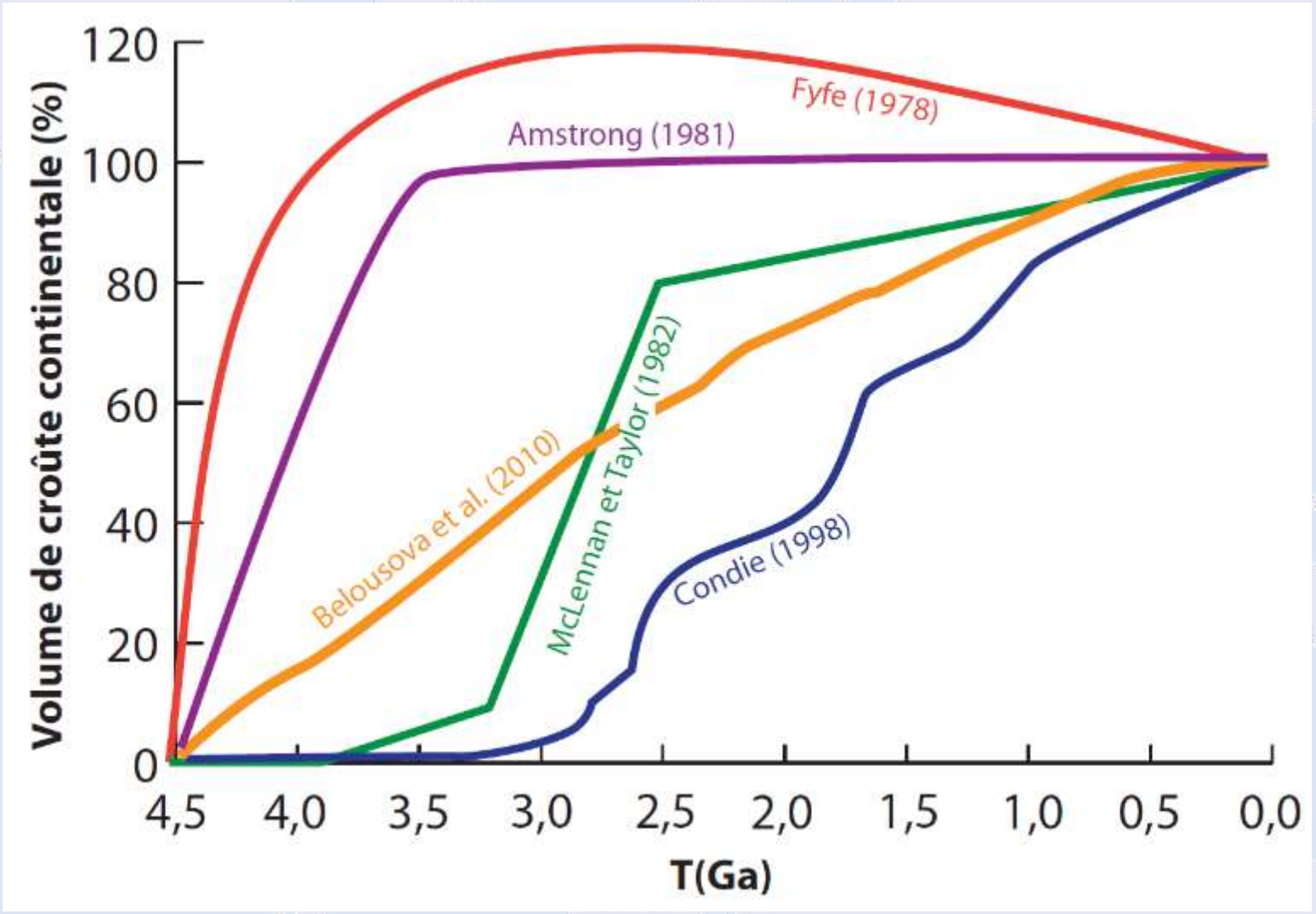
Traçage et datation de la différenciation continentale

Stéphanie Duchene

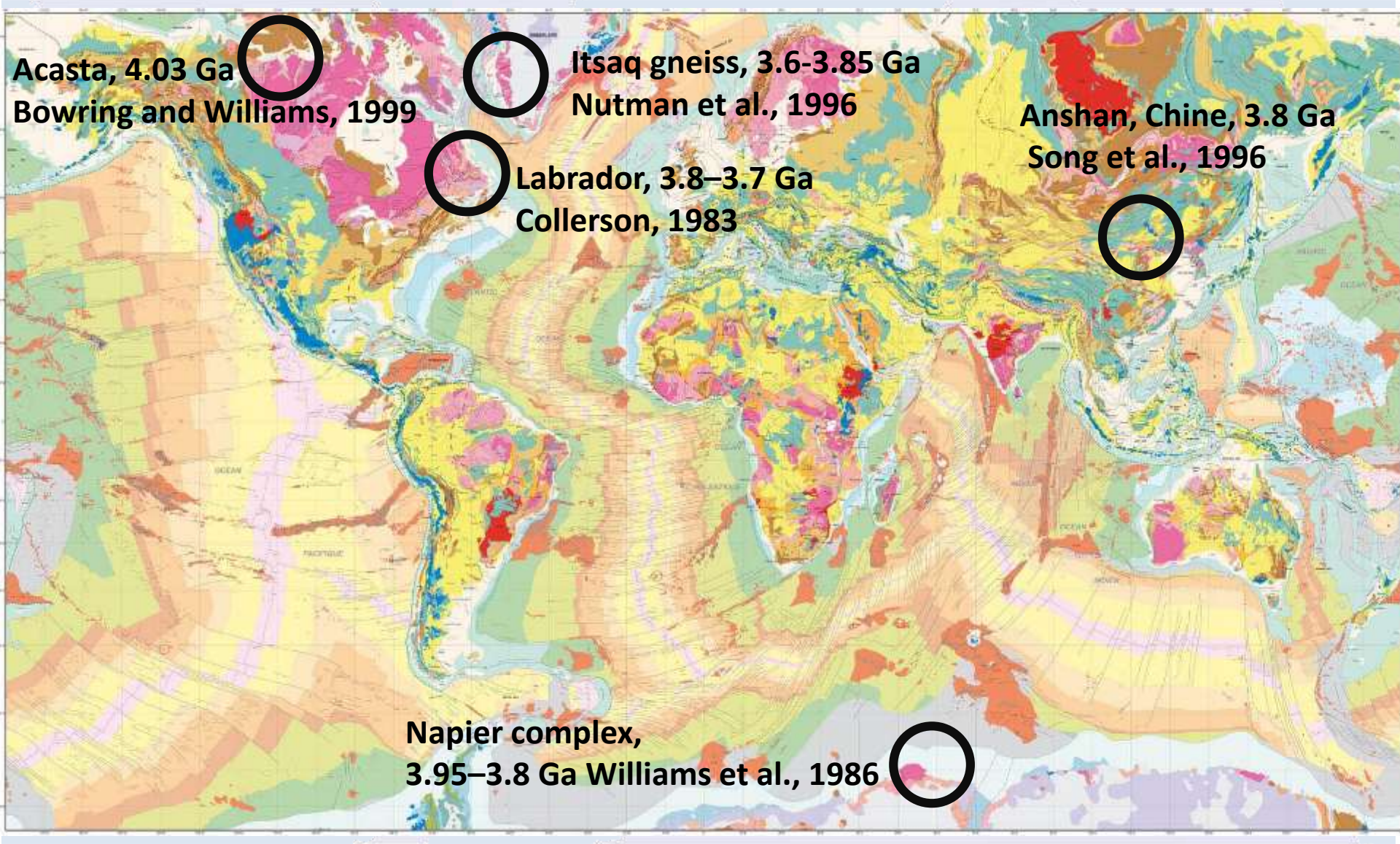
Université Paul Sabatier

Laboratoire Géosciences environnement Toulouse

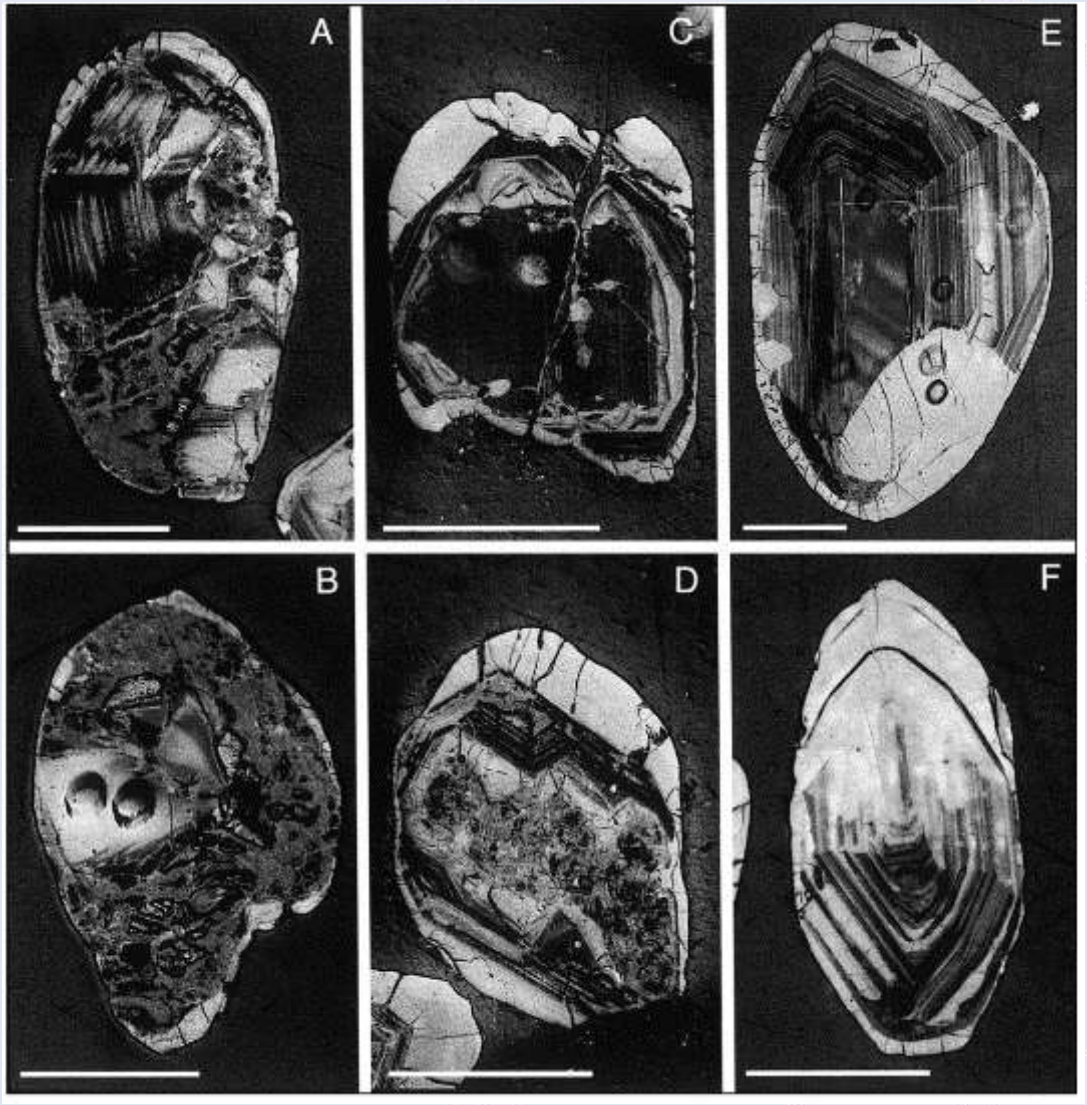
Traçage et datation de la différenciation continentale



Les plus anciens témoins de croûte continentale



Les plus anciens témoins de croûte continentale



Gneiss d'Acasta

Bowring and Williams, 1999

Zircons de granitoïdes (tonalites et granodiorites) métamorphiques

Les plus anciens témoins de croûte continentale

Datations U-Pb

$^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb$ $\lambda = 1.55\times10^{-10}$ an^{-1} (T = 4.47 Ga)

$^{235}U \rightarrow {}^{207}Pb$ $\lambda' = 9.85\times10^{-10}$ an^{-1} (T = 0.704 Ga)

$$^{206}Pb = \left(^{206}Pb\right)_0 + {}^{238}U\left(\exp\left(\lambda t\right) - 1\right)$$

$$^{206}Pb^{*} = {}^{238}U\left(\exp\left(\lambda t\right) - 1\right) \quad (1)$$

Y $$^{206}Pb^{*} / {}^{238}U = \exp\left(\lambda t\right) - 1 \quad (2)$$

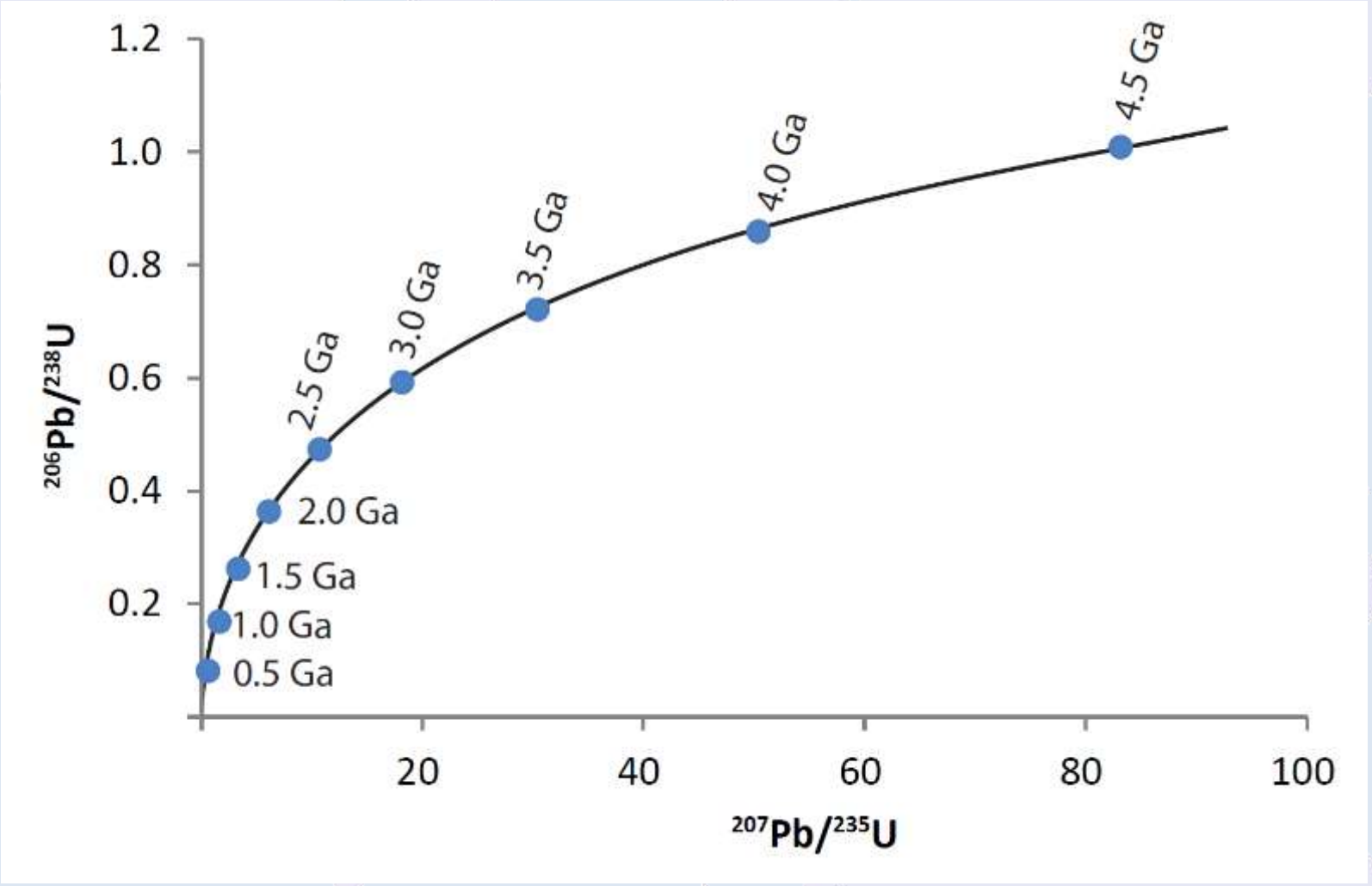
$$^{207}Pb = \left(^{207}Pb\right)_0 + {}^{235}U\left(\exp\left(\lambda' t\right) - 1\right)$$

$$^{207}Pb^{*} = {}^{235}U\left(\exp\left(\lambda' t\right) - 1\right) \quad (1')$$

X $$^{207}Pb^{*} / {}^{235}U = \exp\left(\lambda' t\right) - 1 \quad (2')$$

Courbe concordia

Les plus anciens témoins de croûte continentale



Les plus anciens témoins de croûte continentale

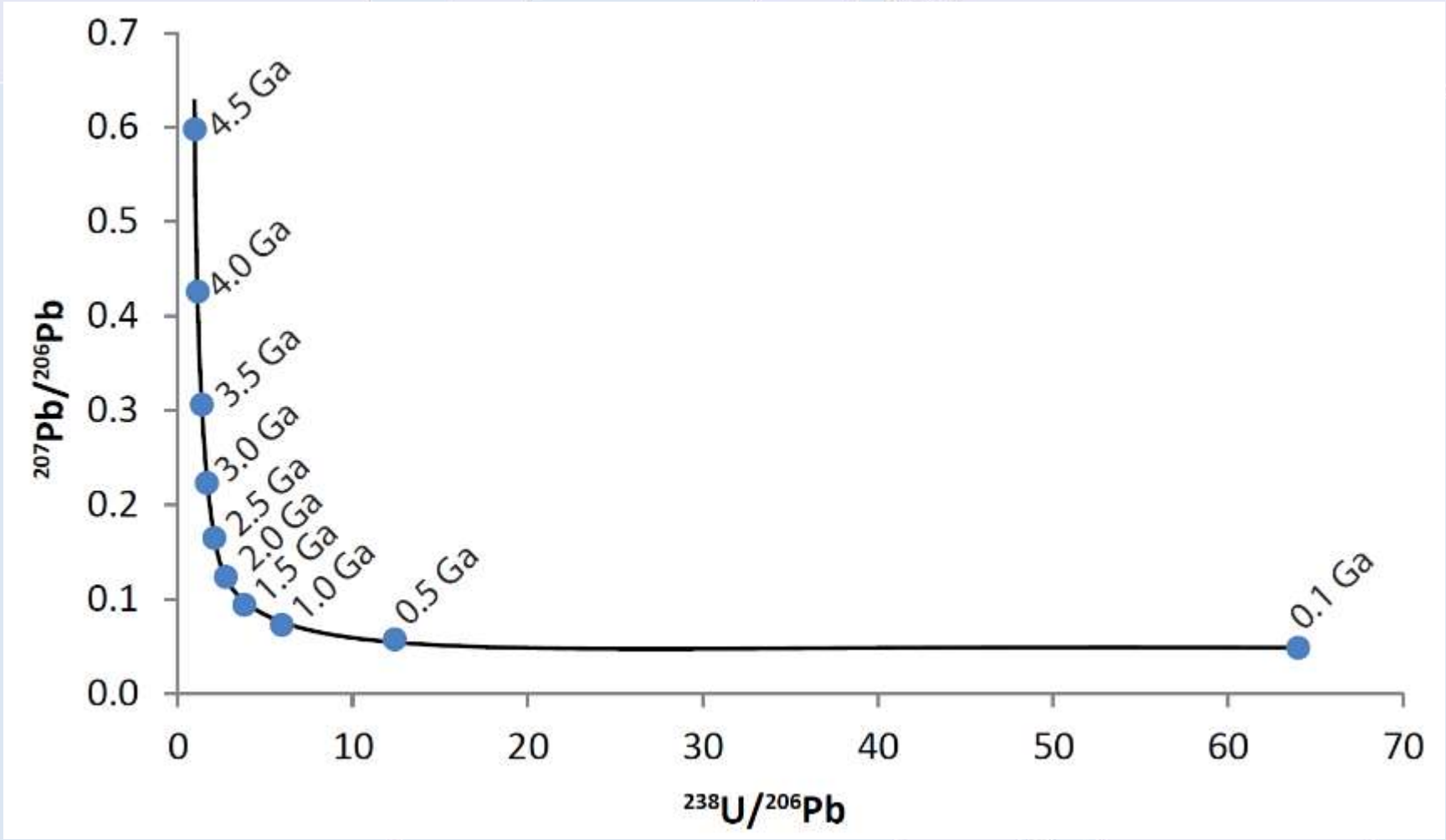
$$^{207}Pb^{*} / ^{206}Pb^{*} = \frac{^{235}U \times (\exp(\lambda' t) - 1)}{^{238}U \times (\exp(\lambda t) - 1)} \qquad \frac{(1')}{(1)}$$

$$^{235}U / ^{238}U = 137.88$$

Y $$^{207}Pb^{*} / ^{206}Pb^{*} = \frac{1}{137.88} \frac{\exp(\lambda' t) - 1}{\exp(\lambda t) - 1} \qquad (3)$$

X $$^{238}U / ^{206}Pb^{*} = 1/(\exp(\lambda t) - 1) \qquad \frac{1}{(2)}$$ **Concordia inverse**

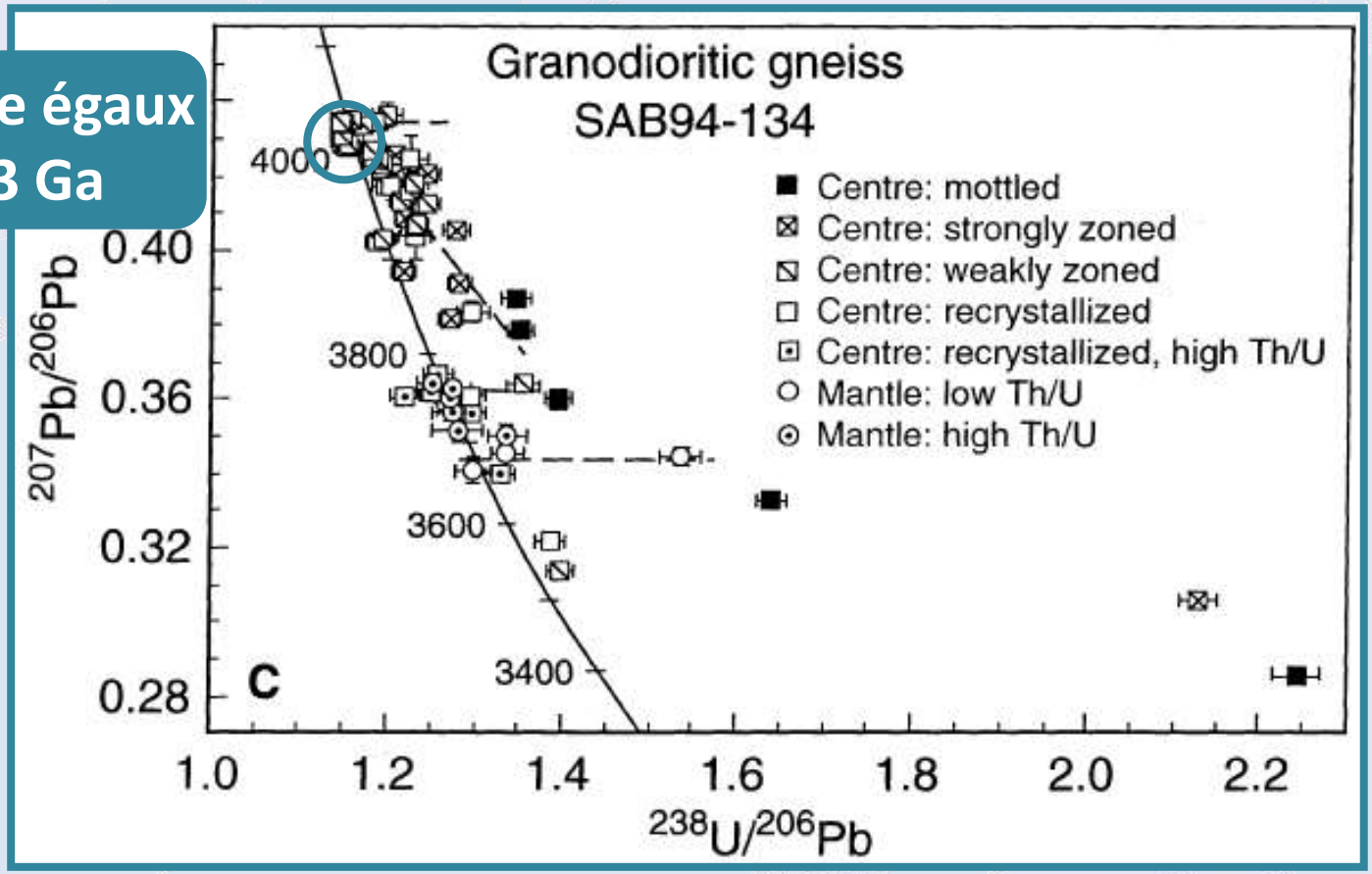
Les plus anciens témoins de croûte continentale



Les plus anciens témoins de croûte continentale

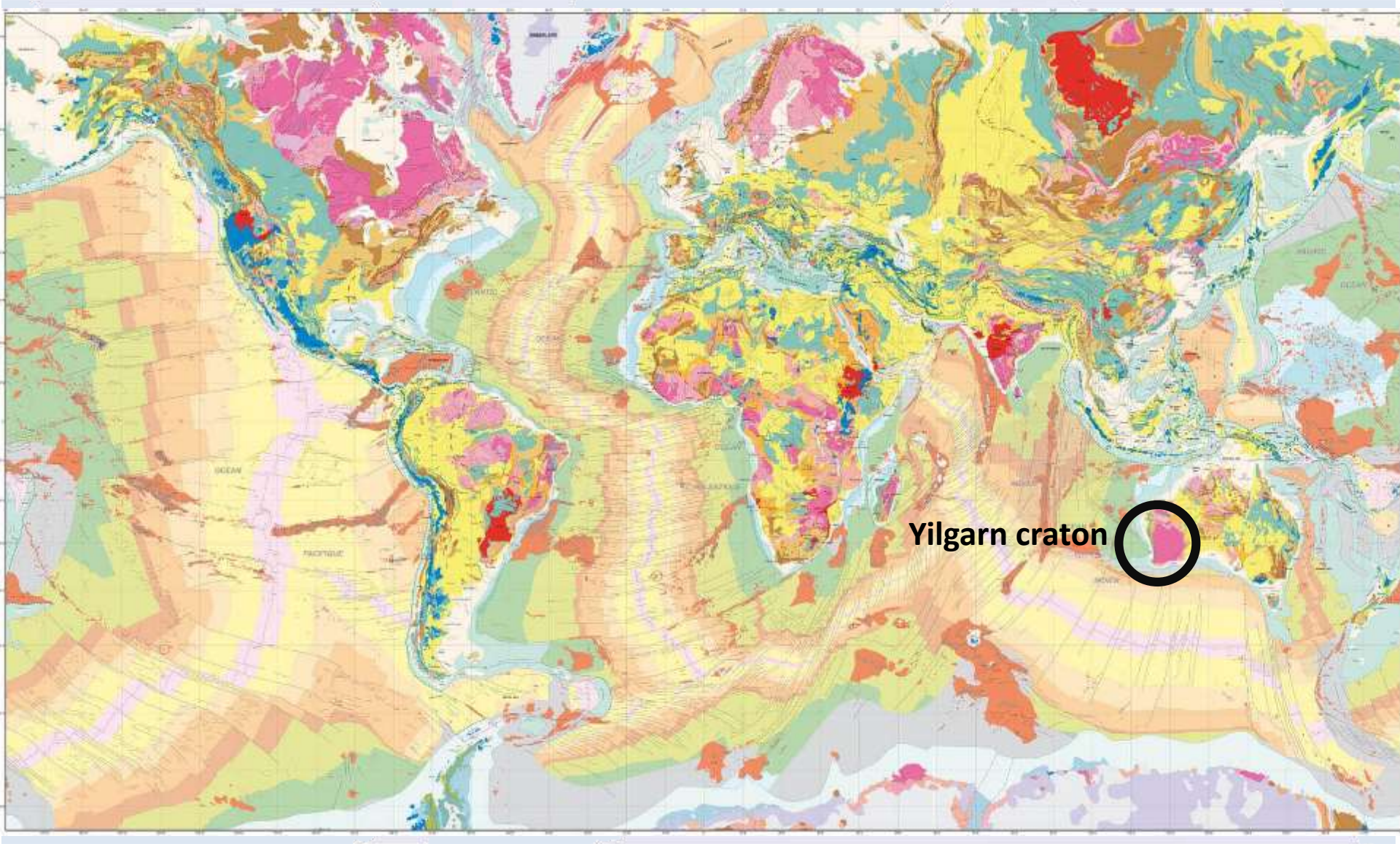
Concordia inverse . Zircons des gneiss d'Acasta

8 grains d'âge égaux
4.031 ± 0.003 Ga



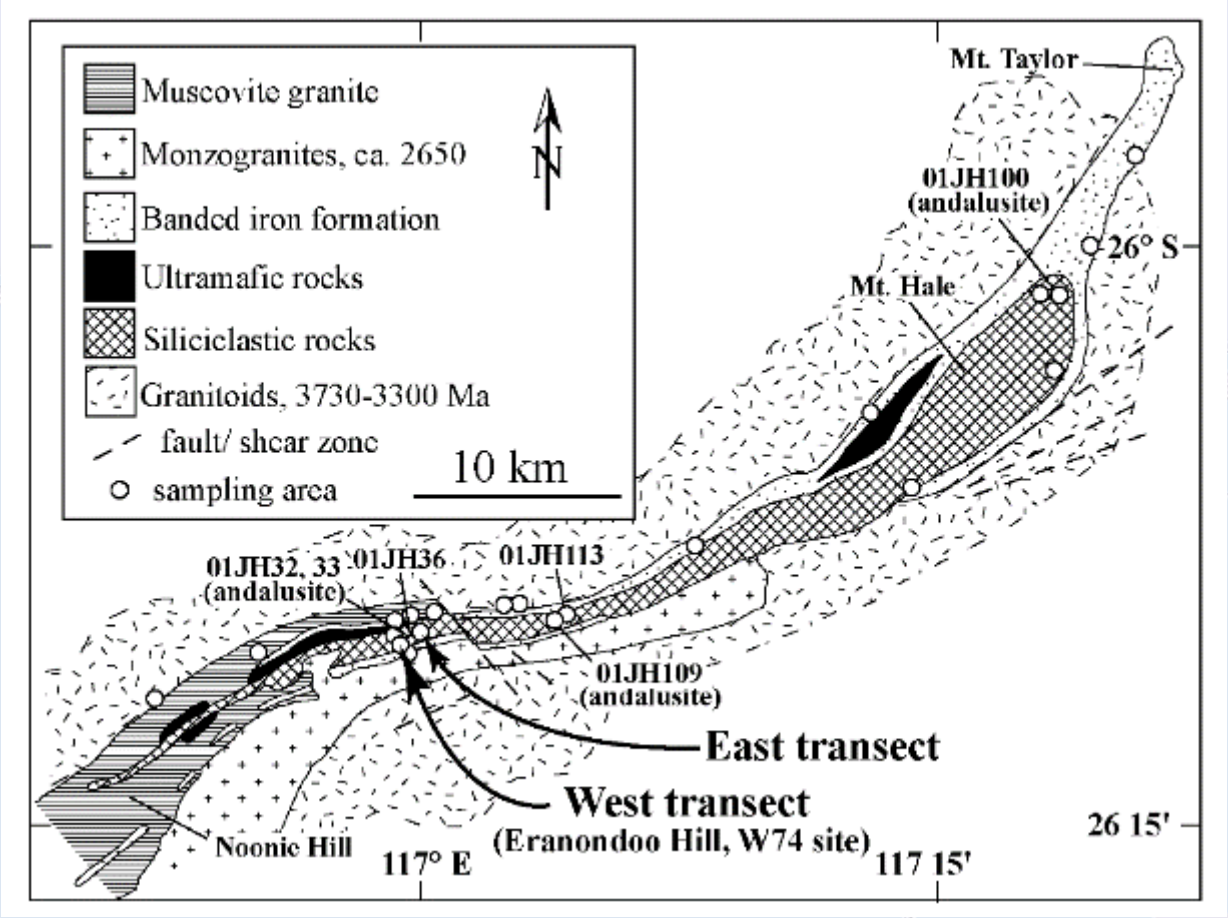
Bowring and Williams, 1999

Les plus anciens témoins de croûte continentale



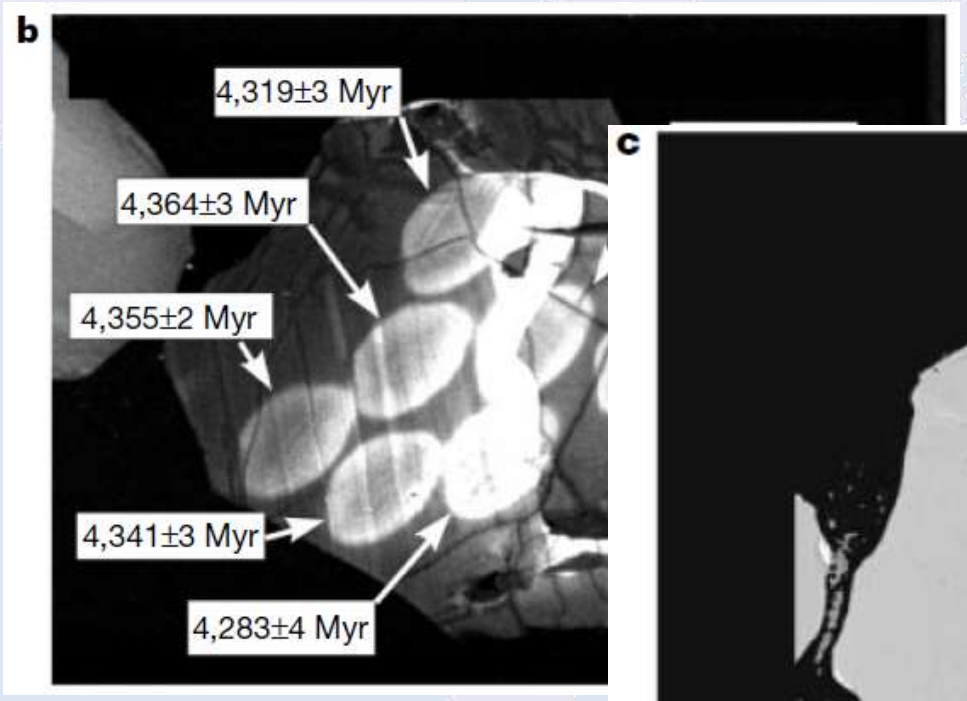
Les plus anciens témoins de croûte continentale

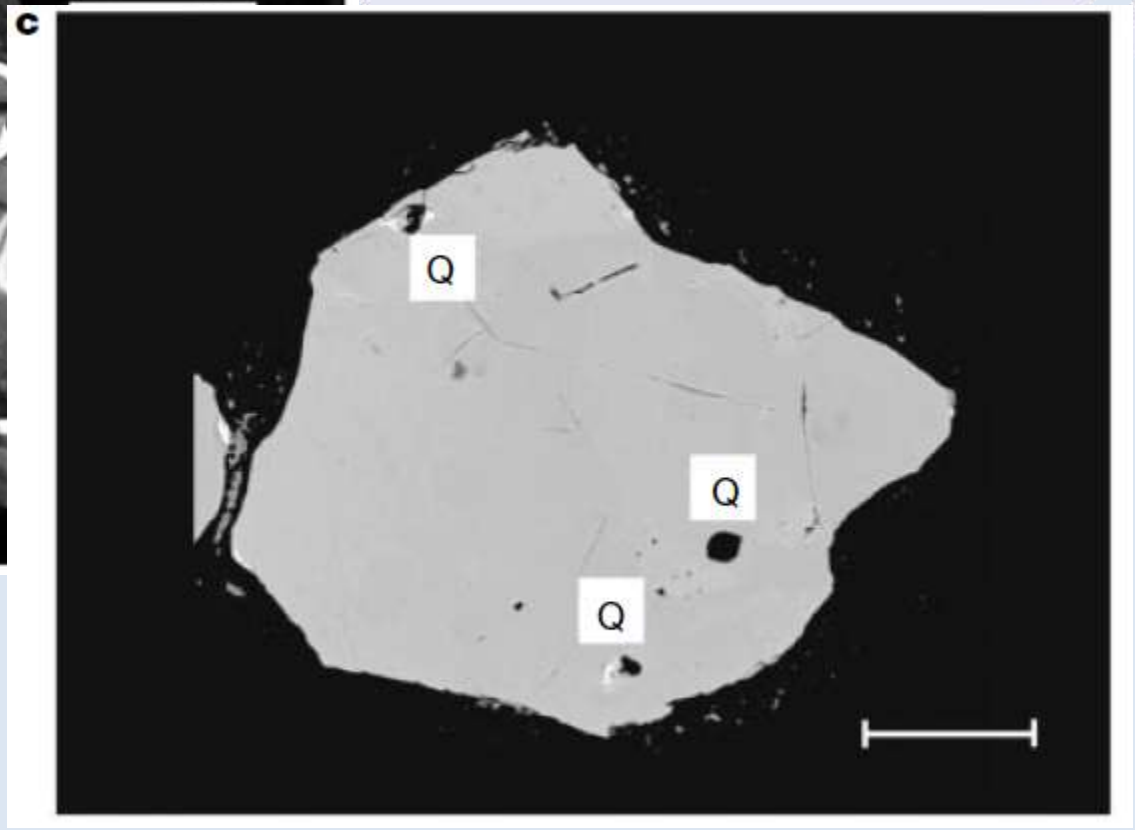
Les zircons de Jack Hill



Cavosie et al., 2004

Les plus anciens témoins de croûte continentale





Wilde et al., 2001

Les plus anciens témoins de croûte continentale

Concordia. Zircons des sédiments de Jack Hills

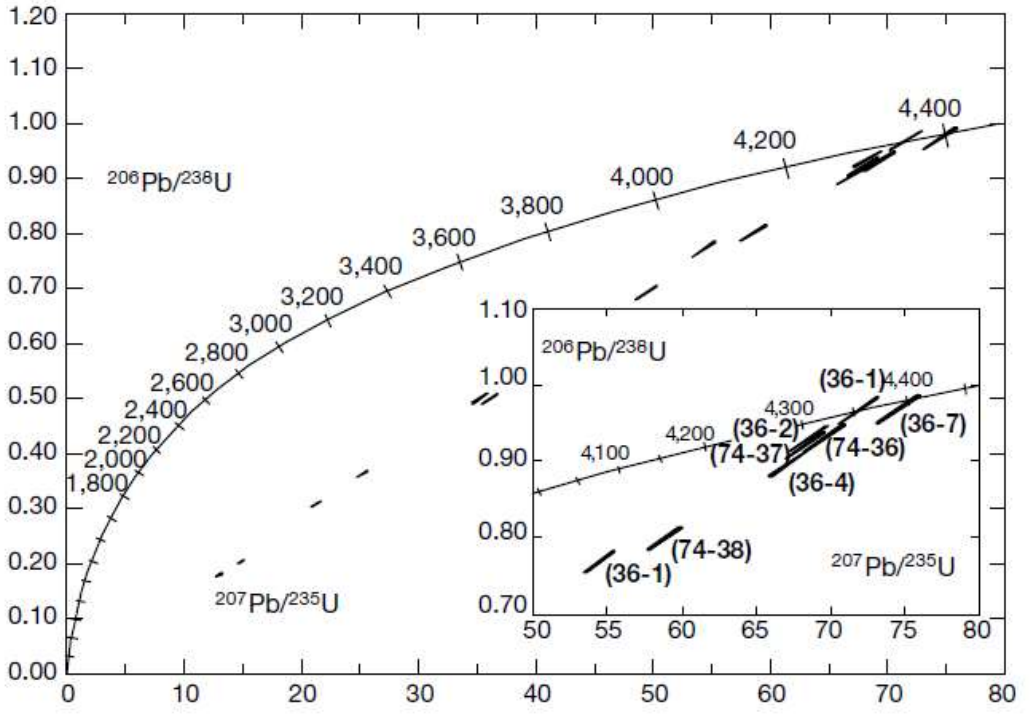


Figure 2 Combined concordia plot for grain W74/2-36, showing the U-Pb results obtained during the two analytical sessions. The inset shows the most concordant data points together with their analysis number (as in Table 1). Error boxes are shown at 1σ.

	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb$ age (Myr)
36-1	0.5401 ± 8	4,355 ± 2
36-2	0.5353 ± 10	4,341 ± 3
36-3	0.5143 ± 12	4,283 ± 4
36-4	0.5436 ± 10	4,364 ± 3
36-5	0.5163 ± 13	4,288 ± 4
36-6	0.5147 ± 11	4,284 ± 3
36-7	0.5587 ± 14	4,404 ± 4
36-8	0.5272 ± 9	4,319 ± 3

(3)

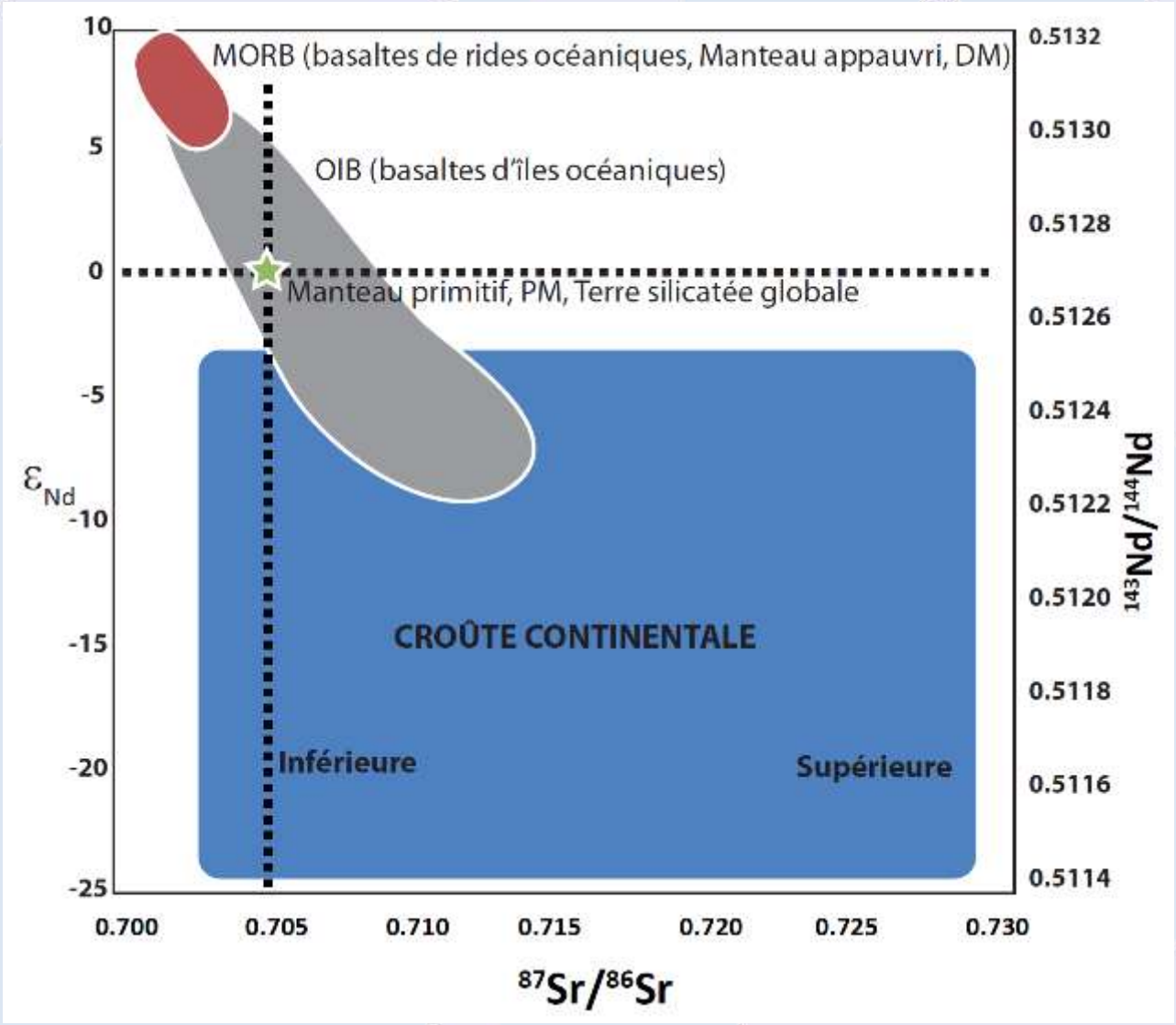
$$^{207}Pb^{*}/^{206}Pb^{*} = \frac{1}{137.88}\,\frac{\exp(\lambda' t)-1}{\exp(\lambda t)-1}$$

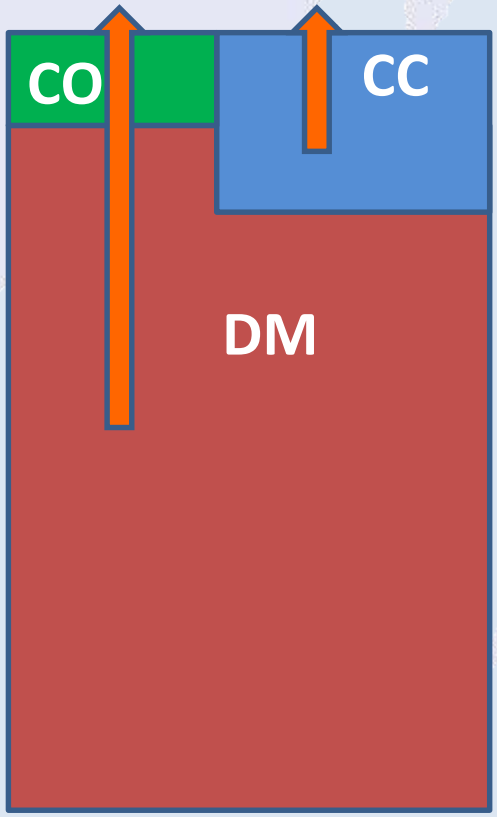
Les plus anciens témoins de croûte continentale

Conclusions partielles

- Les roches continentales les plus anciennes connues sur Terre à ce jour sont les gneiss d'Acasta (Canada). Ils sont vieux de 4.03 Ga.
- Les minéraux les plus anciens, témoins de la présence de croûte continentale, connus sur Terre à ce jour, sont les zircons de Jack Hills (Australie). Ils sont vieux de 4.2 à 4.4 Ga.
- La croûte continentale a donc commencé à se former moins de 200 Ma après la formation de la Terre.

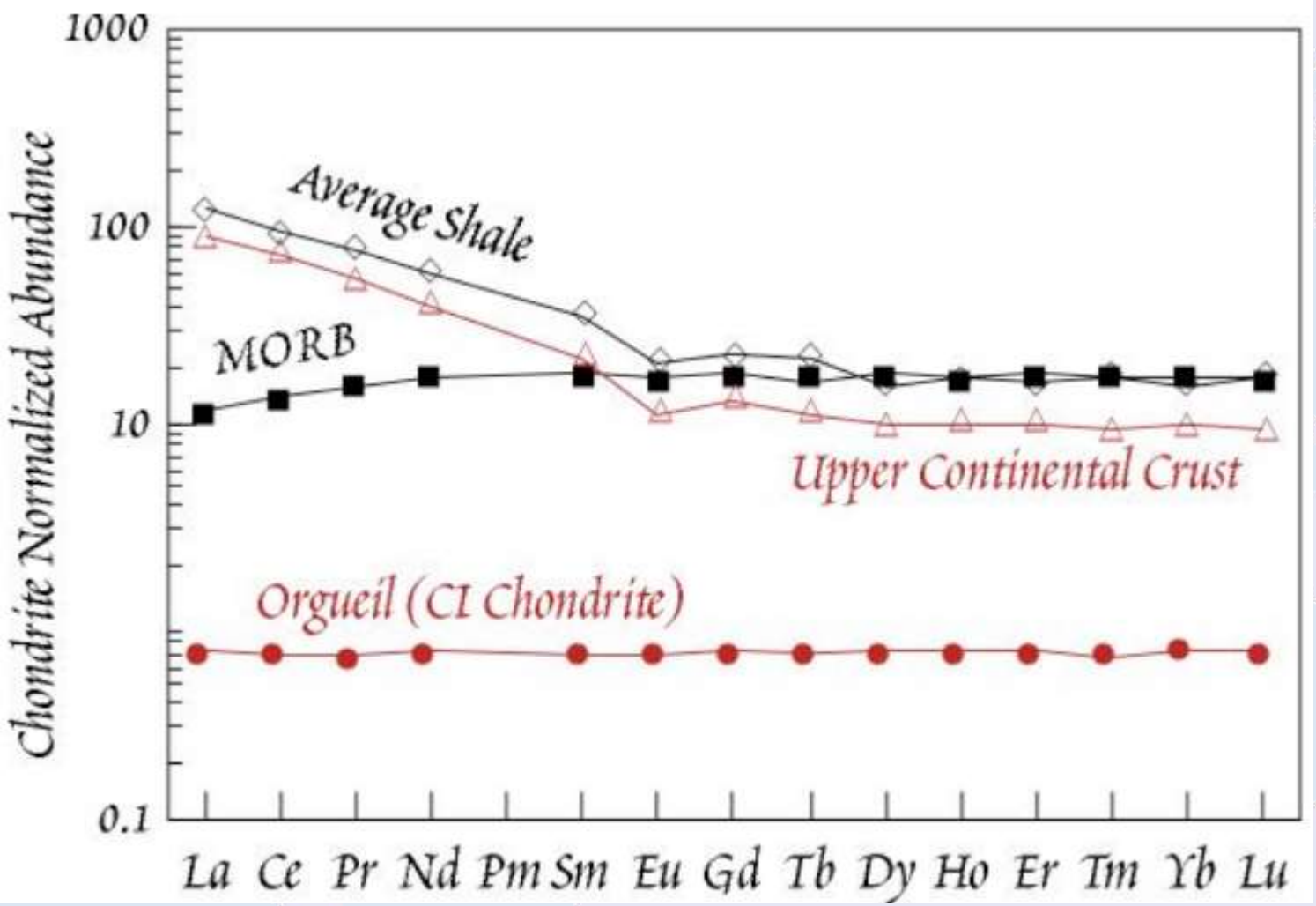
Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes





Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes

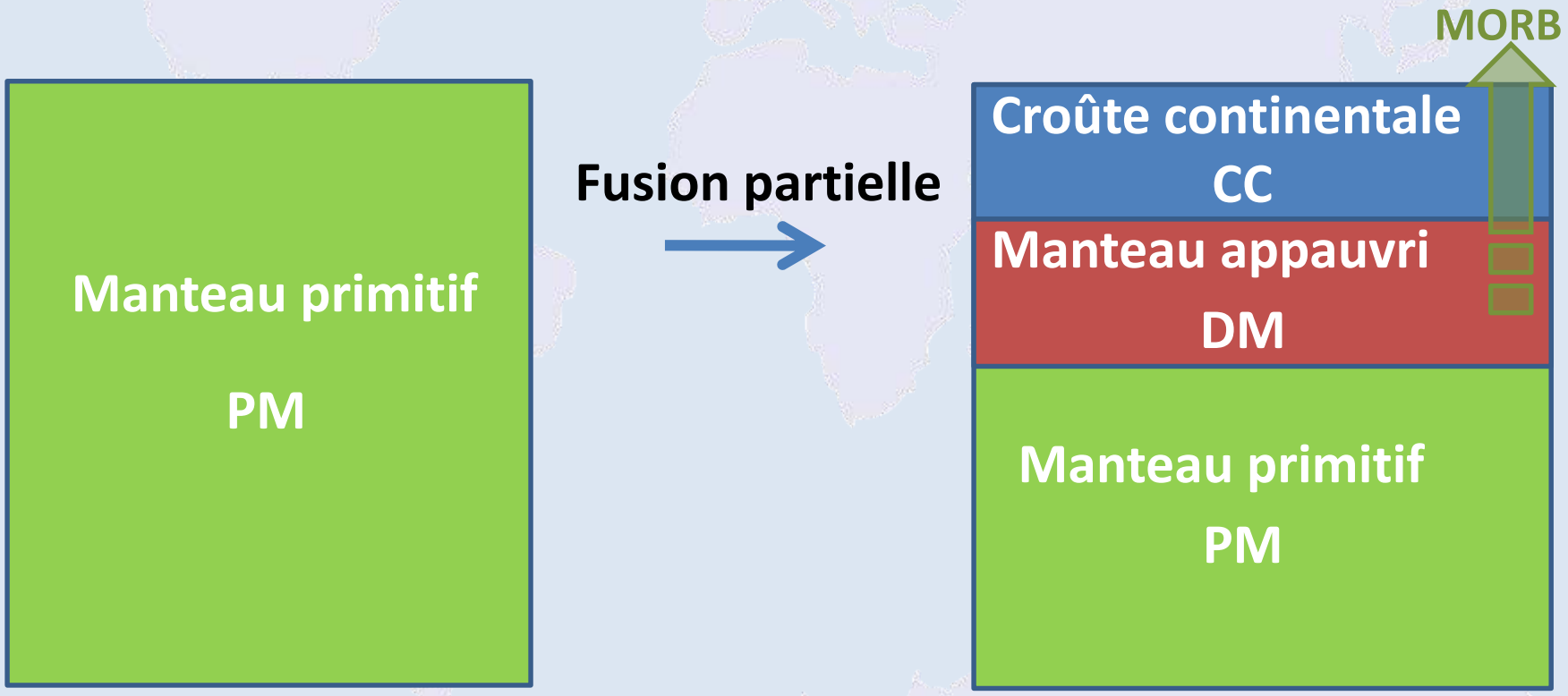
Spectres de Terres Rares des croûtes continentale et océanique



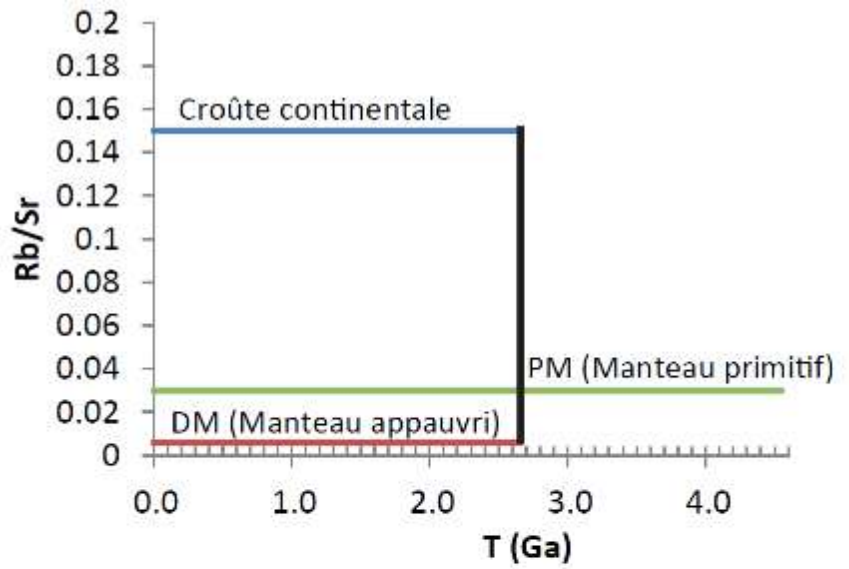
D'après Rudnick et Fountain (1995) in White et al. (2001)

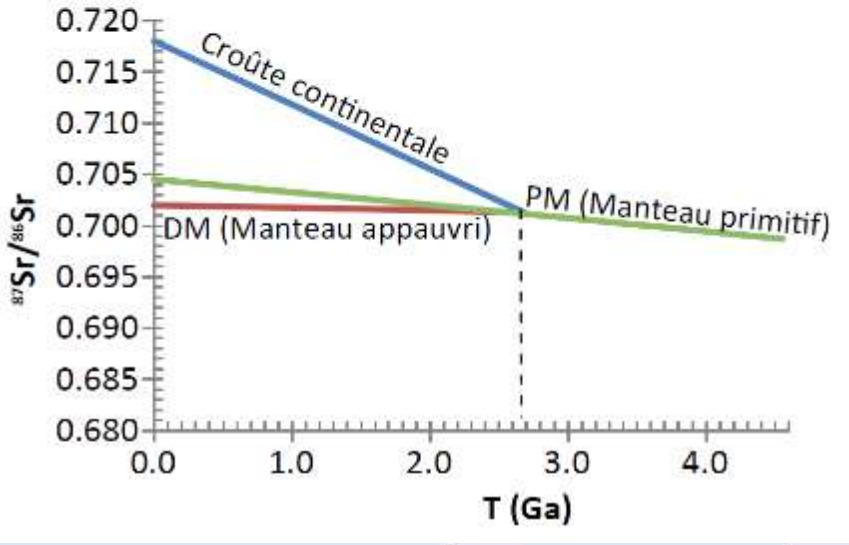
Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes

Le manteau source des MORB est le réservoir complémentaire de la croûte continentale, il est appauvri en éléments incompatibles (DM - Depleted Mantle).



Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes





Courbes d'évolution du Sr

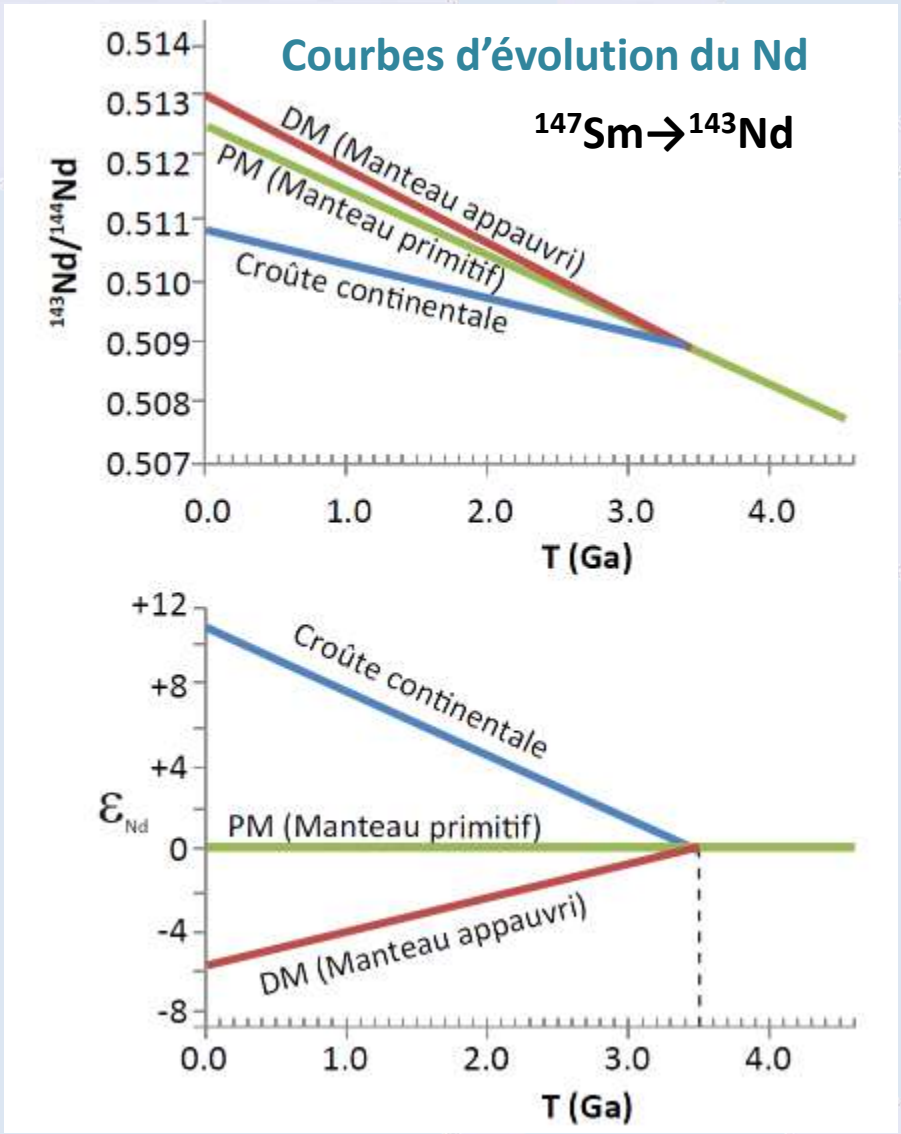
$^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr$

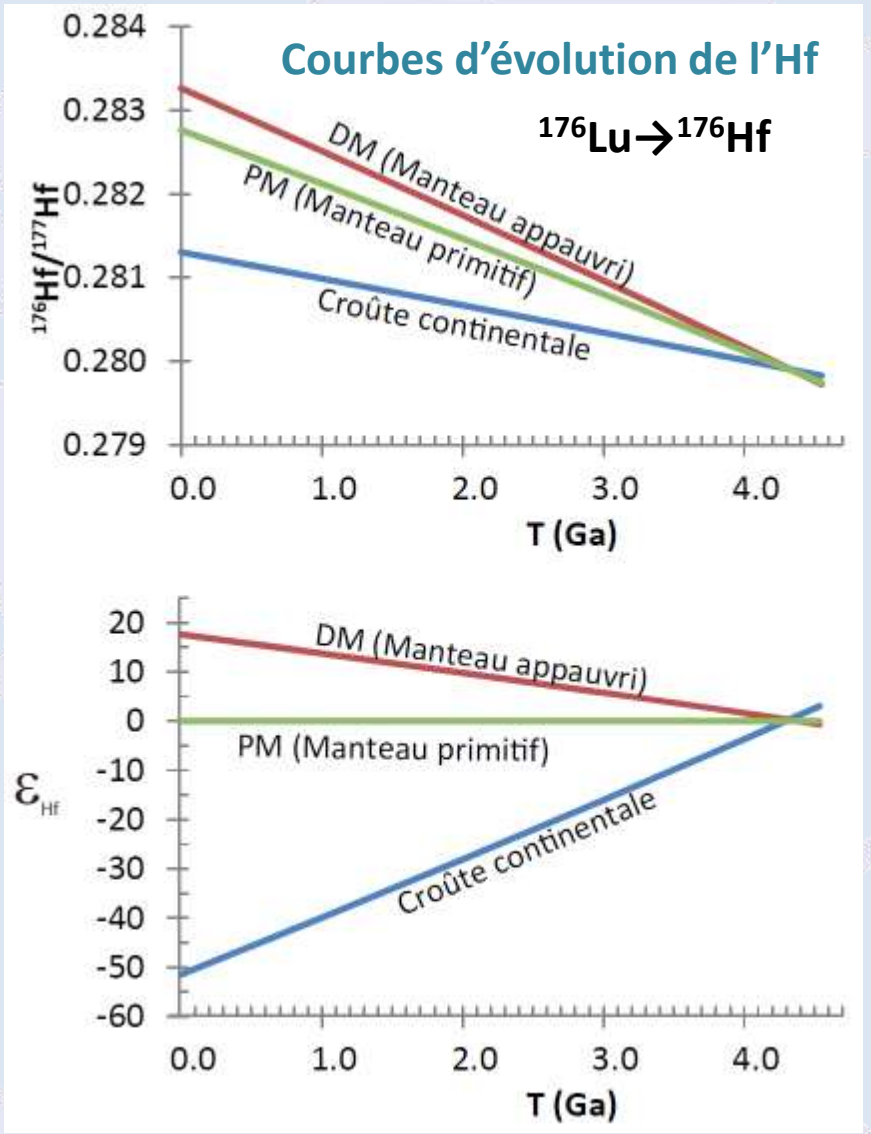
$\lambda = 1.42 \times 10^{-11}\ an^{-1}$

T = 50 Ma

	Rb/Sr	$^{87}Sr/^{86}Sr$
Croûte continentale	0.15	0.718
Manteau appauvri (DM)	0.006	0.702
Manteau primitif (PM)	0.03	0.745

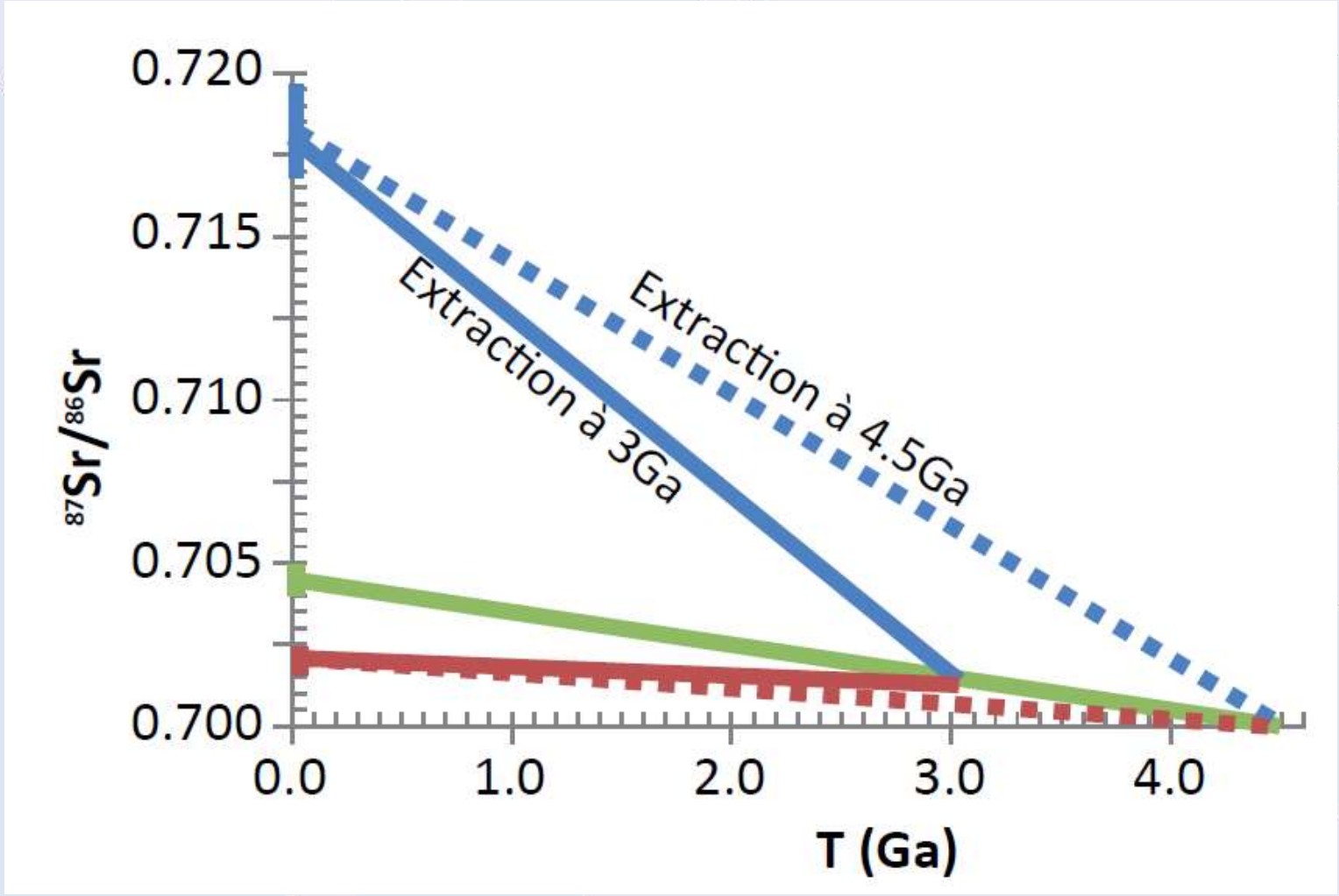
Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes





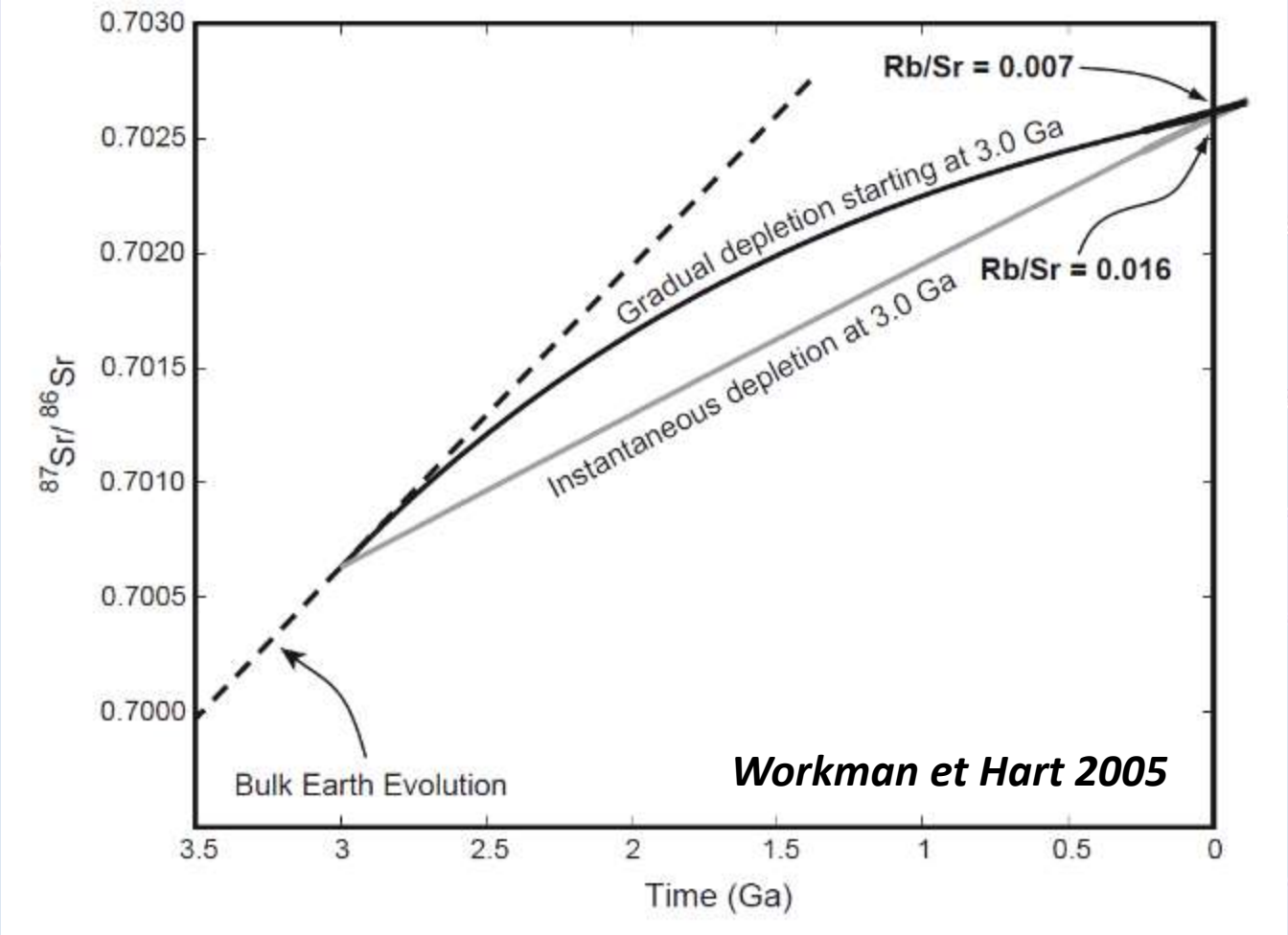
Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes

Modèles d'extraction précoce ou tardive



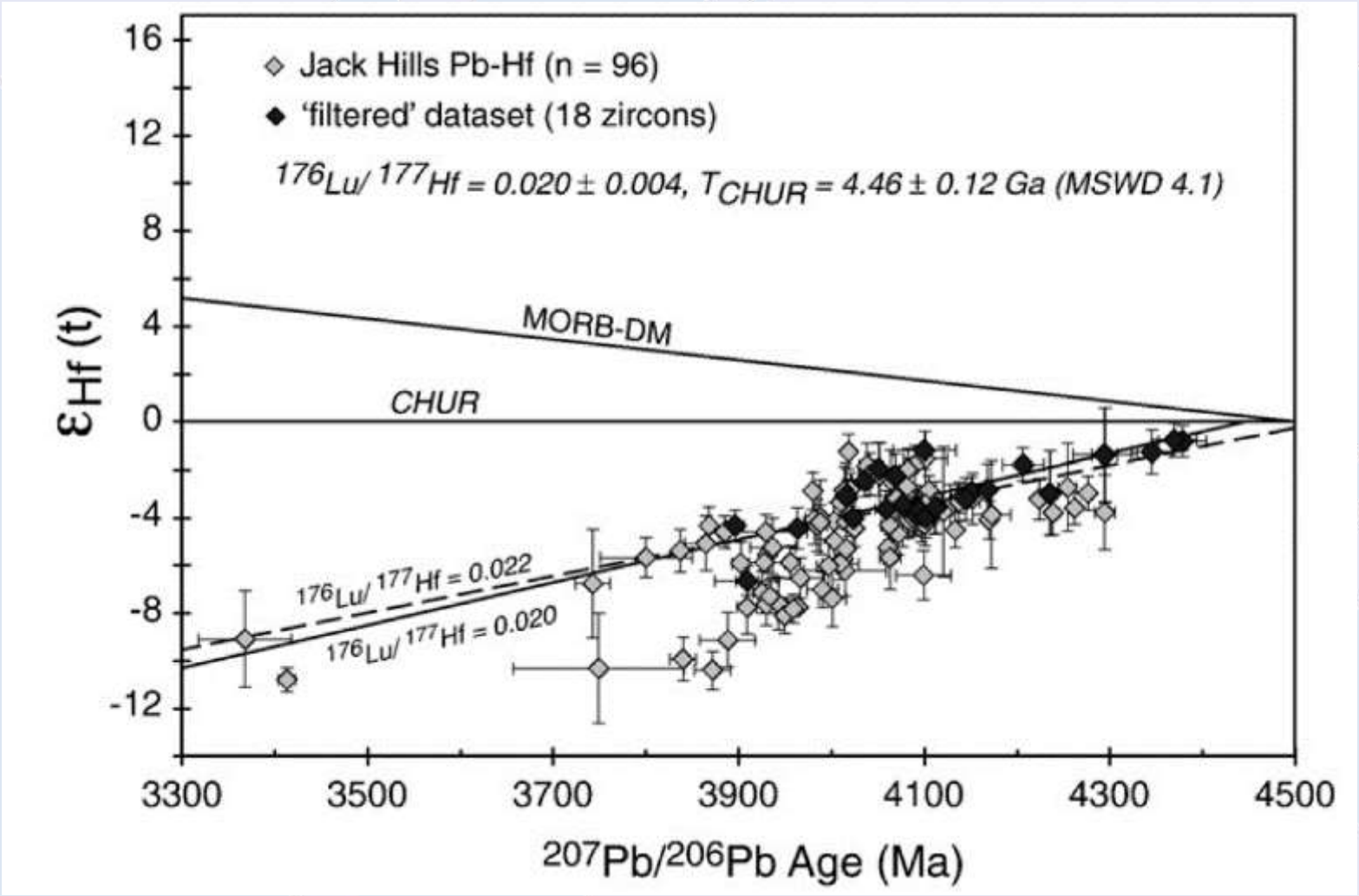
Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes

Modèles d'extraction continue ou instantané



Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes

Origine continentale des zircons de Jack Hills



Kemp et al., 2010

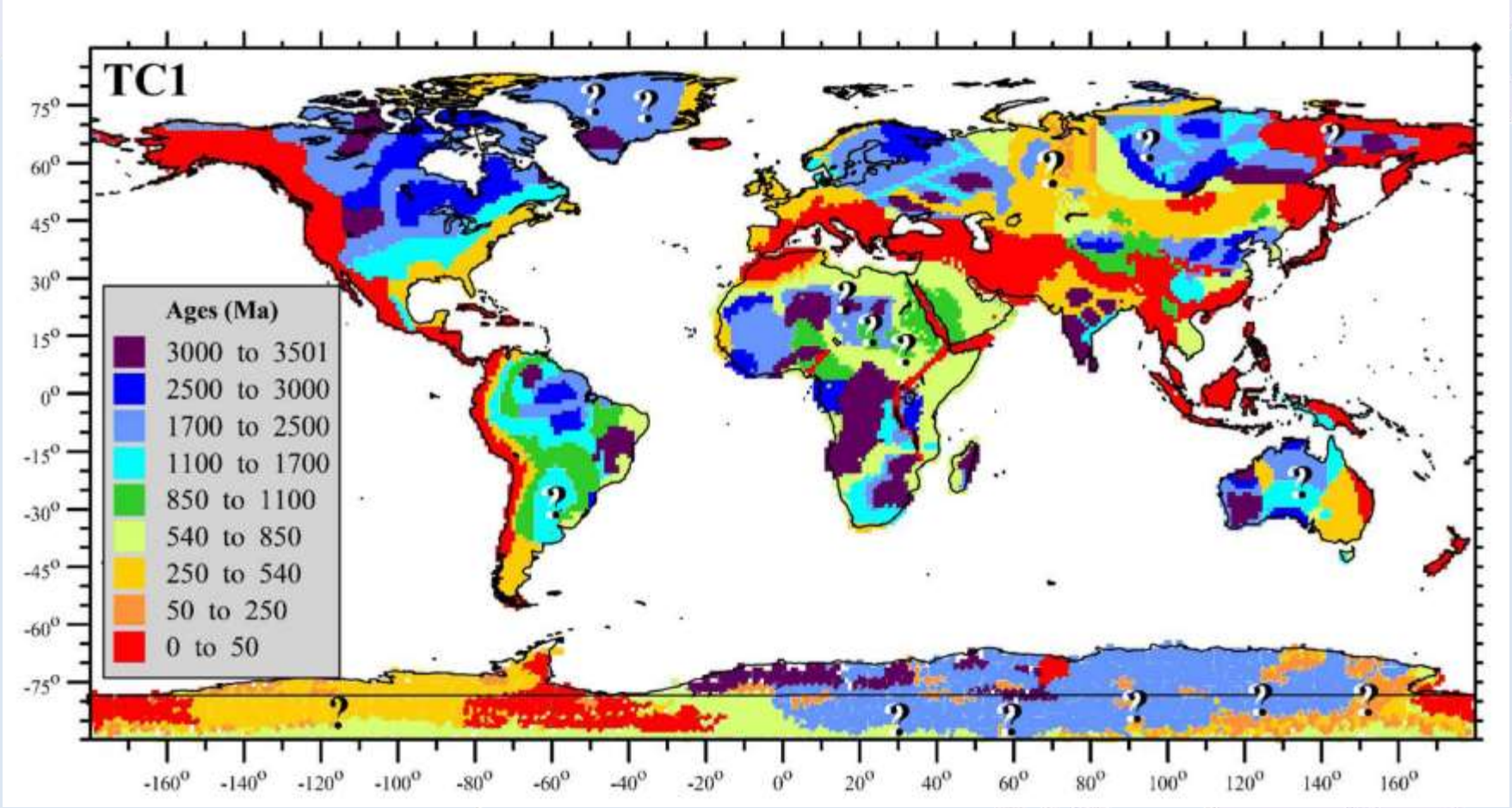
Suivre l'extraction de la croûte grâce aux isotopes

Conclusions partielles

- Différents modèles de croissance (continue, épisodique) peuvent être évoqués pour expliquer les compositions isotopiques actuelles de la croûte et du manteau appauvri source des MORB.
- Un réservoir crustal caractérisé par des εHf et εNd négatifs,et un réservoir mantellique appauvri caractérisé par des εHf et εNd positifs, existent depuis le début de l'histoire de la Terre, témoignant de la présence d'une croûte en quantité significative.
- L'abondance de zircons à εHf <0 depuis la naissance de la Terre montre qu'ils sont eux même formés à partir de la fusion de croûte continentale: c'est le recyclage

L'âge de la croûte et les modèles de croissance

L'âge tectonique de la croûte dans le monde



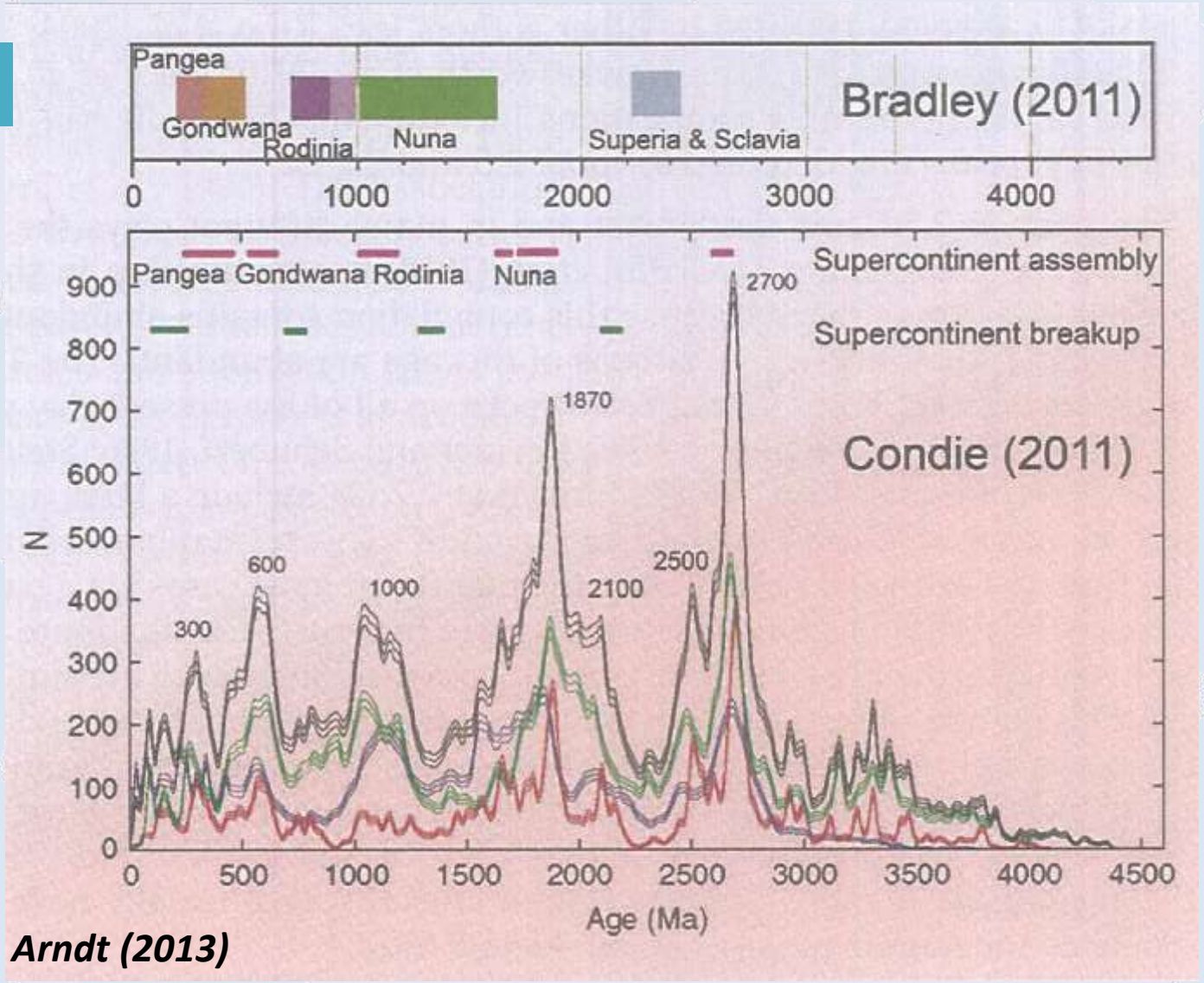
Artemieva et al., 2006

L'âge de la croûte et les modèles de croissance

Ages des zircons

Granitoïdes

Zircons détritiques

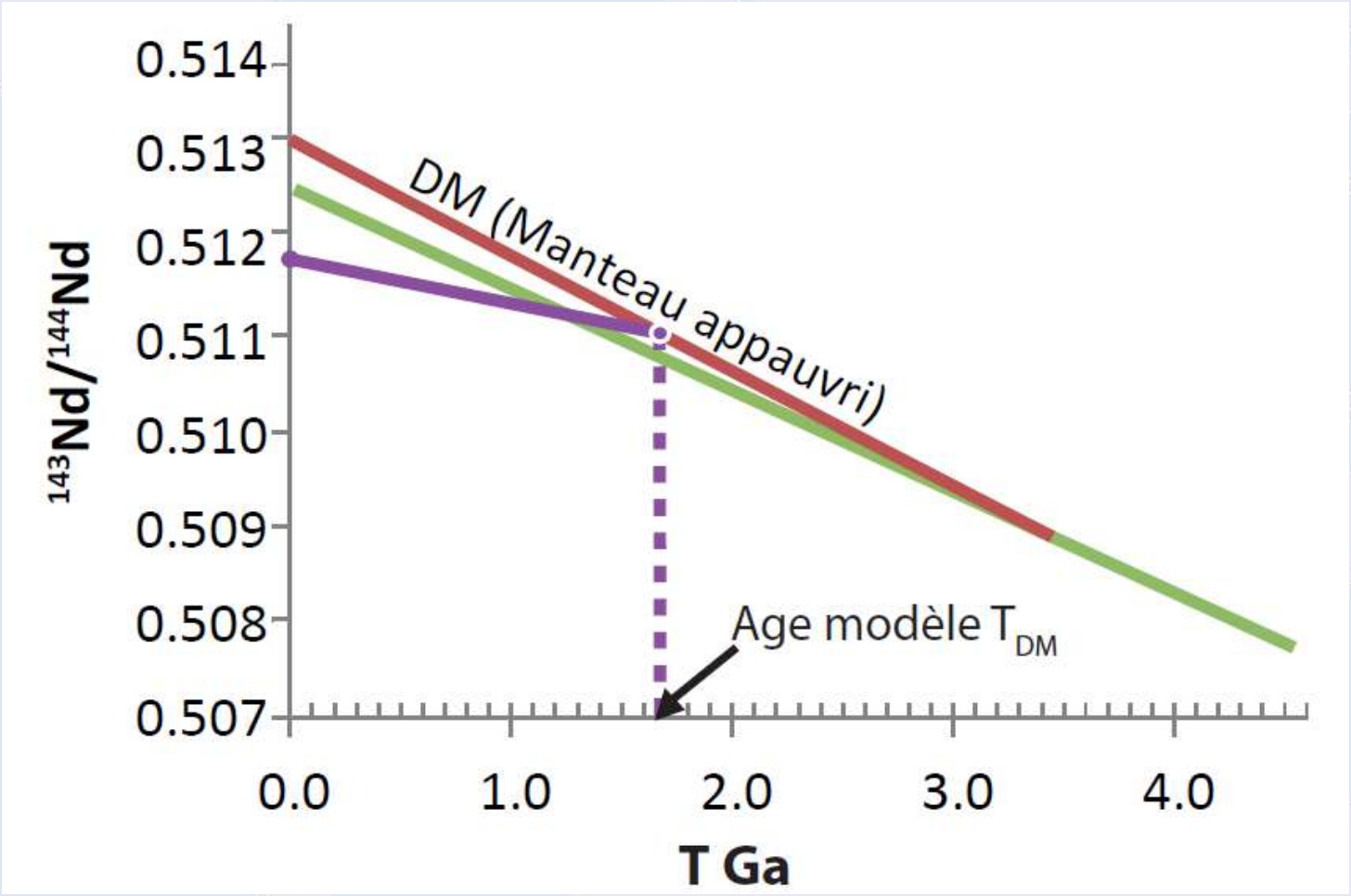


Arndt (2013)

L'âge de la croûte et les modèles de croissance

Ages modèles

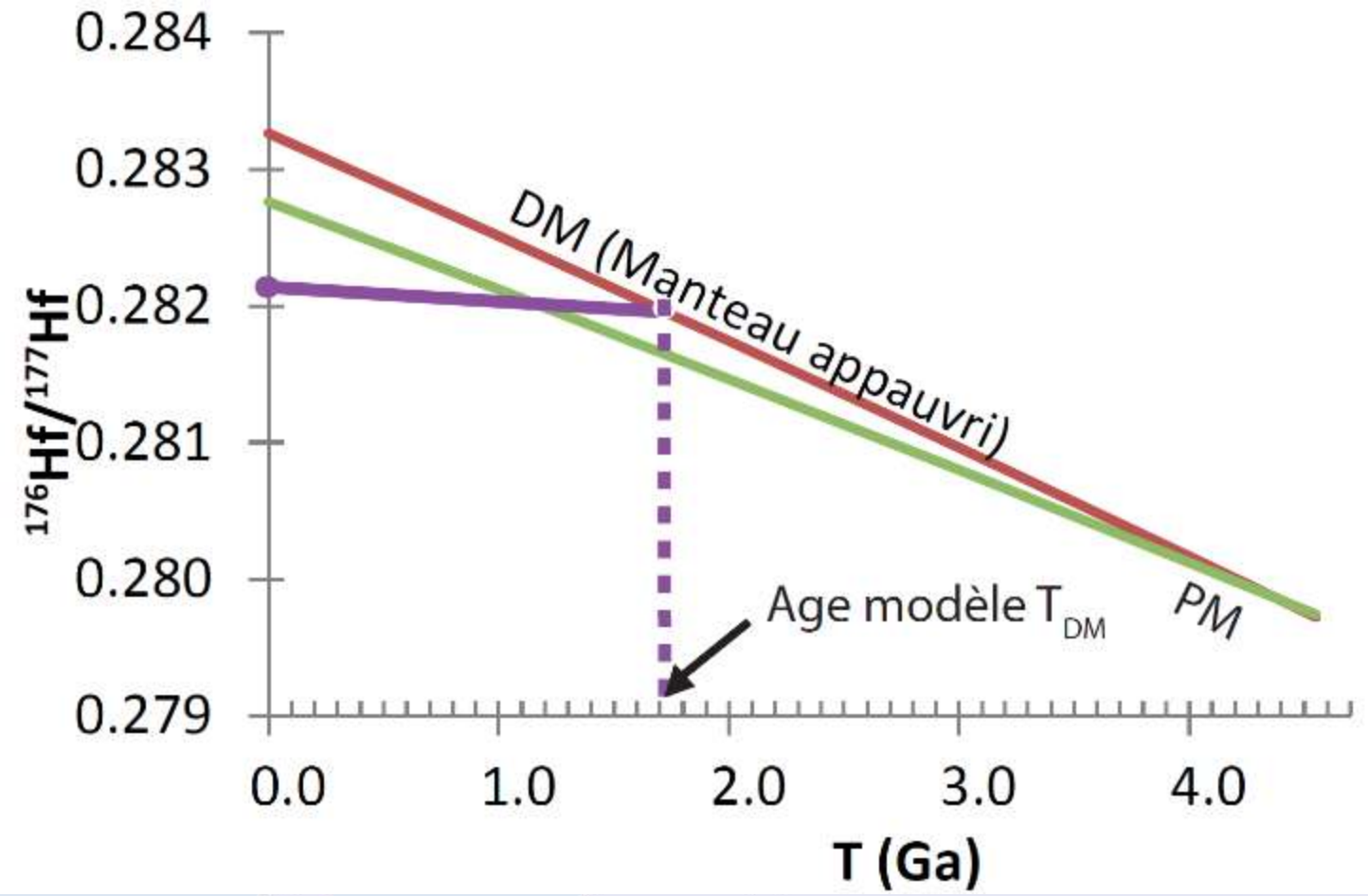
T_{DM} Nd (Généralement sur roches totales)



L'âge de la croûte et les modèles de croissance

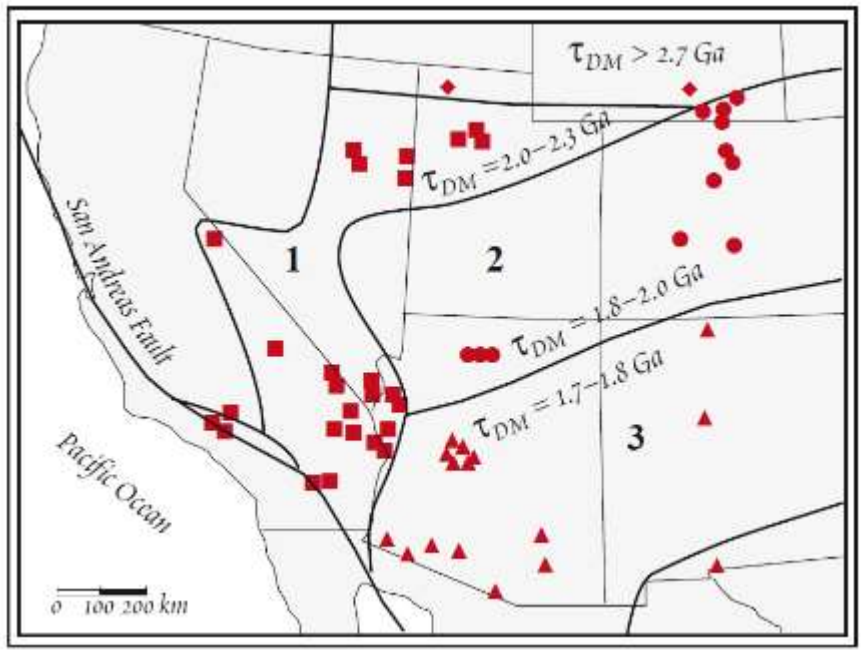
Ages modèles

T_{DM} Hf (Généralement sur zircons)



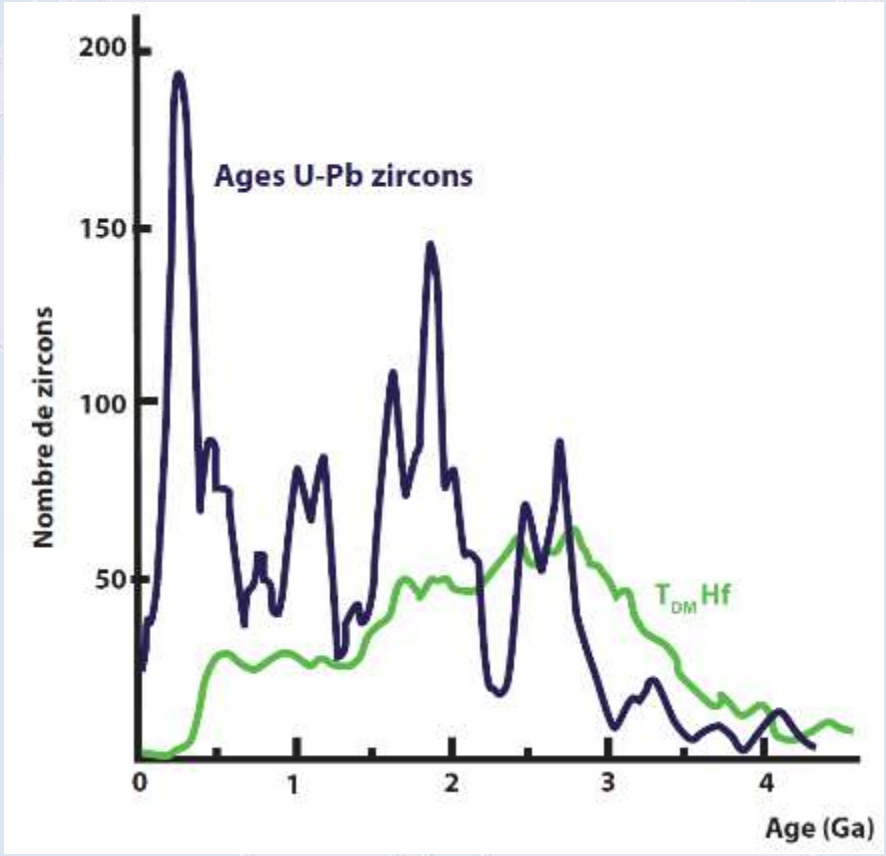
L'âge de la croûte et les modèles de croissance

T_{DM}(Nd) sur la province Nord-Américaine



d'après Bennet et dePaolo (1987) in White (2001)

Données d'âges U-Pb et de T_{DM}(Hf) sur plus de 13,800 zircons

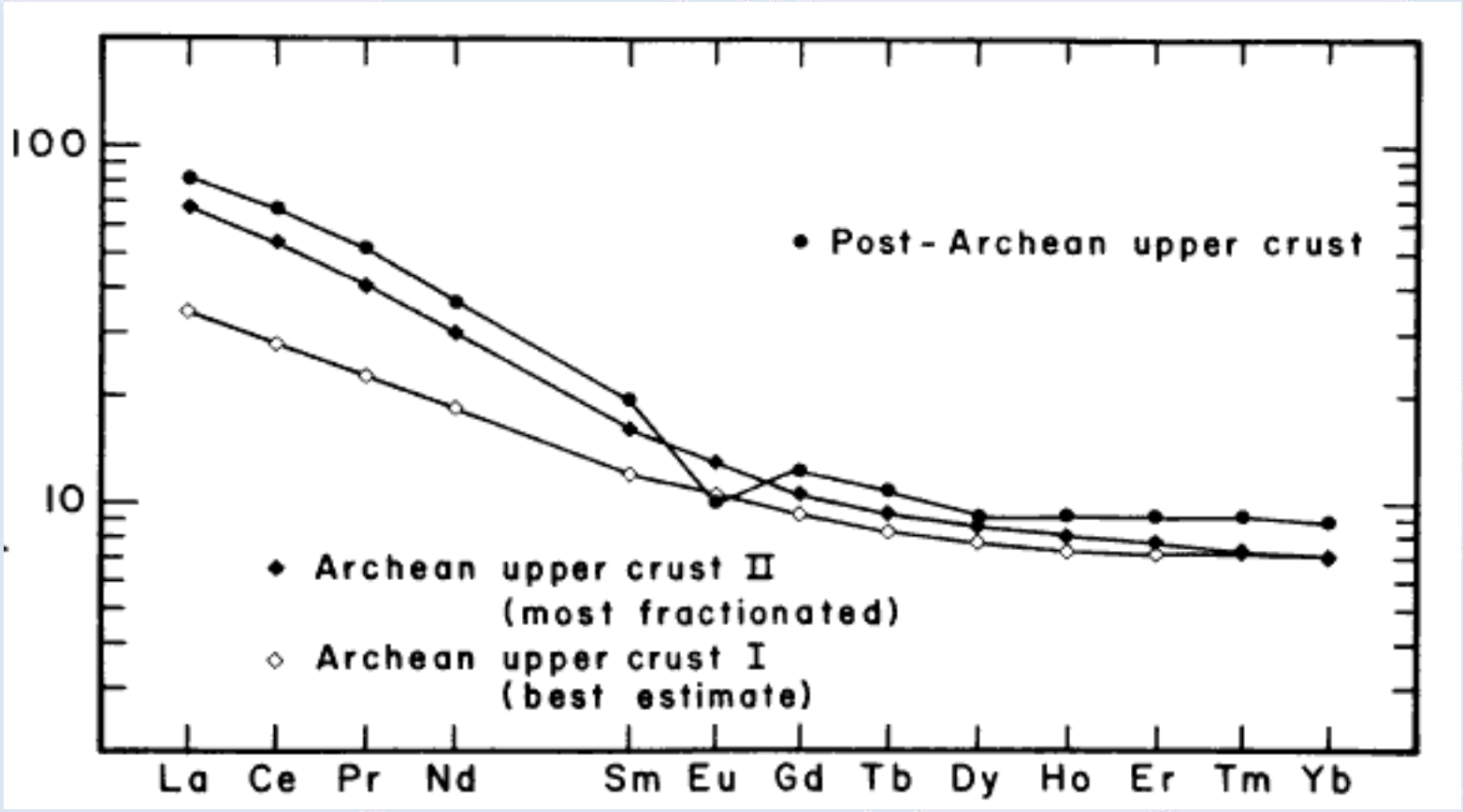


D'après Belousova et al. (2010)

L'âge de la croûte et les modèles de croissance

La géochimie des éléments traces

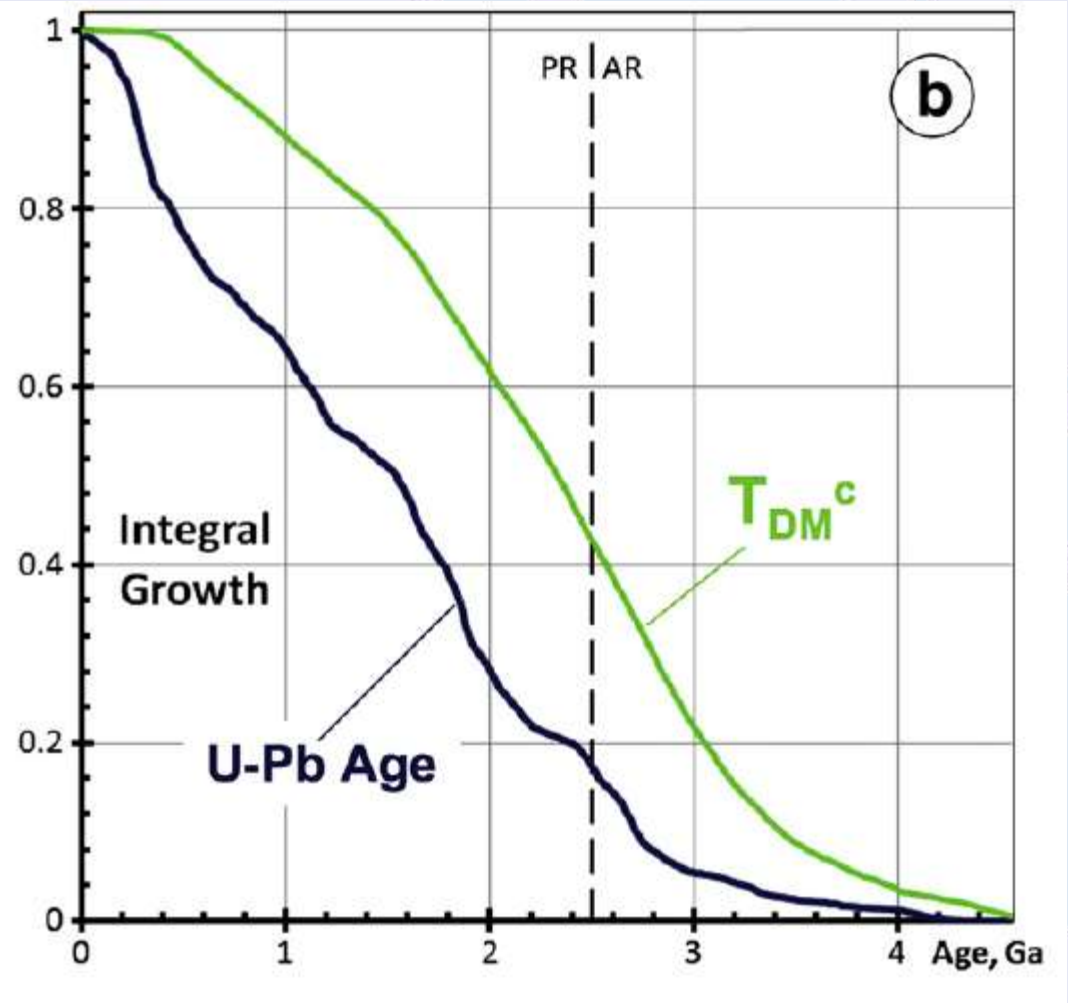
Evolution de la composition en REE de la croûte supérieure



McLennan et Taylor (1982)

L'âge de la croûte et les modèles de croissance

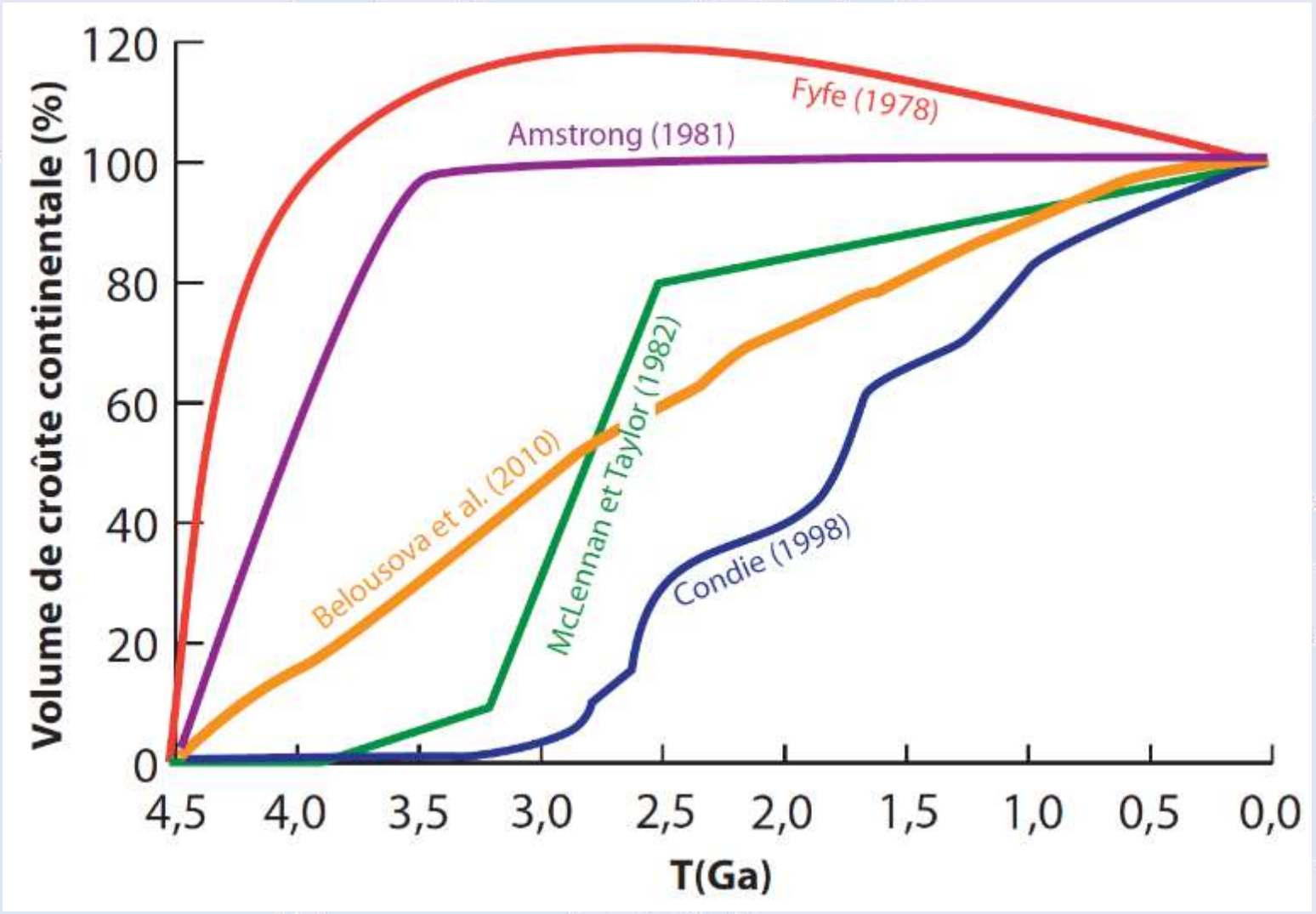
Courbes de croissance



Courbes de croissance obtenues à partir de l'intégration des âges U-Pb et de T_{DM}(Hf) sur plus de 13,800 zircons

Belousova et al. (2010)

L'âge de la croûte et les modèles de croissance



L'âge de la croûte et les modèles de croissance

Conclusions partielles

- Les interprétations récentes sur les zircons (T_{DM}Hf, âges U-Pb) tendent à montrer une croissance épisodique, avec des pics de croissance liés à la dynamique globale.

- L'intégration de ces données donne généralement des courbes de croissance montrant une croissance progressive, avec en particulier une adjonction de croûte y compris après l'archéen.

Conclusions

La première croûte s'est formée juste après la naissance de la Terre, il y a plus de 4.3 Ga.

Le modèle classique de croissance crustale, basé sur l'évolution de la composition en REE de la croûte moyenne, les âges U-Pb de la croûte à l'affleurement et l'âge moyen d'extraction (T_{DM}) dans les systèmes Rb-Sr et Sm-Nd, considère une croissance préférentielle à environ 3 Ga. Les données géochronologiques et géochimiques récentes suggèrent cependant:

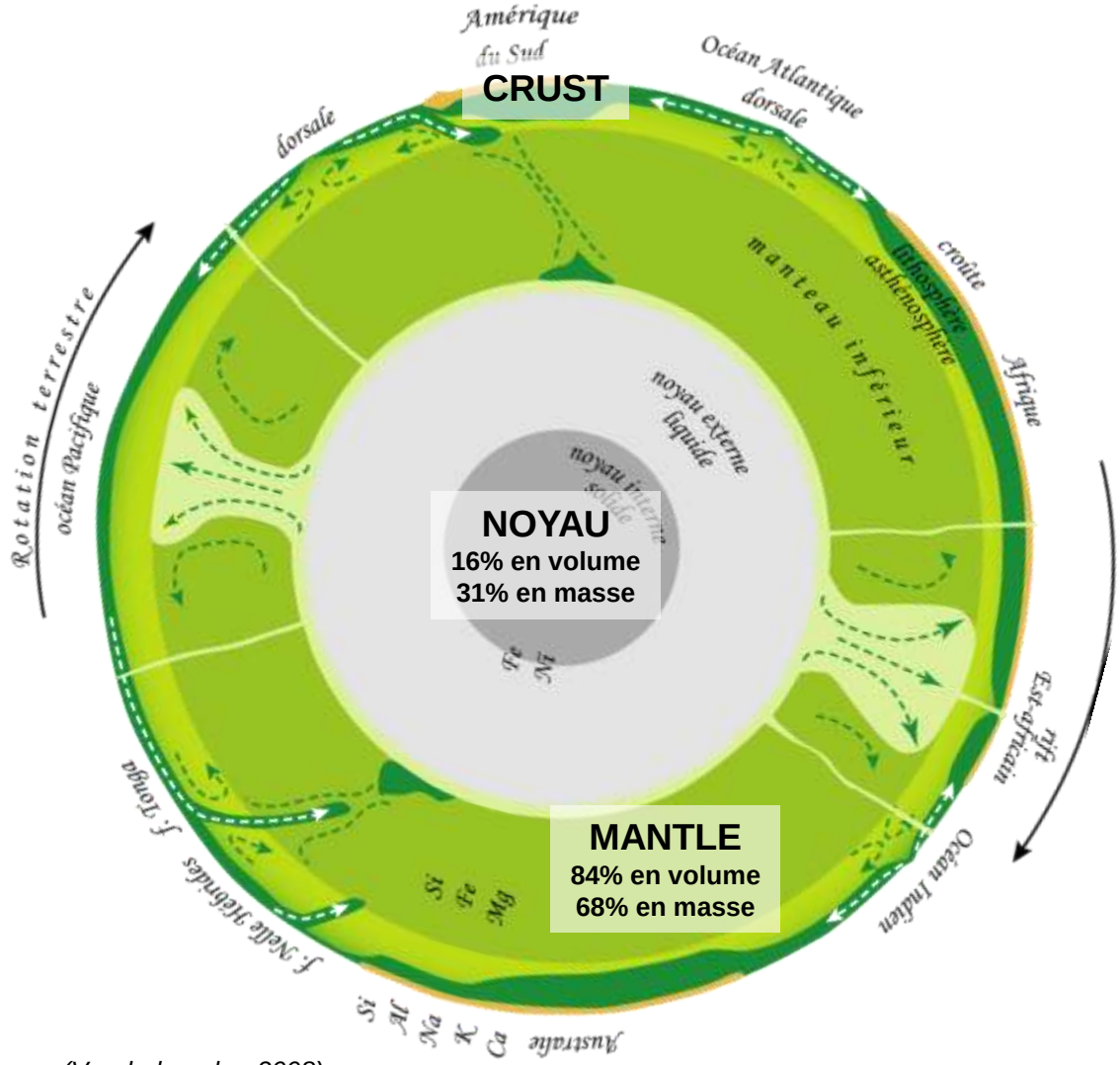
- **qu'un réservoir crustal existe depuis le début de l'histoire de la Terre**
- **que la croissance crustale a été progressive au cours de l'histoire de la Terre**
- **que cette croissance a été épisodique, peut-être en lien avec les grands cycles orogéniques**

AFPSVT

Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

LA CROUTE CONTINENTALE

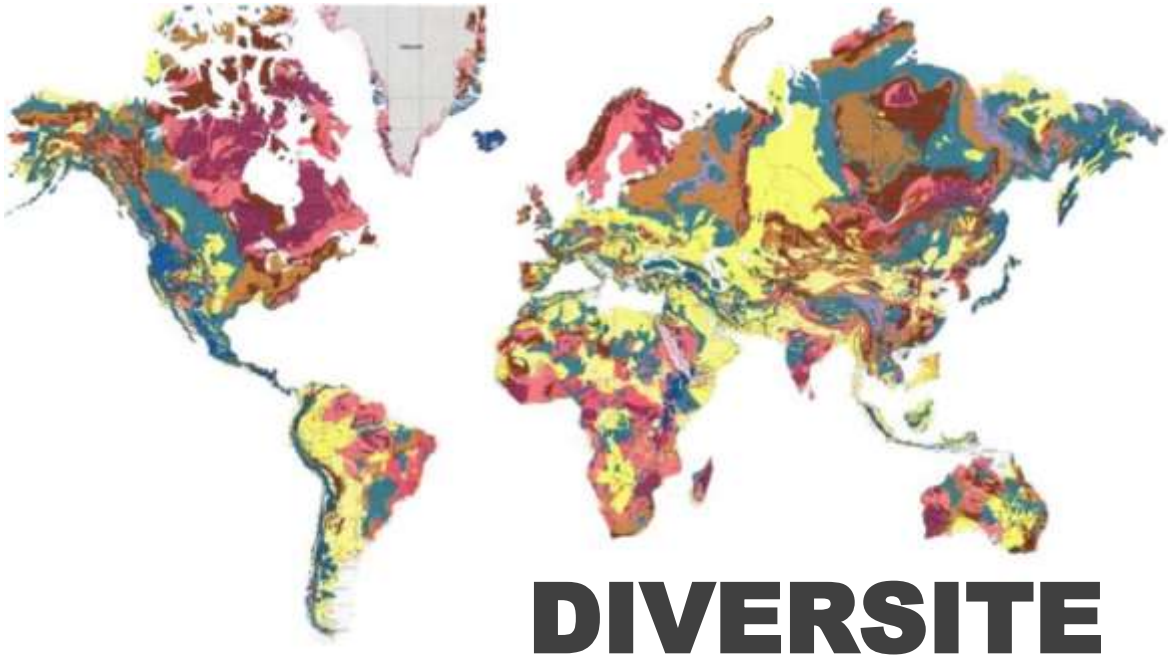
Colloque AFPSVT
14 janvier 2014



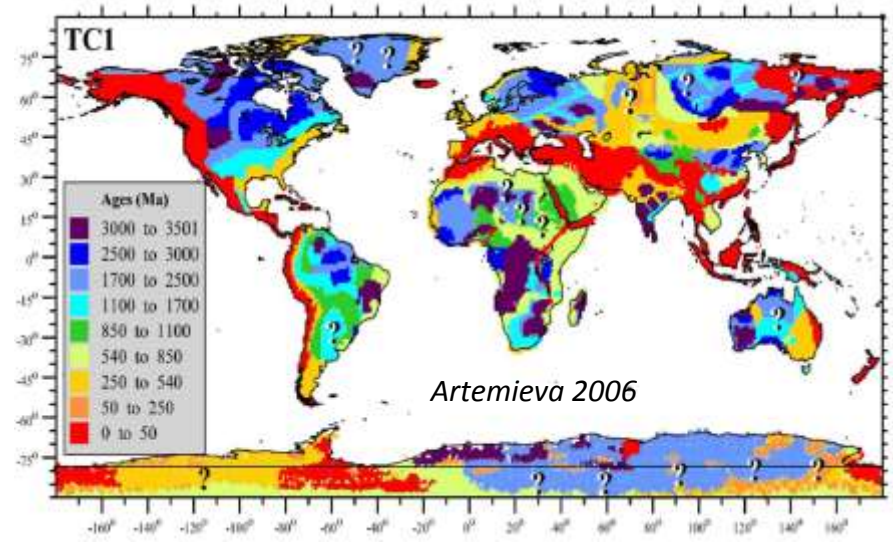
(Vanderhaeghe, 2008)

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

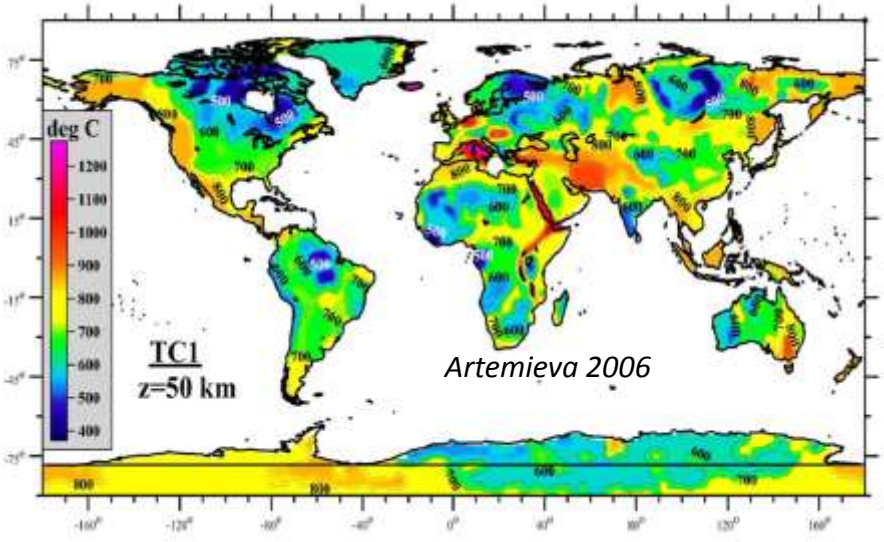
LA CROUTE CONTINENTALE



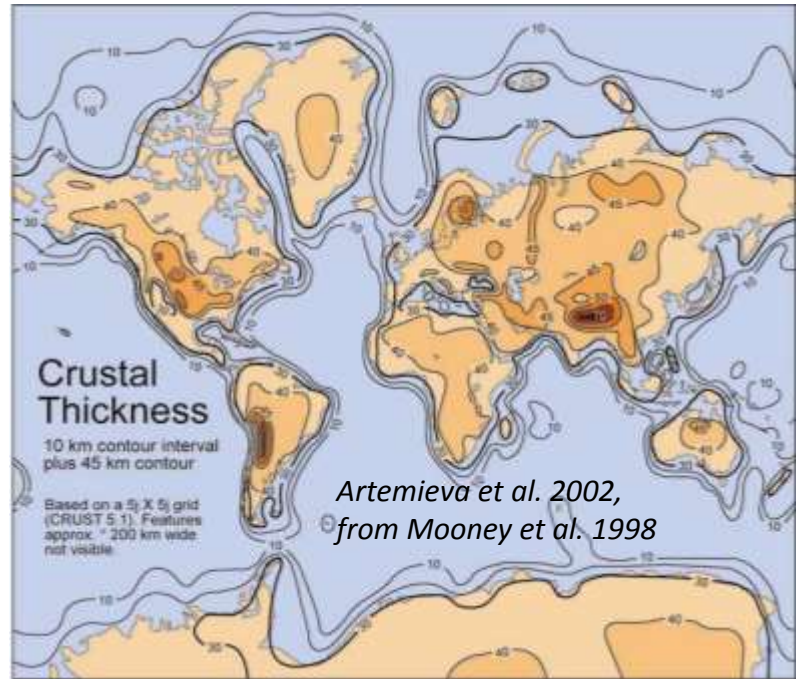
DIVERSITE



Artemieva 2006



Artemieva 2006



Artemieva et al. 2002, from Mooney et al. 1998

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

LA CROUTE CONTINENTALE

B.O. Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011

Annexe
Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de SVT
Classe terminale de la série scientifique

Thème 1-B - Le domaine continental et sa dynamique

En classe de première S, l'attention s'est portée principalement sur les domaines océaniques. On aborde ici les continents. Il s'agit de dégager les caractéristiques de la lithosphère continentale et d'en comprendre l'évolution à partir de données de terrain.
La compréhension de la dynamique de la lithosphère devient ainsi plus complète.
Bilans : granite, gabbro, basalte, péridotite ; le modèle de la tectonique des plaques ; volcanisme, recyclage des matériaux de la croûte ; notions d'érosion, transport, sédimentation.

Thème 1-B-1 La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale

La croûte continentale affleure dans les régions émergées. L'examen de données géologiques permet à la fois d'expliquer cette situation et de nuancer cette vision rapide.
Les mécanismes de formation des montagnes sont complexes. On se limite au cas des reliefs liés à un épaississement crustal dont les indices peuvent être retrouvés sur le terrain et/ou en laboratoire.

Thème 1-B-2 La convergence lithosphérique : contexte de la formation des chaînes de montagnes

Si les dorsales océaniques sont le lieu de la divergence des plaques et les failles transformantes une situation de coulissage, les zones de subductions sont les domaines de la convergence à l'échelle lithosphérique. Ces régions, déjà présentées en classe de première S, sont étudiées ici pour comprendre une situation privilégiée de raccourcissement et d'empilement et donc de formation de chaînes de montagnes.

Thème 1-B-3 Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux

Les zones de subduction sont le siège d'une importante activité magmatique qui aboutit à une production de croûte continentale.

Thème 1-B-4 La disparition des reliefs

Tout relief est un système instable qui tend à disparaître aussitôt qu'il se forme. Il ne s'agit évidemment pas ici d'étudier de façon exhaustive les mécanismes de destruction des reliefs et le devenir des matériaux de démantèlement, mais simplement d'introduire l'idée d'un recyclage en replaçant, dans sa globalité, le phénomène sédimentaire dans cet ensemble.

Thème 2 - Enjeux planétaires contemporains

Thème 2-A - Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

L'énergie solaire, d'origine externe au globe terrestre, a été largement abordée dans les programmes de sciences de la vie et de la Terre des classes de seconde et de première. Un flux thermique dont l'origine est interne se dirige aussi vers la surface. L'étudier en classe terminale est à la fois prendre conscience d'une ressource énergétique possible et un moyen de comprendre le fonctionnement global de la planète.
Bilan : flux thermique, convection, conduction, énergie géothermique.

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

LA CROUTE CONTINENTALE

14 janvier 2014

Bonne journée d'échanges !

10h15 : Stéphanie DUCHENE - PU Université Paul Sabatier, Toulouse
Traçage et datation de la différenciation continentale

11h00 : Jean-François MOYEN - PU Université Jean Monnet, St Etienne
Processus de formation et de différentiation de la croûte continentale

11h45 : Olivier VANDERHAEGHE - PU Université de Lorraine, Nancy
Montagnes : Colosses au cœur tendre ; Le cycle orogénique dans le cadre de la tectonique des plaques

14h00 : Philippe GONCALVES - MC Université de Franche-Comté, Besançon
Les roches métamorphiques: un marqueur des perturbations thermiques de la croûte continentale

14h45 : Cécile ROBIN - MC Université de Rennes 1, Rennes
Les bassins sédimentaires, archives des déformations lithosphériques

16h00 : Siegfried LALLEMANT - PU Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise
L'évolution du concept d'isostasie et son rôle dans la perception de la résistance de la croûte et du manteau

16h45 : Michèle PRIEUR - Chargée d'étude et de recherche à l'Institut Français de l'Education - ENS, Lyon
& Eric SANCHEZ – MC Institut Français de l'Education - ENS Lyon
Classe de terrain, investigation, jeux ... Un bilan de recherche pour concevoir des démarches innovantes dans la classe

université PARIS DIDEROT PARIS 7
Centre de formation et d'études sur l'enseignement des disciplines CFEED

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

Processus de formation et de différentiation de la croûte continentale

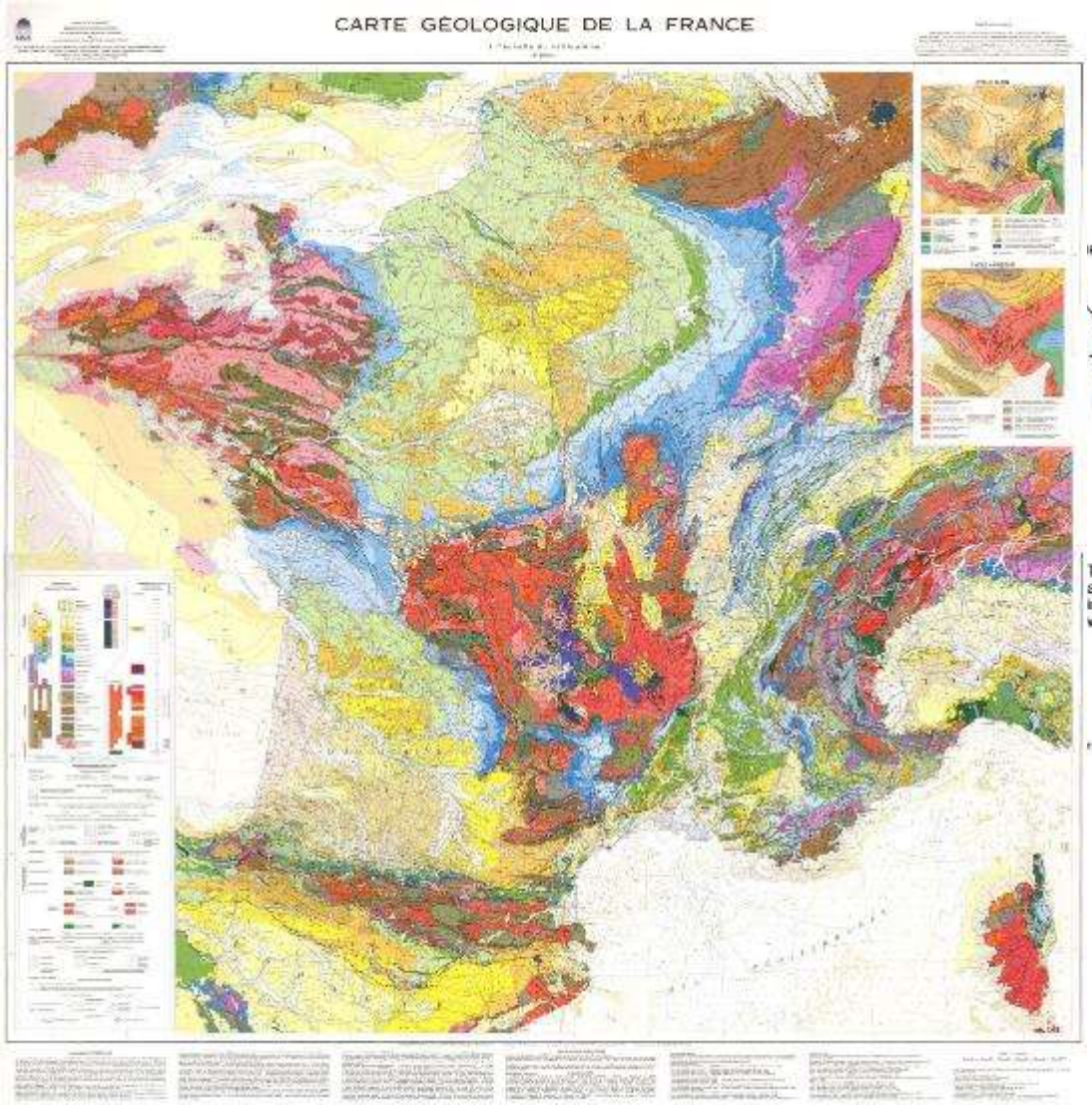
Jean-François Moyen

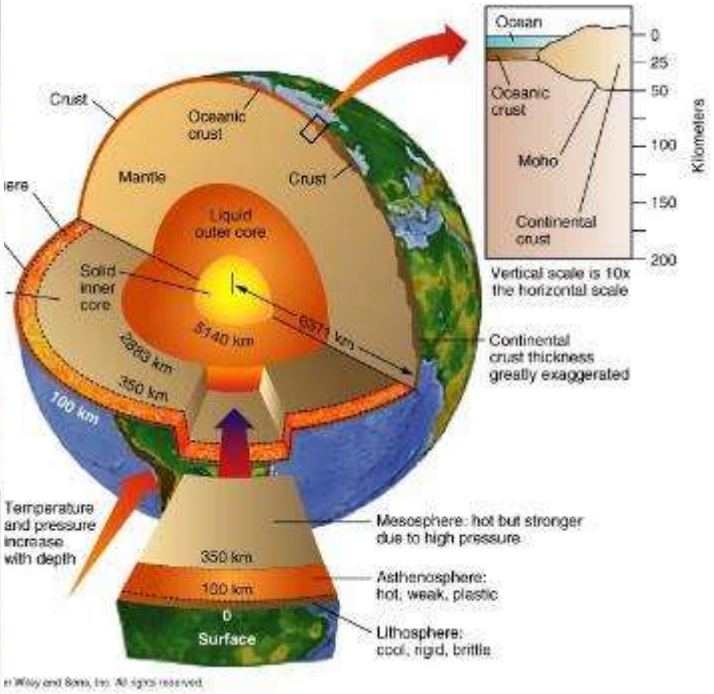
UNIVERSITÉ DE LYON

Magmas et Volcans

Université Jean Monnet SAINT-ETIENNE

Composition de la croûte ?





La croûte supérieure : échantillonnage par les rivières

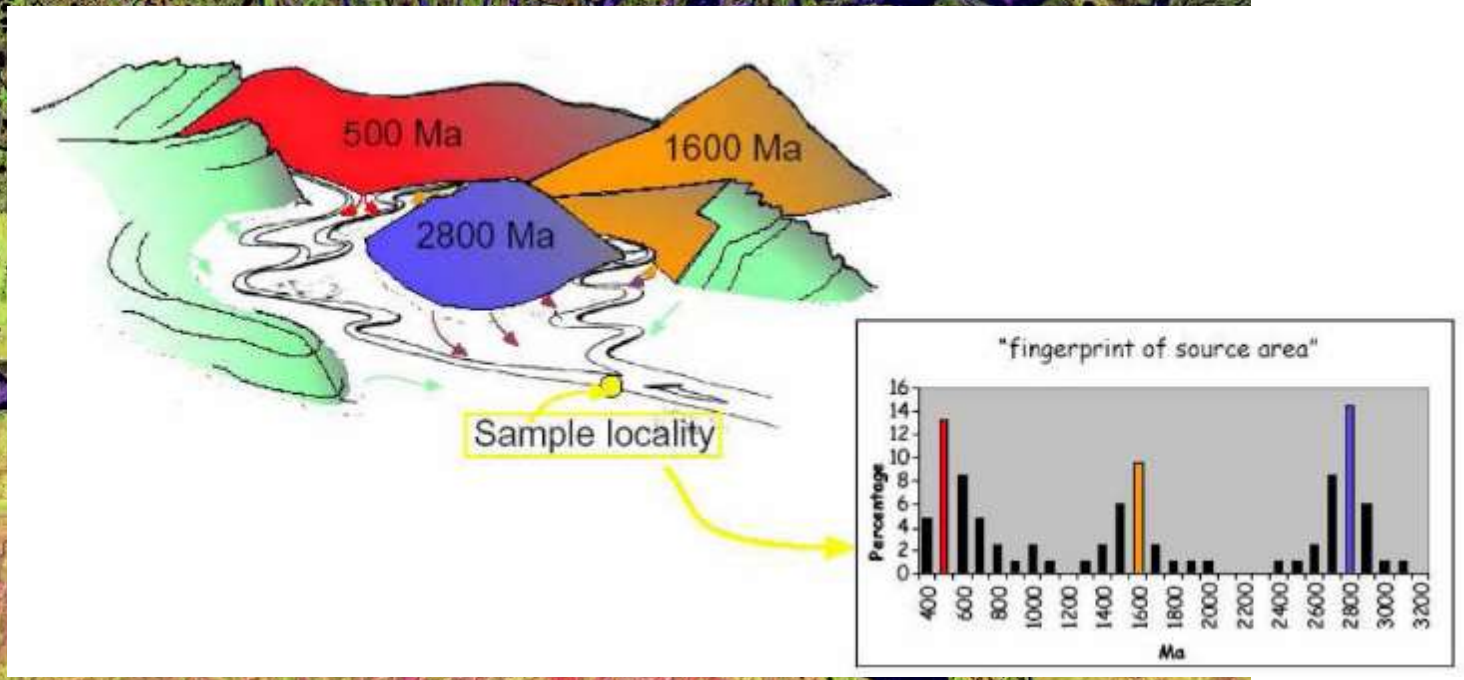
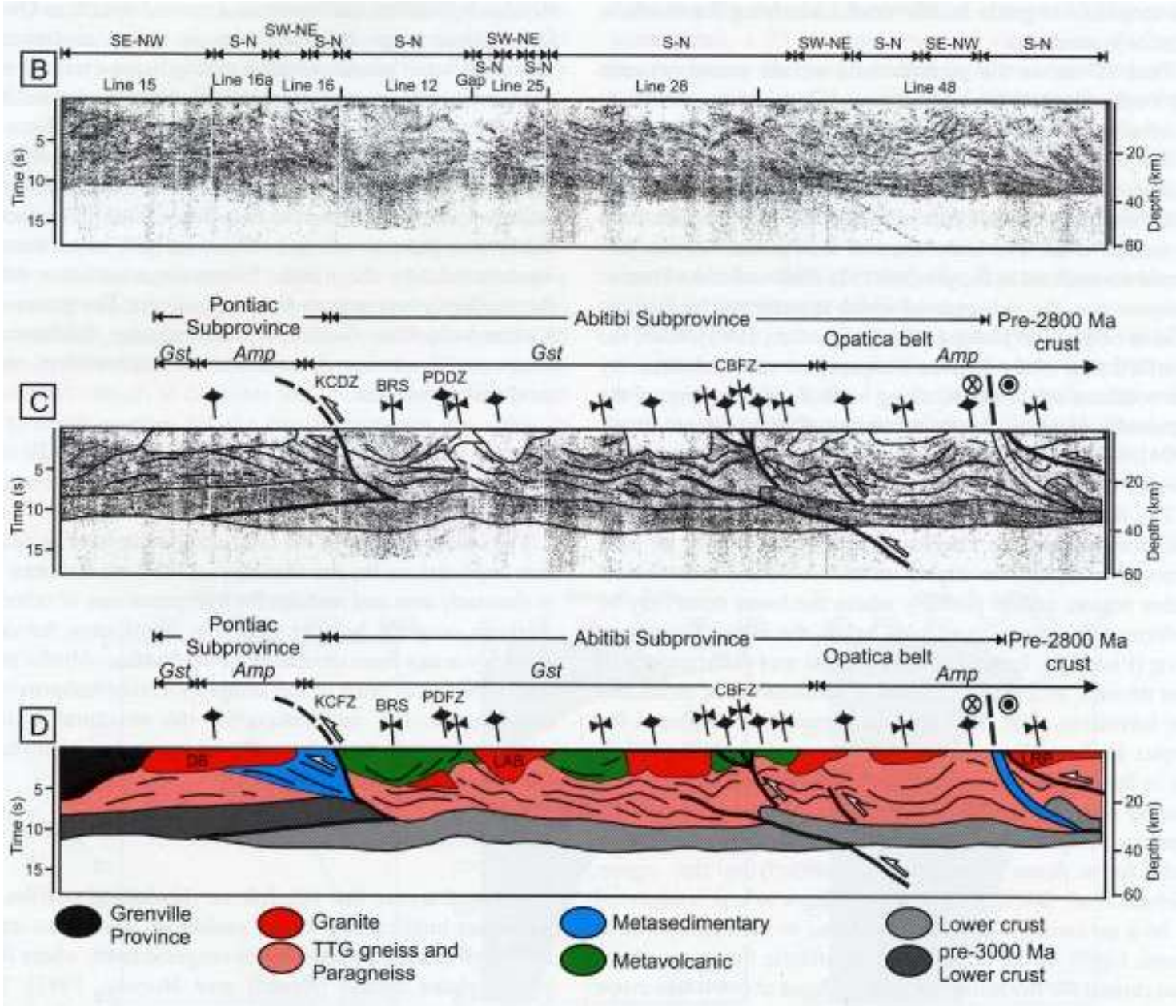


Table 2.8. Chemical composition of particulate matter from selected rivers [51].

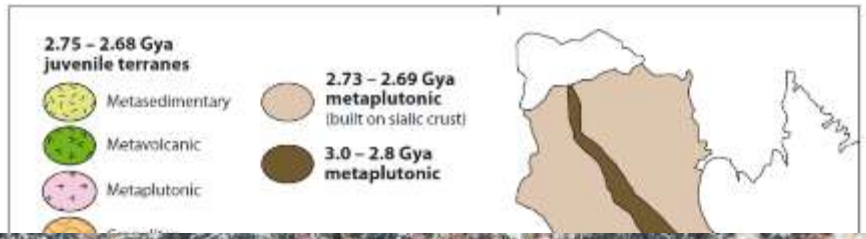
	Amazon	Congo	Ganges	Garonne	Mekong
SiO_2	60.1	58.0	66.9	58.2	61.9
TiO_2	1.3	1.6	0.96	0.84	0.63
Al_2O_3	22.8	25.0	16.0	22.4	22.3
FeO	7.5	10.4	5.2	7.5	7.6
MnO	0.14	0.20	0.14	0.22	0.13
MgO	2.0	1.8	2.3	2.9	2.3
CaO	2.3	1.4	4.1	2.7	0.87
Na_2O	1.2	0.32	1.5	0.75	0.74
K_2O	2.3	1.6	2.7	4.1	3.0
Σ	99.6	99.6	99.8	99.6	99.5
Cs	13	6	8.2	—	21
Ba	700	790	490	615	600
Rb	138	60	116	—	190
Sr	309	61	—	164	92
La	48	50	42	44	48
Ce	112	90	98	93	93
Pr	—	—	—	8.2	8.5
Nd	—	—	48	36	47
Sm	9.7	—	9.7	6.2	5.4
Eu	1.8	1.6	1.2	1.1	1.5
Gd	—	—	—	6.1	5.3
Tb	—	1.6	0.7	0.9	0.9
Ho	—	—	—	0.9	0.9
Er	—	—	—	2.4	2.7
Tm	—	—	0.35	0.44	0.45
Yb	3.7	2.6	3.2	2.8	3.2
Lu	0.6	0.37	0.51	0.42	0.58
ΣREE	—	—	—	207	222
La_N/Yb_N	8.8	13.0	8.9	10.6	10.1
Eu/Eu*	0.57	0.47	0.58	0.54	0.85
Th	13	16.2	17.5	13	17
U	2.5	3	2.8	3.6	5.8
Hf	6.2	5.1	8.4	—	4.0
Ta	2.0	1.1	1.25	—	1.35
Th/U	5.2	5.4	6.3	3.6	2.9
La/Th	3.7	3.1	2.4	3.4	2.8
Cr	193	175	71	255	102
V	232	163	—	150	175
Sc	18	12	11.5	—	19.5
Ni	105	74	80	33	99
Co	41	25	14	39	20
Ga	19	25	—	16	28
La/Sc	2.7	4.2	3.7	—	2.5
Th/Sc	0.72	1.4	1.5	—	0.87
B	68	93	—	120	87

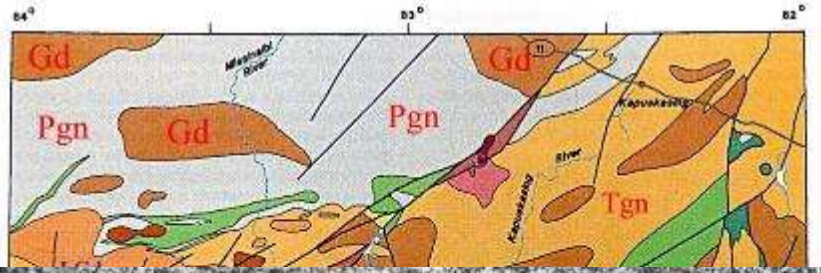
Croûte supérieure moyenne *(Rudnick et Gao)*			
oxydes pds %		Minéraux normatifs	
SiO2	66.6	Q	21.258
Al2O3	15.4	C	0.462
FeO	5.04	Or	16.547
MgO	2.48	Ab	27.67
CaO	3.59	An	17.811
Na2O	3.27	Di	0
K2O	2.8	Hy	15.432

Et la croûte inférieure ?

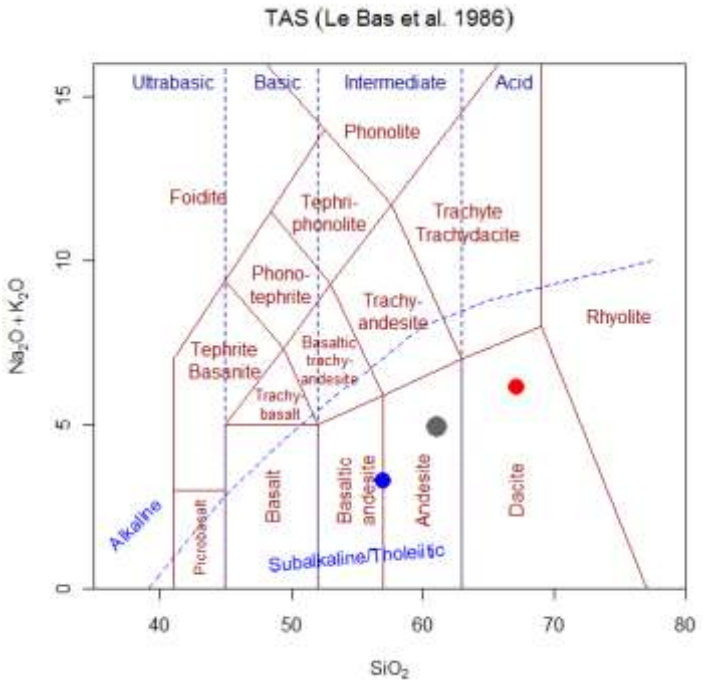


Exemple: Kapuskasing, Canada





	oxydes pds %				Mnx normatifs			
	Crt sup	Crt inf	Crt globale			Crt sup	Crt inf	Crt globale
SiO2	66.6	54.33	60.60		Q	21.26	7.48	11.17
Al2O3	15.4	15.30	15.90		C	0.46	0.00	0.00
FeO	5.04	10.60	6.70		Or	16.55	2.01	10.70
MgO	2.48	3.50	4.66		Ab	27.67	23.69	25.98
CaO	3.59	8.49	6.40		An	17.81	28.18	24.26
Na2O	3.27	2.80	3.07		Di	0.00	11.85	6.21
K2O	2.8	0.34	1.81		Hy	15.43	22.16	20.83



CROÛTE SUPERFICIELLE

Roches sédimentaires et volcaniques

CROÛTE SUPERIEURE

Roches métamorphiques et granitoïdes

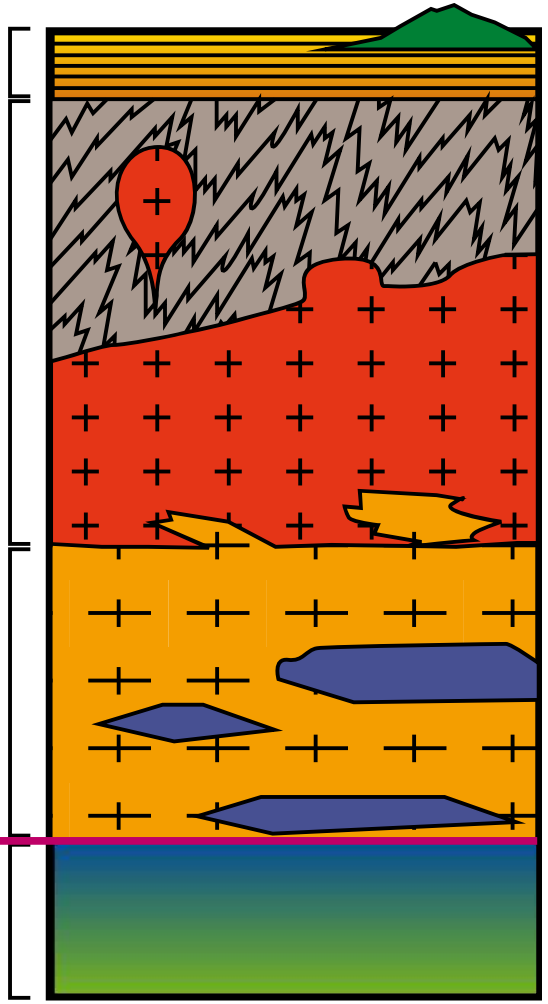
CROÛTE INFERIEURE

Roches métamorphiques (granulites) et roches intrusives

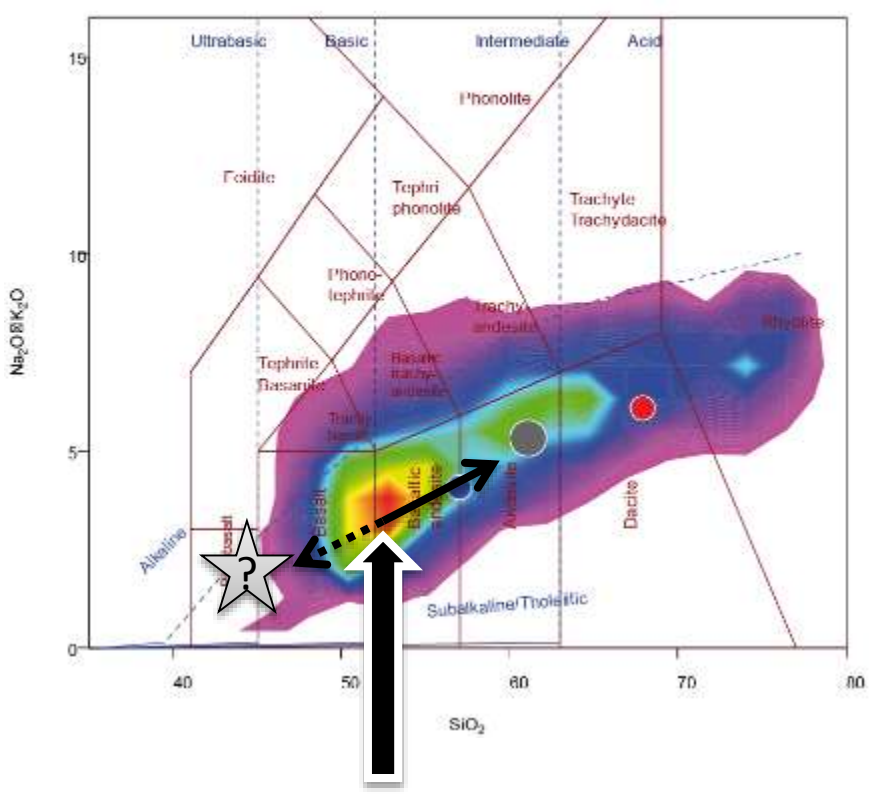
MOHO

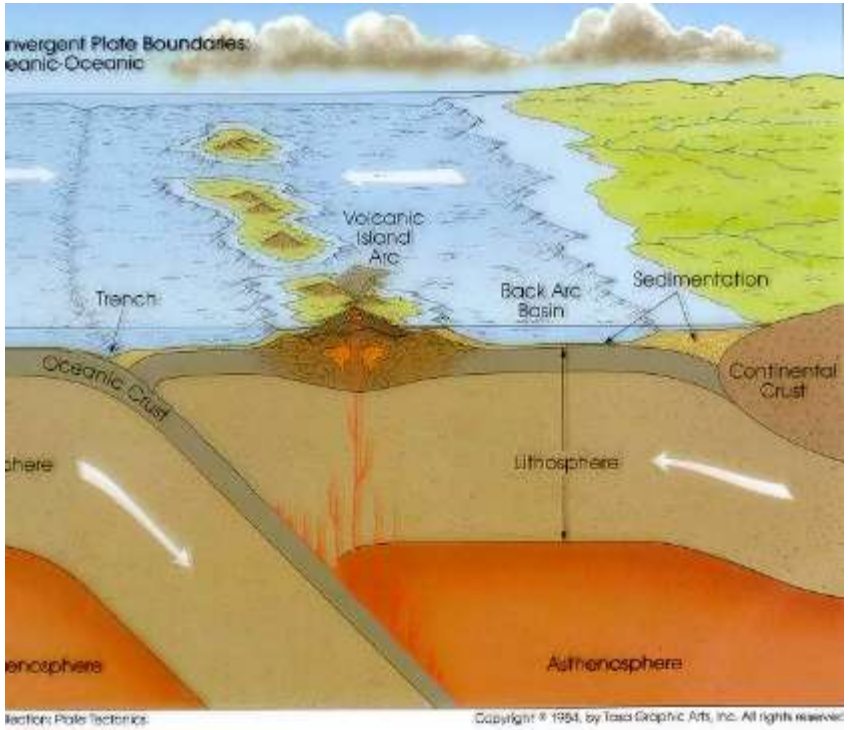
MANTEAU SUPERIEUR

Péridotites



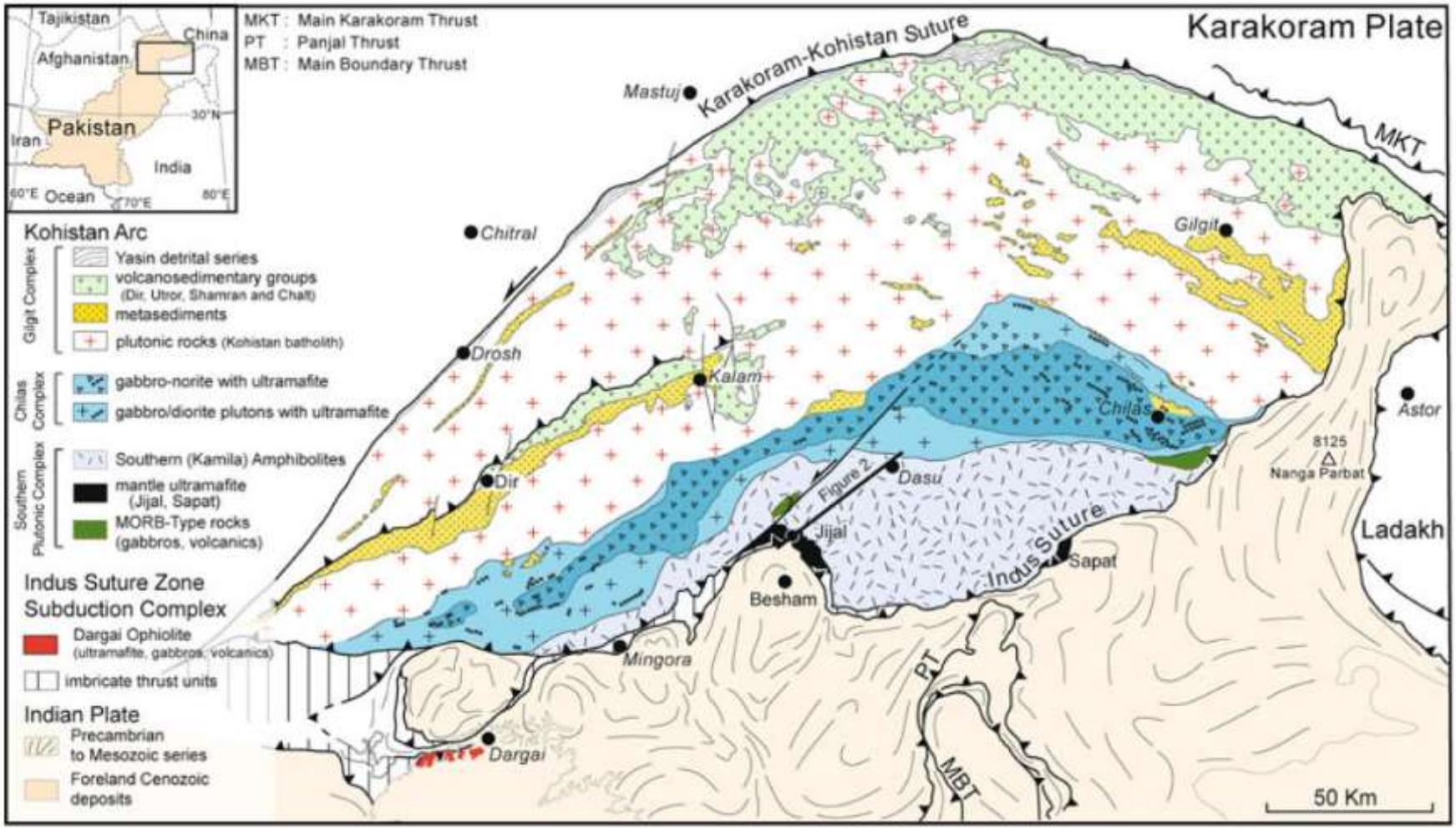
Modèle andésitique

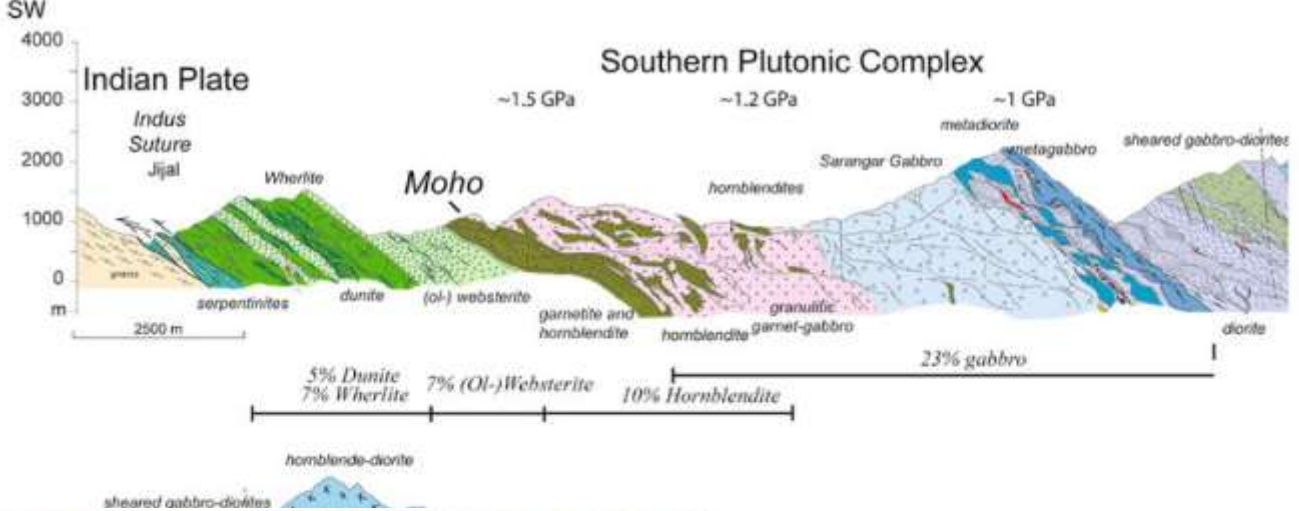


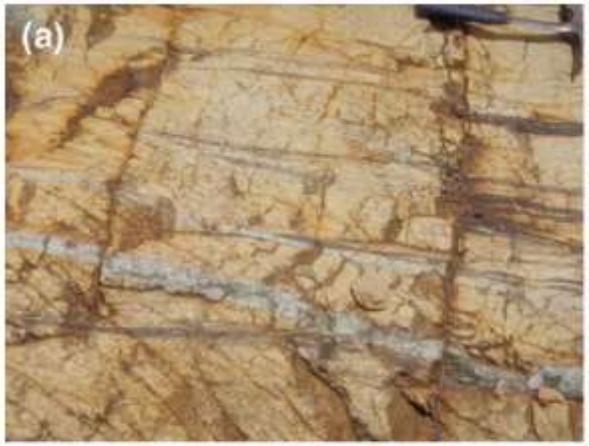


Mais… Le flux entrant est plutôt basaltique !

Le (paléo)arc du Kohistan, Pakistan



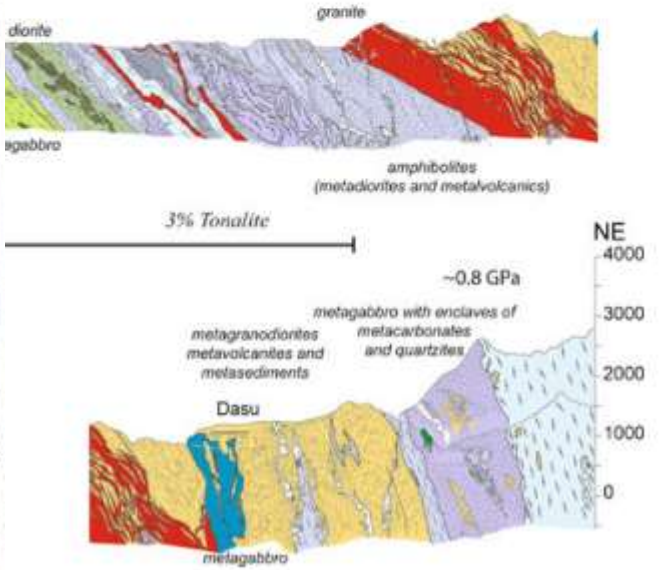

SW
4000
3000
2000
1000
0
m
Indian Plate
Indus
Suture
Jijal
Wherlite
Moho
Southern Plutonic Complex
~1.5 GPa
~1.2 GPa
~1 GPa
metadiorite
metagabbro
sheared gabbro-diorites
Sarangar Gabbro
hornblendites
serpentinites
dunite
(ol-) websterite
garnetite and
hornblendite
hornblendite
granulitic
garnet-gabbro
diorite
2500 m
23% gabbro
5% Dunite
7% Wherlite
7% (Ol-)Websterite
10% Hornblendite
hornblende-diorite
sheared gabbro-diorites


(a)

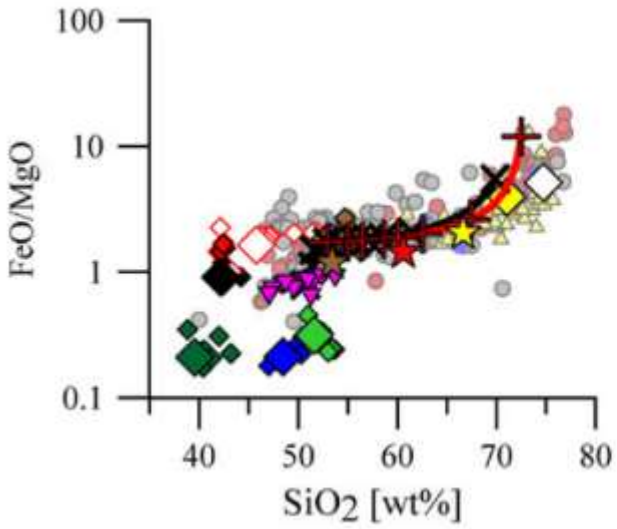
(b)

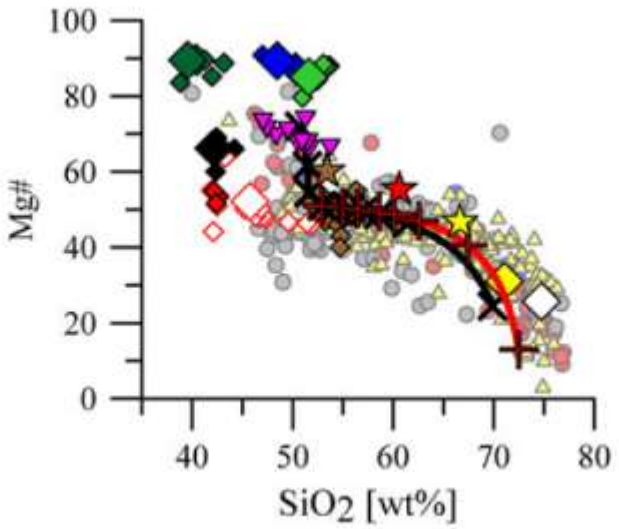
(c)

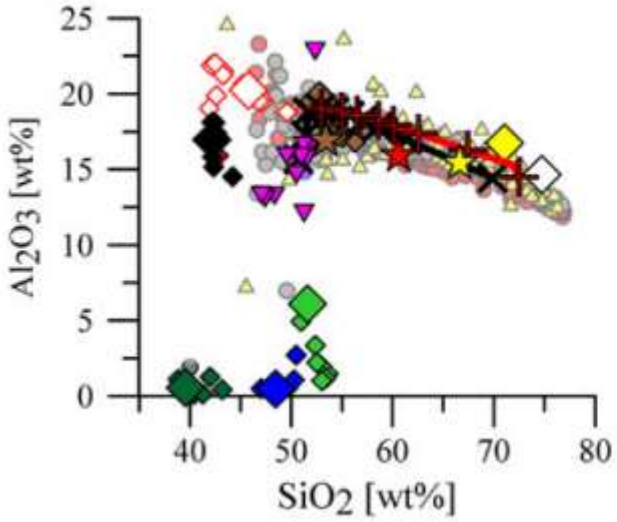
(d)

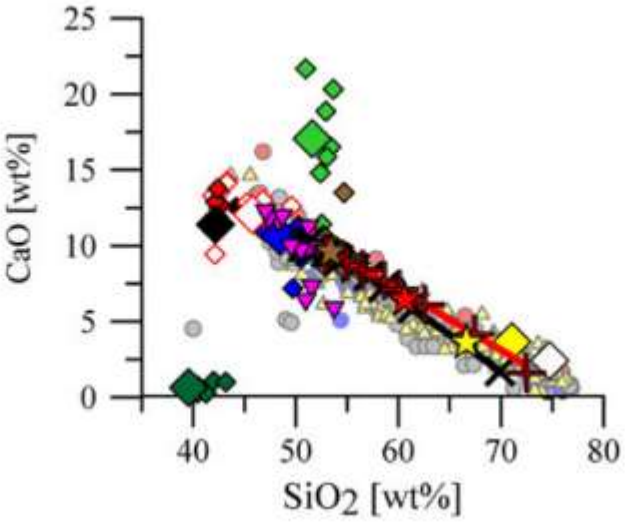

granite
diorite
gabbro
amphibolites
(metadiorites and metavolcanics)
3% Tonalite
NE
4000
3000
2000
1000
0
~0.8 GPa
metagabbro with enclaves of
metacarbonates
and quartzites
metagranodiorites
metavolcanites and
metasediments
Dasu
metagabbro

Différentiation de la croûte d'arc au Kohistan

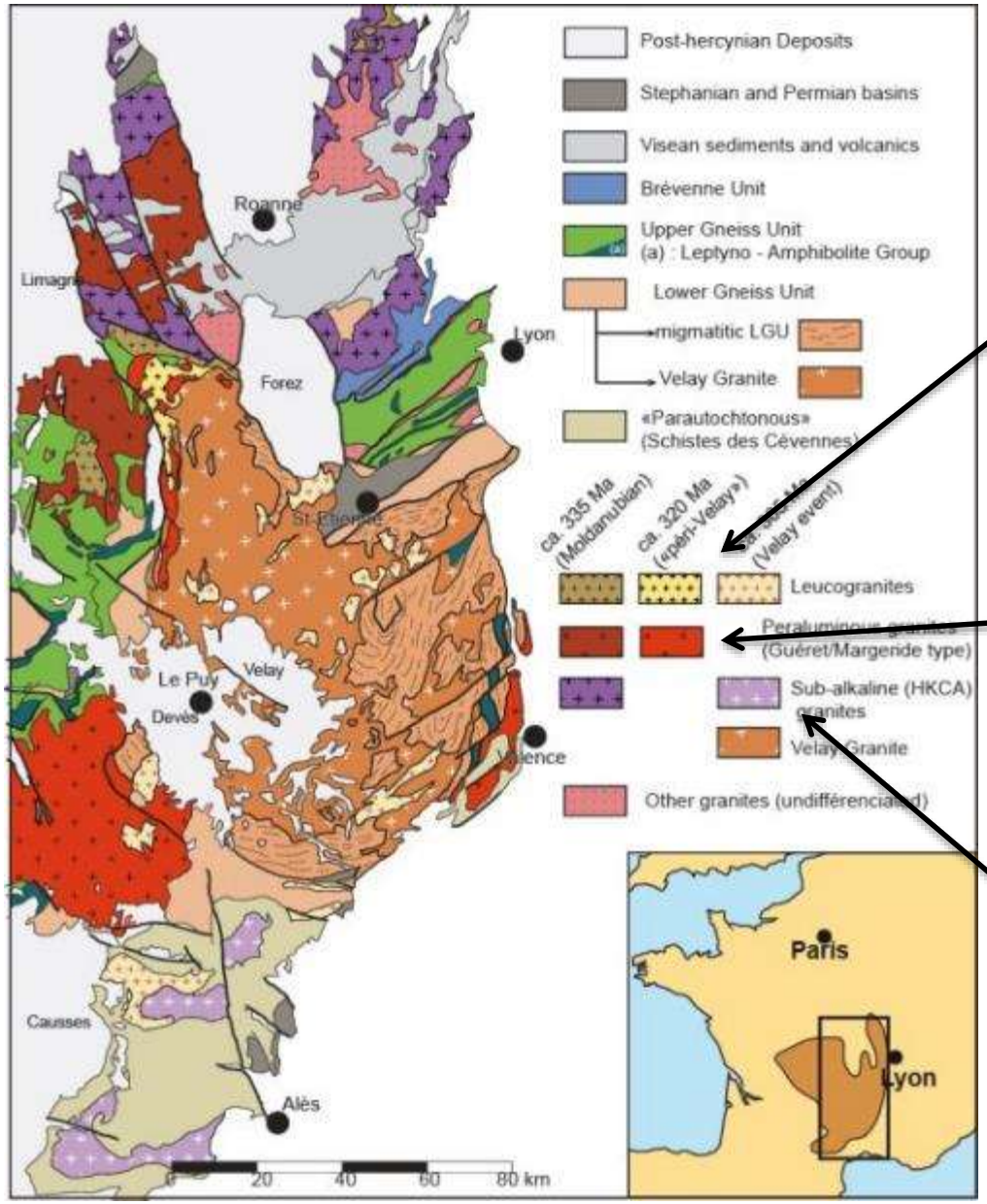




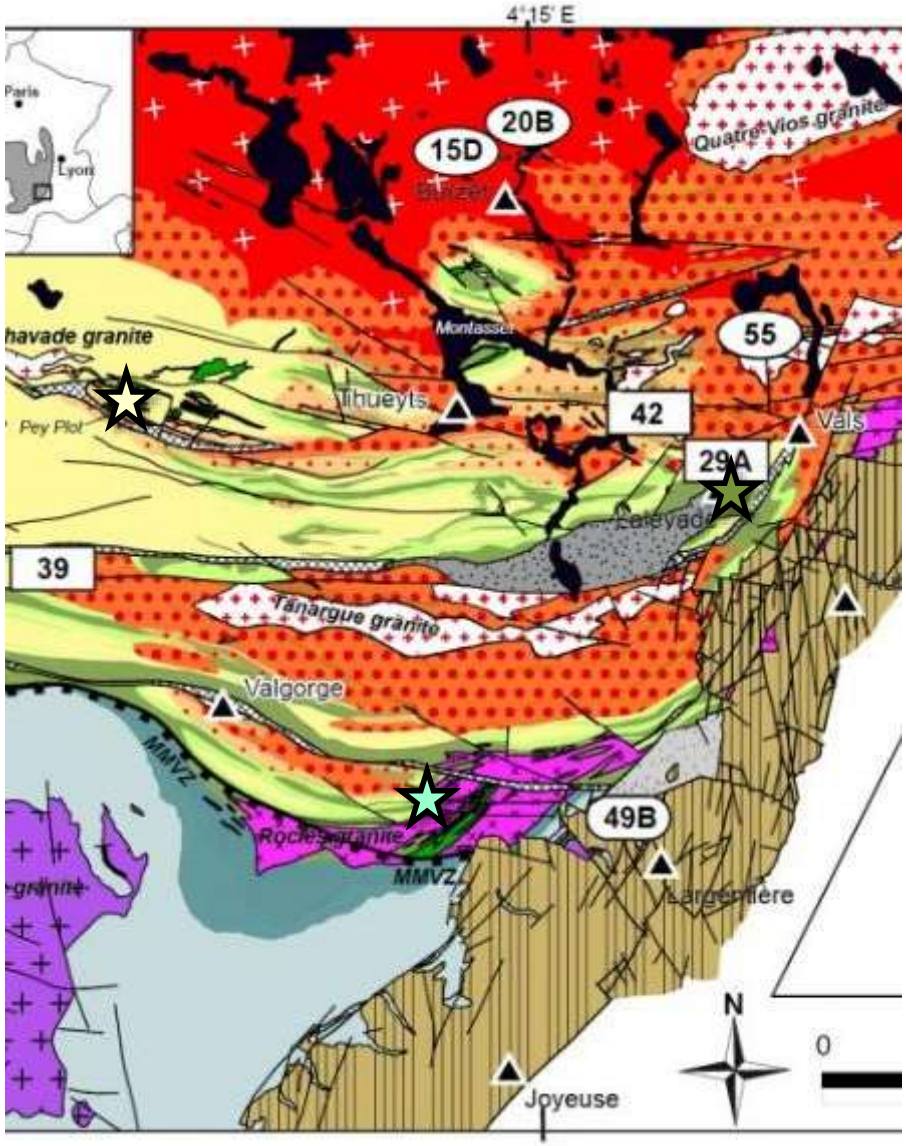


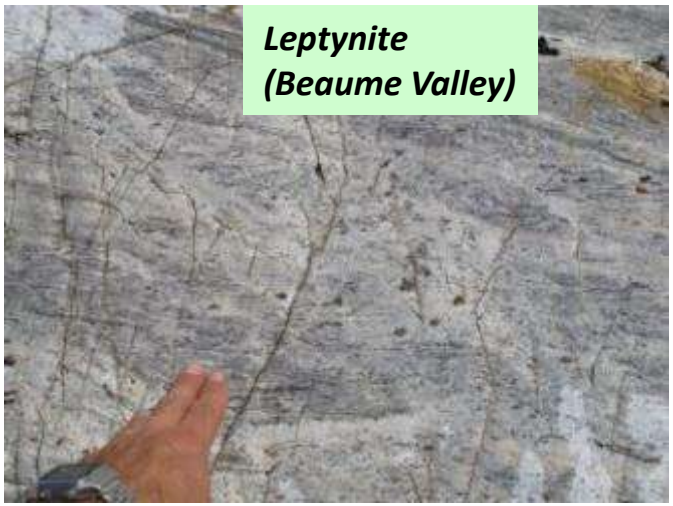


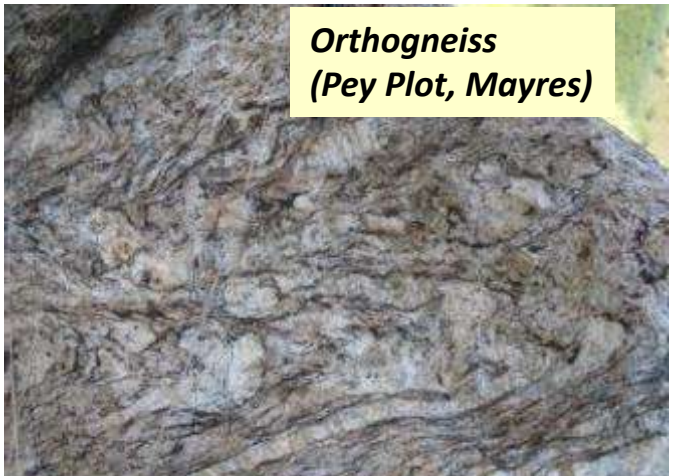
La croûte du Massif Central



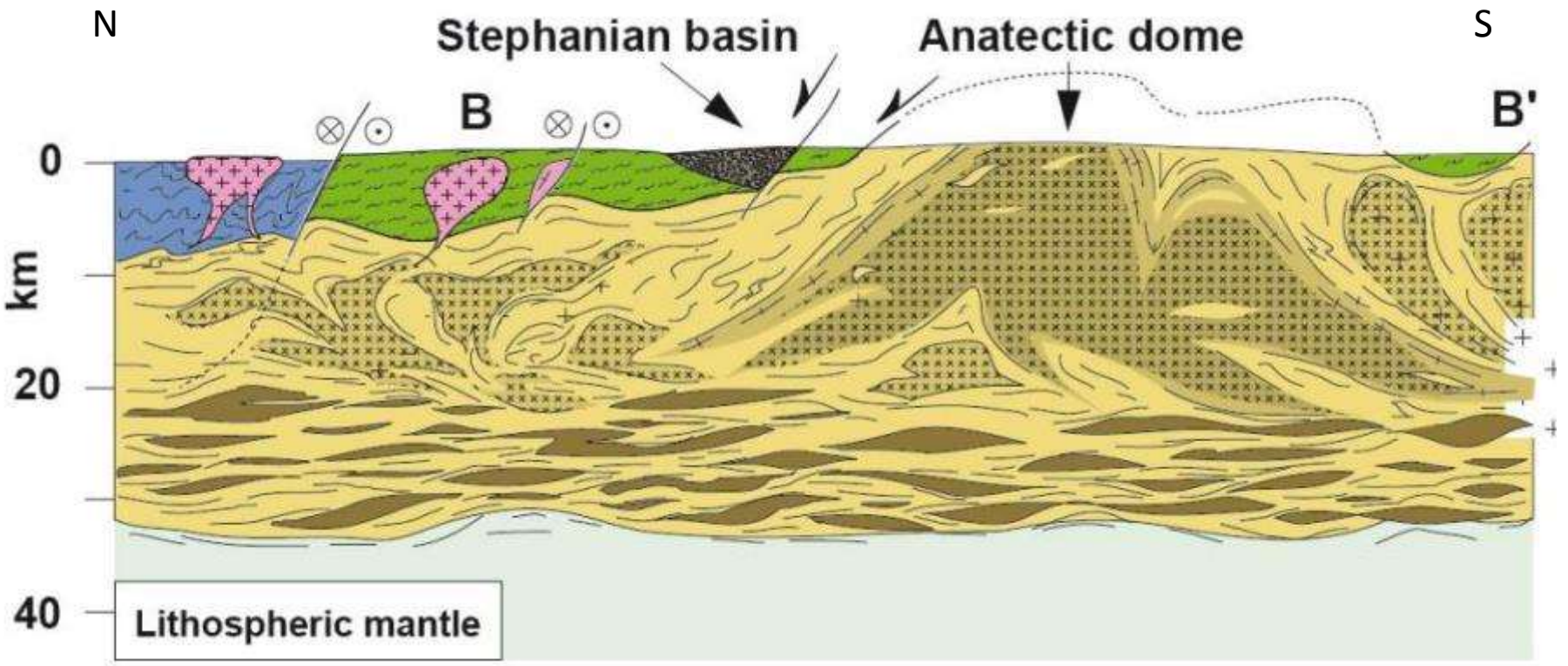
A la source aussi…







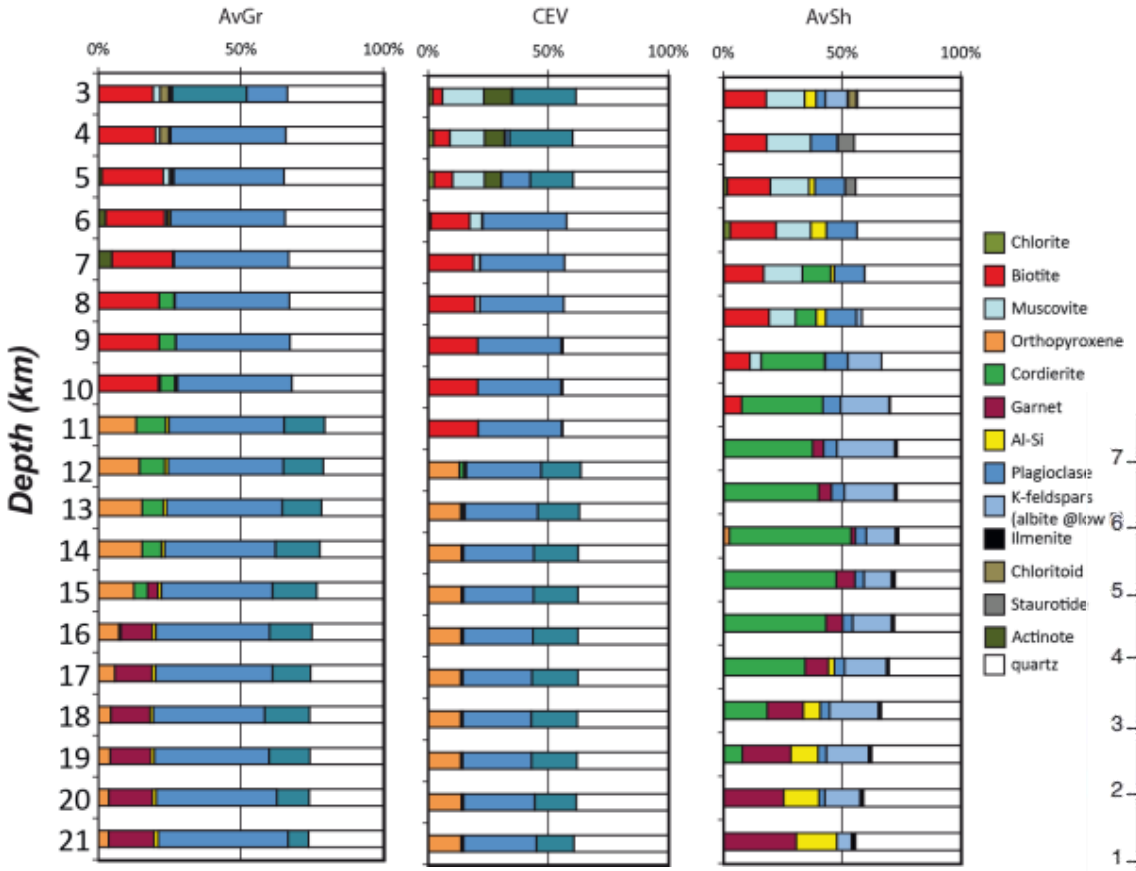
Une croûte partiellement fondue !

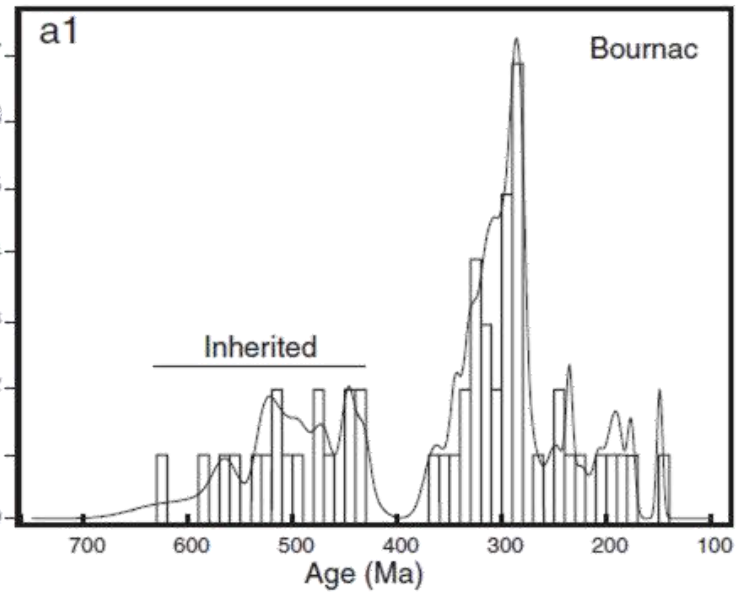


Rey et & al. 1997

Si on enlève des granites, il reste…

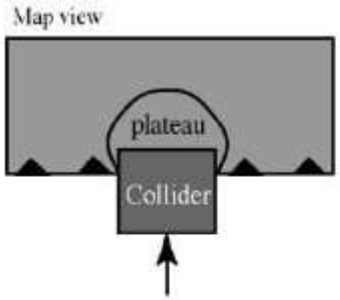
Enclaves à Bournac
(Miocène)

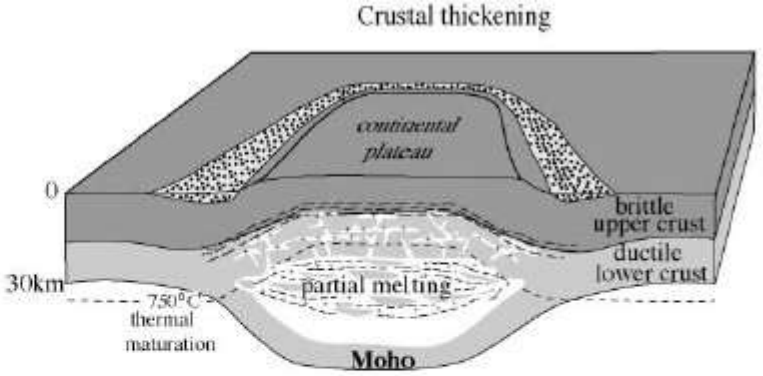


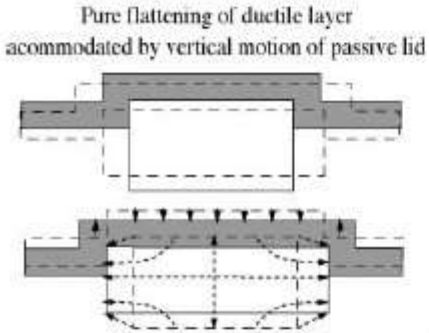


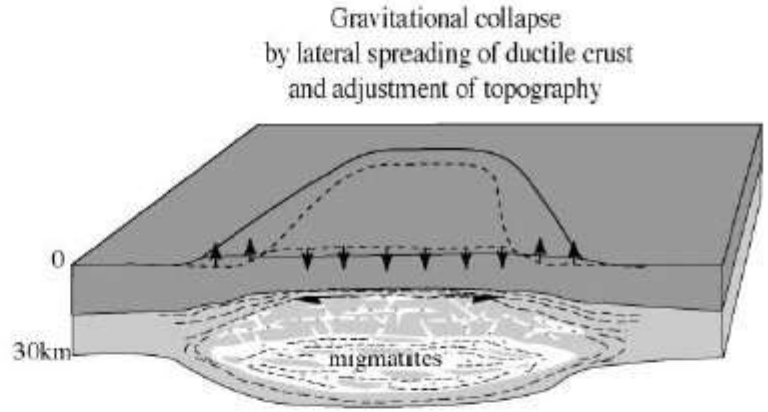
Rossi et al 2006

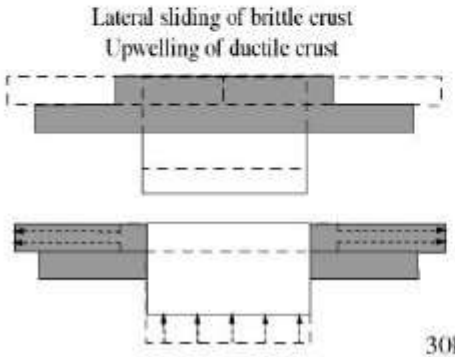
Effondrement gravitaire et retour à l'équilibre

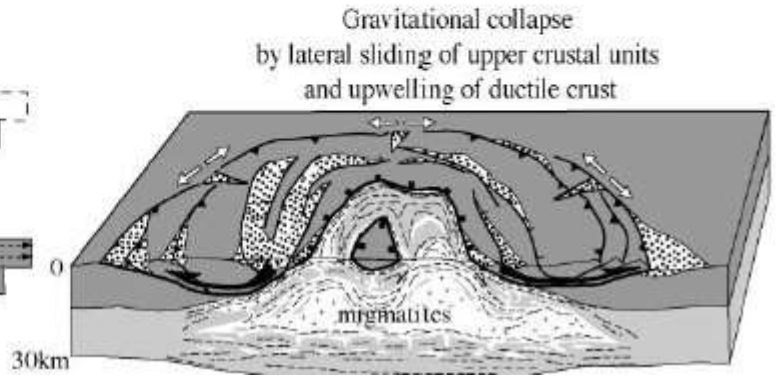




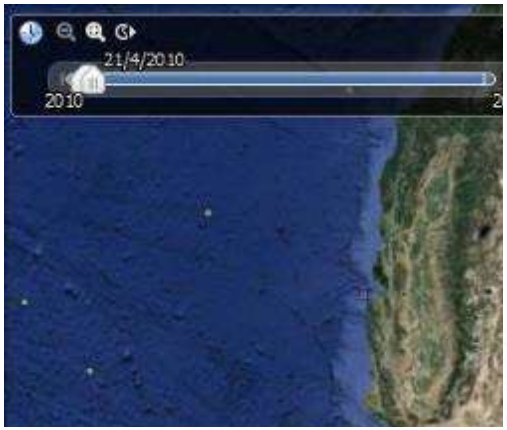


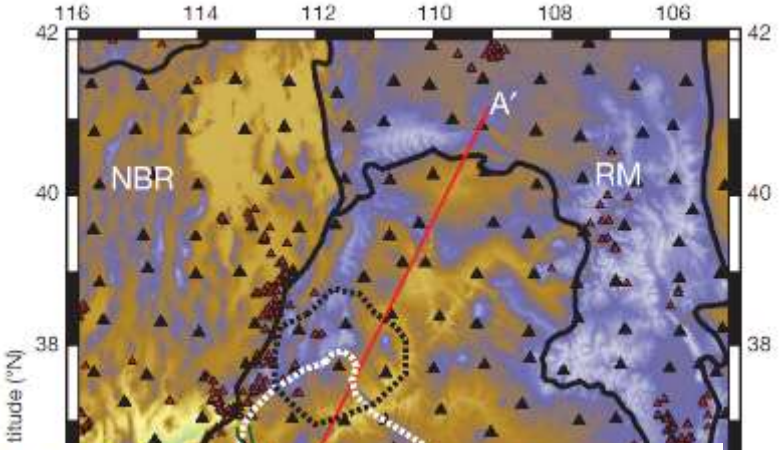


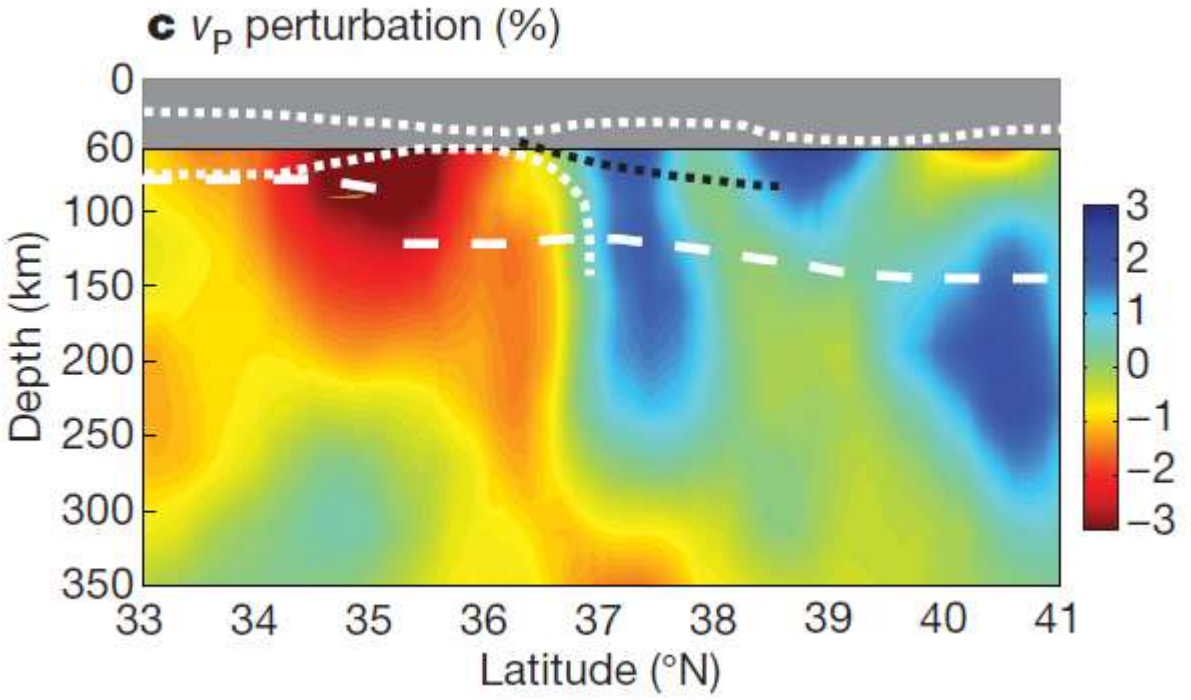


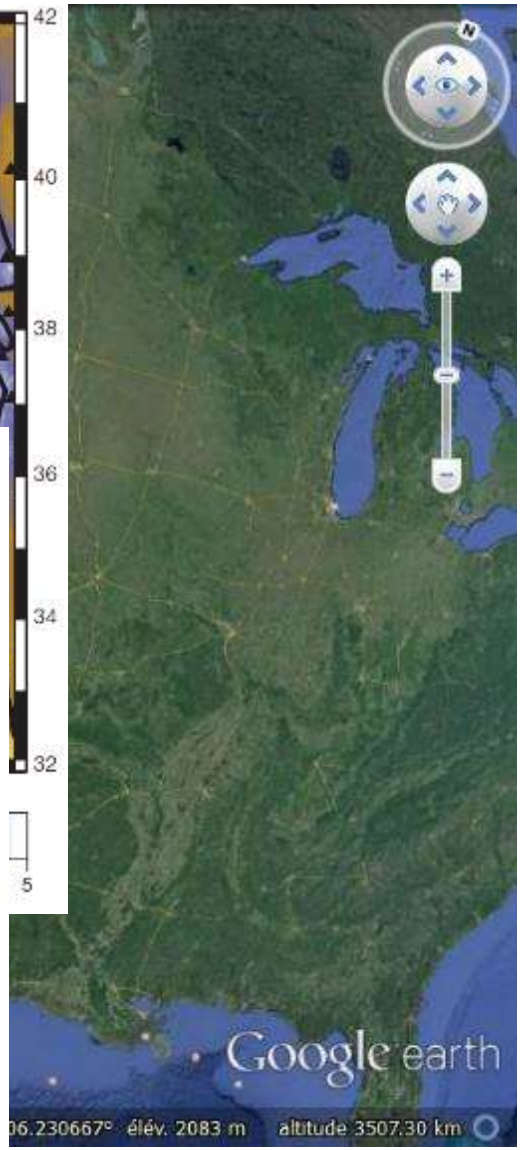


Plateau du Colorado

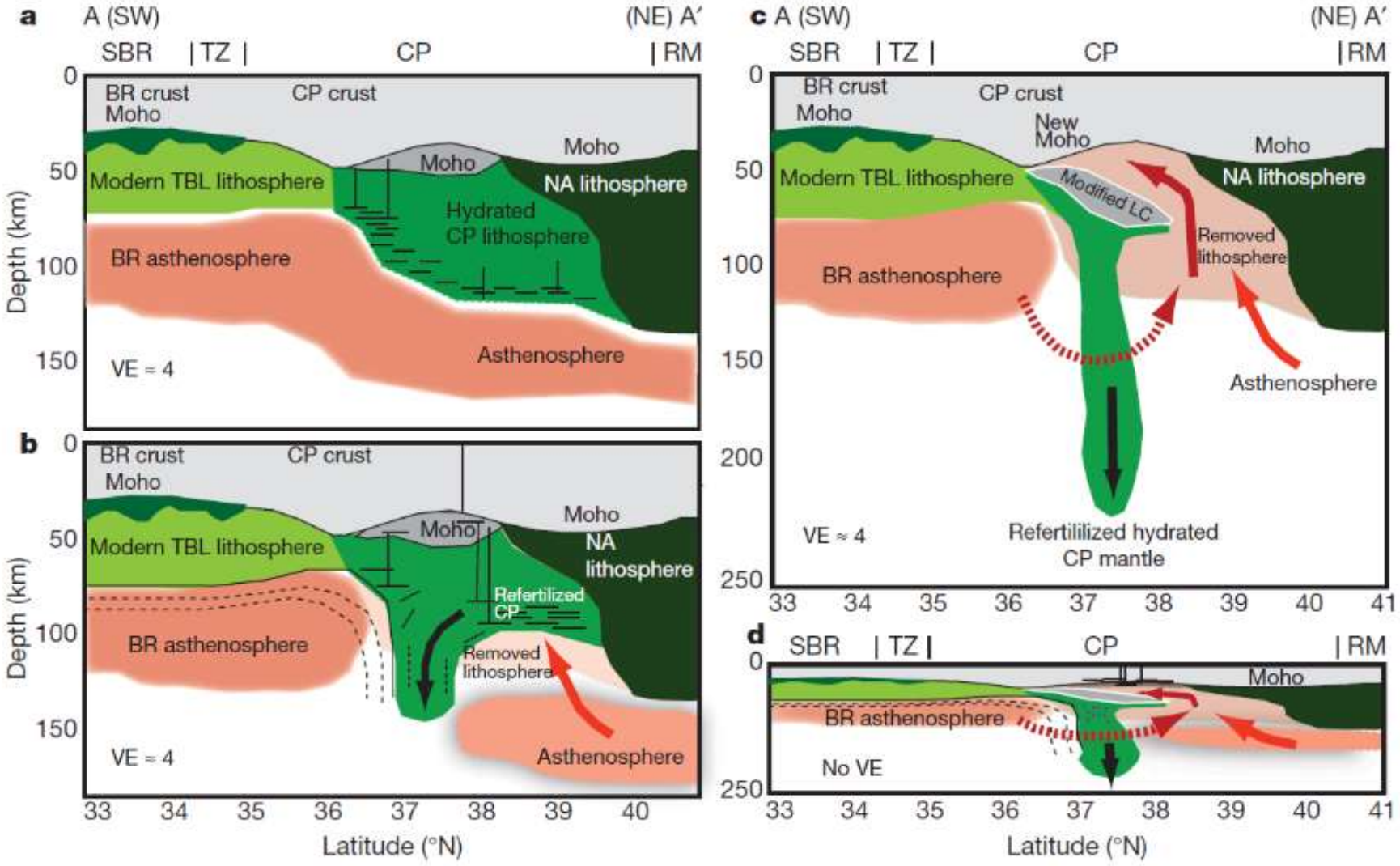




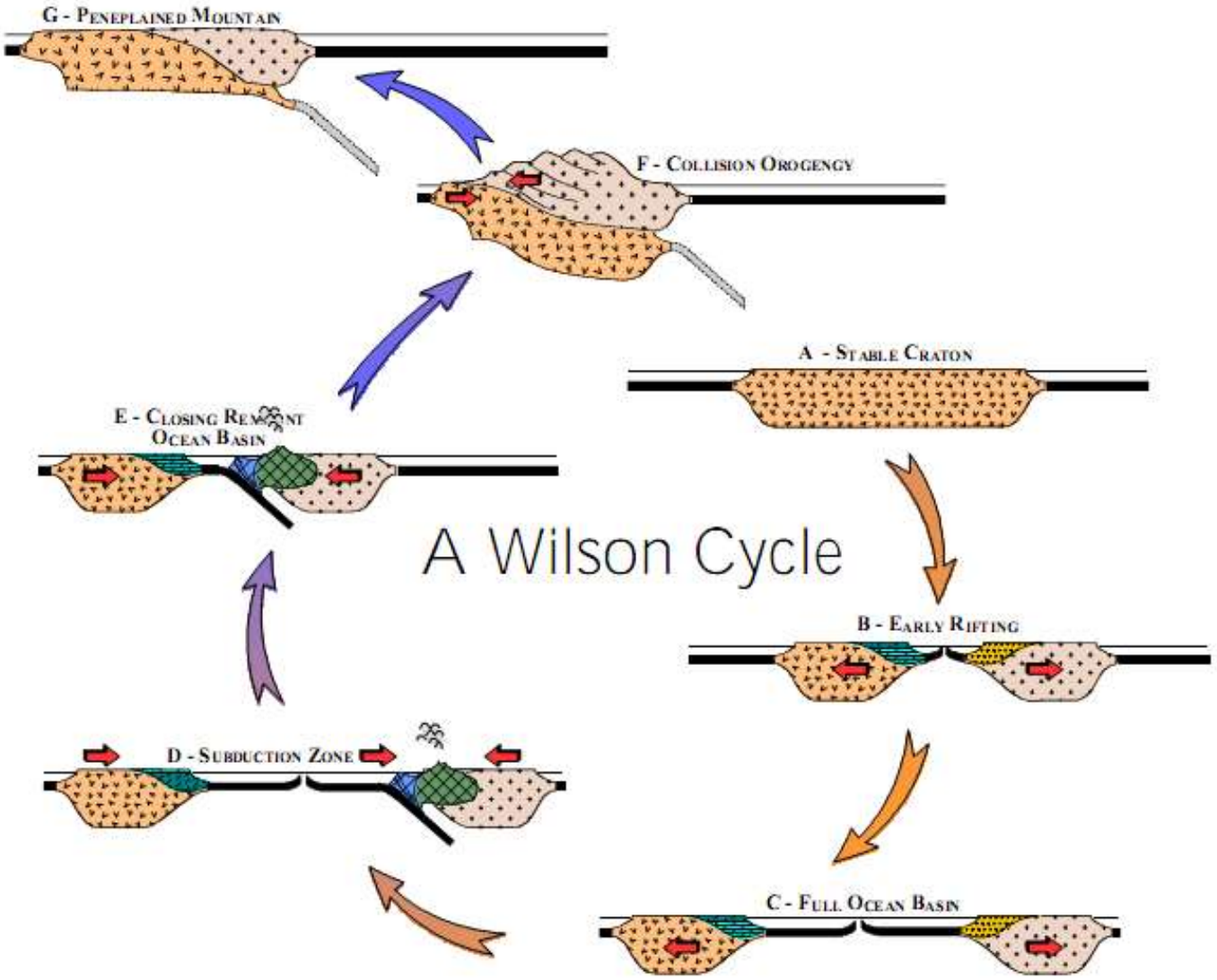




Délamination de la croûte inférieure (et du manteau lithosphérique)



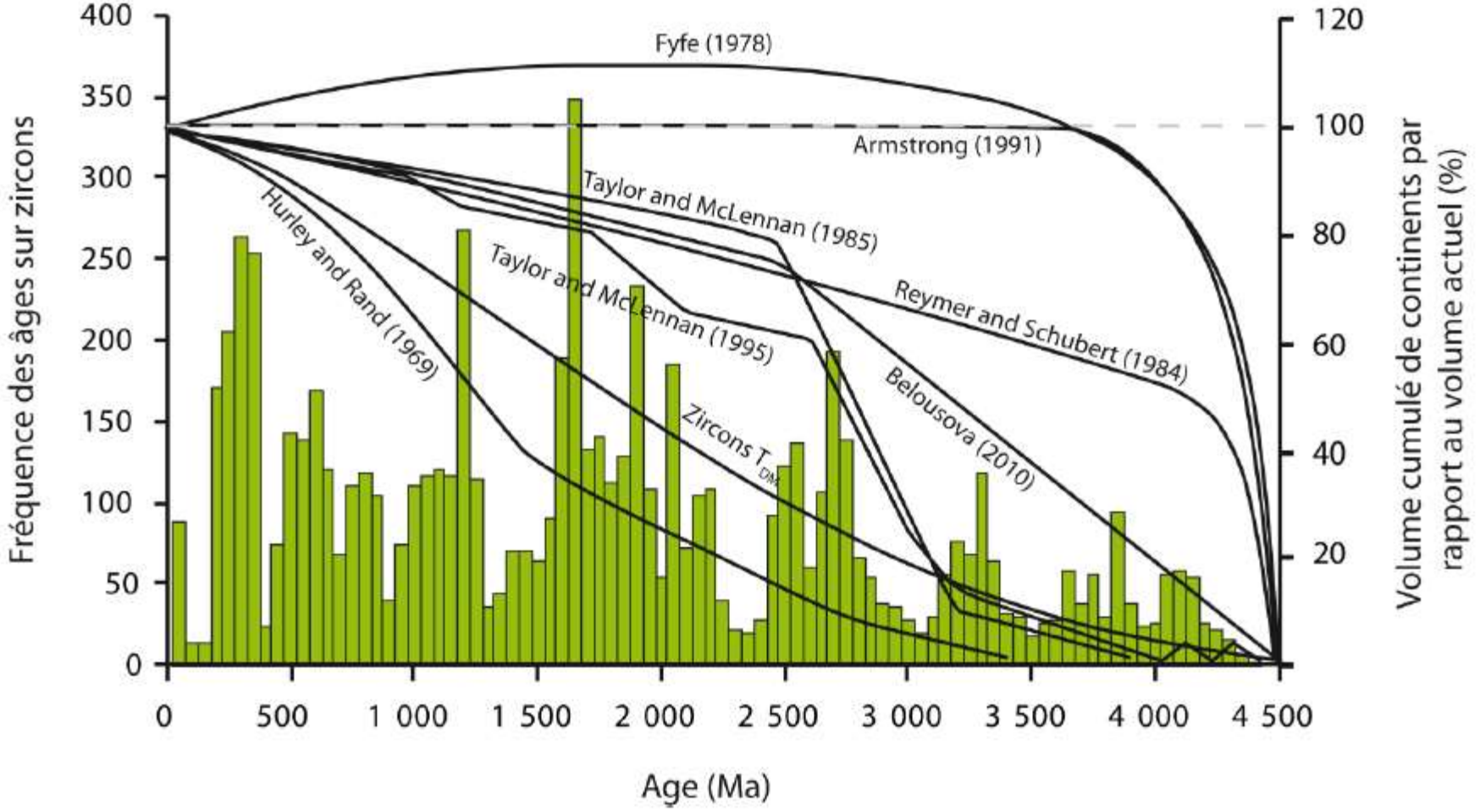
Cycle de Wilson



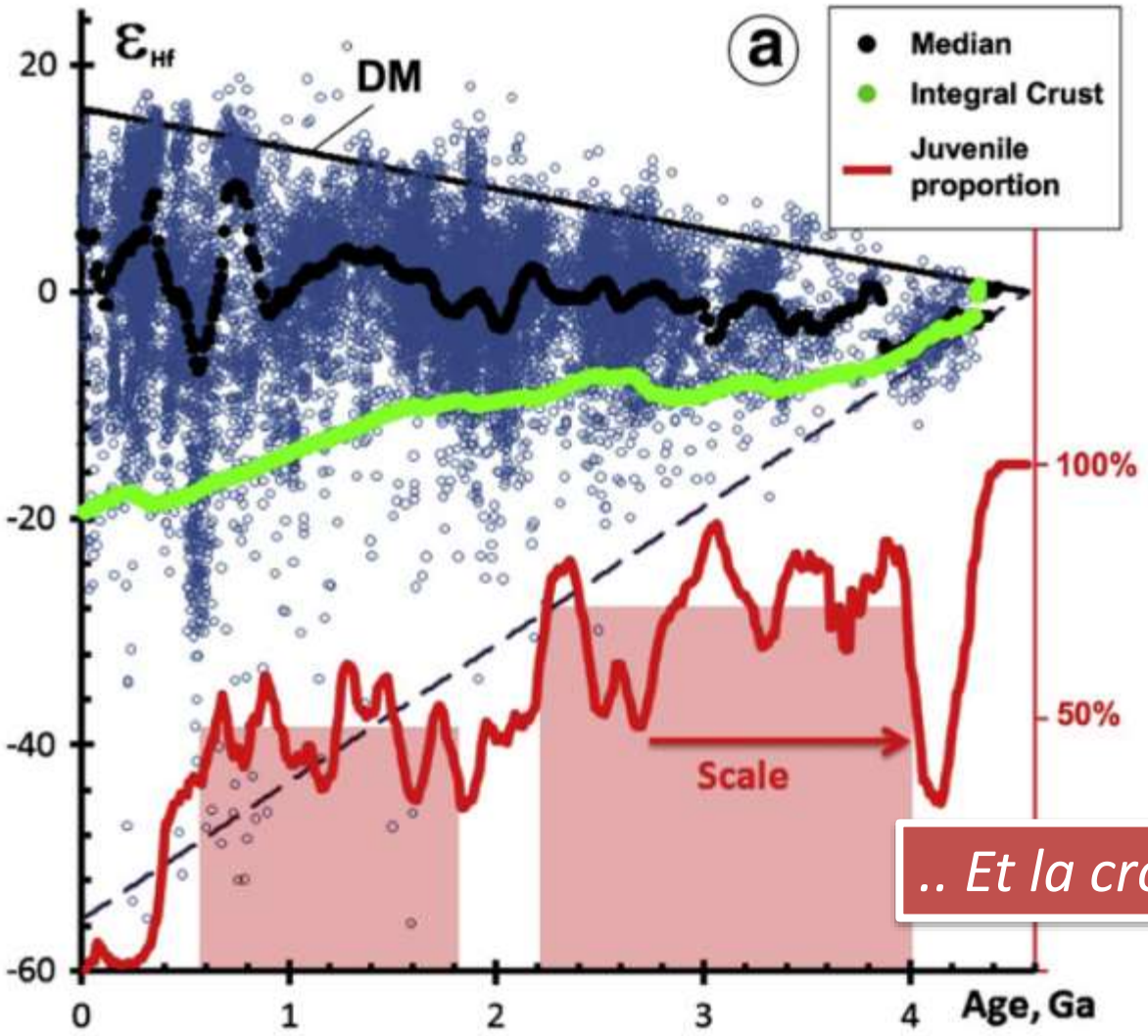
J. Tuzo Wilson
1908 – 1993

http://geollab.jmu.edu/Fichter/Wilson/wilsoncircl.html

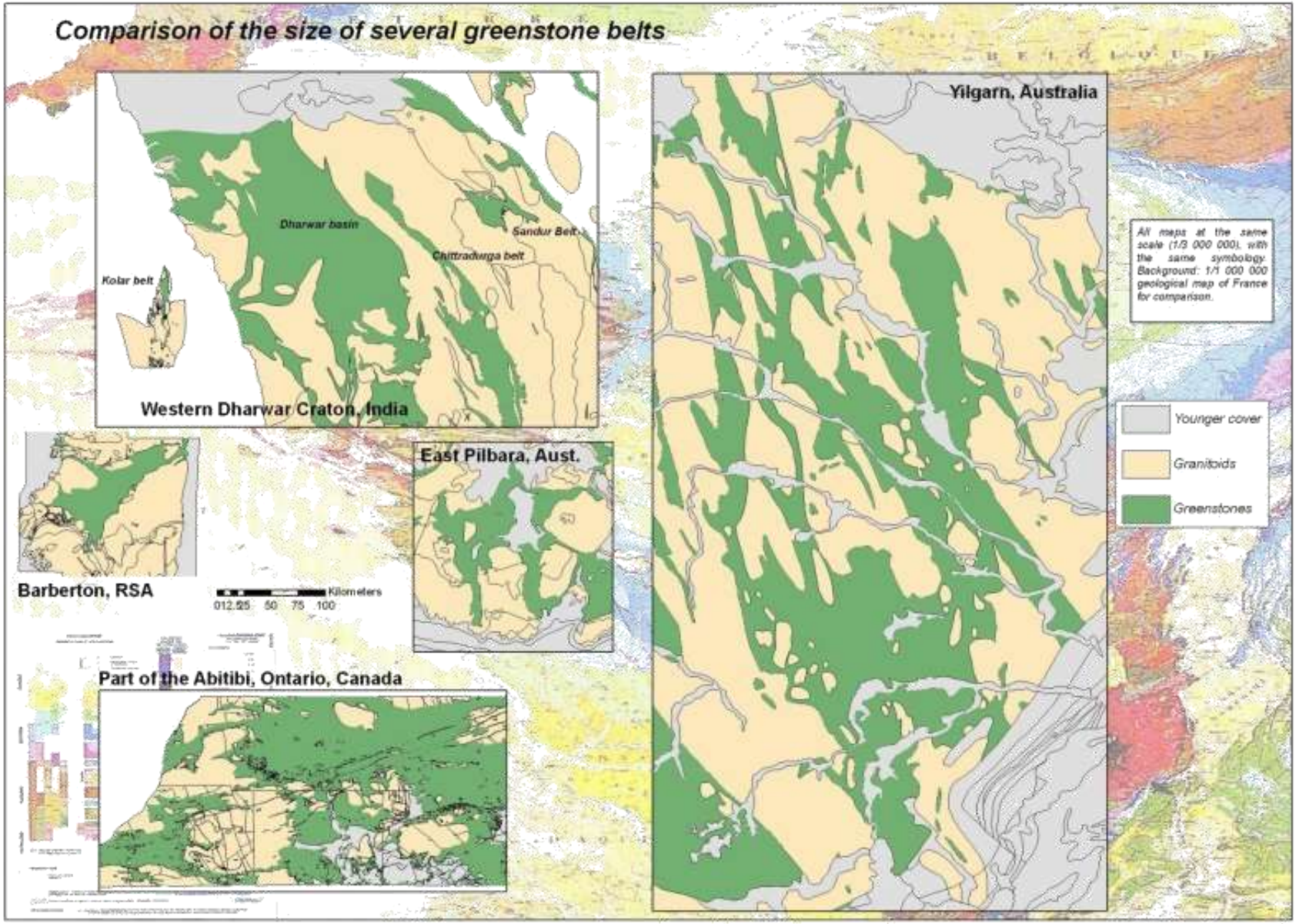
Chronologie de la croissance crustale

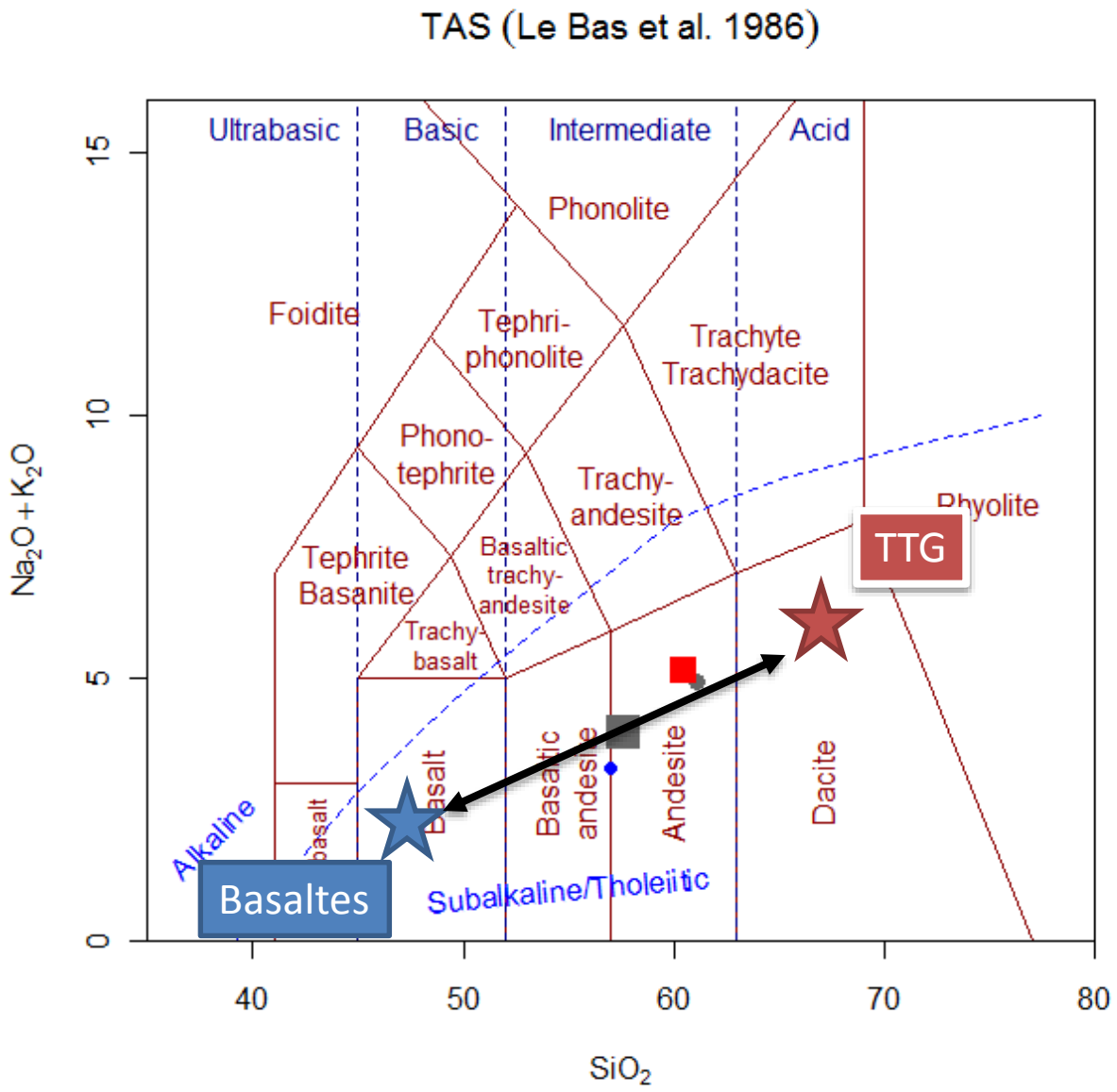


La croûte moderne est recyclée

- 

.. Et la croûte ancienne ?

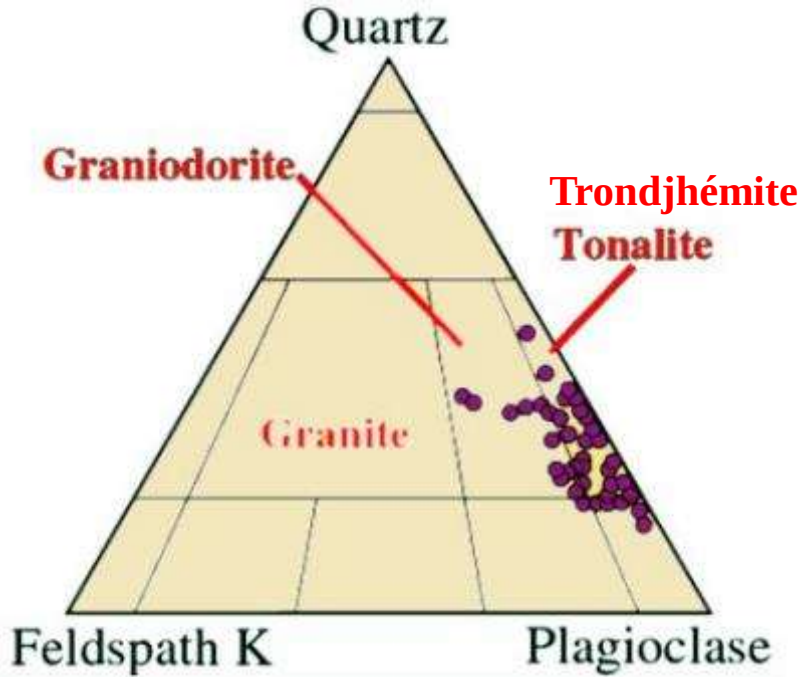

Comparison of the size of several greenstone belts
Dharwar basin
Sandur Belt
Chittradurga belt
Kolar belt
Western Dharwar Craton, India
Barberton, RSA
East Pilbara, Aust.
Kilometers
0 12.25 50 75 100
Part of the Abitibi, Ontario, Canada
Yilgarn, Australia
All maps at the same scale (1/3 000 000), with the same symbology. Background: 1/1 000 000 geological map of France for comparison.
Younger cover
Granitoids
Greenstones



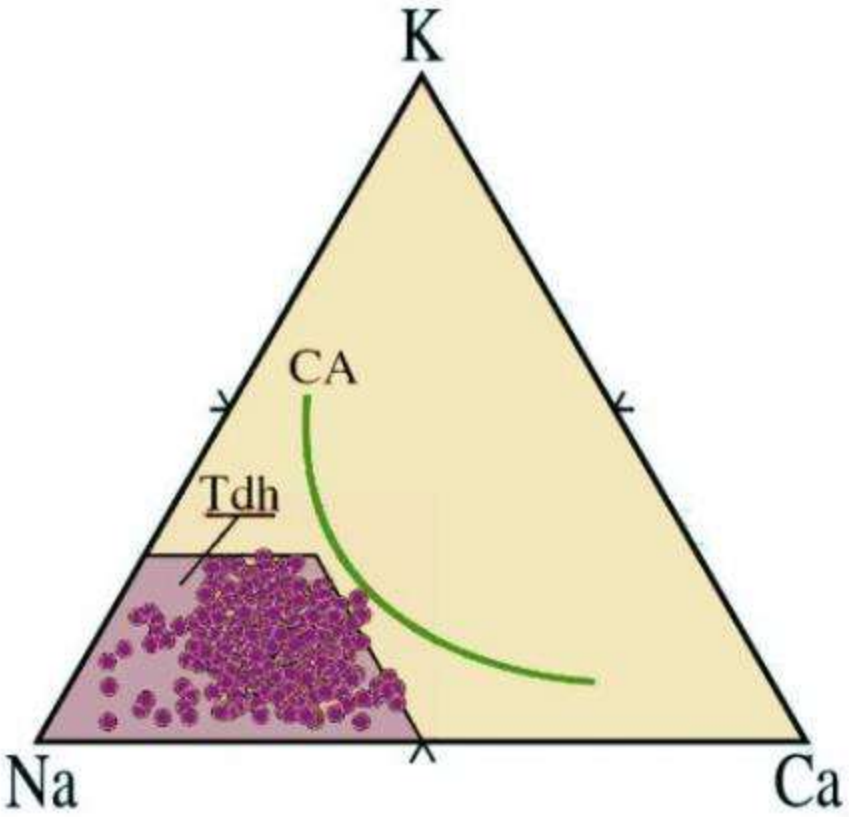
- Crt Archéenne = basaltes + TTG
- Différentiation minime, la crt à l'affleurement représente la croûte totale
- Granitoïdes juvéniles (≠ moderne !)

Gneiss gris et TTG

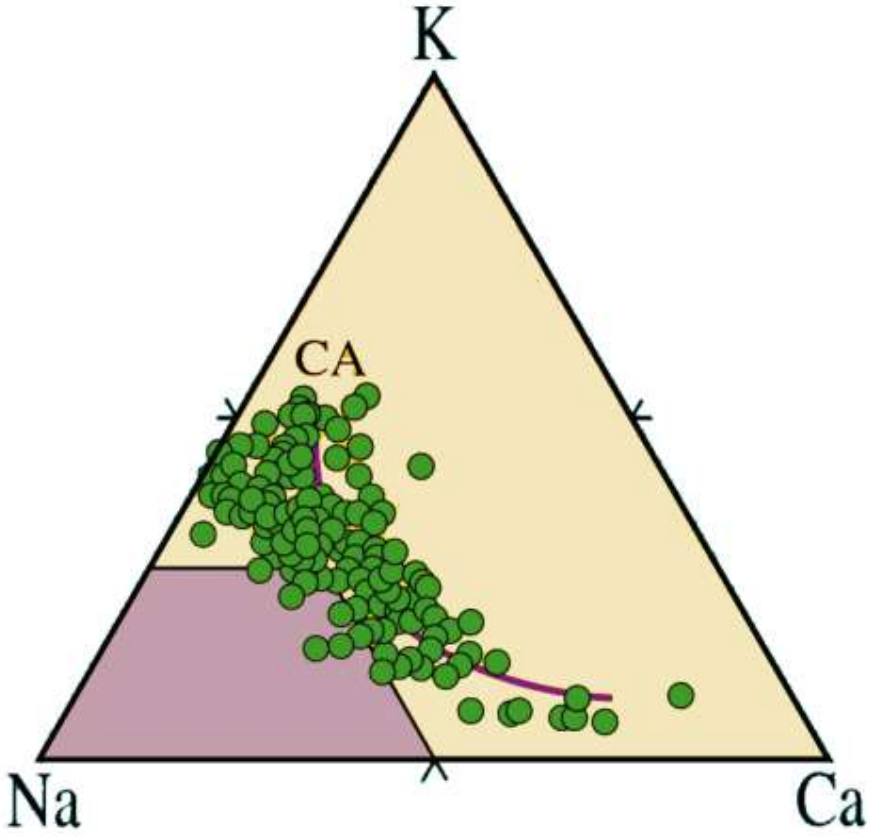
quartz
epidote
plagioclase
biotite

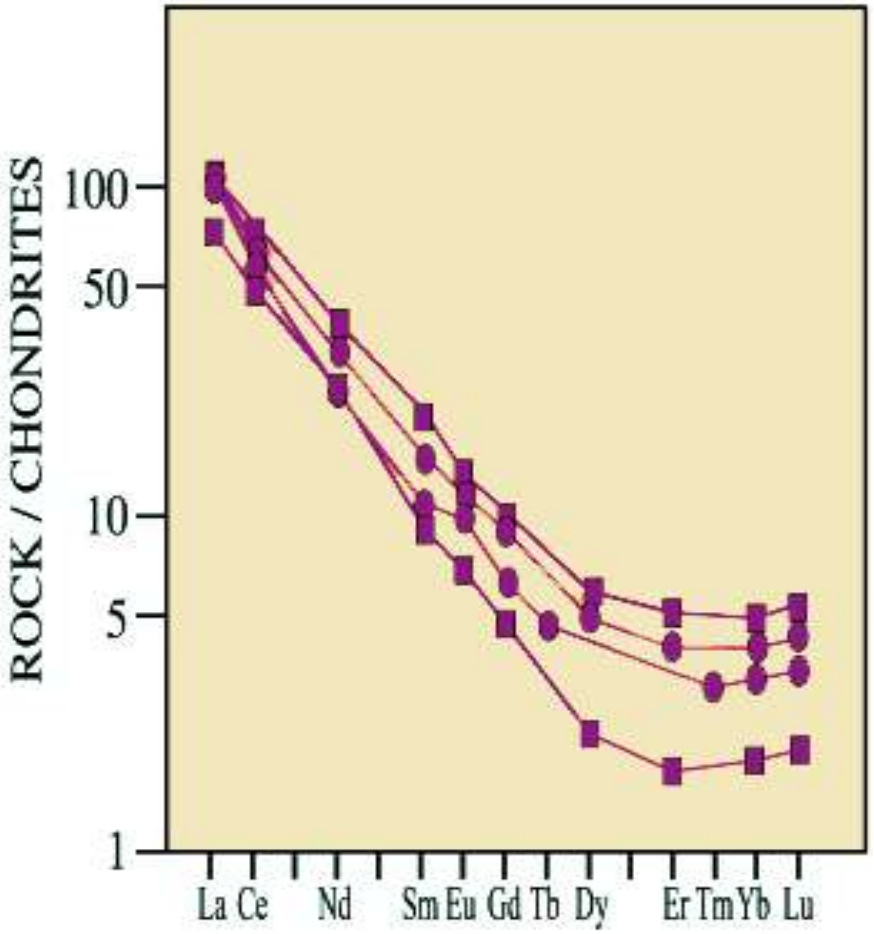

Quartz
Graniodorite
Trondjhémite
Tonalite
Granite
Feldspath K
Plagioclase

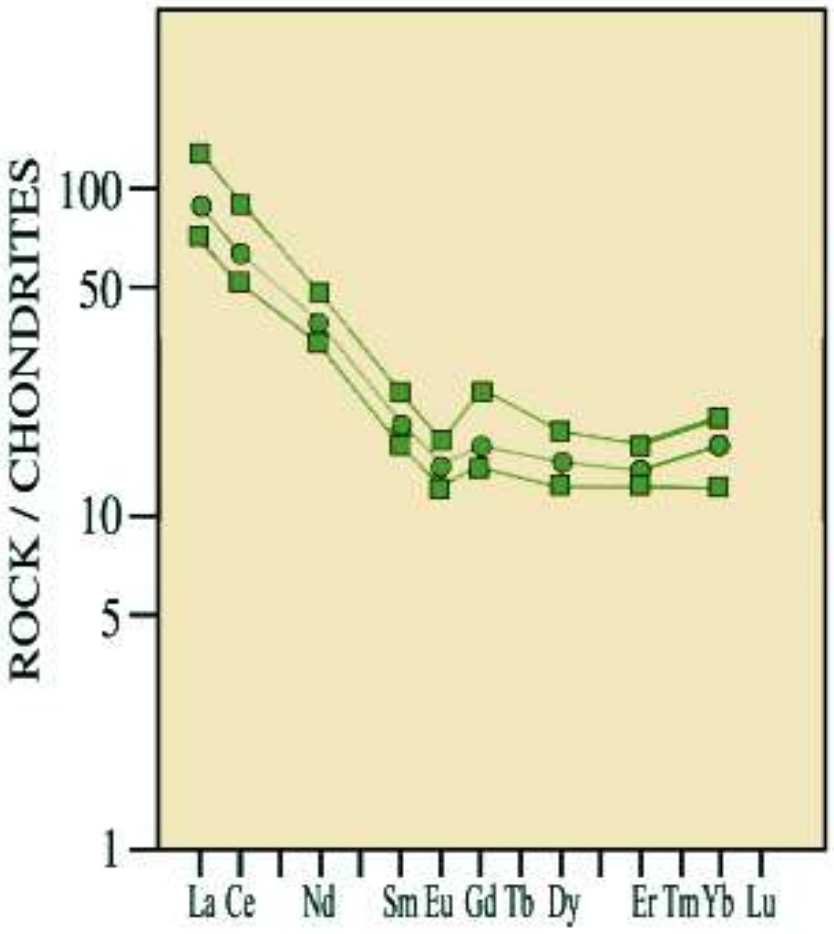
Archaean TTG



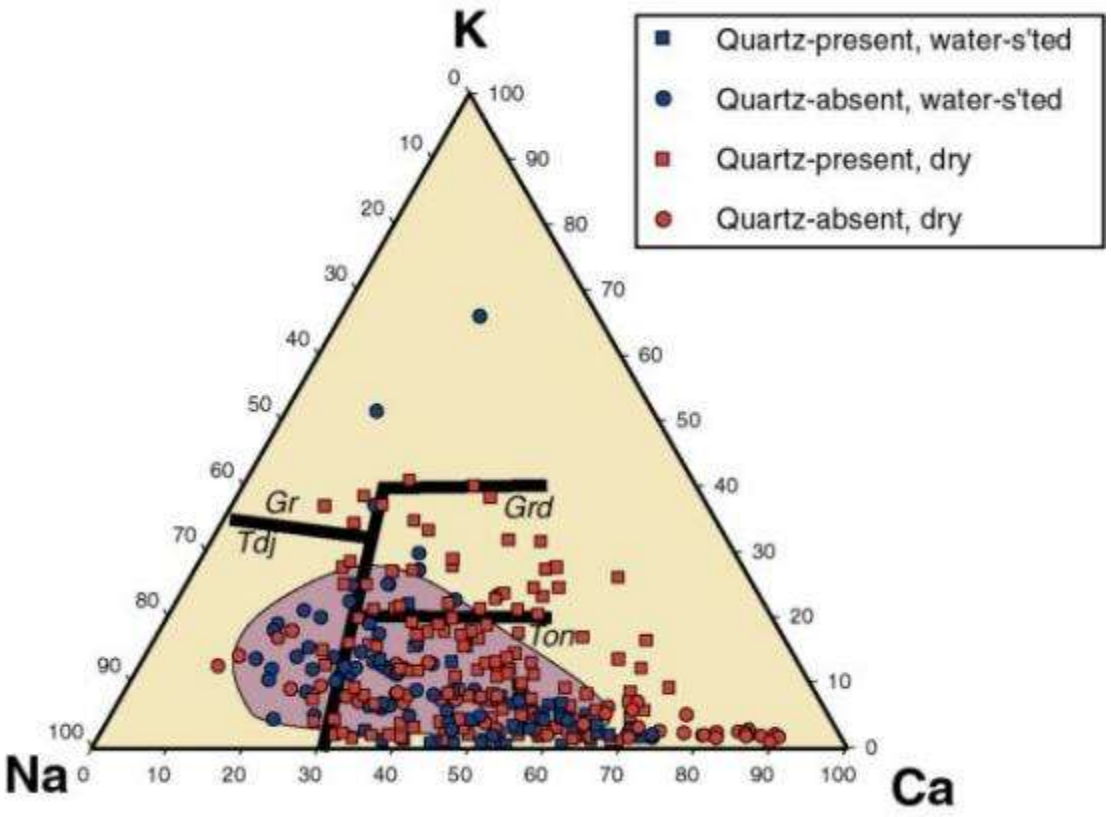
Modern granites



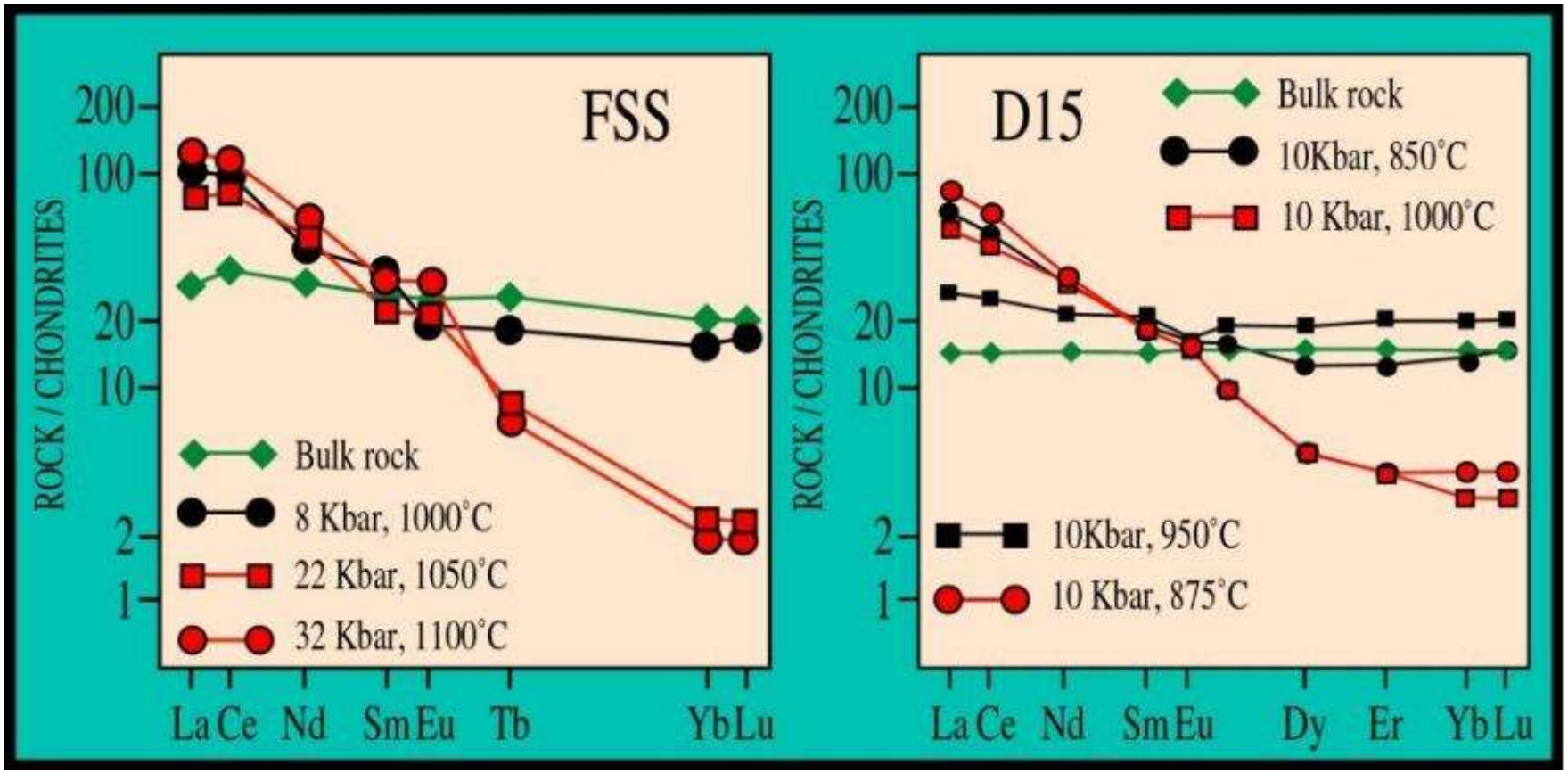

ROCK / CHONDRITES
100
50
10
5
1
La Ce Nd Sm Eu Gd Tb Dy Er Tm Yb Lu


ROCK / CHONDRITES
100
50
10
5
1
La Ce Nd Sm Eu Gd Tb Dy Er Tm Yb Lu

Données expérimentales



Traces dans liquides expérimentaux

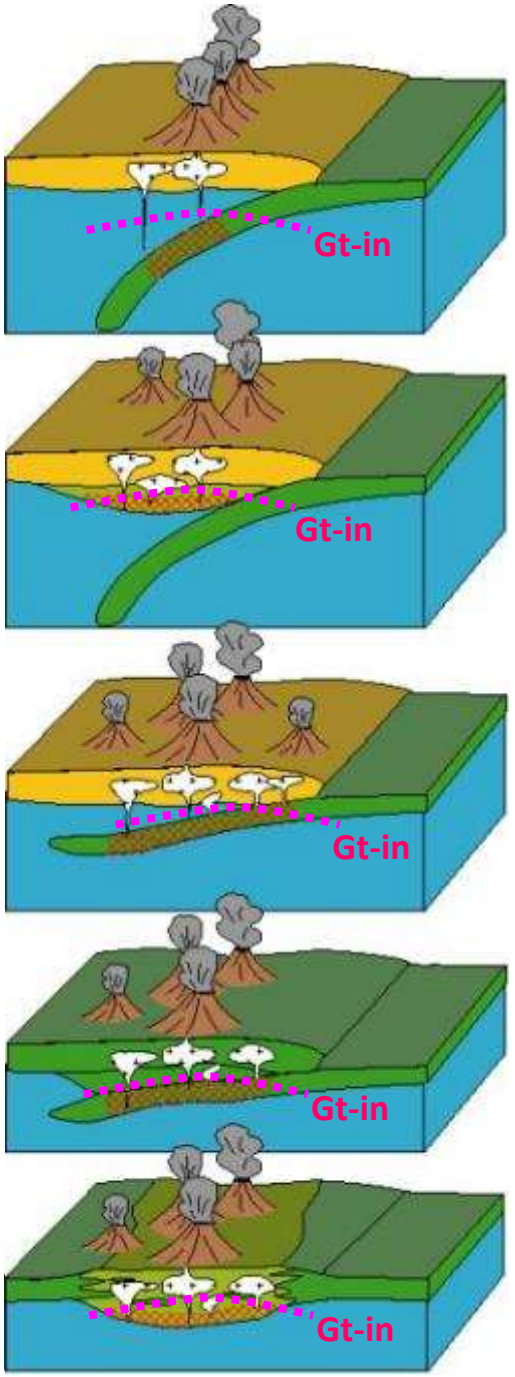


Geodynamic site ?

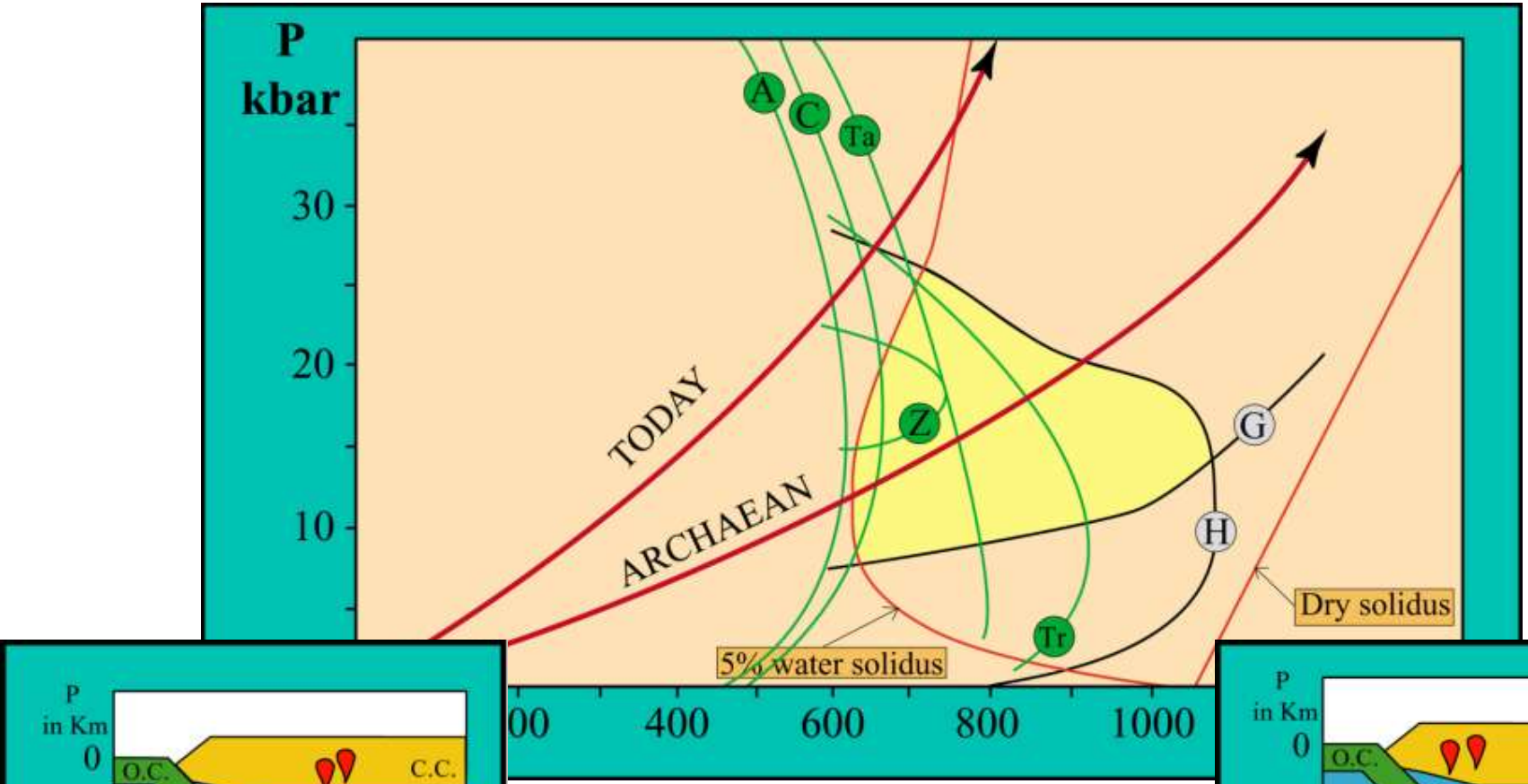
Subduction

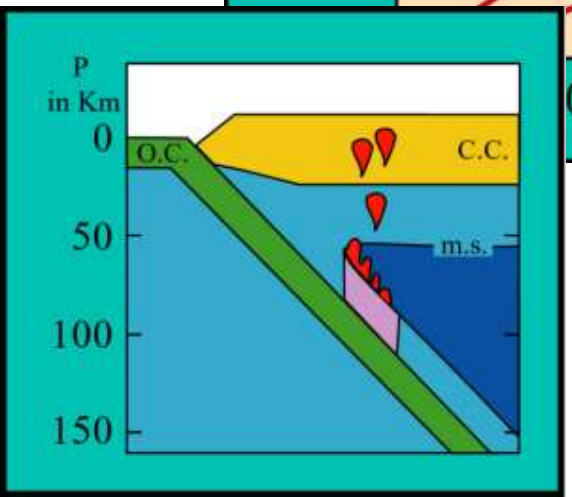
Intermediate cases:
- Shallow subduction
  (± underplating)
- Stacked oceanic crust

Thick (oceanic or continental) crust
(e.g. Oceanic plateau)



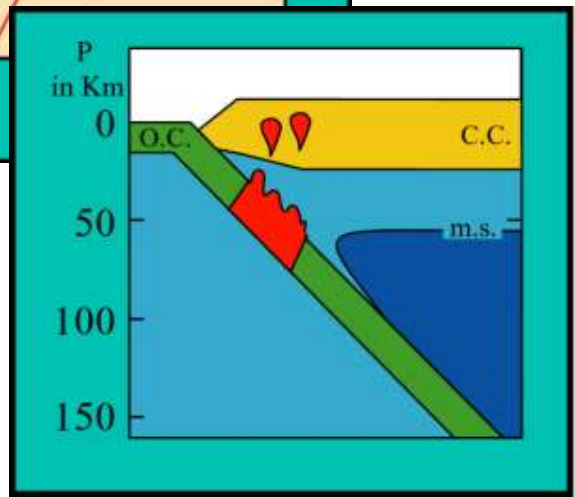
Subduction chaude?

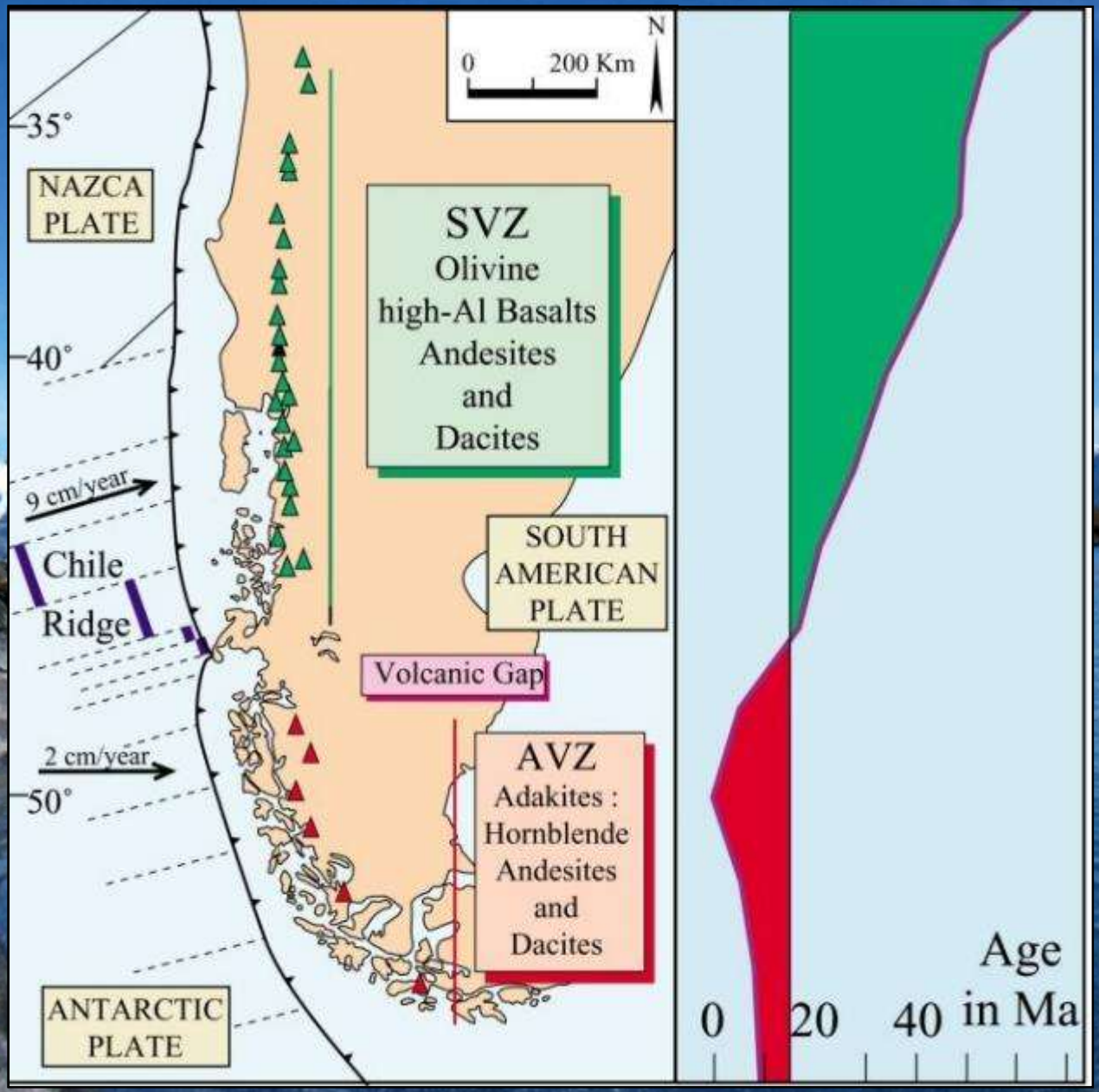




TODAY

ARCHAEAN



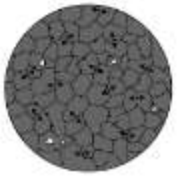

N
0
200 Km
35°
NAZCA PLATE
40°
9 cm/year
Chile Ridge
2 cm/year
50°
ANTARCTIC PLATE
SVZ
Olivine high-Al Basalts Andesites and Dacites
SOUTH AMERICAN PLATE
Volcanic Gap
AVZ
Adakites : Hornblende Andesites and Dacites
0
20
40
Age in Ma

Croûte Archéenne

- Largement juvénile
- Mal stratifiée
  - Granitoïdes TTG
  - Basaltes
- Granitoïdes primitifs TTG

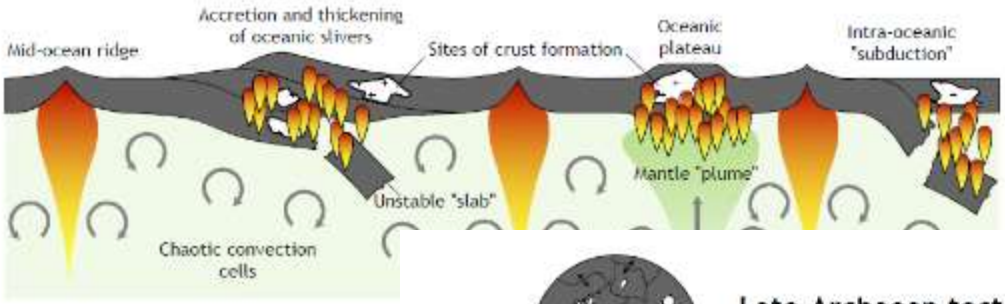
Croûte moderne

- Largement recyclée
- Bien stratifiée
  - Couverture sédimentaire
  - Granites et gneiss
  - Granulites « résiduelles »
- Granitoïdes différenciés et/ou remaniement



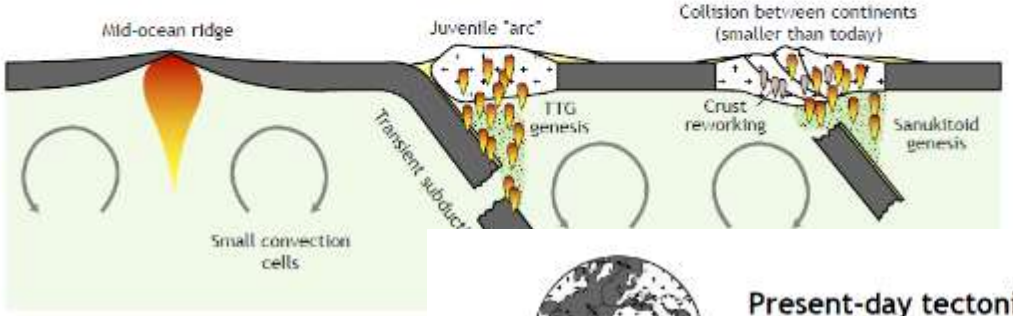
Archaean tectonics : 4400/4000 (?) - 3000 Ma

Oceanic crust
Continental crust
Juvenile continental magmatism



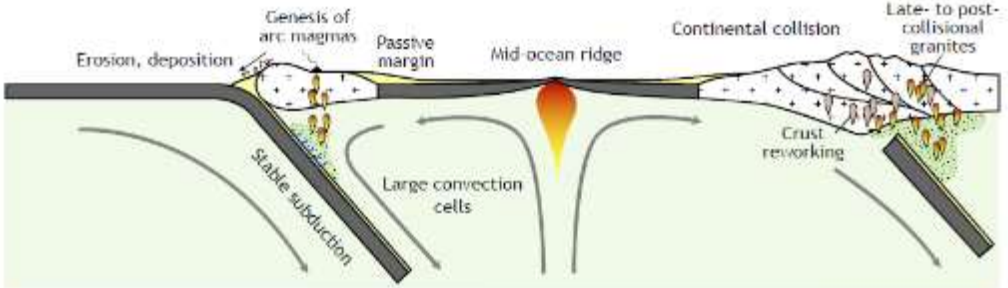
Late-Archaean tectonics : 3000 - 2500 Ma

Oceanic crust
Continental crust
Juvenile continental magmatism



Present-day tectonics : 2500 Ma - today

Oceanic crust
Continental crust
Juvenile continental magmatism

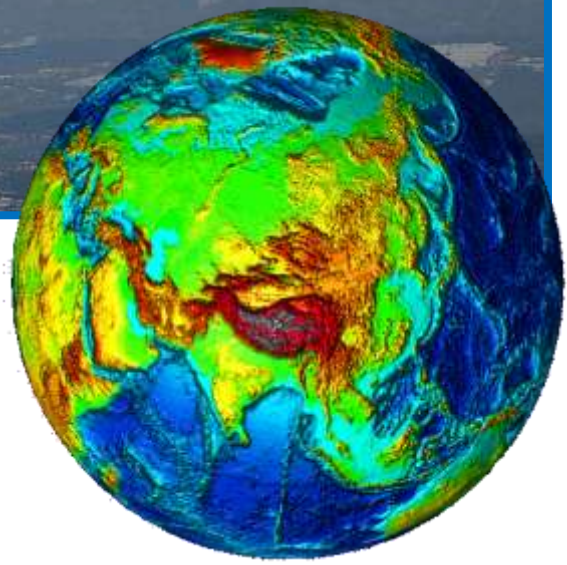


Merci !
Août 2010 – Les difficultés de l'étude de la croûte Archéenne

MONTAGNES : COLOSSES AU CŒUR TENDRE

Olivier VANDERHAEGHE
olivier.vanderhaeghe@univ-lorraine.fr

Le Massif du Mont Blanc, Chaîne Alpine



AFPSVT Colloque « Croûte Continentale », Paris, 14 janvier 2014

Des pionniers…

(De Saussure, 1779 Voyages dans les Alpes)

Des pionniers…

Coupe des Alpes

(Argand 1911)

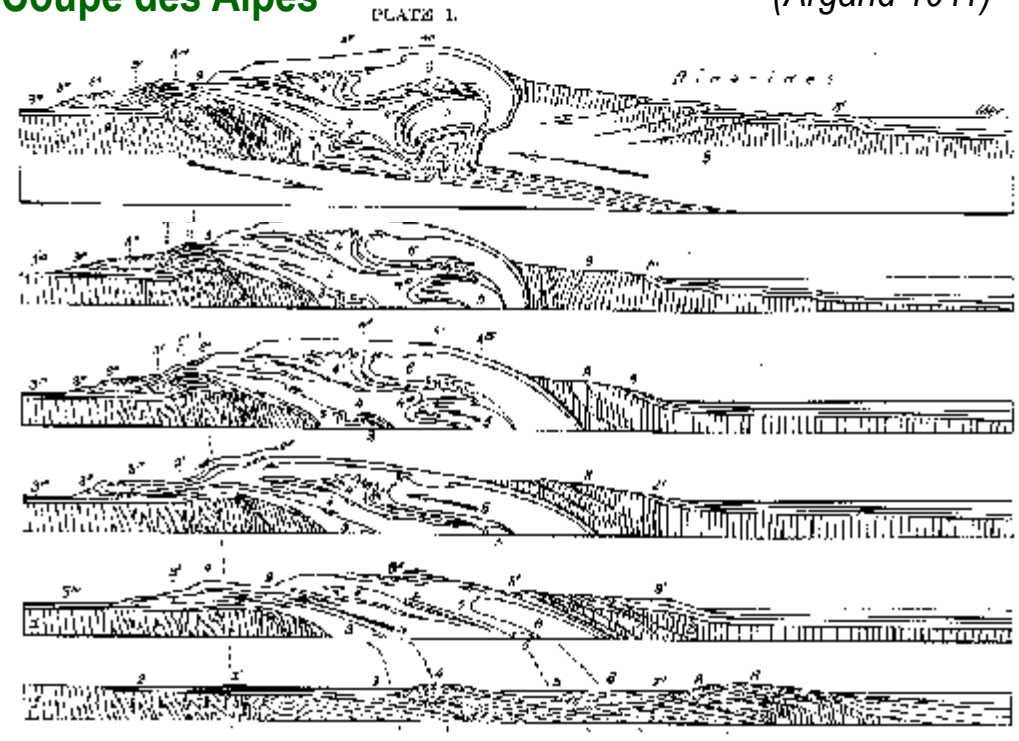
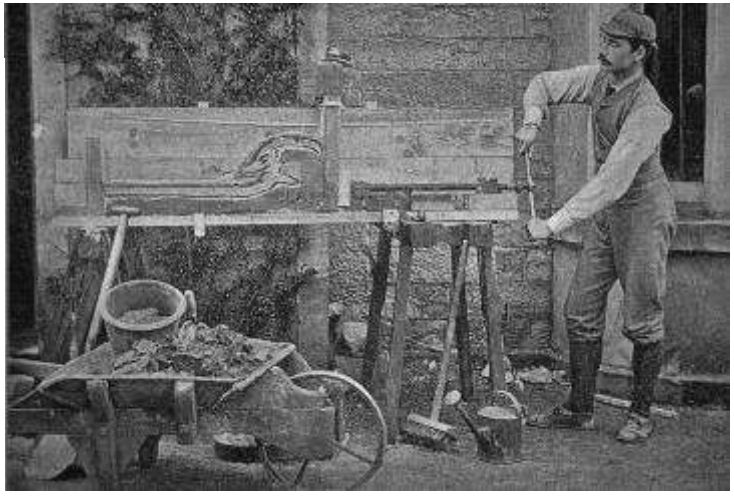


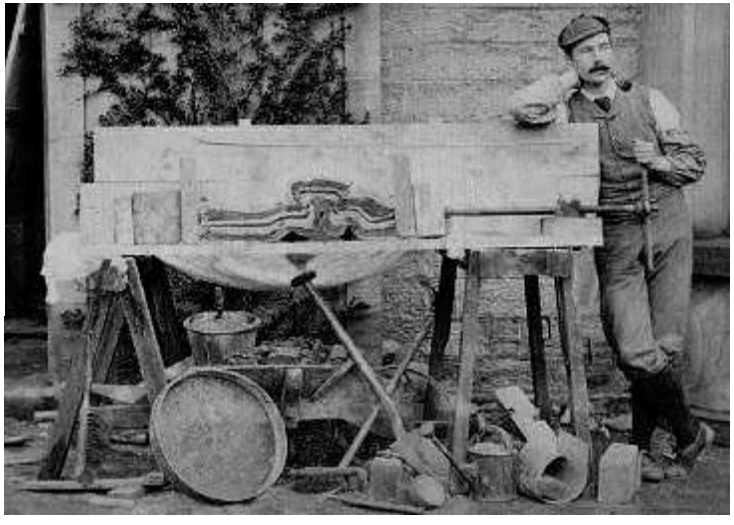
Schéma d'évolution tectonique

Les montagnes se soulèvent en réponse à la collision des continents …

Modélisation analogique

(Henry M. Cadell, 1889
Experiments in mountain building)

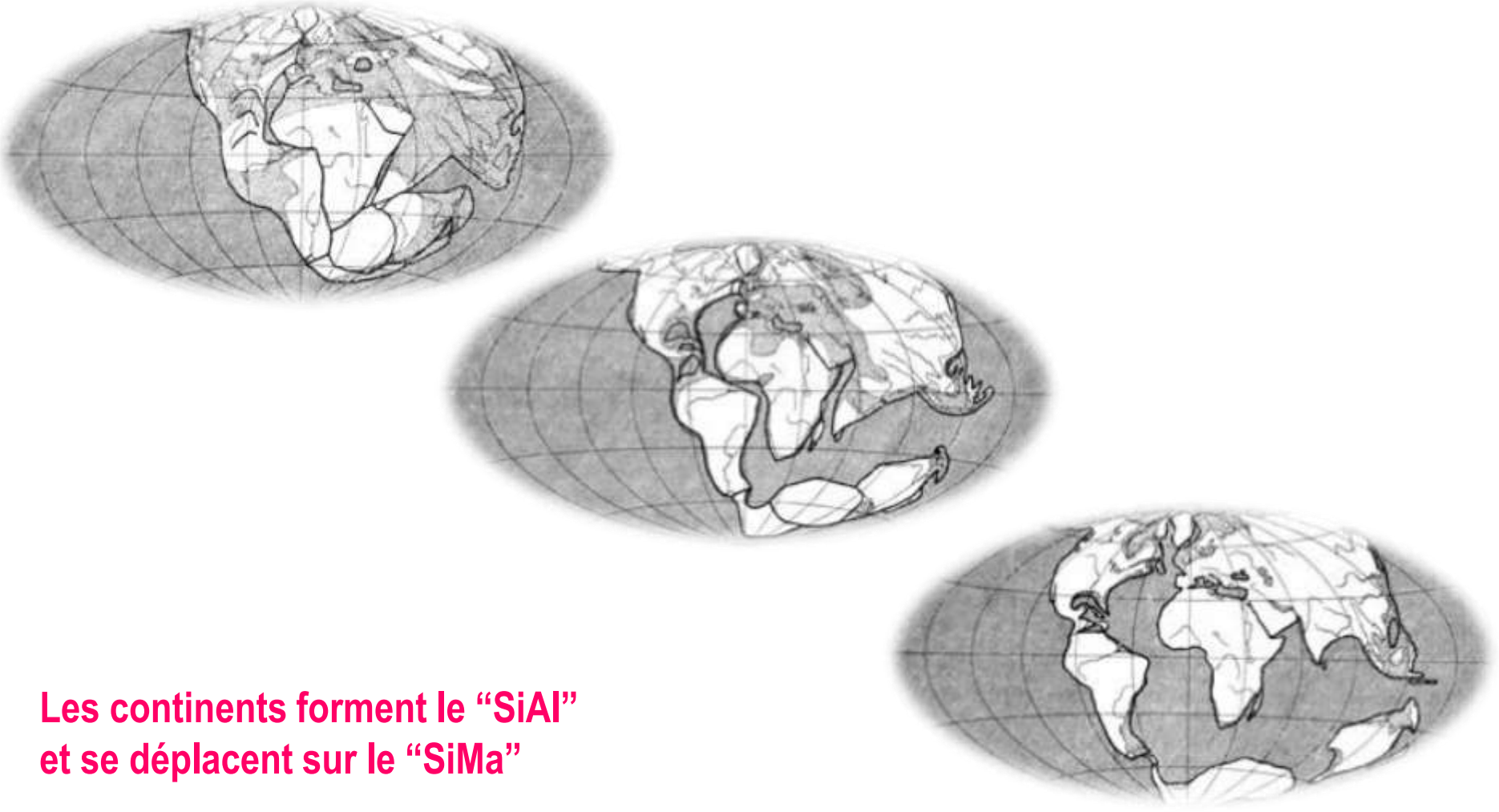




…à la tectonique du camembert!

…mais la croûte ramollie flue sous l'effet de la gravité!

De la dérive des continents…



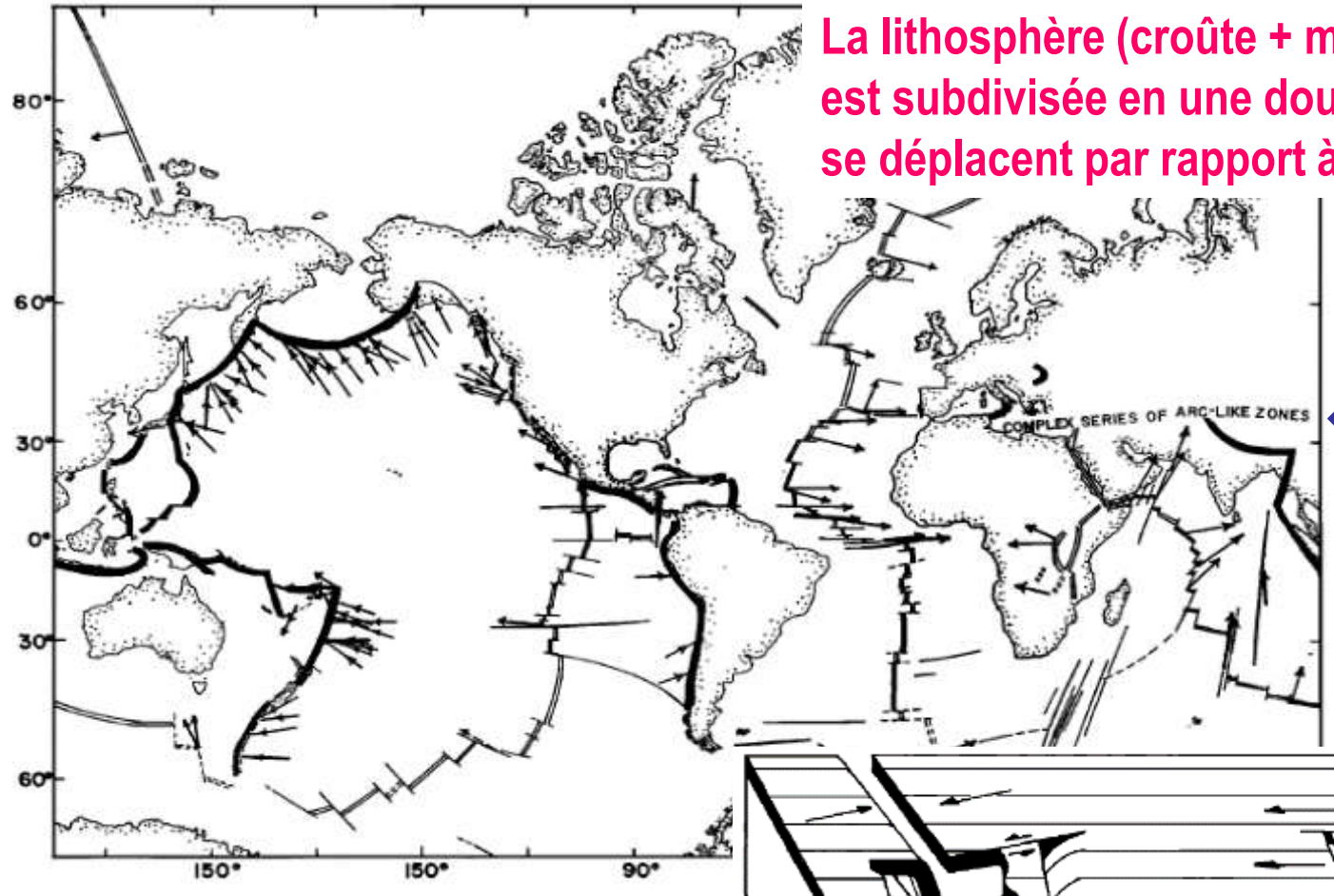
Les continents forment le “SiAl”
et se déplacent sur le “SiMa”

(Wegener, 1912)

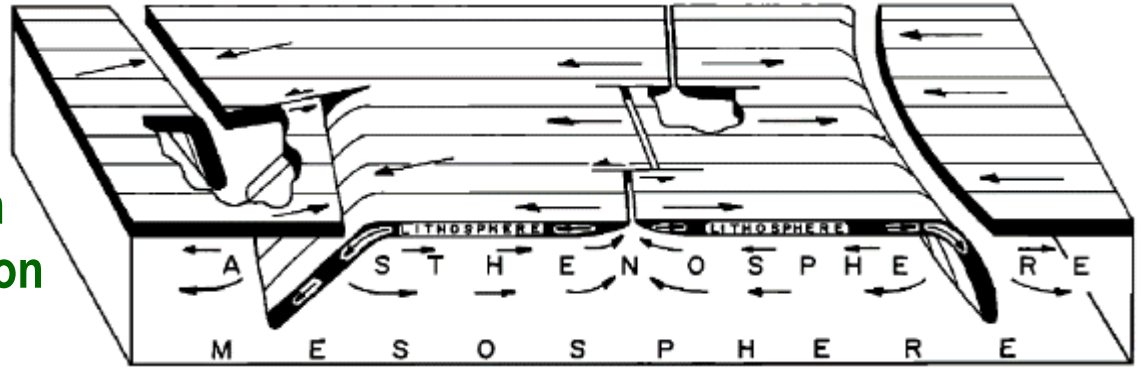
…à la tectonique des plaques.

(Isacks et al., 1968; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968)

La lithosphère (croûte + manteau lithosphérique) est subdivisée en une douzaine de plaques qui se déplacent par rapport à l'Asthénosphère



Chaînes de montagnes?



- **Divergence: Dorsales-Extension**
- **Convergence: Fosses-Subduction**

Tectonique des plaques

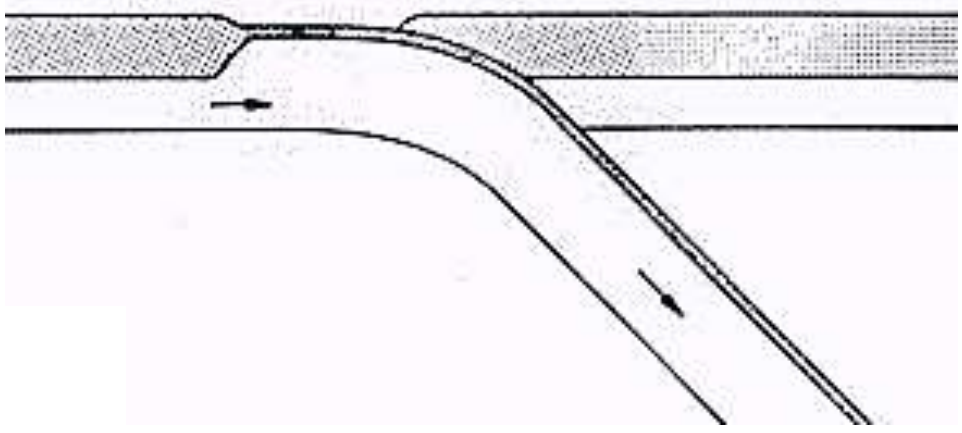
Subduction/Collision

La convergence est accommodée par subduction

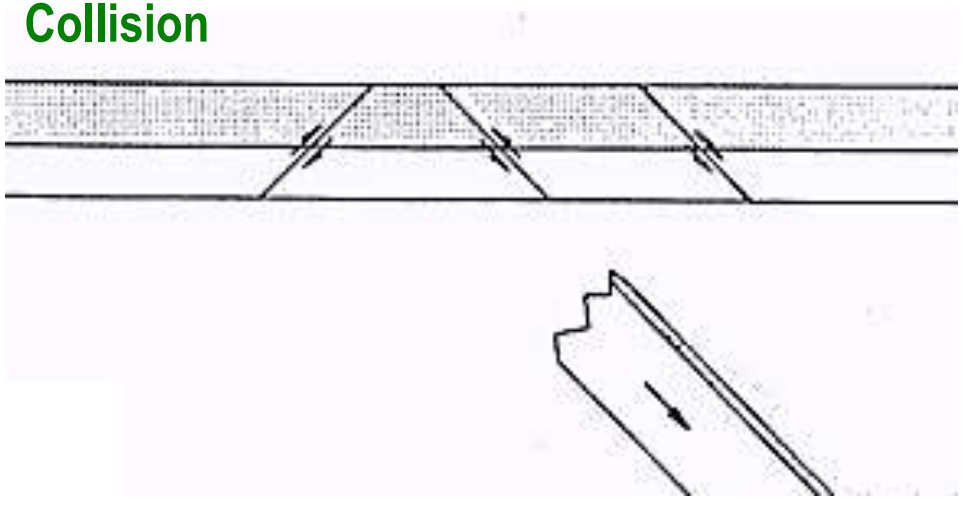
La subduction est suivie de la collision

La croûte continentale n'est pas assez dense pour subducter

Subduction



Collision



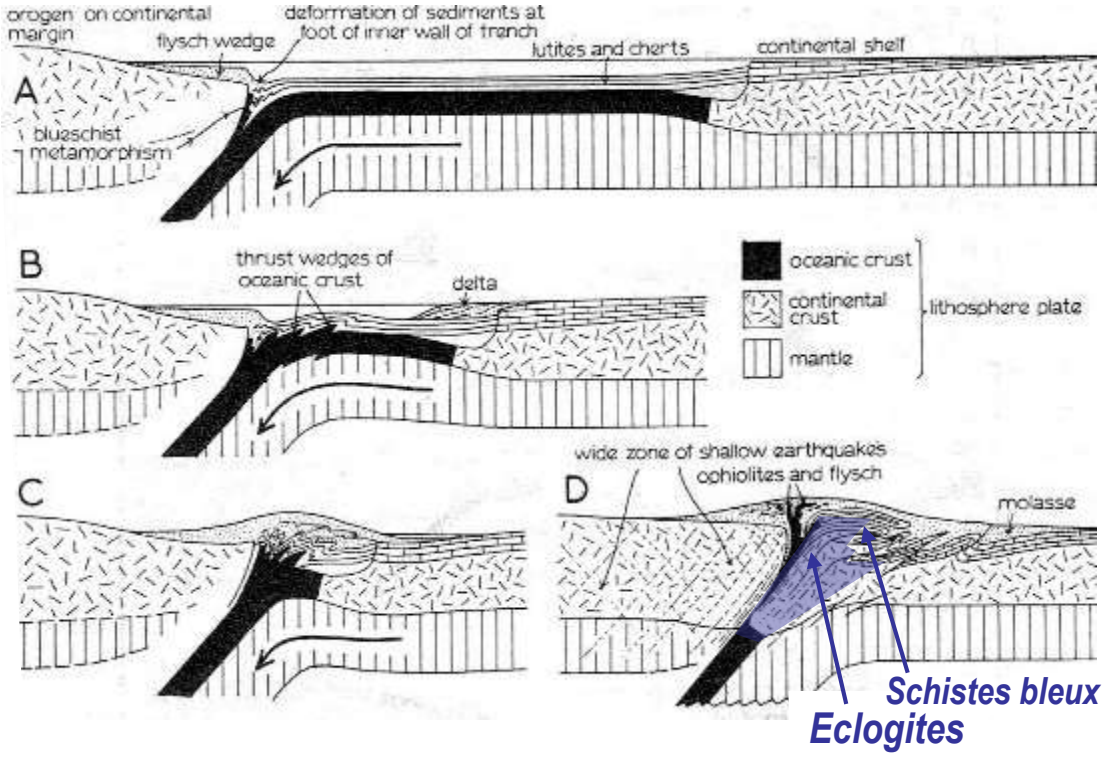
(Mc Kenzie, 1969)

Tectonique des plaques et orogénèse

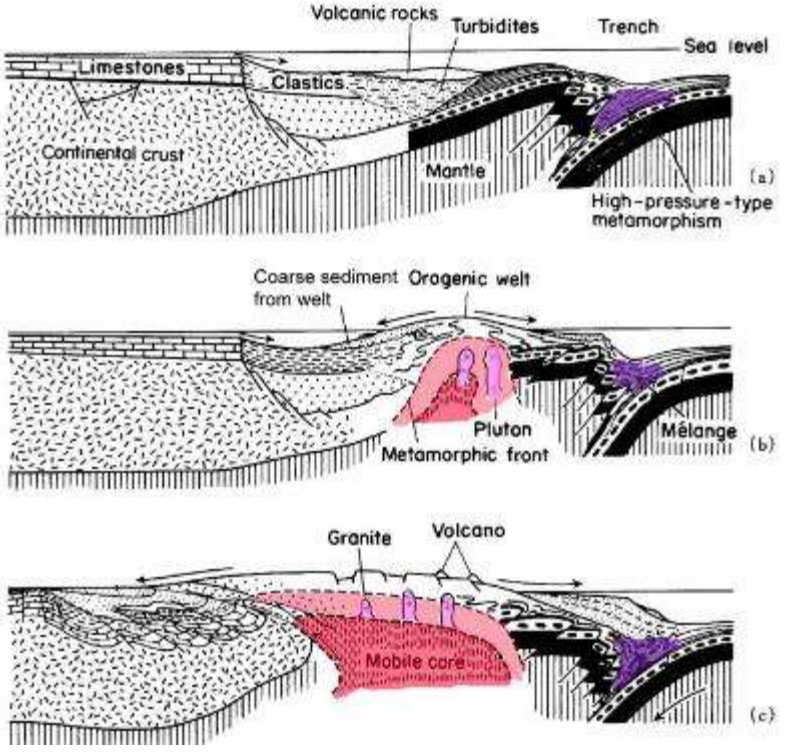
Enregistrement géologique de la transition subduction/collision

(Dewey & Bird, 1970)

Chaînes de collision : Alpes-Himalayas



Chaînes de Subduction : Cordillères



Sédimentation: ***Flysch/Molasse***

Déformation: ***Ophiolites/Nappes***

Métamorphisme: ***Schistes bleux-Eclogites HP/BT***

Métamorphisme:

- ***Schistes bleux-Eclogites HP/BT***
- ***Amphibolites (Migmatites) HT***

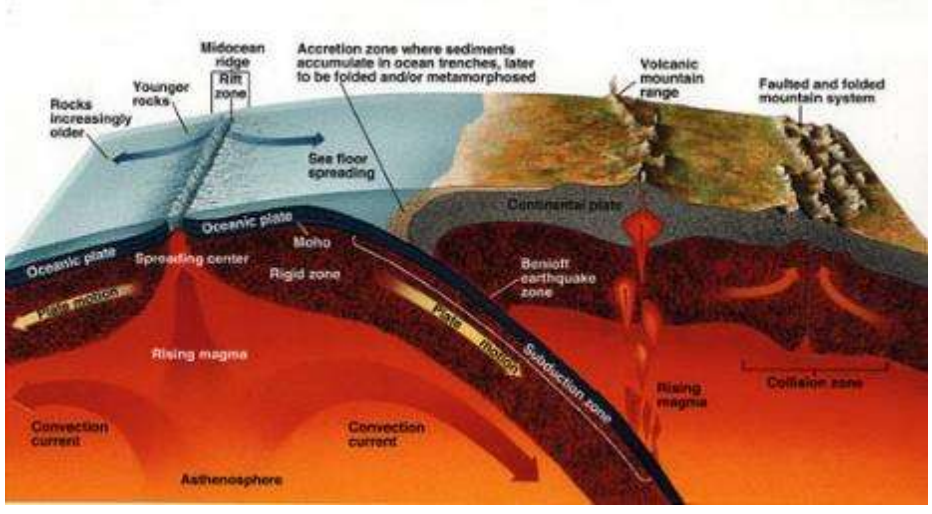
Magmatisme

Le paradigme actuel

Formation des chaînes de montagnes:

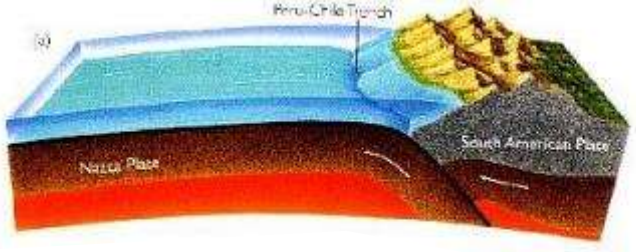
- Collision continentale
- Accrétion magmatique

} le long des zones de convergence de plaques

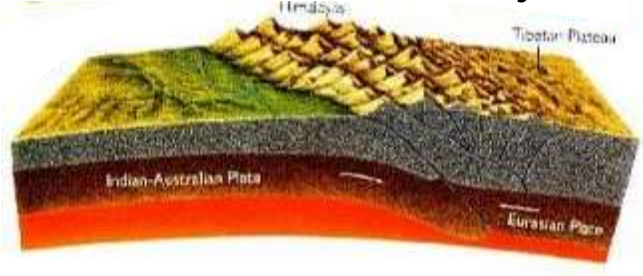


Cordillères Ouest Pacifique: *Mariannes*

Cordillères Est Pacifique: *Andes*



Chaînes de collision: *Himalayas-Tibet*

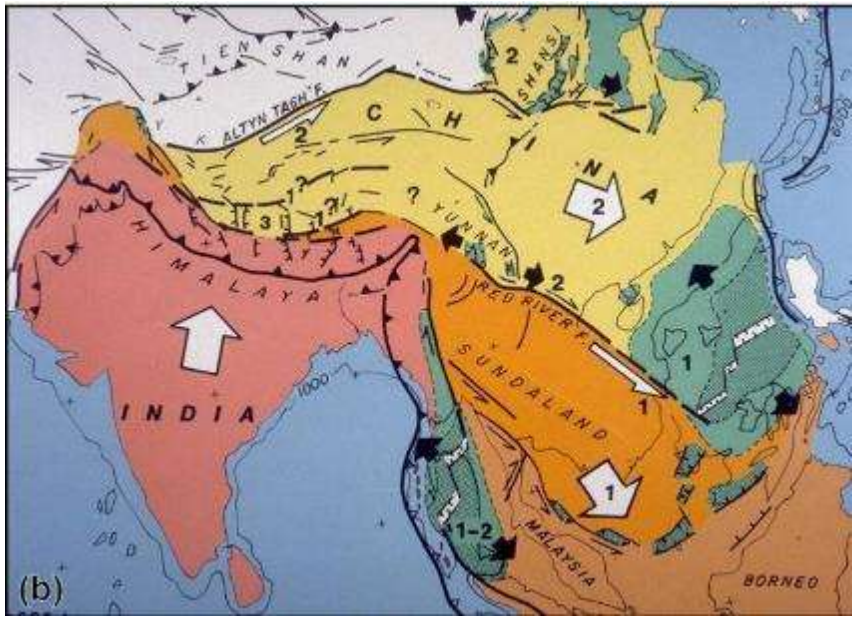


Le paradigme actuel

Formation des chaînes de montagnes:

Collision continentale *(à l'échelle crustale)*:

- Poinçonnement rigide et extrusion latérale accommodée par déformation localisée
- Corrélation entre cinématique des plaques et déformation continentale



(Tapponnier & Molnar, 1985)

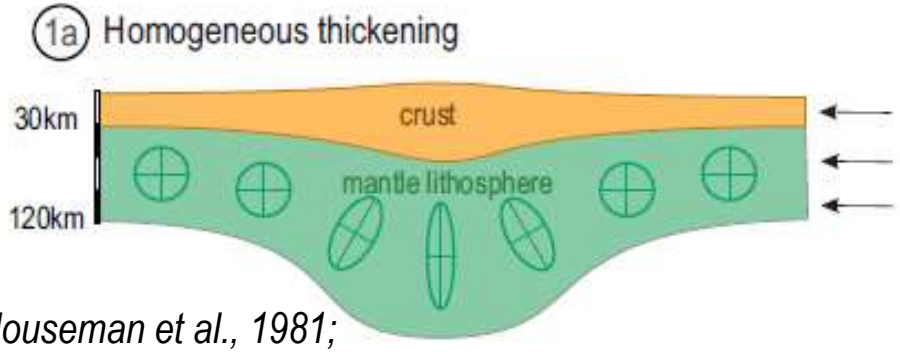
(Tapponnier et al. 1982)

La gravité n'est pas prise en compte!

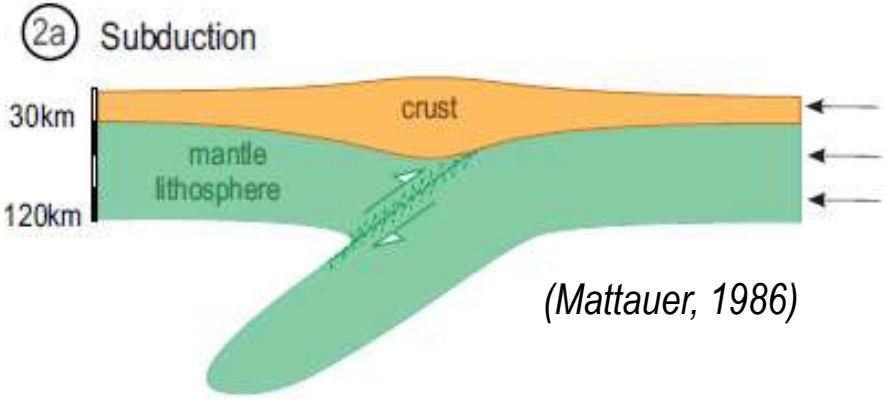
Le paradigme actuel

Formation des chaînes de montagnes:

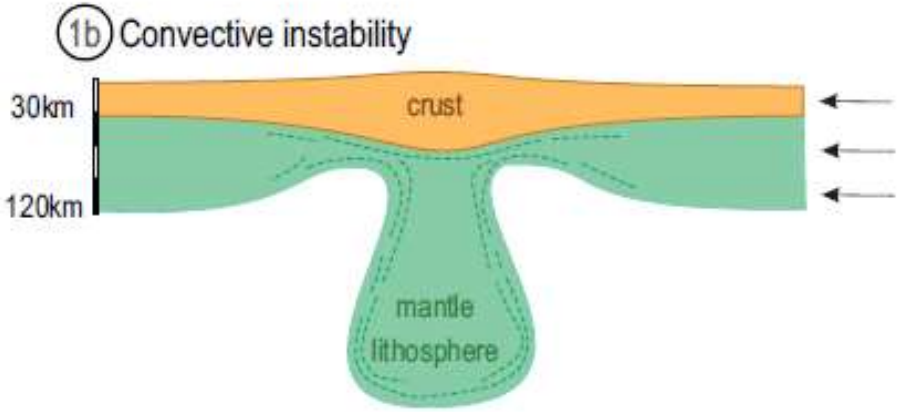
Collision continentale *(à l'échelle lithosphérique)*

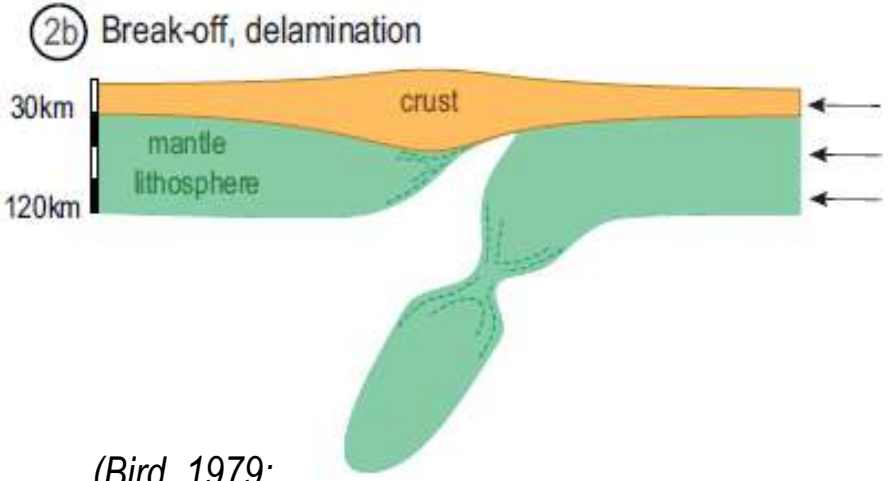


(Houseman et al., 1981; Houseman & Molnar, 1997)



(Mattauer, 1986)

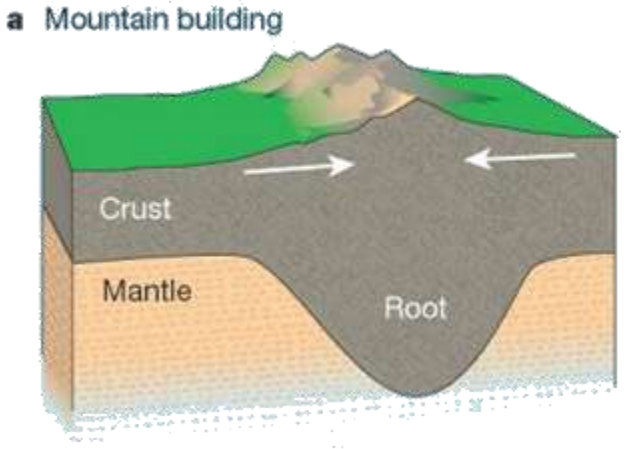


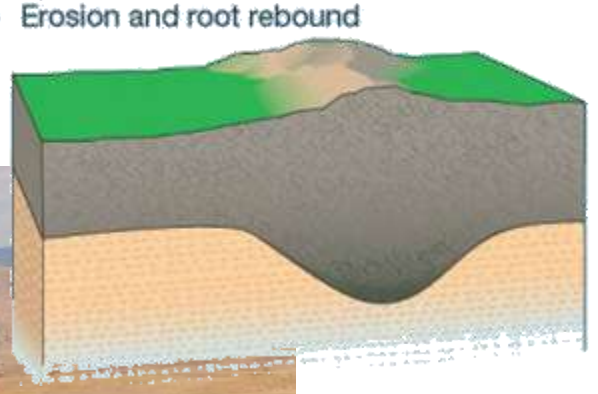


(Bird, 1979; Davies & Von Blanckenburg, 1995)

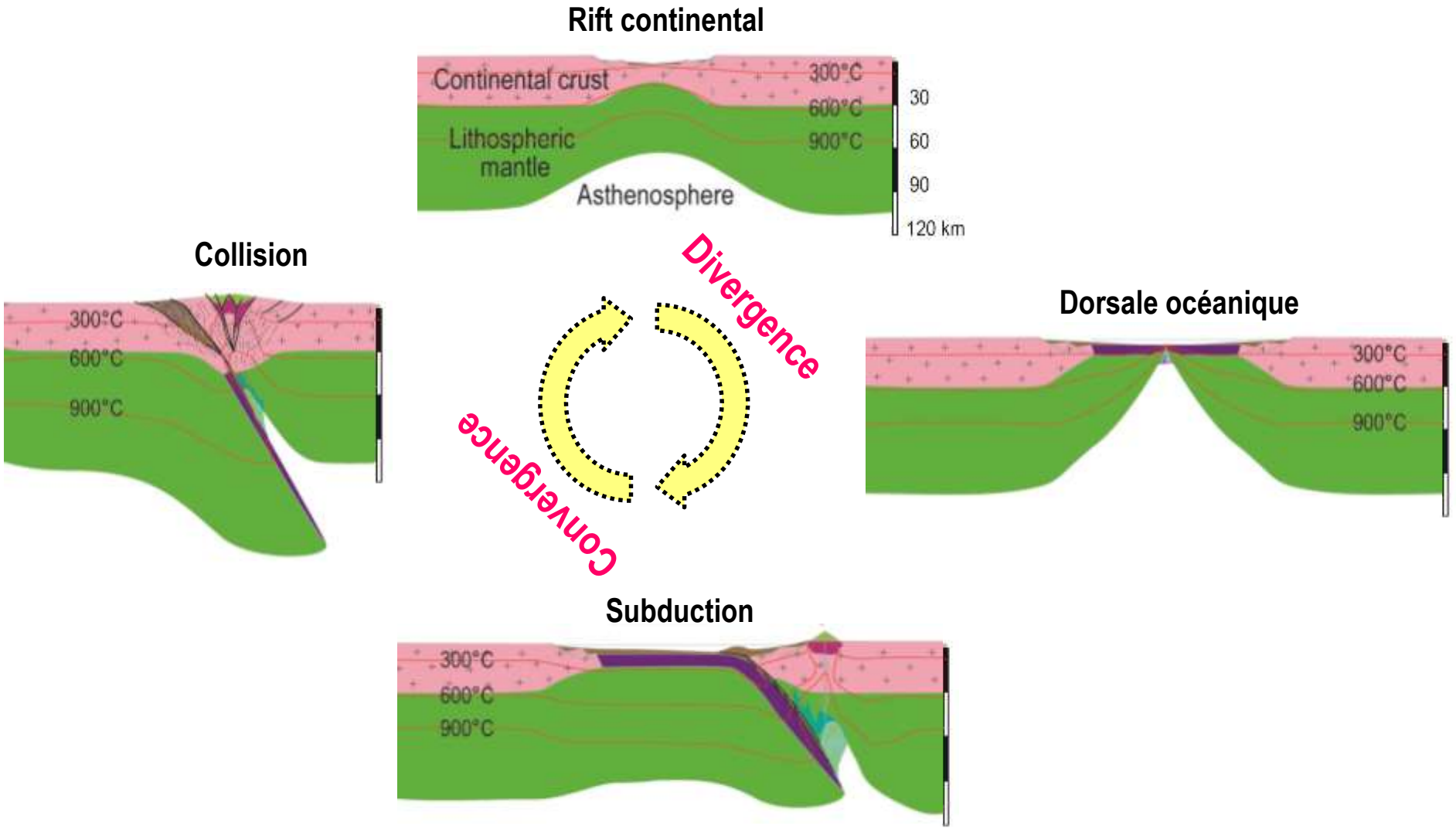
Le paradigme actuel:

Destruction des montagnes: Erosion et rebond isostatique

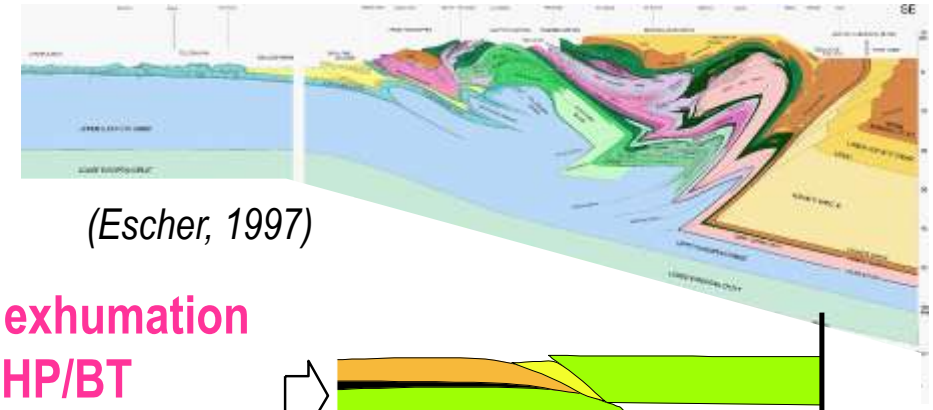




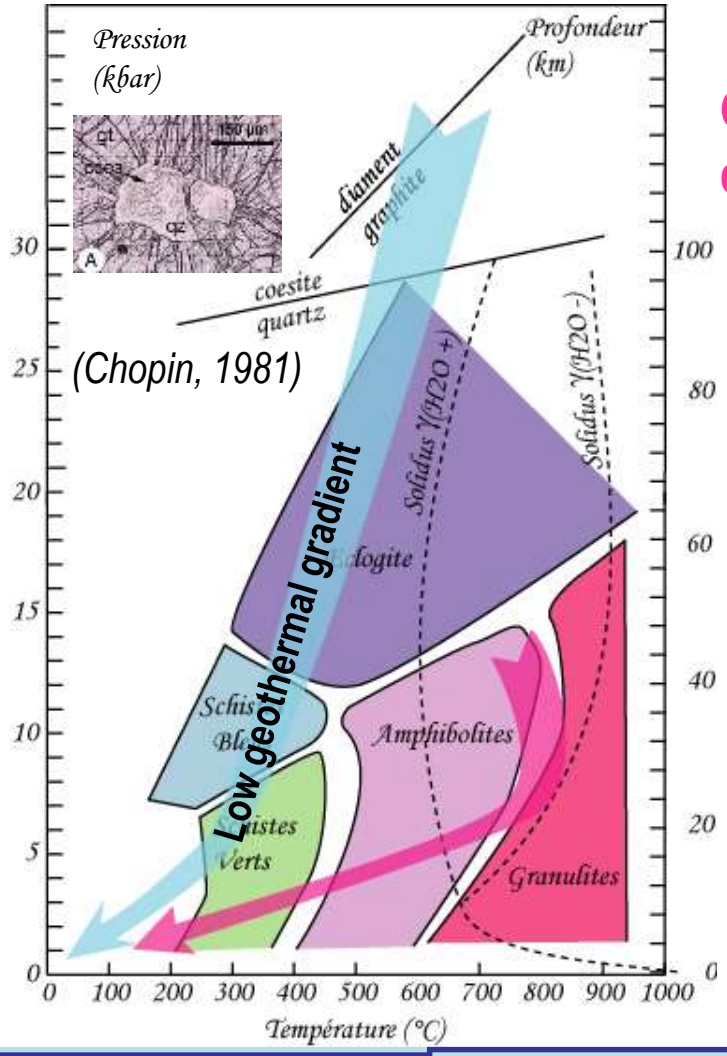
Le cycle orogénique de Wilson



Evolution thermomécanique des orogènes

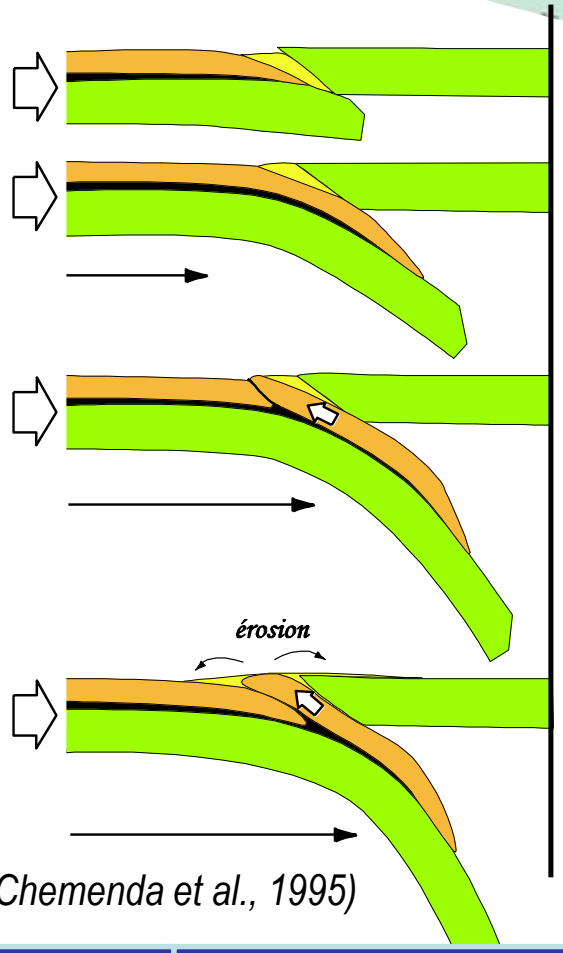


(Escher, 1997)



(Chopin, 1981)

Genèse et exhumation de roches HP/BT

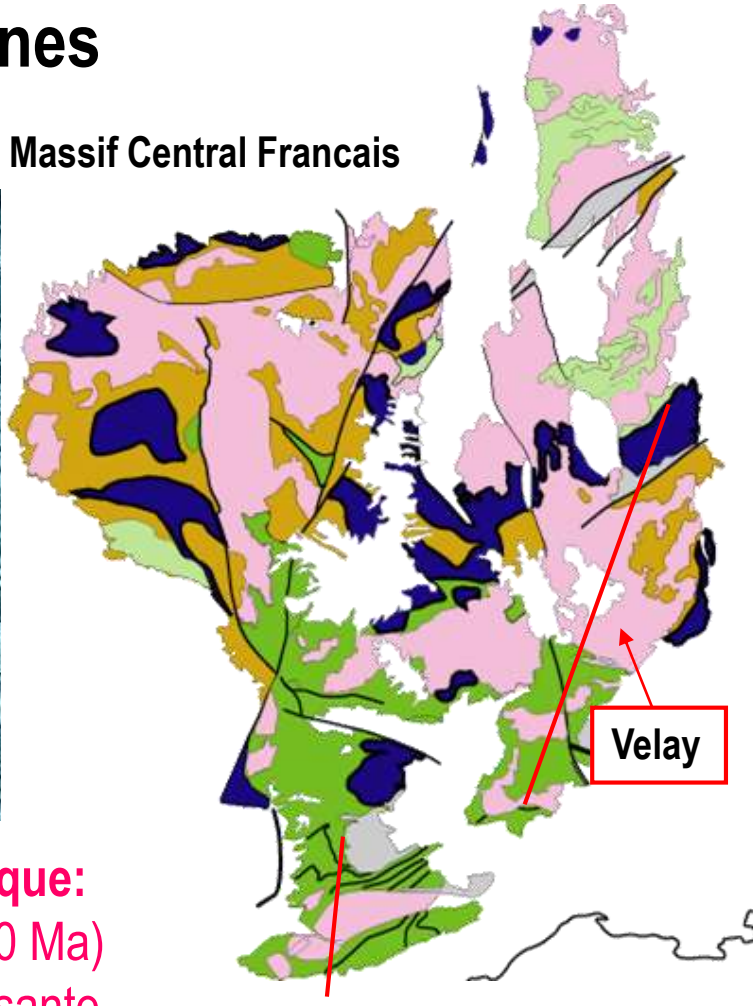


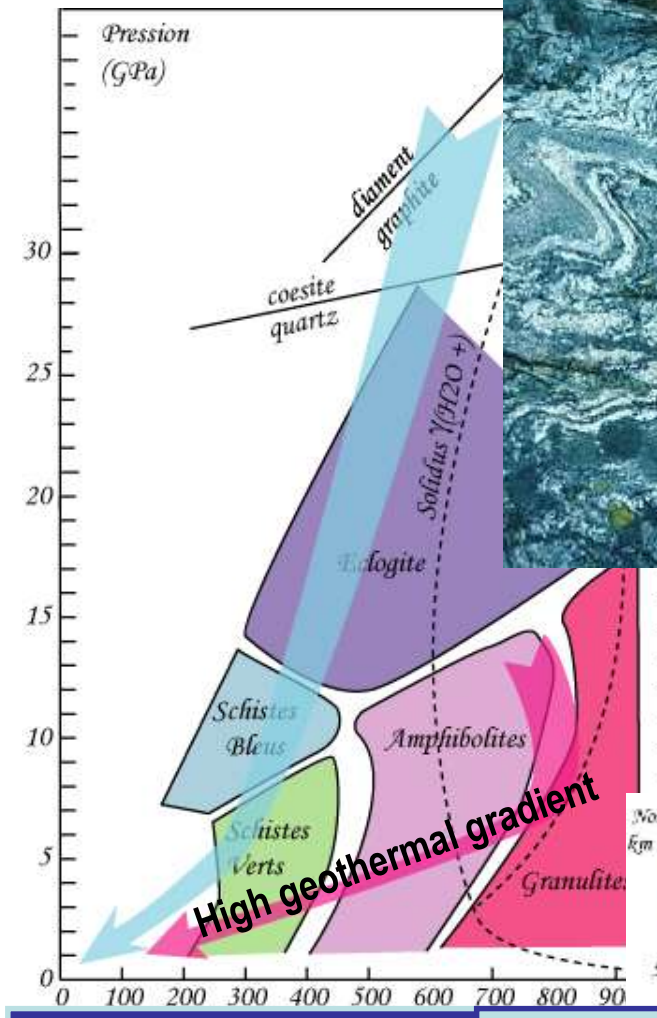
(Chemenda et al., 1995)

Evolution thermomécanique des orogènes

Fusion partielle de la croûte continentale

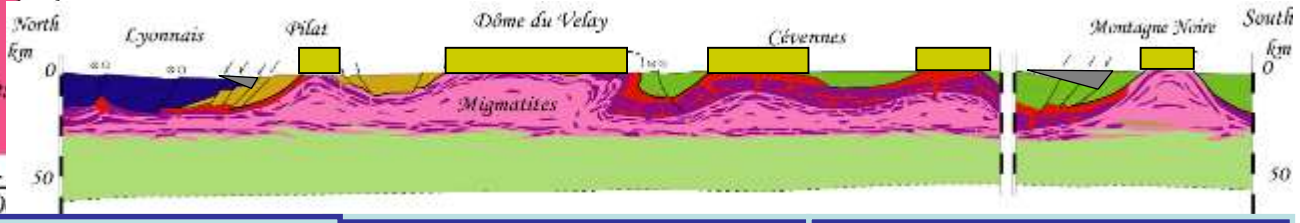
Massif Central Francais





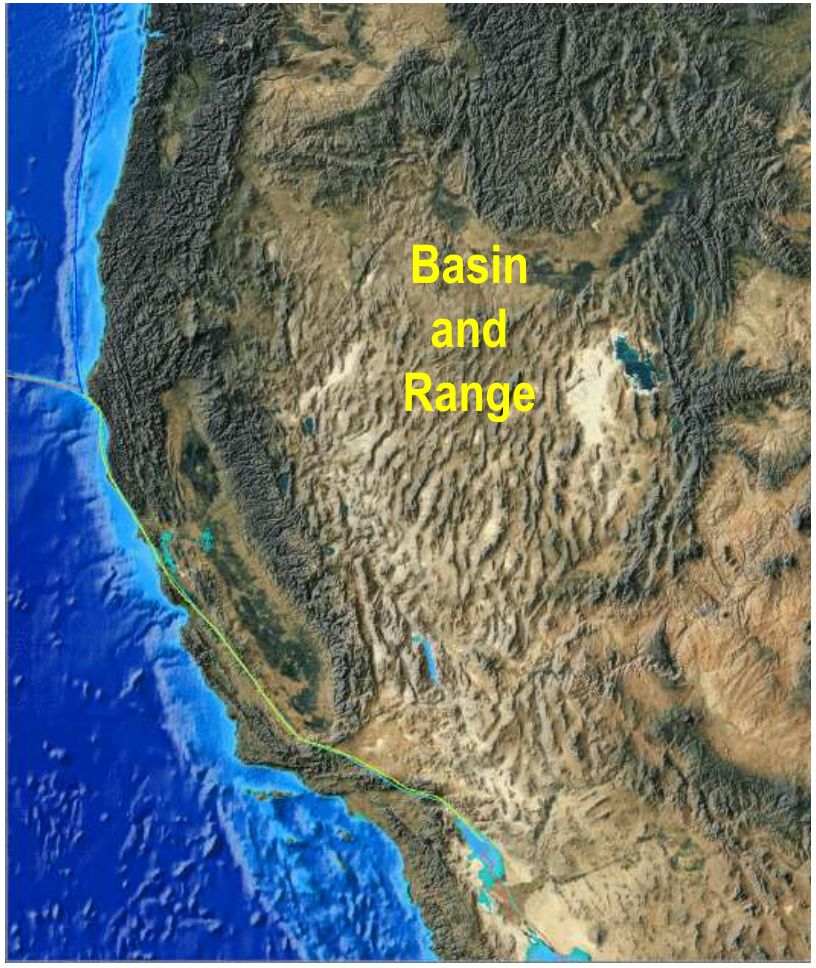
Pénéplaine Varisque:

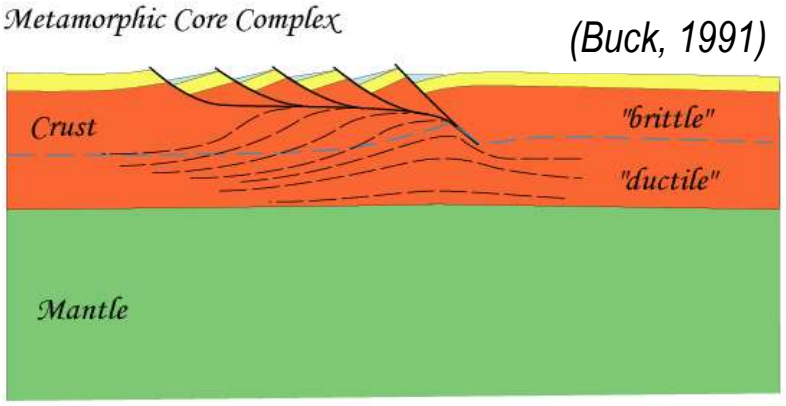
- Précoce (~ 290 Ma)
- Érosion insuffisante

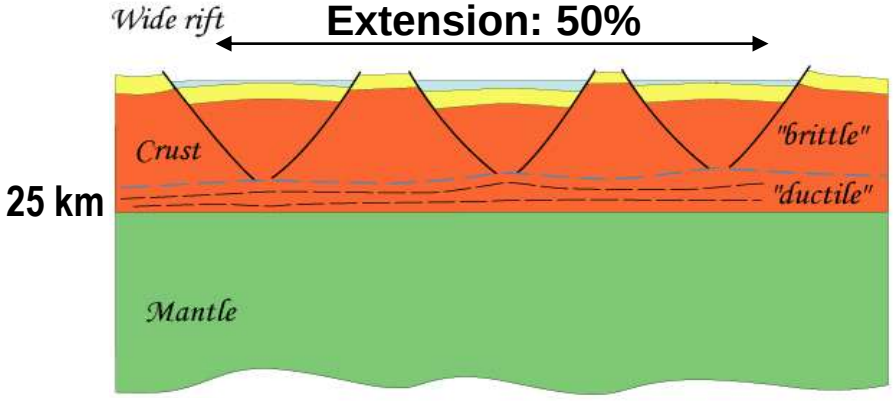


Evolution thermomécanique des orogènes

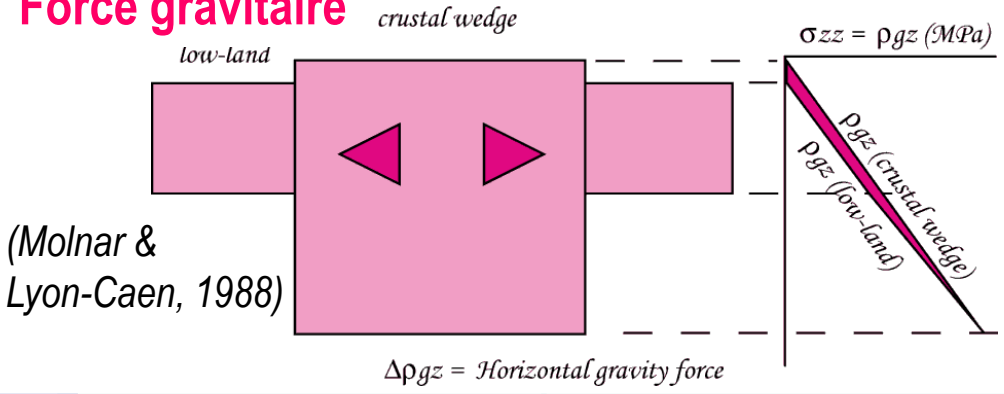
Extension de la croûte orogénique







Force gravitaire



(Molnar & Lyon-Caen, 1988)

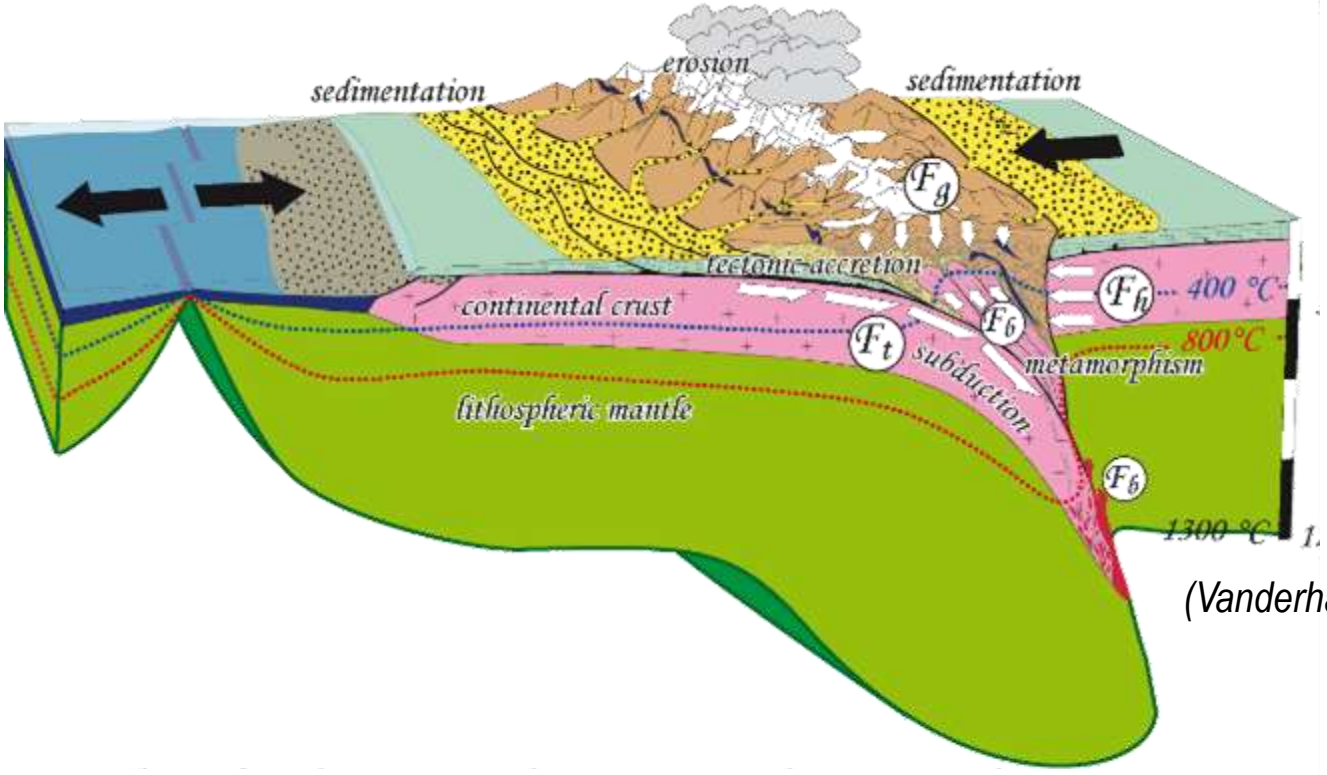
Evolution thermomécanique des orogènes

Resultats :

- Subduction continentale (UHP)
- Fusion partielle (migmatites)
- Extension de la croûte orogénique

Questions :

- Transition géotherme faible/fort ?
- Transition épaississement/amincissement ?
- Exhumation des roches métamorphiques?

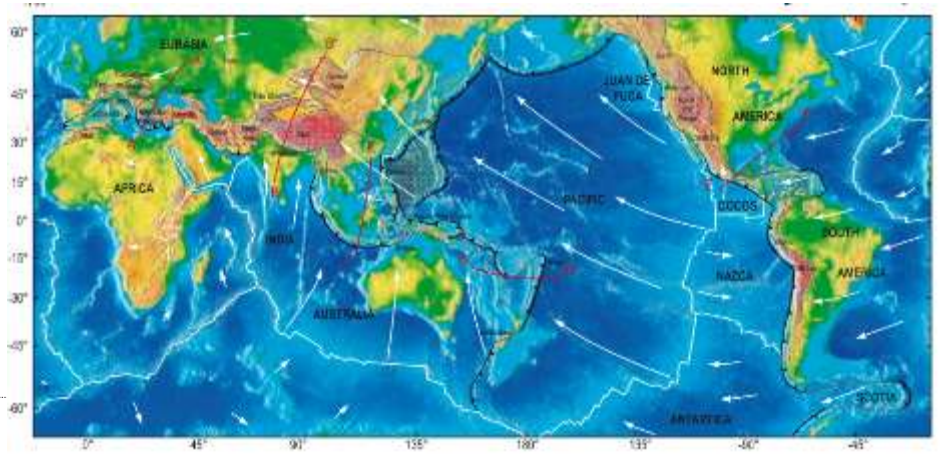


(Vanderhaeghe, 2012)

Bilan des forces

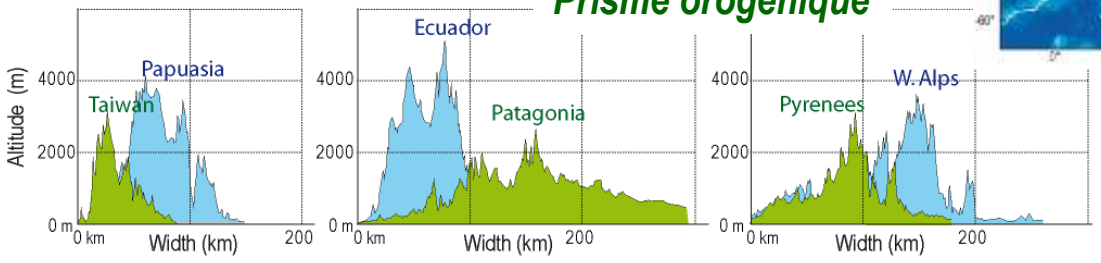
Bilan thermique

Topographie des zones de convergence

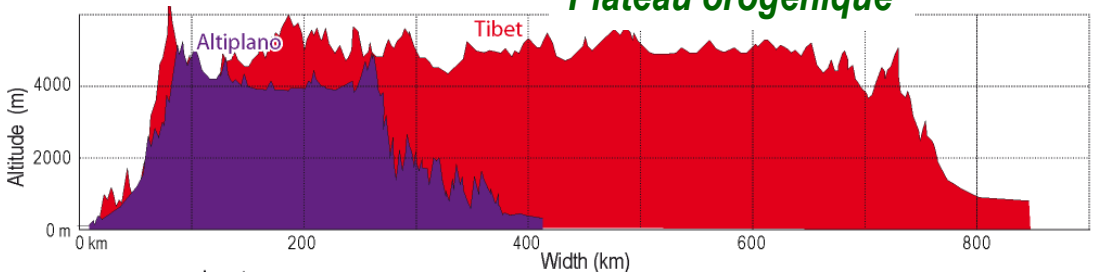


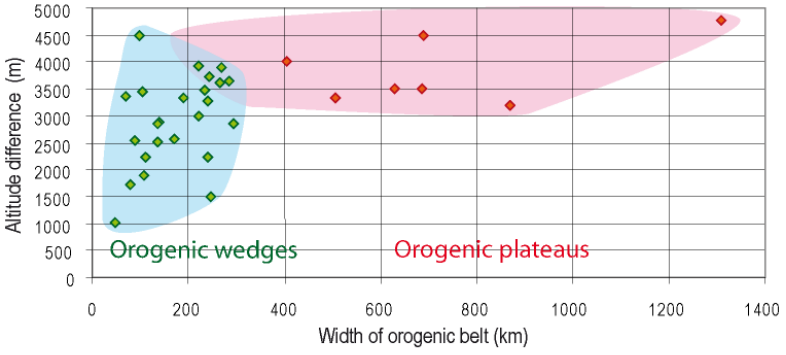
(Vanderhaeghe, 2012)

Prisme orogénique

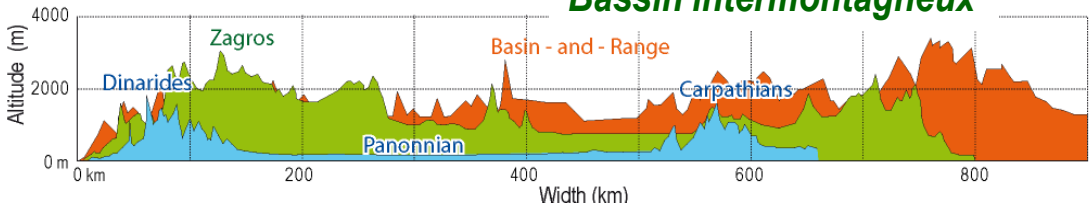


Plateau orogénique

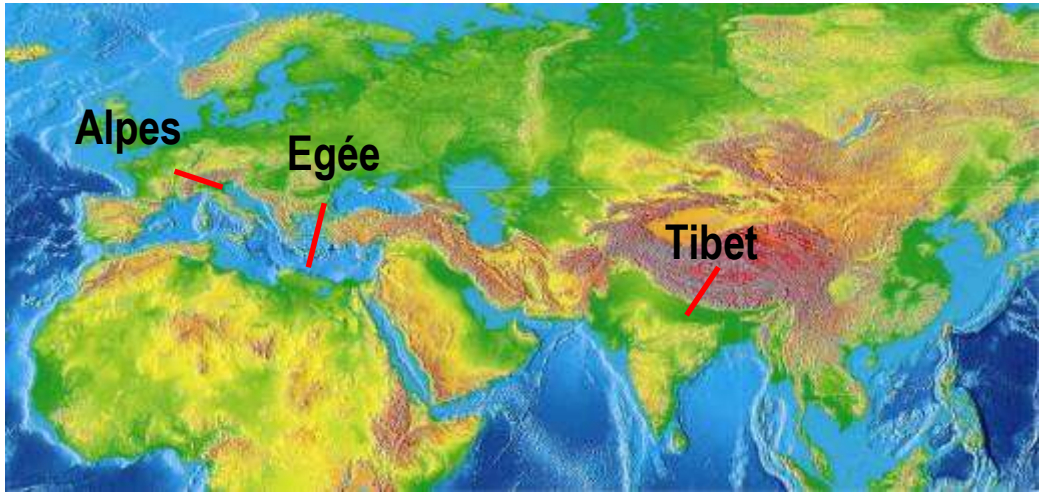


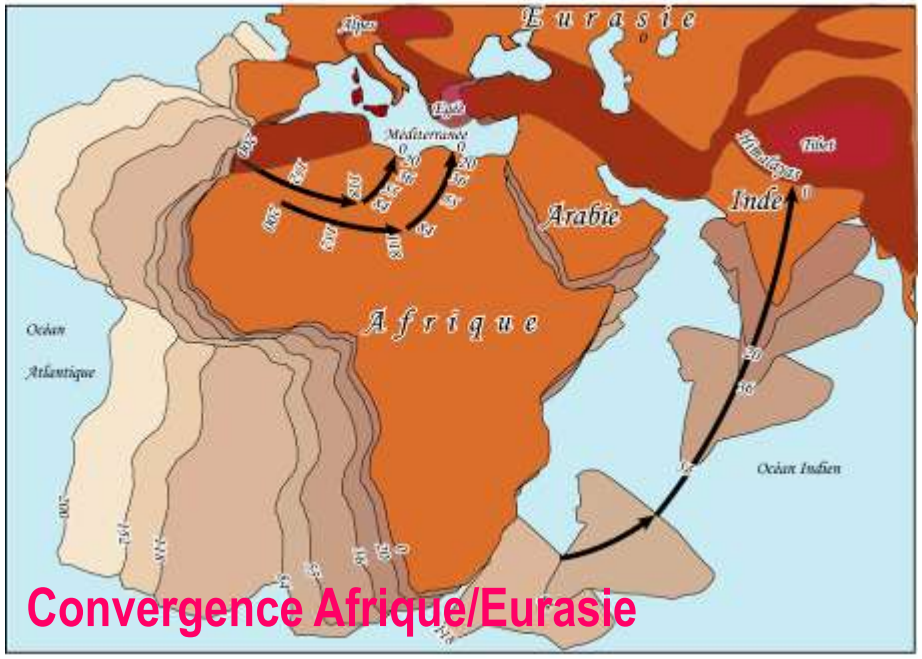


Bassin intermontagneux



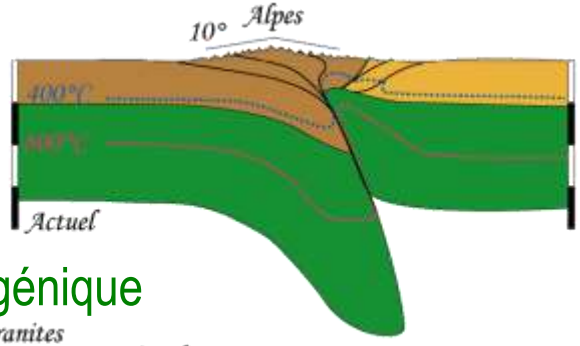
La chaine alpine s.l.



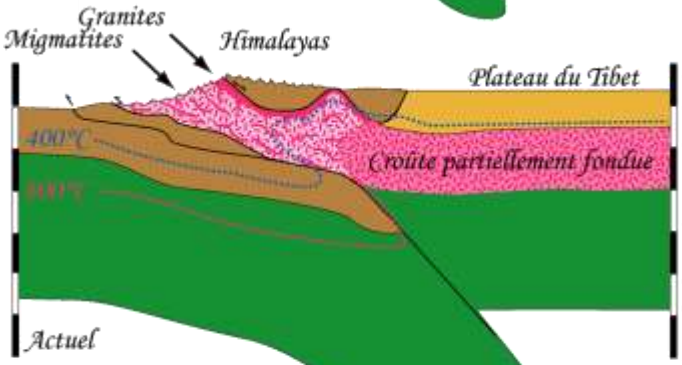


Convergence Afrique/Eurasie

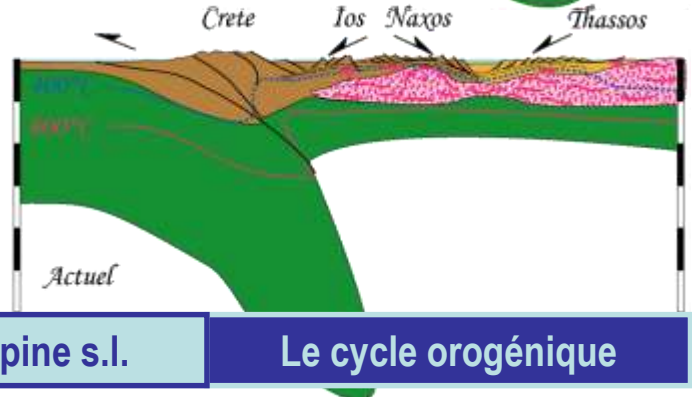
Alpes :
Prisme orogénique



Tibet :
Plateau orogénique



Egée :
Bassin intermontagneux



ALPES :
Formation d'un prisme orogénique

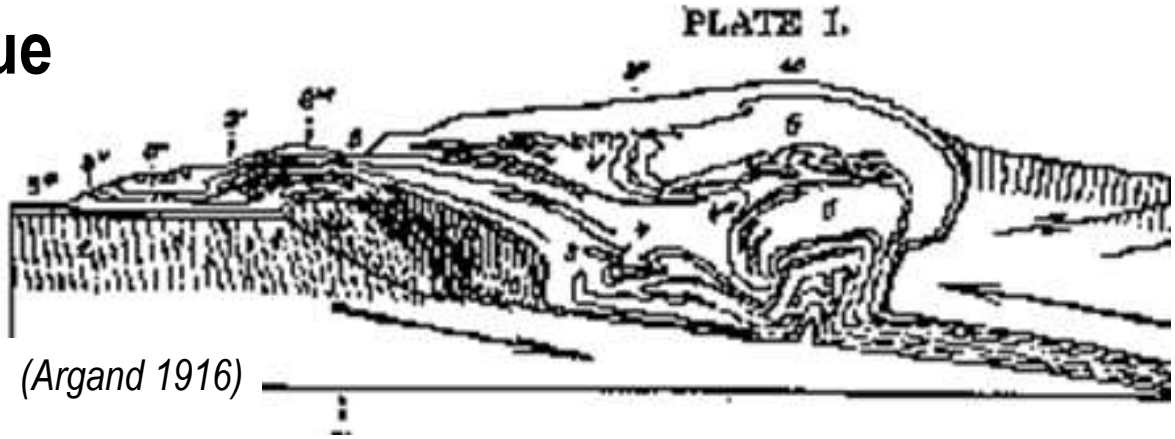
Alpes: prisme orogénique

Zone externe:
Décollement couverture/socle

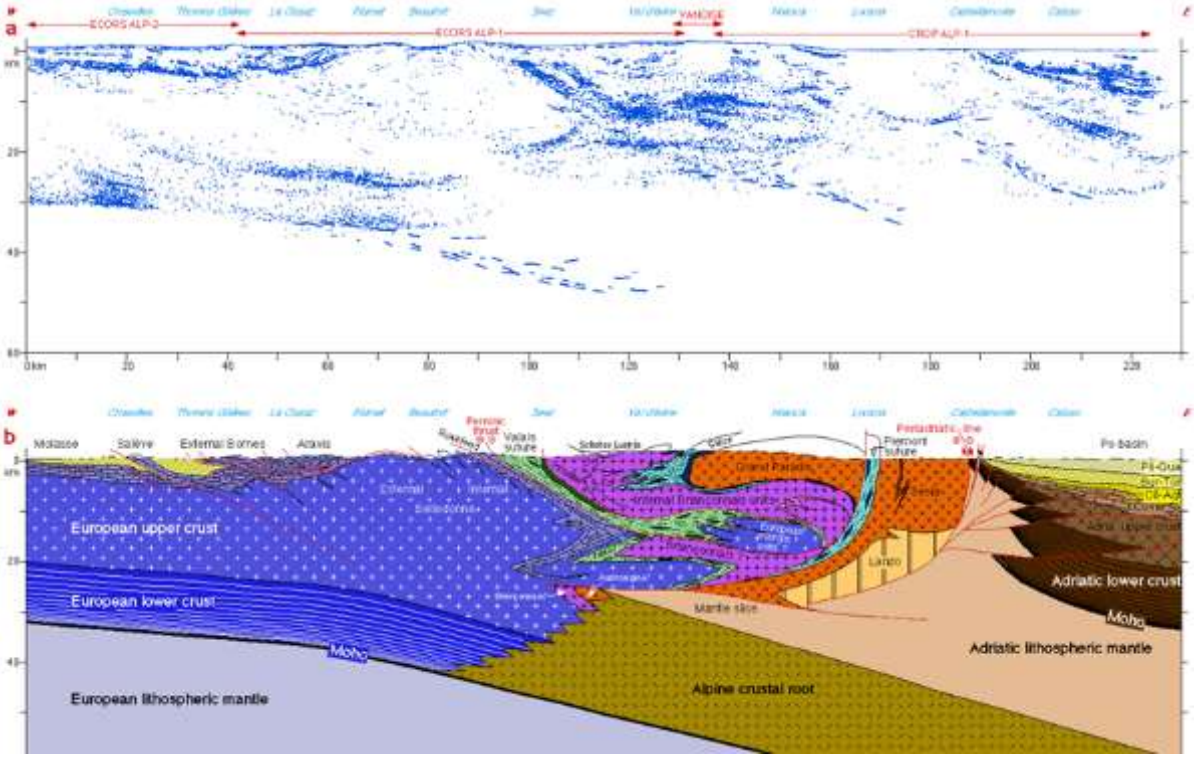
Zone interne:
Nappes HP/BT
Plusieurs sutures

Avant-Pays:
Bassin flexural avec sédiments détritiques

Structure profonde:
Subduction Eurasie sous Afrique



(Argand 1916)



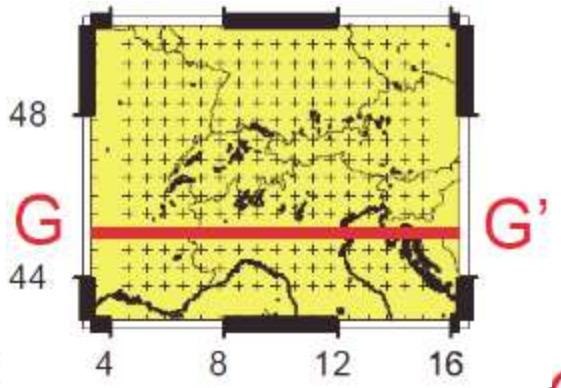
(Marchant & Stampfli, 1997)

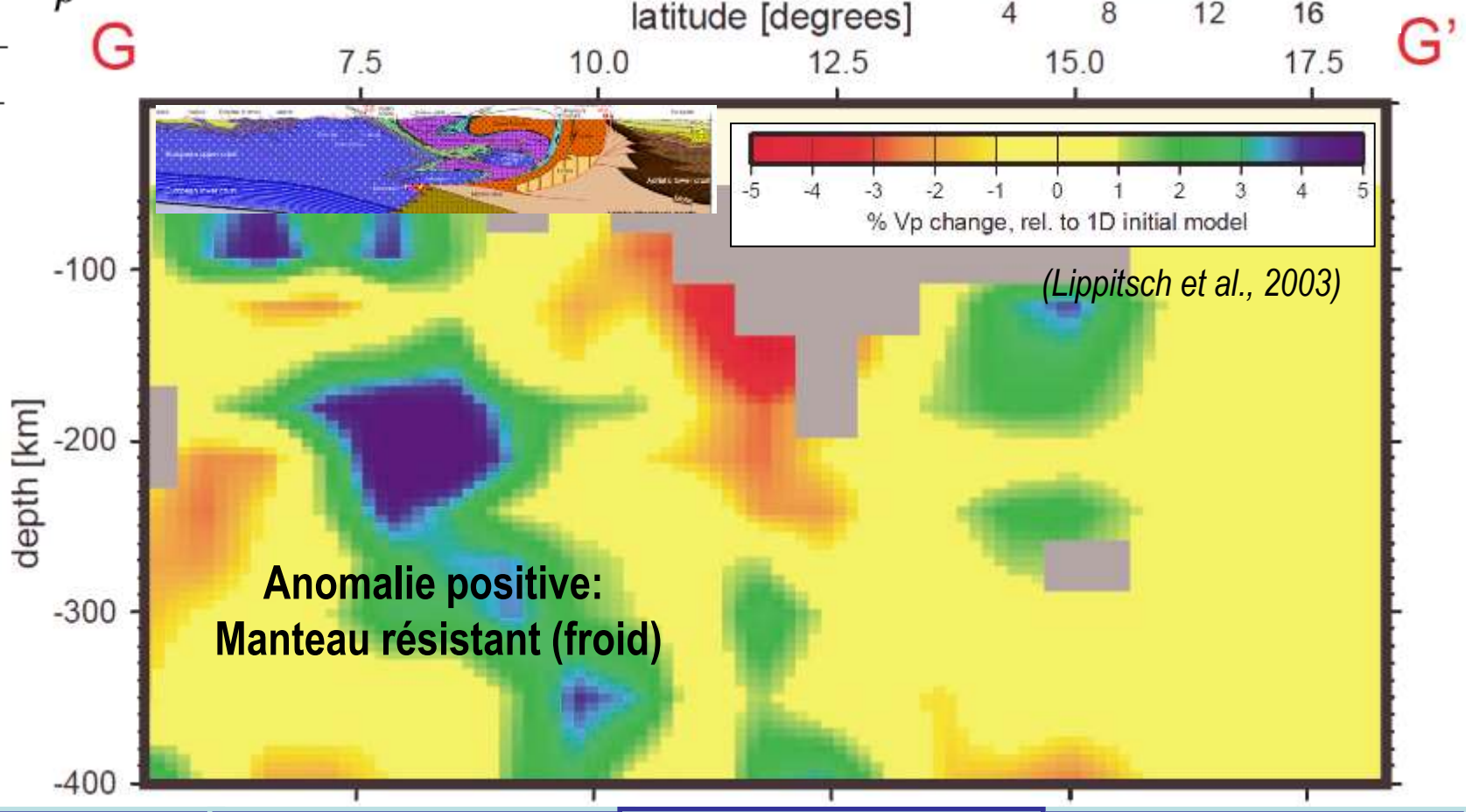
Alpes: prisme orogénique

Tomographie sismique : Un seul slab alpin

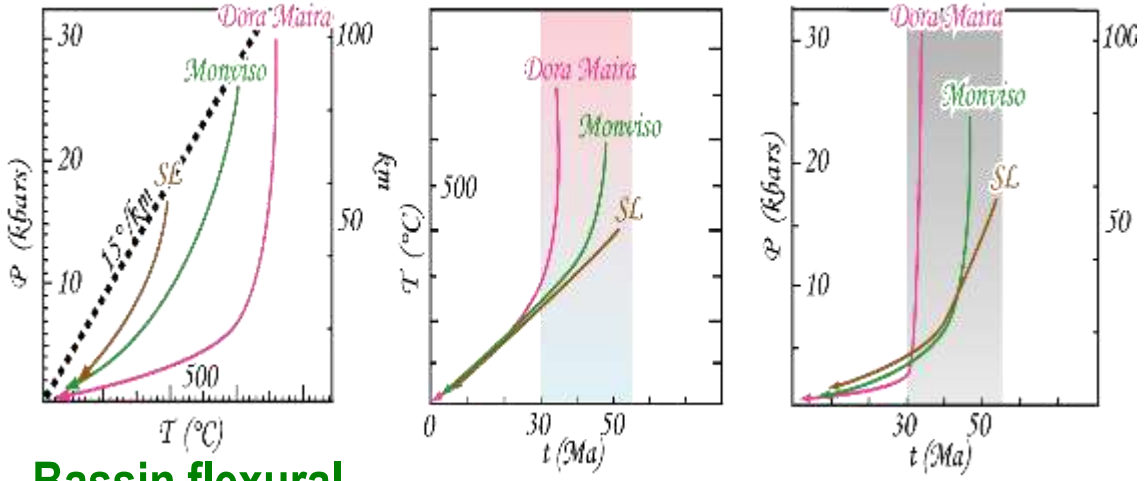
$$Vp = \sqrt{\frac{(4/3)\mu + k}{\rho}}$$

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

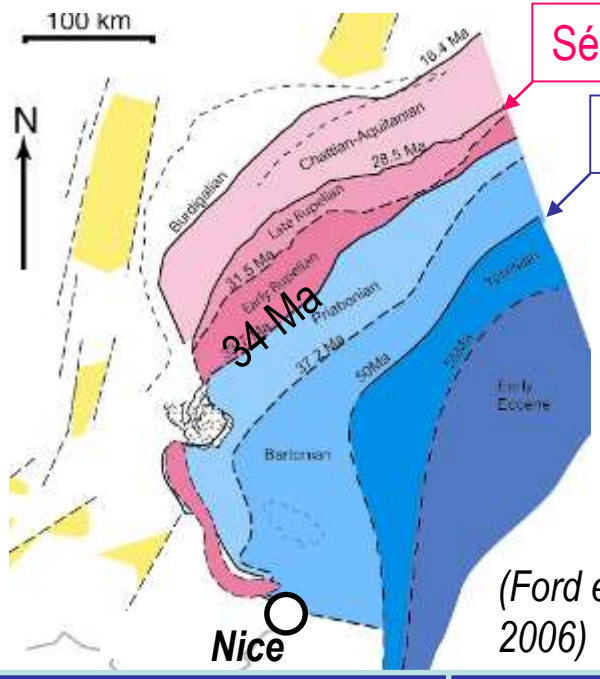




Alpes: prisme orogénique



Bassin flexural

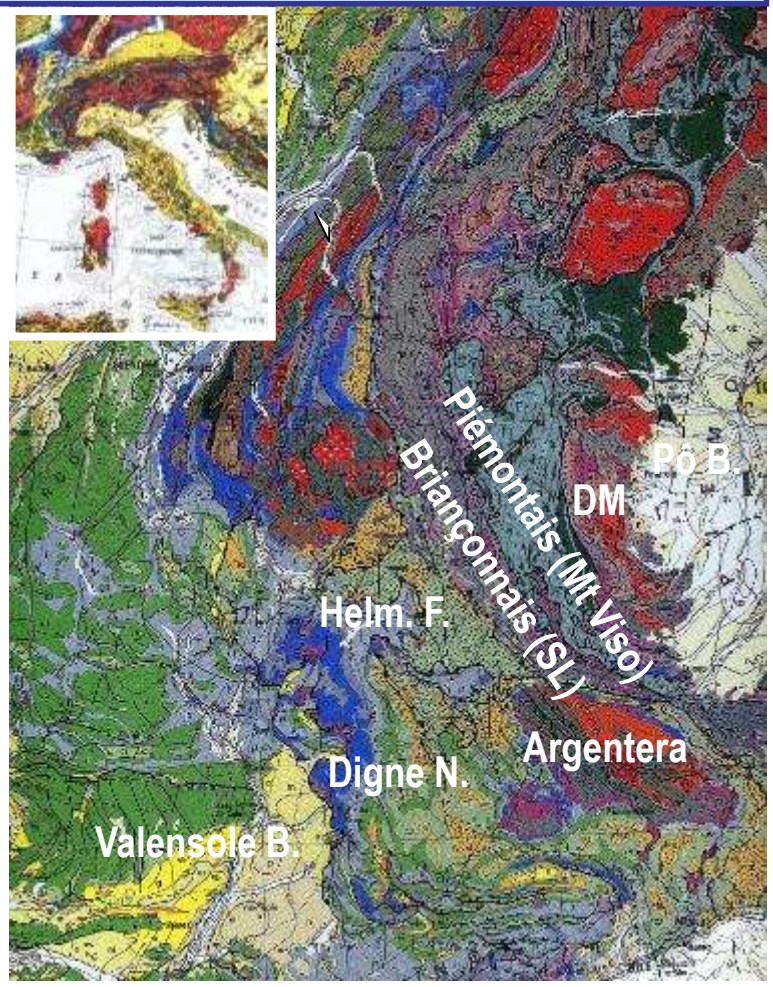


Sédiments: continentaux

Sédiments marins

Diachronisme: Exhumation/Erosion

(Ford et al. 2006)



Convergence rapide

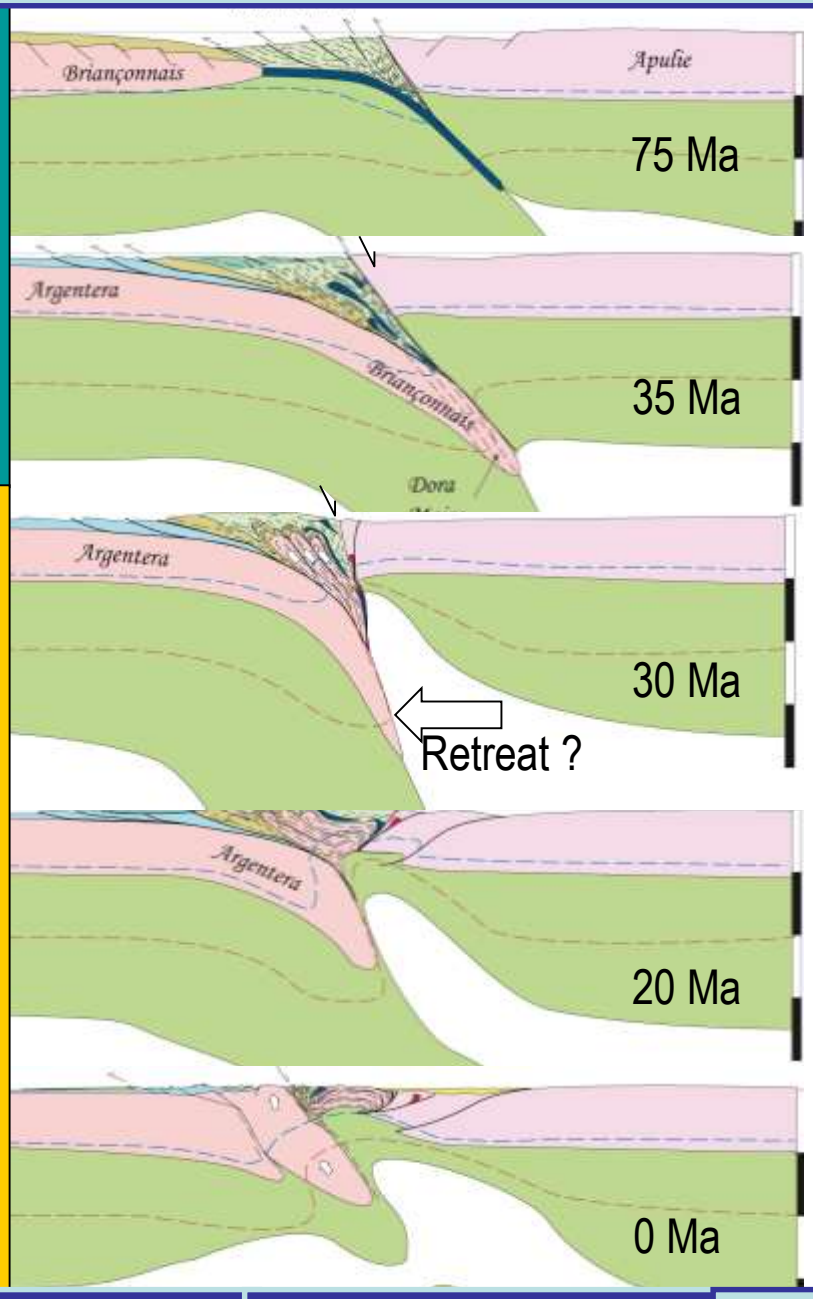
1,5 cm/yr

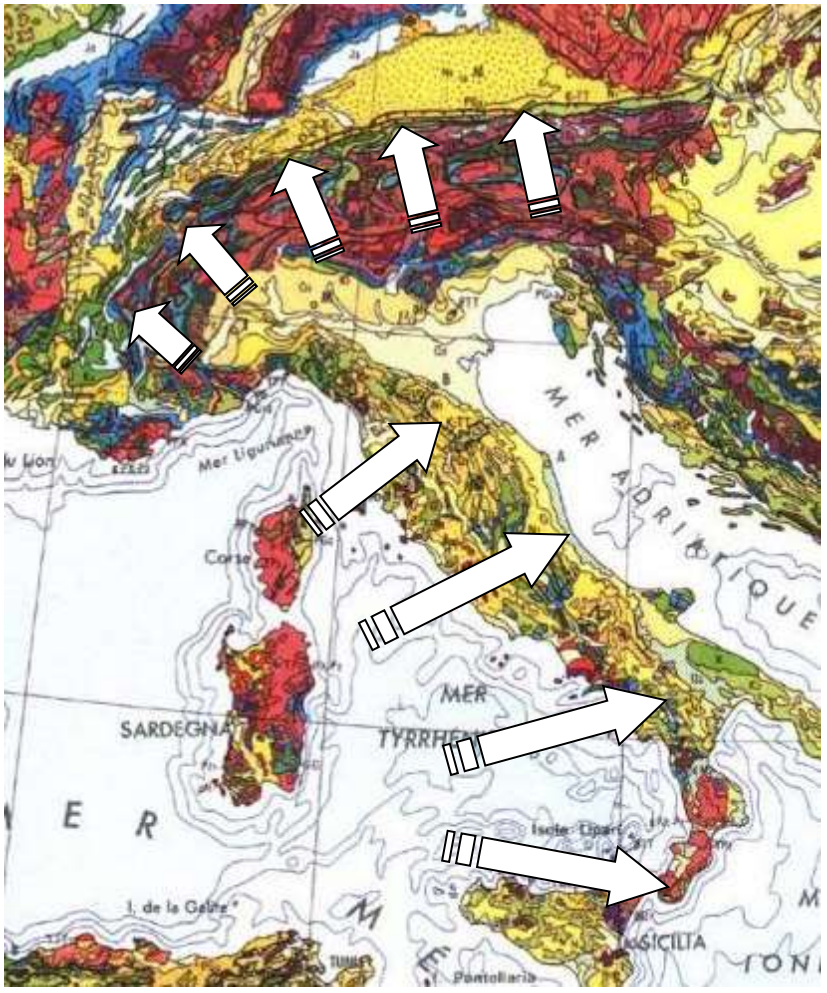
oceanic

Convergence lente

0,5 cm/yr

continental

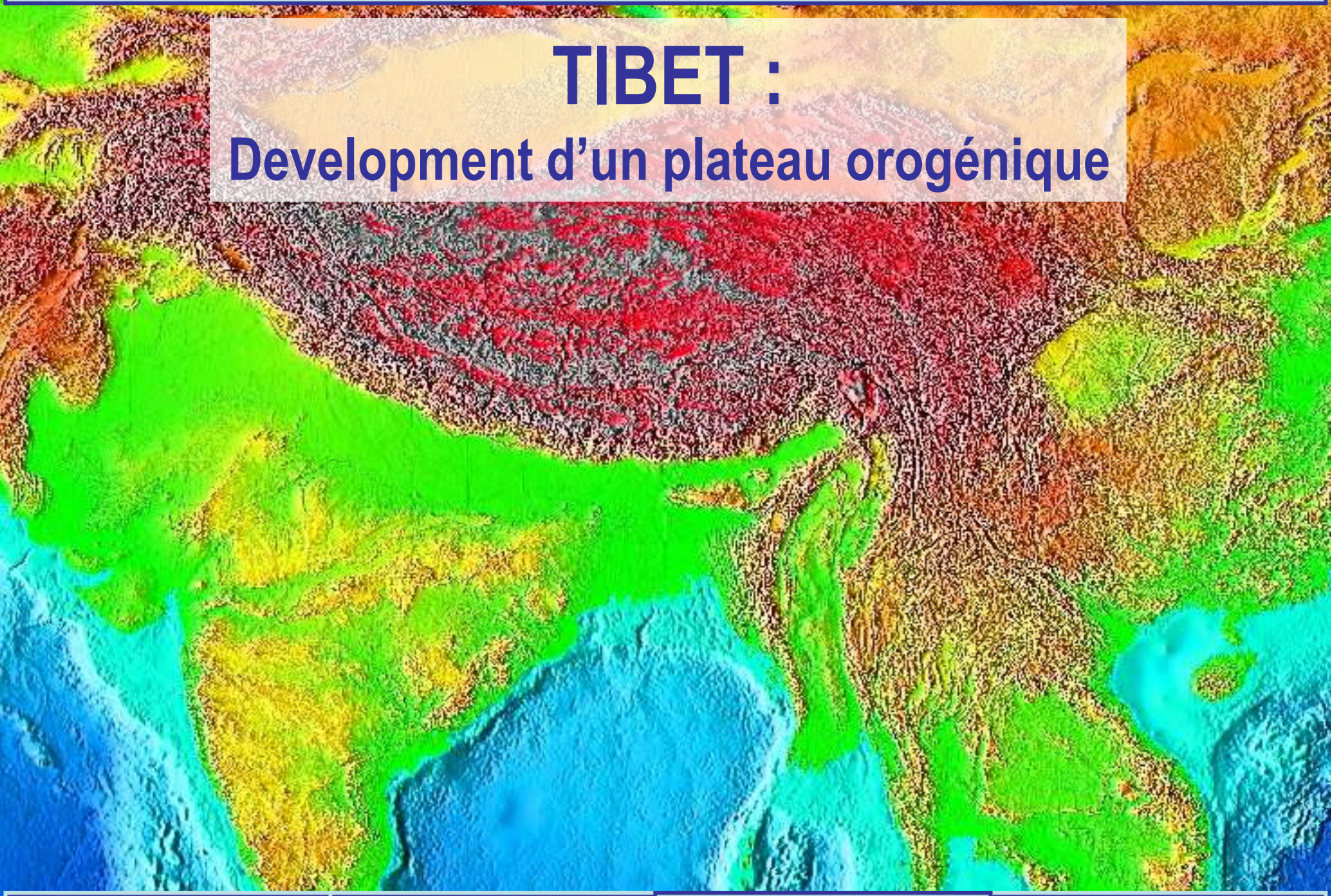




Formation d'un prisme orogénique HP/BT:
Enfouissement/Exhumation :

- ~~Erosion~~
- **Slab retreat ?**

TIBET :
Development d'un plateau orogénique

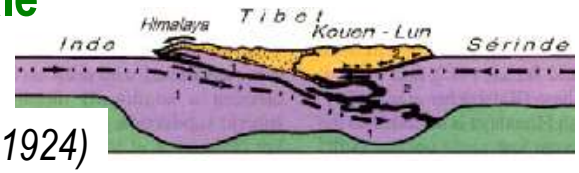


Tibet: plateau orogénique

Structure Crustale

- Plateau

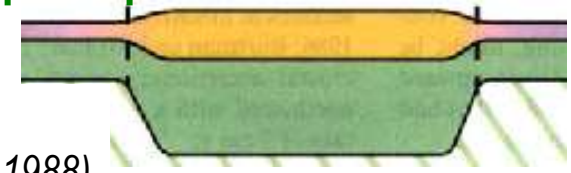
(Argand, 1924)



Structure Lithosphérique

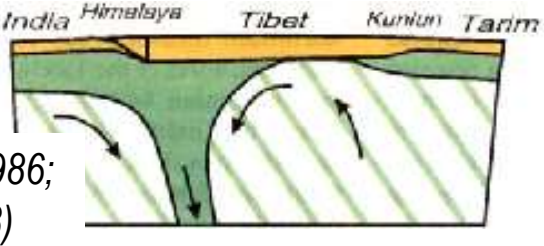
- Racine

(England & Houseman, 1988)



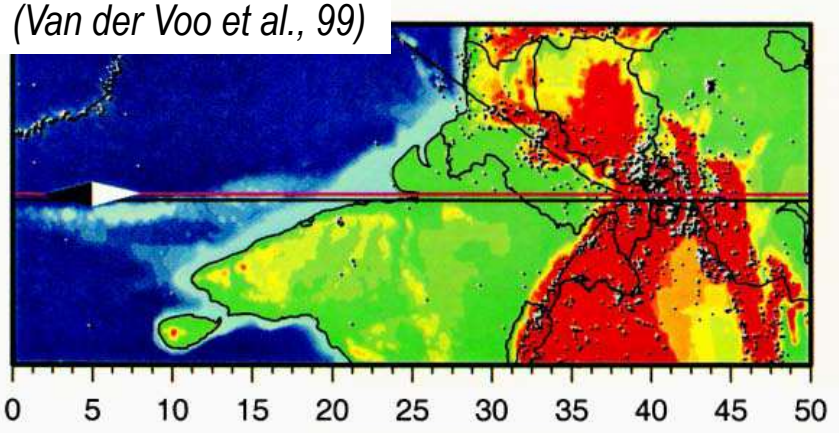
- Slab

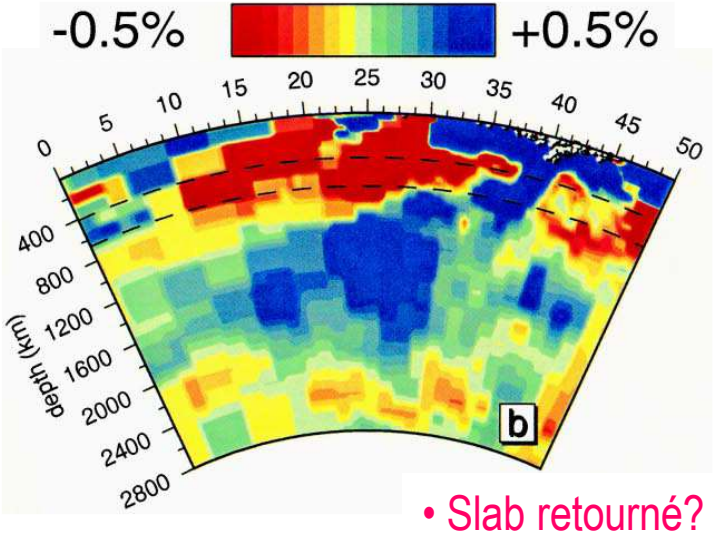
(Mattauer, 1986; Molnar, 1988)



Tomographie

(Van der Voo et al., 99)

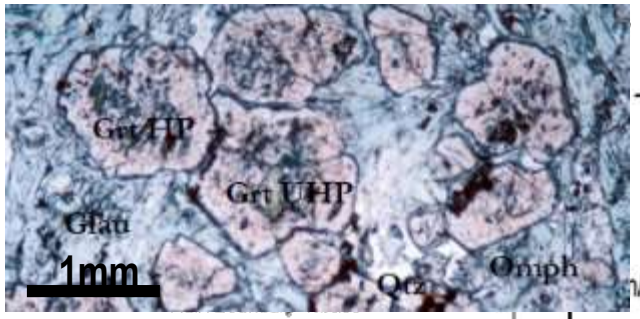




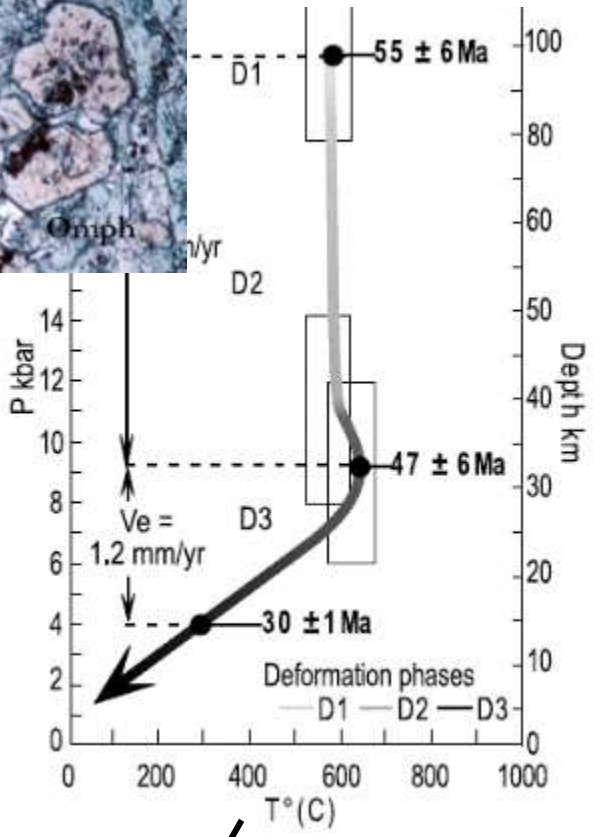
- Slab retourné?

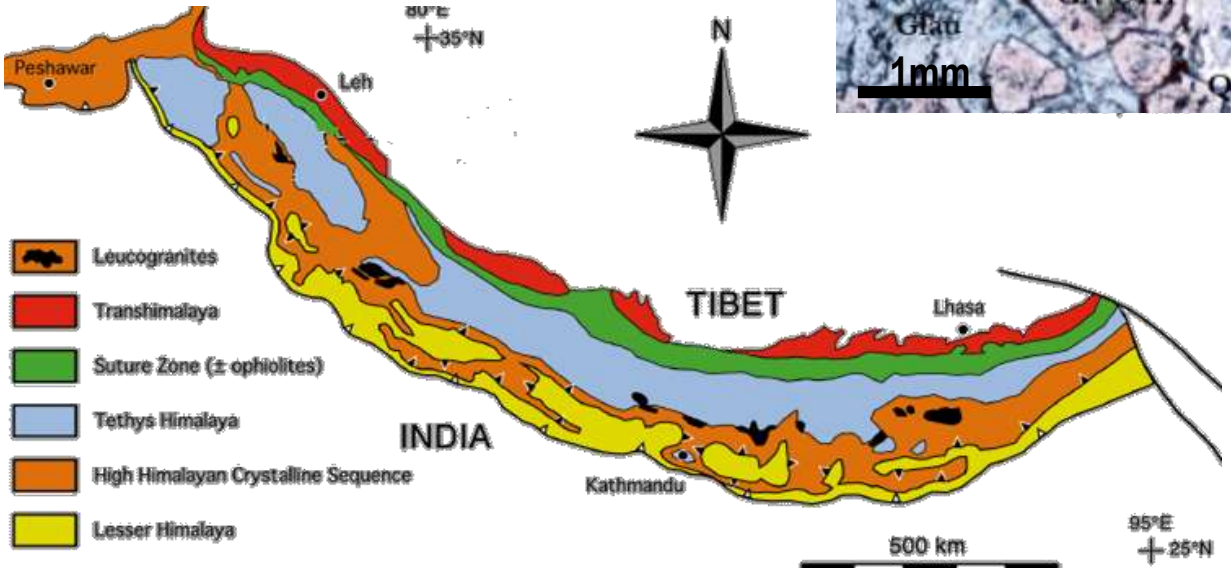
Tibet: plateau orogénique

Des roches métamorphiques de HP/BT

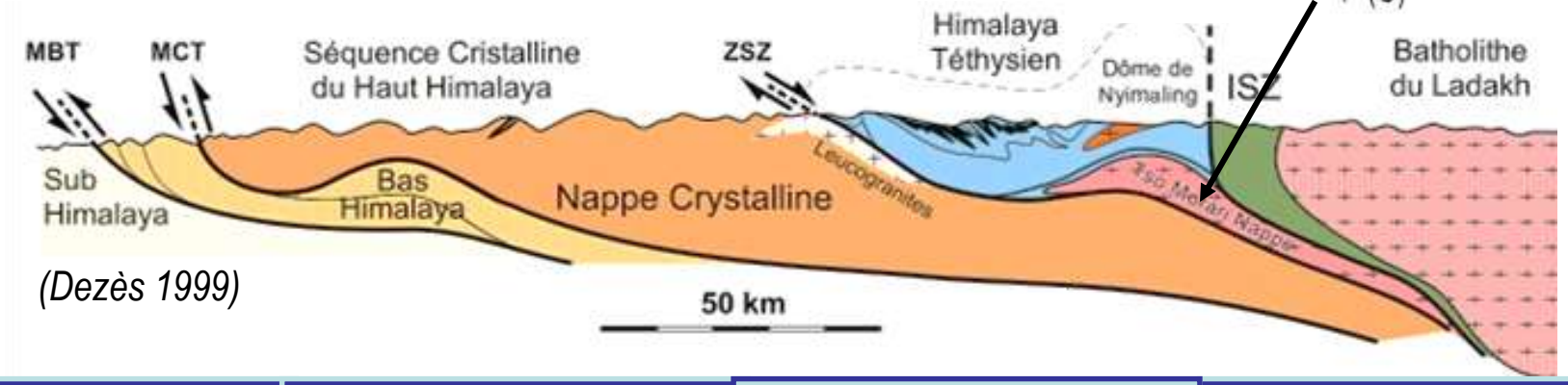


(de Sigoyer et al., 2004)





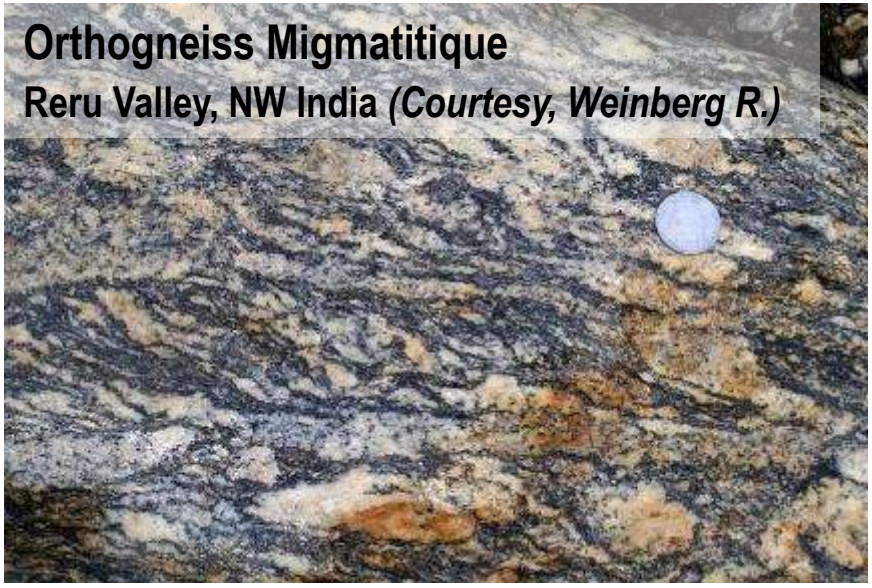
(Le Fort, 1988)

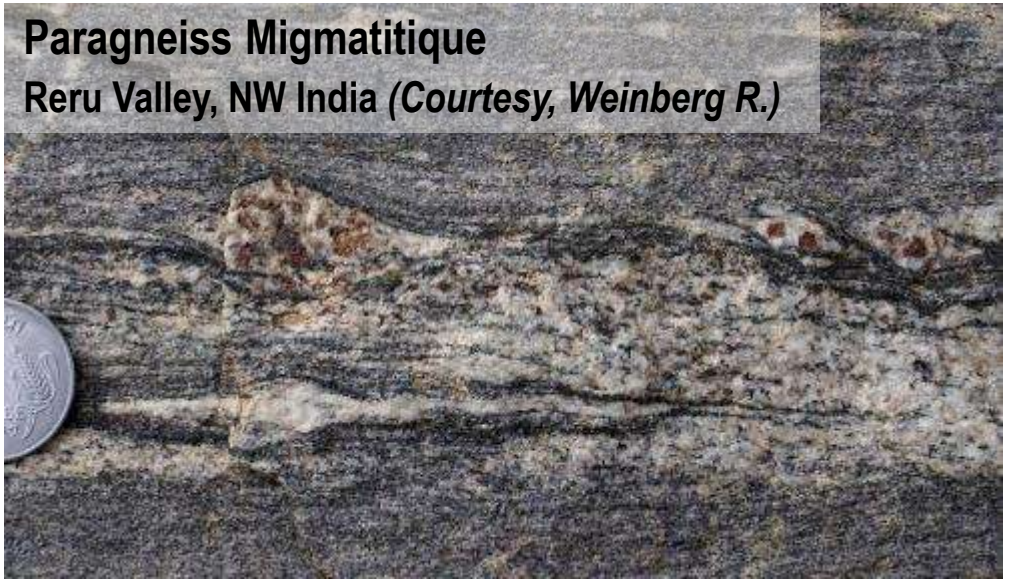


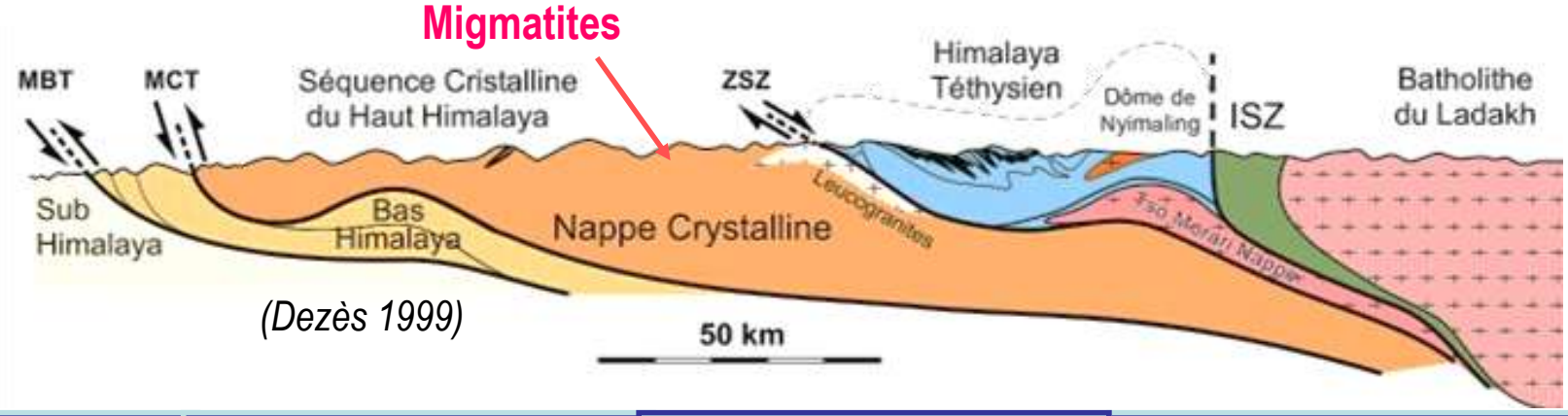
(Dezès 1999)

Tibet: plateau orogénique

Des migmatites, témoins de la fusion partielle (HT)



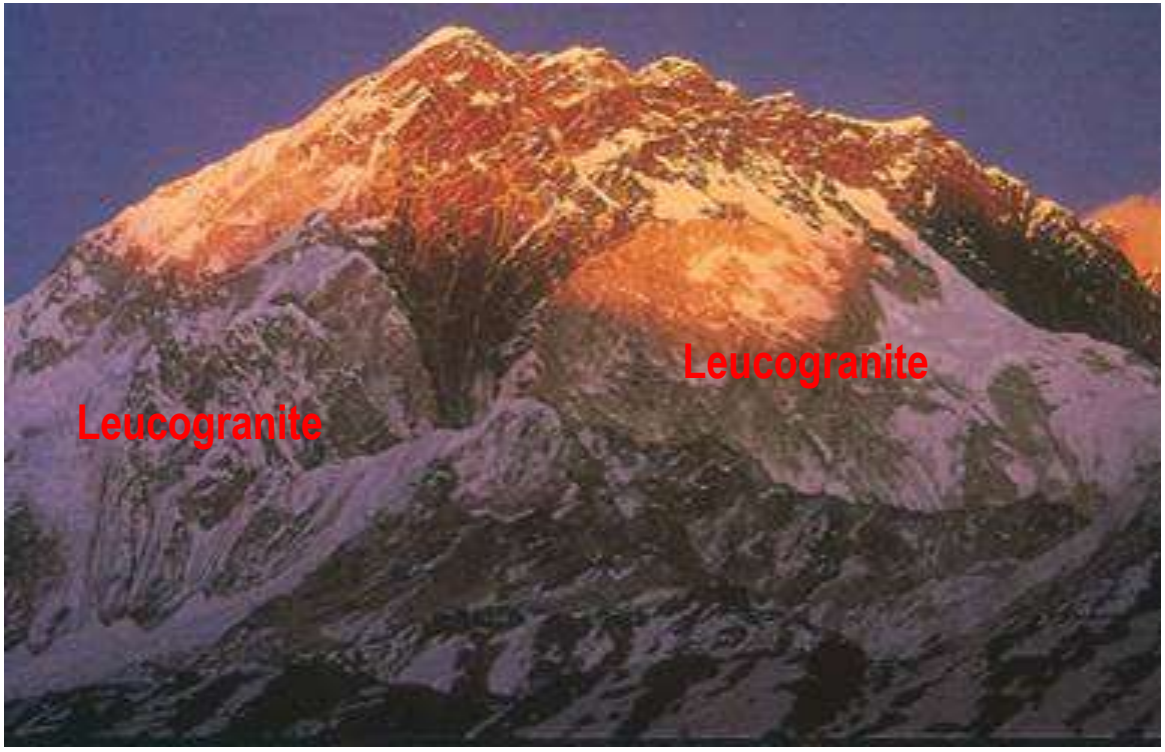




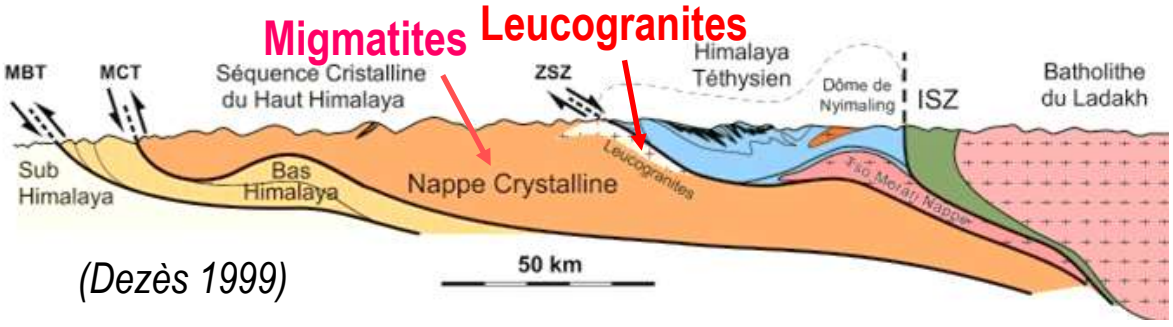
(Dezès 1999)

Tibet: plateau orogénique

Des migmatites et leucogranites témoins de la fusion partielle (HT)



(Weinberg and Searle, 1999)

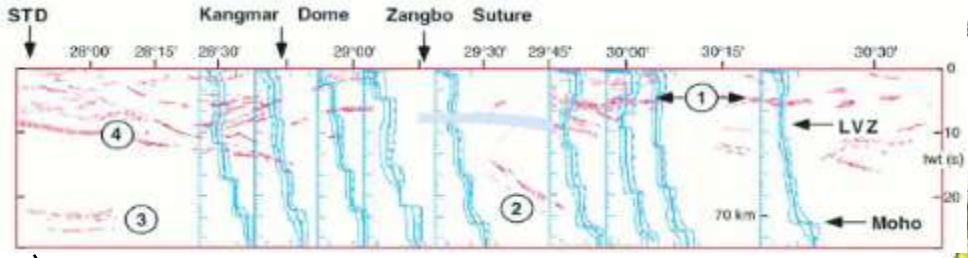


(Dezès 1999)

Tibet: plateau orogénique

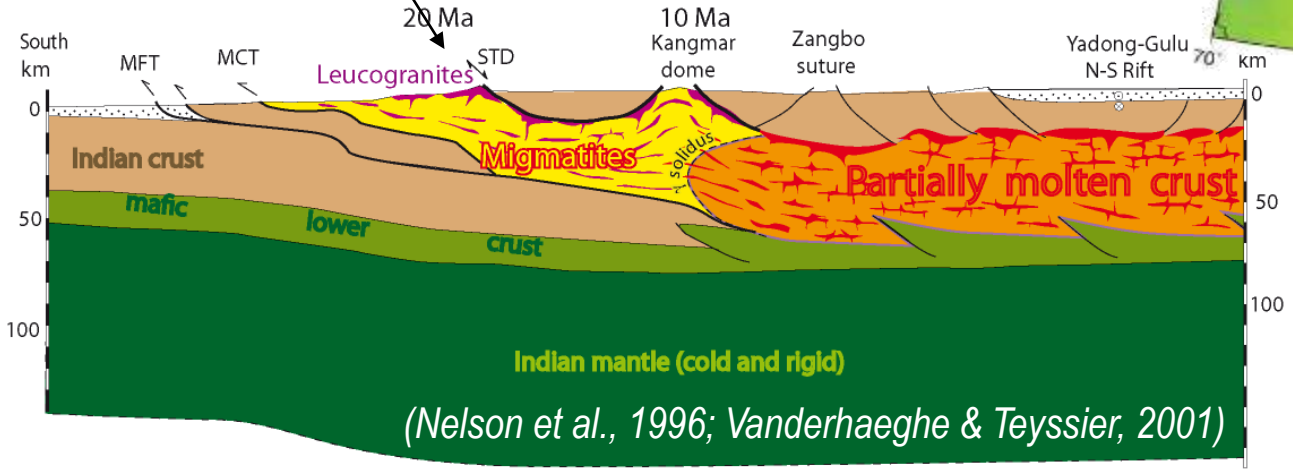
Une zone partiellement fondue sous le Tibet

Sismologie



Faible vitesse
Forte reflectivité
(Forte conductivité)

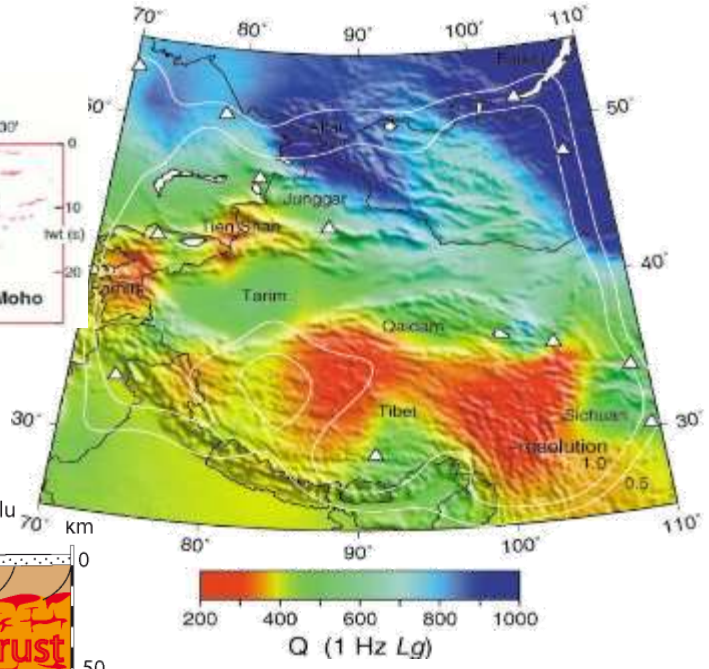
(Nelson et al., 1996)



(Nelson et al., 1996; Vanderhaeghe & Teyssier, 2001)

Atténuation des ondes sismiques

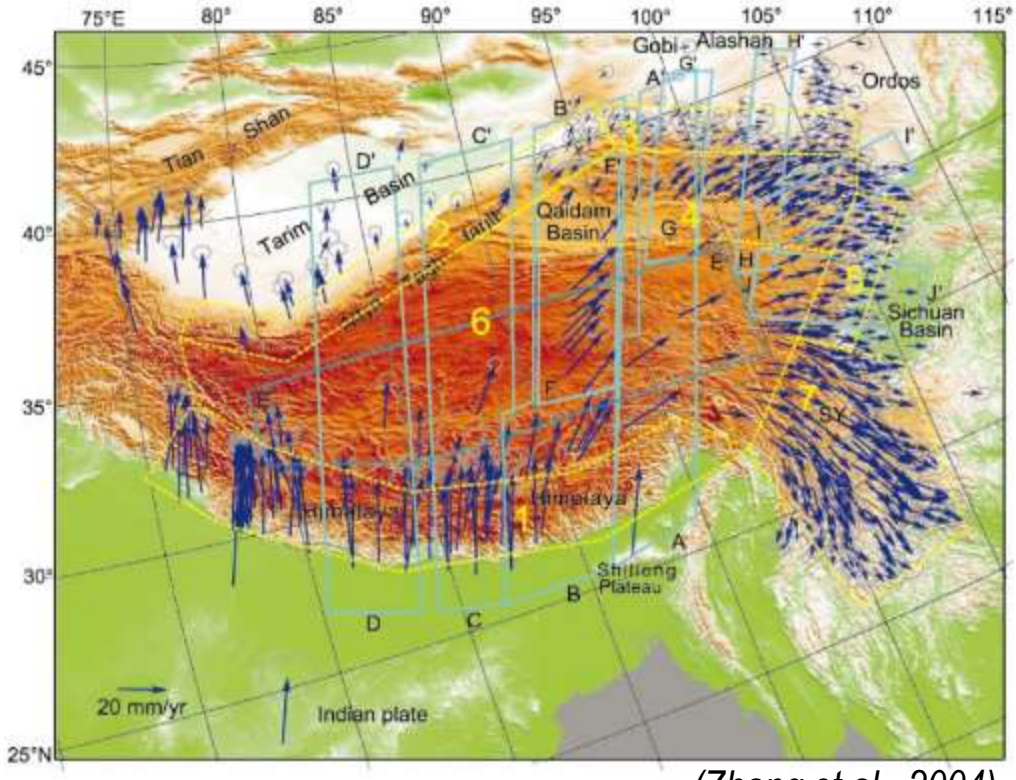
(Philips et al., 2000)



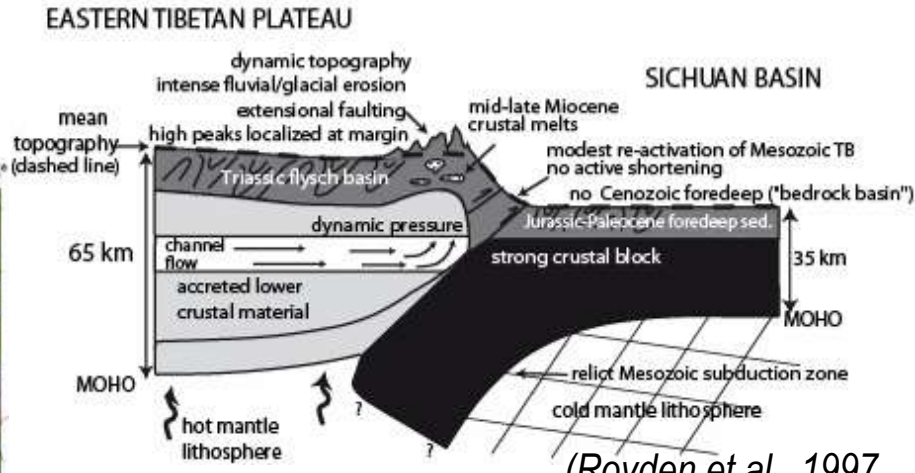
- Fluage latéral de la croûte partiellement fondue
- Ségrégation et migration vers le haut des liquides granitiques

Tibet: plateau orogénique

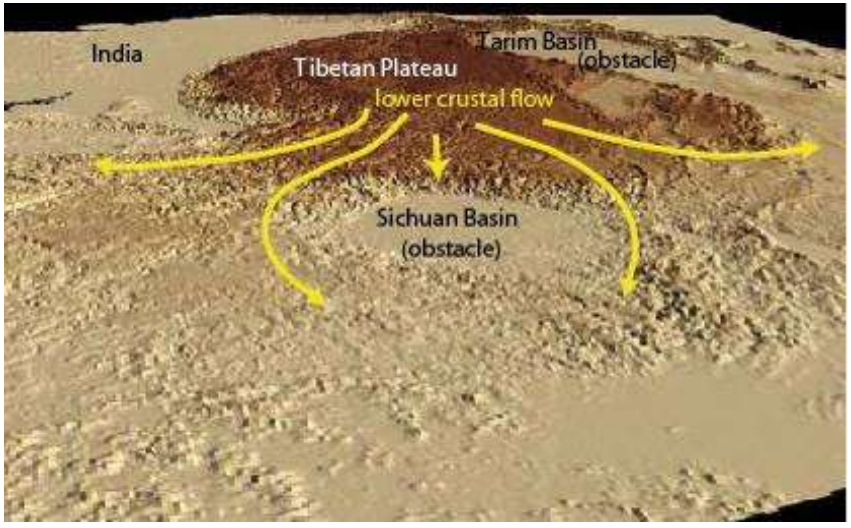
Une zone partiellement fondue sous le Tibet



(Zhang et al., 2004)



(Royden et al., 1997
Clarke et al., 2004)

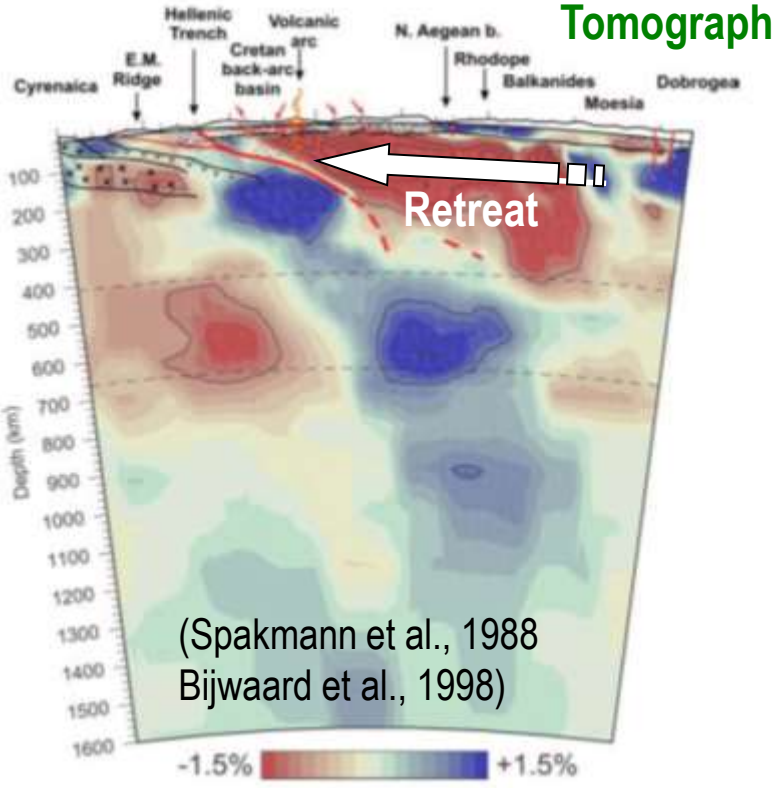


- Propagation latérale du plateau orogénique
- Fluage autour des noyaux cratoniques rigides

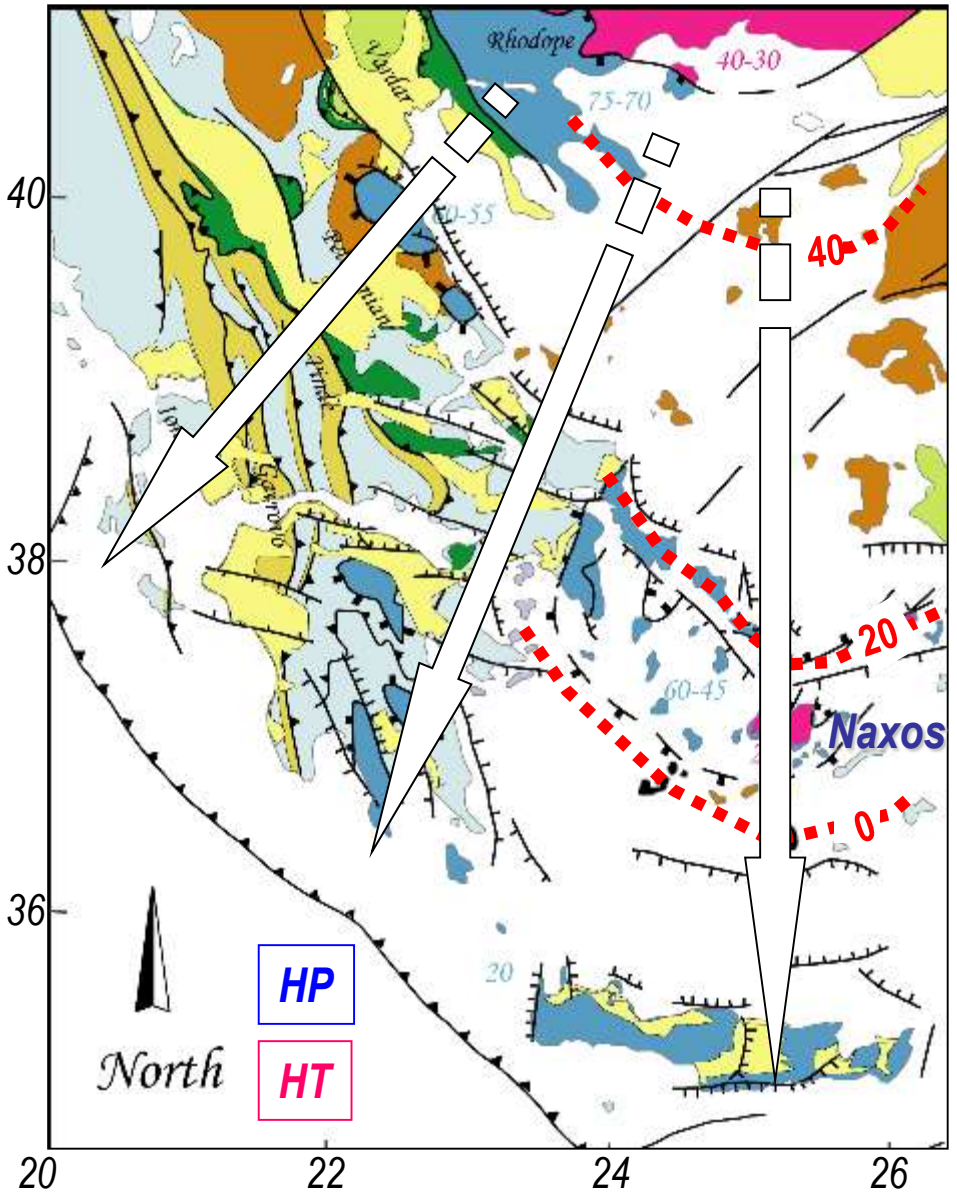
EGEE :
Bassin intermontagneux

Egée

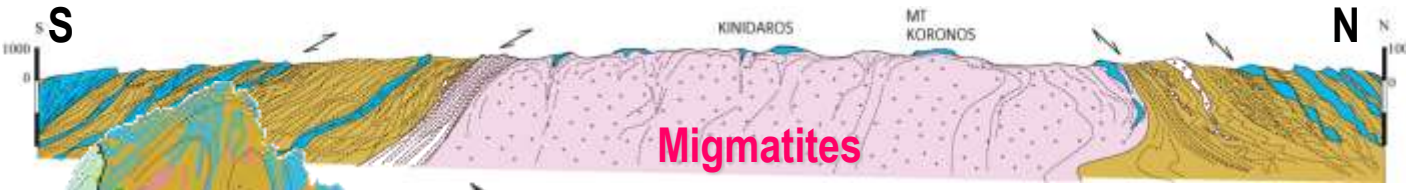
- Sutures océaniques, blocs continentaux
- **Pas de montagnes!**
- Chevauchements **et failles normales**
- Métamorphisme HP/LT **et HT**
- Bassins d'avant-pays **et fossés d'effondrement**
- **Magmatisme d'arc migrant vers le Sud**

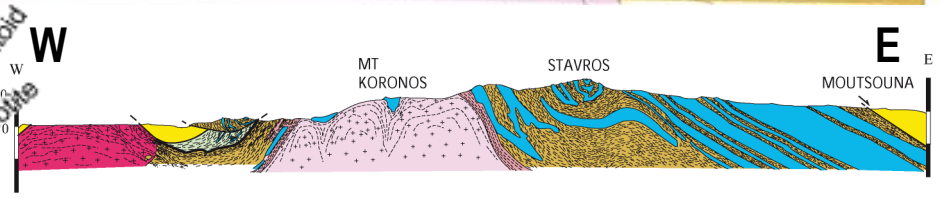


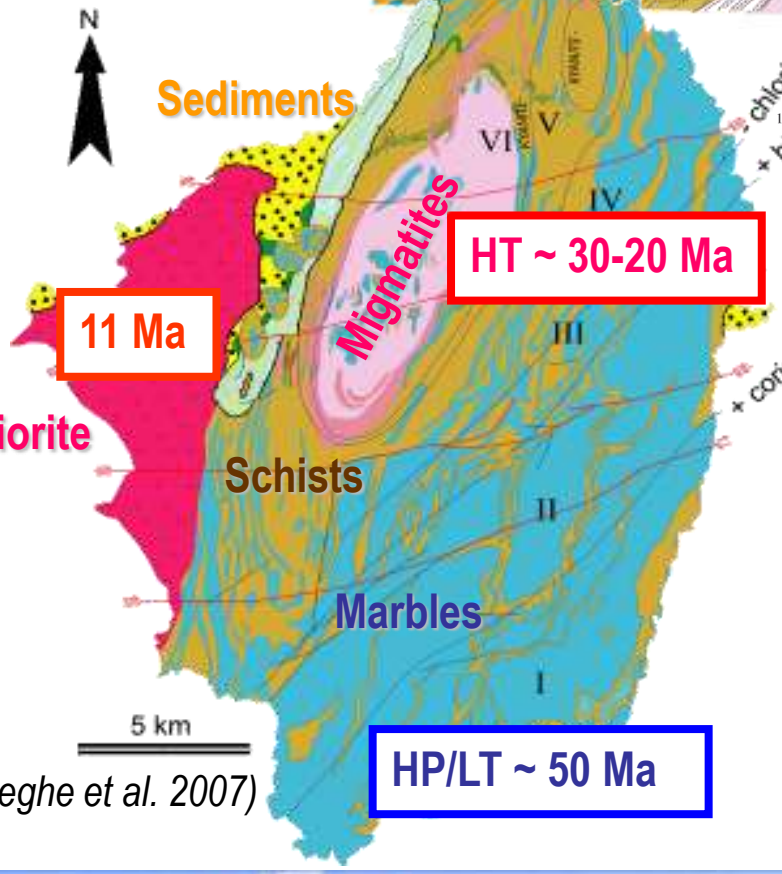
(Vanderhaeghe et al., 2007)



Egée: Naxos



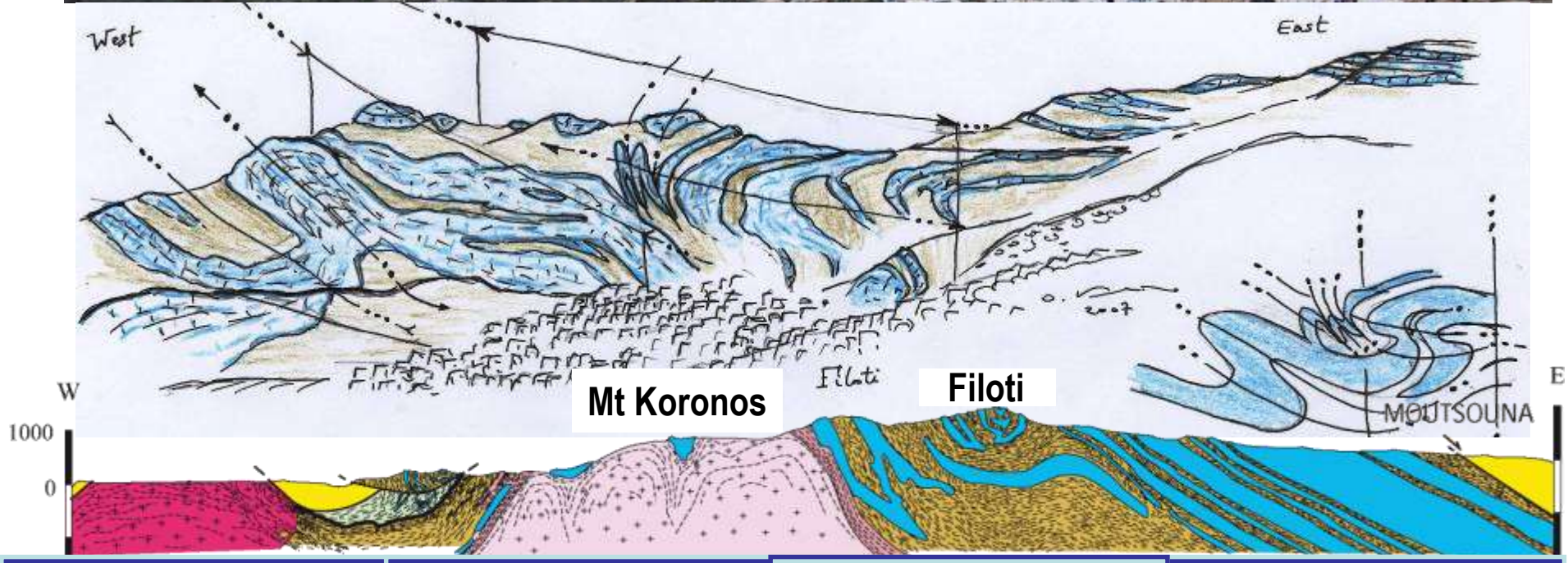




(Vanderhaeghe et al. 2007)

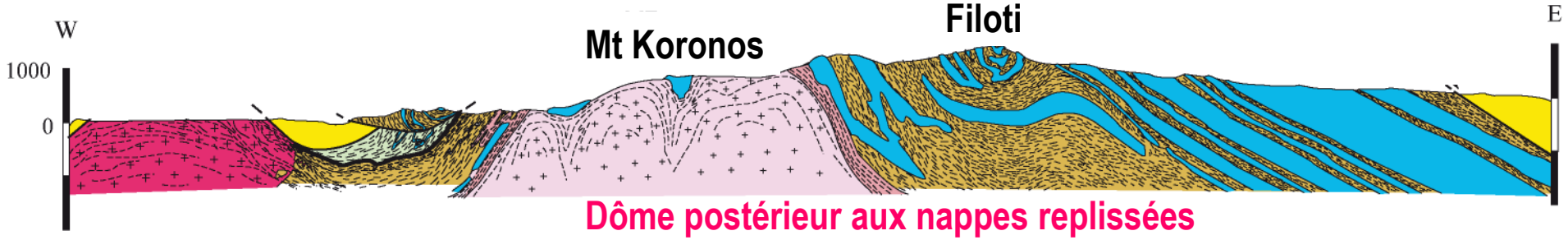
Egée: Naxos

Foliation HP/BT pentée transposée dans foliation plate MT à HT



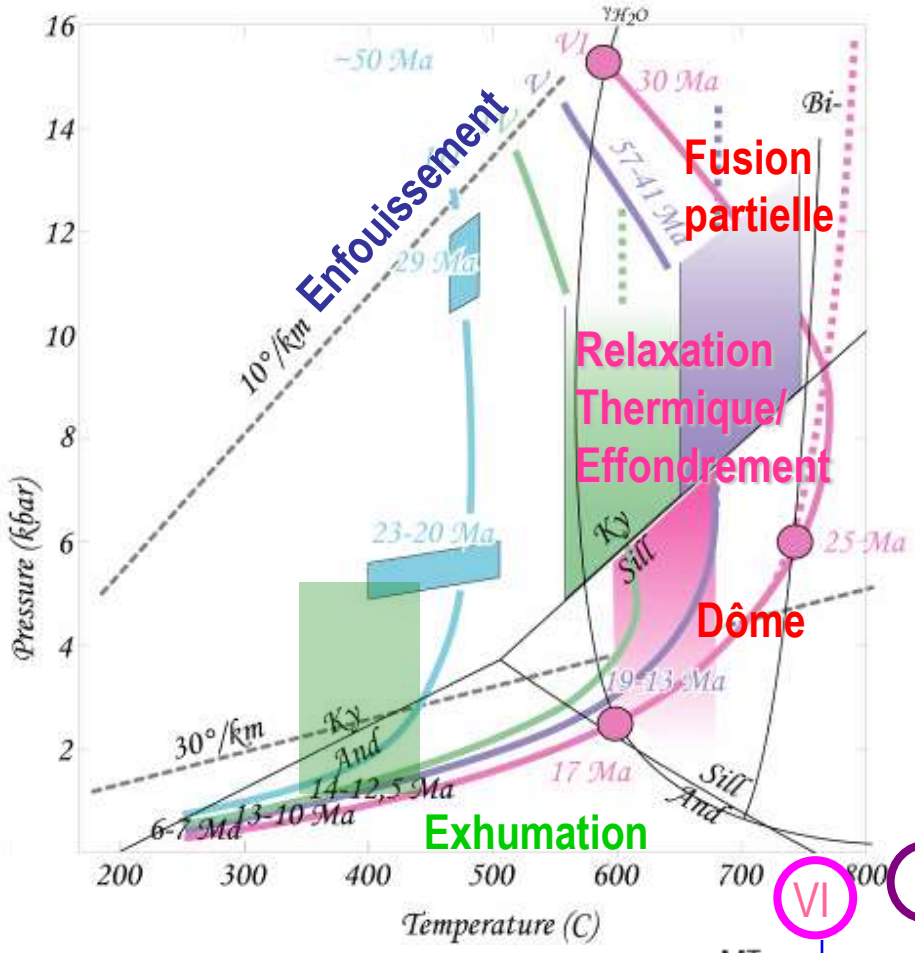
Egée: Naxos

(Vanderhaeghe, 2004
Vanderhaeghe et al., 2007
Kruckenberg et al., 2010, 2011)



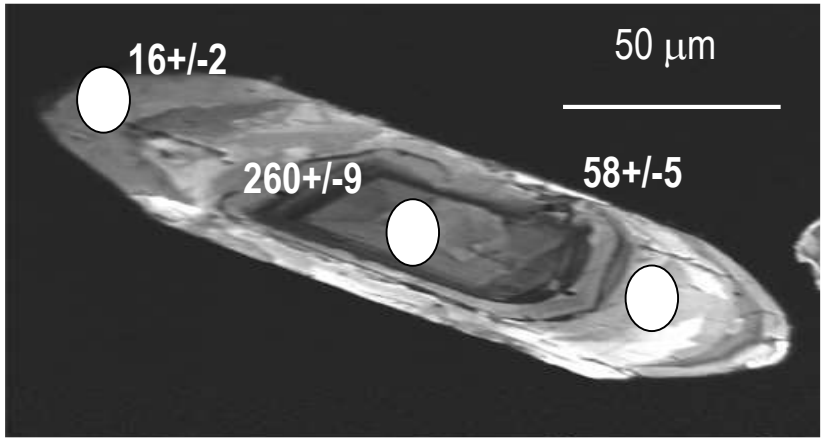
Dôme postérieur aux nappes replissées

Egée: Naxos

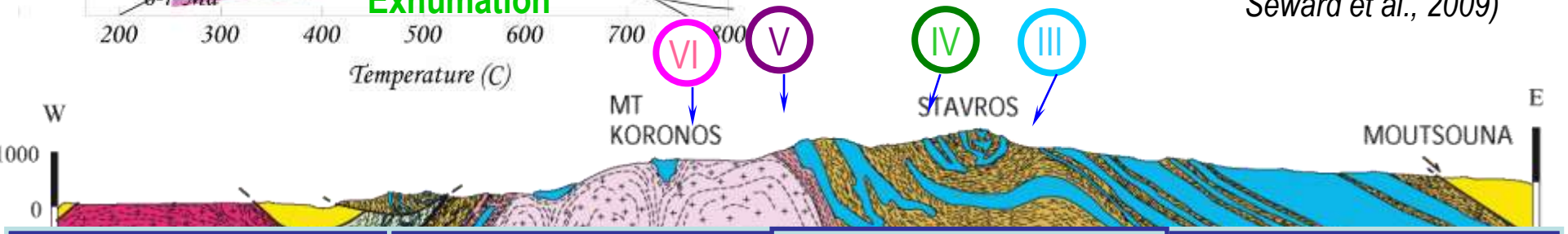


Metagabbro

- *Coeur hérité:* *260 Ma*
- *Recristallisation HP:* *58 Ma*
- *Recristallisation HT:* *16 Ma*

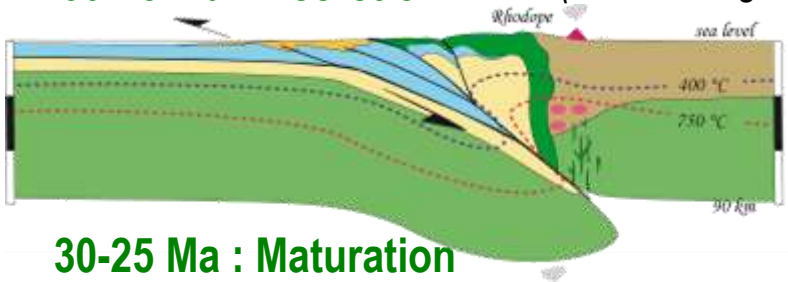


(Vanderhaeghe, 2004 Martin et al., 2006; Duchêne et al., 2006; Martin et al., 2008 Seward et al., 2009)

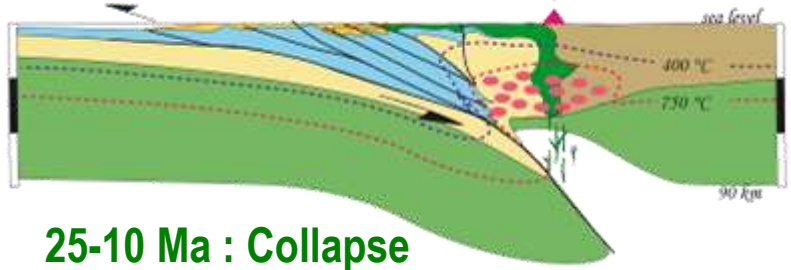


60-45 Ma : Accretion

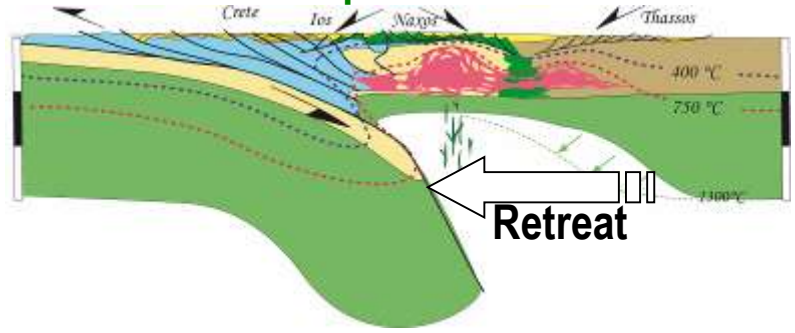
(Vanderhaeghe et al., 2007)

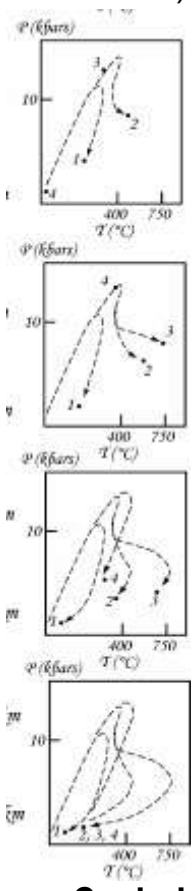


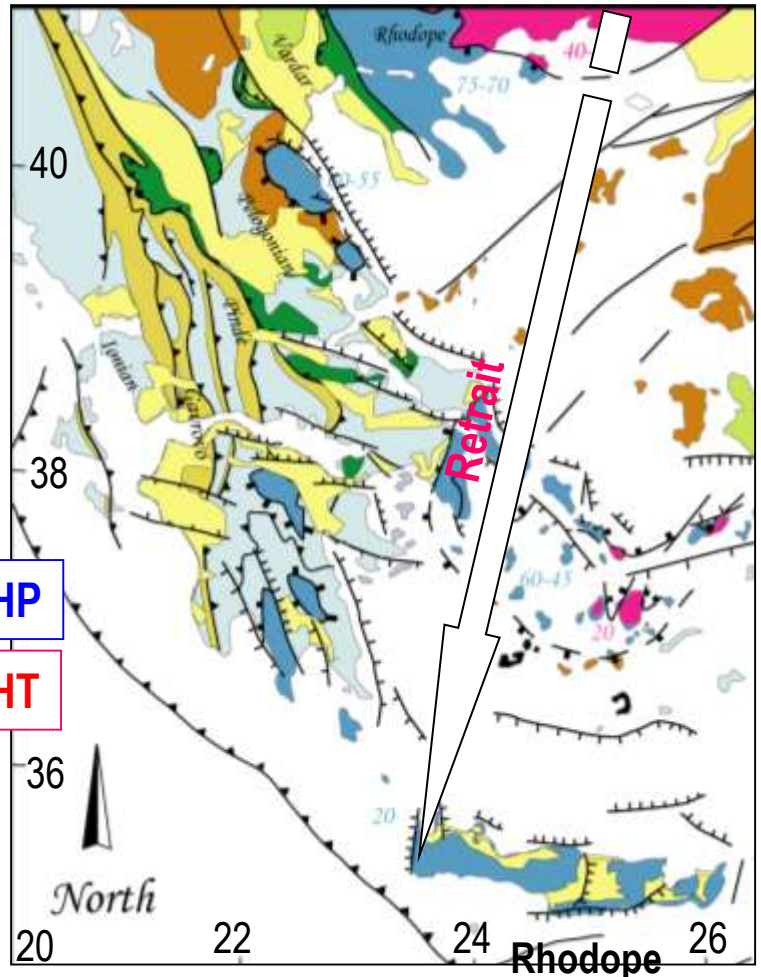
30-25 Ma : Maturation

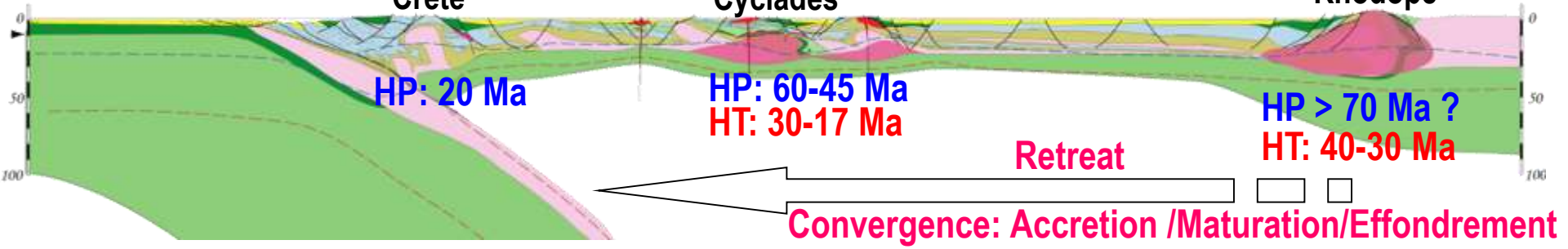


25-10 Ma : Collapse









Evolution thermomécanique des orogènes

Alpes (Prisme orogénique) :

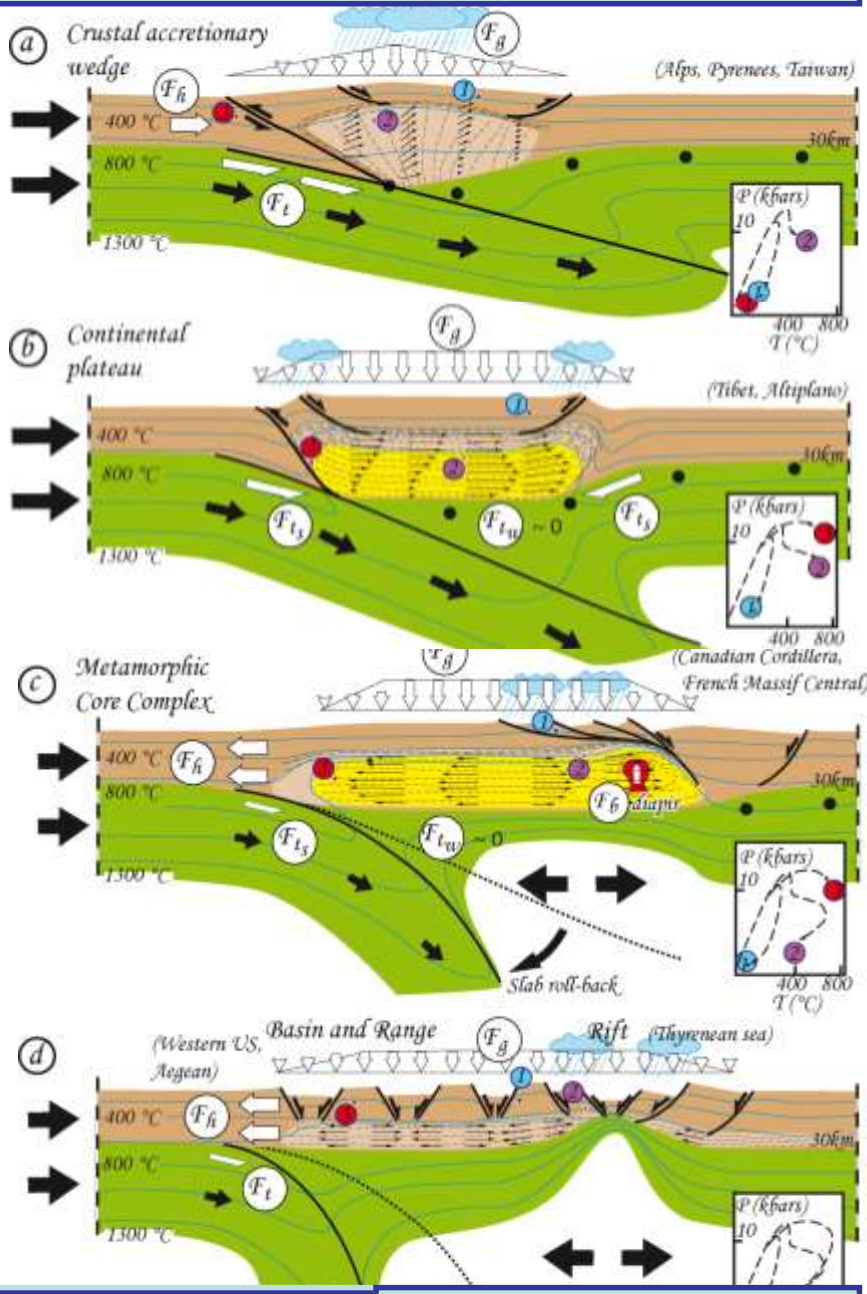
- Convergence: subduction/accrétion
- Géotherme faible

Tibet (Plateau orogénique) :

- Fluage gravitaire d'une croûte inférieure à faible viscosité

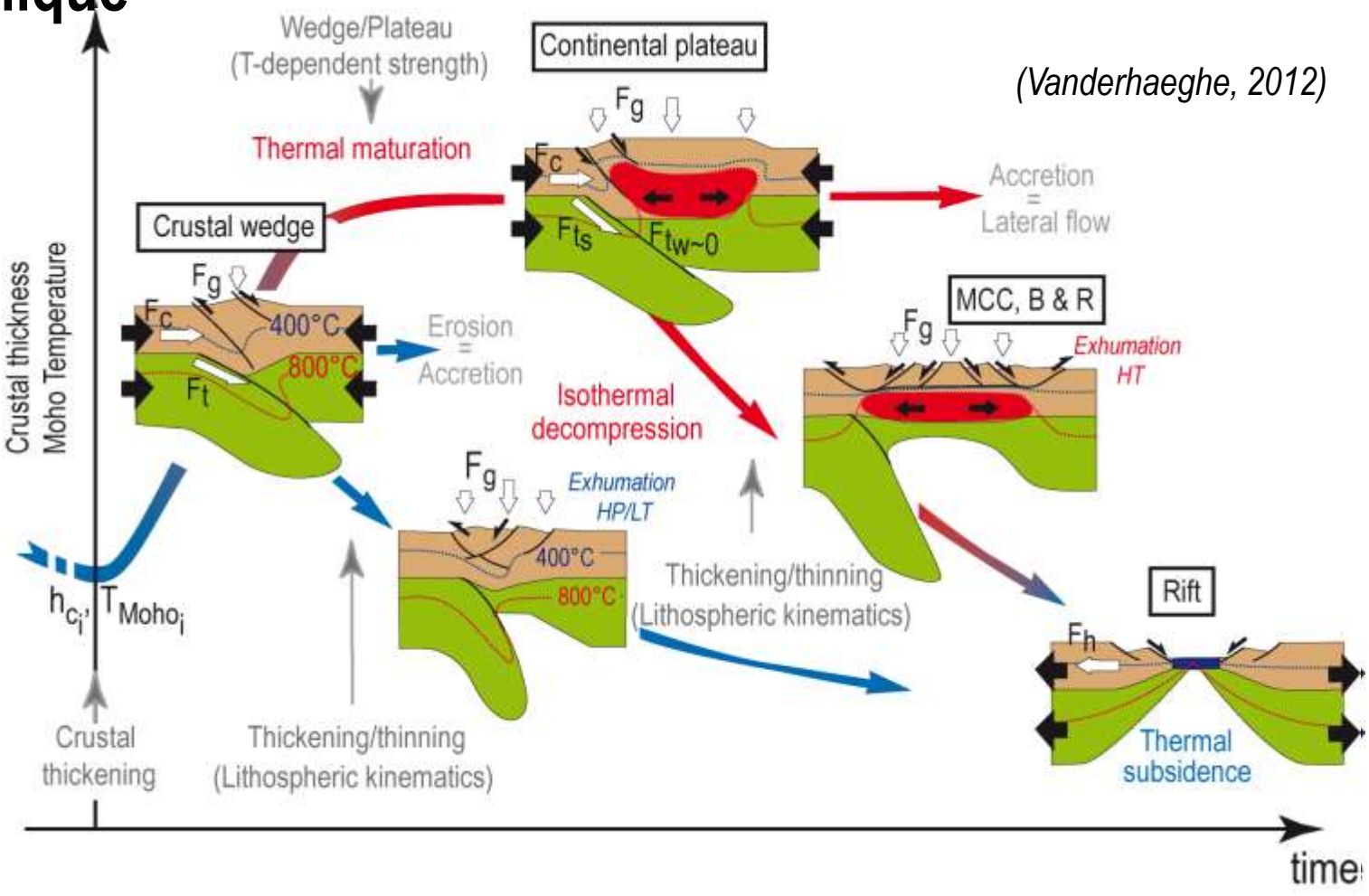
Egée (Bassins intermontagneux) :

- Accrétion d'unités HP/LT
- Maturation thermique
- Effondrement gravitaire d'une croûte ramollie



Cycle orogénique

Subduction
ET
Accrétion-Collision



(Vanderhaeghe, 2012)

Réponses :

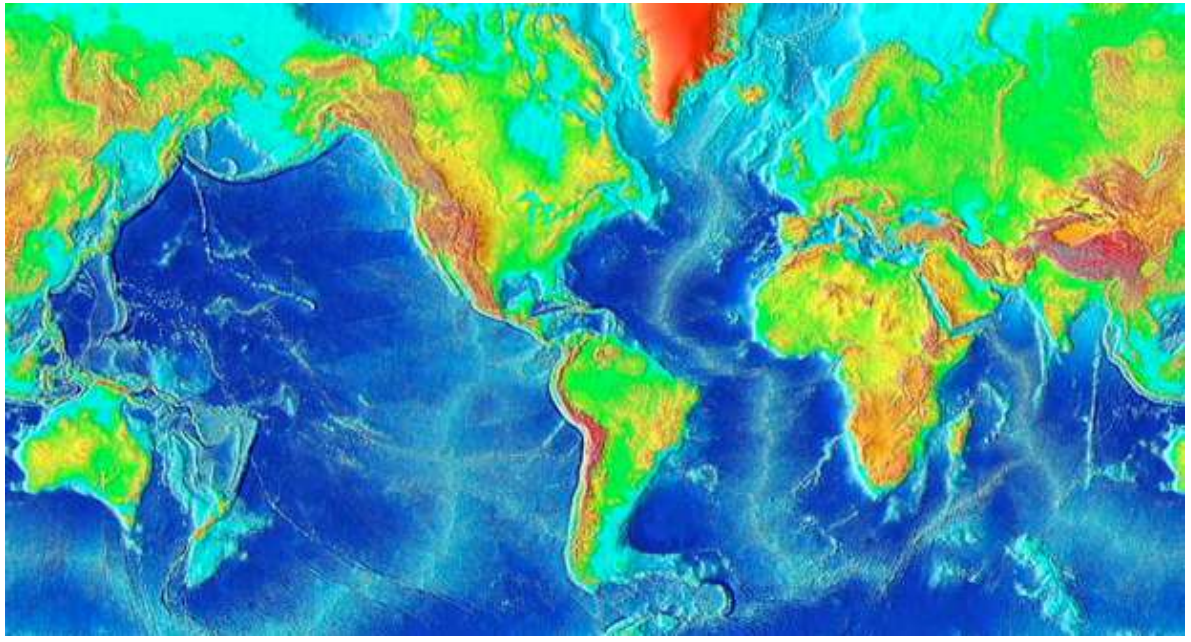
- Transition géotherme faible/fort ? : ***Relaxation thermique post-épaississement***
- Transition épaississement/amincissement ? : ***Changement de la cinématique des plaques***
- Exhumation des roches métamorphiques? : ***Erosion et surtout extension***

Bon camembert!

Earth dynamics and plate tectonics

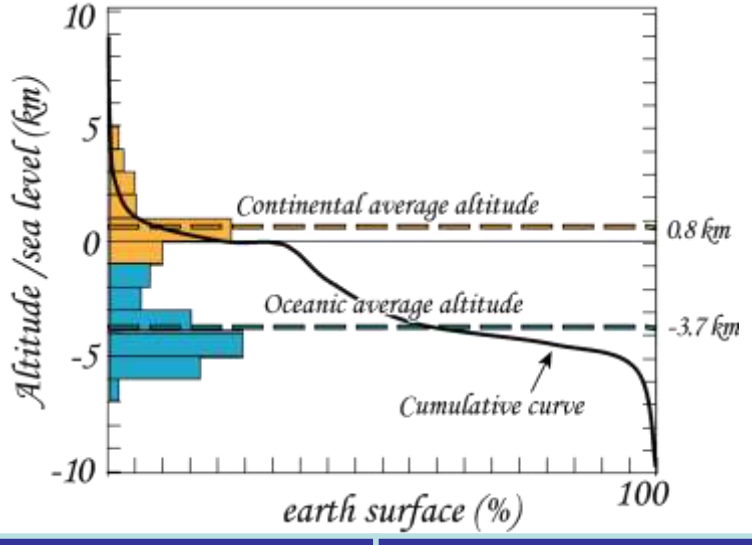
Earth topography

http://www.ngdc.noaa.gov/



Earth topography:

- Continental plains, mountain belts, basins
- Oceans : abyssal plains, ridges, trenches
- Mass distribution within the Earth
- Distinction continents/oceans



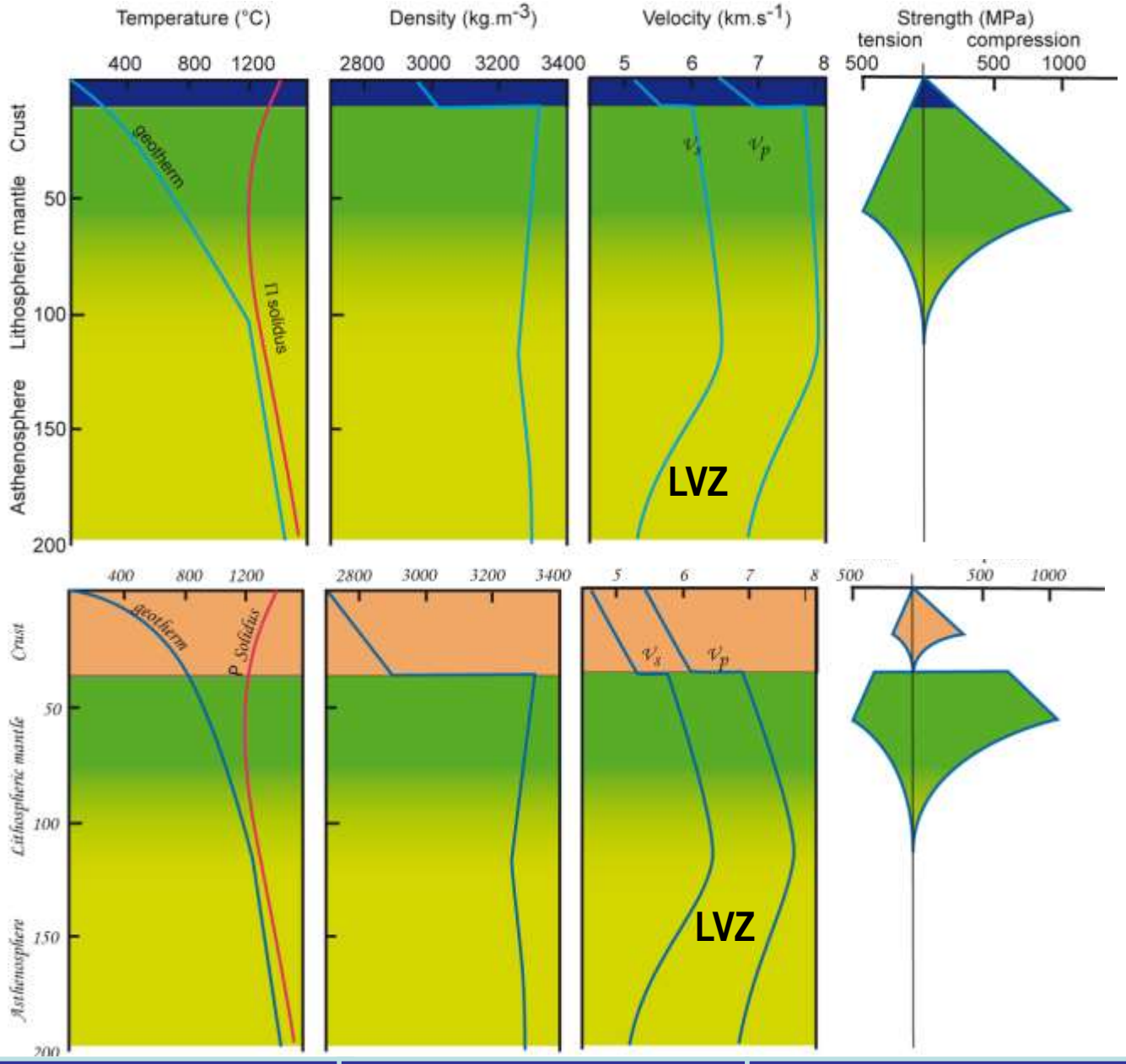
Earth dynamics :

- Mass redistribution
- Modifications of surface topography

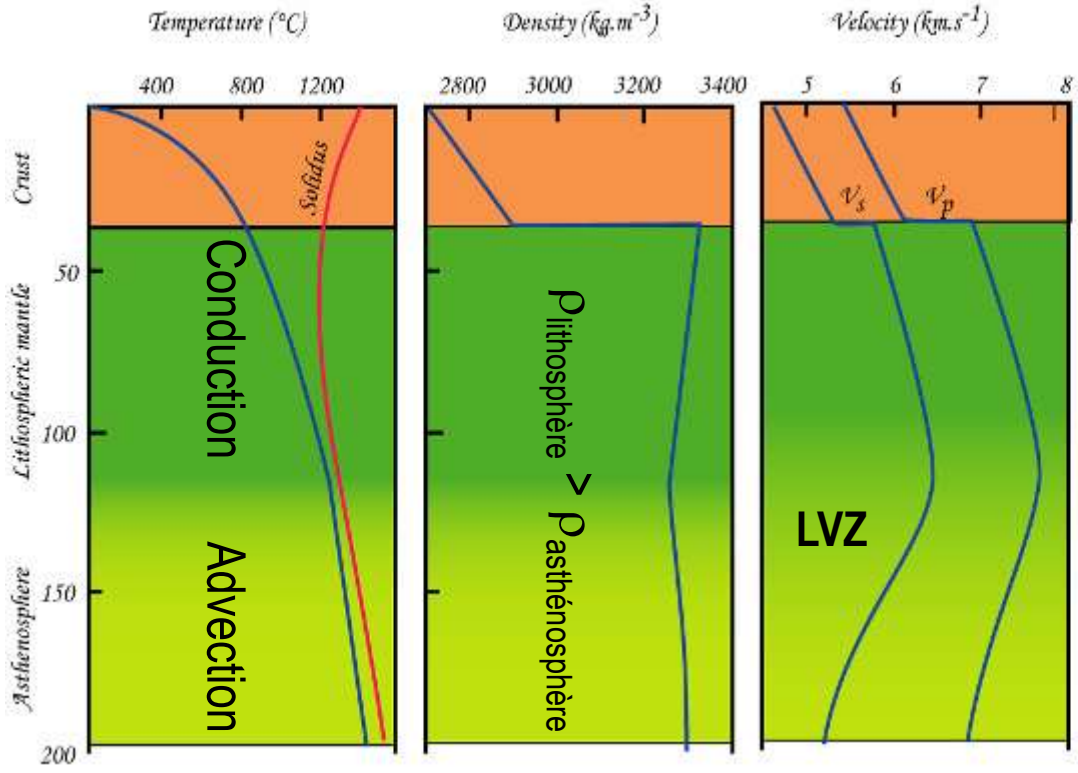
Oceanic lithosphere
Continental lithosphere

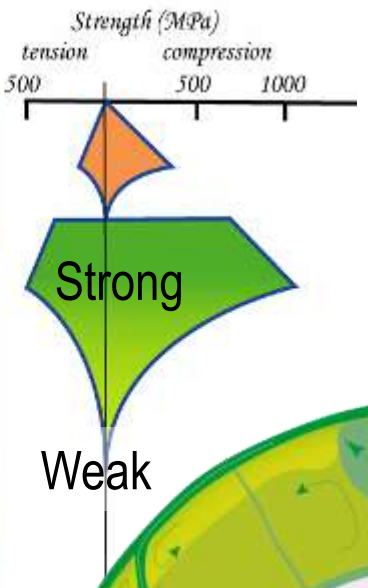
$$Vp = \sqrt{\frac{(4/3)\mu + k}{\rho}},$$

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$



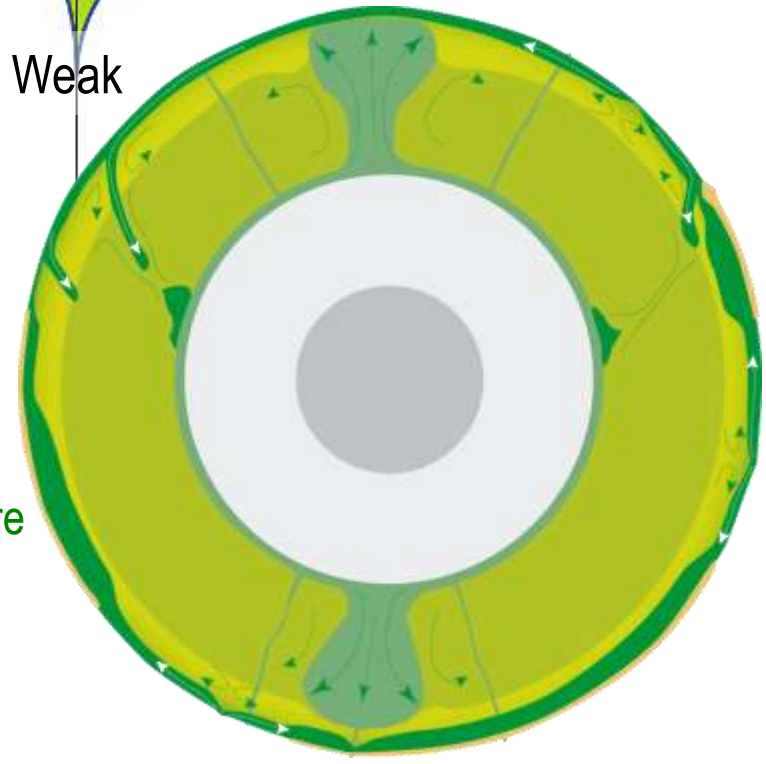
Lithosphere definitions





$$Vp = \sqrt{\frac{(4/3)\mu + k}{\rho}},$$

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$



Lithosphere:

- Mechanical — **Strong**
- Thermal — **Conductive**
- Chemical — **Dense**

} Compared to asthenosphere

- **Plate tectonics**
- **Mantle-scale mass redistribution**

Earth dynamics and plate tectonics

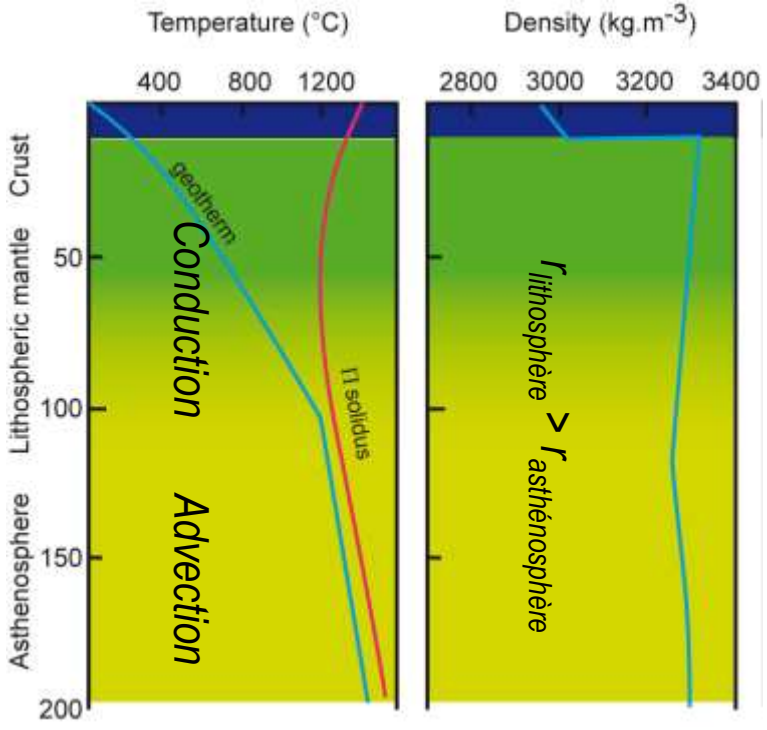
Oceans:

Oceanic ridges:

- *Young lithosphere*
- *High surface heat flux*

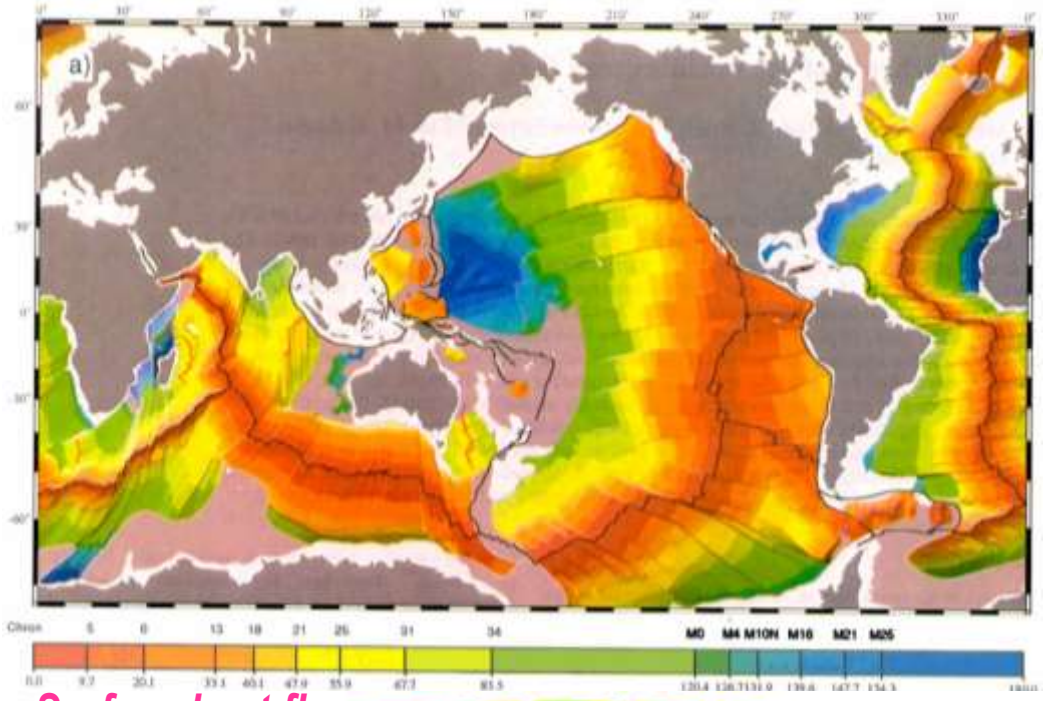
Oceanic trenches:

- *Old lithosphere*
- *Low surface heat flux*

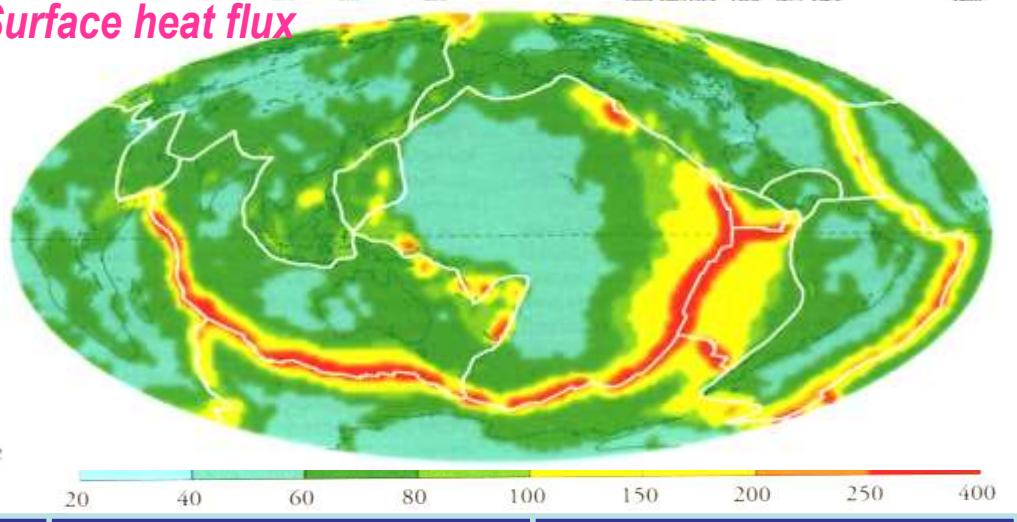


Age of the oceanic lithosphere

(Müller et al., 97)



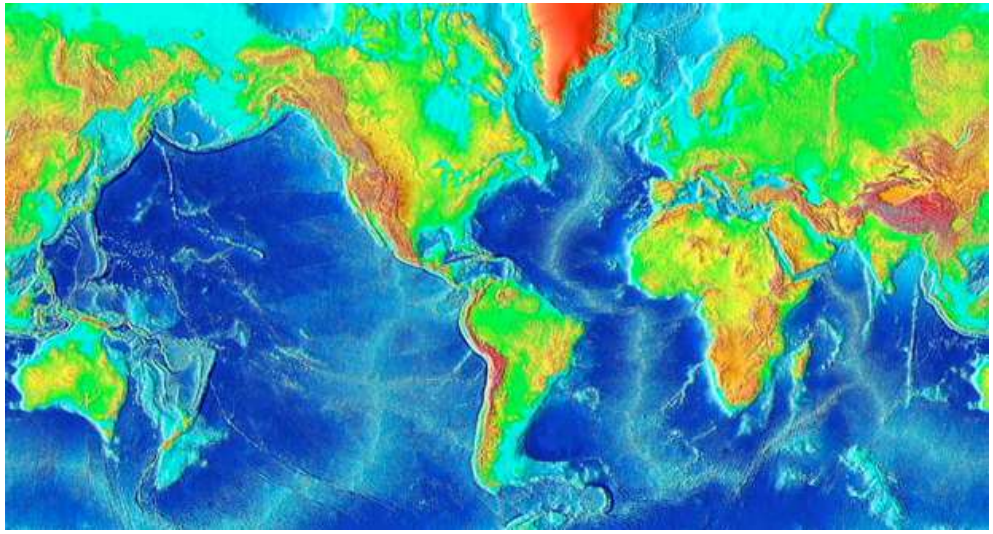
Surface heat flux



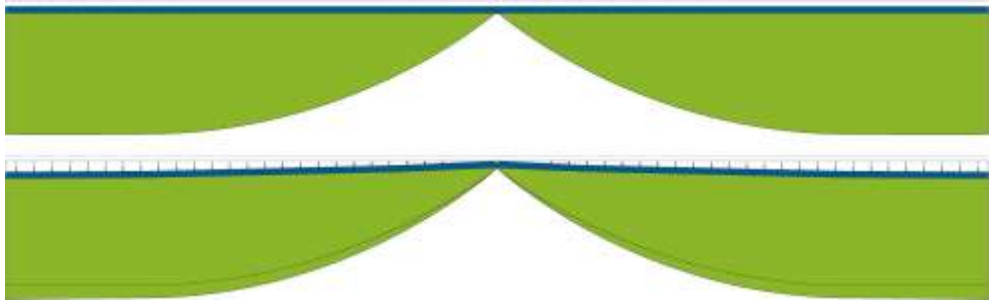
Earth dynamics and plate tectonics

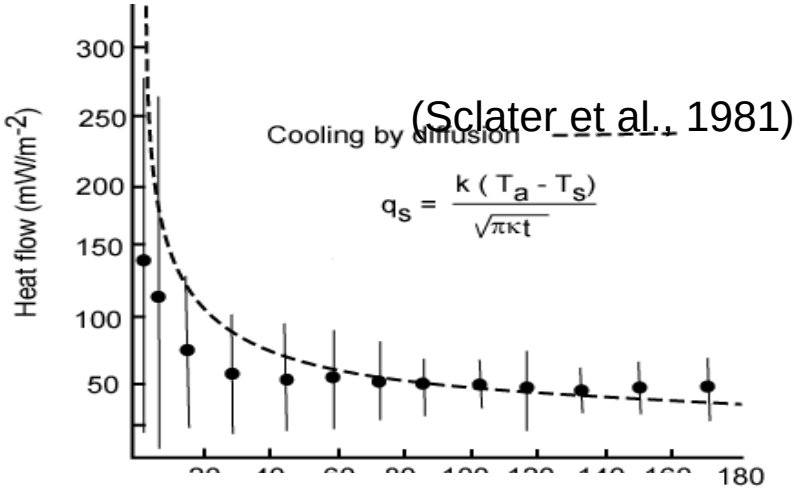
Ocean's topography :

- *Lithospheric thickness*

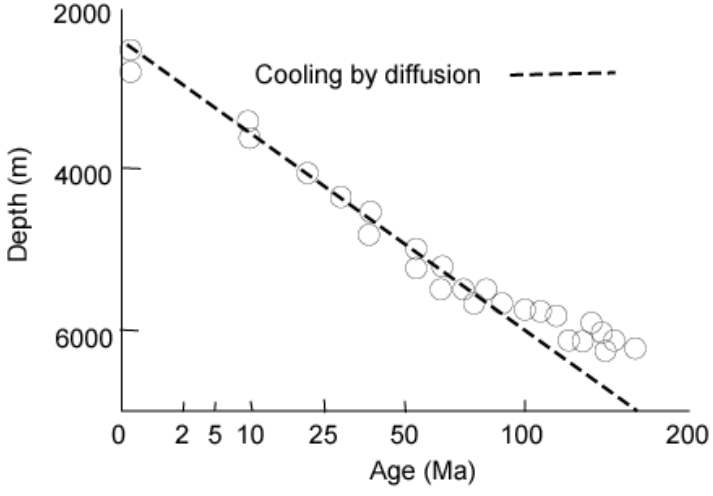


http://www.ngdc.noaa.gov/

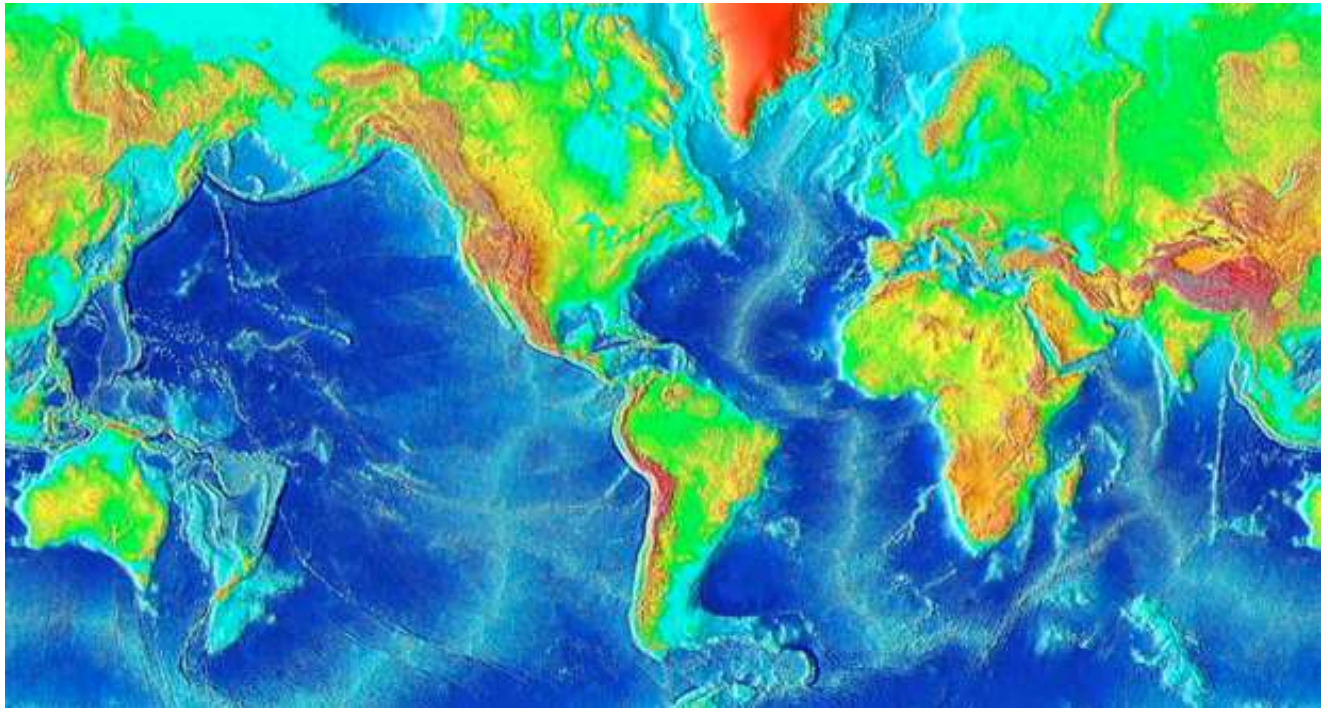




(Sclater et al., 1981)



Earth dynamics and plate tectonics



Ocean's topography :

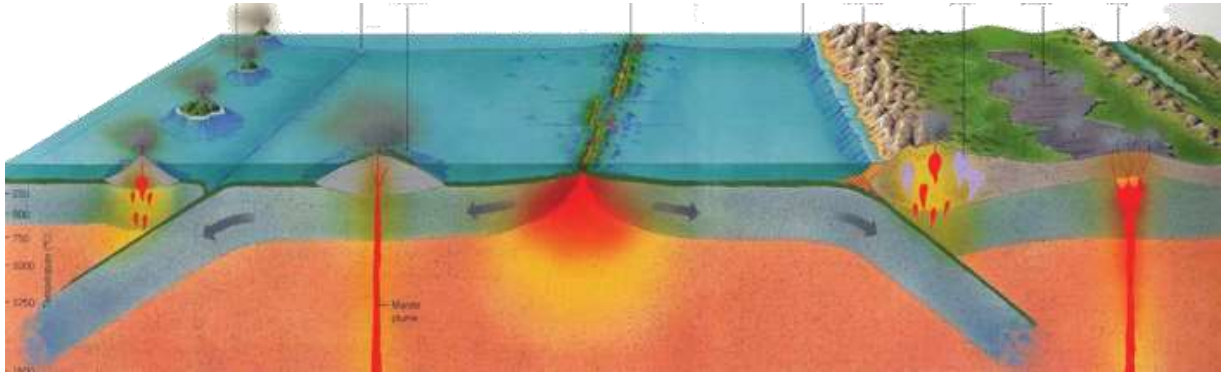
- Lithospheric thickness

Ridges:

- Plate divergence
- Thinning

Trenches:

- Plate convergence
- Subduction



Earth dynamics and plate tectonics

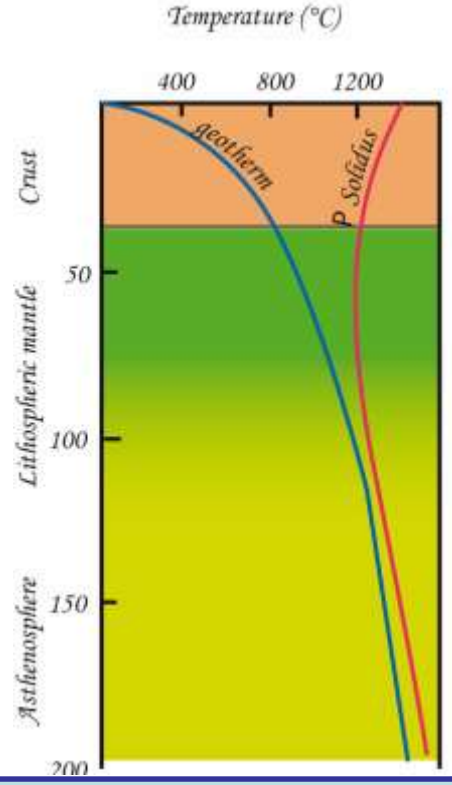
Continents

Mountain belts :

- Thick crust
- High surface heat flux

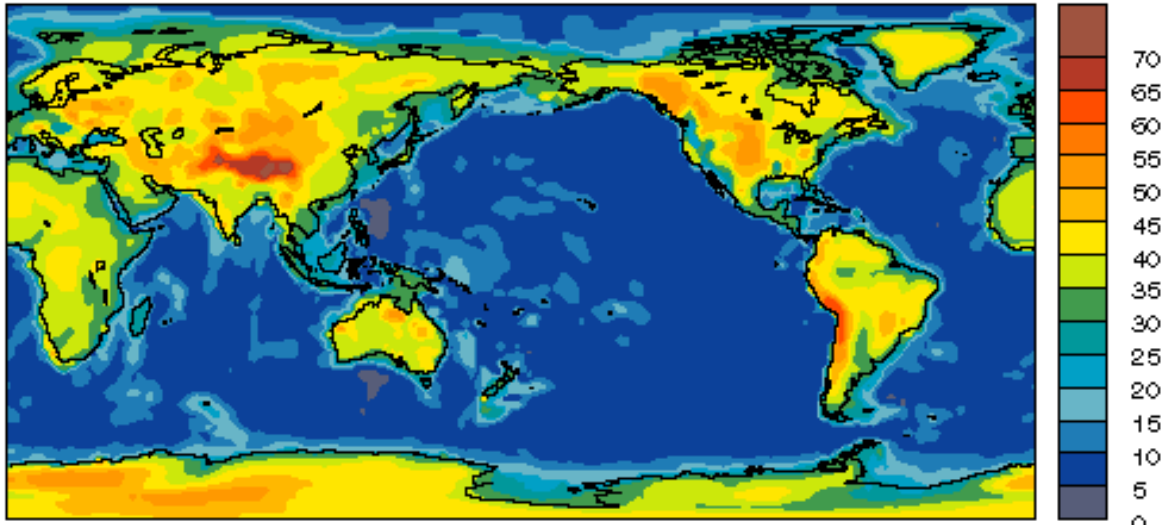
Rifts:

- Thin crust
- High surface heat flux



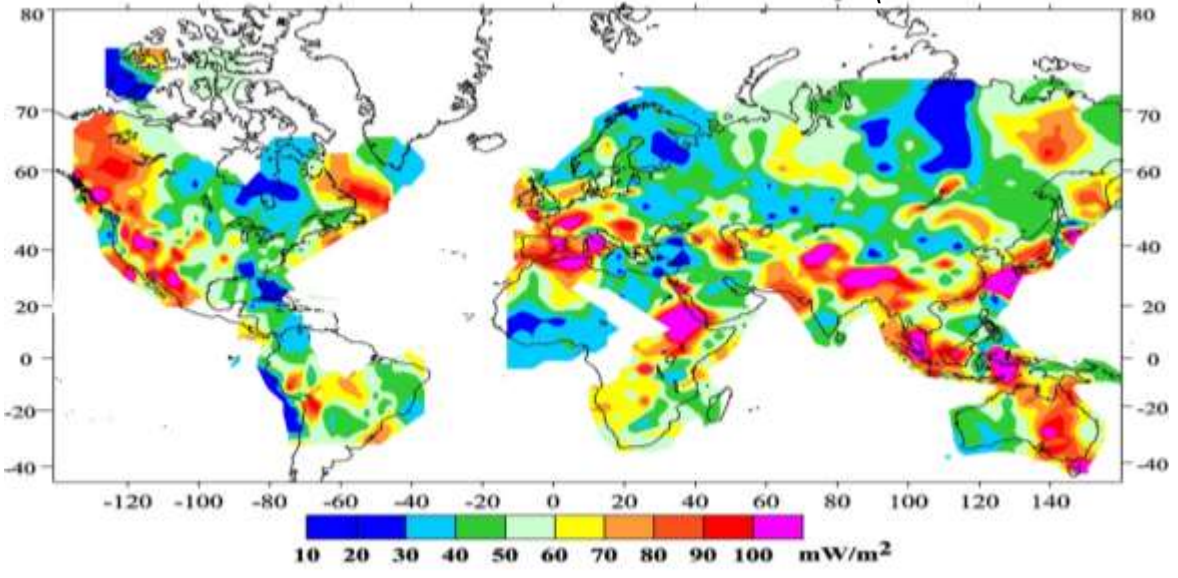
Crustal thickness

(Bassin et al., 00)



Surface heat flux

(Artemieva & Mooney, 01)

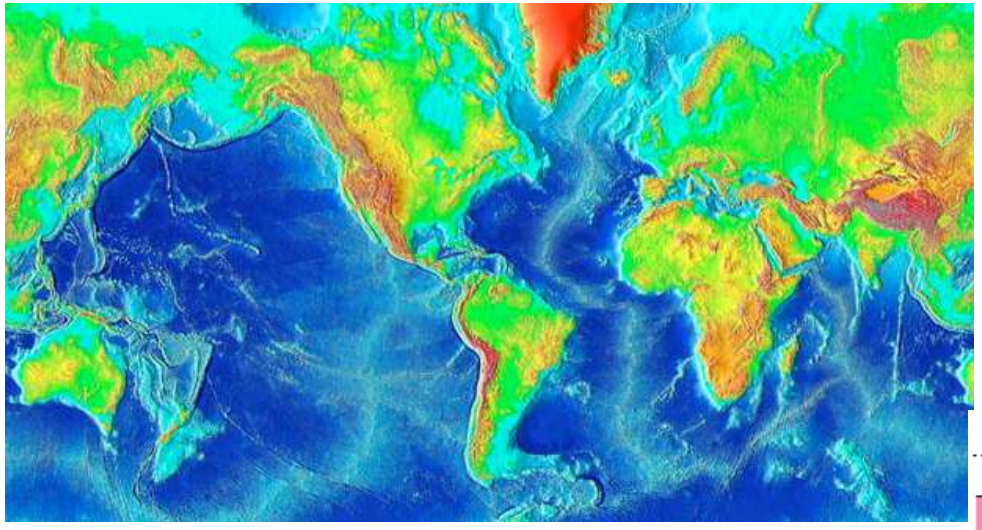


Earth dynamics and plate tectonics

Continents

Mountain belts :

- Thick crust
- High surface heat flux



http://www.ngdc.noaa.gov/

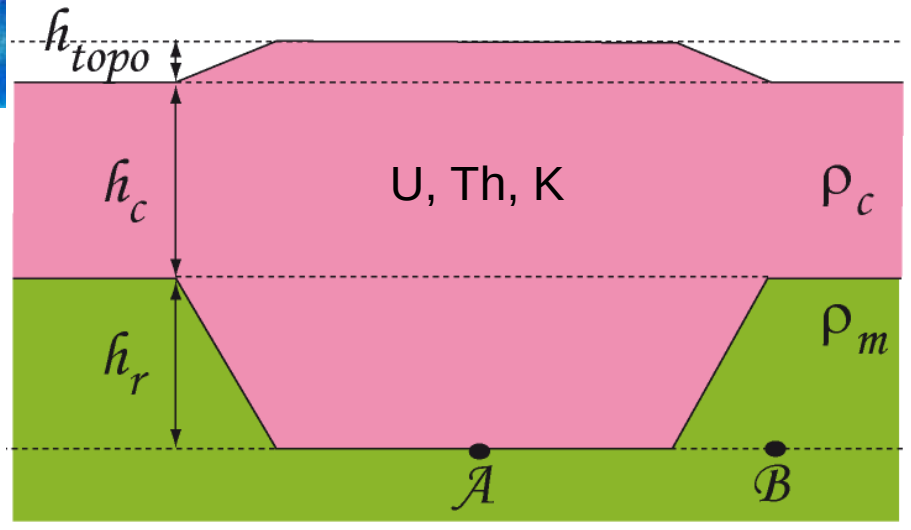
Isostasy

$$\mathcal{P}_{\mathcal{A}} = \mathcal{P}_{\mathcal{B}}$$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{A}} = \rho_a g(h_{topo} + h_c + h_r)$$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{B}} = \rho_c h_c + \rho_m h_r$$

$$\longrightarrow h_r = 5\, h_{topo}$$



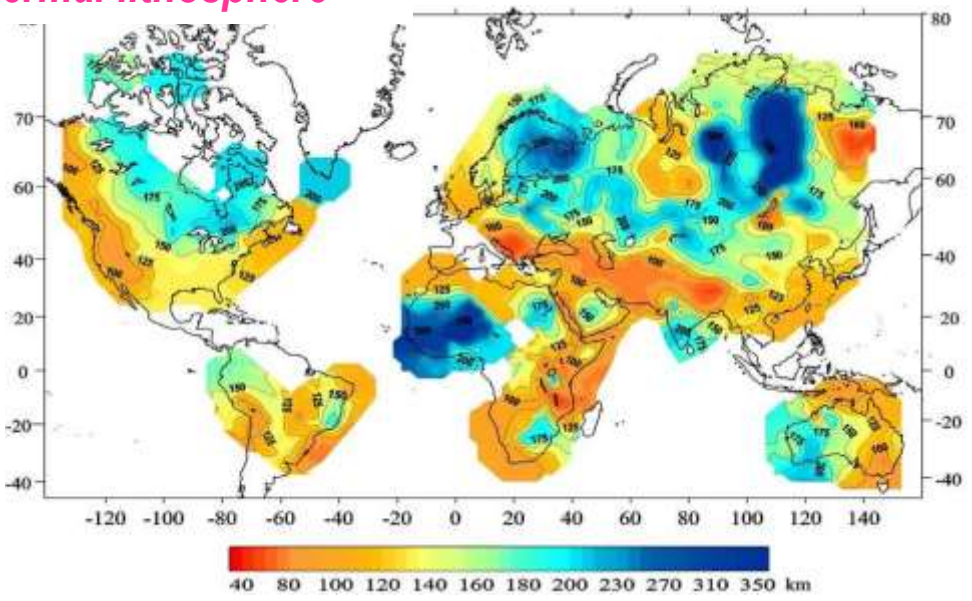
Earth dynamics and plate tectonics

Continental plains (old cratons) :
- *Thick lithosphere*
- *Low surface heat flux*

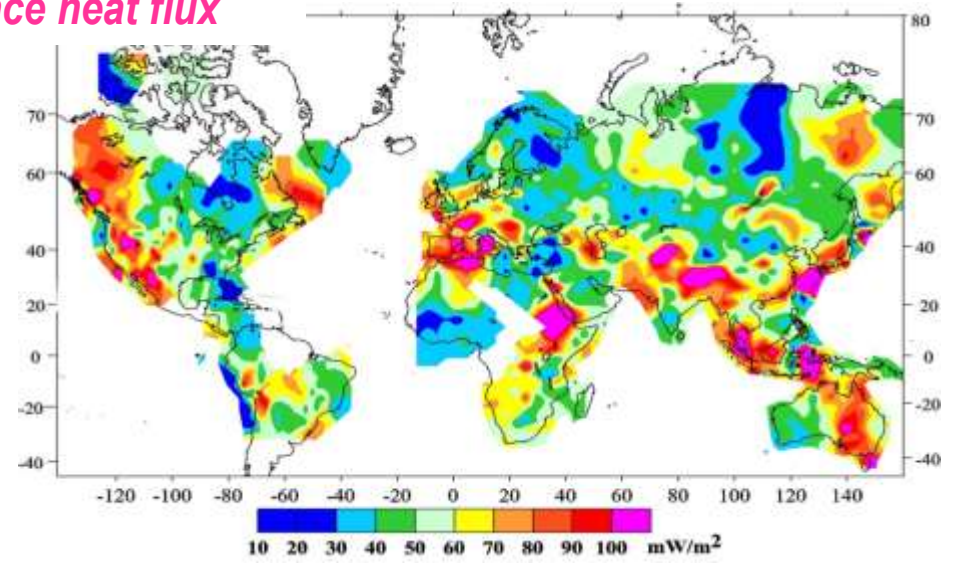
Rifts and mountain belts :
- *Thin lithosphere*
- *High surface heat flux*

Continents' topography :
- *Crust/lithosphere thickness ratio*

Thermal lithosphere



Surface heat flux



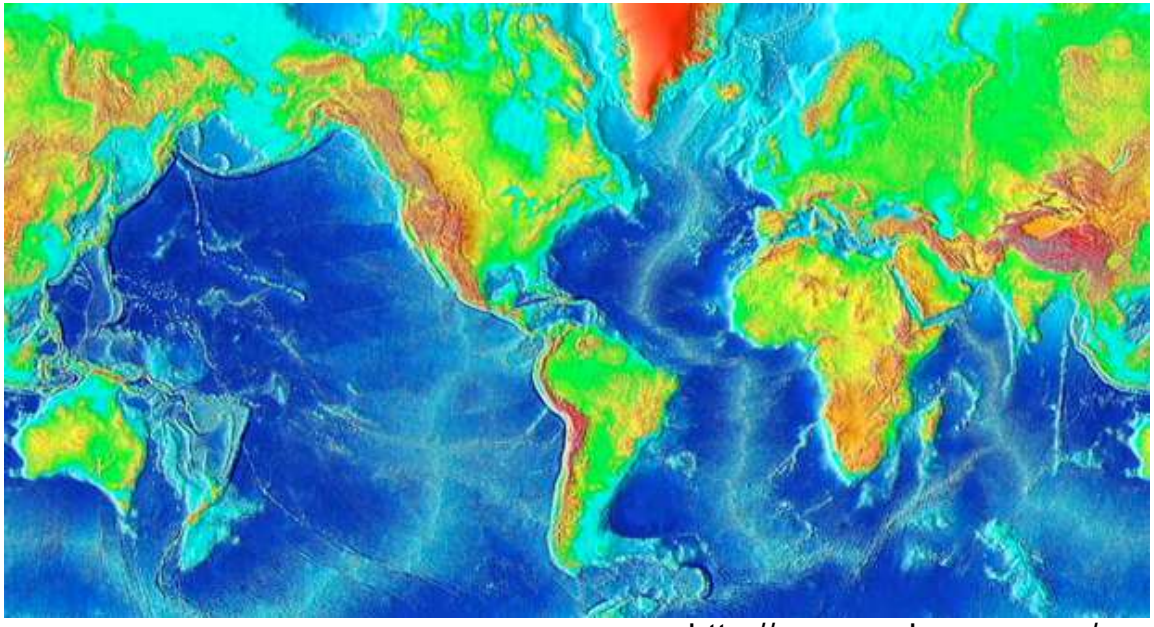
(Artemieva & Mooney, 01)

Plate tectonics
Formation and evolution of the continental crust

Plate convergence :

- Magmatic accretion
- Tectonic accretion

→ Crustal thickening



http://www.ngdc.noaa.gov/

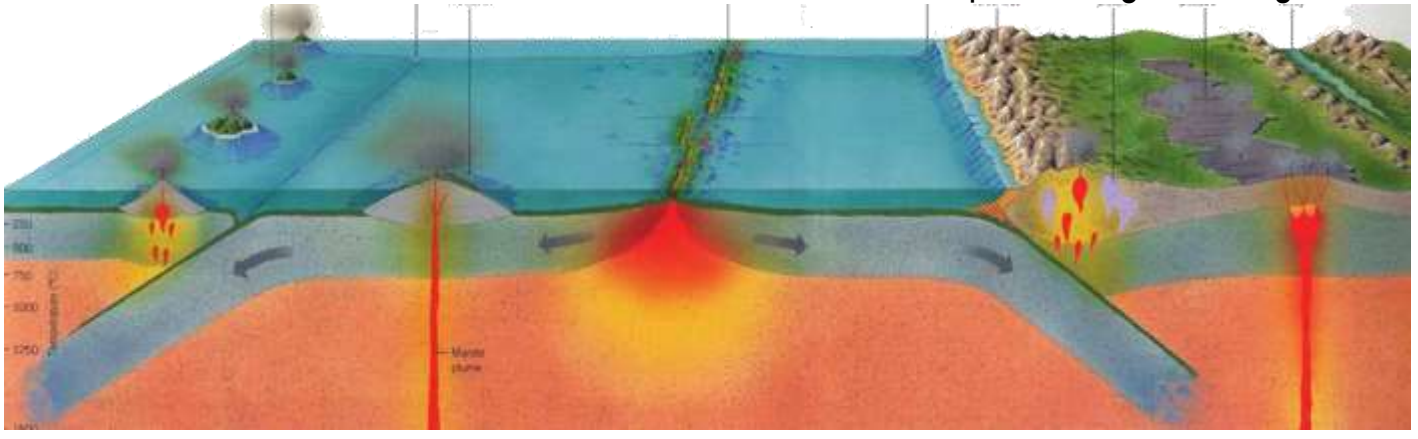
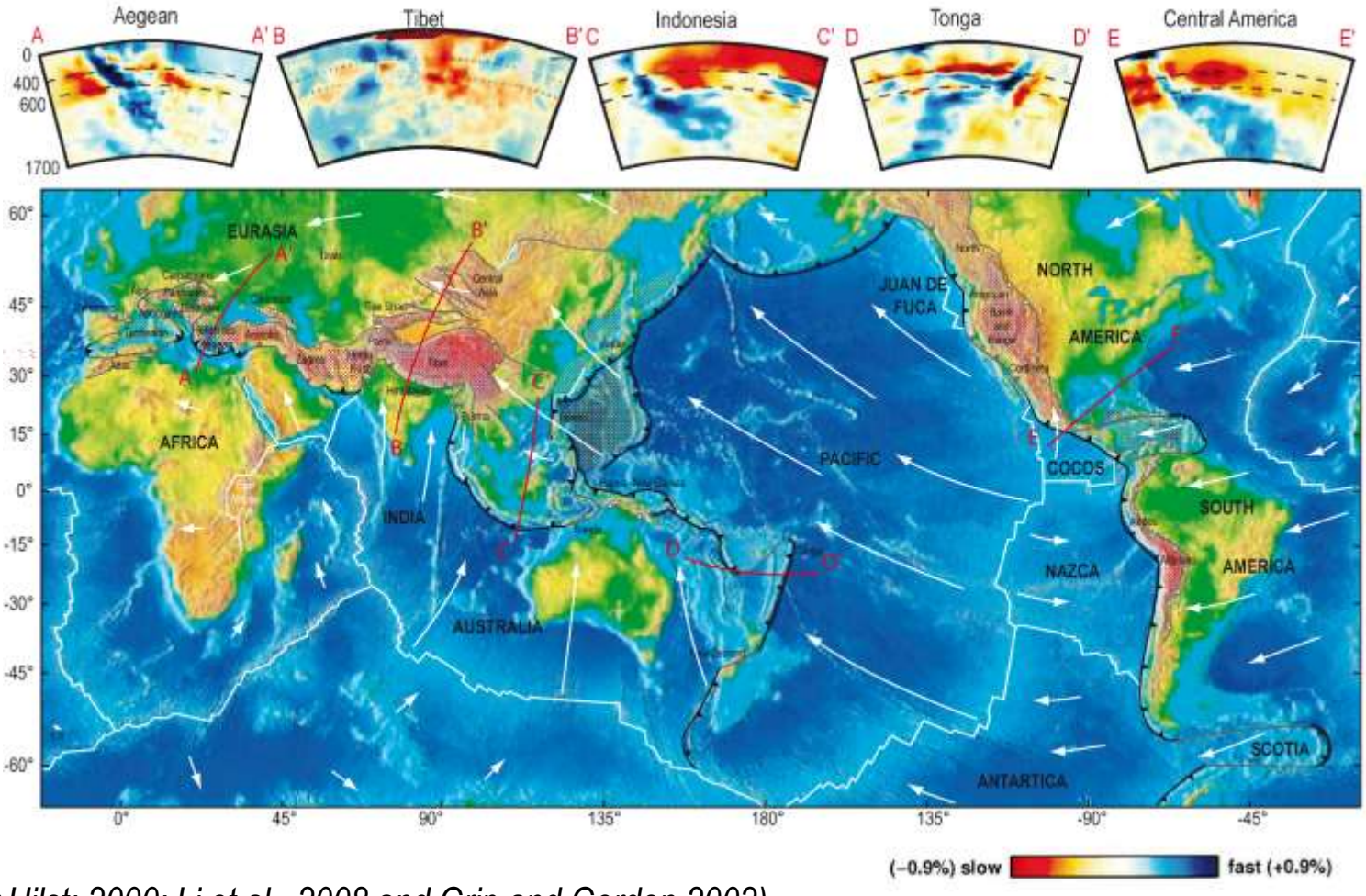


Plate tectonics and orogeny

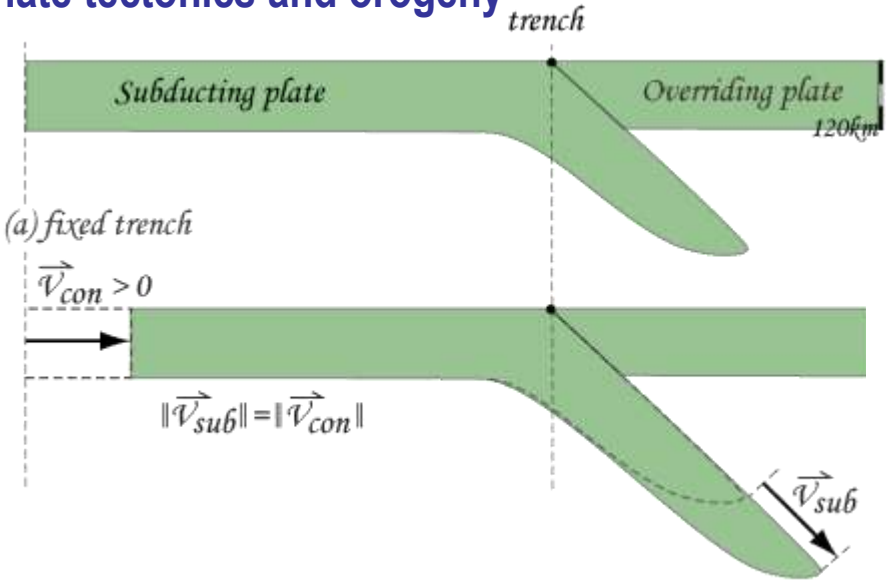
Convergent plate boundaries:

- **Subduction**
- **Tectonic accretion**
- **Magmatism**

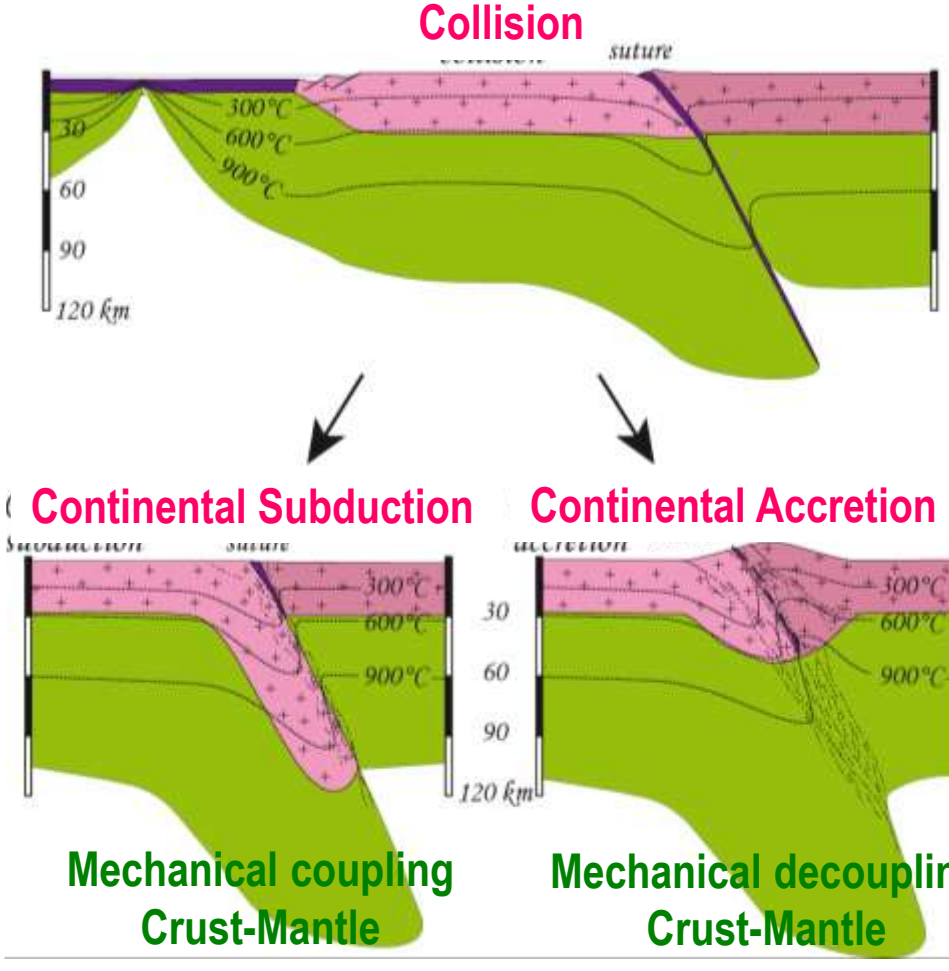


(Vanderhaeghe, 2012,
after Karason & van der Hilst; 2000; Li et al., 2008 and Grip and Gordon 2002)

Plate tectonics and orogeny



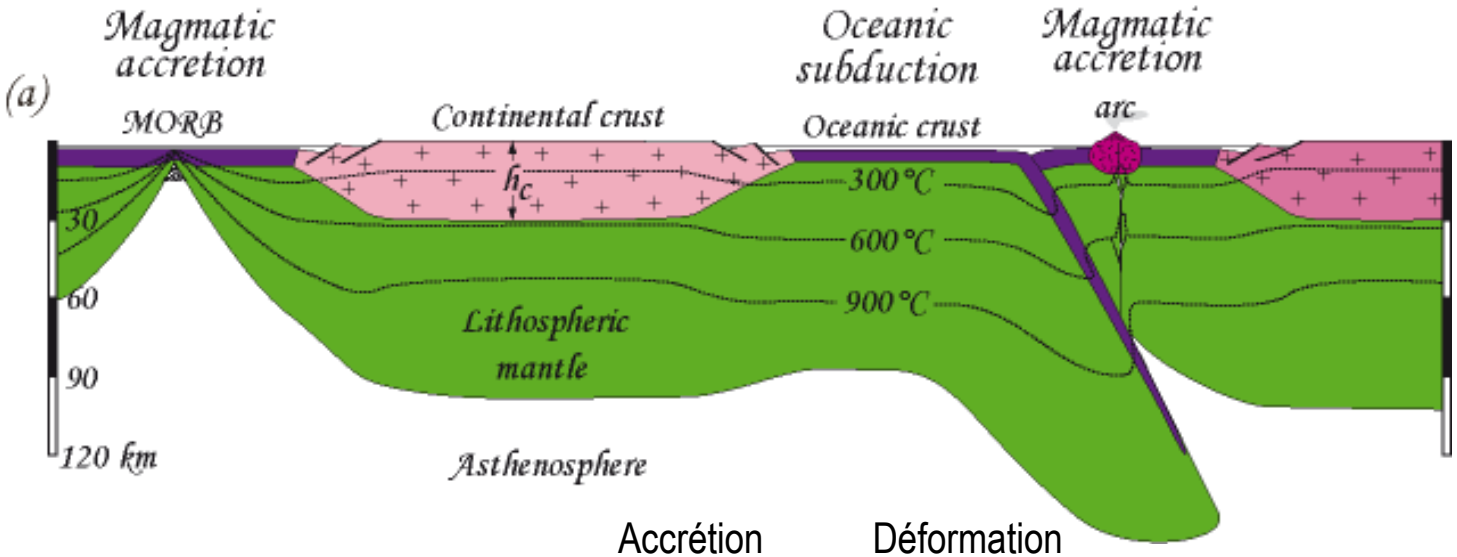
Crustal behaviour



(Vanderhaeghe & Duchêne, 2010)

Convergent plate boundaries:

Plate kinematics



(Vanderhaeghe & Duchêne, 2010)

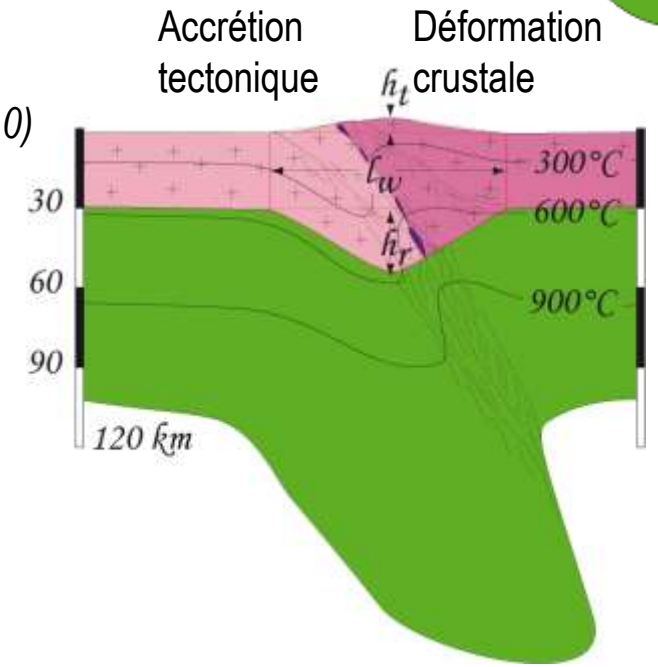
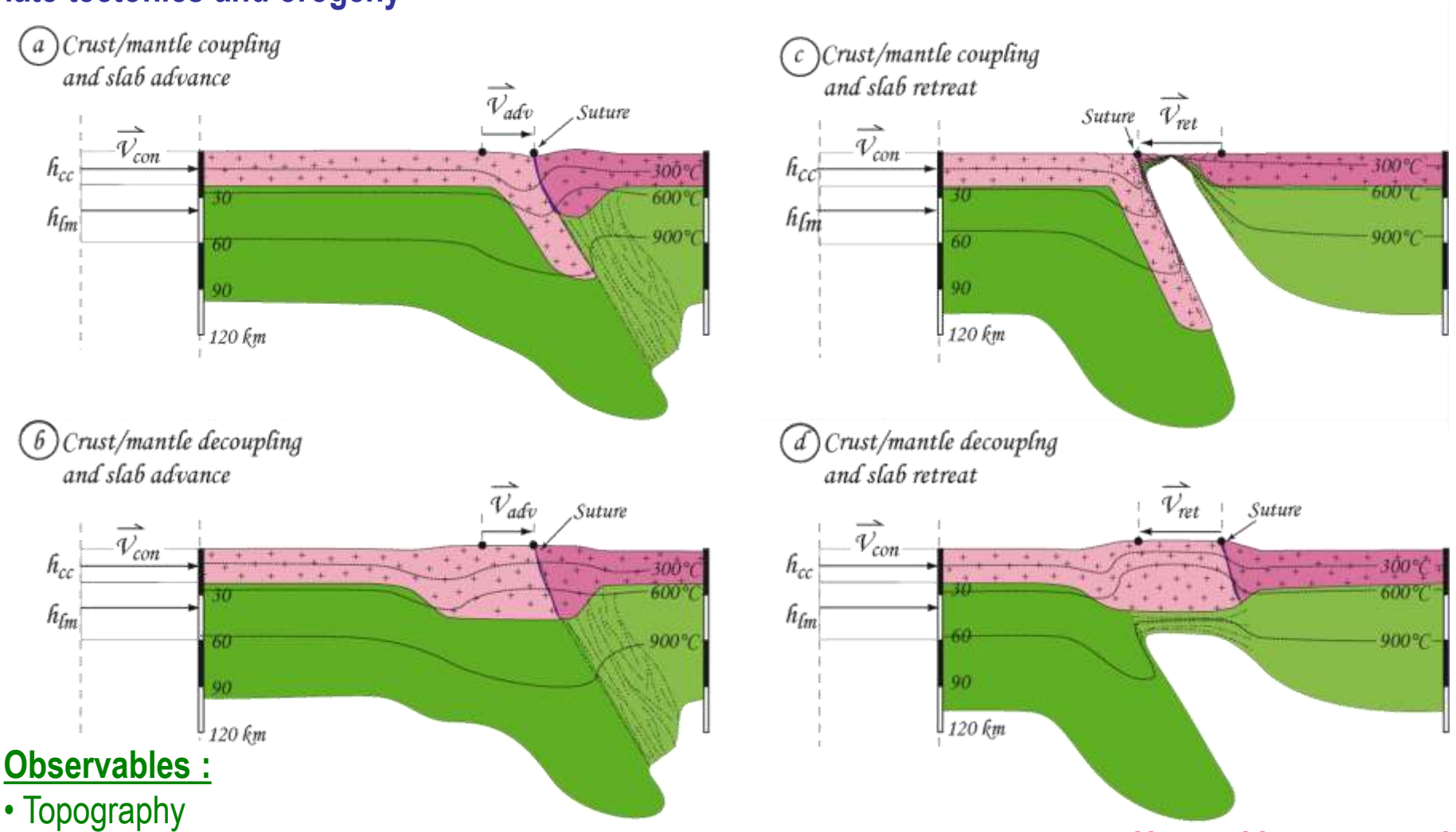


Plate tectonics and orogeny



Observables :

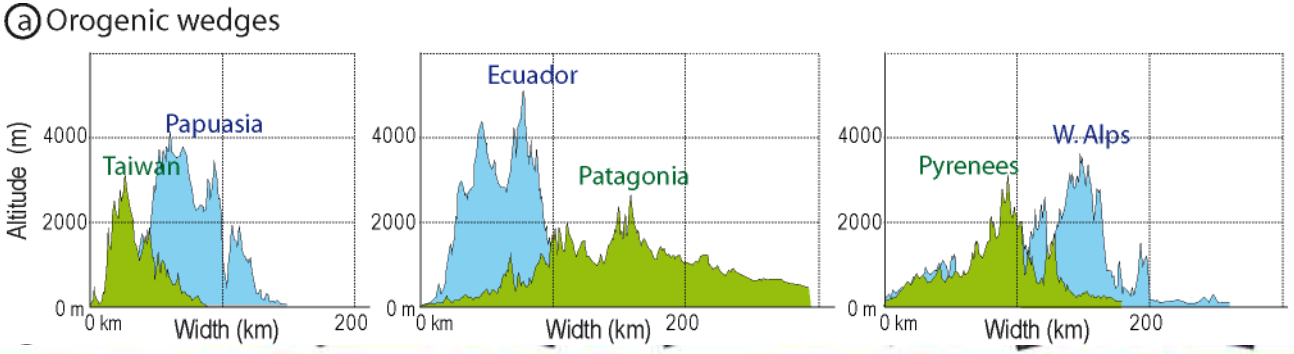
- Topography
- Suture
- crust/mantle thickness ratio
- Surface heat flux

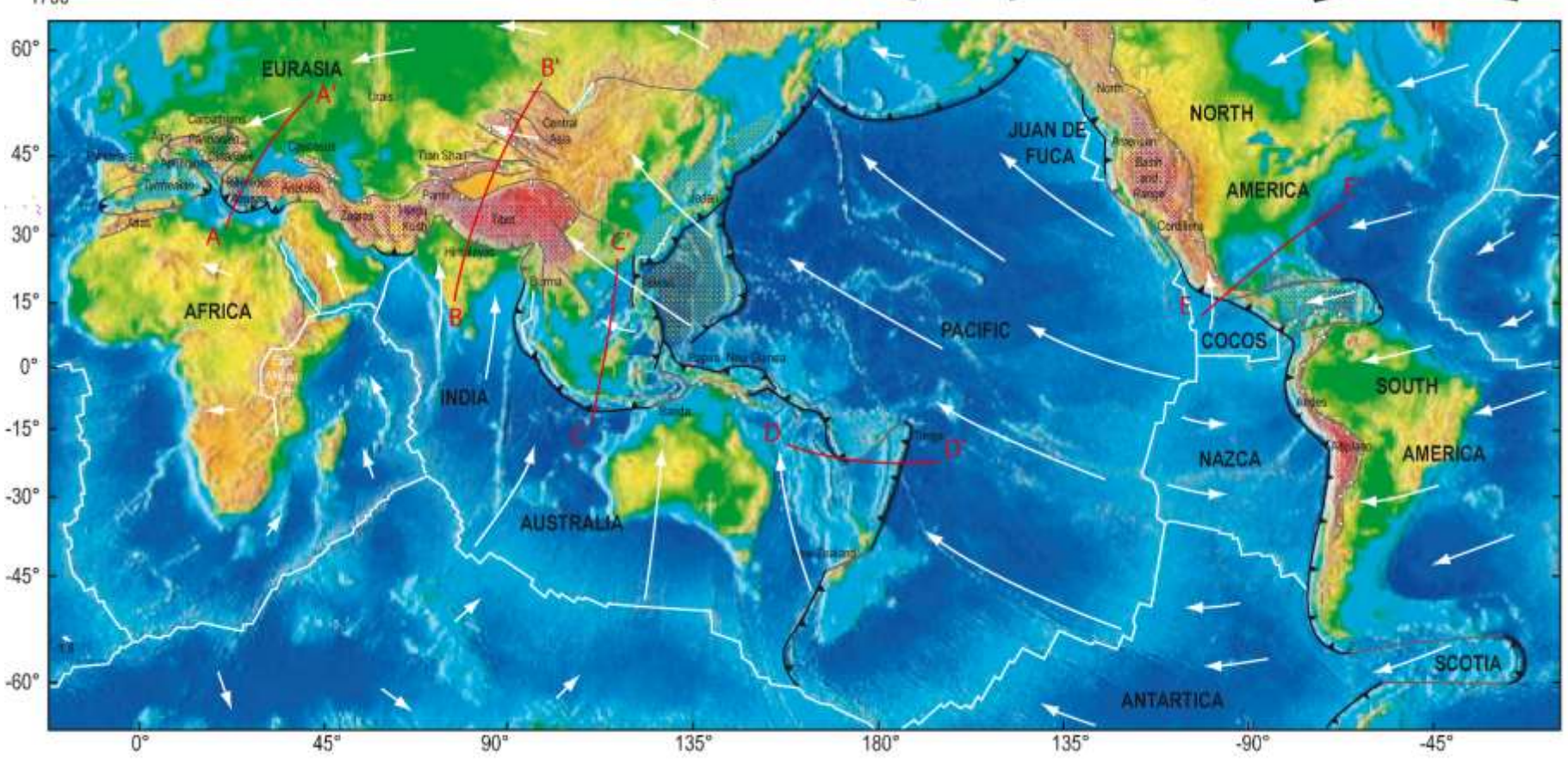
→ **Hot and buoyant wedge**

(Vanderhaeghe & Duchêne, 2010)

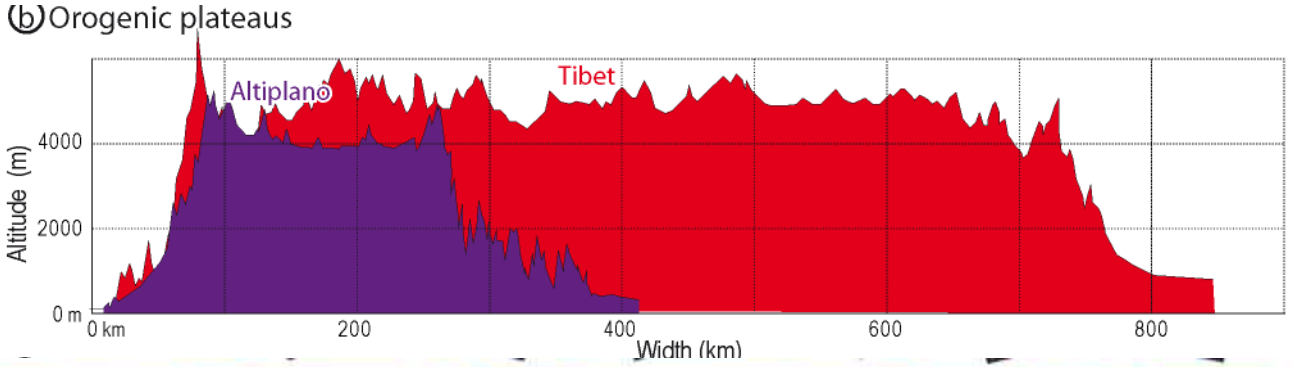
Topography along convergent plate boundaries

(Vanderhaeghe, 2012)

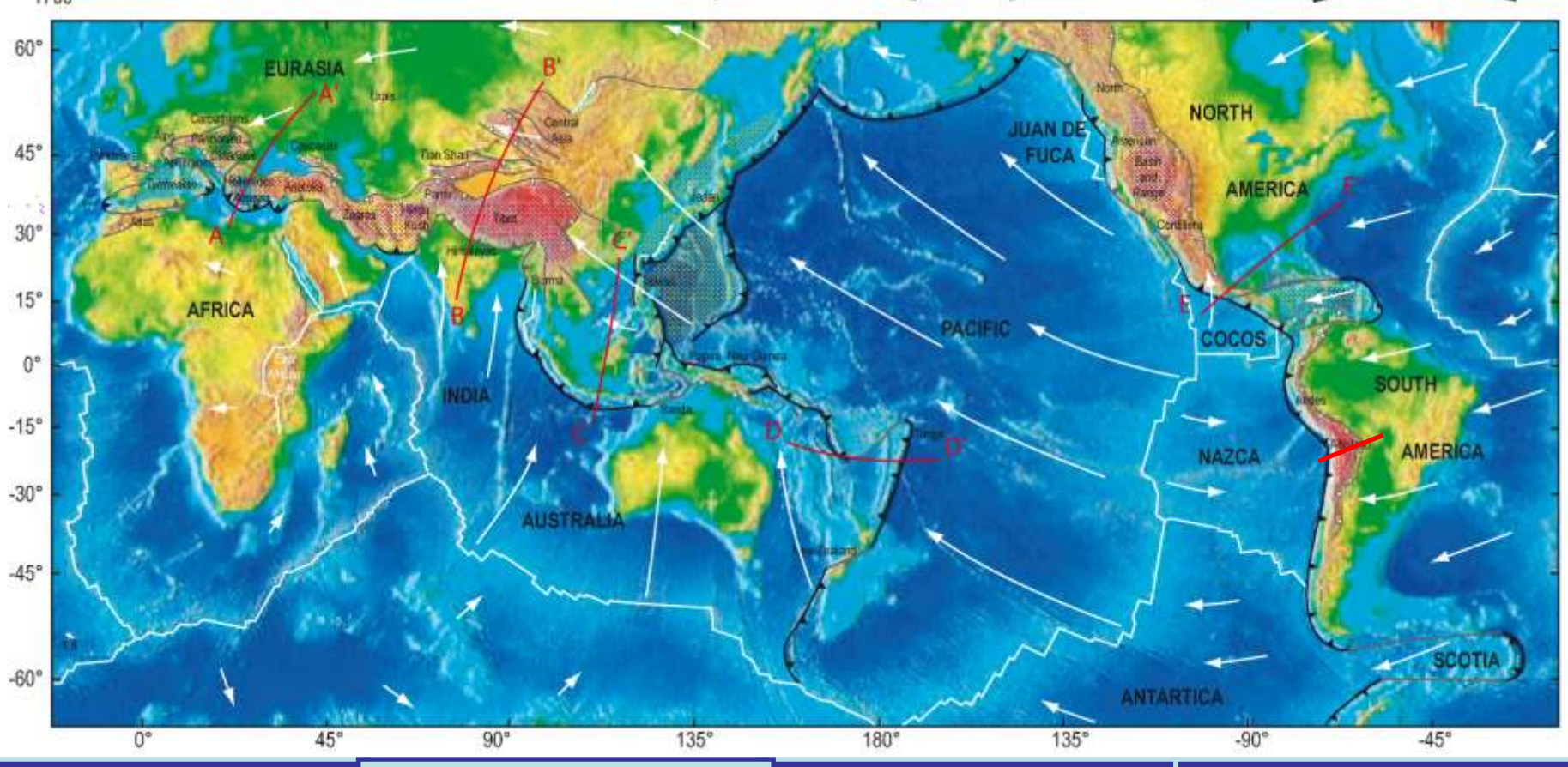




Topography along convergent plate boundaries

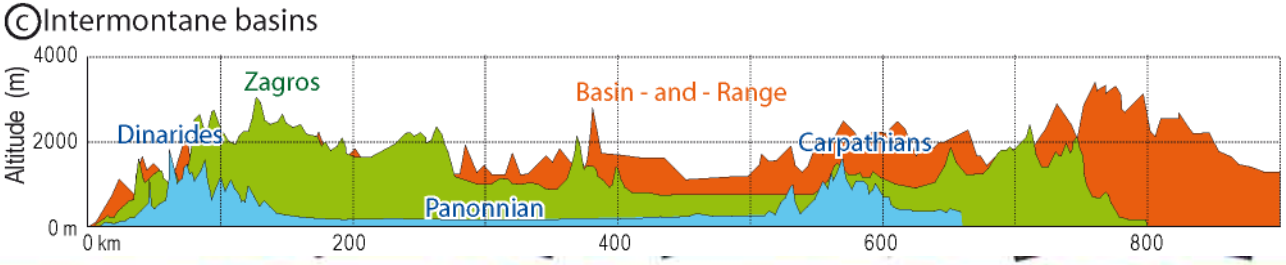


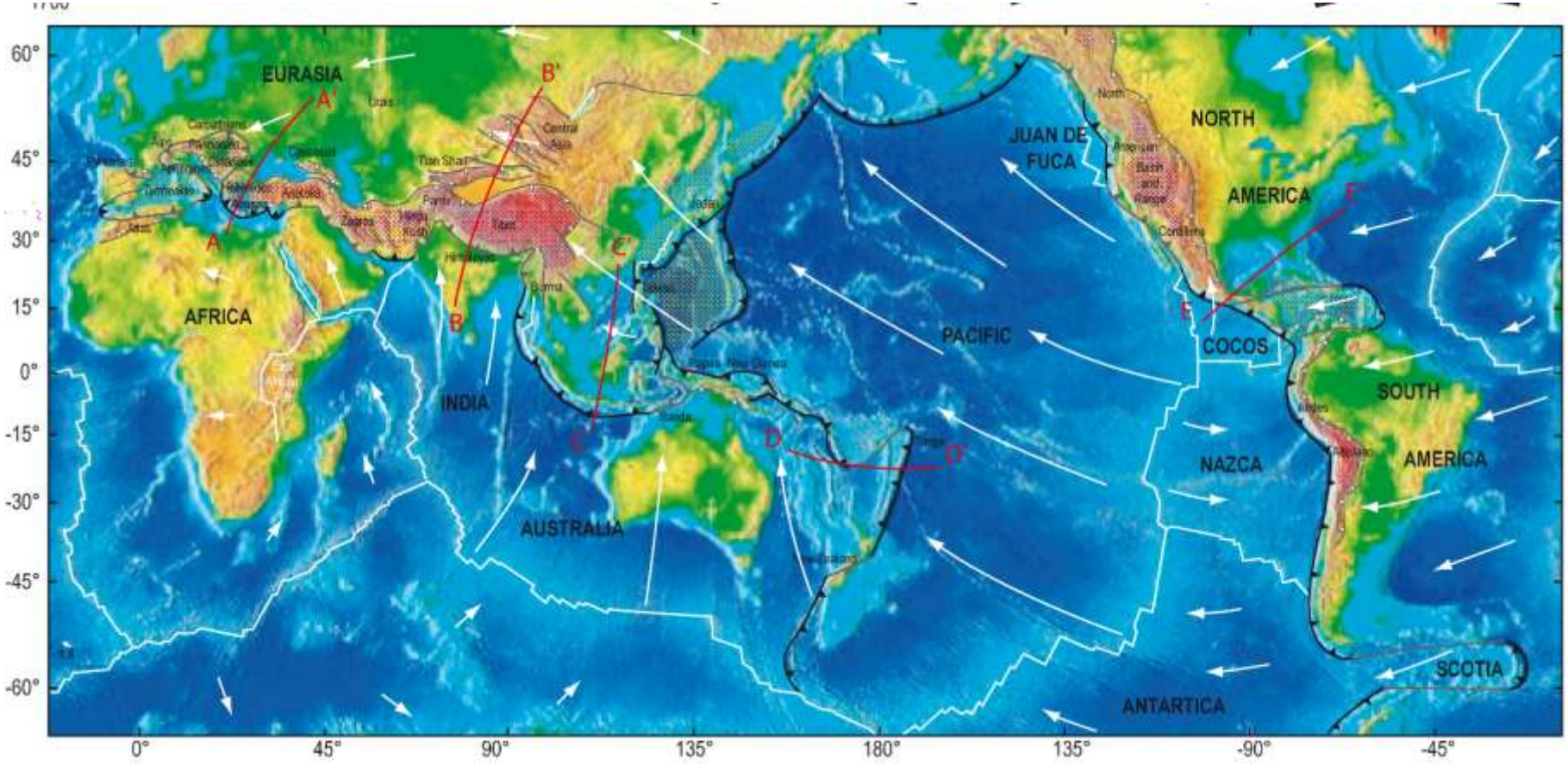
(Vanderhaeghe, 2012)



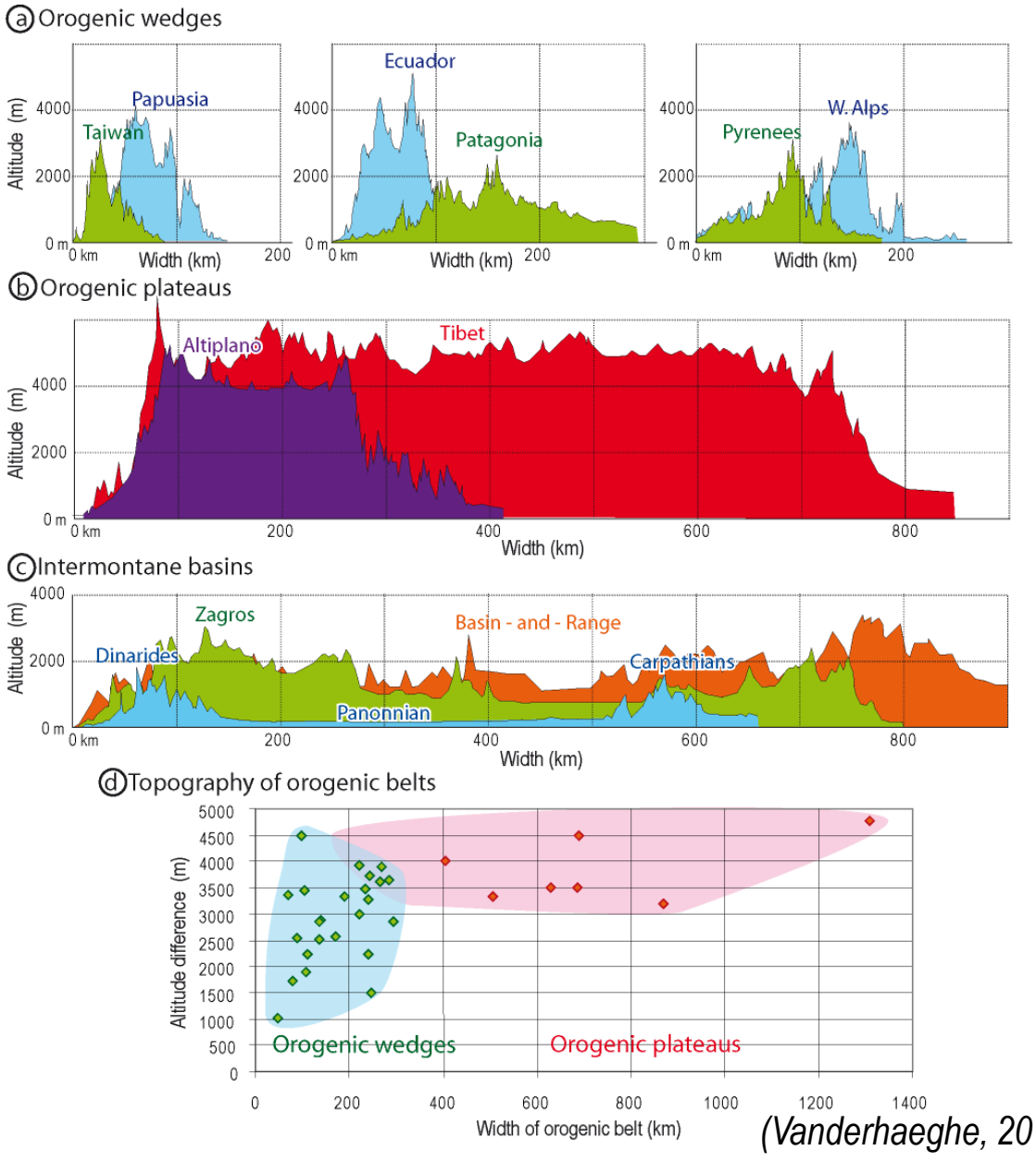
Topography along convergent plate boundaries

(Vanderhaeghe, 2012)





Topography along convergent plate boundaries

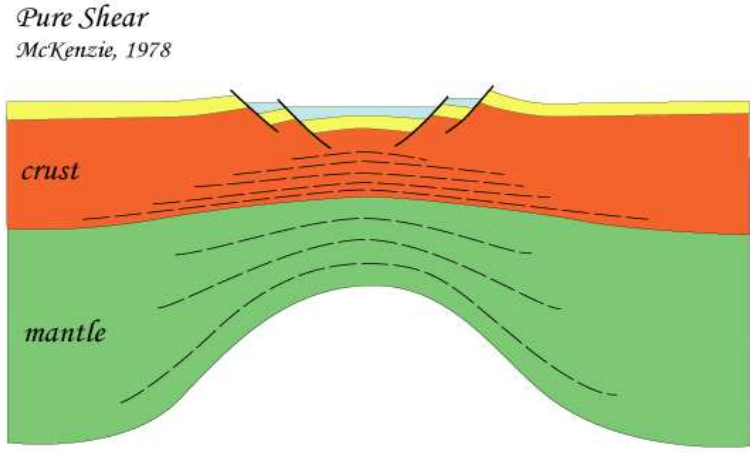


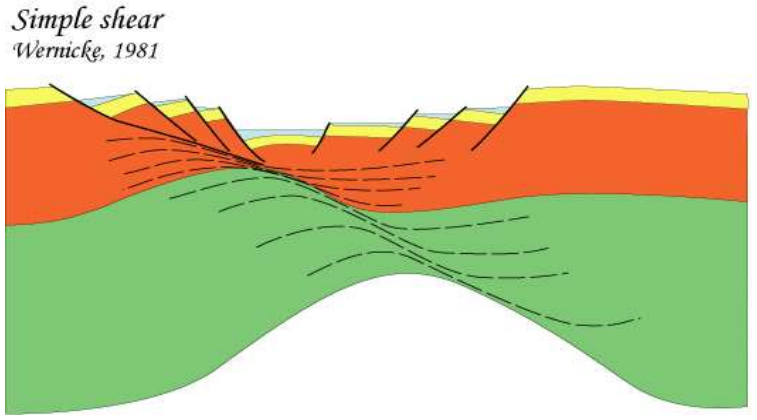
(Vanderhaeghe, 2012)

Orogenic crust thermomecanics

Extension of orogenic crust

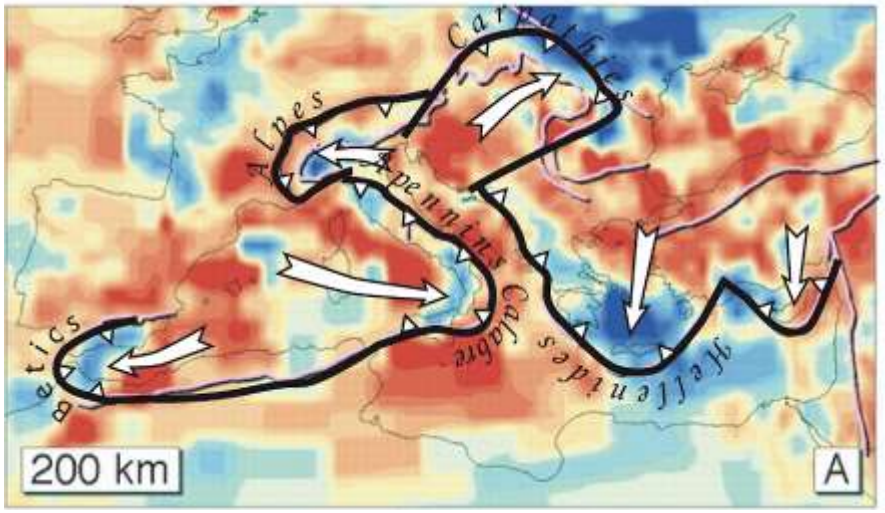
(Coney & Harms, 1984
Dewey, 1988)

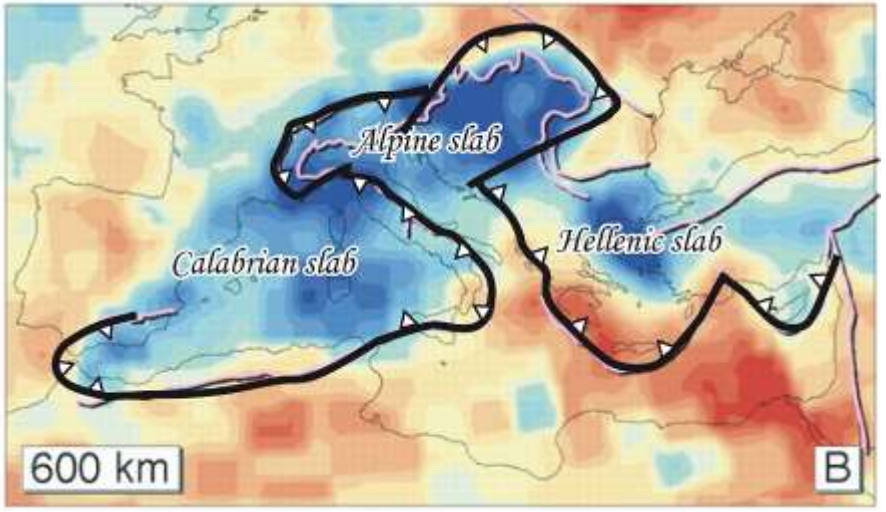




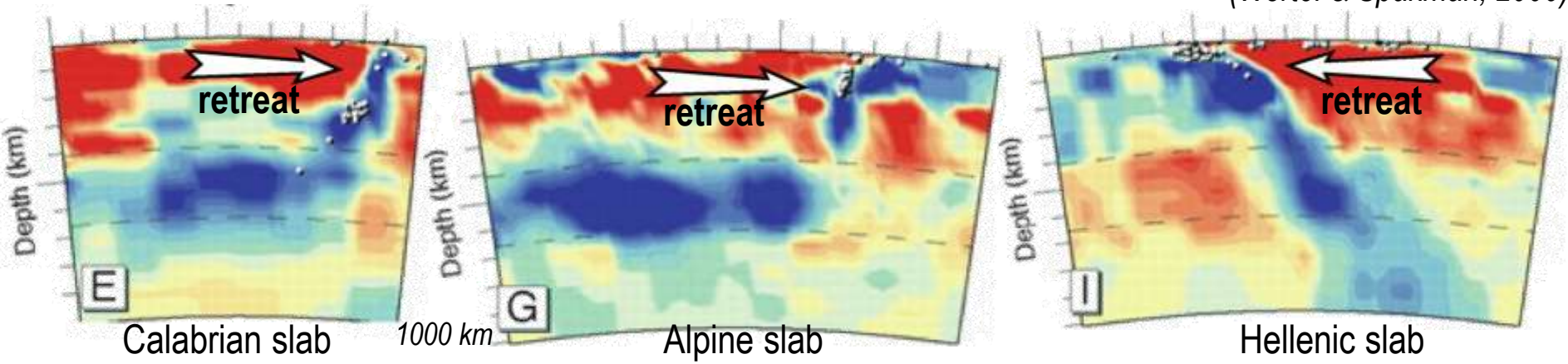
Kinematic approach

3D geometry of Tethyan slabs : Seismic tomography





(Wortel & Spakman, 2000)



Calabrian slab — Alpine slab — Hellenic slab

- Three retreated slabs
- Lateral and longitudinal discontinuities
- Accumulation at 400-600 km

Western Alps

Crustal balance

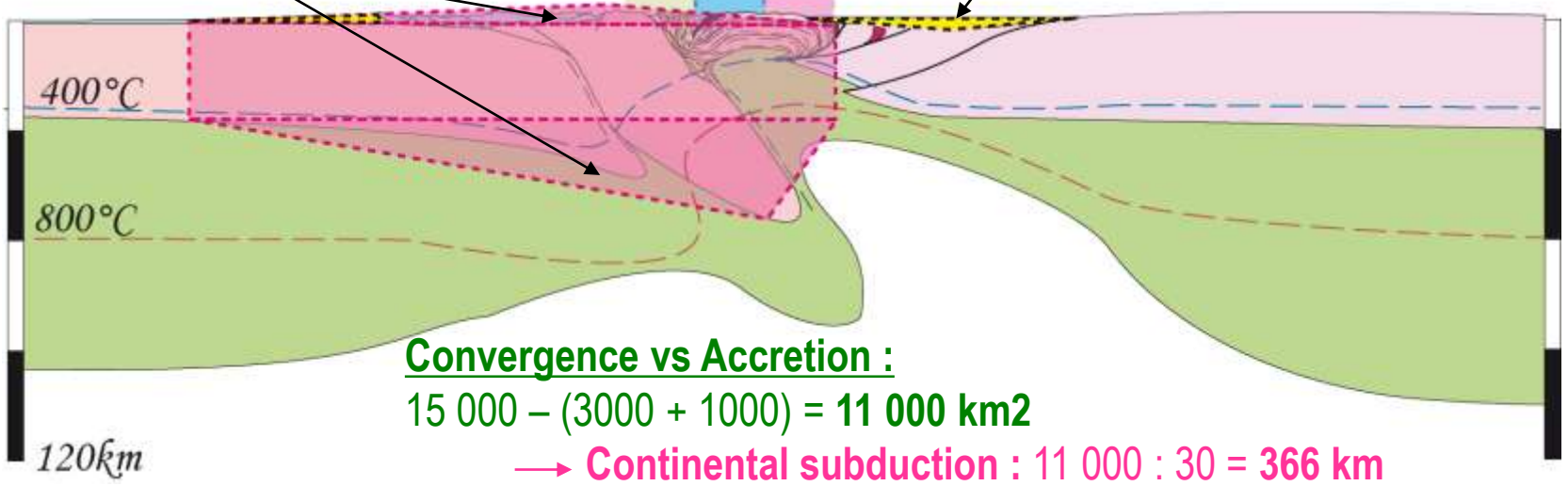
Continental crust since collision (50 Ma) :
500 x 30 = **15 000 km²**

Exhumation :
GS: 30 x 20 = ***600 km²***
BS: 30 x 45 = ***1350 km²***
E: 30 x 68 = ***1990 km²***
Total = 3990 km²

Crustal wedge :
[200 x (5 + 25)] : 2 = **3000 km²**

Sediments :
1000 km² (England,1981)

1cm/yr = 10km/Ma

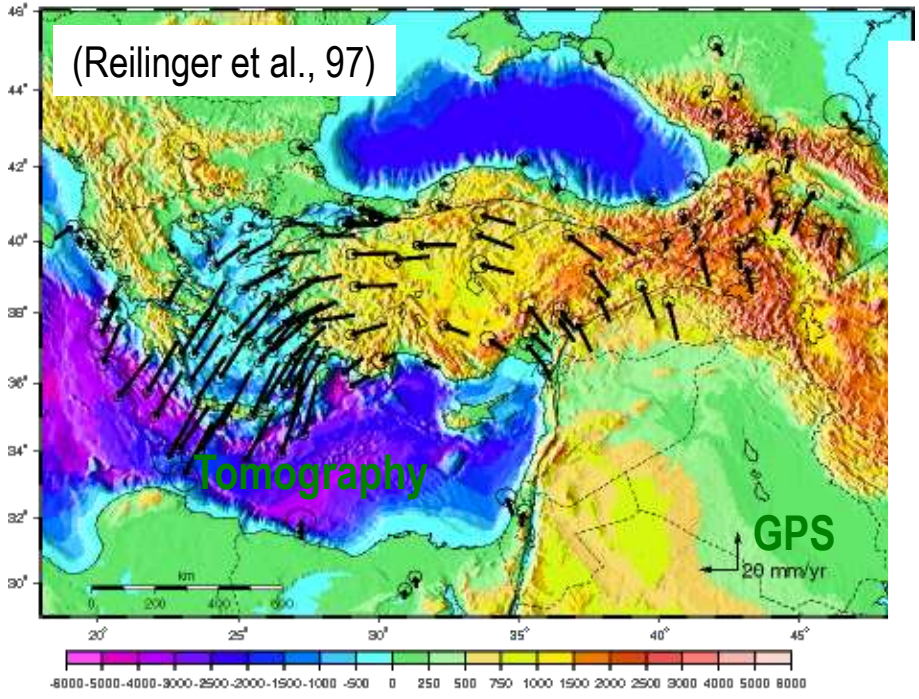


Convergence vs Accretion :
15 000 – (3000 + 1000) = **11 000 km2**
→ **Continental subduction :** 11 000 : 30 = **366 km**

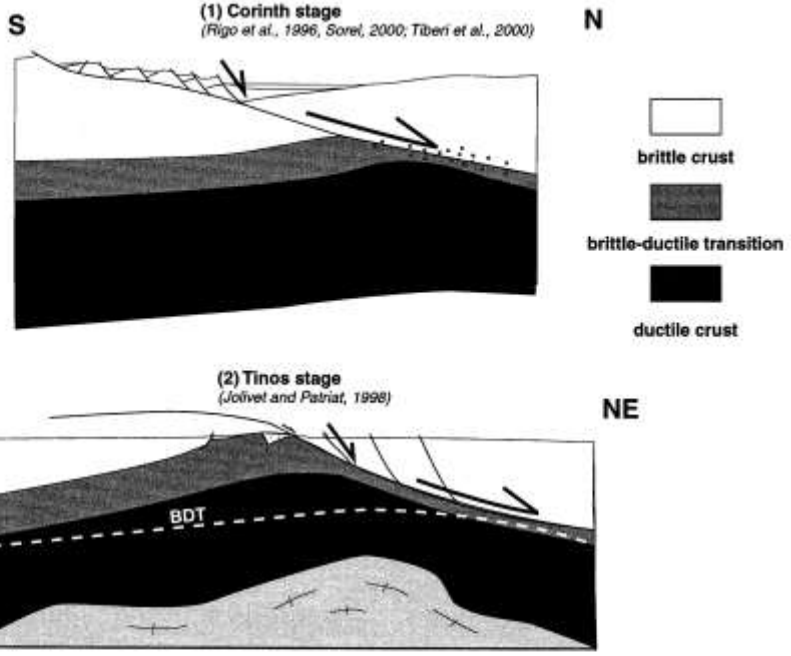
Exhumation vs Sedimentation :
3990 – 1000 ~ **3000 km²**
→ **Slab retreat :** 3000 : 30 = **100 km**

(Vanderhaeghe et al., in prep.)

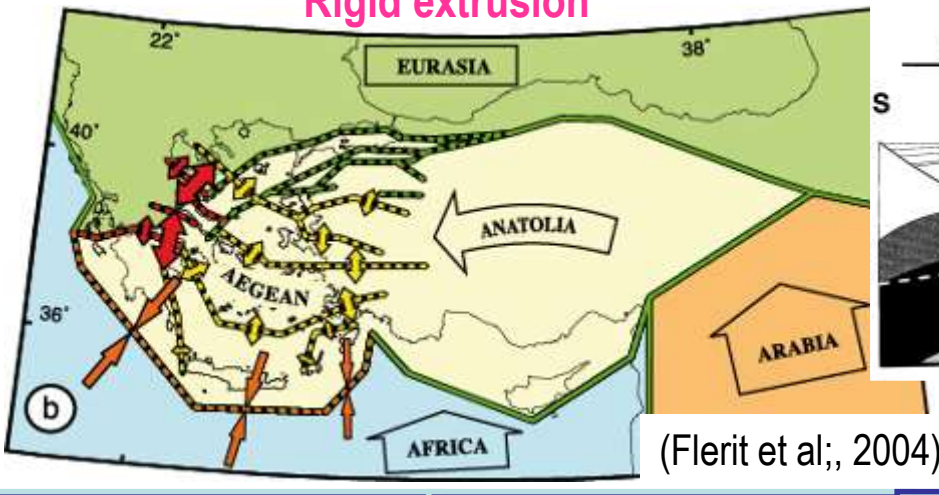
Crustal structure



Crustal extension

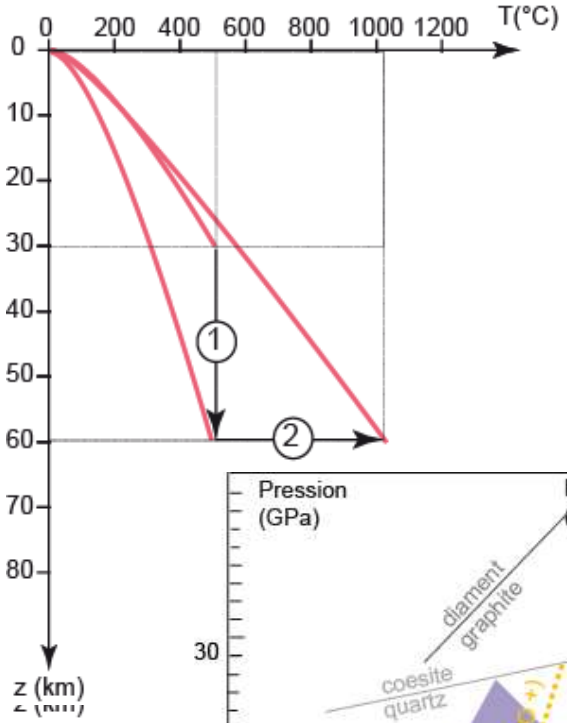


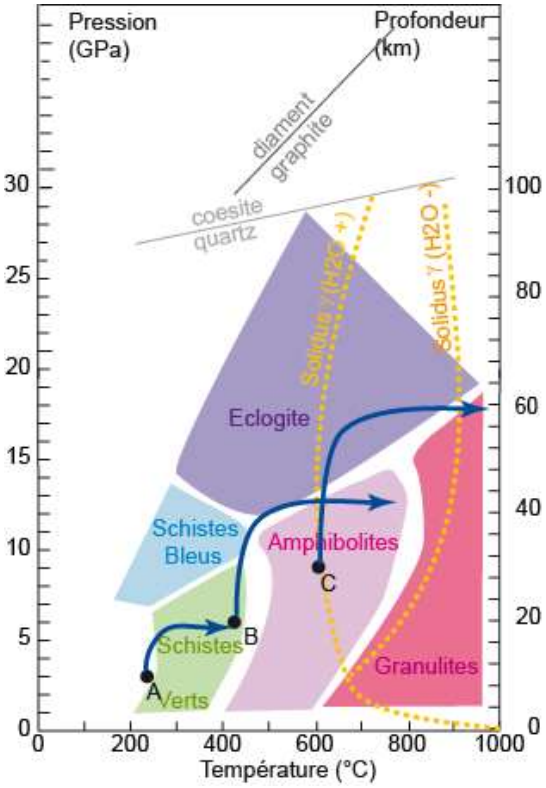
Rigid extrusion



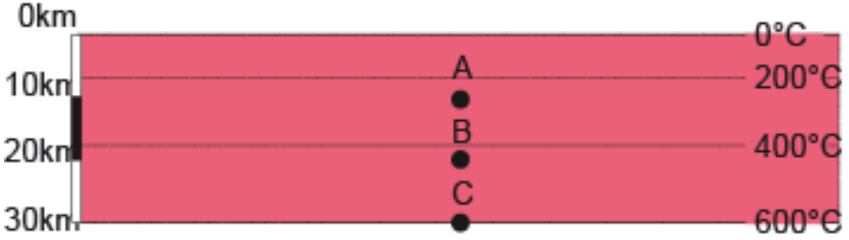
(Flerit et al;, 2004)

(Gautier et al., 1999; Jolivet et al., 2001)

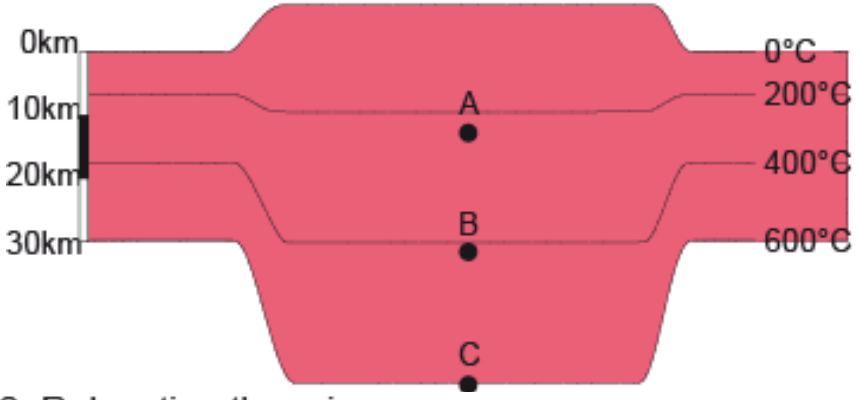




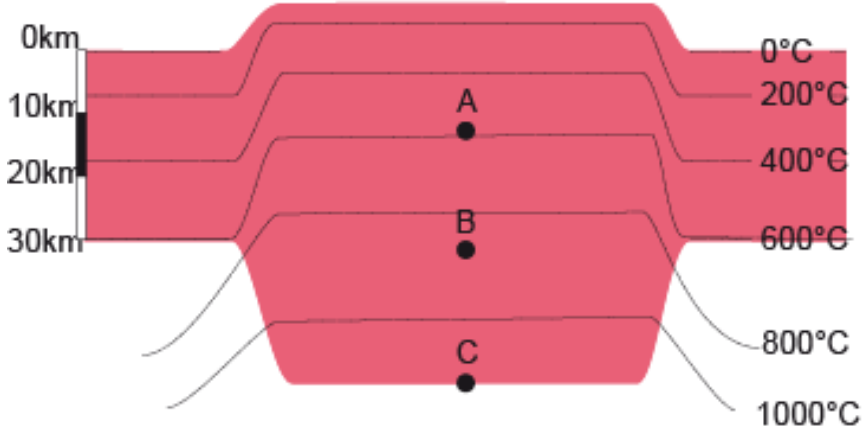
0. Etat initial

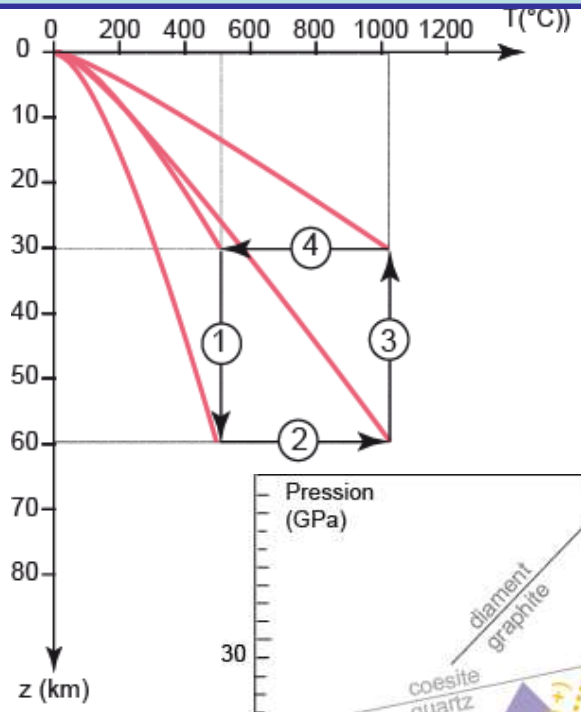


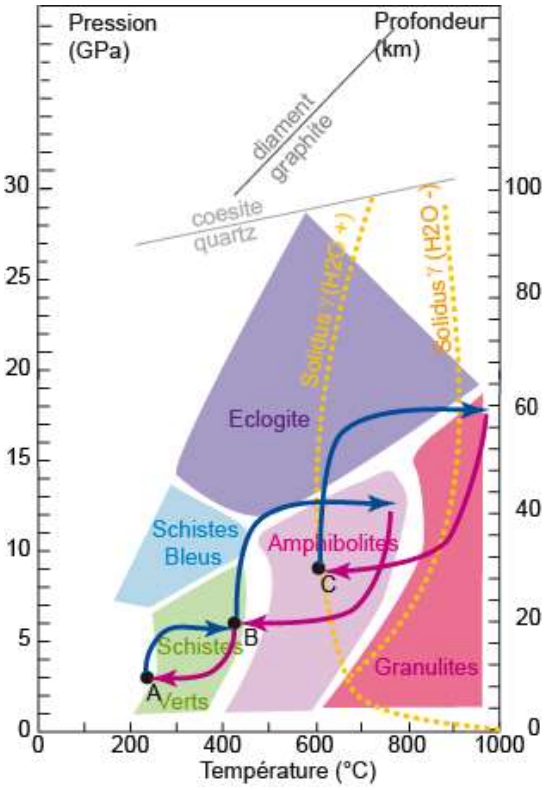
1. Epaississement homogène instantané



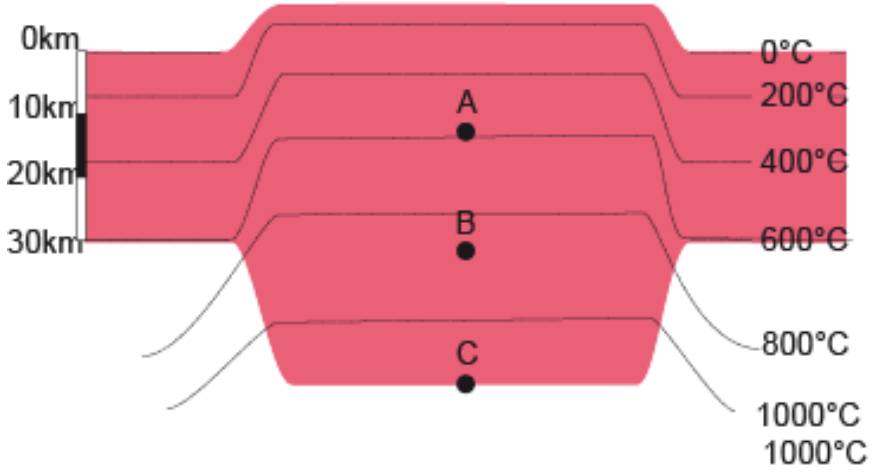
2. Relaxation thermique



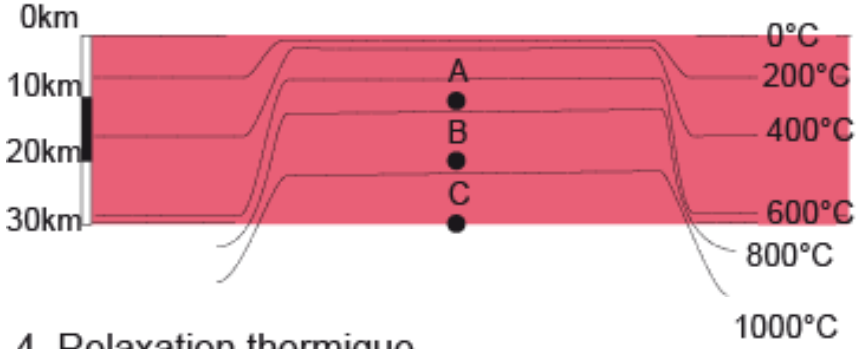




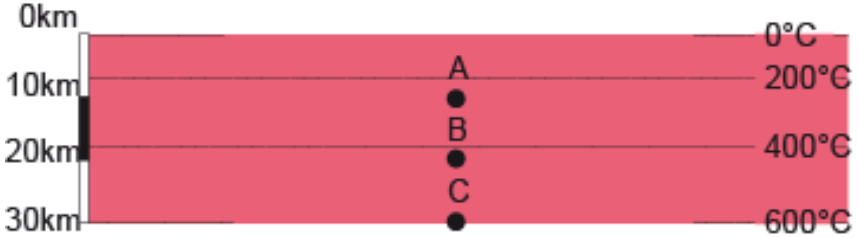
2. Relaxation thermique



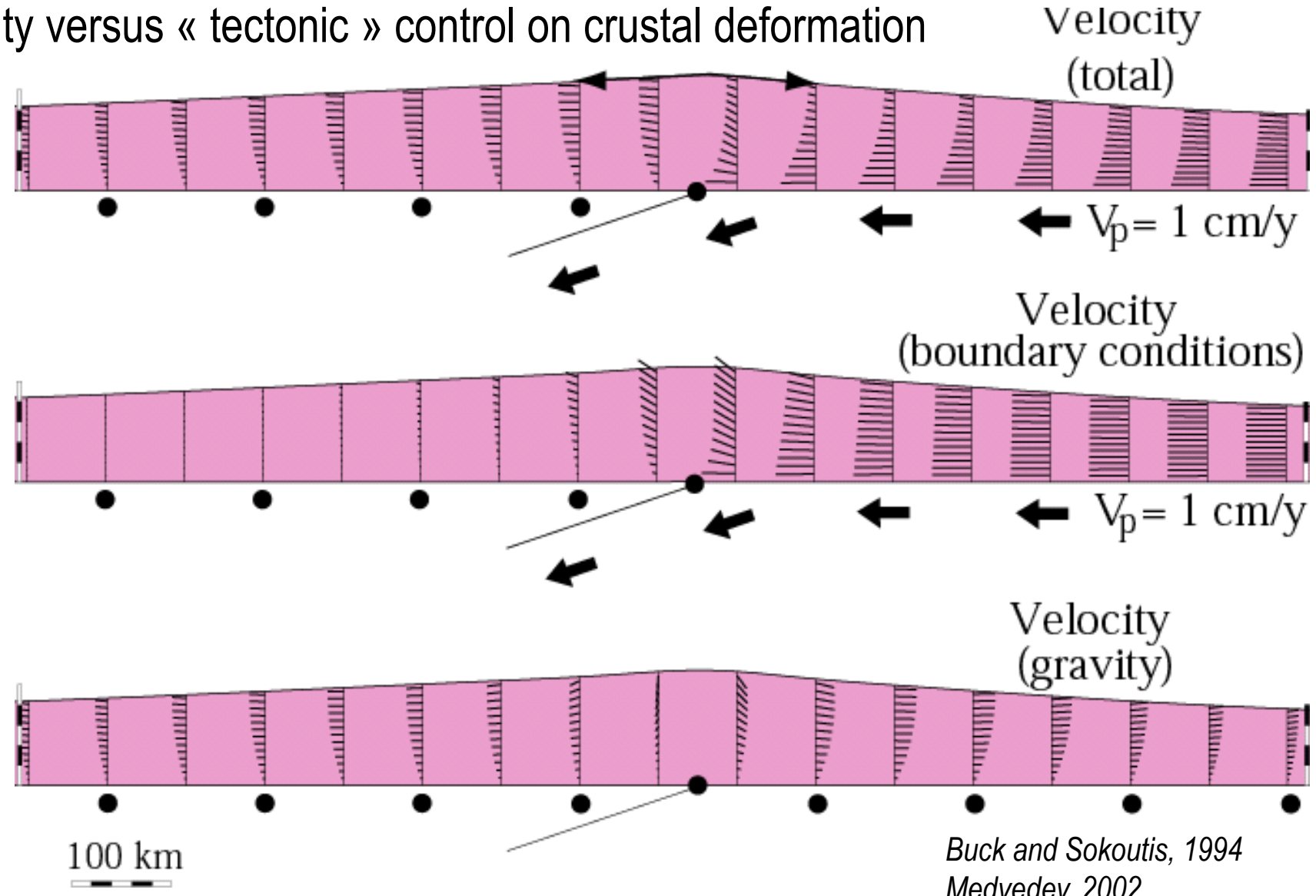
3. Amincissement homogène instantané



4. Relaxation thermique



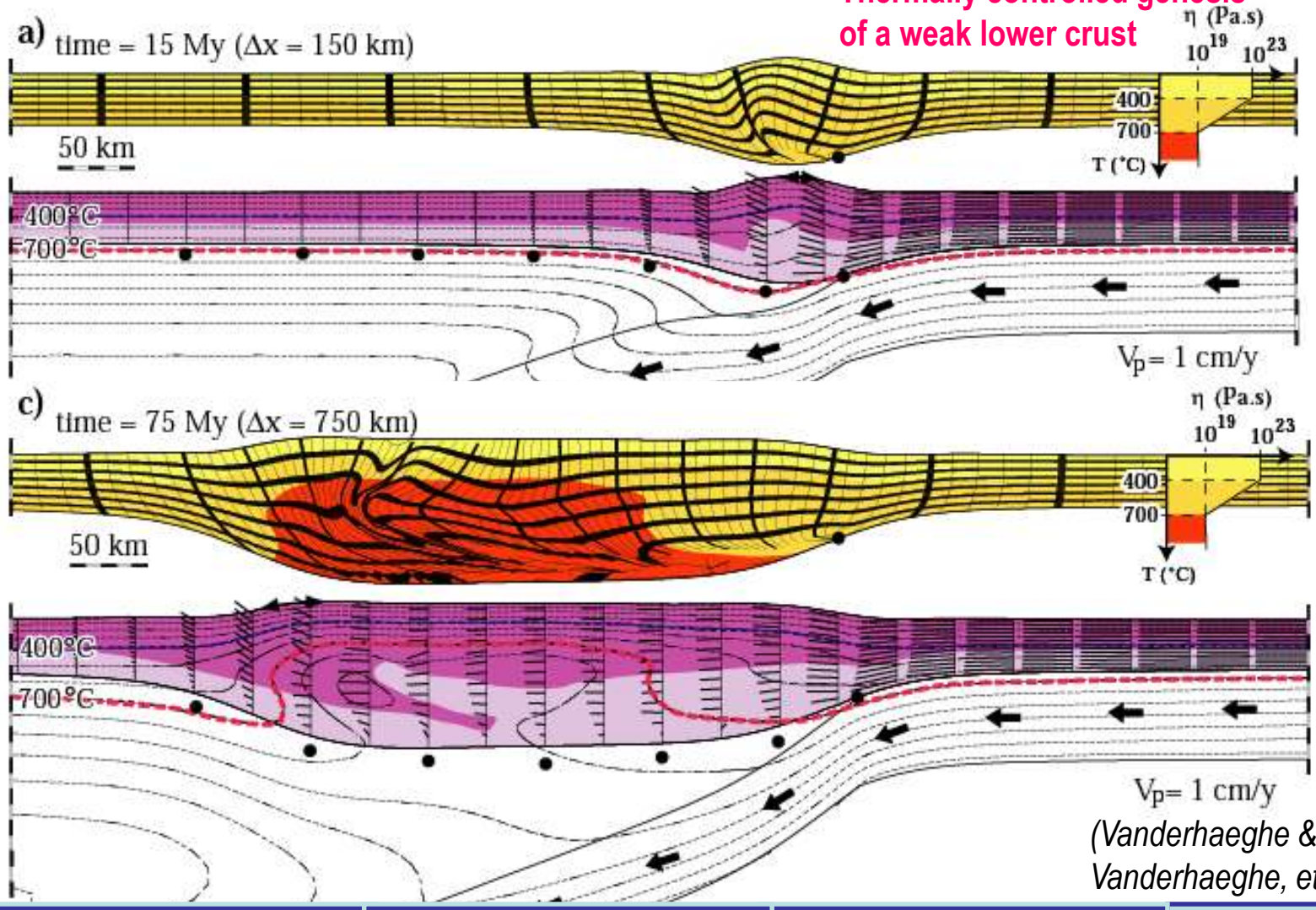
Gravity versus « tectonic » control on crustal deformation



Buck and Sokoutis, 1994
Medvedev, 2002
Vanderhaeghe et al., 2003

Wedge-plateau transition

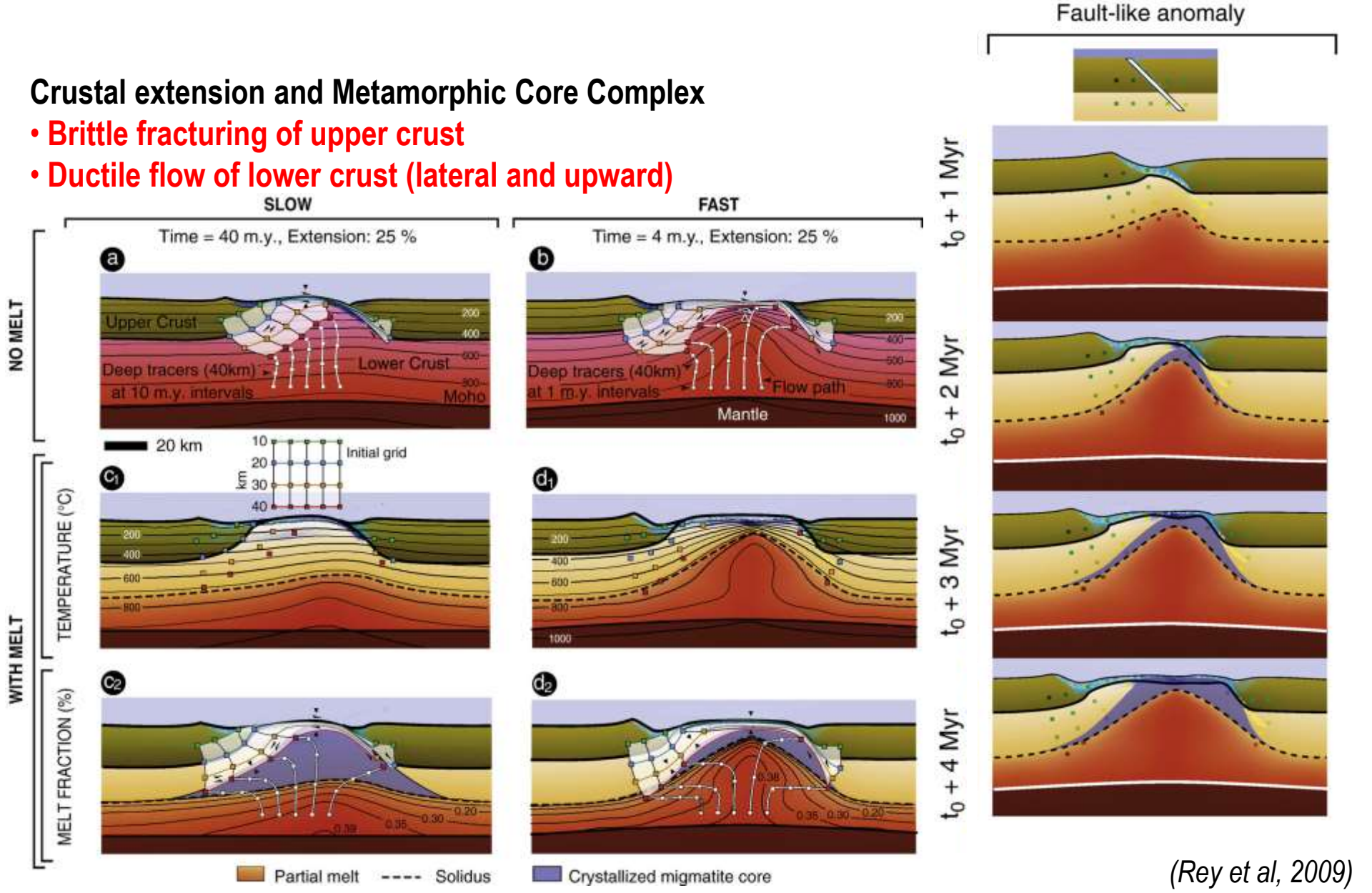
•T increase during convergence:
Radioactive heat production
•Wedge/plateau transition:
Thermally controlled genesis
of a weak lower crust



(Vanderhaeghe & Teyssier, 2001
Vanderhaeghe, et al., 2003

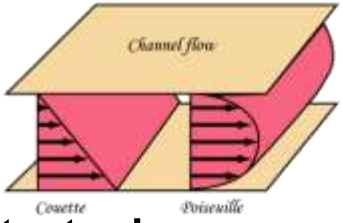
Crustal extension and Metamorphic Core Complex

- Brittle fracturing of upper crust
- Ductile flow of lower crust (lateral and upward)

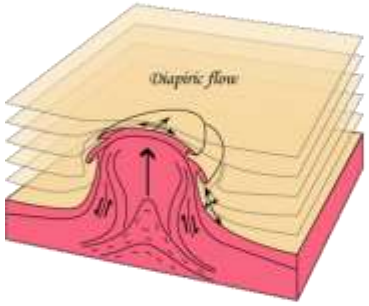


(Rey et al, 2009)

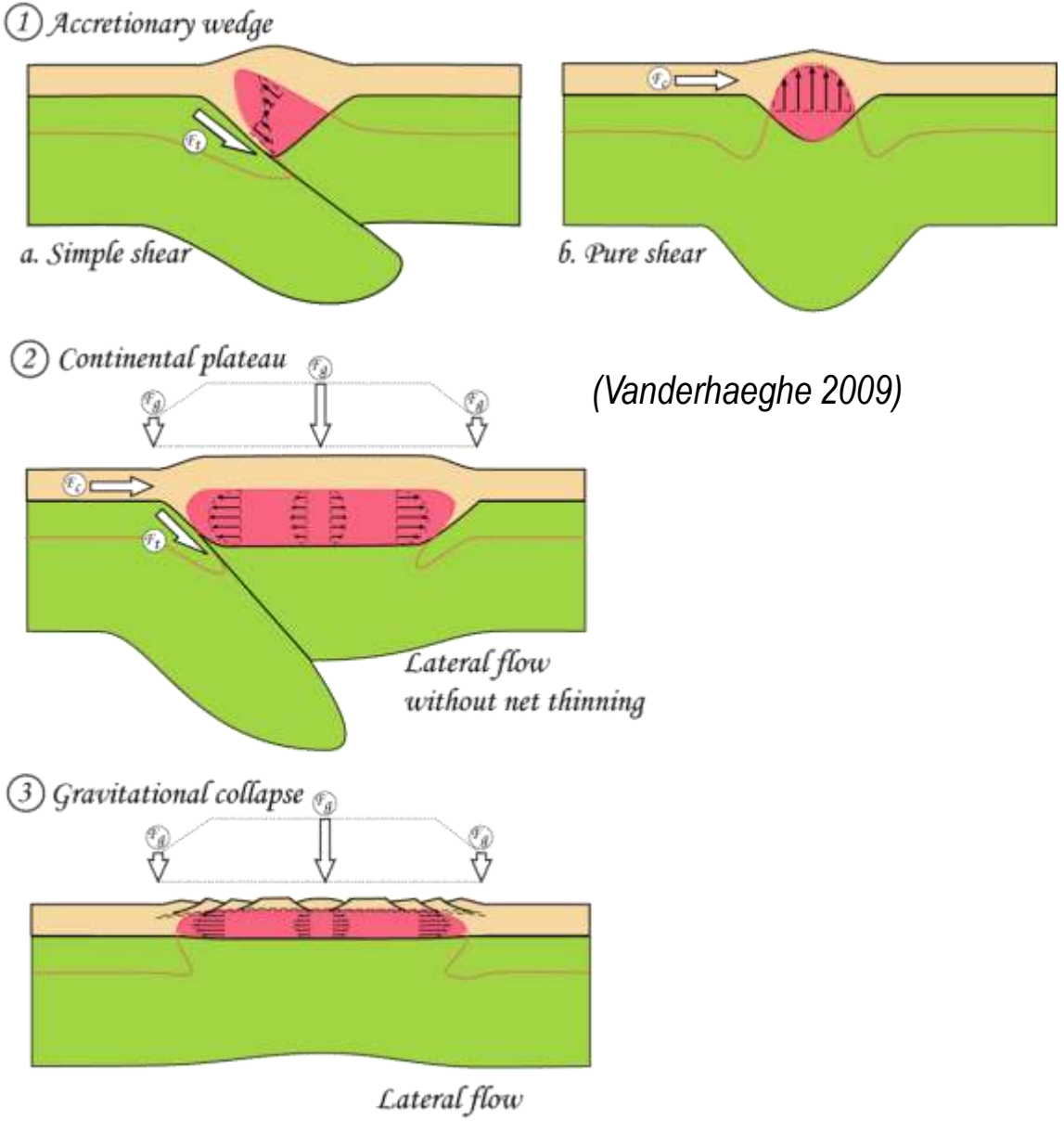
Flow modes of weak partially molten crust



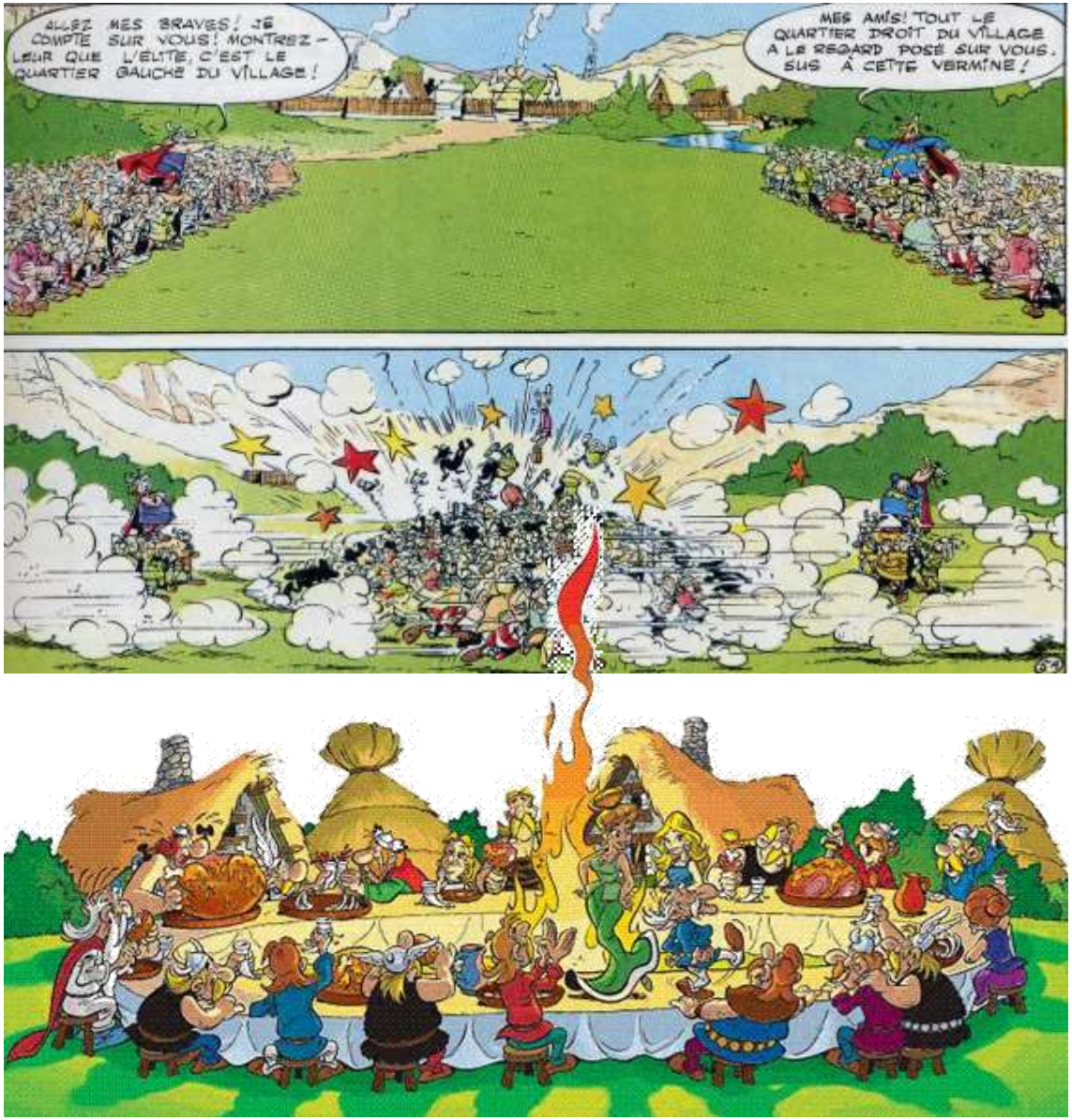
Driven by « tectonic » and/or gravity forces



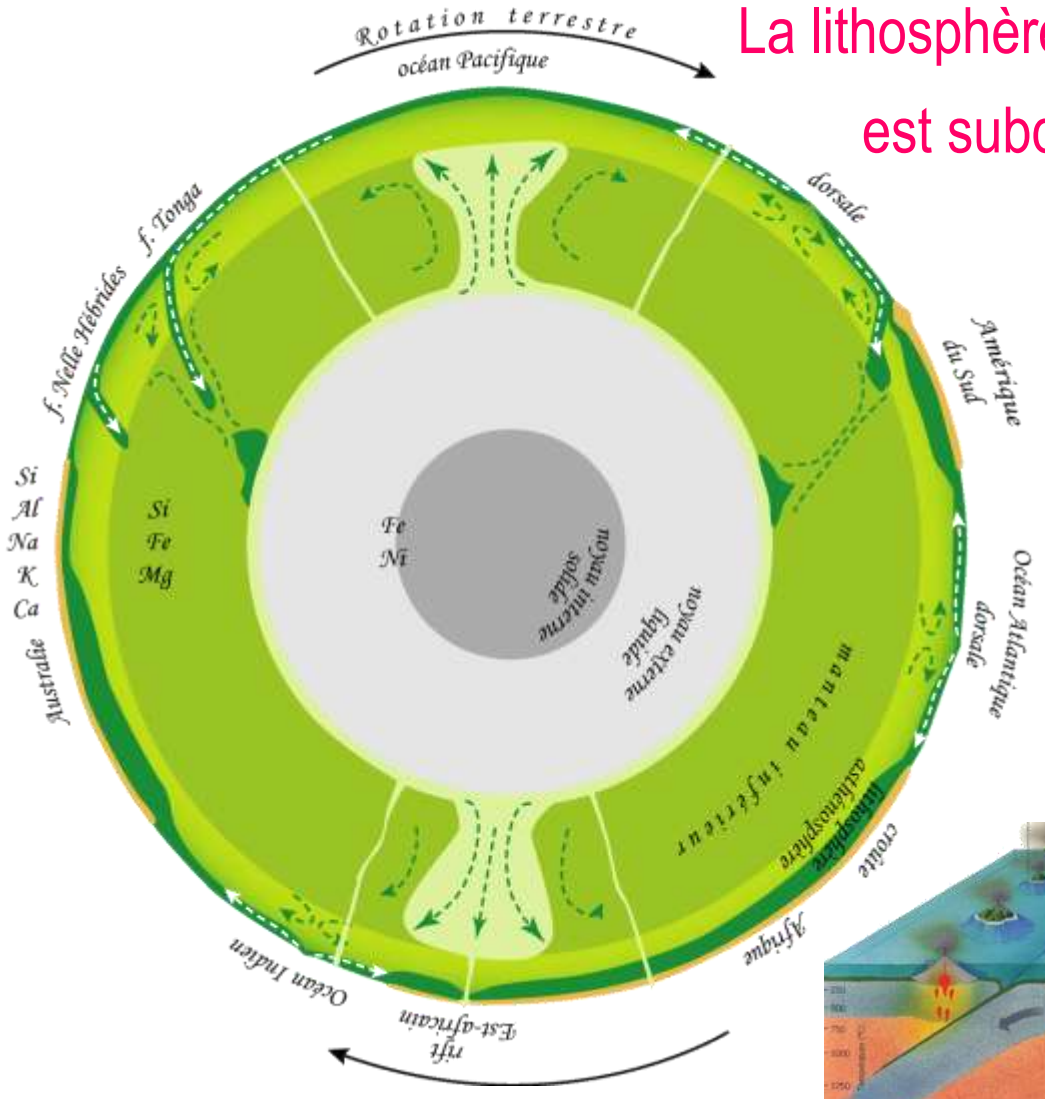
Buoyancy-driven



(Vanderhaeghe 2009)

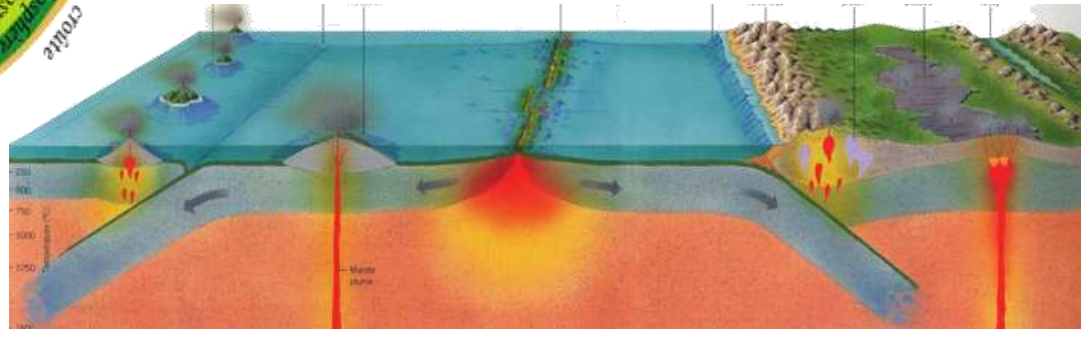

ALLEZ MES BRAVES ! JE COMPTE SUR VOUS ! MONTREZ-LEUR QUE L'ELITE, C'EST LE QUARTIER GAUCHE DU VILLAGE !
MES AMIS ! TOUT LE QUARTIER DROIT DU VILLAGE A LE REGARD POSÉ SUR VOUS. SUS À CETTE VERMINE !

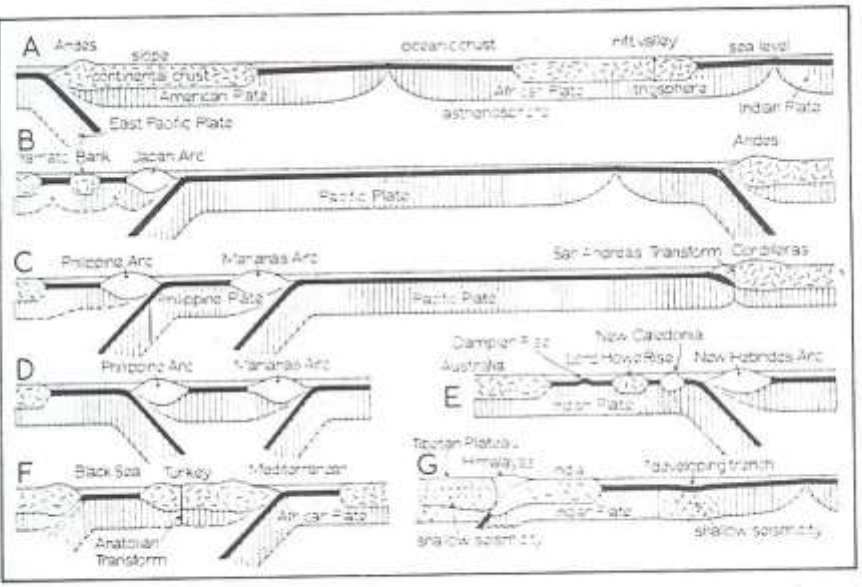
…à la tectonique des plaques.



La lithosphère (croûte + manteau lithosphérique) est subdivisée en une douzaine de plaques qui se déplacent par rapport à l'Asthénosphère

(Isacks et al., 1968; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968)





Schematic sections showing plate, ocean, continent, island arc relationship. The ? developing trench indicated in (G) is from *Sykes* [1970].

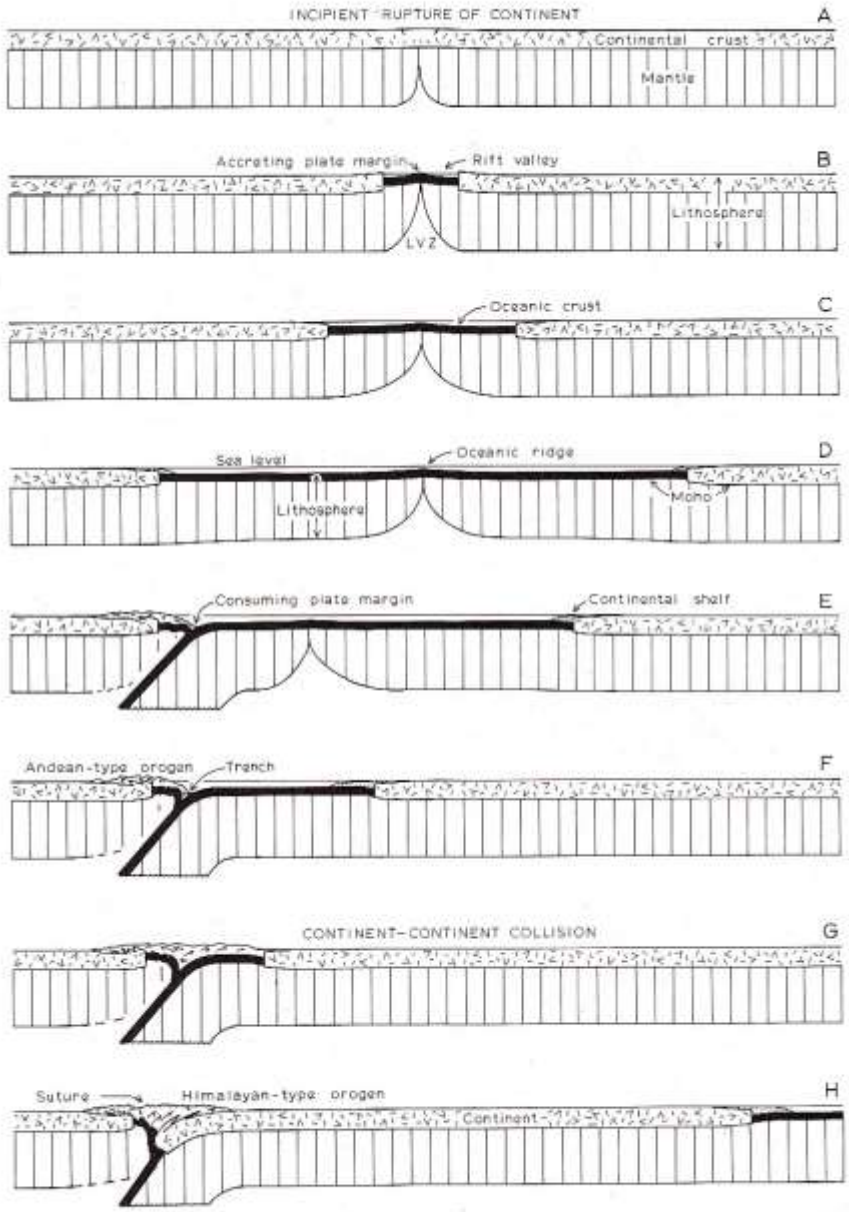
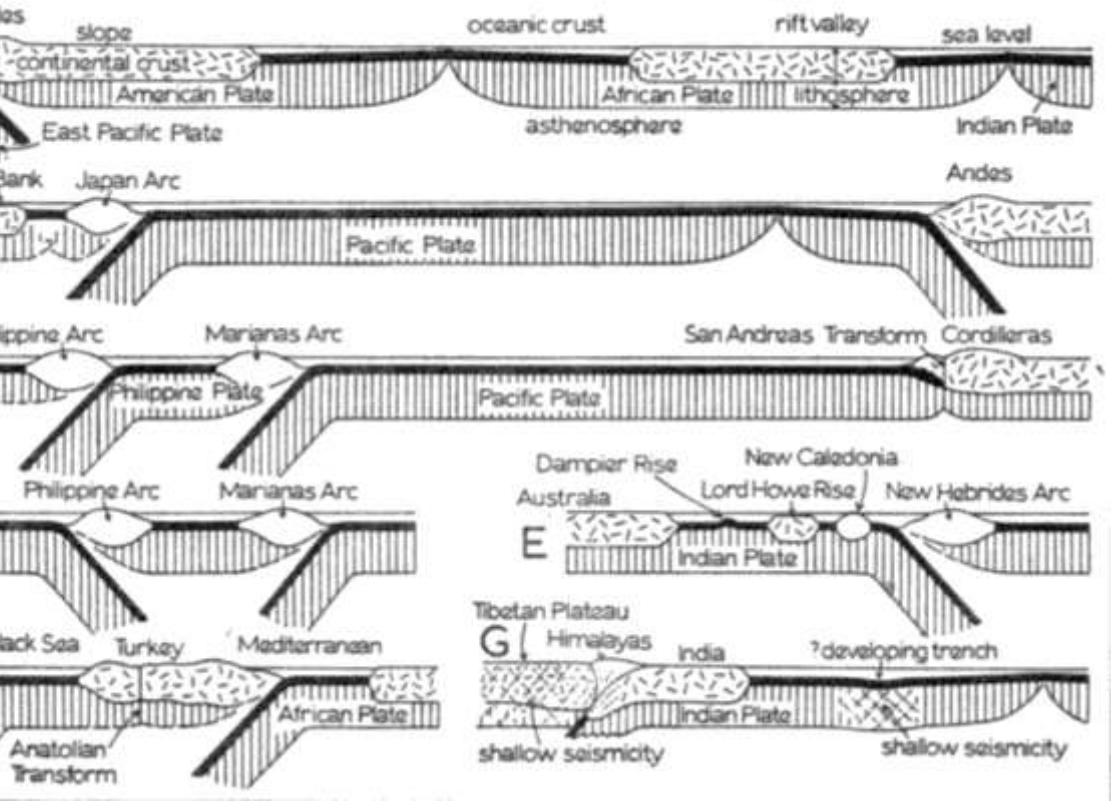
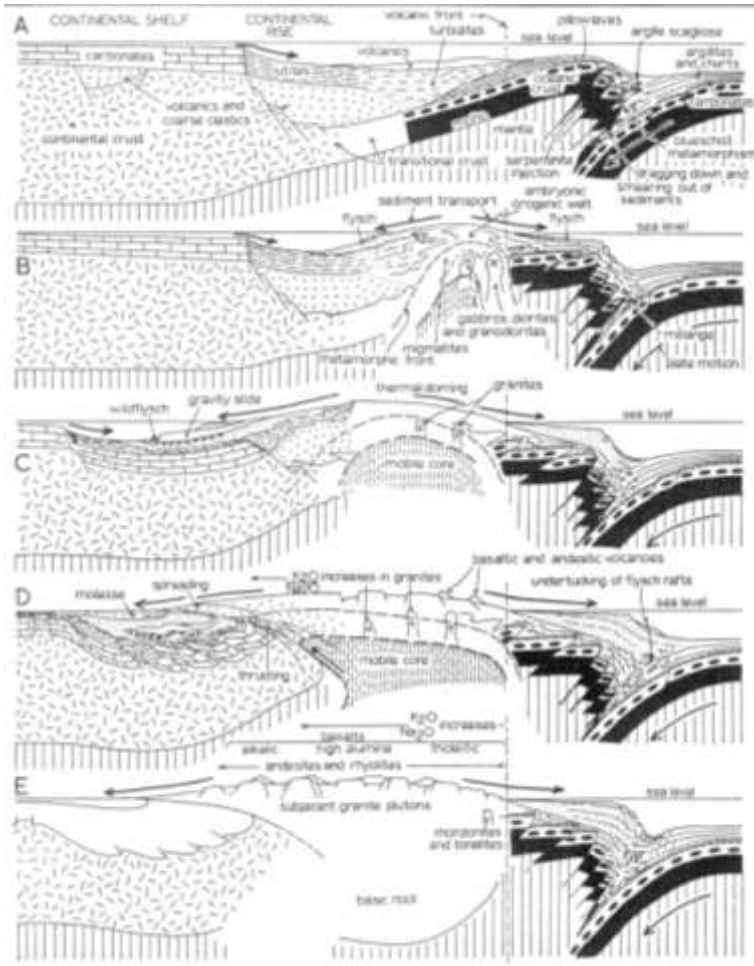
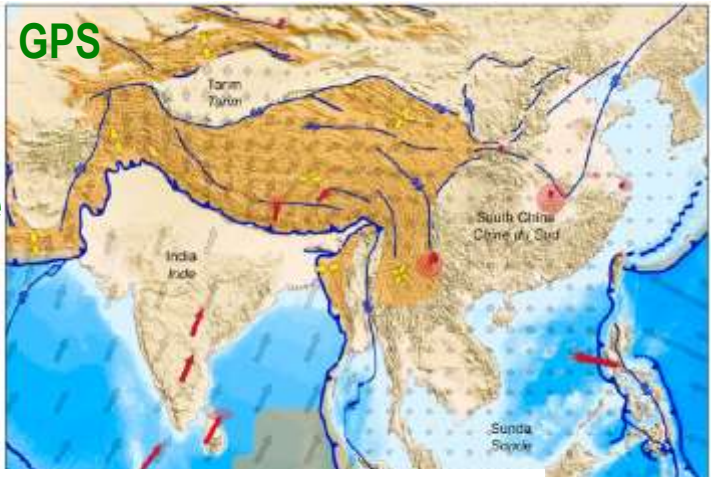


FIGURE 1. Schematic illustration of the Wilson cycle, the evolution of oceans, in the framework of lithosphere plate evolution. (Adapted from Bird and Dewey, 1970, Fig. 9)

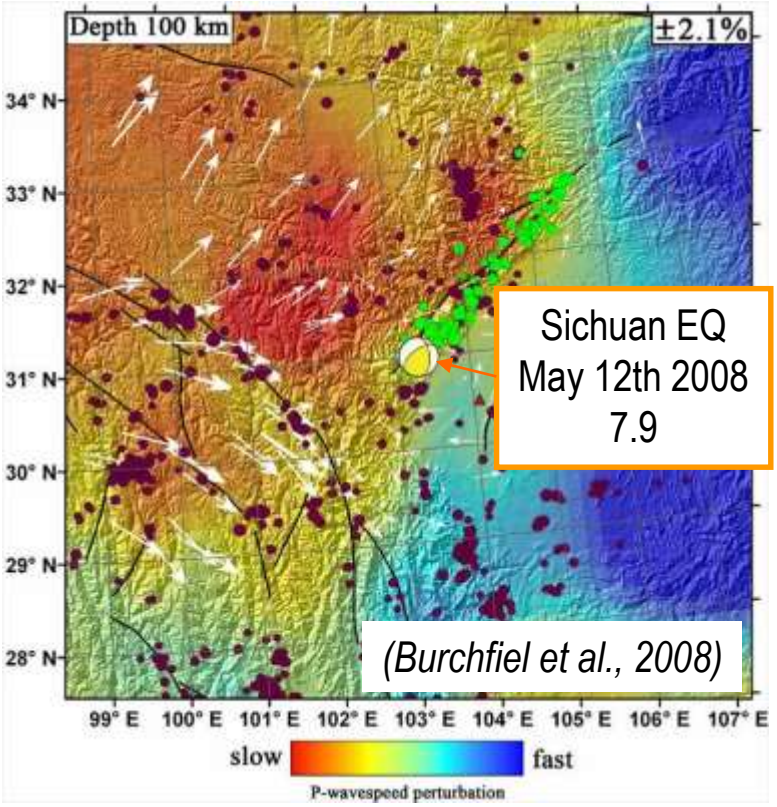

slope
continental crust
American Plate
East Pacific Plate
oceanic crust
rift valley
sea level
African Plate
lithosphere
asthenosphere
Indian Plate
Japan Arc
Andes
Pacific Plate
Marianas Arc
San Andreas Transform
Cordilleras
Philippine Plate
Philippine Arc
Marianas Arc
Dampier Rise
New Caledonia
Australia
Lord Howe Rise
New Hebrides Arc
E
Indian Plate
Turkey
Mediterranean
Tibetan Plateau
G
Himalayas
India
?developing trench
African Plate
Anatolian Transform
shallow seismicity
Indian Plate
shallow seismicity

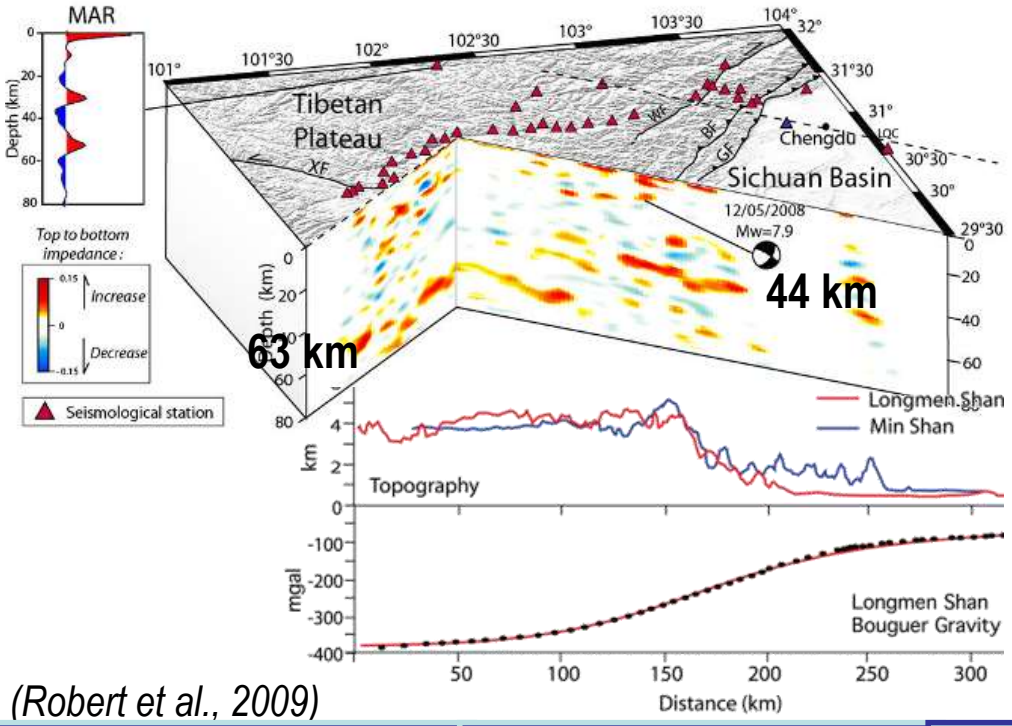

A
CONTINENTAL SHELF
CONTINENTAL RISE
volcanic front
turbidites
pillow lavas
sea level
argillo scagliose
carbonates
volcanics
volcanics and coarse clastics
continental crust
mantle
transitional crust
serpentinite intrusion
blueschist metamorphism
dragging down and shearing out of sediments
sediment transport
flysch
embryonic orogenic belt
B
gabbros, diorites and granodiorites
migmatites
metamorphic front
Benioff motion
wildflysch
gravity slide
thermal doming
granites
C
mobile core
basaltic and andesitic volcanics
molasse
spreading
increases in granites
undertrusting of flysch rafts
D
thrusting
K_2O
Na_2O
increases
alkalic
high alumina
tholeiitic
andesites and rhyolites
E
subjacent granite plutons
monzonites and tonalites
basic rock

E-Tibet :
Active tectonics and lithospheric structure



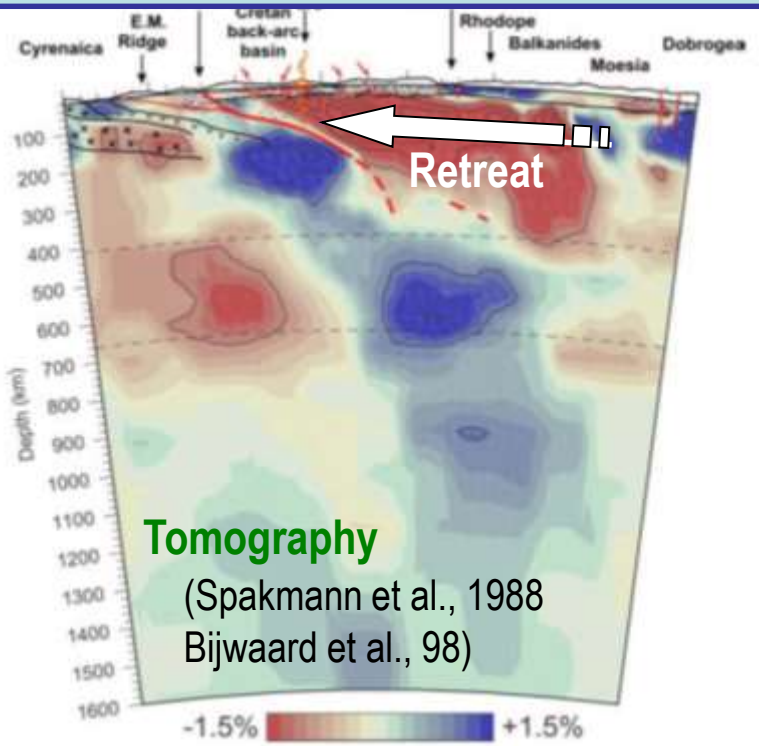
(Chamot-Rooke & Rabaute, 2006)

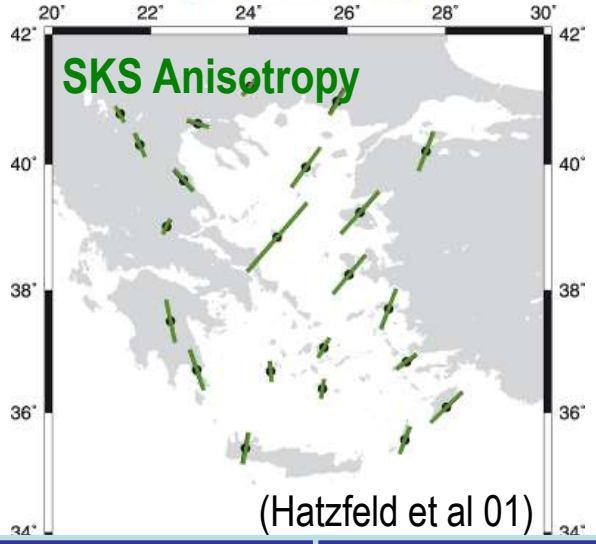




(Robert et al., 2009)

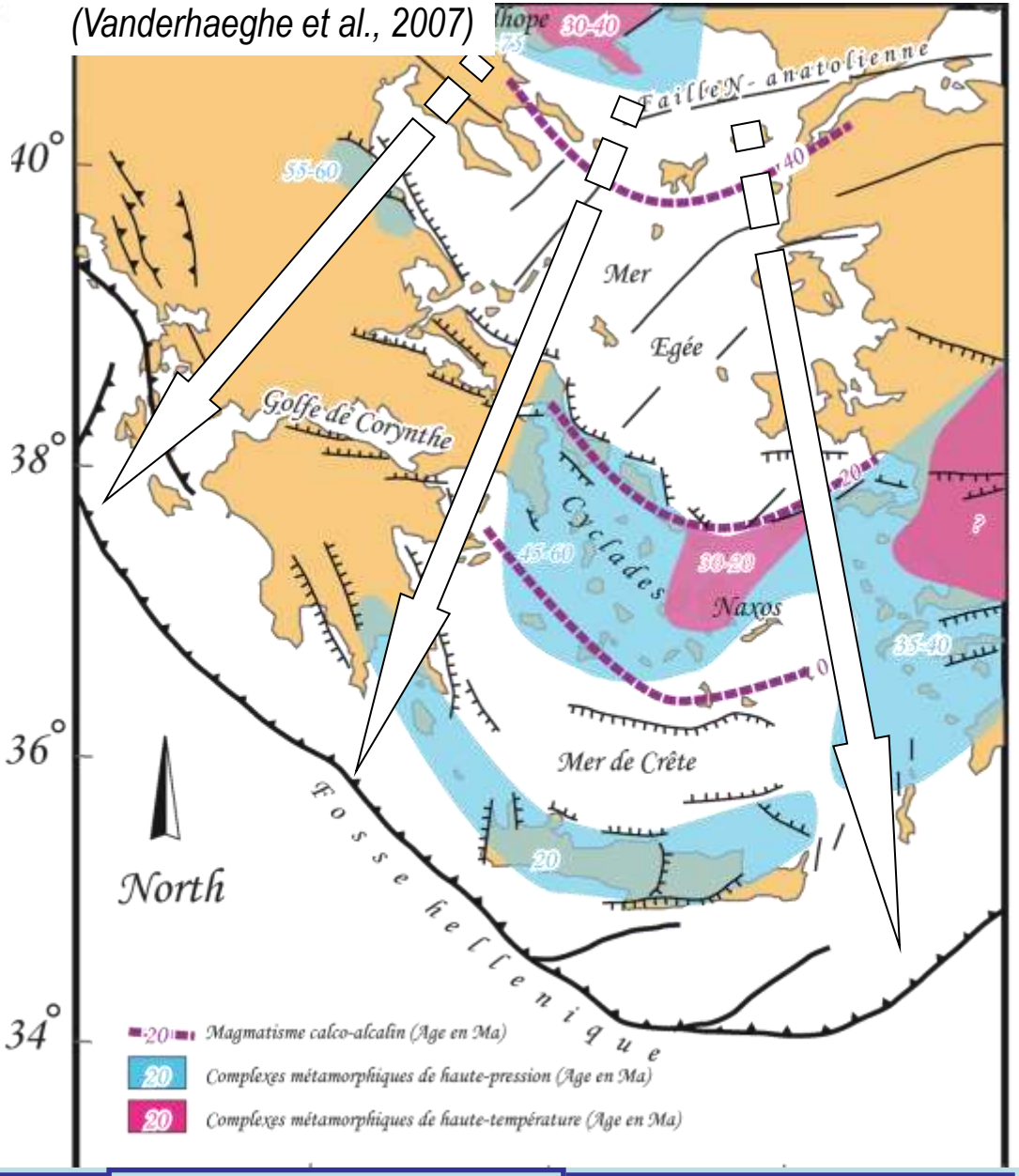
- Limited active surface shortening
- Abrupt Moho offset and topographic step
- Lateral variations of lithospheric structure
- Smooth lithospheric flexure

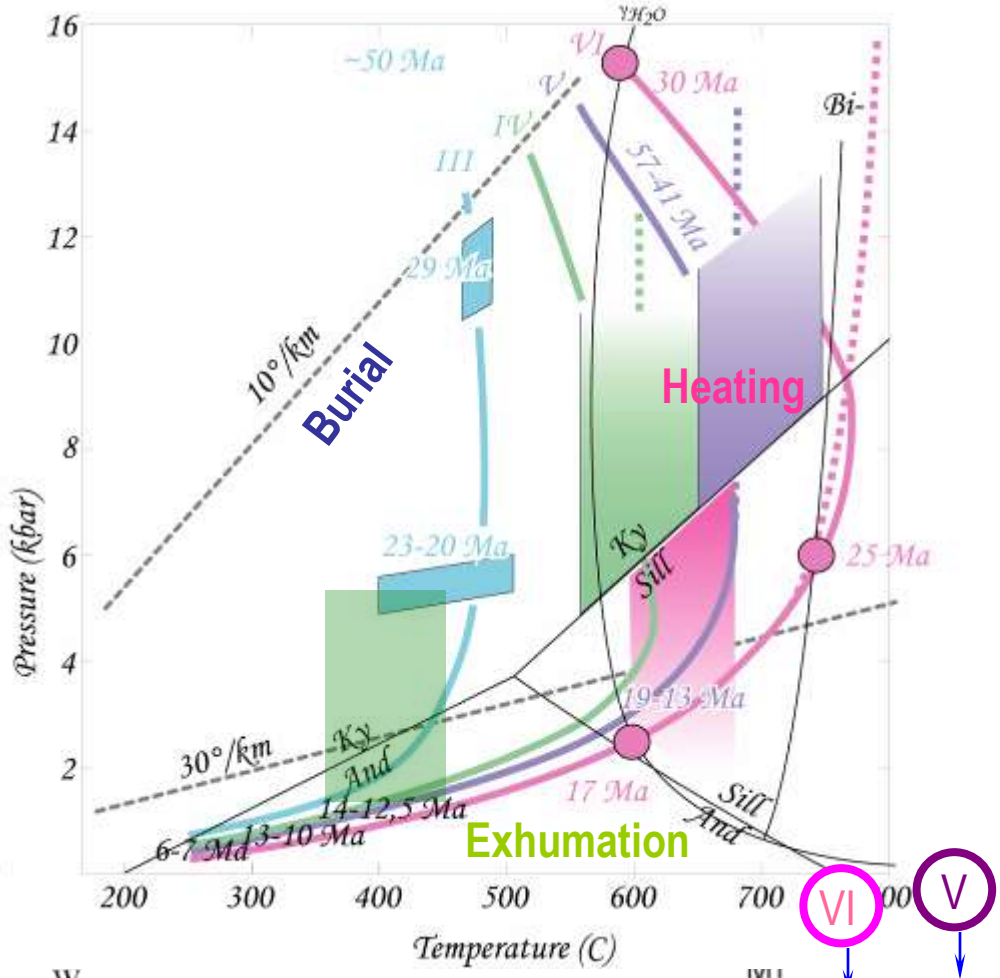


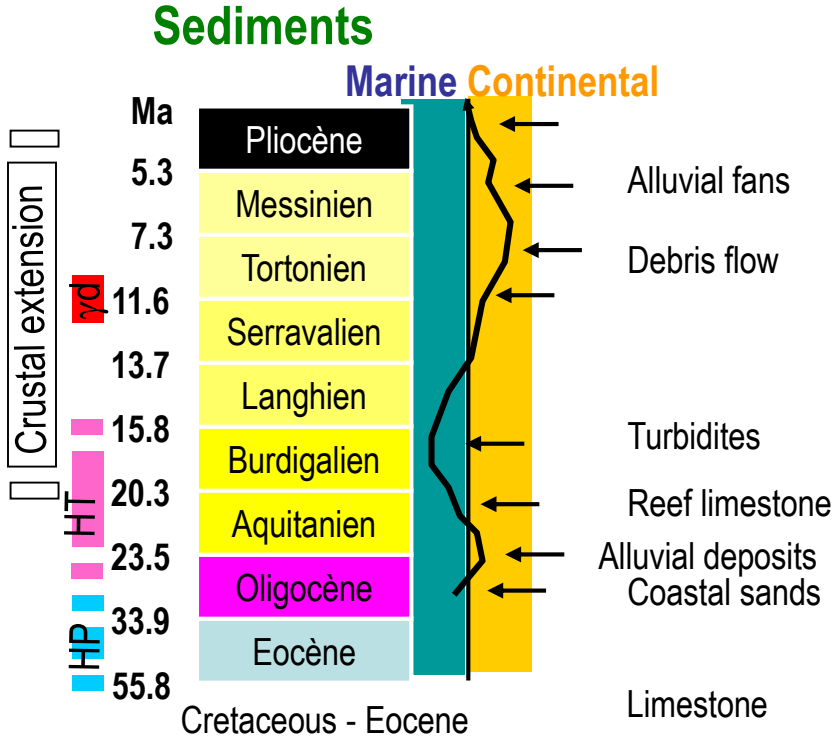


(Hatzfeld et al 01)

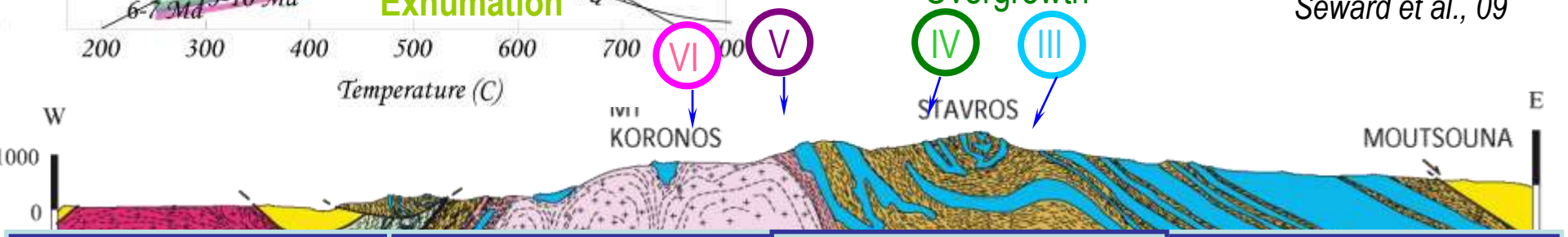
(Vanderhaeghe et al., 2007)



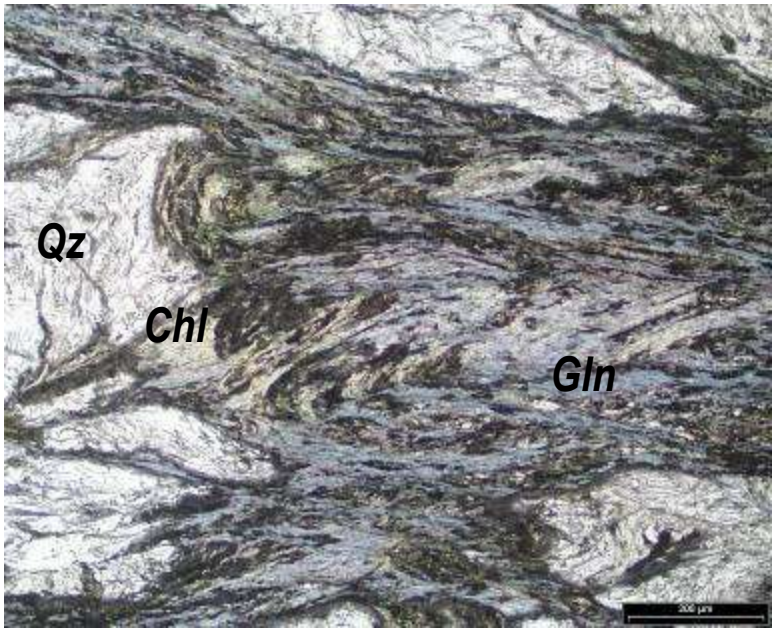


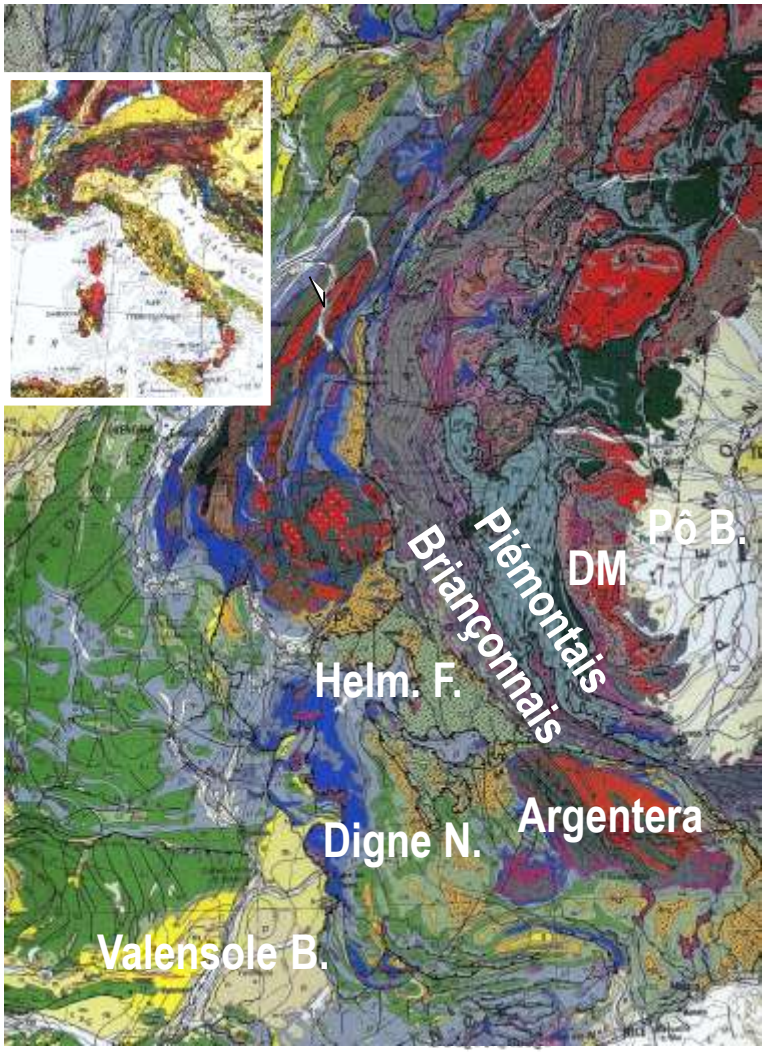


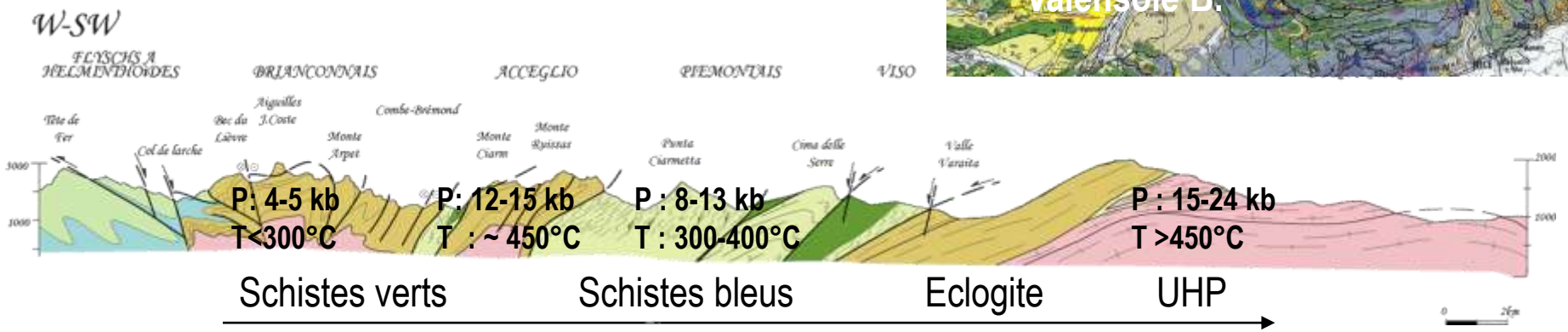
Vanderhaeghe, 04
Martin et al., 06;
Duchêne et al., 06;
Martin et al., 08
Seward et al., 09



Le prisme d'accrétion orogénique alpin:
Métamorphisme SB/SV et microstructure

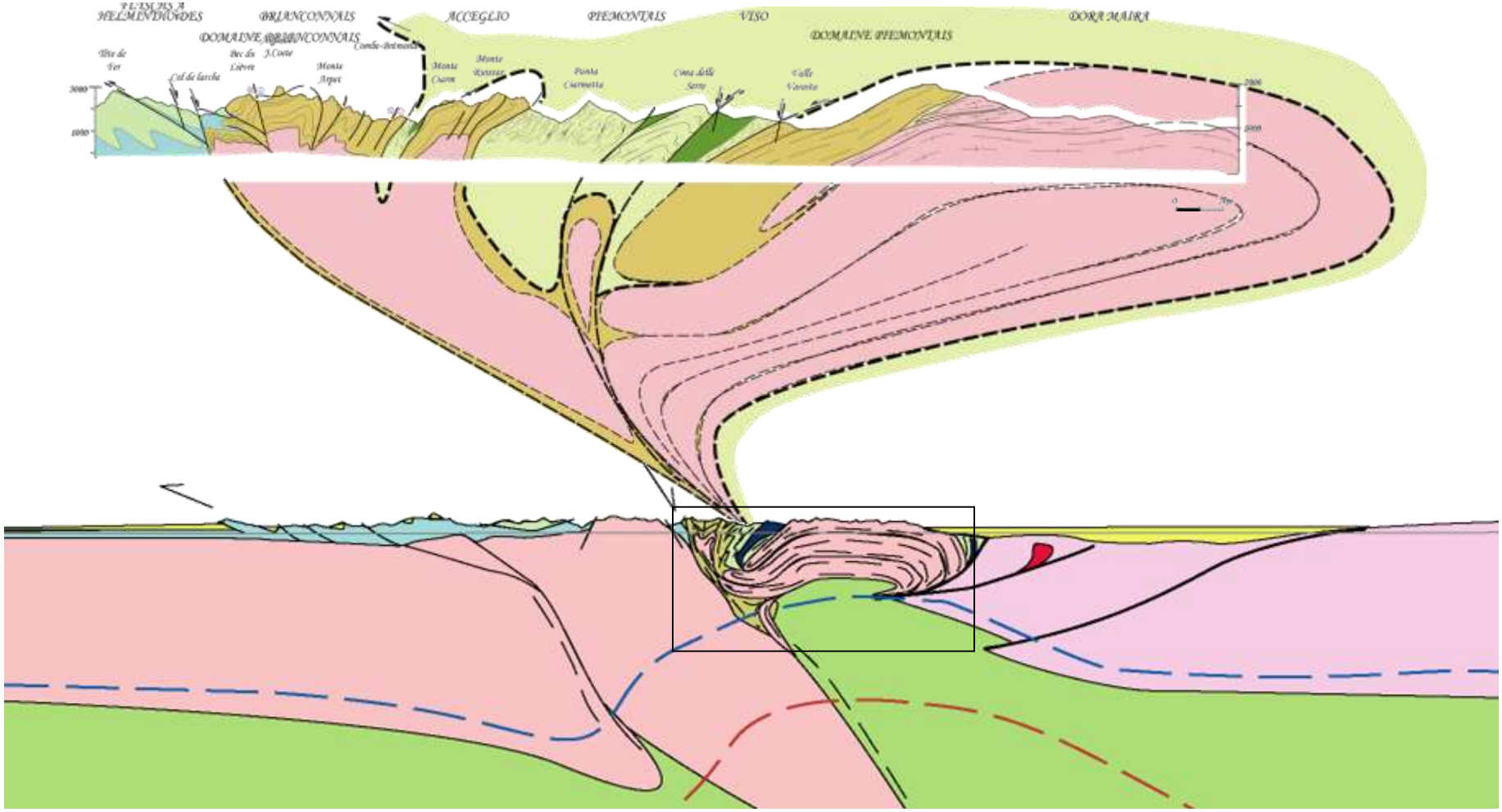






4.2. Le prisme d'accrétion orogénique alpin:

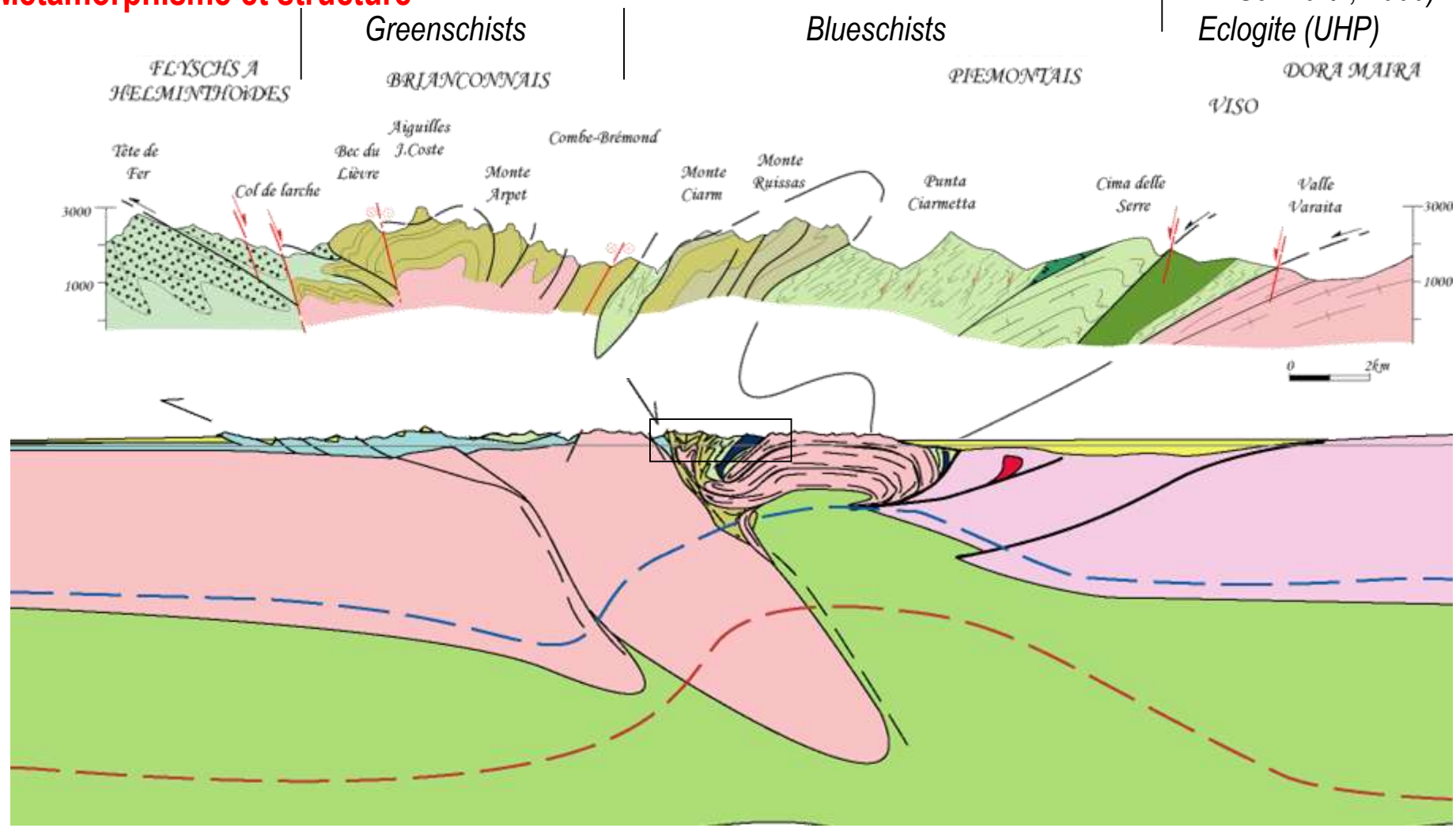
Métamorphisme et structure



4.2. Le prisme d'accrétion orogénique alpin:

Métamorphisme et structure

(Gidon et al., 1975
Schwartz, 2000)



Déformation polyphasée, plis couchés isoclinaux replissés

Contact Briançonnais/Piémontais précoce par rapport au replissement et au facies schistes verts

Marge apulienne faiblement déformée

Les roches métamorphiques : un marqueur des perturbations thermiques de la croûte continentale

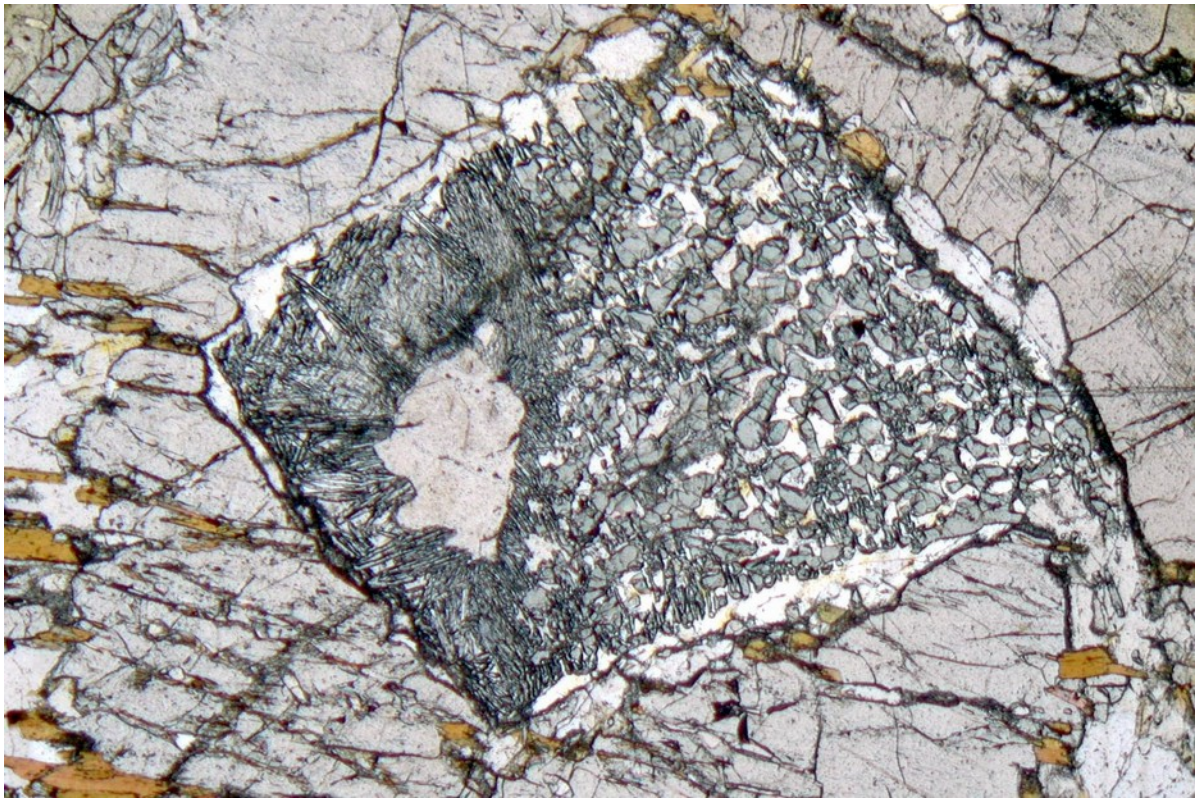
Philippe Goncalves

Univ. Franche-Comté

UMR Chrono-Environnement

25000 Besançon

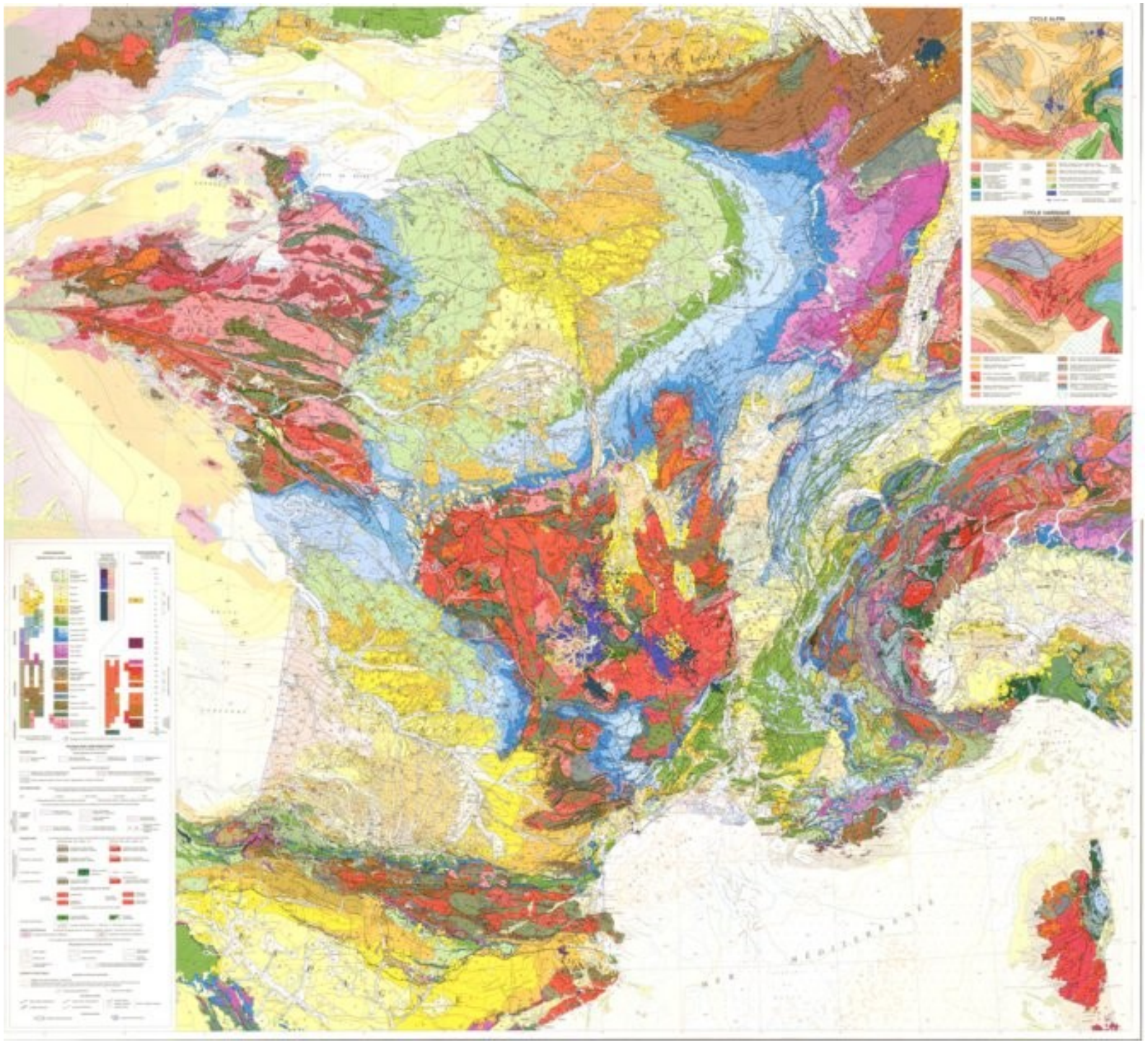
philippe.goncalves@univ-fcomte.fr



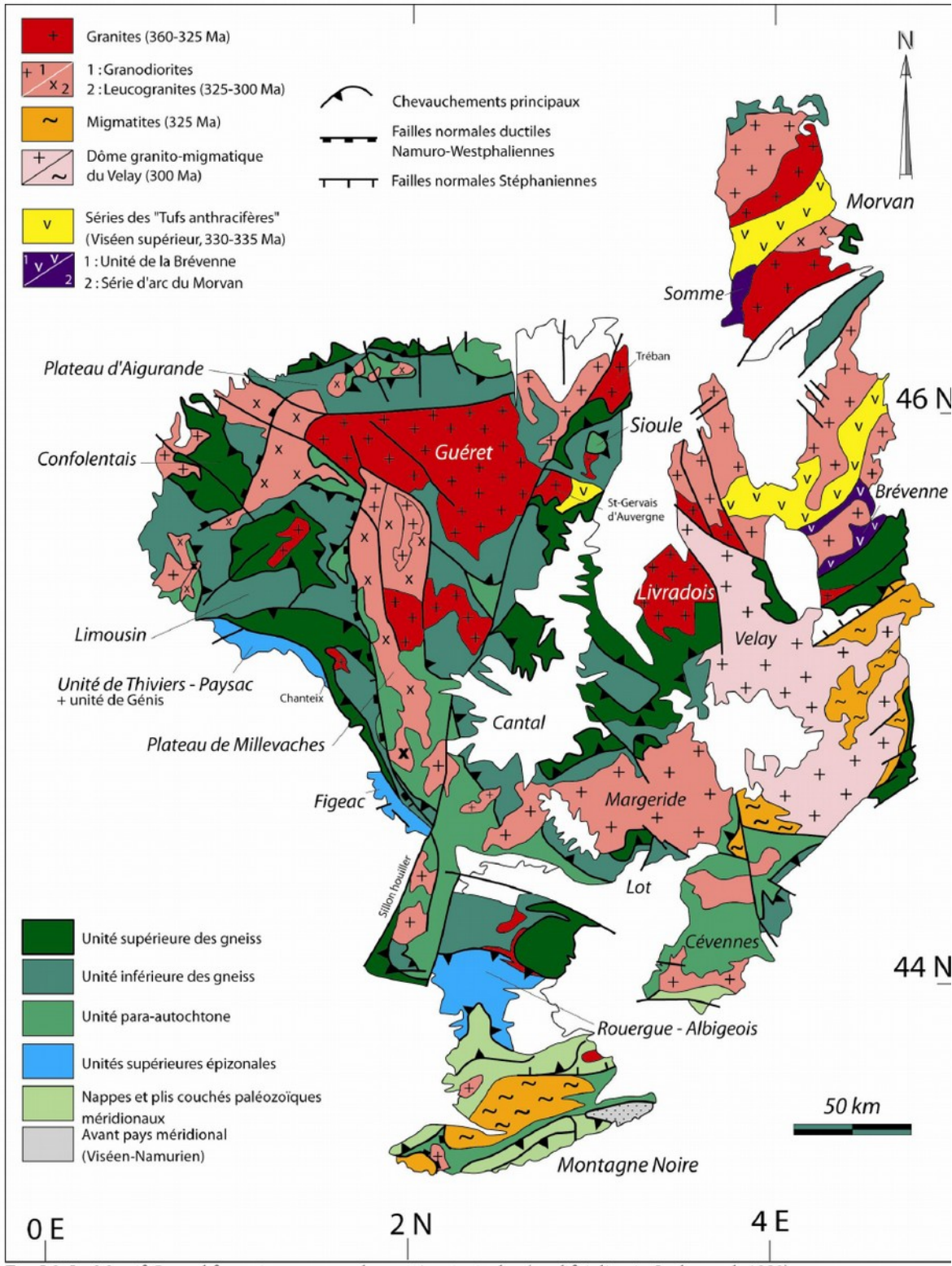
fantôme de sillimanite

réaction métamorphique opx + sill = spr + crd

Répartition des roches métamorphiques dans la croûte continentale



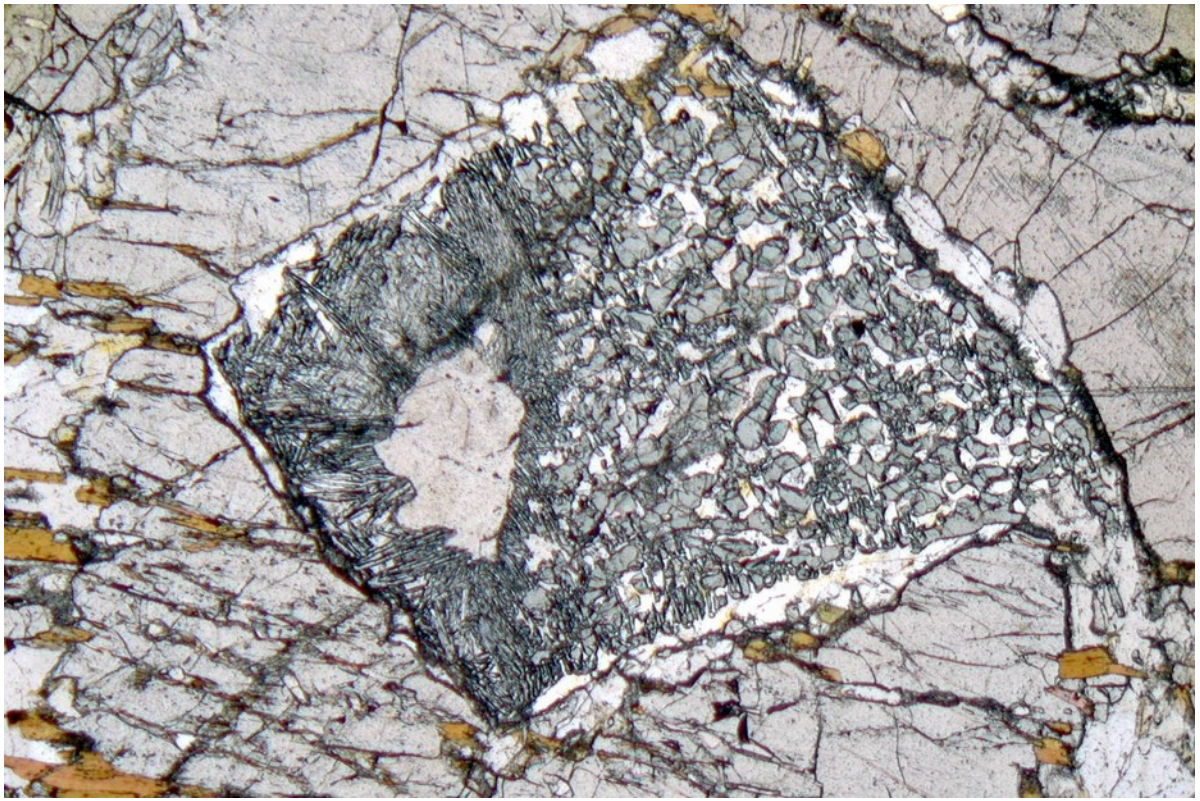
Roches métamorphiques = constituant majeur de la croûte continentale



Faure et al. (2009)

Fig. I.3. Le Massif Central français et ses grandes unités principales (modifié d'après Ledru et al. 1989).

Les roches métamorphiques : un marqueur des perturbations thermiques de la croûte continentale (oui mais pas forcément)



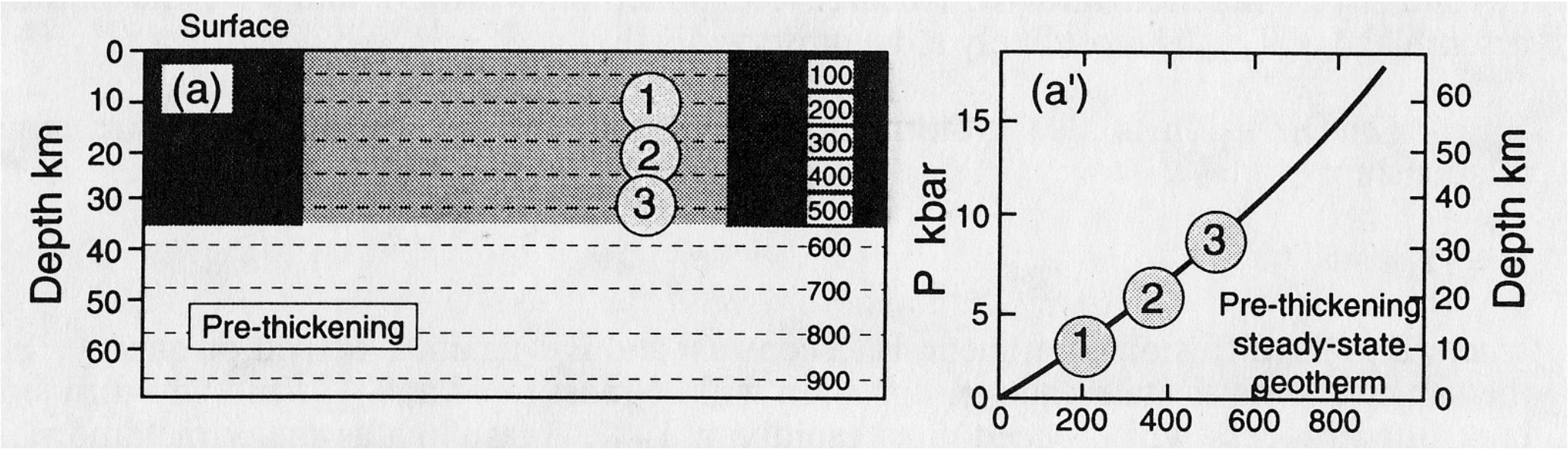
fantôme de sillimanite

réaction métamorphique opx + sill = spr + crd

1. Relations entre évolution thermique de la croûte et métamorphisme

La structure thermique de la croûte continentale

Le gradient géothermique : T(z) ou T(P) avec P=ρ.g.z



Le gradient géothermique

- Le calcul d'un gradient géothermique découle de l'équation générale de flux de chaleur (1D)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{A}{c \cdot \rho} + \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - u_z \cdot \frac{dT}{dz}$$

Production de chaleur — transfert par conduction — transfert par advection

c : chaleur spécifique (quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un corps de masse donné de 1°)

ρ : densité

A ($W.m^{-3}$): production ou consommation de chaleur interne

K : diffusivité thermique (m^{-2}/s)

u_z : vitesse de déplacement vertical d'un point

Gradient géothermique stationnaire

- un gradient géothermique stationnaire s'applique ***aux zones stables*** de la croûte

- un système perturbé (épaississement de la croûte dû à une collision continentale) tendra toujours ***à évoluer vers cet état stationnaire***

Il implique donc :

- absence de changement de T d'un point au cours du temps soit

$$\frac{dT}{dt} = 0$$

- épaisseur de croûte constante (30-35 km) sans mouvements verticaux de type exhumation

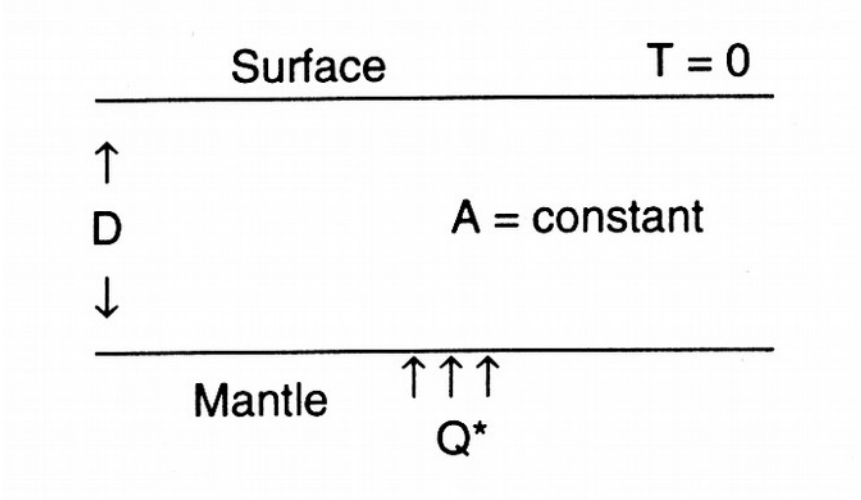
$$u_z = 0$$

$$0 = \frac{A}{c \cdot \rho} + \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad avec \qquad \kappa = \frac{k}{c \cdot \rho} \qquad on\ a$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{A}{k}$$

Equation d'un gradient géothermique stationnaire

Résolution (Spear, 1993)



$$Pour\ z \leq D$$

$$T = \frac{-A \cdot z^2}{2k} + \frac{Q^* \cdot A \cdot D}{k} \cdot z + 0$$

Calcul d'un gradient géothermique stationnaire moyen

géotherme moyen

K = 2.25 W.m-1.K-1

A = mW.m-3

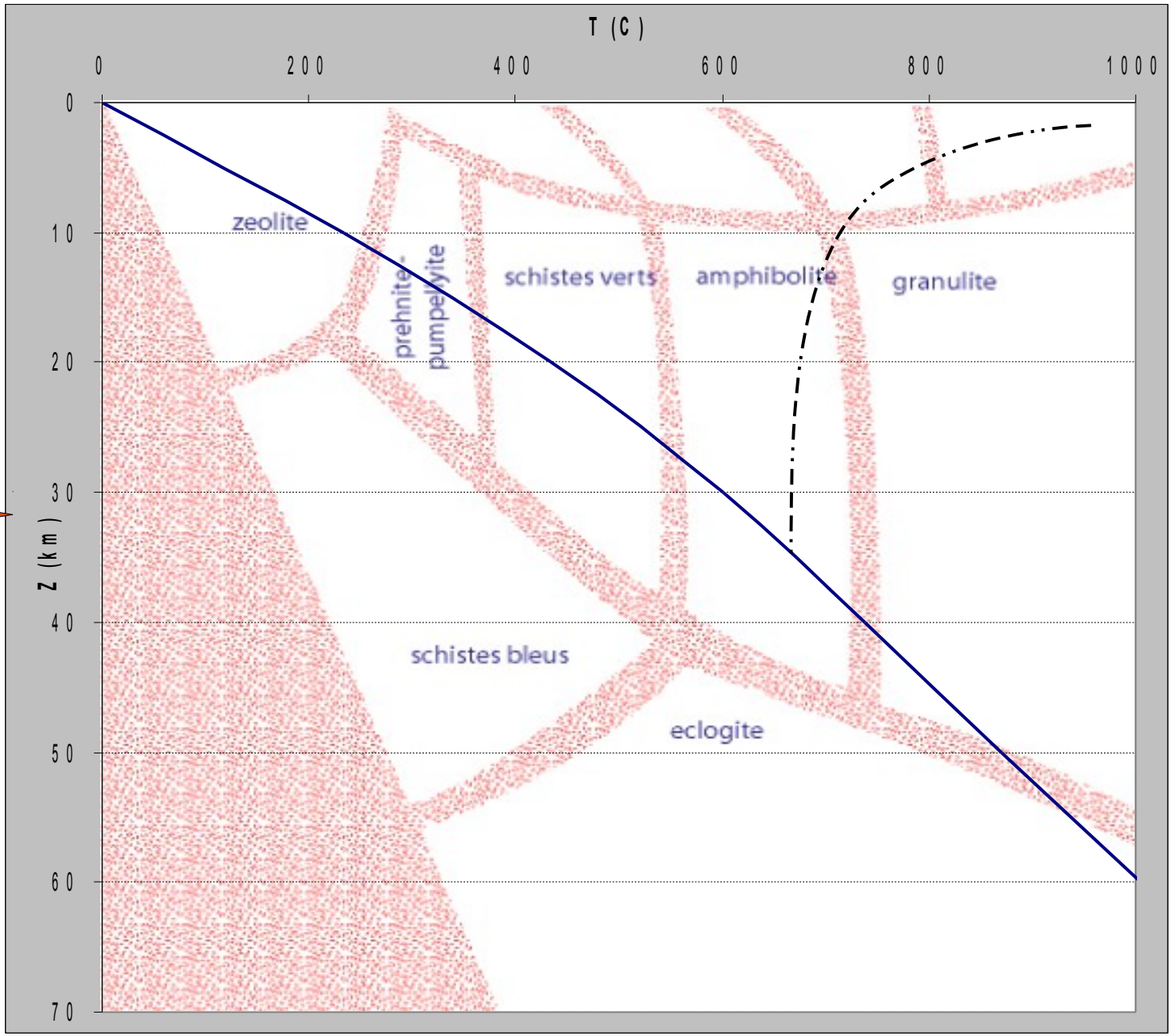
Q* = 30 mW.m-2

D = 35km

moho

Solidus hydratée

(systèmes pélitiques)



Perturbation du gradient géothermique stationnaire

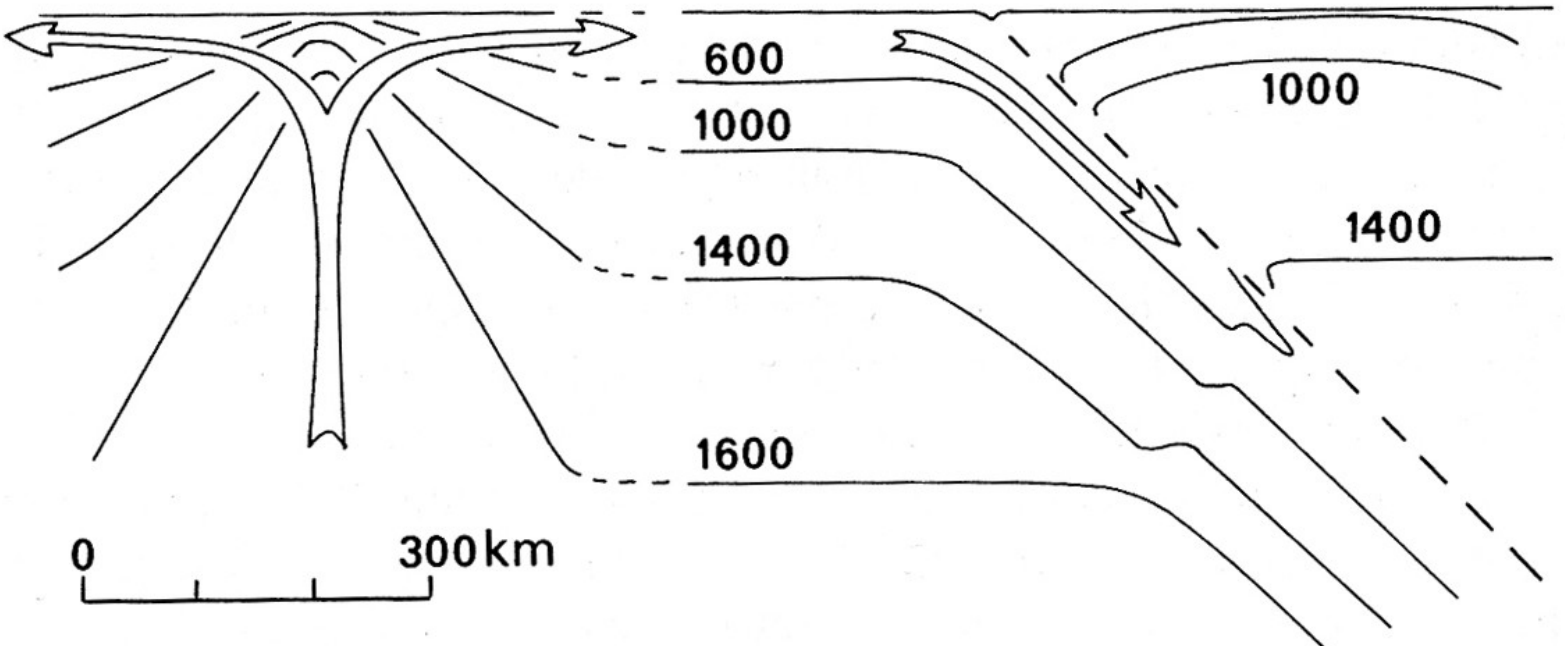
Si la croûte subit une ***perturbation thermique*** par

- des apports locaux de chaleur (intrusion magmatique)
- des contraintes tectoniques (épaississement crustal)

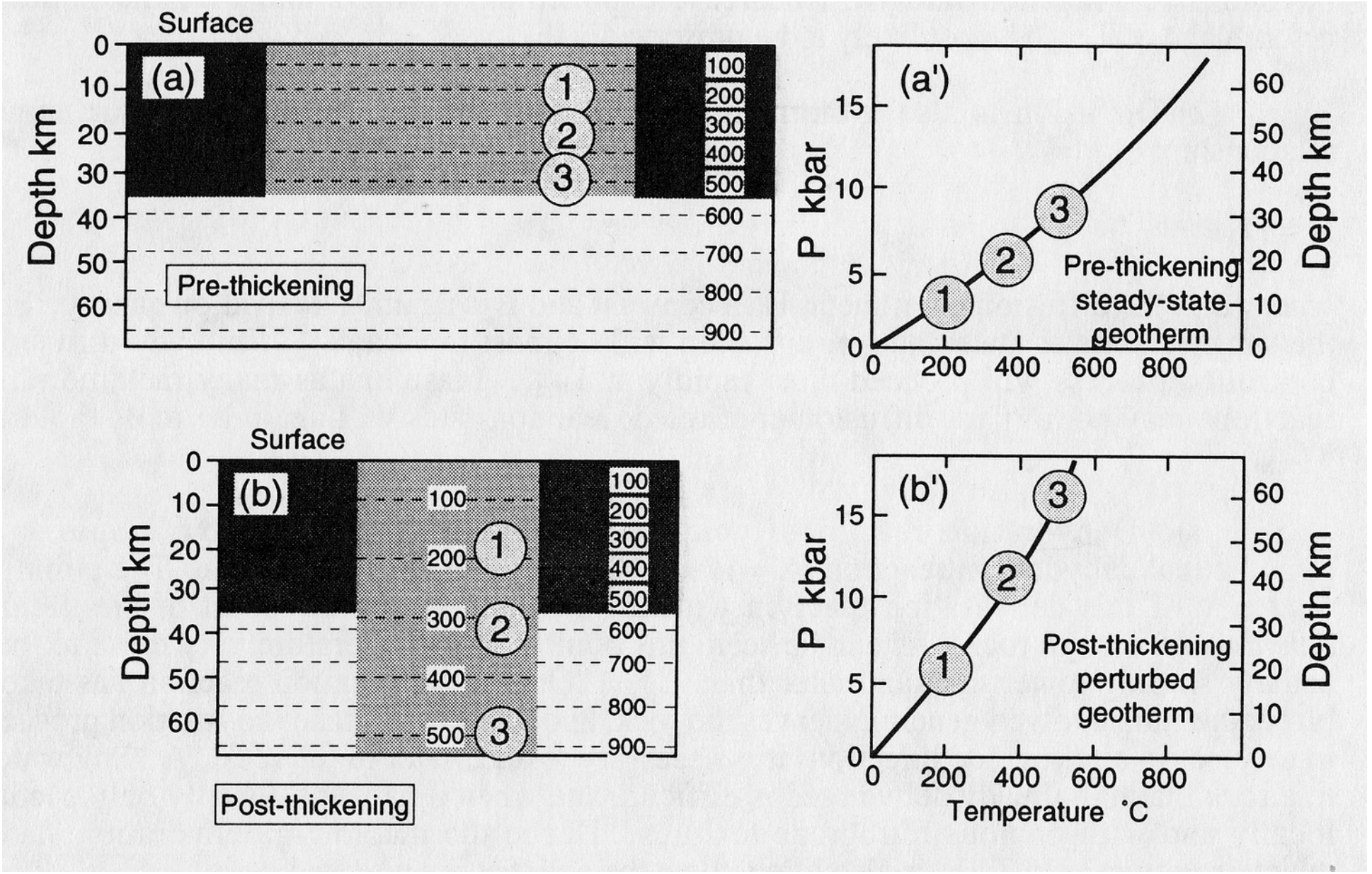
alors...

$$\frac{dT}{dt} \neq 0 \qquad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{A}{c \cdot \rho} + \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - u_z \cdot \frac{dT}{dz}$$

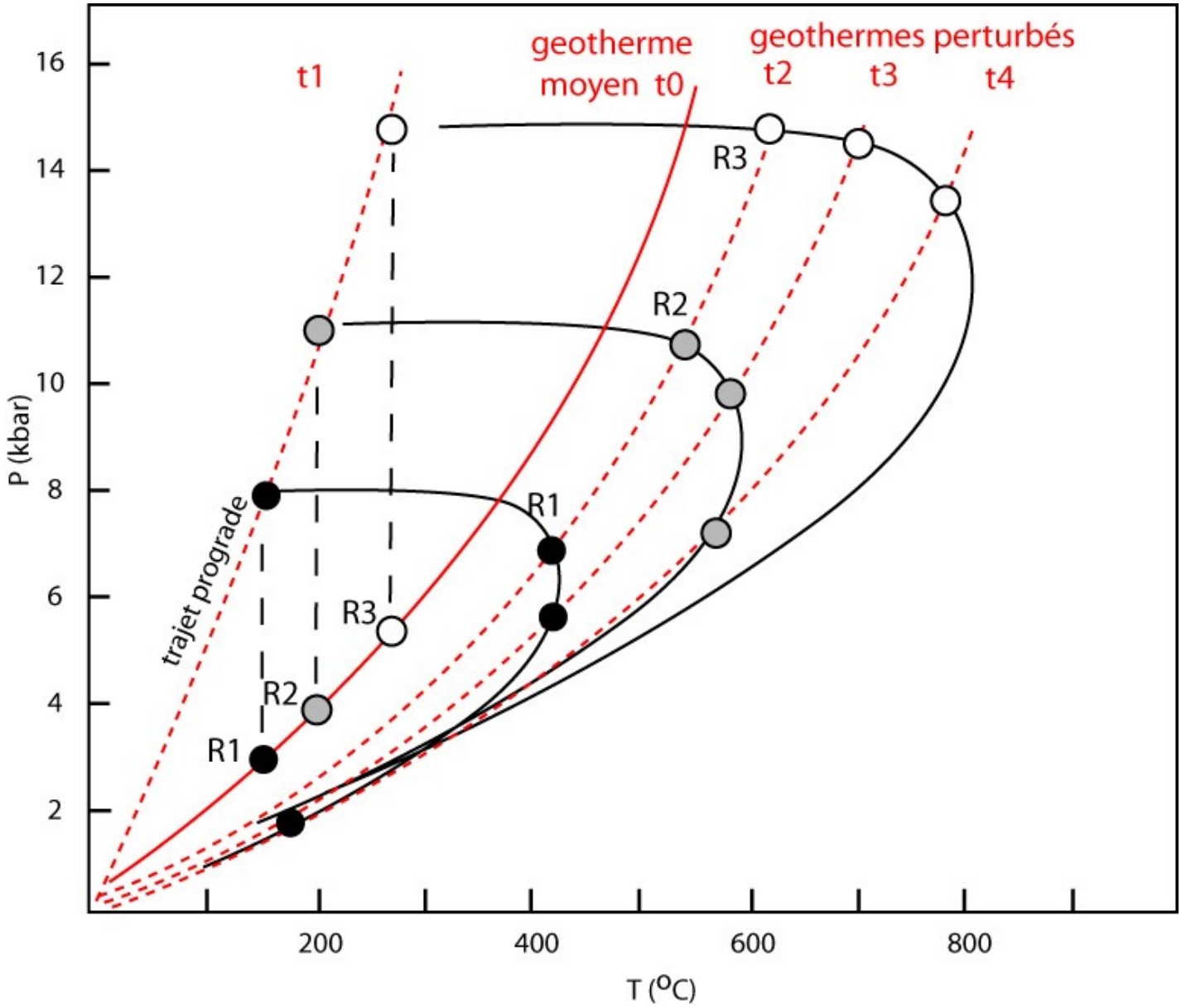
Uz ≠ 0



Perturbation du gradient géothermique stationnaire : modèle d'épaississement homogène



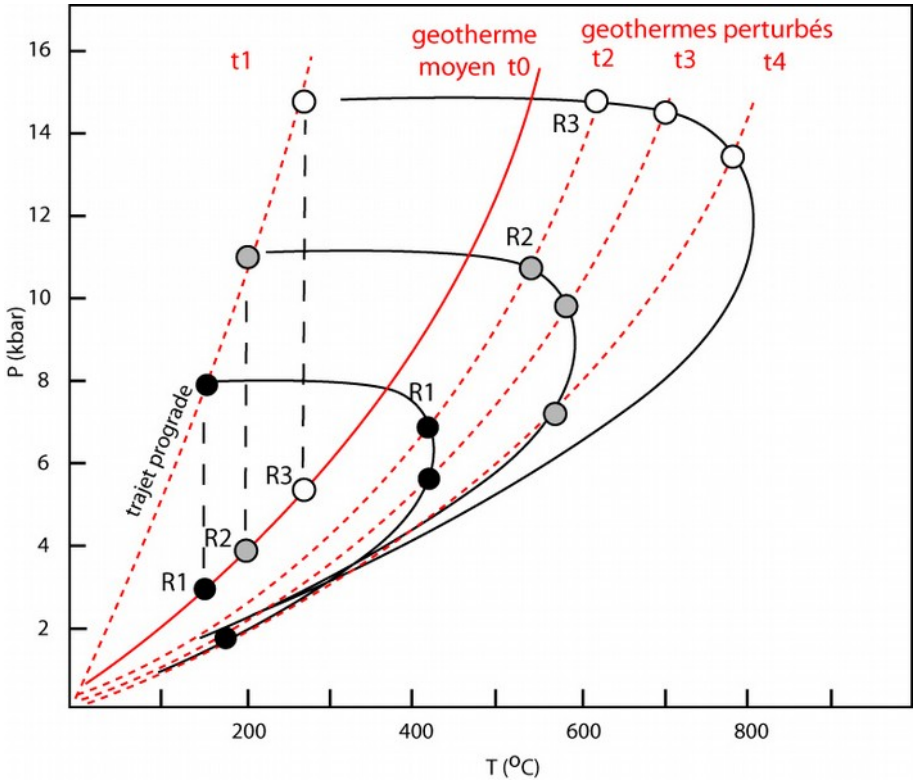
Relation entre évolution du gradient géothermique et trajet P-T

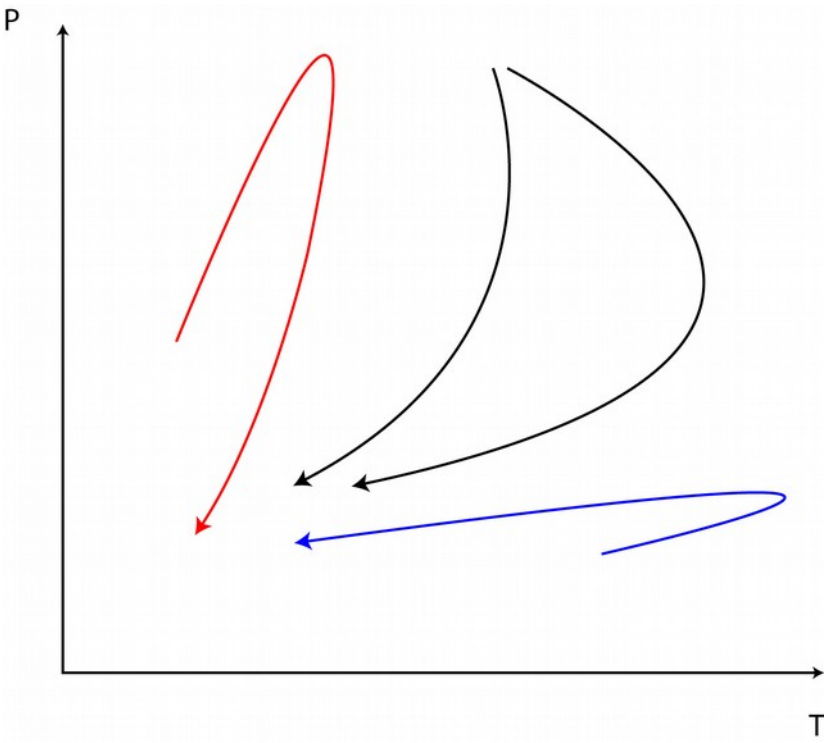


Les roches métamorphiques n'enregistrent pas directement l'évolution du gradient géothermique mais plutôt des portions de trajet P-T

Rôle du géologue :

- reconstruire ces trajets P-T
- déduire le contexte géodynamique





La forme et position des trajets P-T = f(nature de la perturbation, position initiale de la roche, vitesse de relaxation thermique et de déplacements verticaux, ...)

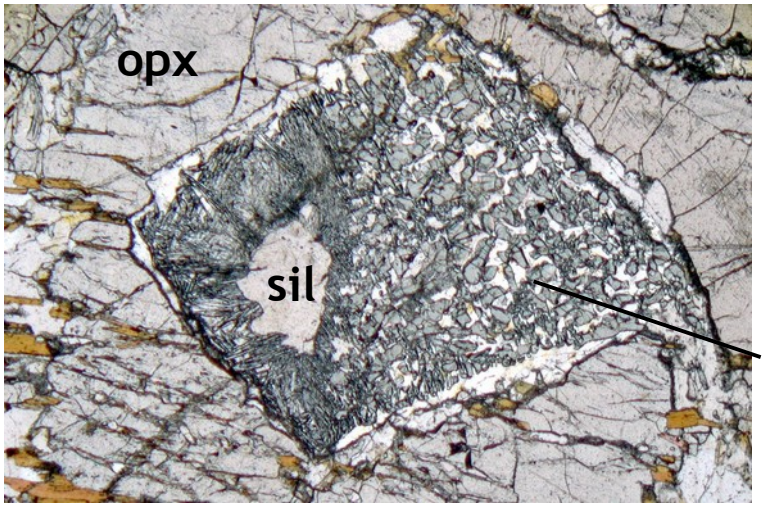
2. Pourquoi et comment les roches métamorphiques enregistrent-elles l'évolution P-T ?

2. Pourquoi et comment les roches métamorphiques enregistrent-elles l'évolution P-T ?

Métamorphisme et Thermodynamique sont intimement liés

une réaction chimique (métamorphique) correspond à un réarrangement d'atomes accompagné de transferts d'énergie suite à un changement des conditions environnementales du système = thermodynamique

opx + sil = spr + crd



Une roche = système thermodynamique (ouvert ou fermé) qui tend toujours vers un équilibre en minimisant son énergie interne

Un système thermodynamique (roche) est à l'équilibre :

(1) s'il n'a aucune de ses propriétés qui changent avec le temps

(2) s'il est perturbé (c'est à dire soumis à des gradients de quelque nature que ce soit (P, T, chimie), reviendra spontanément à son état d'équilibre (par élimination des gradients).

Un système peut-être définit sous 3 états : stable, métastable et instable

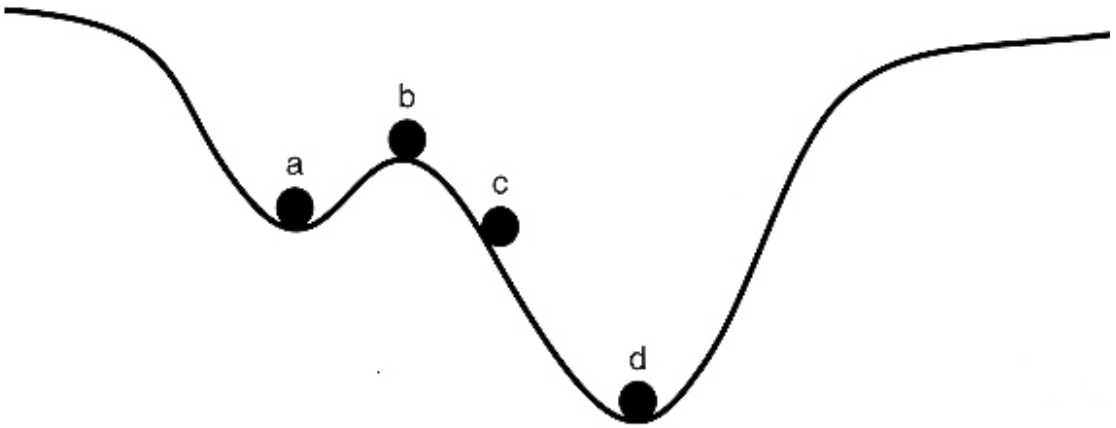


Figure 2.3 Four positions of a ball on a surface, to illustrate the concept of equilibrium. Position a – metastable equilibrium. Position b – unstable. Position c – unstable. Position d – stable equilibrium.

Anderson, 2005

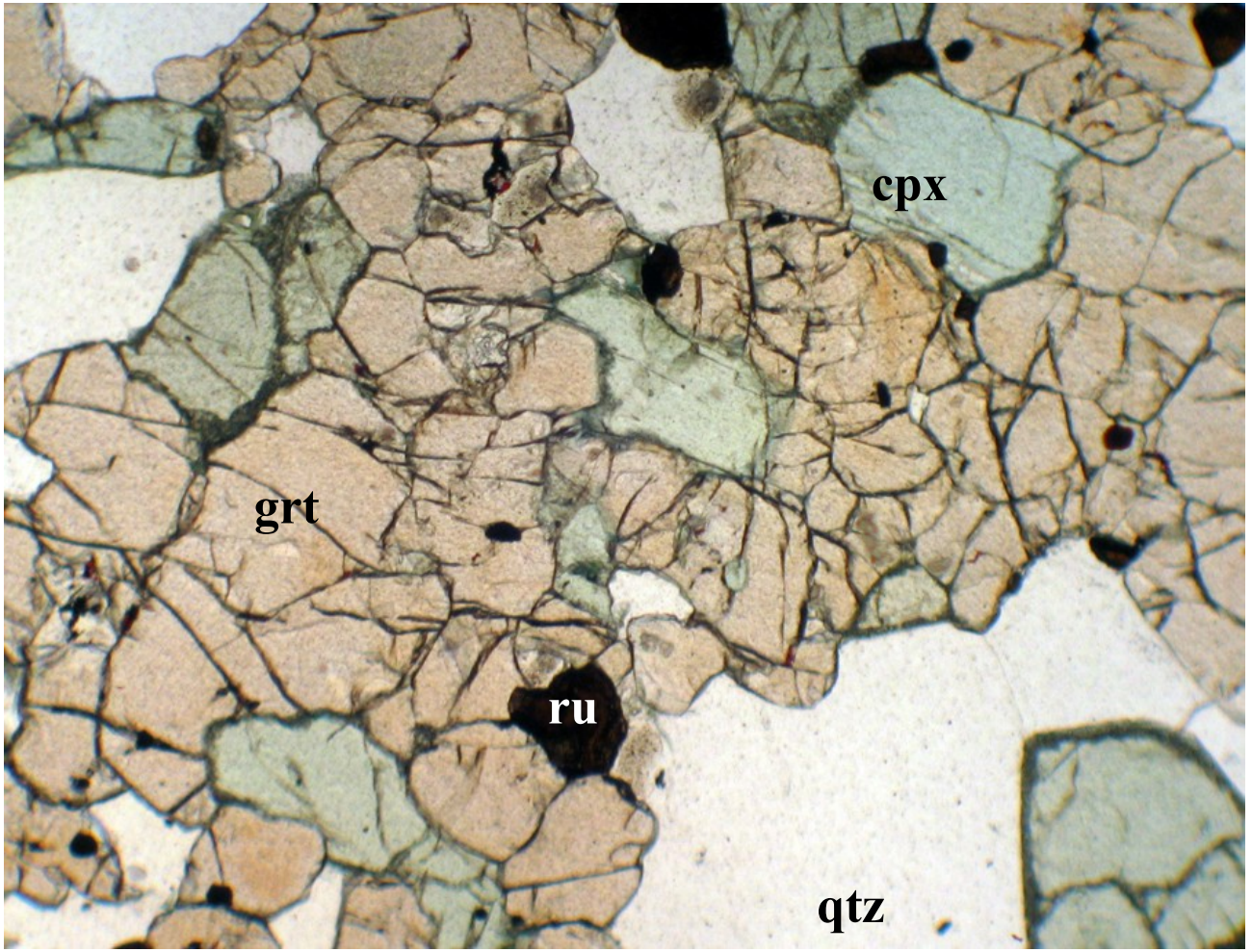
d. stable = le système est à l'équilibre et dans son état d'énergie minimum

a. métastable = système à l'équilibre mais dans une configuration d'énergie non minimum

a. et d. vérifie bien la définition de l'équilibre thermodynamique

b. et c. instable = système en déséquilibre

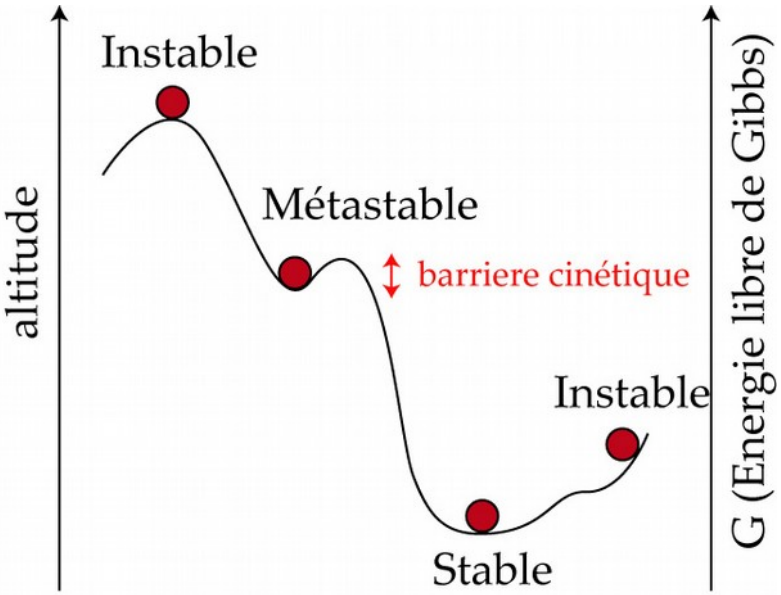
exemple de métastabilité : les roches de HP aux conditions atmospheriques



Dans les conditions d'observations (20°C et 1 bar), cette eclogite est métastable. la paragenèse grt-cpx-q subsiste en dehors de son champ de stabilité

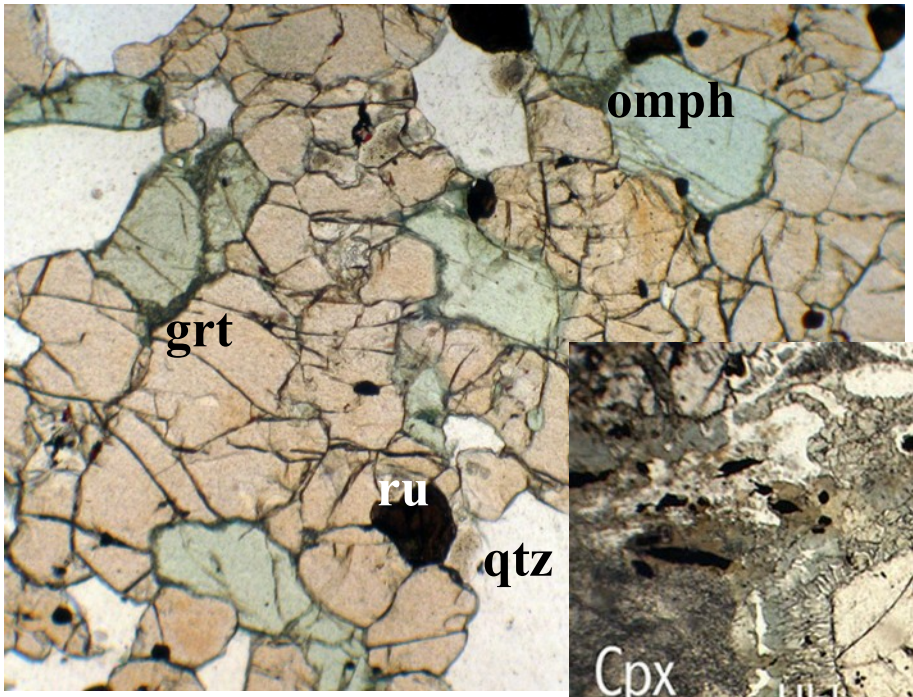
Le système est en équilibre mais pas dans sa configuration d'énergie minimum

Le passage à un état stable ne se fera que si les barrières cinétiques sont franchies

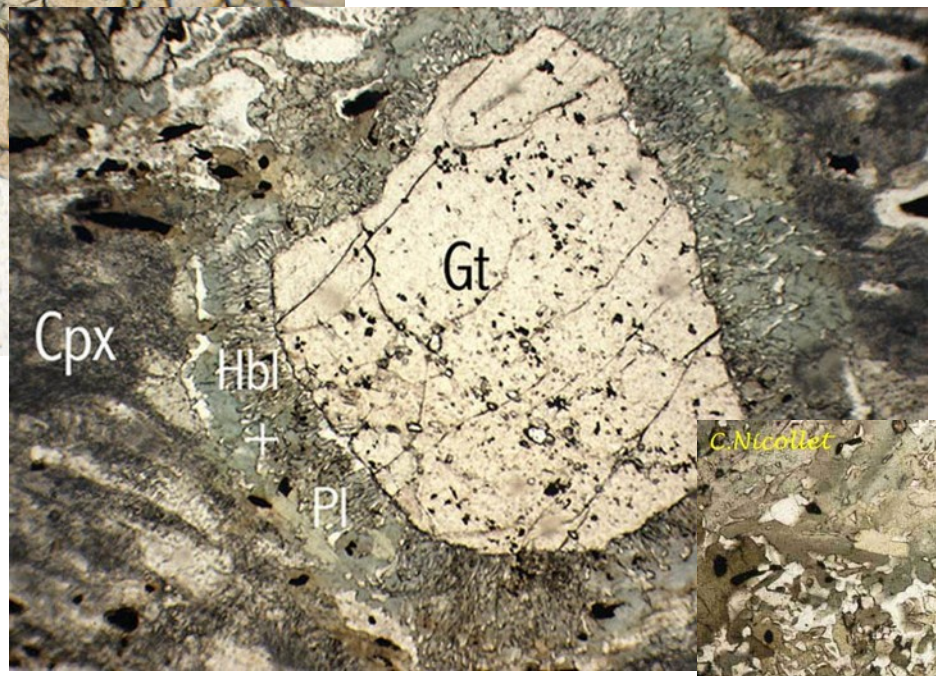


Les réactions métamorphiques

Les réactions métamorphiques affectant une roche suite à des variations de P et T répondent à une nécessité thermodynamique: la minimisation de l'énergie libre (Gibbs)



eclogite
(grt-omph-qtz-ru)



amphibolite à fantôme de grt
(amph - pl)

diminution de P

cpx grt q V = amph pl

http://christian.nicollet.free.fr

les réactions polymorphiques

changement de structure cristallographique d'un minéral sans variation chimique de sa composition (A = B)

transformations isochimiques qui ne dépendent que de P et T = bons marqueurs thermobarométrique

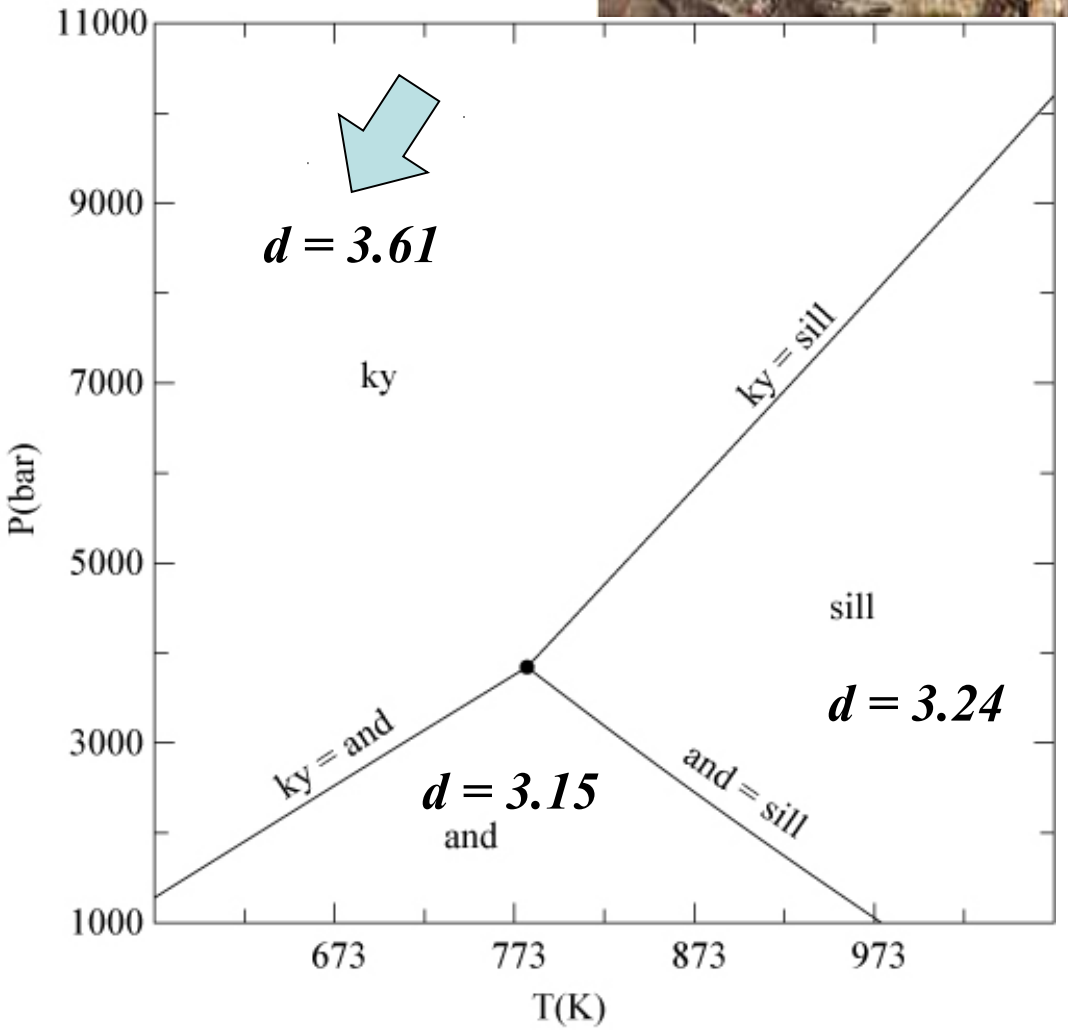
- exemple des silicates d'alumines

orthorhombique

http://www.indiana.edu/

triclinique

orthorhombique



réactions entres phases pures ou solution solide de la forme

A + B = C
A + B = C + D etc etc

mu + q = sill + ksp + H2O
sil + ksp + q + H2O = liq

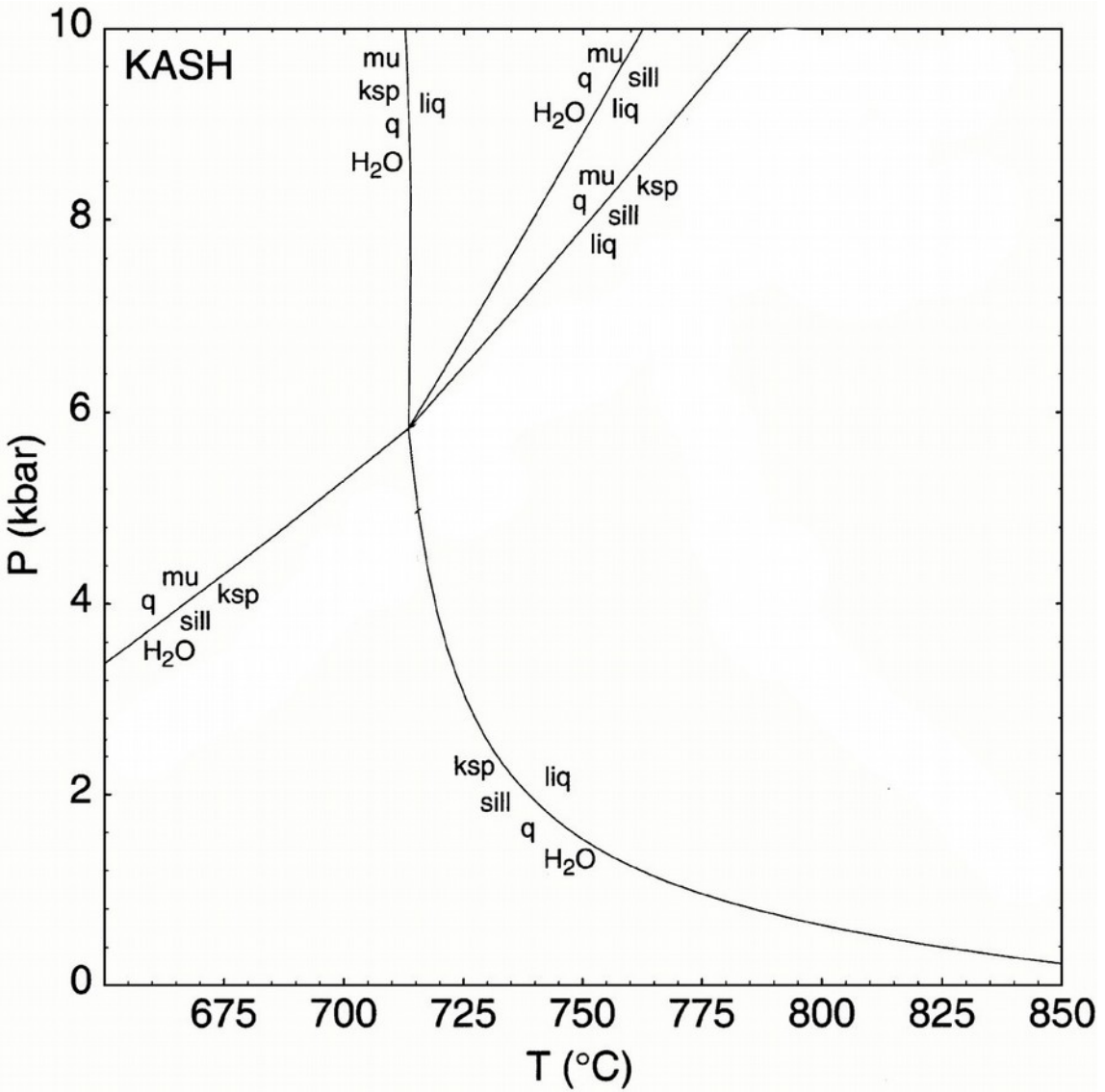
mu : muscovite

q : quartz

sill : sillimanite

ksp : feldspath K

liq : liquide



Comment est déterminée la position des réactions dans un espace P-T ?

1. approche expérimentale

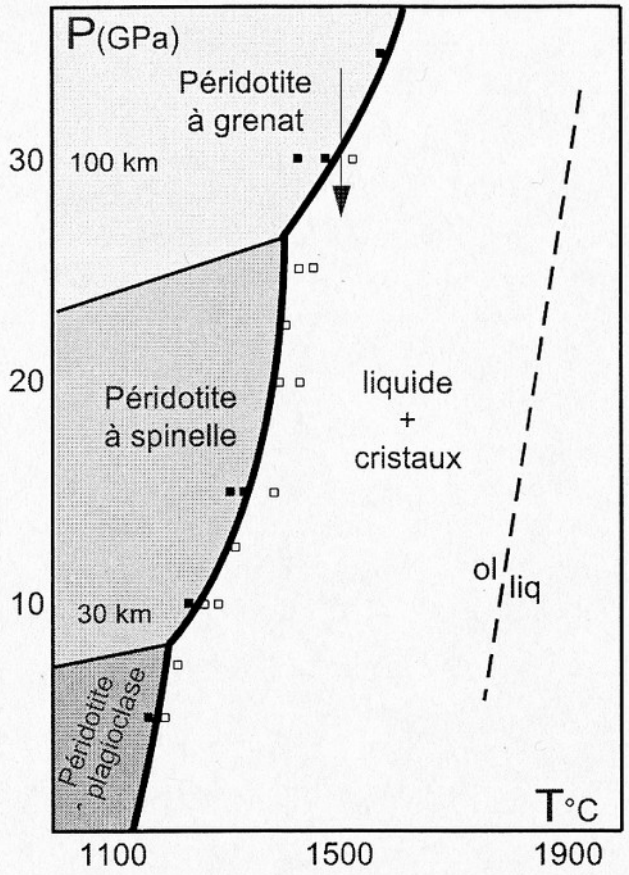


Fig. 4.21. Diagramme de phases expérimental montrant la fusion de la péridotite KLB-1 en conditions anhydres (d'après Takahashi, 1986). Le solidus est figuré en trait épais. Les carrés pleins et vides correspondent aux points expérimentaux. La flèche représente une remontée adiabatique du manteau asthénosphérique. Comparer ce diagramme avec la grille pétrogénétique de la figure 4.20.

2. approche thermodynamique

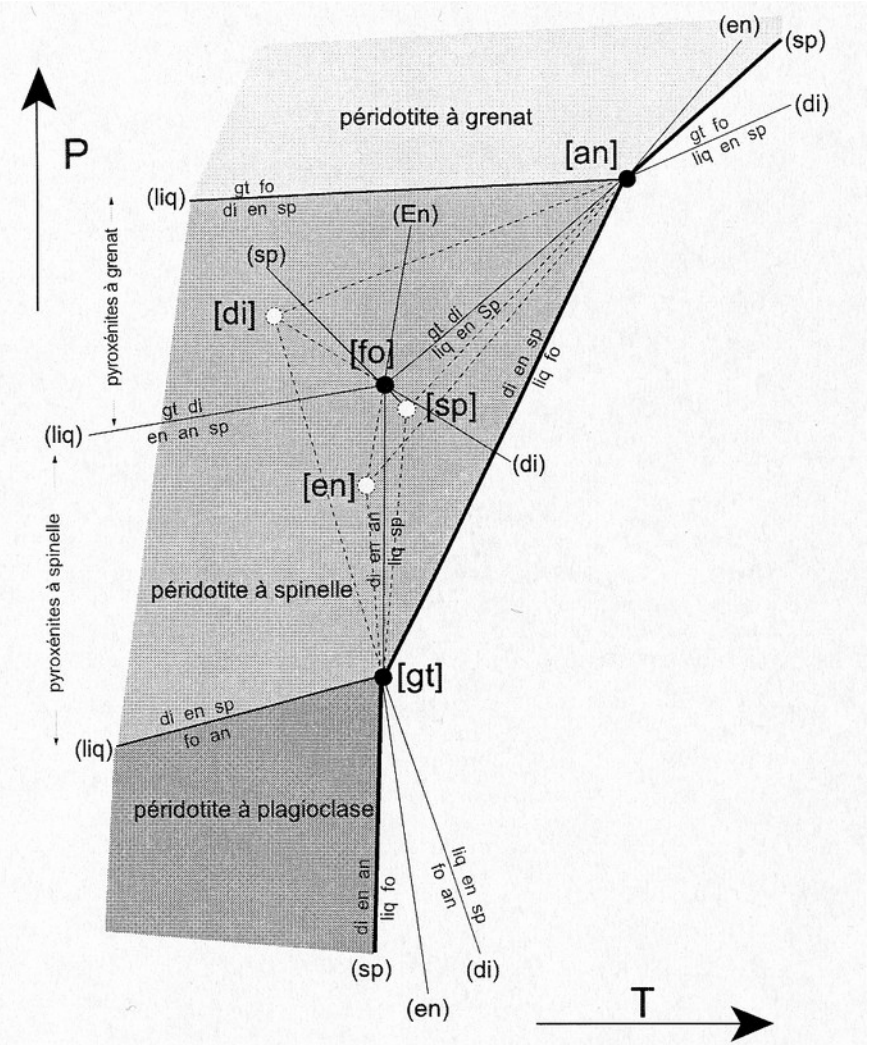


Fig. 4.20. Section P-T montrant les relations chémographiques dans le système CMAS pour les phases anorthite, diopside, enstatite, forstérite, grenat, spinelle et liquide. Le solidus est figuré en trait épais. Les différents grisés marquent les champs de stabilité des péridotites à plagioclase, spinelle et grenat constituant le manteau lithosphérique.

1. approche expérimentale

principe : reproduire en laboratoire les conditions physico-chimiques de l'intérieur de la Terre

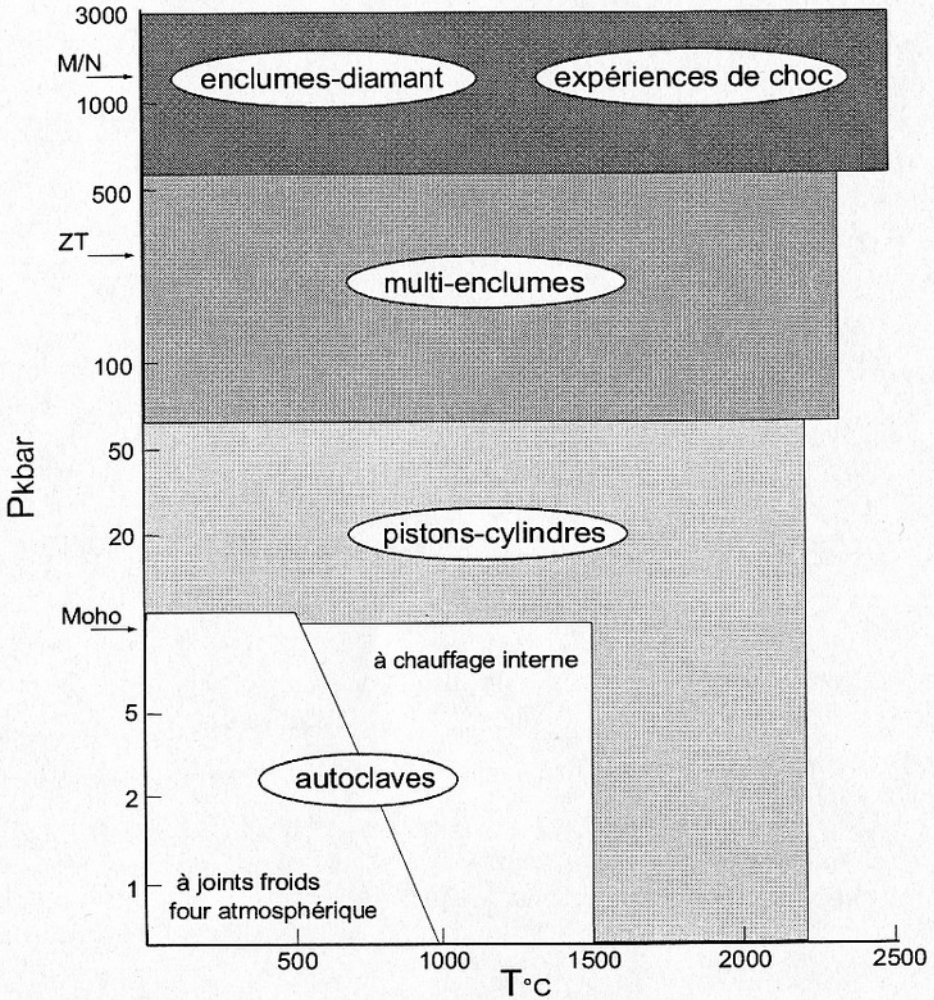


Fig. 4.2. Domaines P-T couverts par les principaux types d'appareillages expérimentaux. M/N = transition manteau-noyau, ZT = zone de transition, Moho = discontinuité de Mohorovicic. D'après Holloway et Wood (1988).

piston cylindre - Lab Magmas et Volcans

1. approche expérimentale

principe : reproduire en laboratoire les conditions physico-chimiques de l'intérieur de la Terre

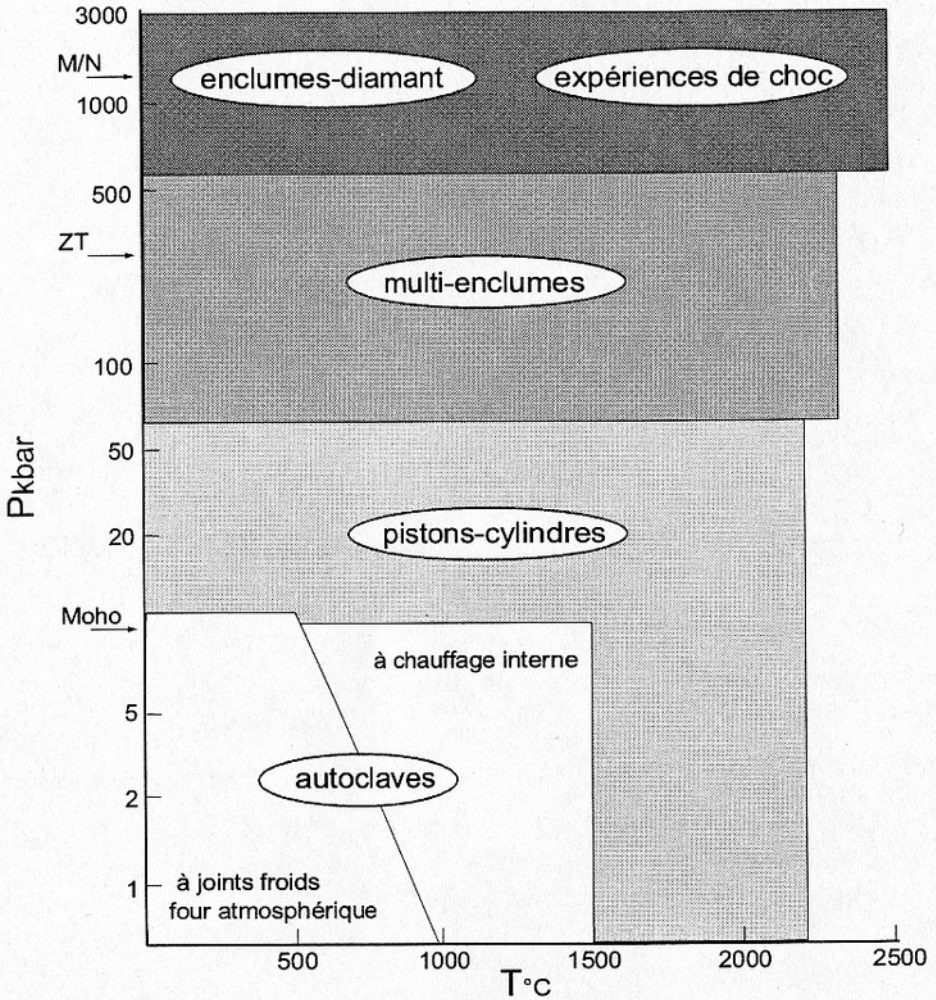
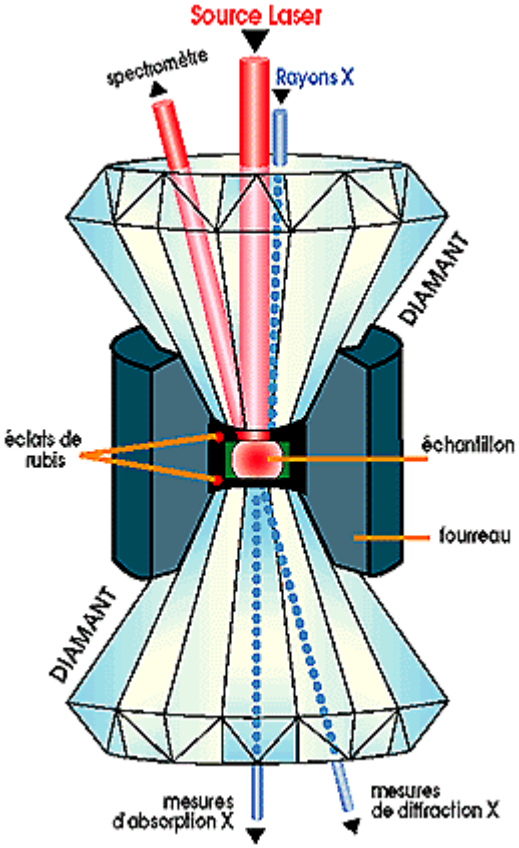


Fig. 4.2. Domaines P-T couverts par les principaux types d'appareillages expérimentaux. M/N = transition manteau-noyau, ZT = zone de transition, Moho = discontinuité de Mohorovicic. D'après Holloway et Wood (1988).



enclume diamant (ENS Lyon)

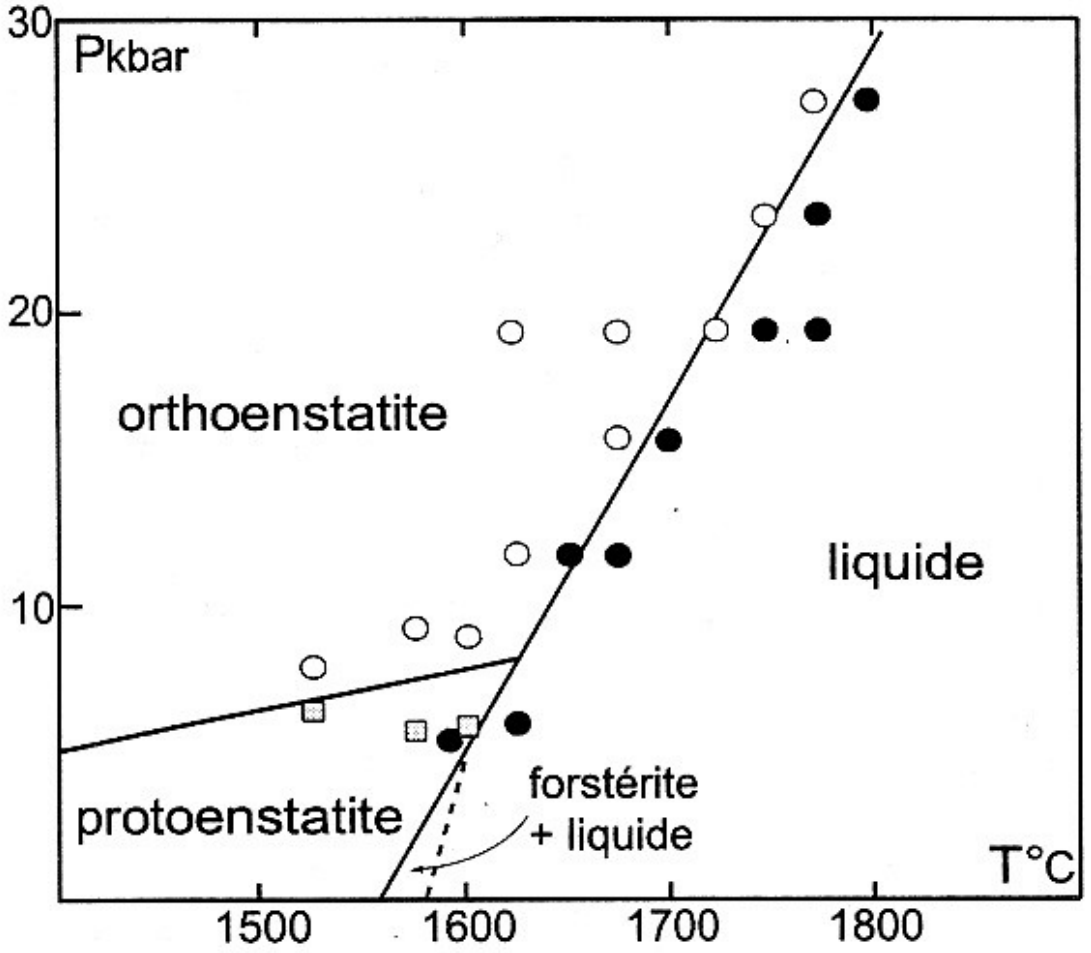


Fig. 4.1. Diagramme P-T de $MgSiO_3$ déterminé expérimentalement. Les cercles noirs représentent le verre ou les produits de trempe, les cercles vides l'orthoenstatite non fondue et les carrés gris clair la clinoenstatite produite par inversion de la protoenstatite. D'après Boyd et England (1961).

2. approche thermodynamique

principe : - élaboration de diagrammes de phases en calculant les assemblages stables, connaissant leur propriétés thermodynamiques (S, V, H, Coeff. expansion thermique....), en fonction des variables P-T-X

outils :

- minimisation de l'énergie libre de Gibbs (G)

permet de déterminer les champs de stabilité des assemblages dans un espace P-T-X

- règles géométriques de Schreinemakers

permet de déterminer qualitativement l'agencement des équilibres dans l'espace P-T-X

- équation de Clapeyron et $\Delta G^{T,P}$ des réactions

permet de calculer la pente et la position des équilibres dans l'espace P-T-X

3. Outils de quantification des conditions P-T du métamorphisme

Quantification des paramètres physico-chimiques du métamorphisme

4 outils:

- minéraux index: approche qualitative et applicable au terrain

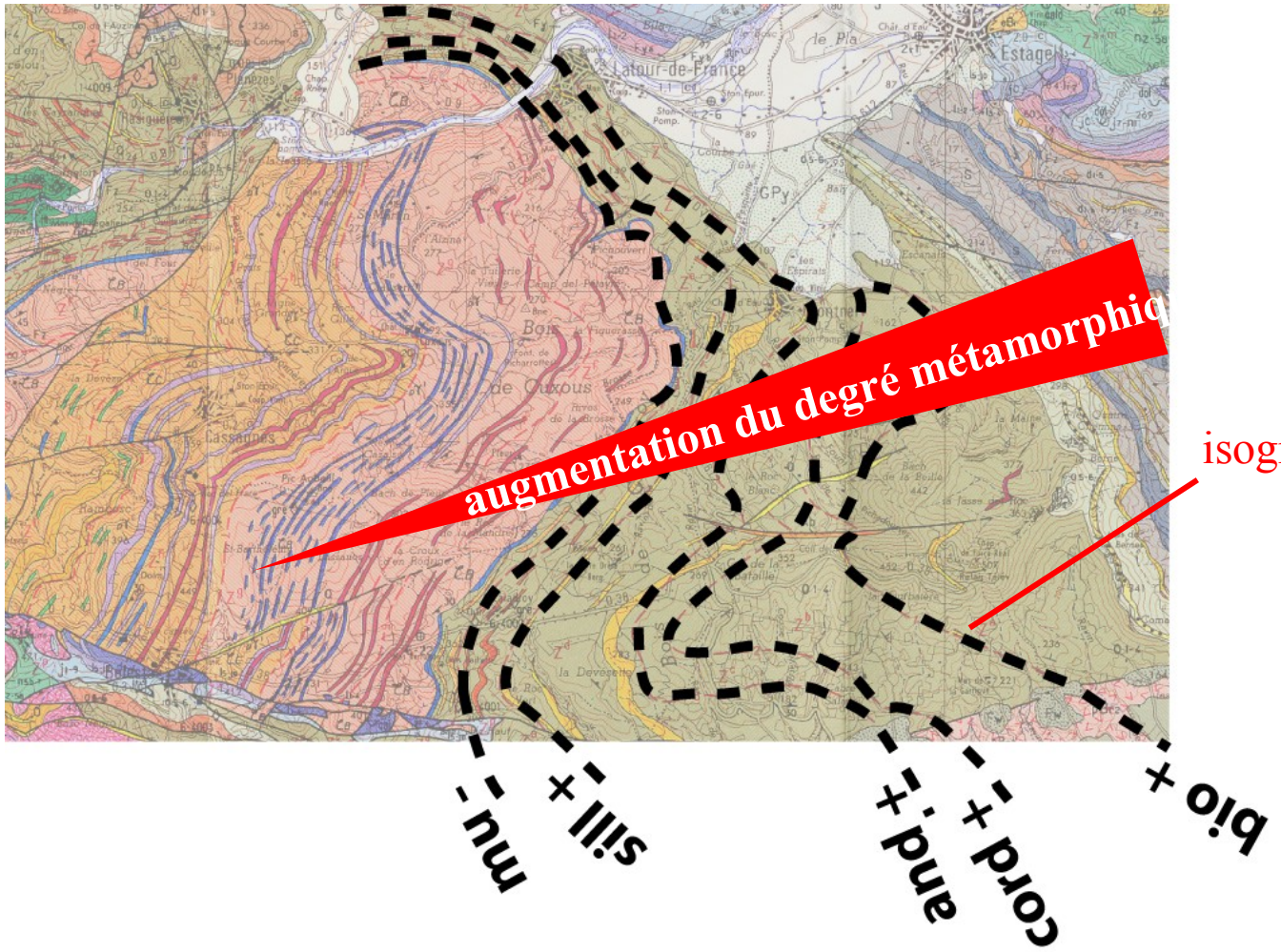
- facies métamorphiques: approche empirique et semi-quantitative et difficile à utiliser sur les roches non-basiques

- diagramme de phases (grilles pétrogénétiques, pseudo-sections): approche thermodynamique - outils fondamental et extrêmement puissant de modélisation directe des relations de phase

- thermobarométrie: approche thermodynamique et/ou empirique - outils fondamental de modélisation inverse

les minéraux index

- approche macroscopique utilisable sur le terrain basée sur l'apparition ou disparition de minéraux caractéristiques (notion d'isogrades)

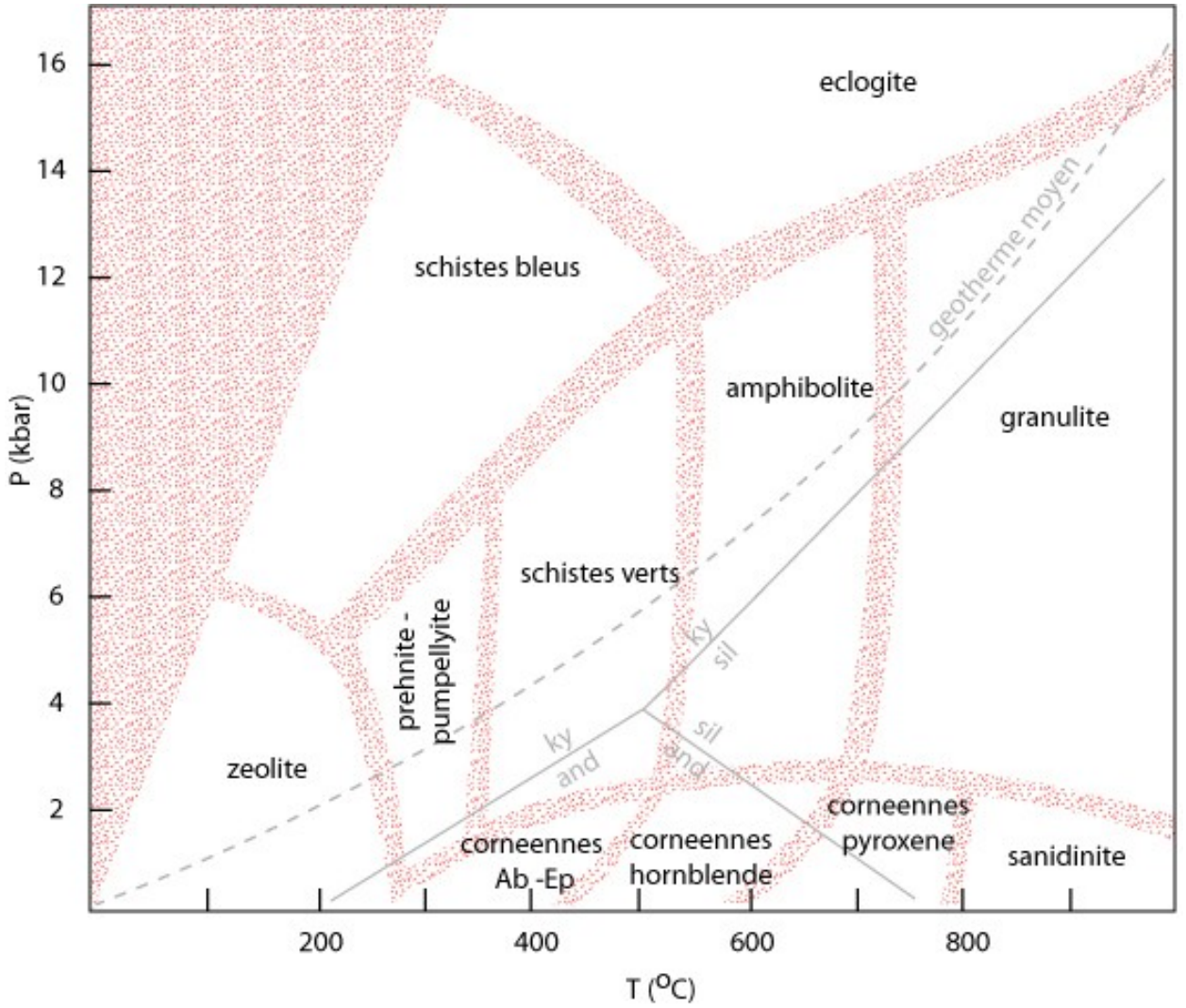


extrait carte de Rivesaltes
massif de l'Agly
BRGM 1/50000

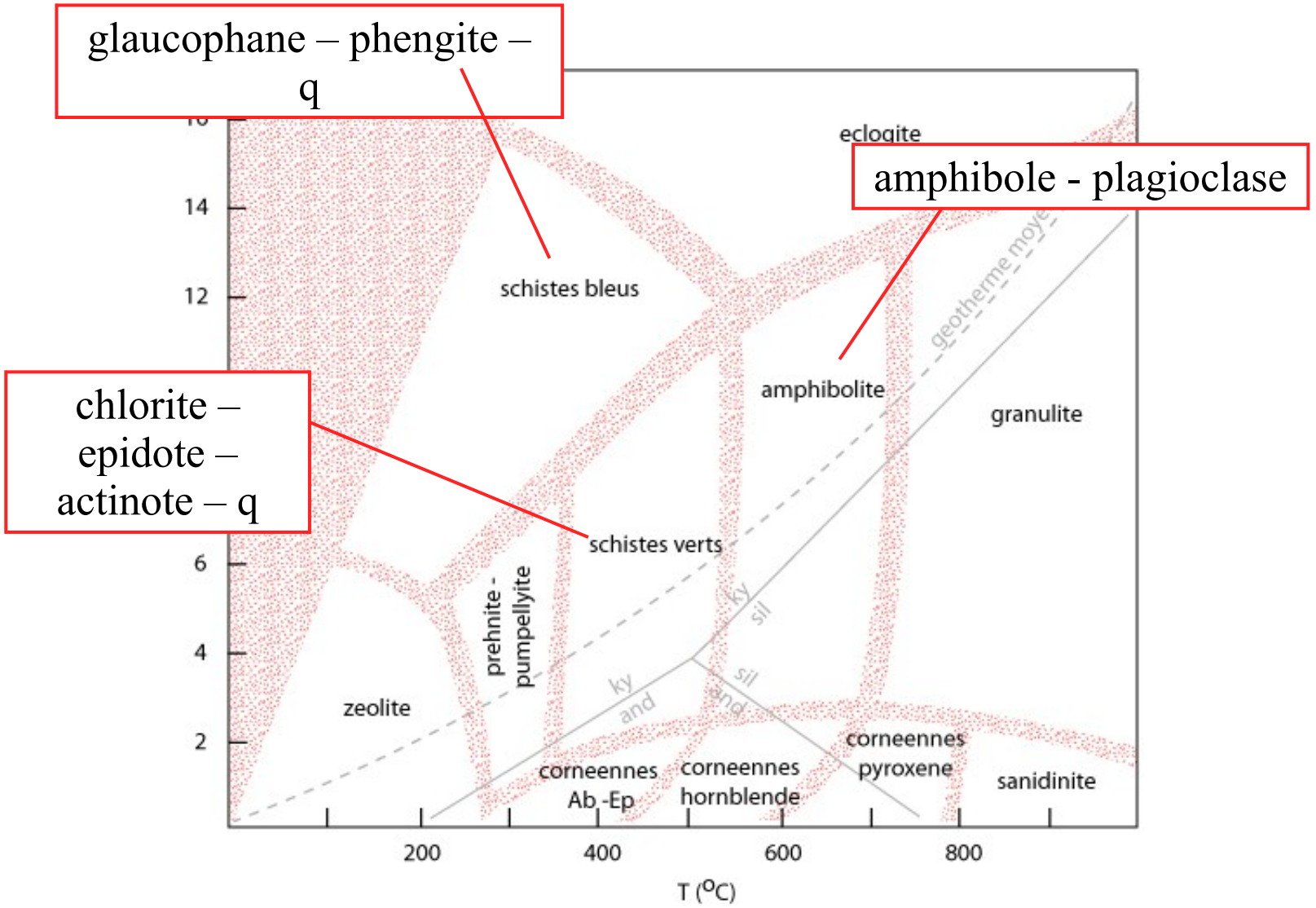
les facies métamorphiques

concept initialement introduit par Eskola en 1915 (puis largement révisé) qui a abouti à la sub-division de l'espace P-T en domaine dont chacun représente un faciès métamorphique

modifié d'après Winter (2001) et Spear (1993)



nomenclature : noms et l'extension P-T des facies a été défini sur la base des assemblages métamorphiques observés dans les métabasites (métabasalte)



limites de facies : position de réactions métamorphiques majeures dans les métabasites

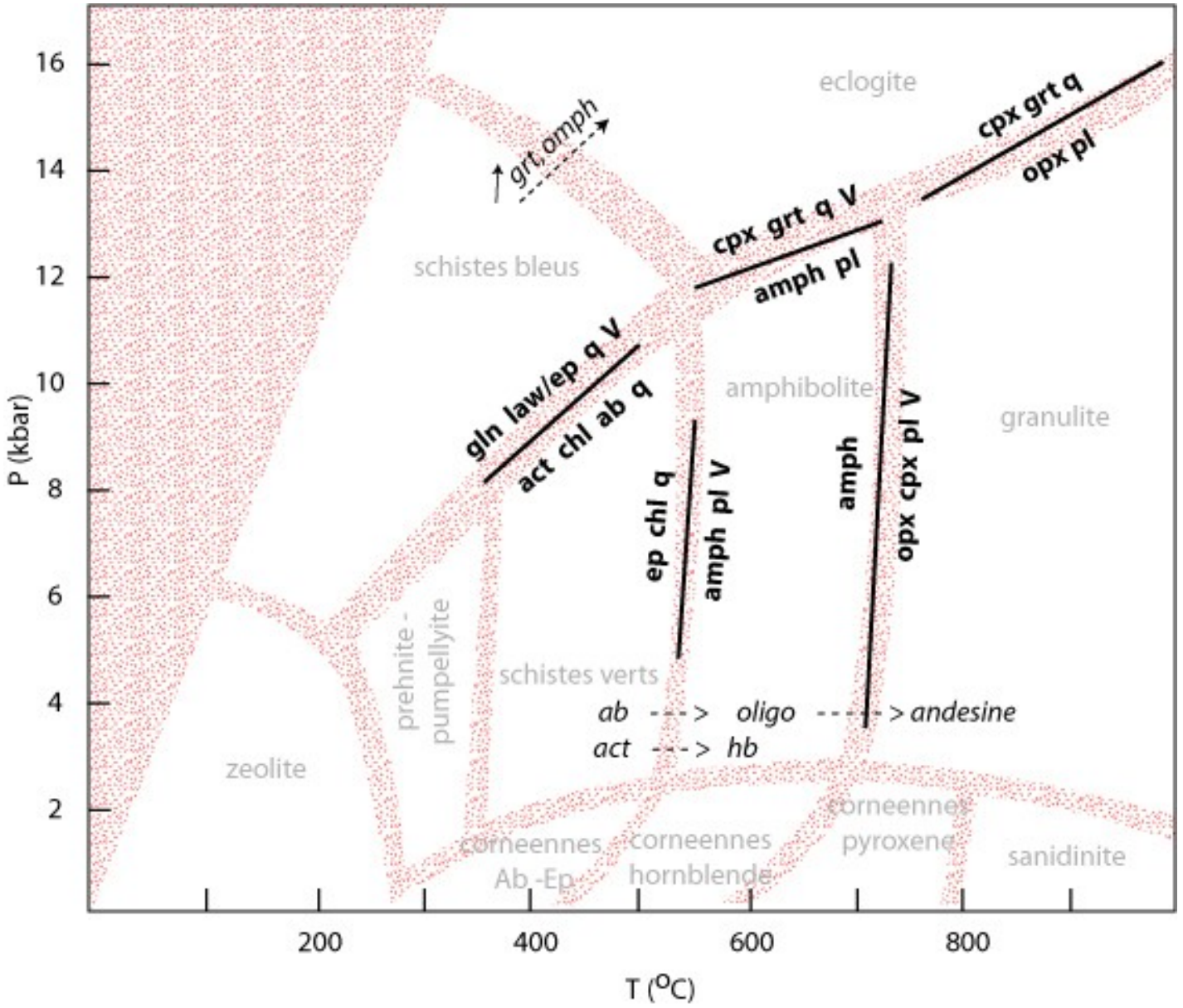
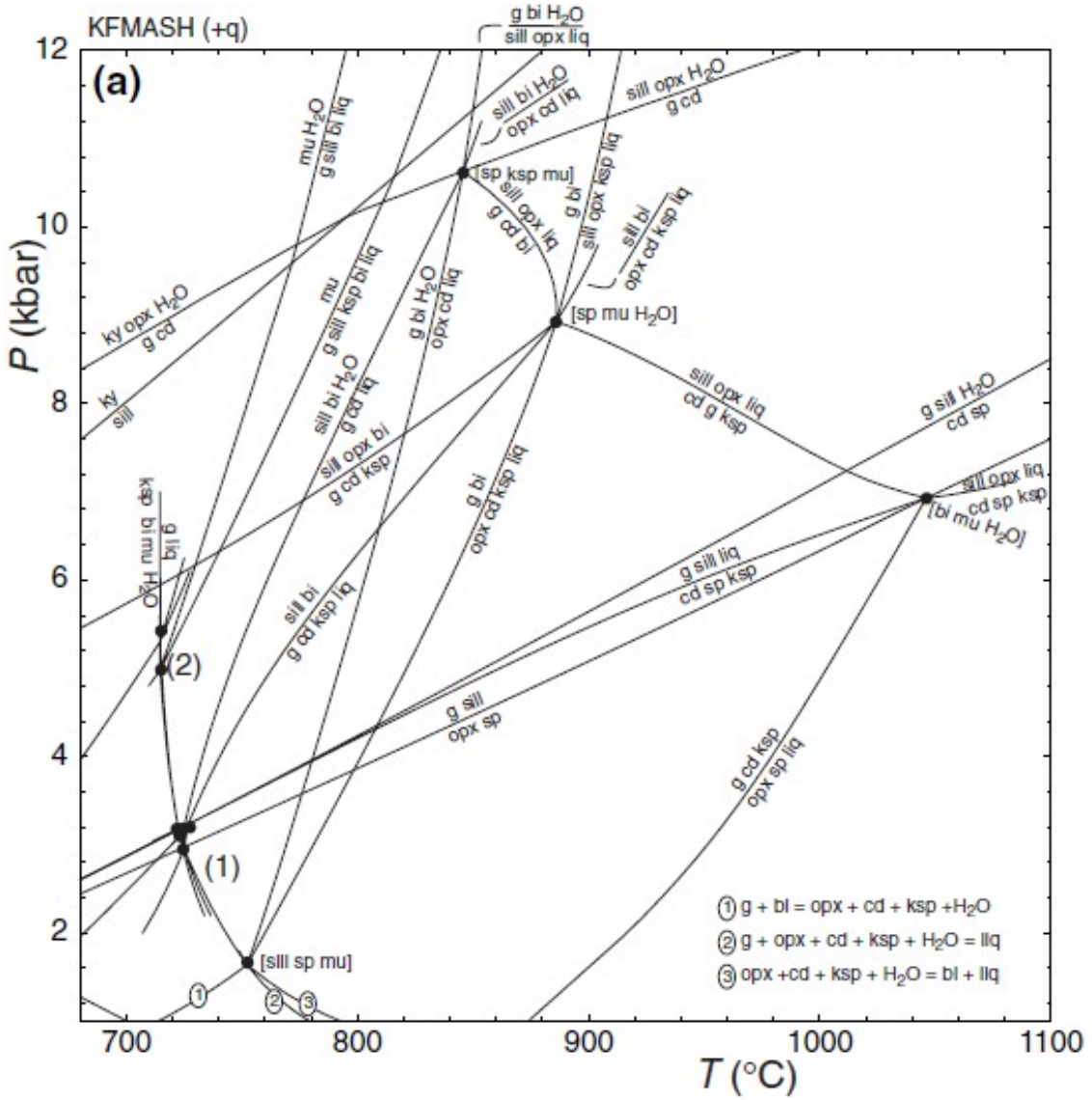


Diagramme de phases



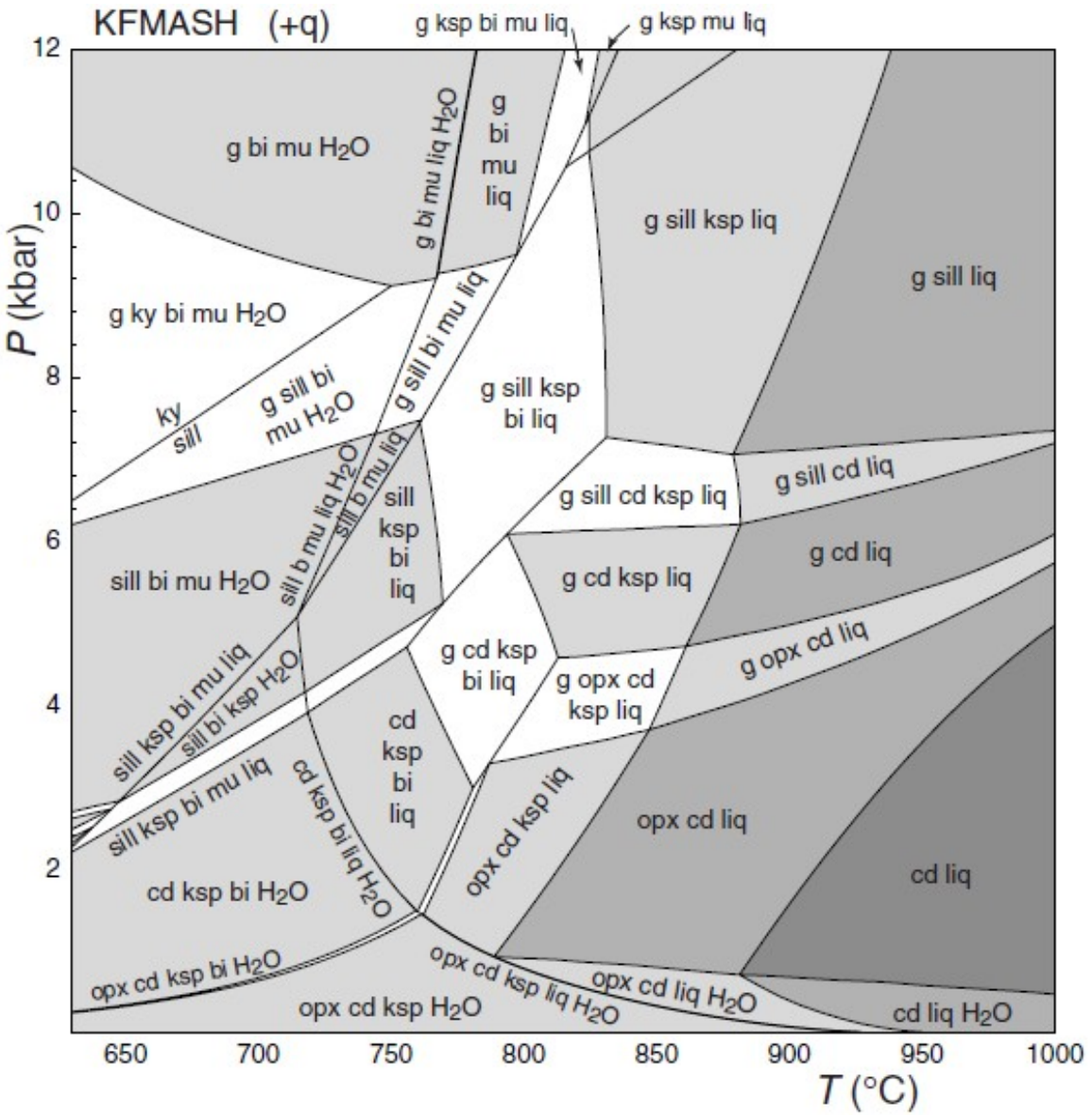
Grille pétrogénétique

Projection des équilibres univariants dans un espace P-T

Applicable quelque-soit la composition de la roche

Limité à des systèmes chimiques simples

Diagramme de phases



Pseudosection

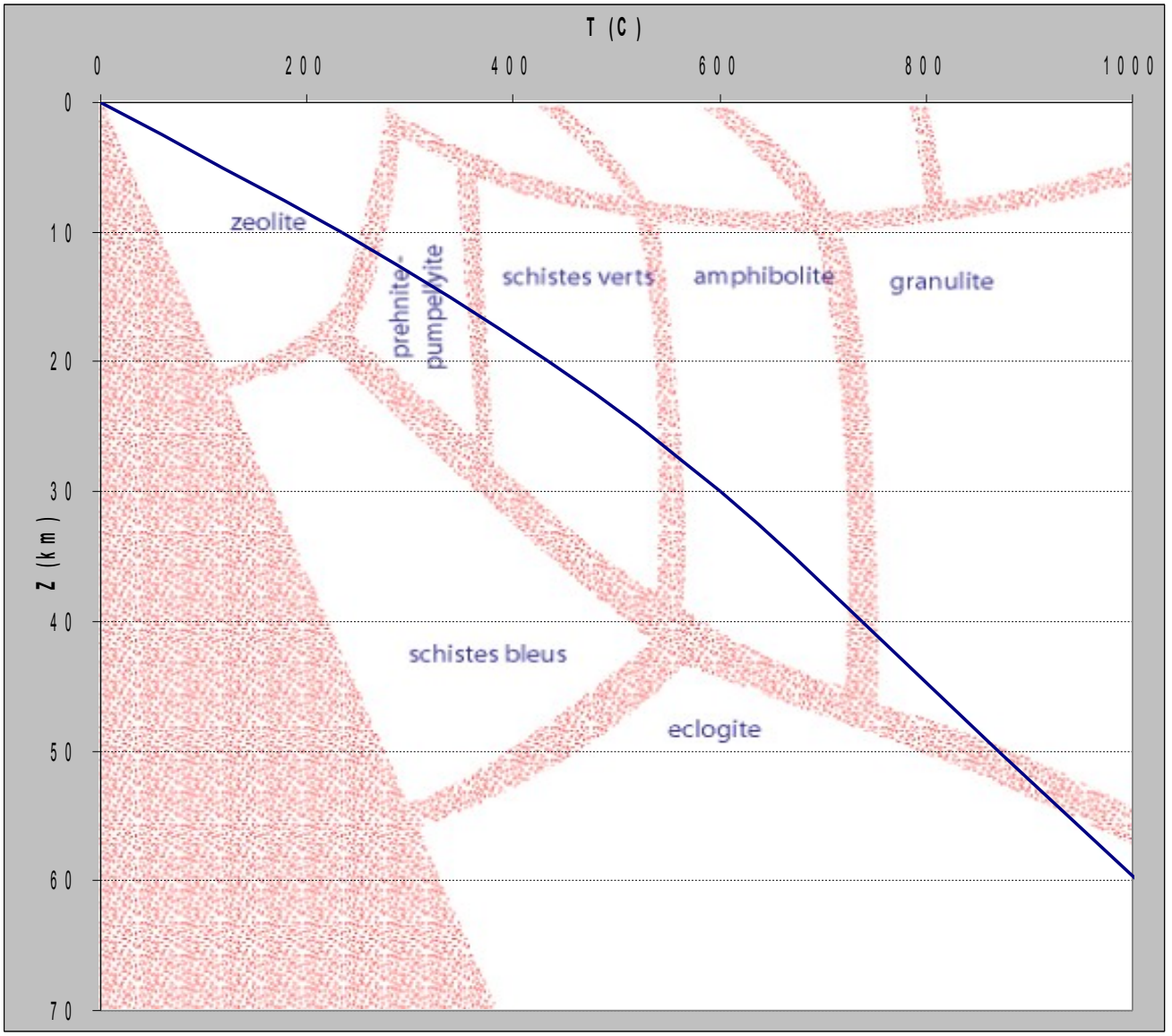
Diagramme de phases montrant la stabilité des assemblages pour une composition de roche donnée

Équilibres multivariants

Al2O3 = 30.66, FeO=23.74, MgO=12.47, CaO=0.97, Na2O=1.94, K2O=9.83

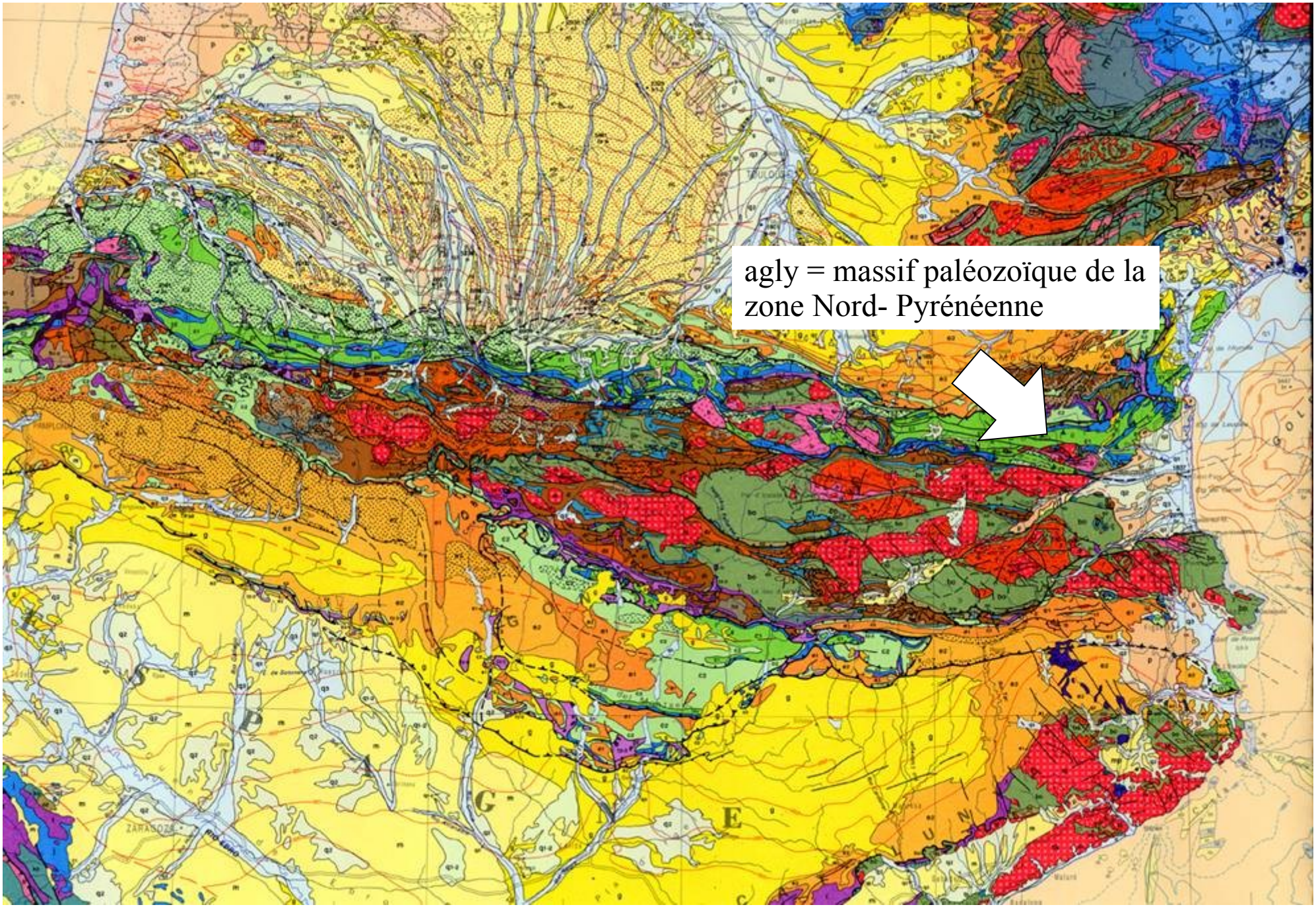
(qtz en excés)

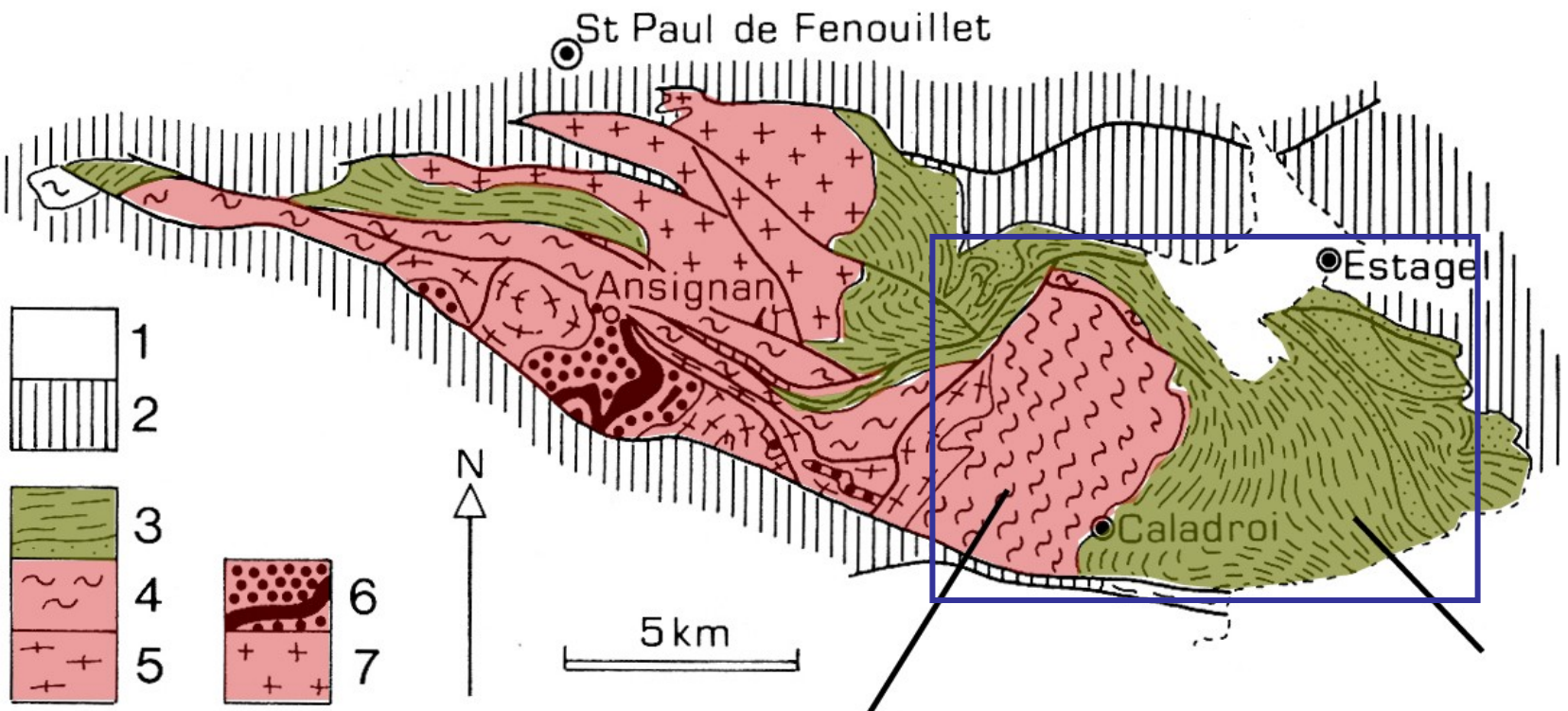
4. Un exemple de conditions anormales (perturbées) dans la croûte continentale



Gradient géothermique stationnaire moyen

le massif de l'agly: un exemple de gradient métamorphique de BP



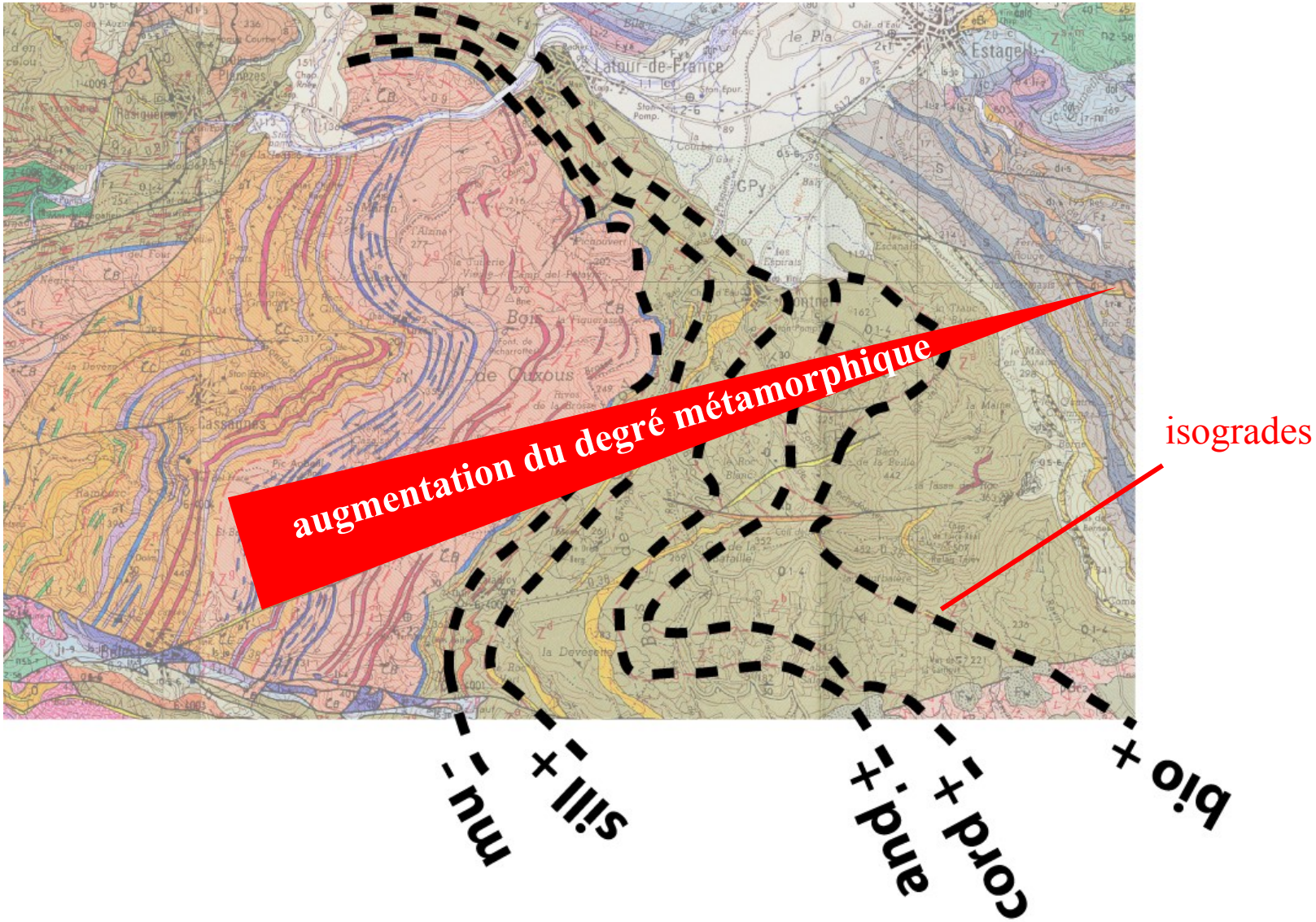


socle gneissique
+ granite intrusifs ~300 Ma

couverture allochtone
paleozoique
quartzo-pelitique
age metamorphisme : ~300Ma

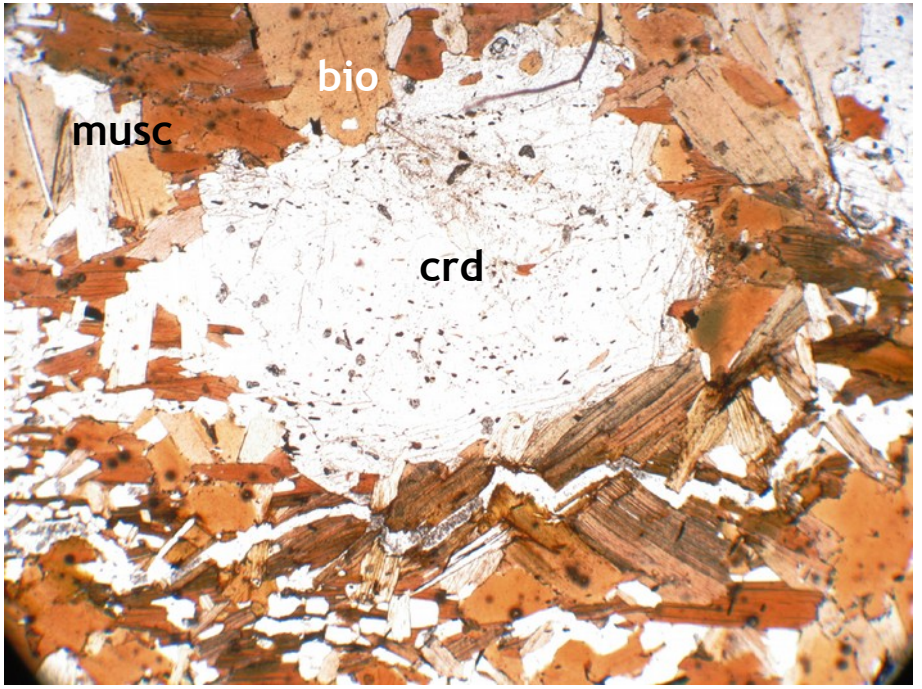
Kornprobst (1994)

exemple du massif de l'agly

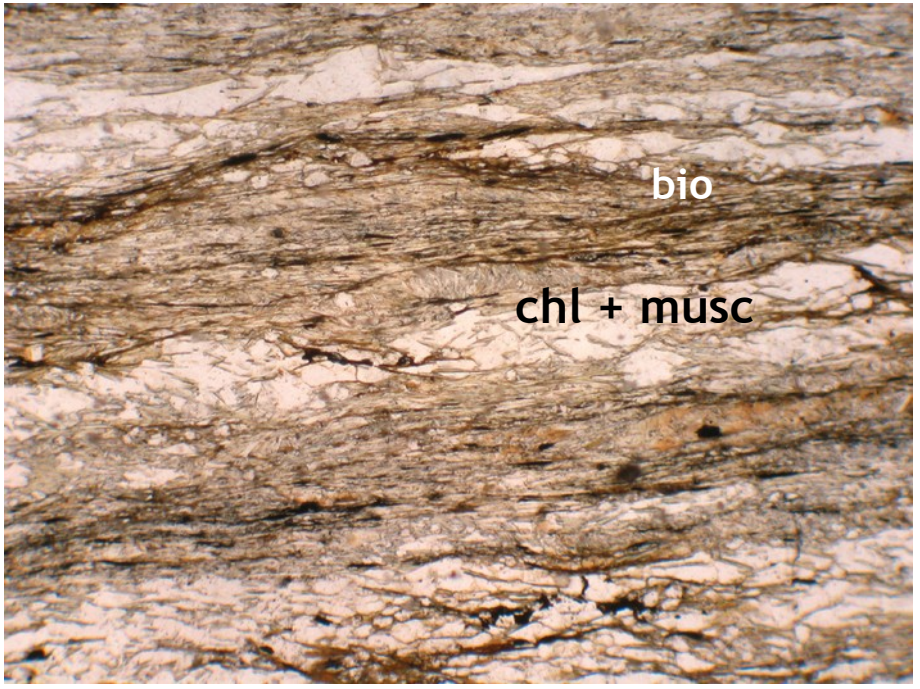


paragenèse: chl + musc + q ± Fk

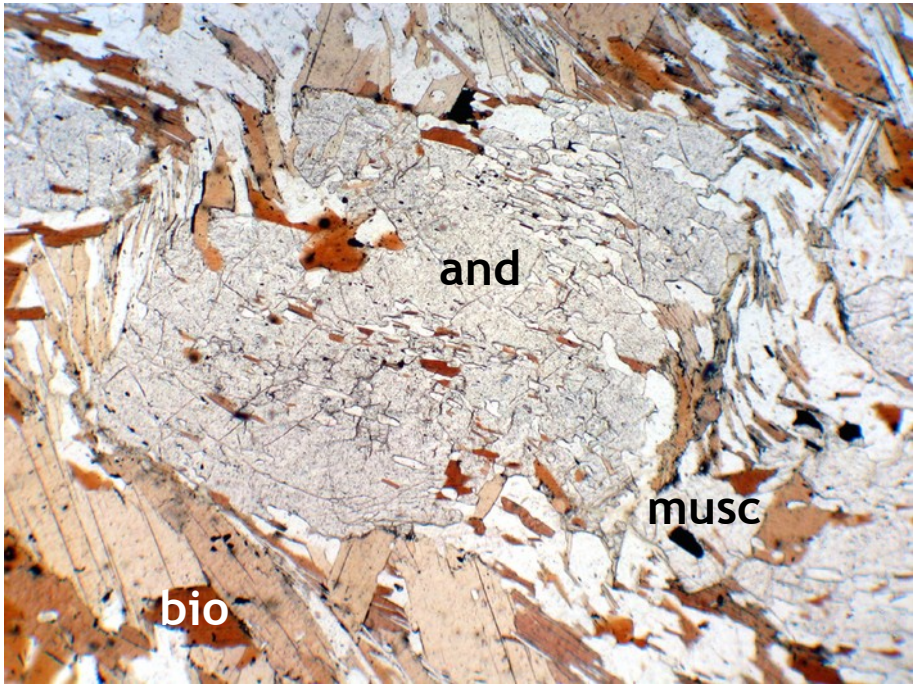
paragenèse: crd + musc + bio + q



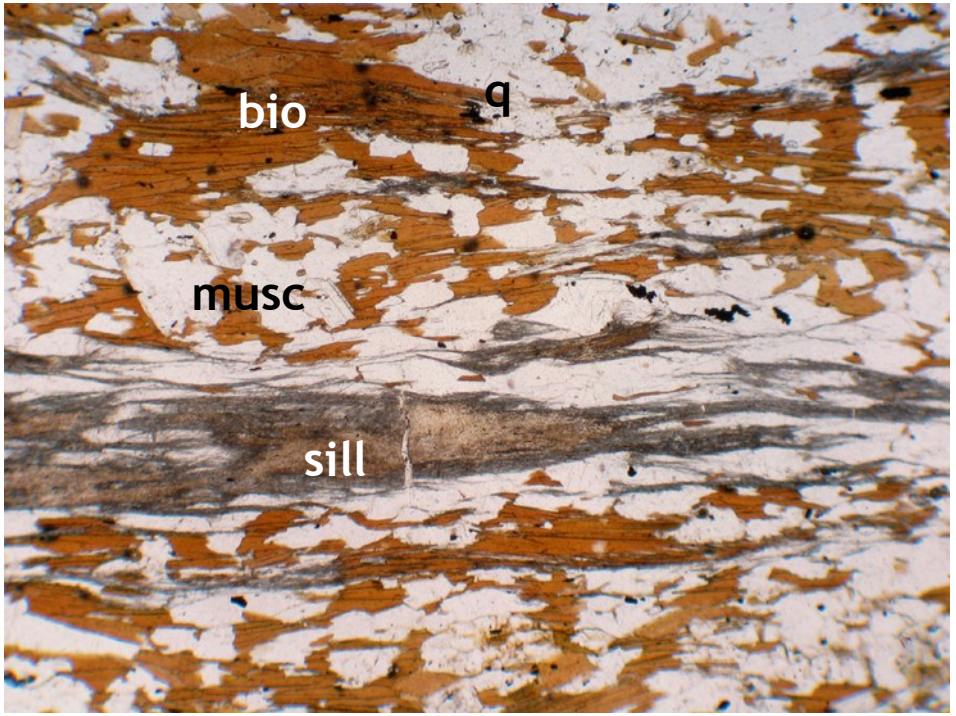
paragenèse: chl + musc + bio + q



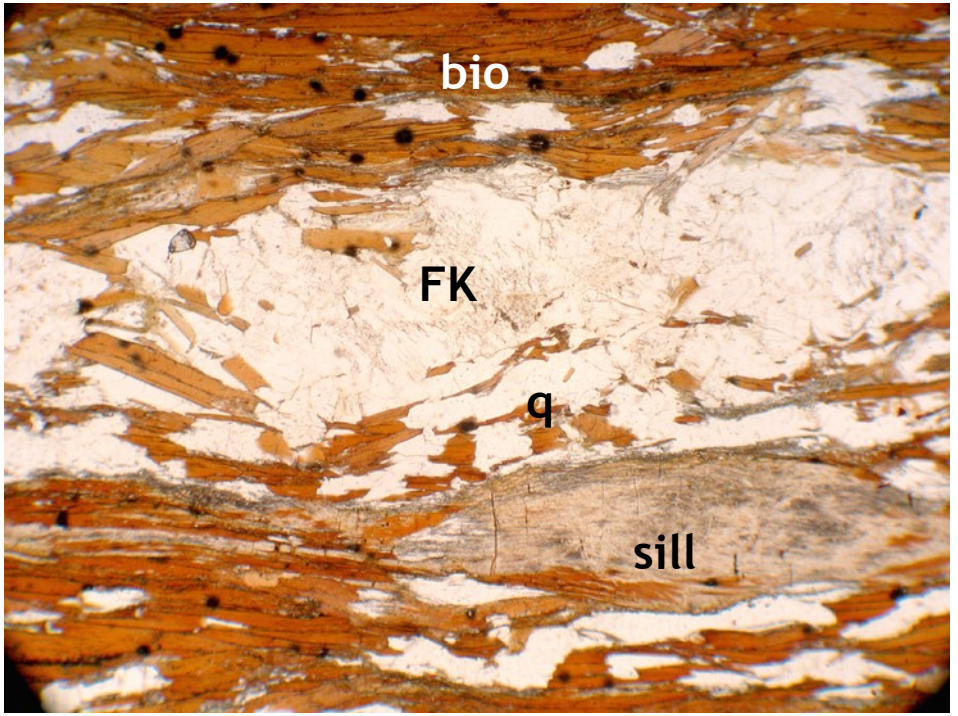
paragenèse: and + musc + bio + q +/- crd

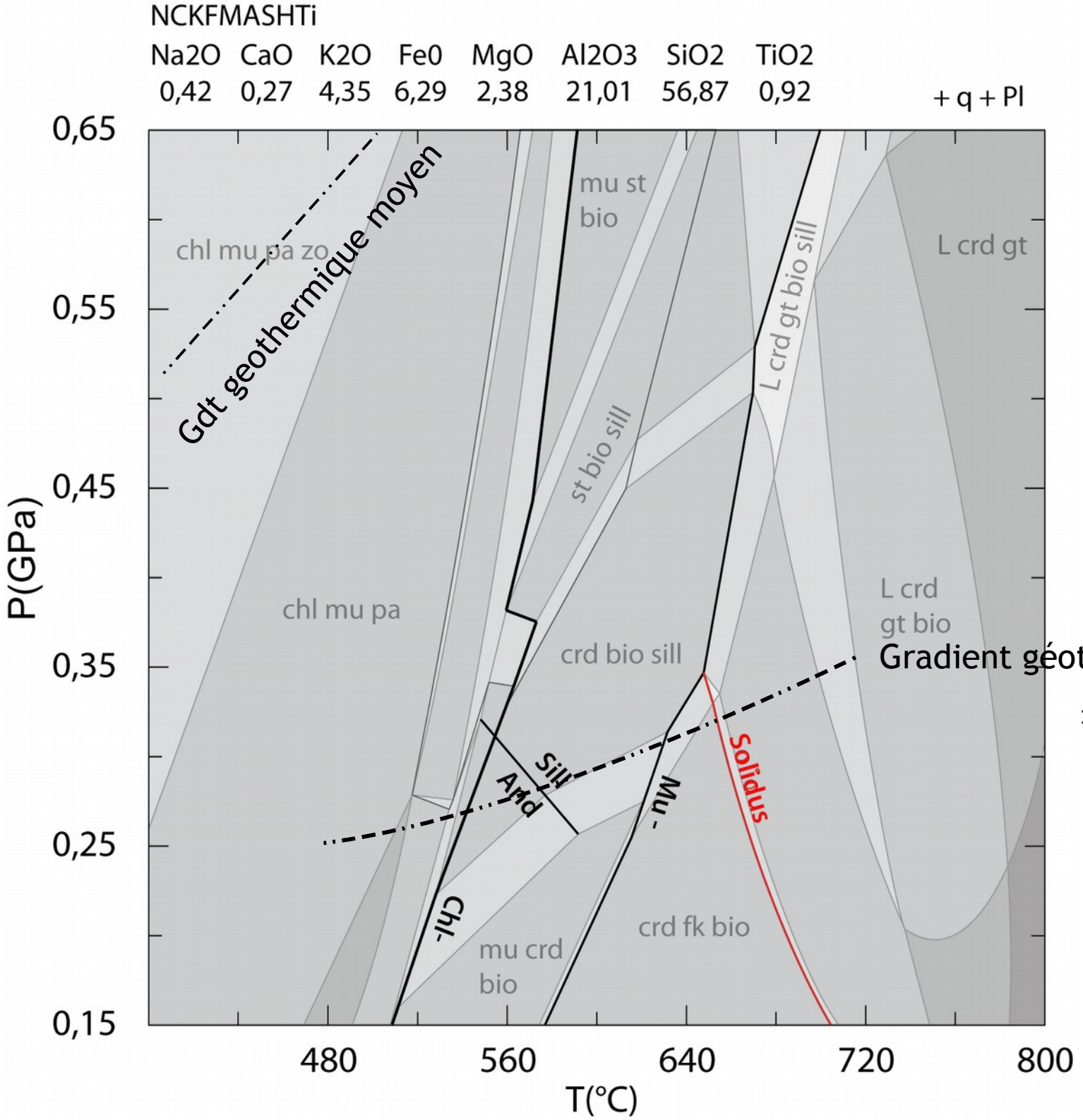


paragenèse: sill + musc + bio + q +/- crd



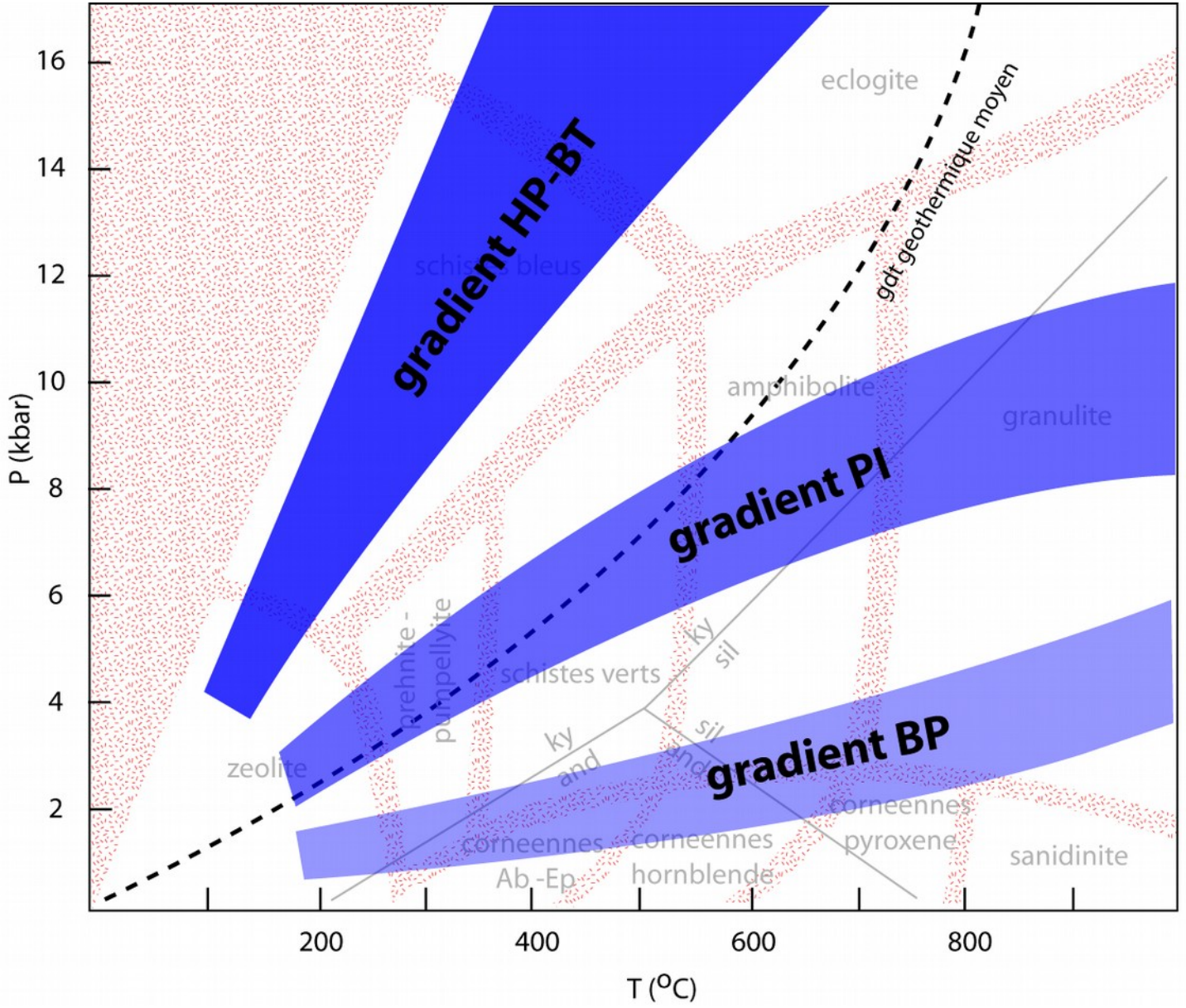
paragenèse: FK + sill + bio + q
(musc – et liq +)




NCKFMASHTi
Na2O CaO K2O Fe0 MgO Al2O3 SiO2 TiO2
0,42 0,27 4,35 6,29 2,38 21,01 56,87 0,92
+ q + Pl
Gdt geothermique moyen
chl mu pa zo
mu st bio
L crd gt bio sill
L crd gt
st bio sill
chl mu pa
crd bio sill
L crd gt bio
Gradient géothermique de BP
> 60°C/km !
Sill
And
Chl-
Mu-
Solidus
mu crd bio
crd fk bio
P(GPa)
0,65
0,55
0,45
0,35
0,25
0,15
480
560
640
720
800
T(°C)

Autres exemples dans le Massif Central Français

• Occurrence locale d'éclogite (HP-HT)



• dôme du Lévezou (Rouergue)

• Monts du Lyonnais - Pilat/Velay

• Pilat/Velay

• Agly

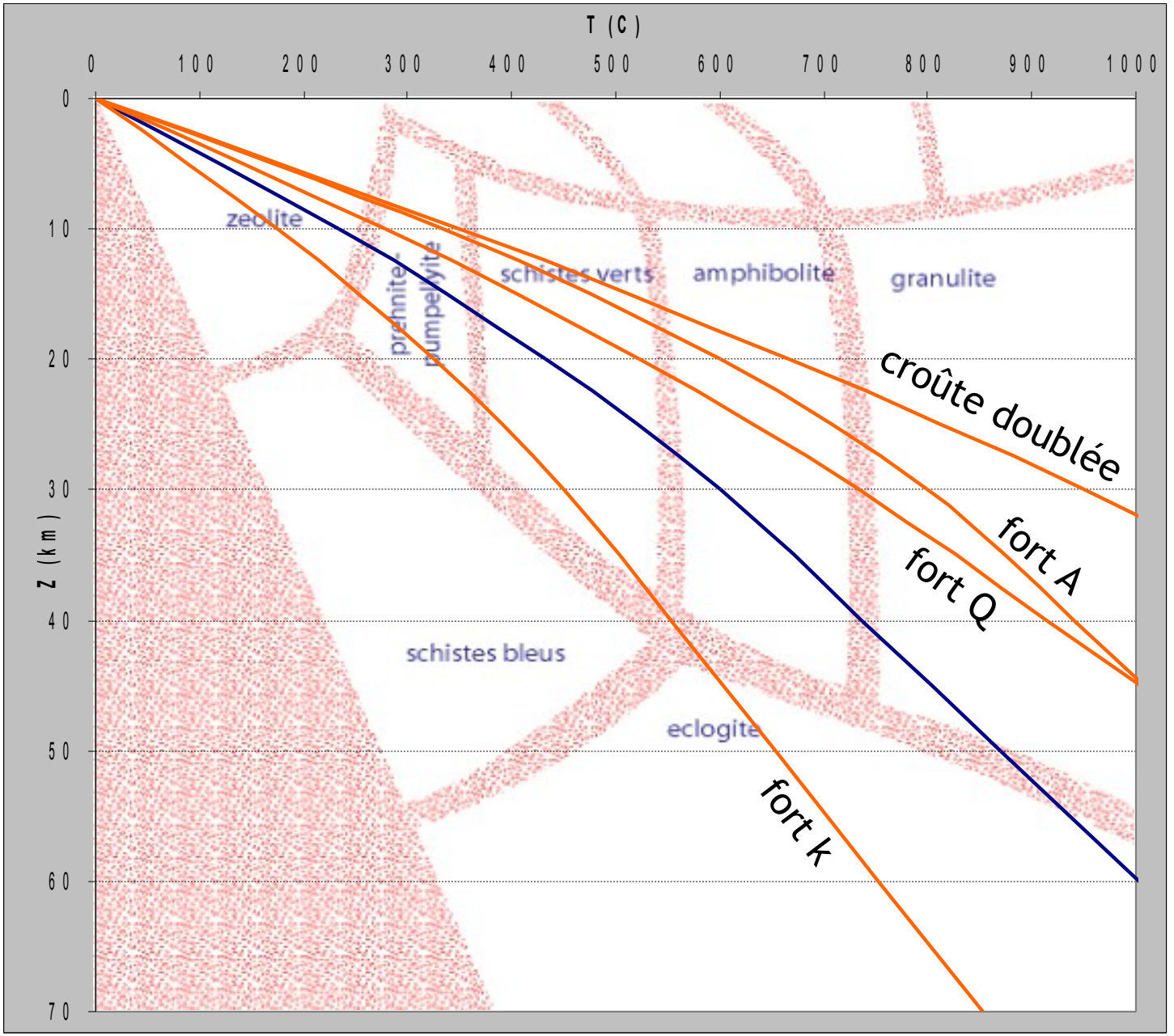
géotherme moyen

K = 2.25 W.m-1.K-1

A = mW.m-3

Q* = 30 mW.m-2

D = 35km



exemple de métastabilité : graphite et diamand

Anderson, 2005

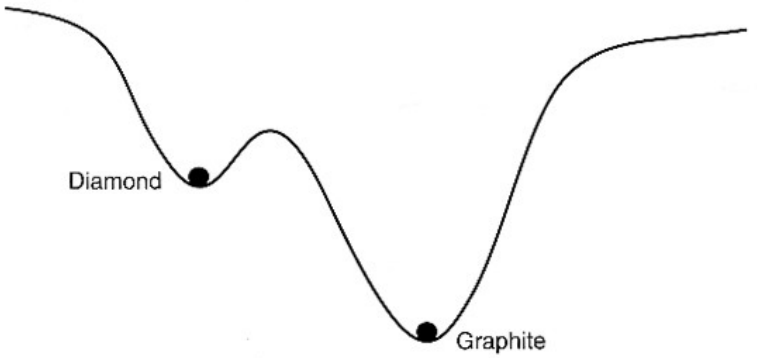


Figure 2.5 The mechanical analogy for carbon at Earth surface conditions. Graphite is the stable form of carbon because it has the lowest energy content of any form of carbon (under Earth surface conditions). Diamond has a higher energy content but is prevented from changing to graphite by an energy barrier.

- exemple des polymorphes de la silice

Spear (1993)

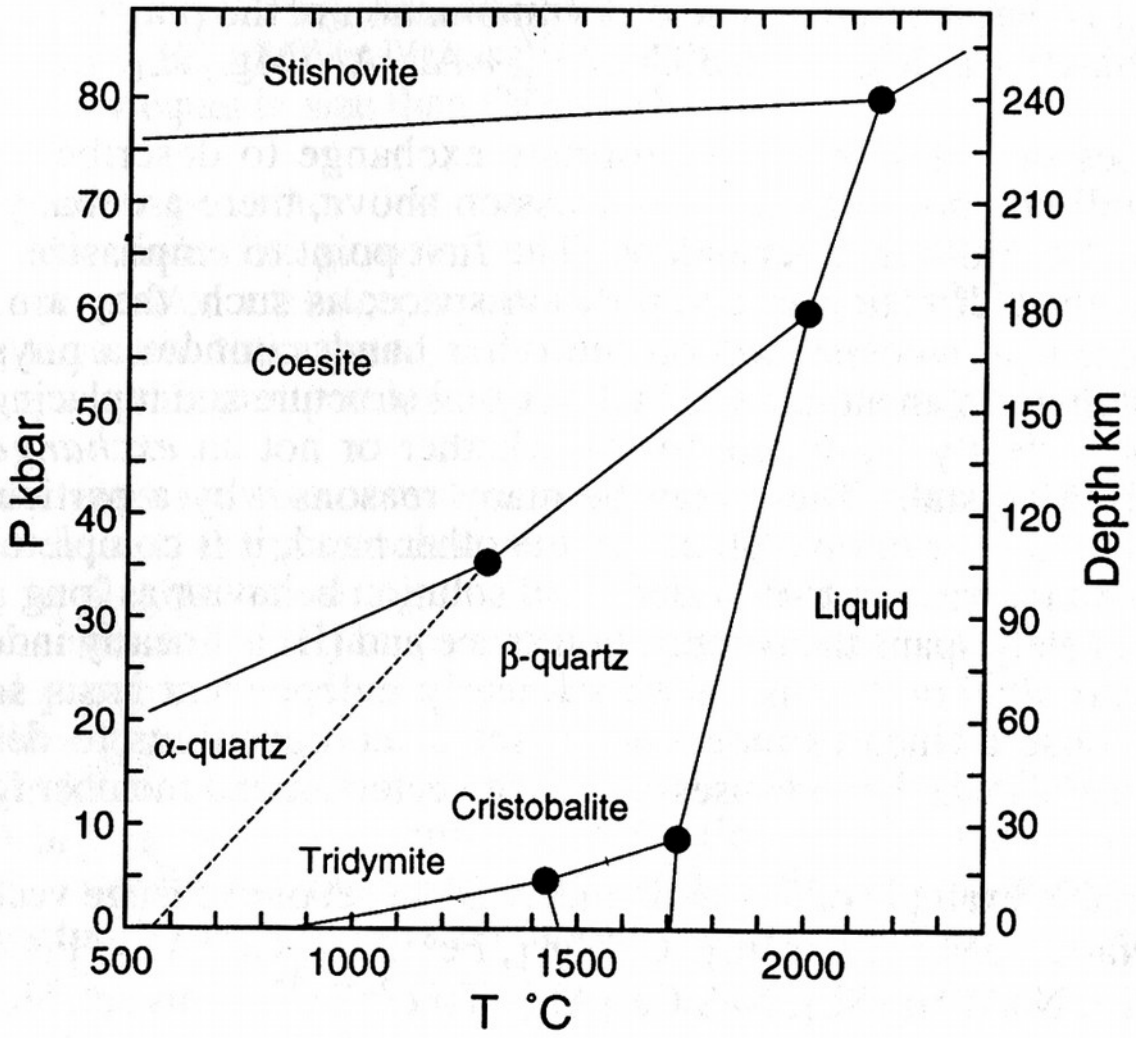
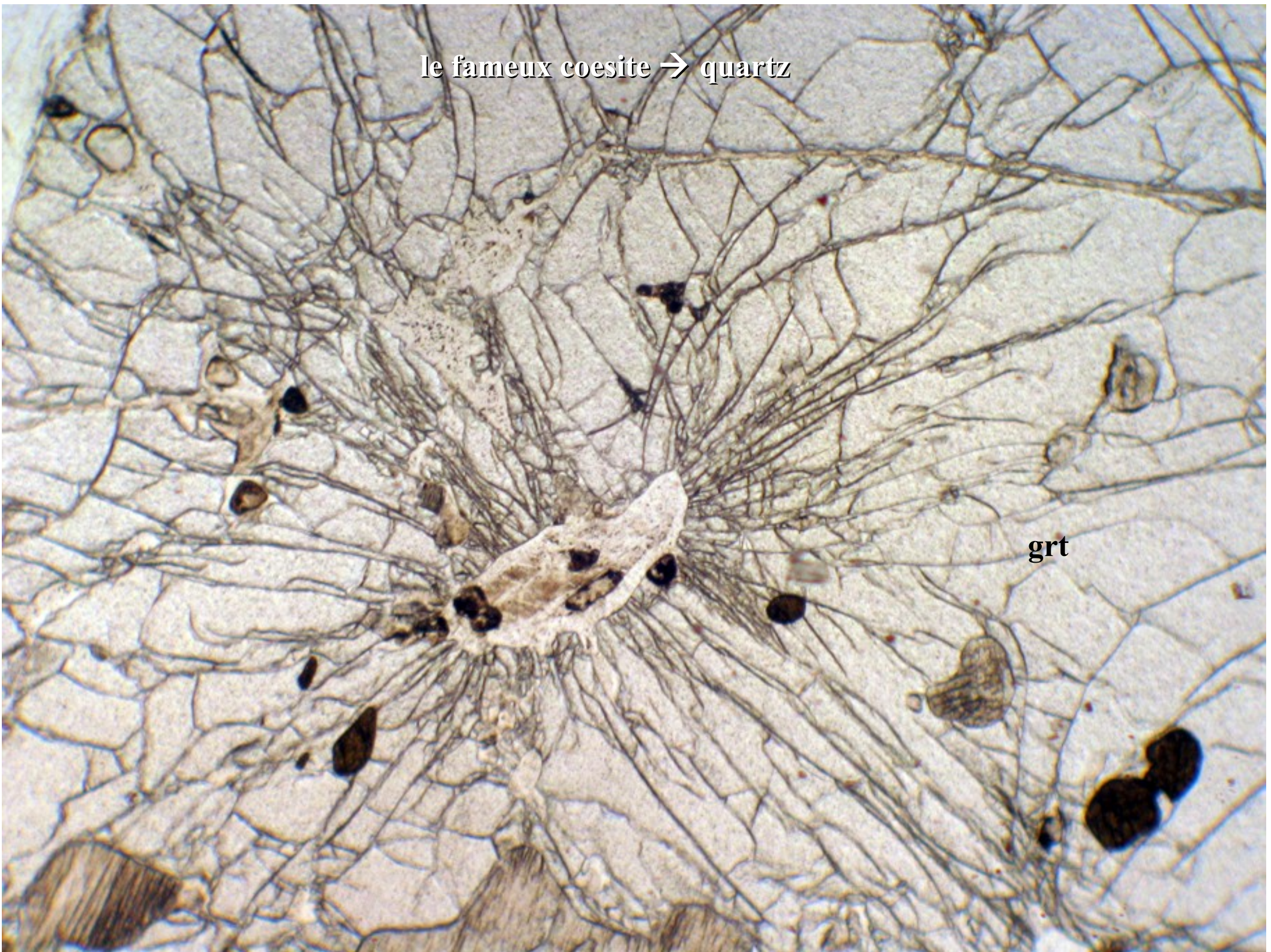


Figure 4-2. Phase diagram for the SiO_2 system showing the P-T stability fields for the silica polymorphs. From Zoltai and Stout (1984).


le fameux coesite → quartz
grt

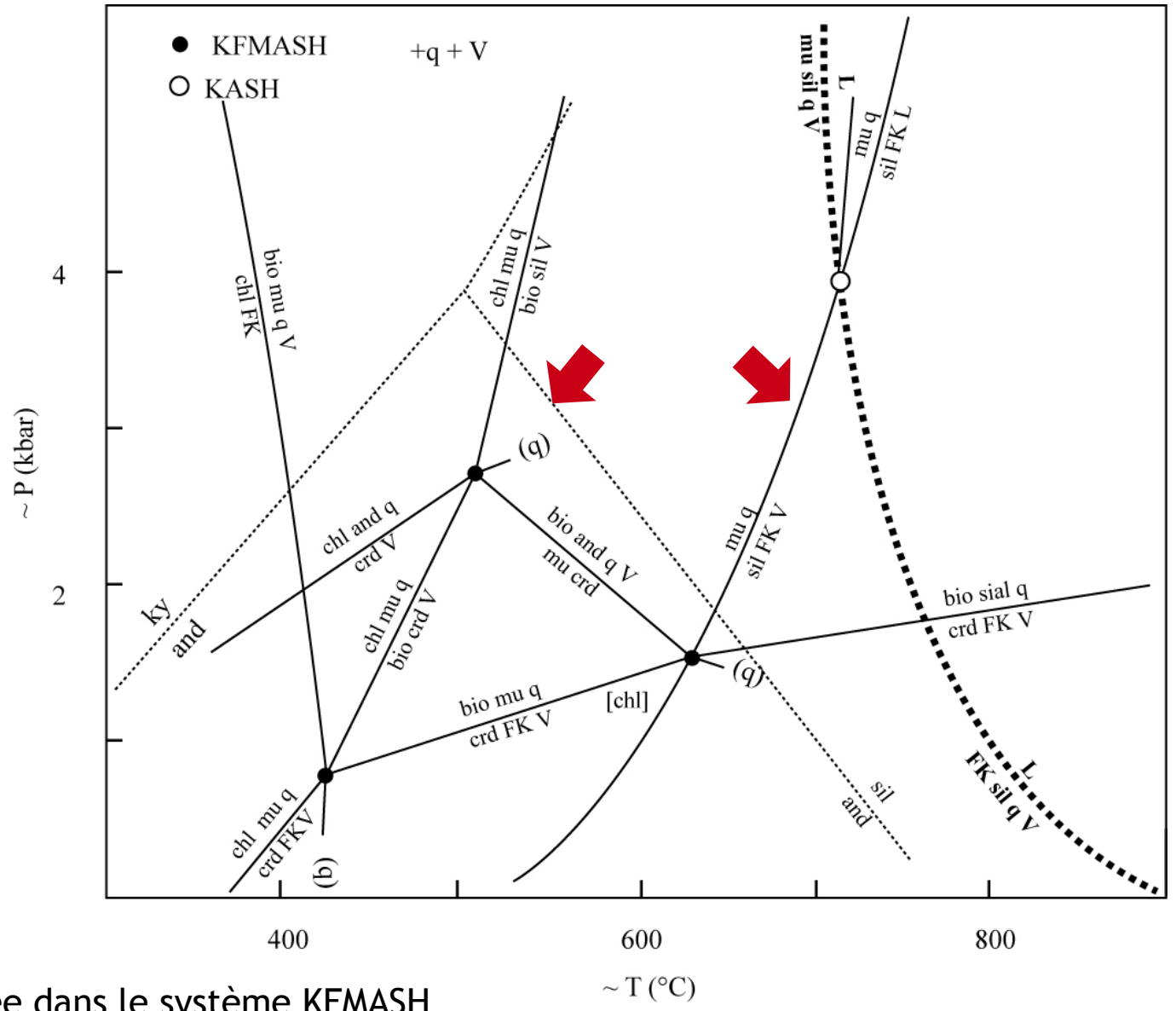
Pourquoi les minéraux index (isogrades) ne sont pas de bons marqueurs des conditions PT ?

1. apparition d'une phase dépend de P, T et X (composition chimique du protolith)

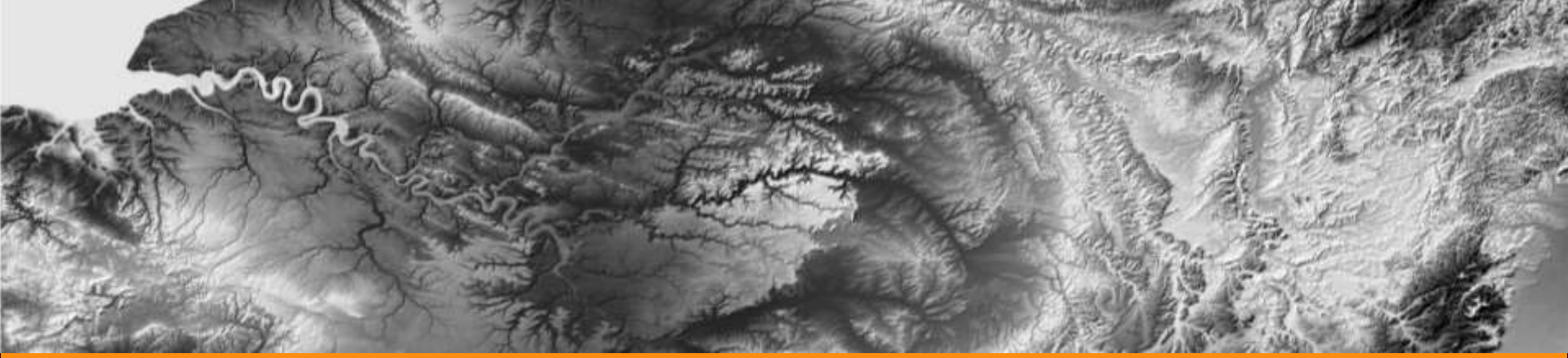
2. apparition (ou disparition) d'une phase est liée à des réactions métamorphiques qui peuvent avoir lieu à différentes conditions P-T : exemple de la sill

Les minéraux index ne sont pas forcément de bons marqueurs des conditions PT ?

1. apparition d'une phase dépend de P, T et X (composition chimique du protolith)
2. une phase peut être produite par une multitude de réactions métamorphiques à ≠ P-T (e.g. sil)



grille pétrogénétique simplifiée dans le système KFMASH



Les bassins sédimentaires, archives des déformations lithosphériques

UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Cécile ROBIN

GEOSCIENCES Rennes

UN PEU D'HISTORIQUE

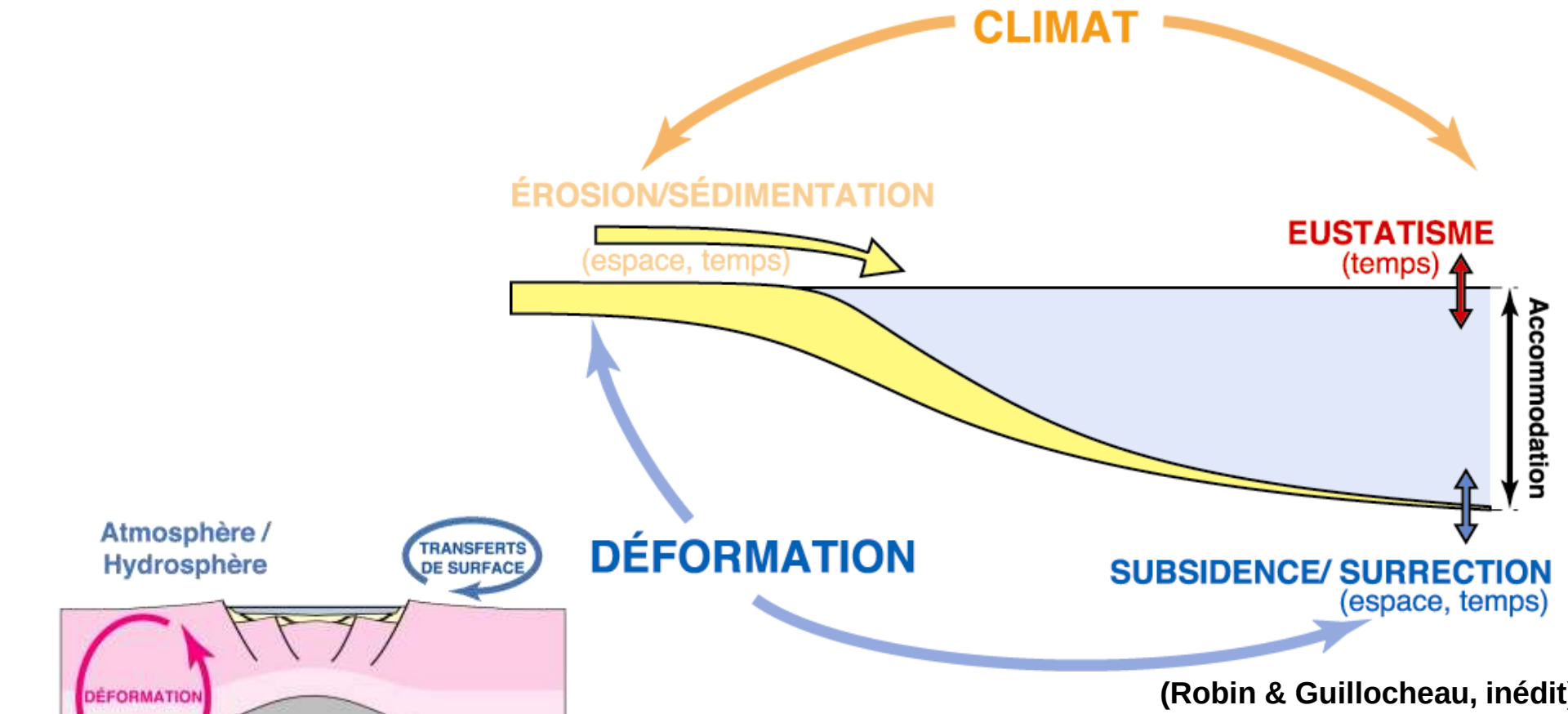
- **1858 : SORBY (formation d'une ride)**
- **1905 : Barrell (formation des deltas transféré dans l'ancien, en l'occurrence au Dévonien)**
- **1954 : Kuenen & Migliori, interprétation des granoclassements en termes de processus**
- **1962 : le premier modèle sédimentaire prédictif, la séquence de Bouma**
- **Fin des années 50's : la création de l'International Association of Sedimentologists**

LA SUITE DE L'HISTOIRE

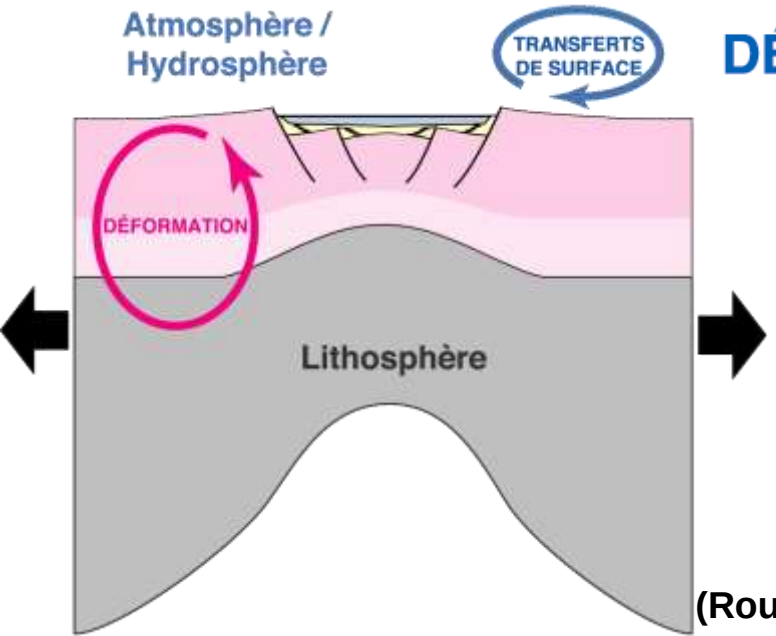
- **Le contexte économique**
- **1977 La stratigraphie sismique (modèle de Vail)**
- **1988 La stratigraphie séquentielle (Posamentier et al, Homewood et al etc...)**

- **Mais en fait Haug en 1900 (relations géosynclinaux et variations du niveau de la mer)**
- **Et surtout Walter dès 1880 …**

AVÈNEMENT DE LA STRATIGRAPHIE SEQUENTIELLE

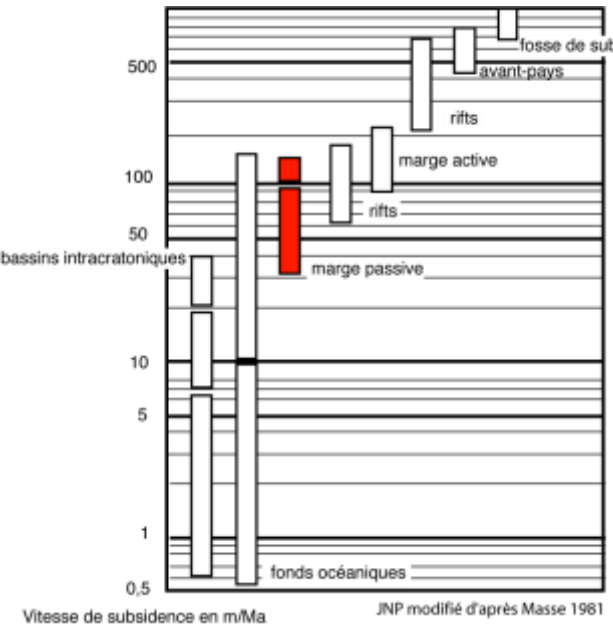


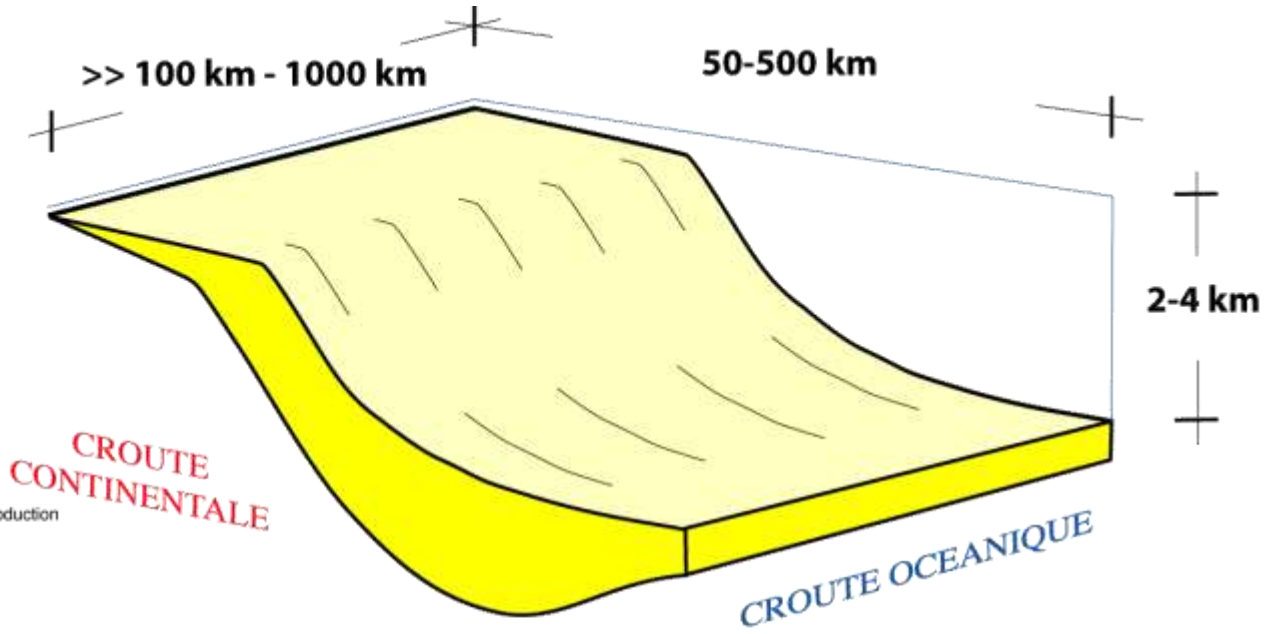
(Robin & Guillocheau, inédit)



(Rouby, 2002)

LE FACTEUR TECTONIQUE





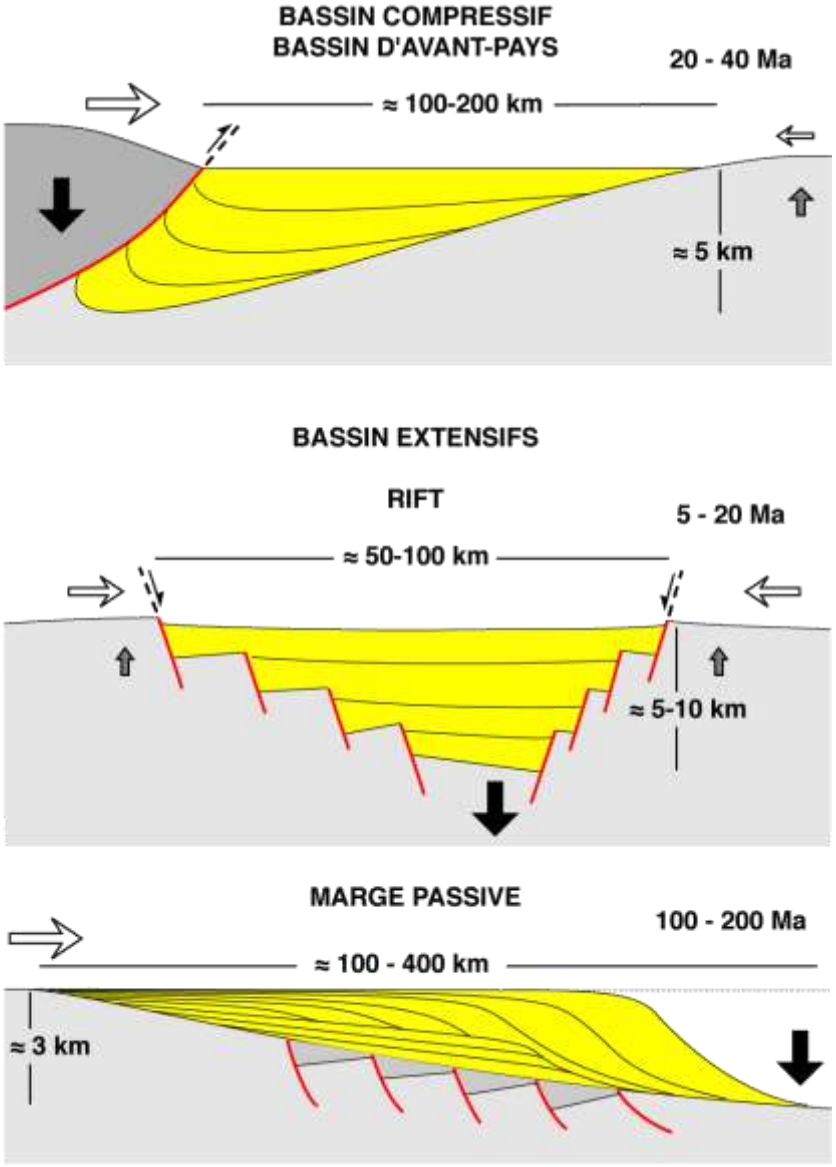
VITESSE DE SUBSIDENCE : **30-100 m/Ma** (maximum 150 m/Ma)

DUREE : **100-200 Ma**

ACCUMULATION MOYENNE : **3-5 km**

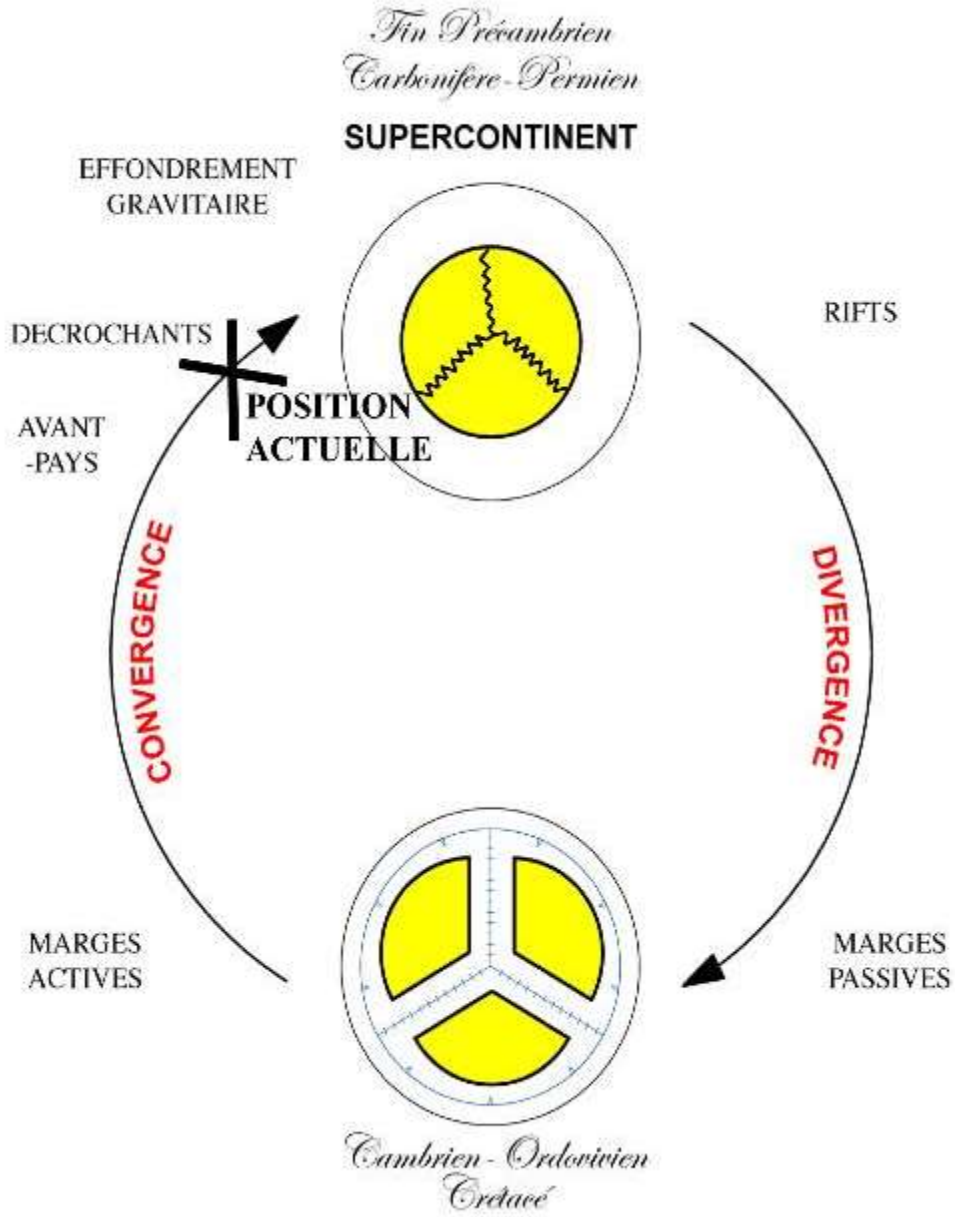
(F. Guillocheau, inédit)

LE FACTEUR TECTONIQUE



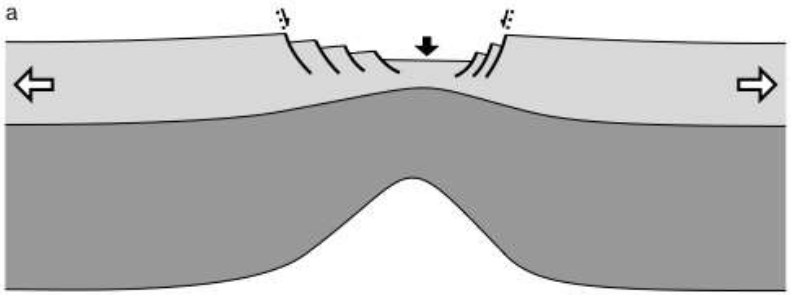
(Nalpas, inédit)

RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION

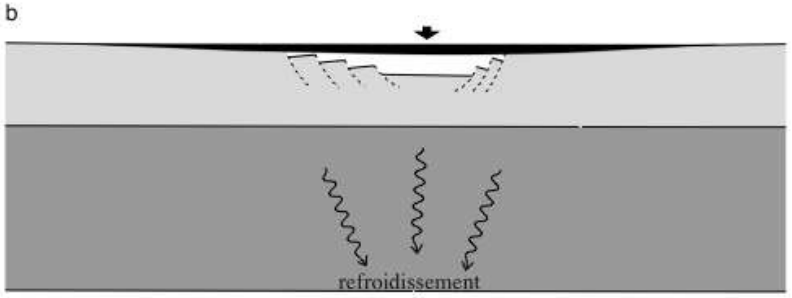


LE FACTEUR TECTONIQUE : LES SUBSIDENCES

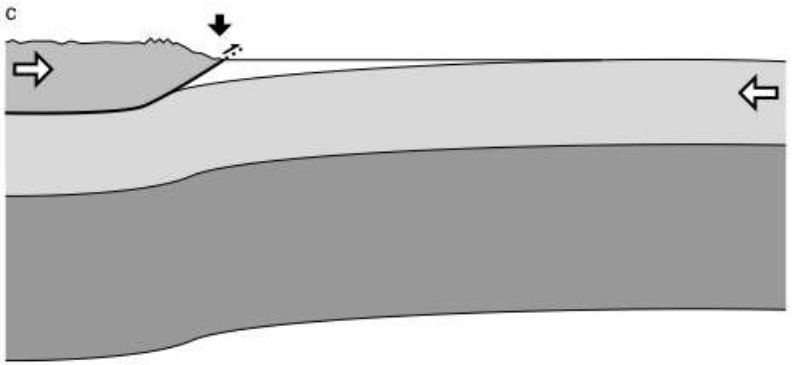
Subsidence tectonique



Subsidence thermique



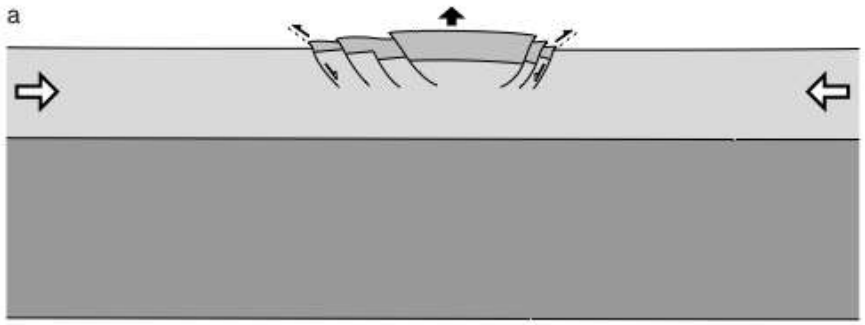
Subsidence gravitaire
Ou Isostasie



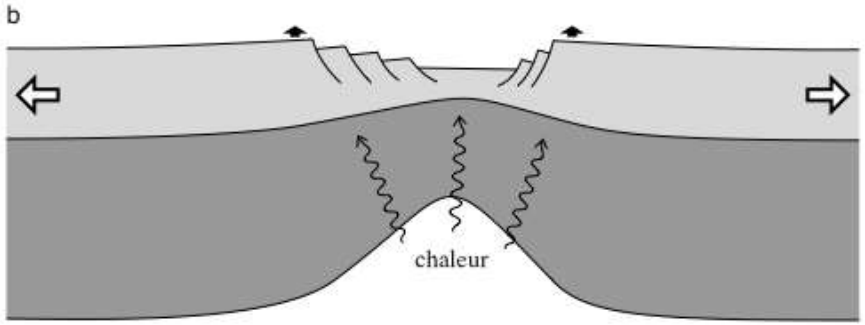
(Nalpas, inédit)

LE FACTEUR TECTONIQUE : LES SUBSIDENCES

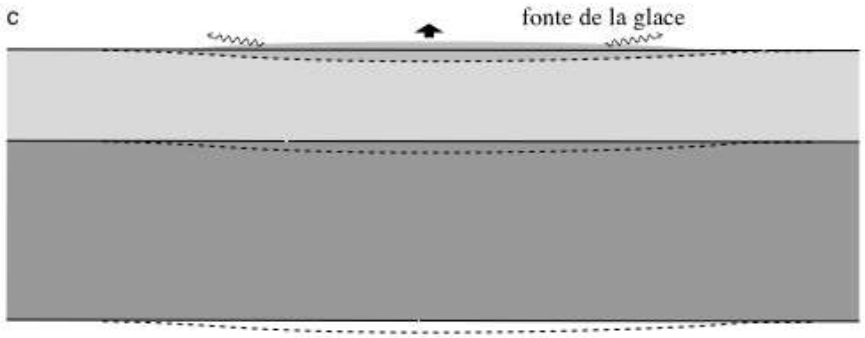
Subsidence tectonique



Subsidence thermique

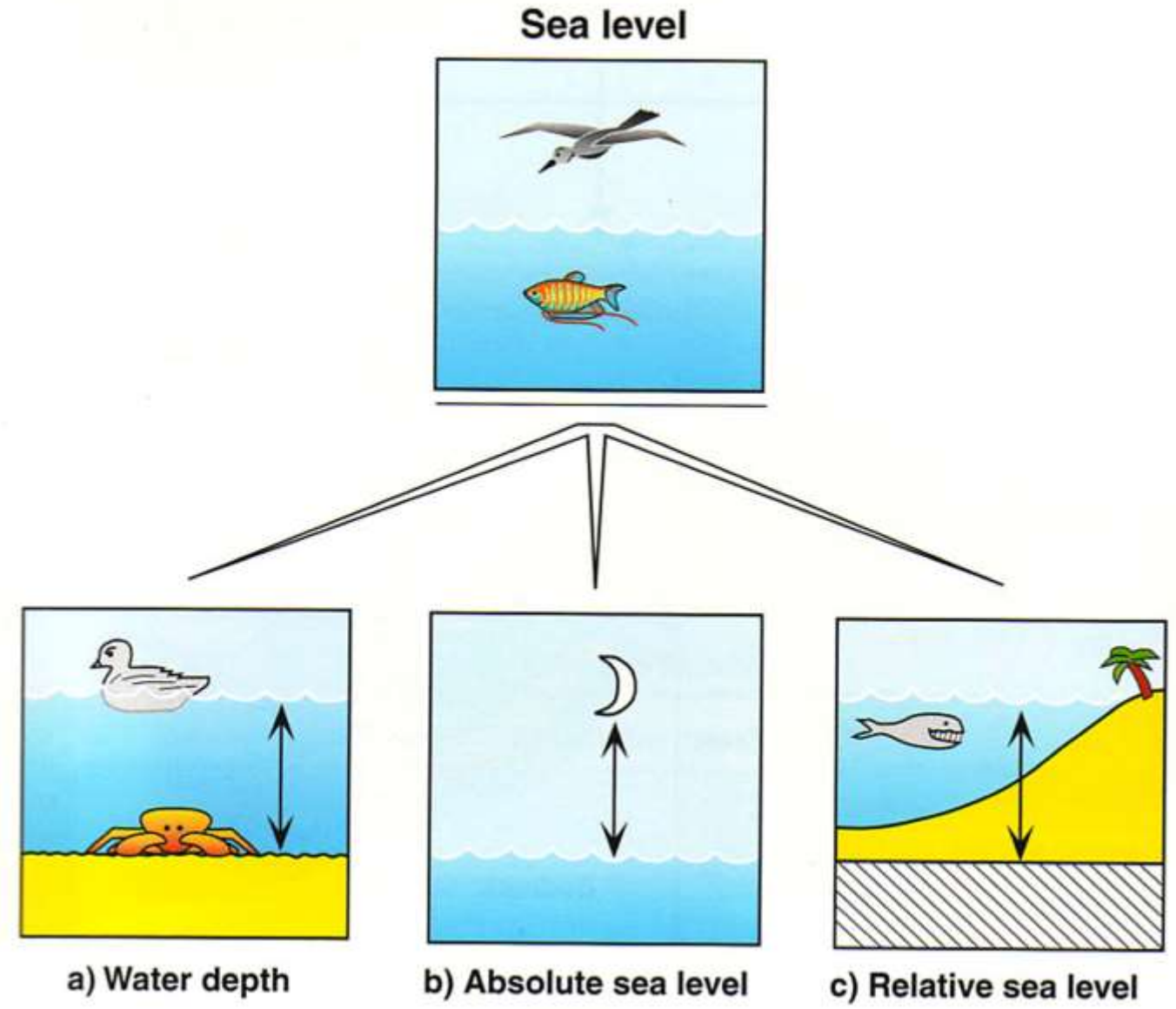


Subsidence gravitaire
Ou Isostasie



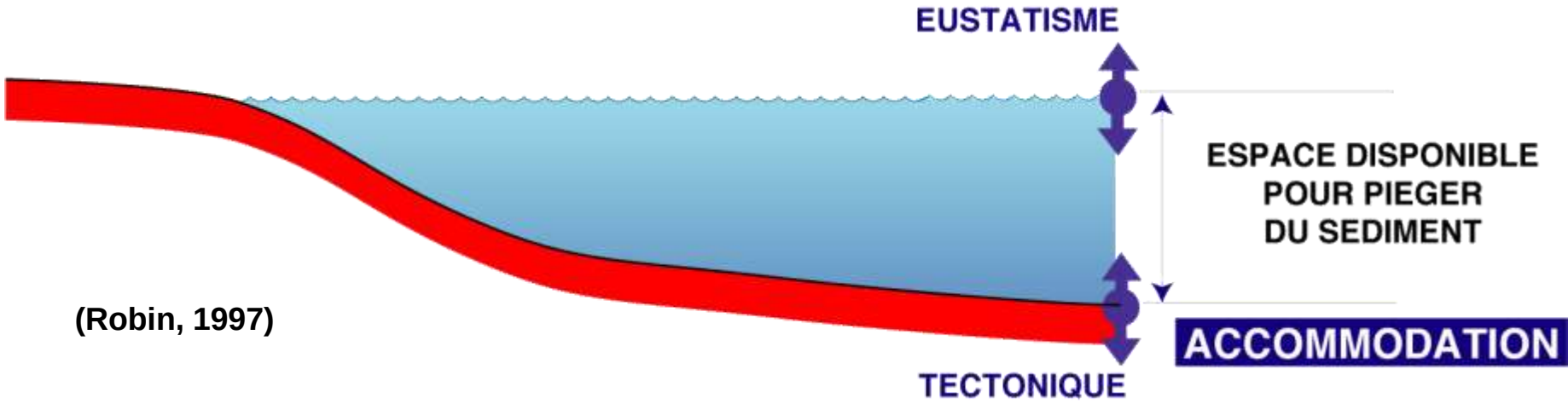
(Nalpas, inédit)

UN ou DES NIVEAUX MARINS ?

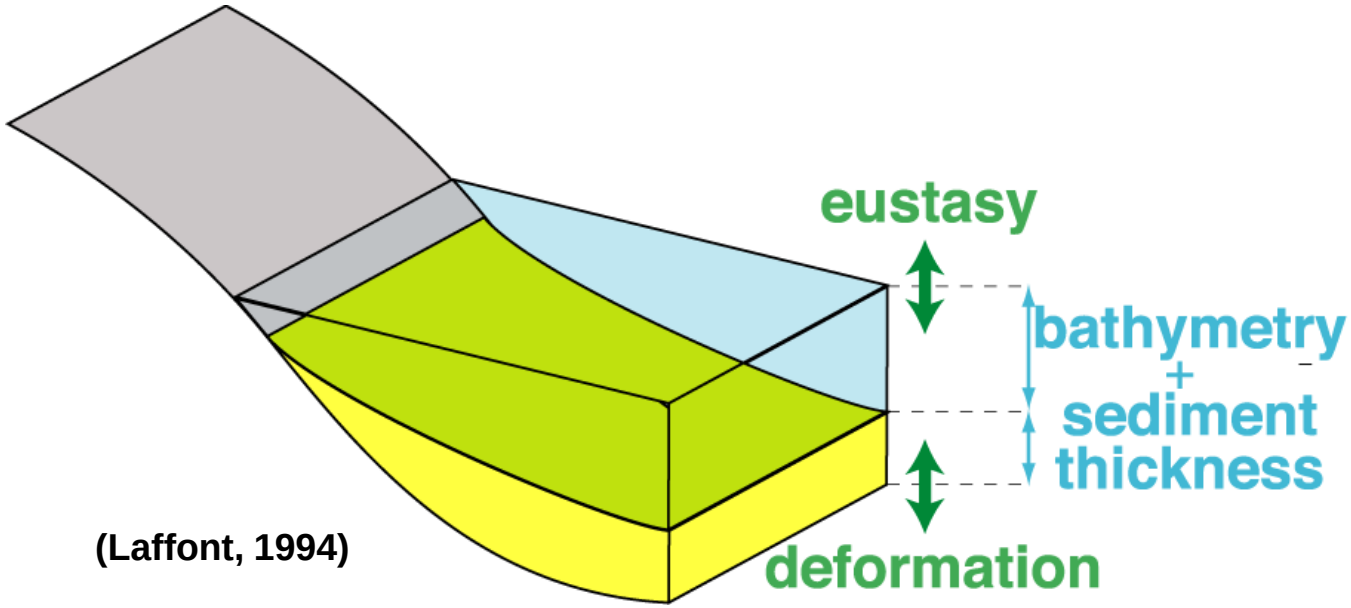


(Homewood et al., 1999)

LA NOTION D'ACCOMODATION



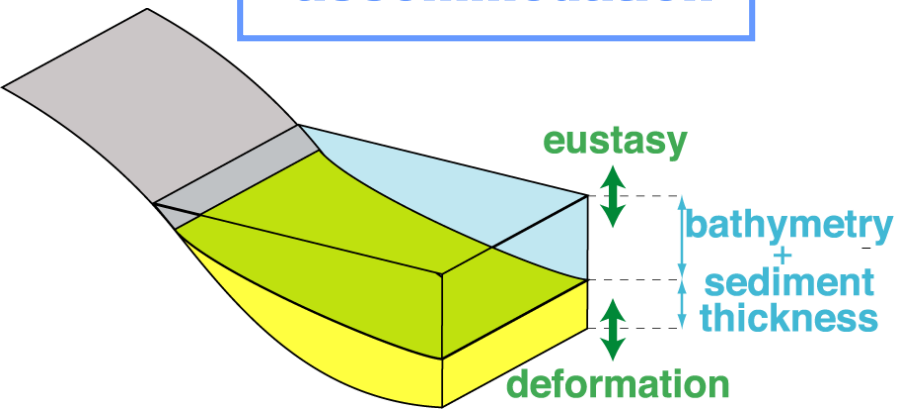
(Robin, 1997)



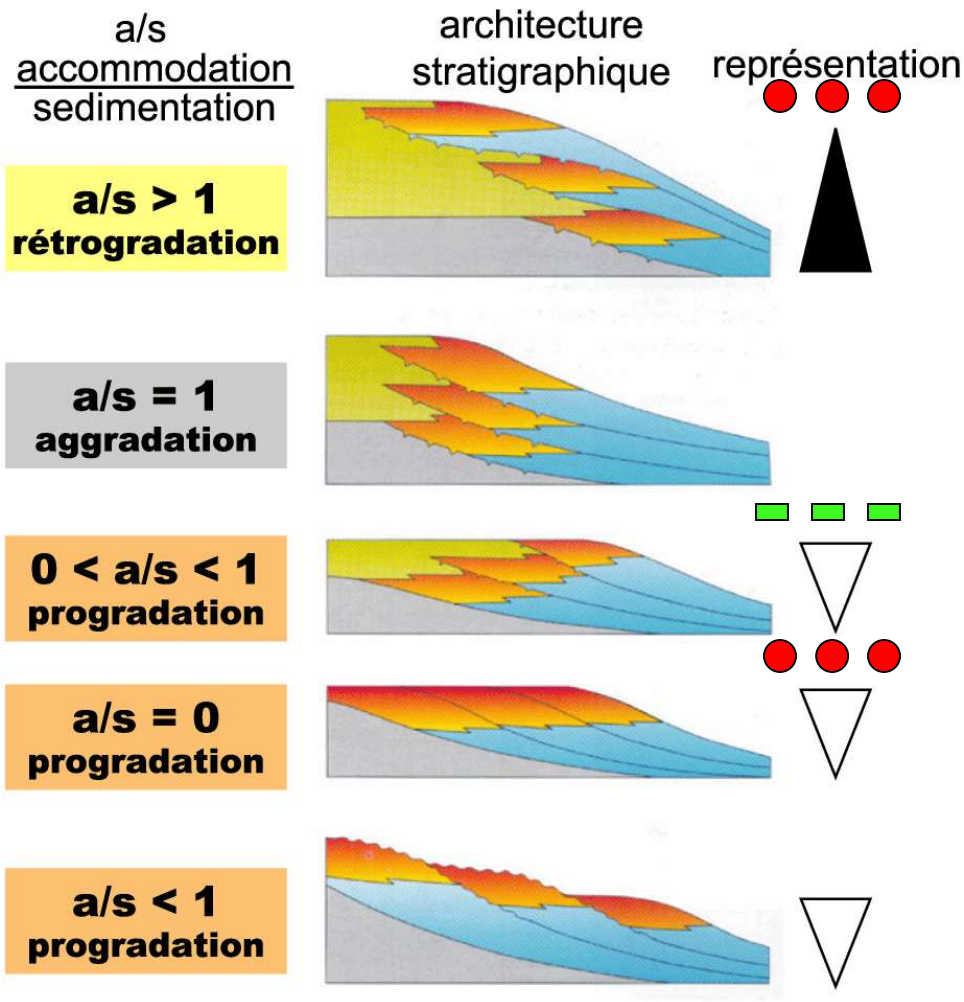
(Laffont, 1994)

LA NOTION D'ACCOMODATION

accommodation



éléments architecturaux

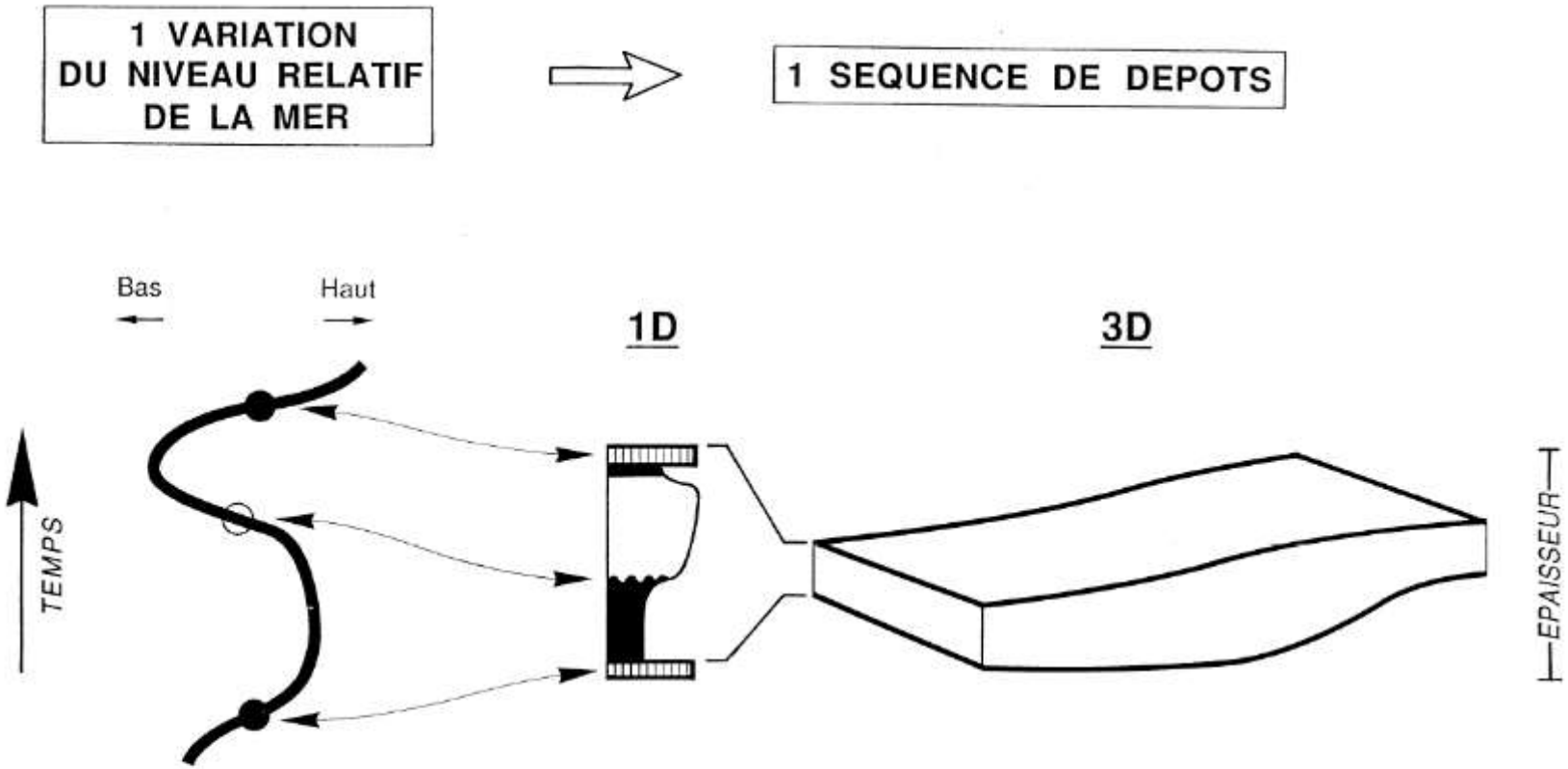


Maximum Flooding Surface
MFS

Flooding Surface
FS

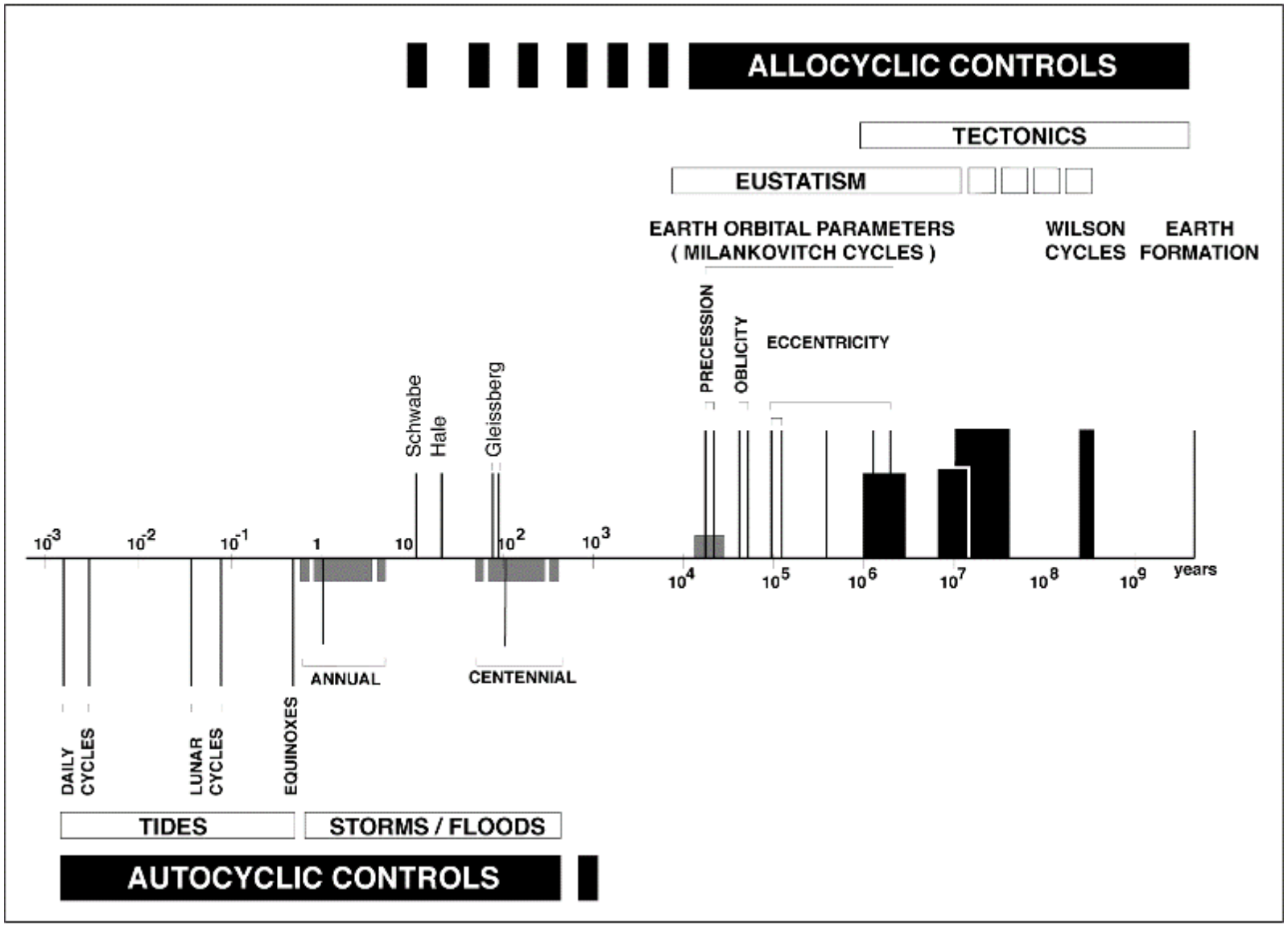
(Homewood et al., 1999)

LA SEQUENCE DE DEPÔT



VALABLE QUELQUE SOIT LA DUREE DE LA VARIATION DU NIVEAU RELATIF DE LA MER
(de quelques dizaines de milliers d'années à la dizaine de millions d'années)

COMMENT DISCRIMINER LES FACTEURS DE CONTRÔLE ?

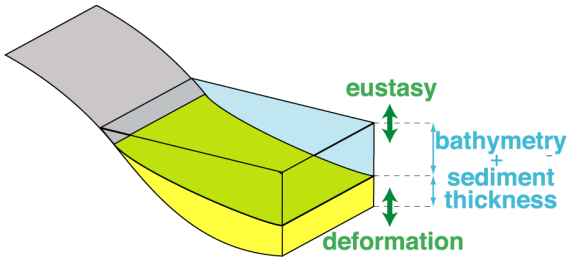


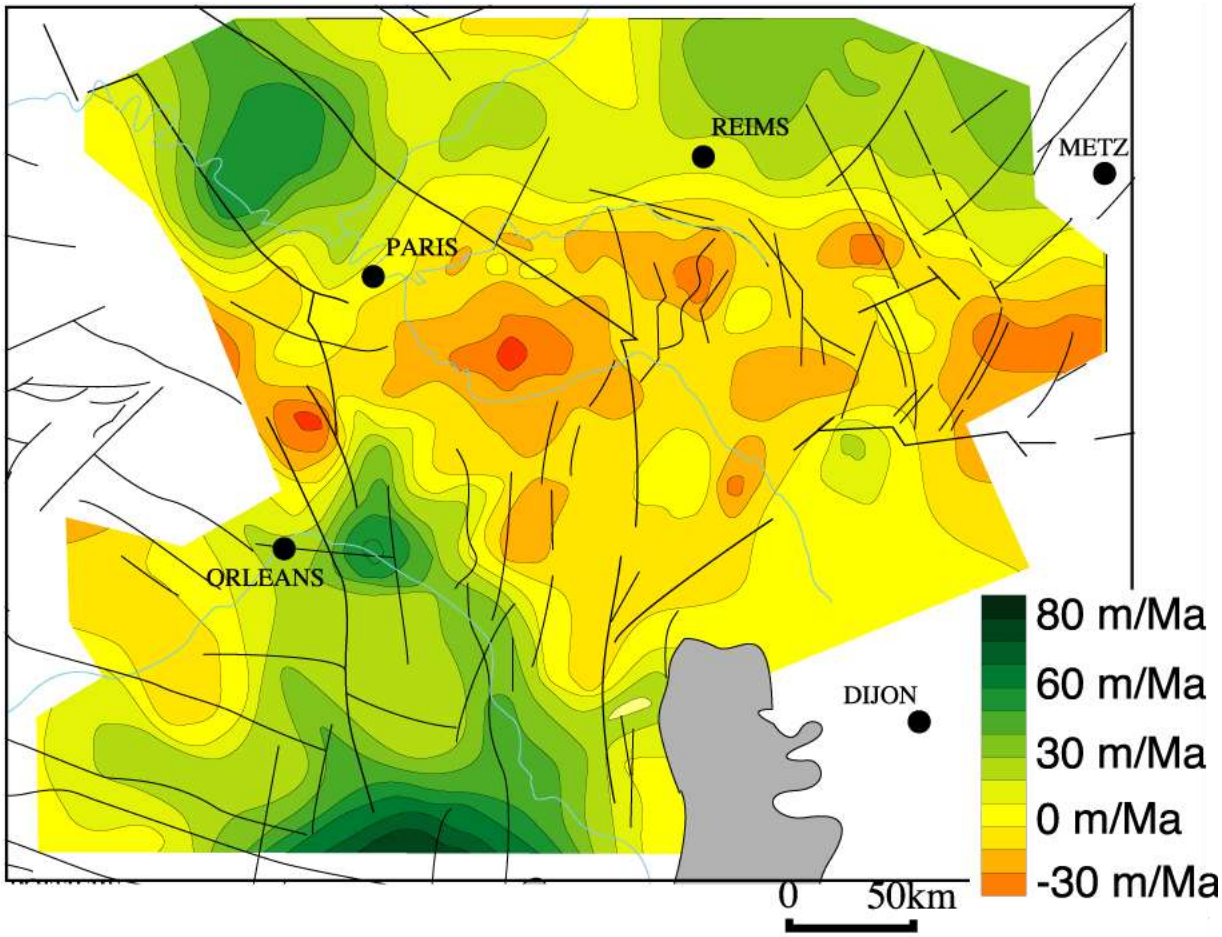
(Guillocheau, 1995)

DISCRIMINATION DES FACTEURS DE CONTRÔLE : MESURE DE L'ACCOMODATION

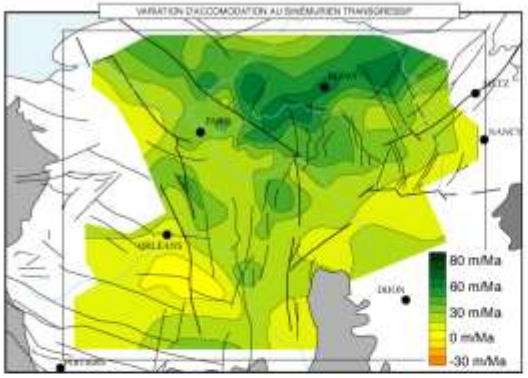
Eustatisme = f (temps)
Tectonique = f (temps, espace)

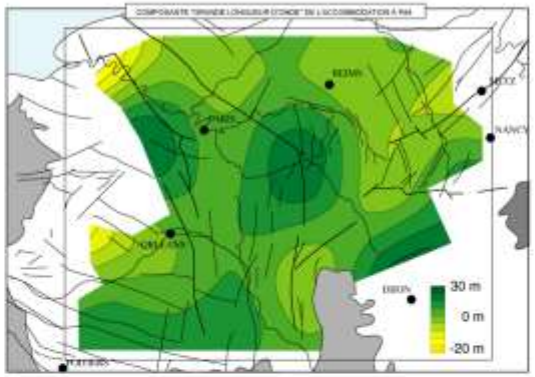
BASSIN DE PARIS (Robin et al., 1998, *Terra Nova*)

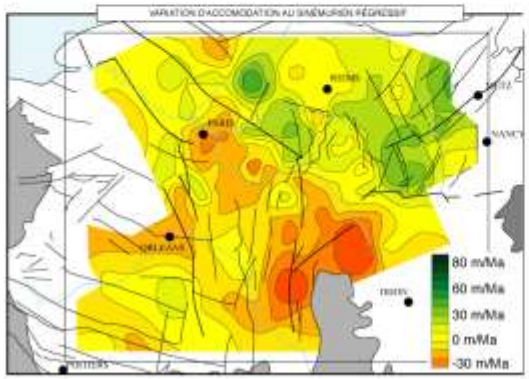


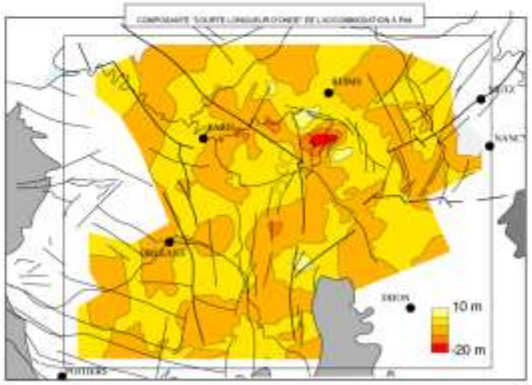


DISCRIMINATION DES FACTEURS DE CONTRÔLE : MESURE DE L'ACCOMODATION

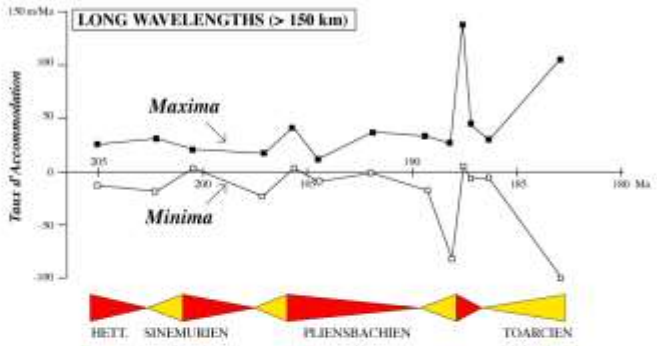


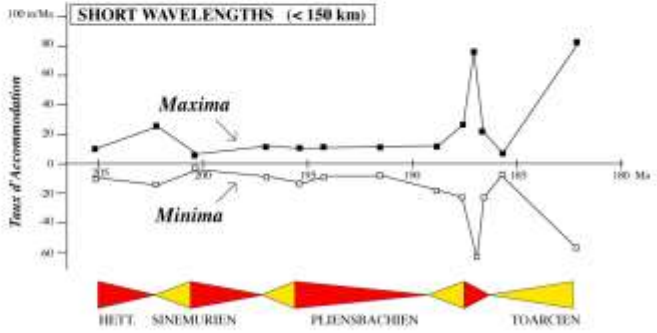






EXTRACTION DU SIGNAL EUSTATIQUE

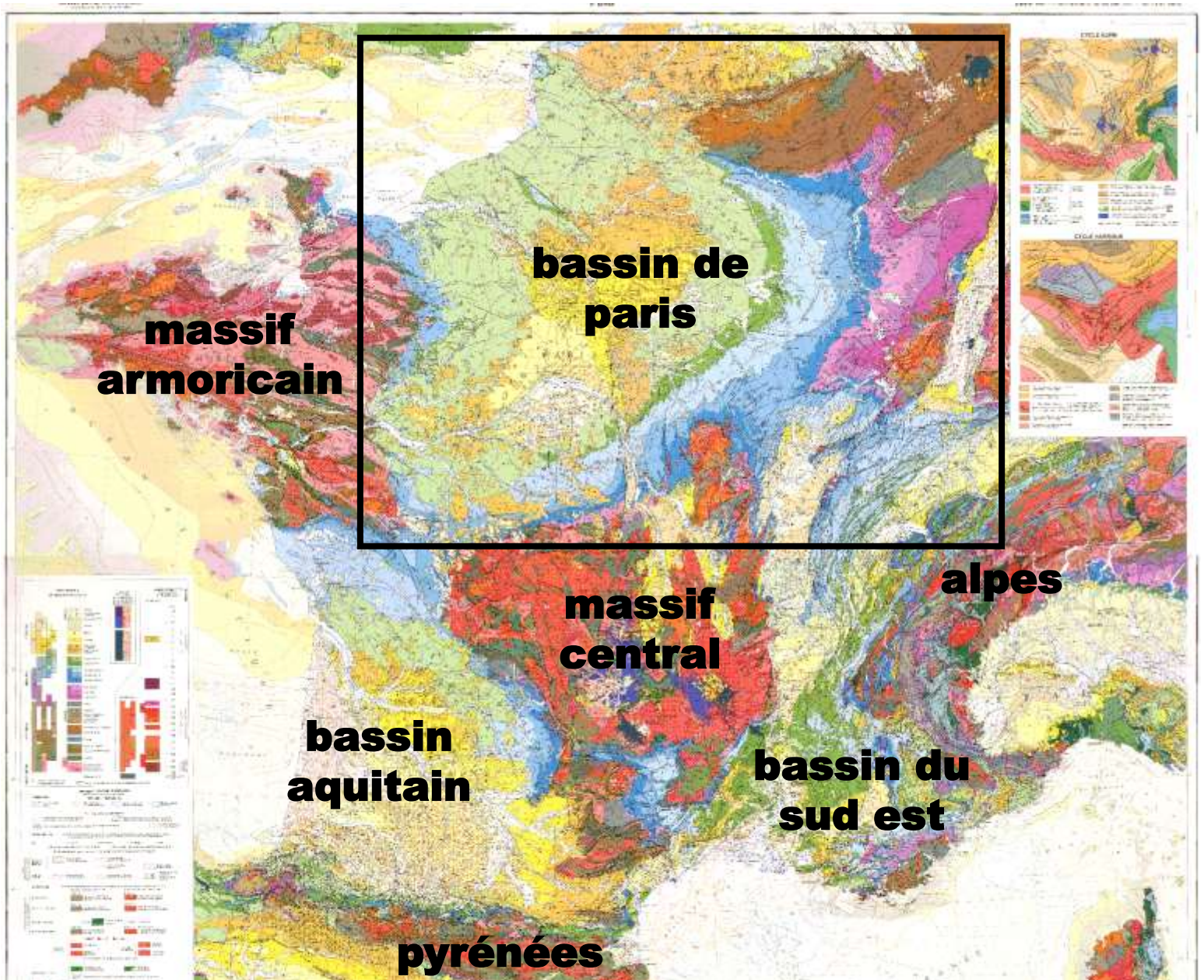




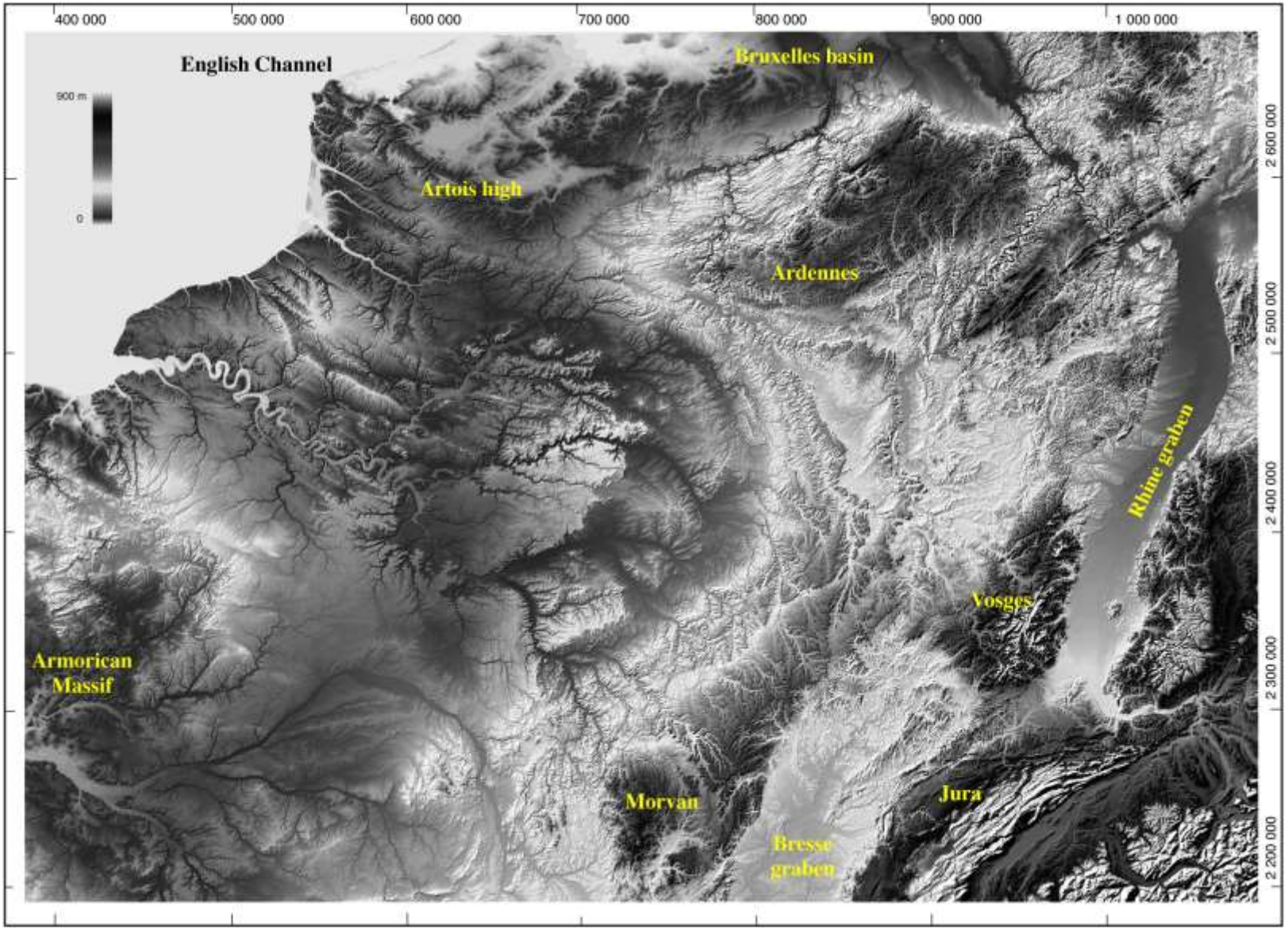
EXTRACTION DU SIGNAL TECTONIQUE

BASSIN DE PARIS (Robin et al., 1998, *Terra Nova*)

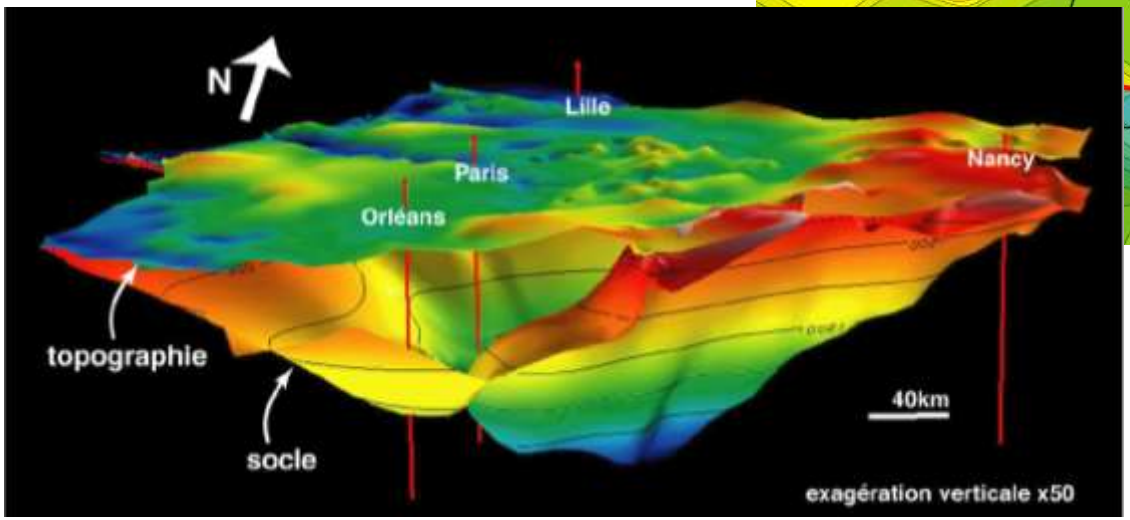
EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS

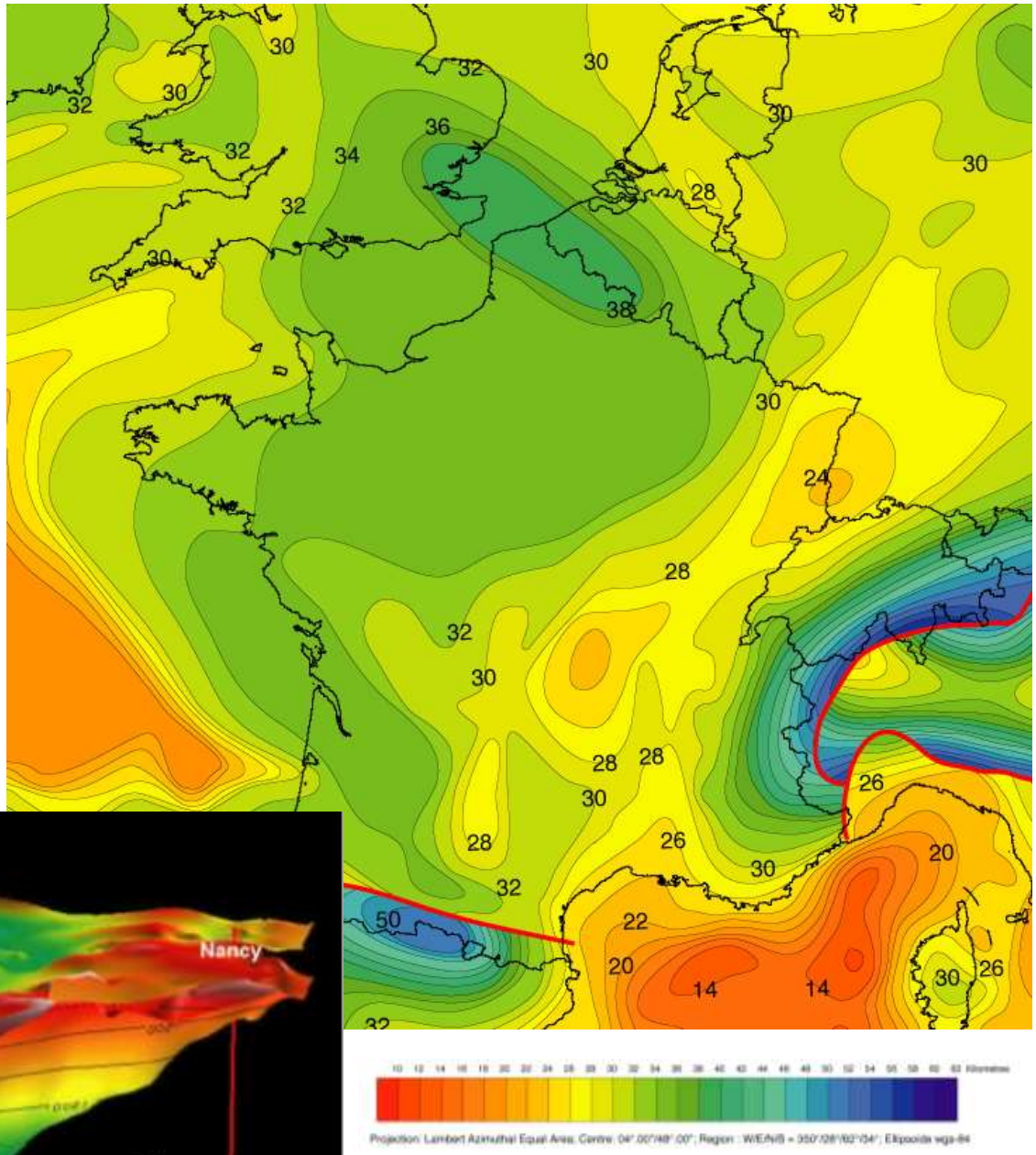


EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS



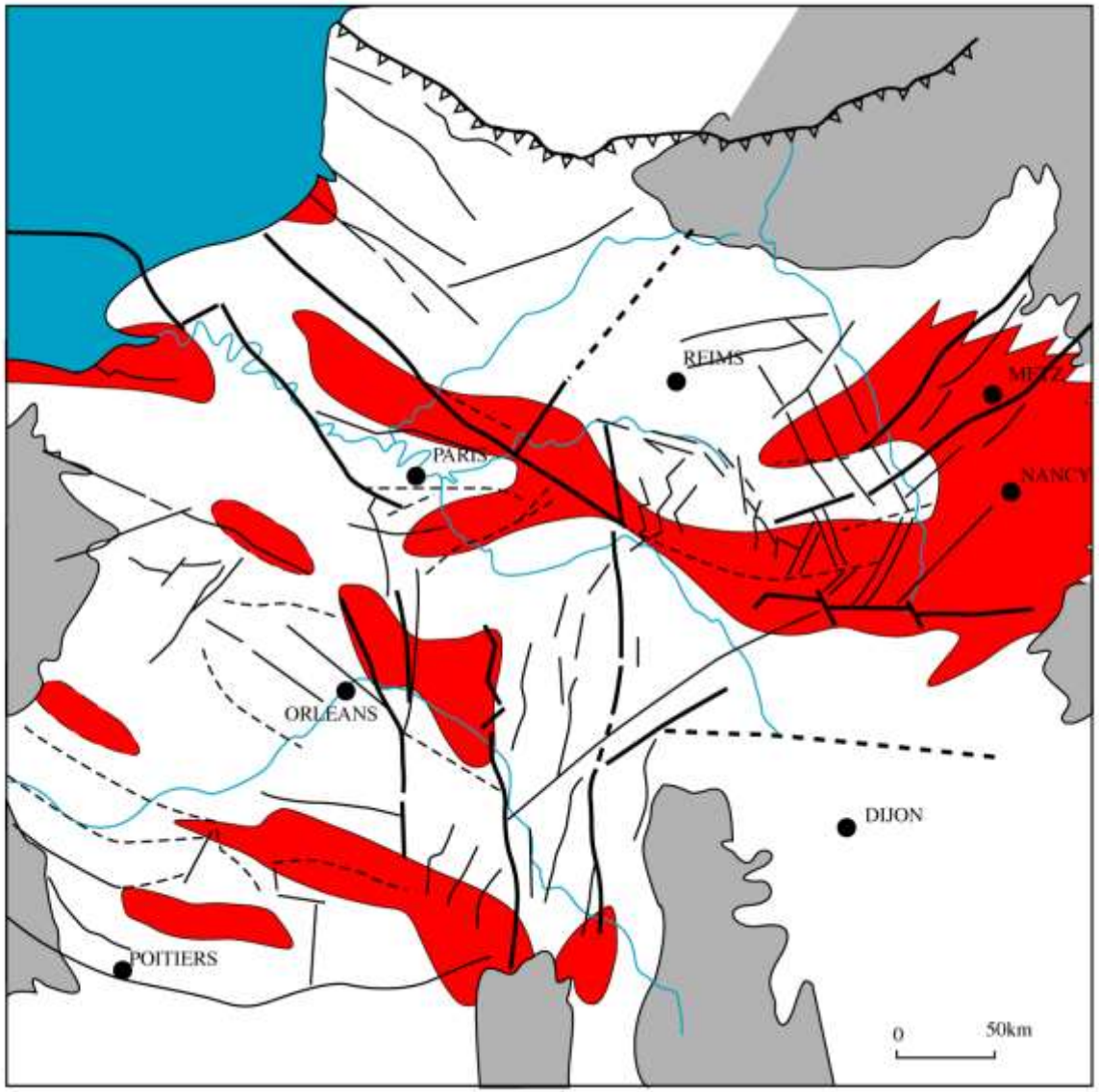
EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS





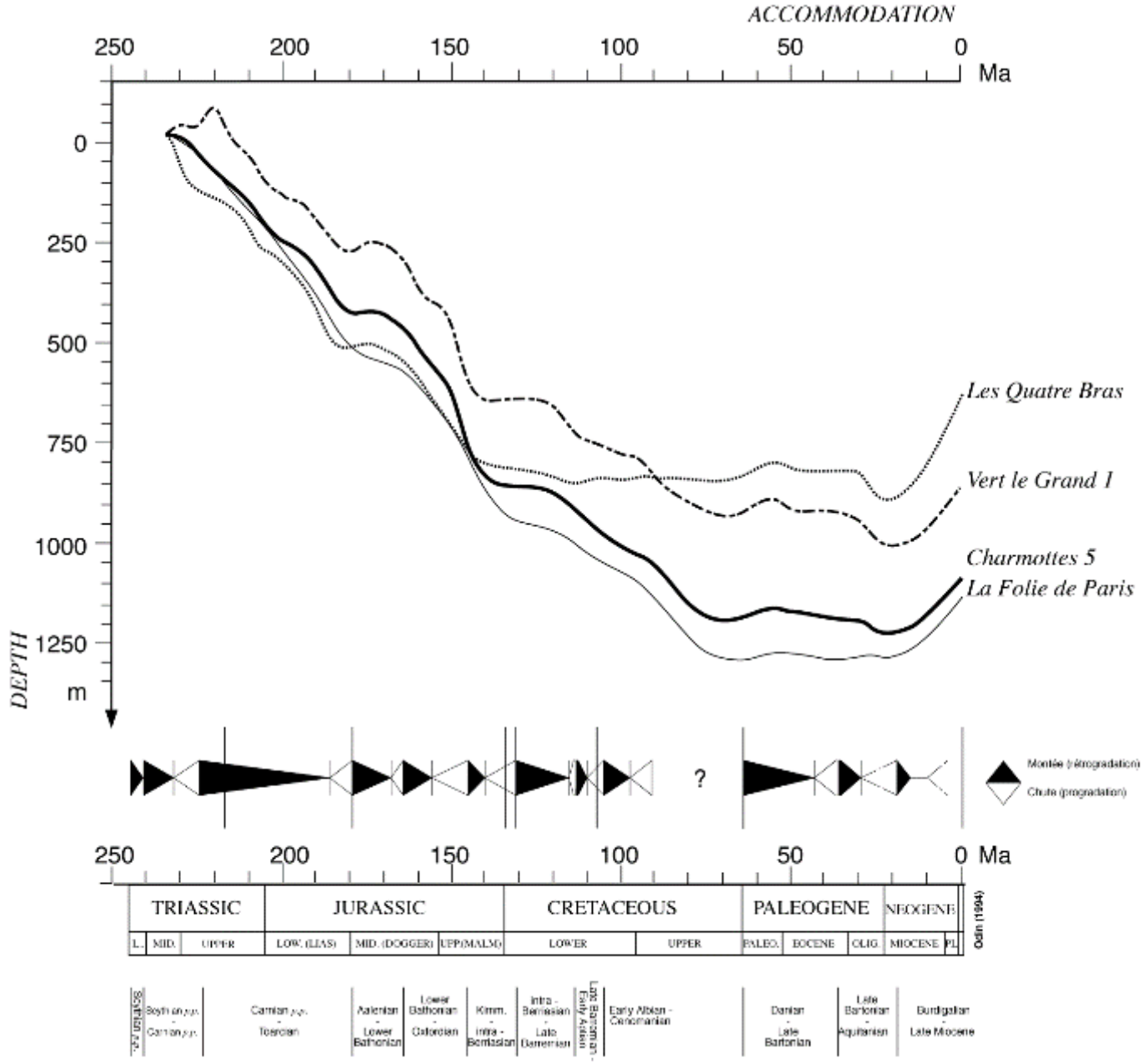
Profondeur du Moho

EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS

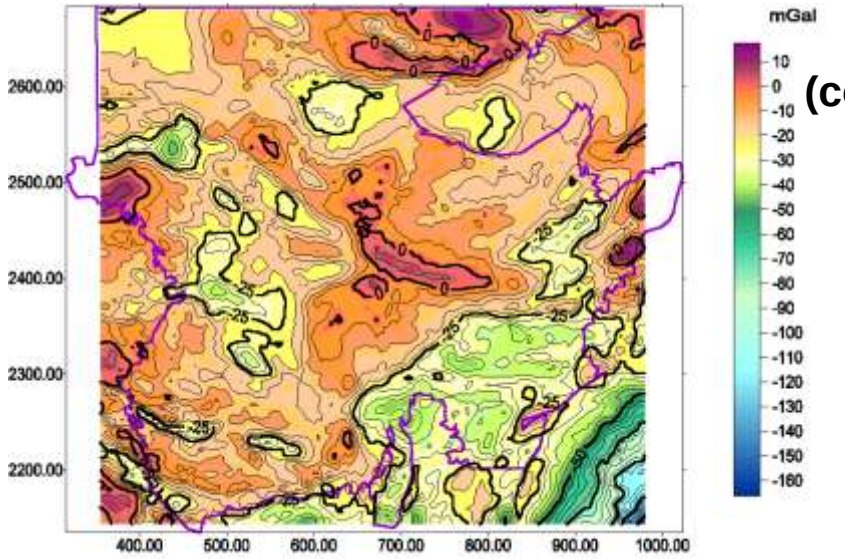


(Mascle)

EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS



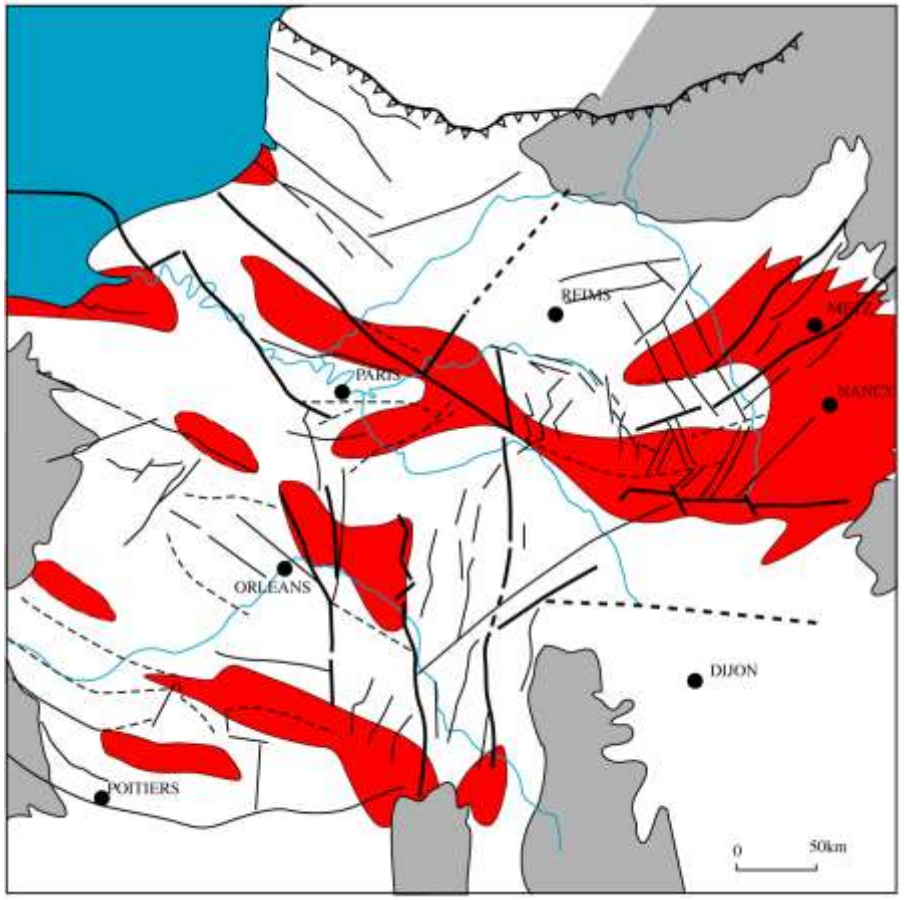
EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS

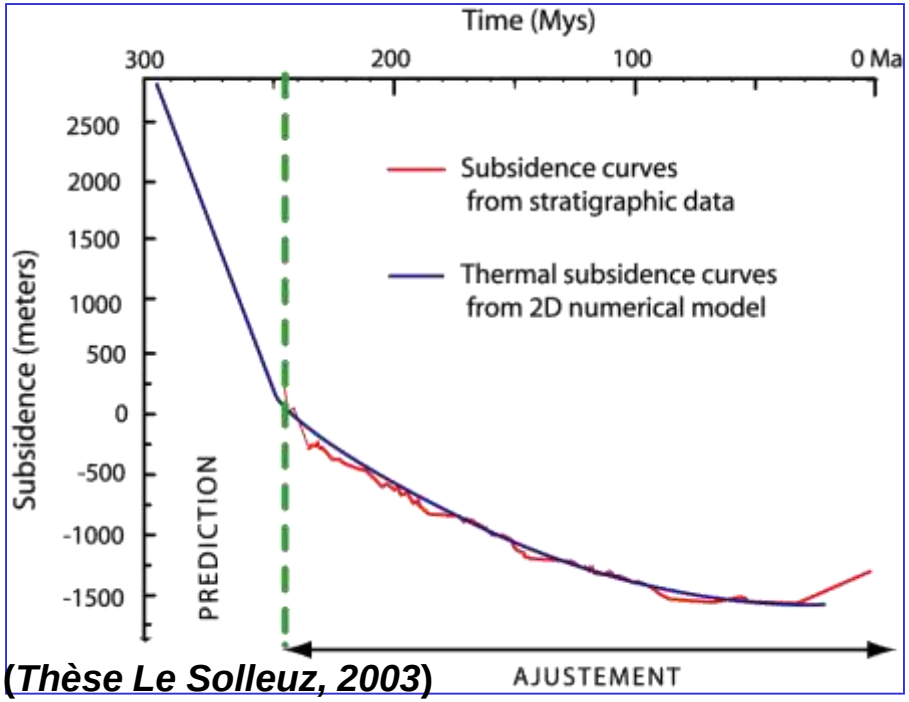


Gravimétrie bu Bassin de Paris (correction de Bouguer, Debeglia, 2000)

Extension permienne : collapse gravitaire post-hercynien

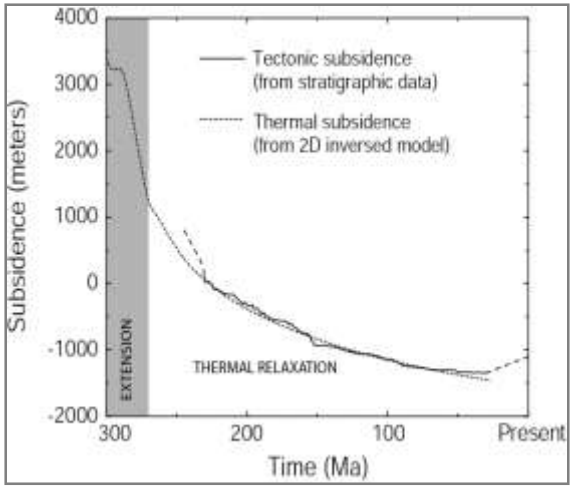
Carte des Bassins permiens ***(Mascle, 1990)***





(***Thèse Le Solleuz, 2003***)

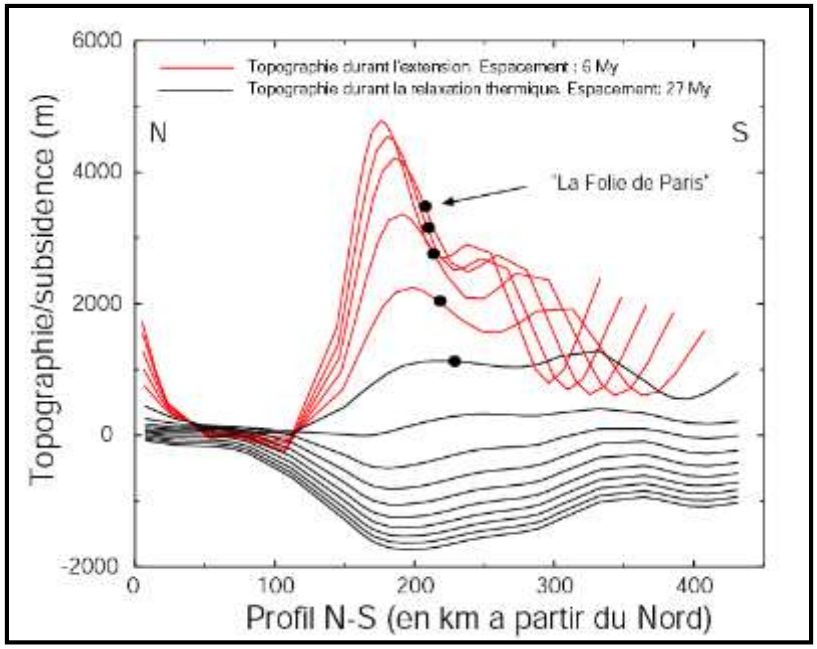
EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS

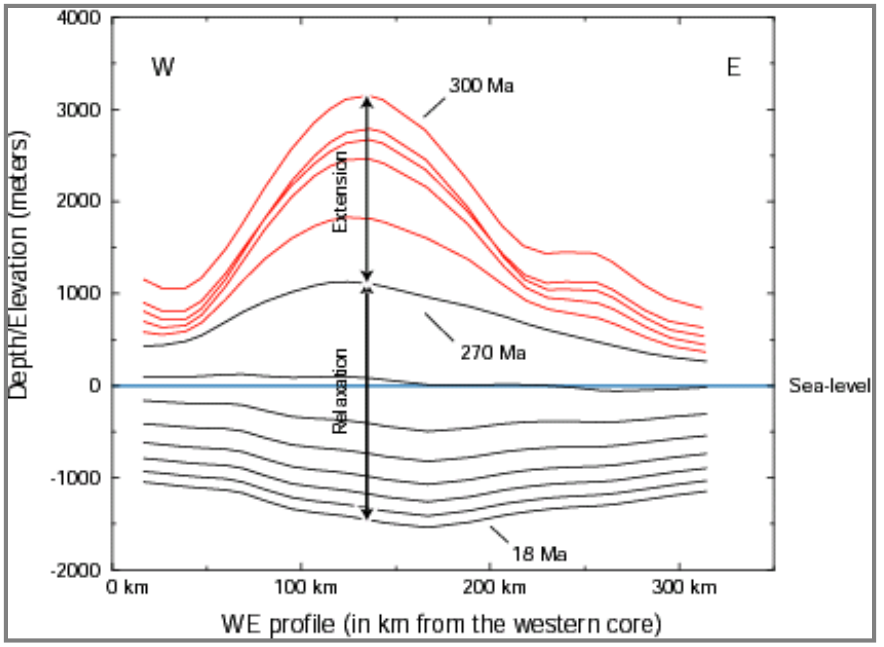


➲ **Topographie de 3000-3500 m à Paris, il y a 300 Ma**

➲ **Géométrie type « cordilière »: flanc court/flanc long**

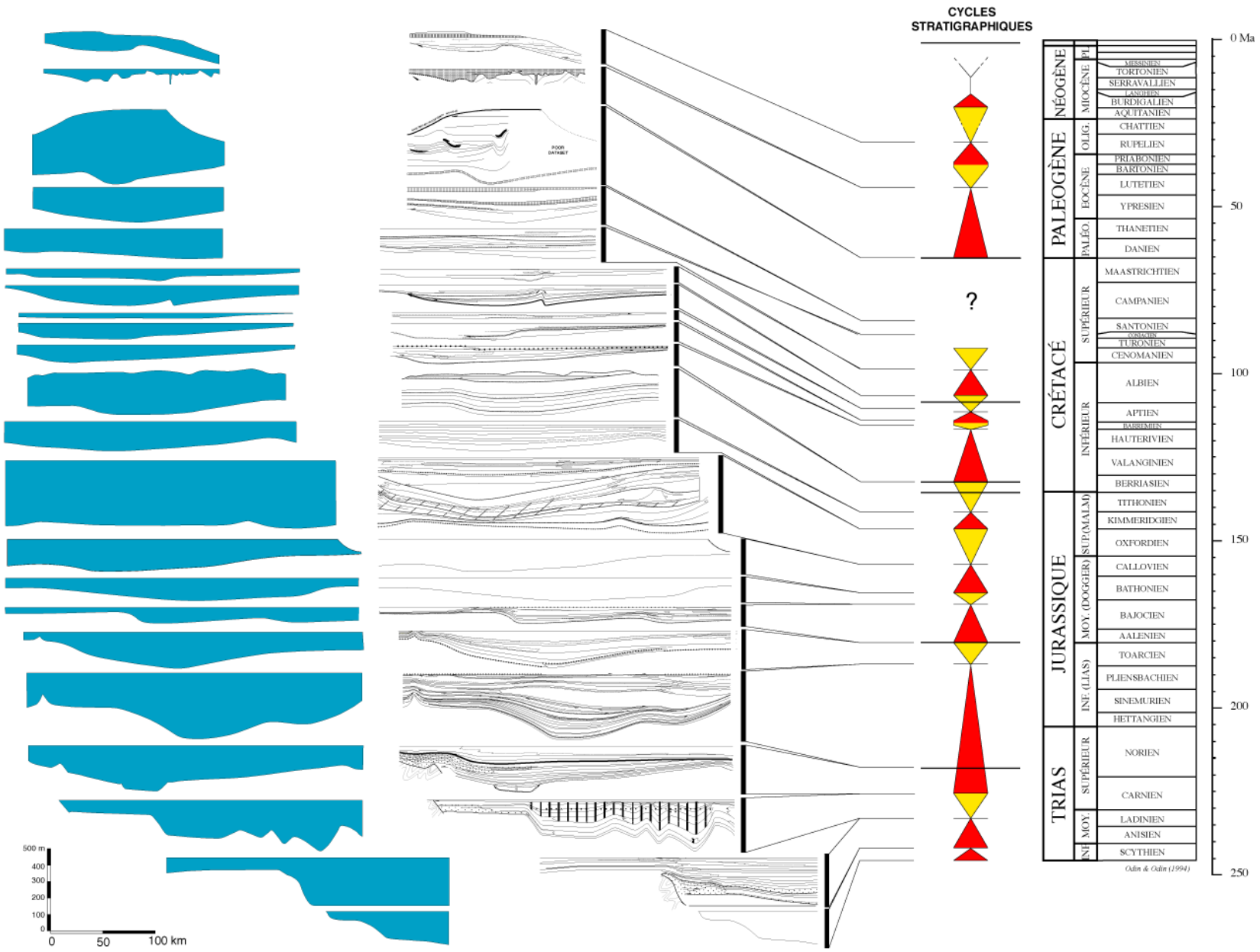
➲ **Ennoiement à l'Est puis migration vers l'Ouest**



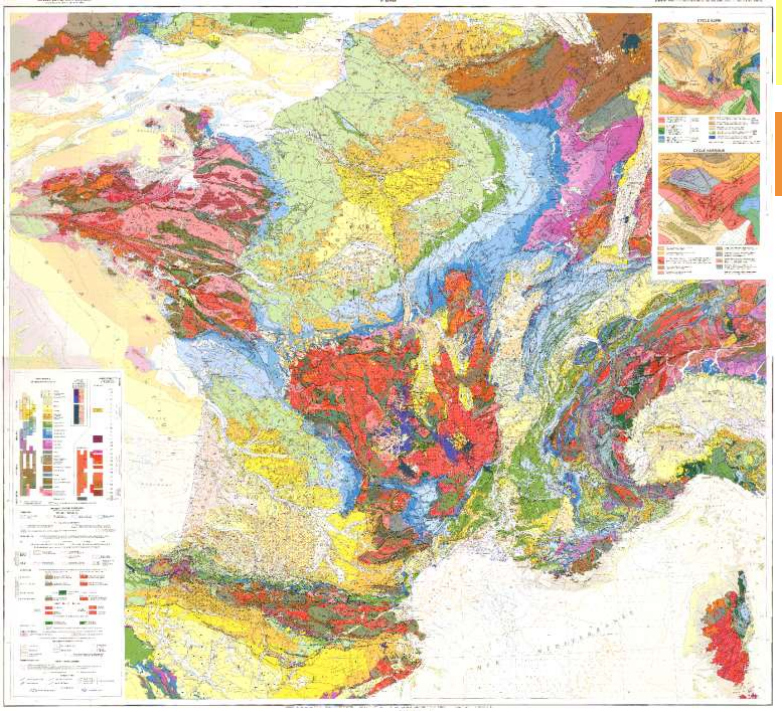


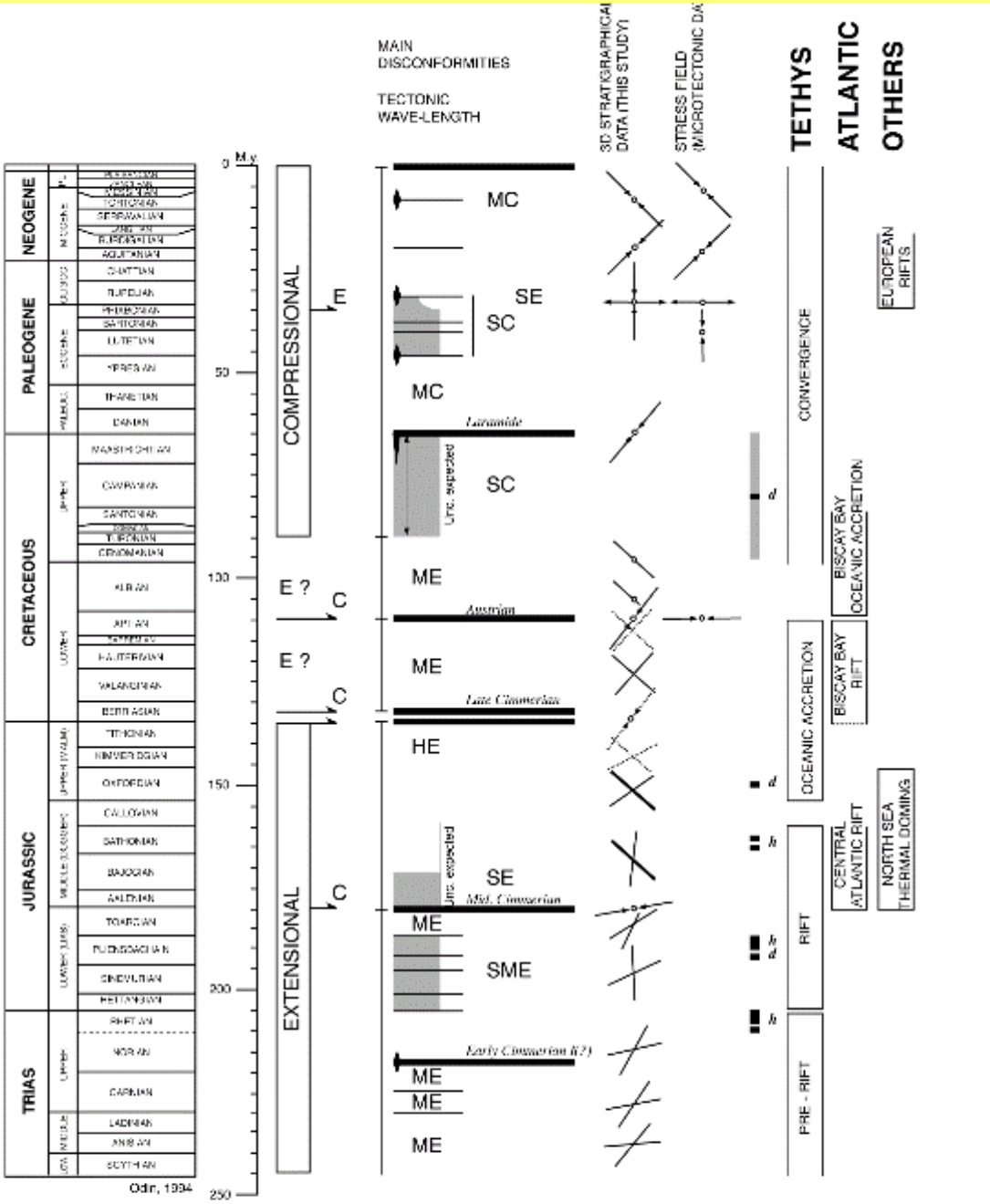
(Thèse Le Solleuz, *2003*)

EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS

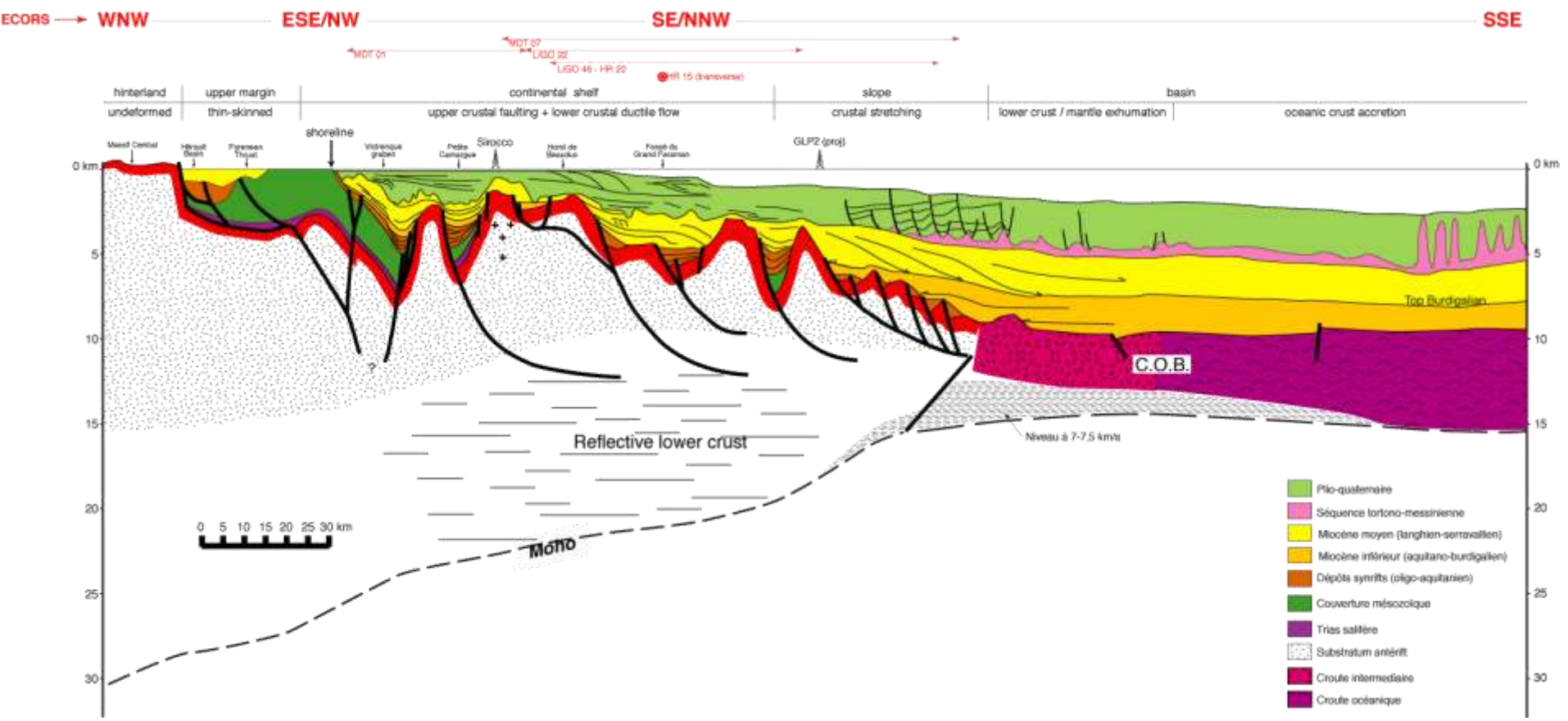


EXEMPLE DU BASSIN DE PARIS



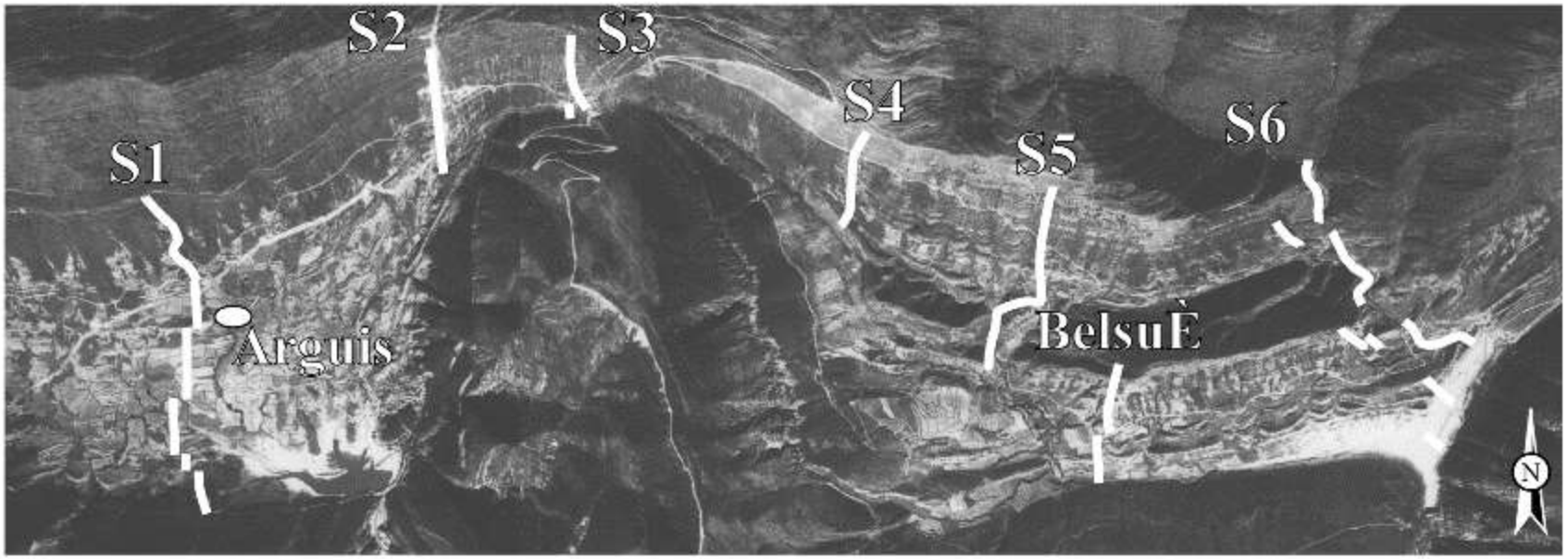


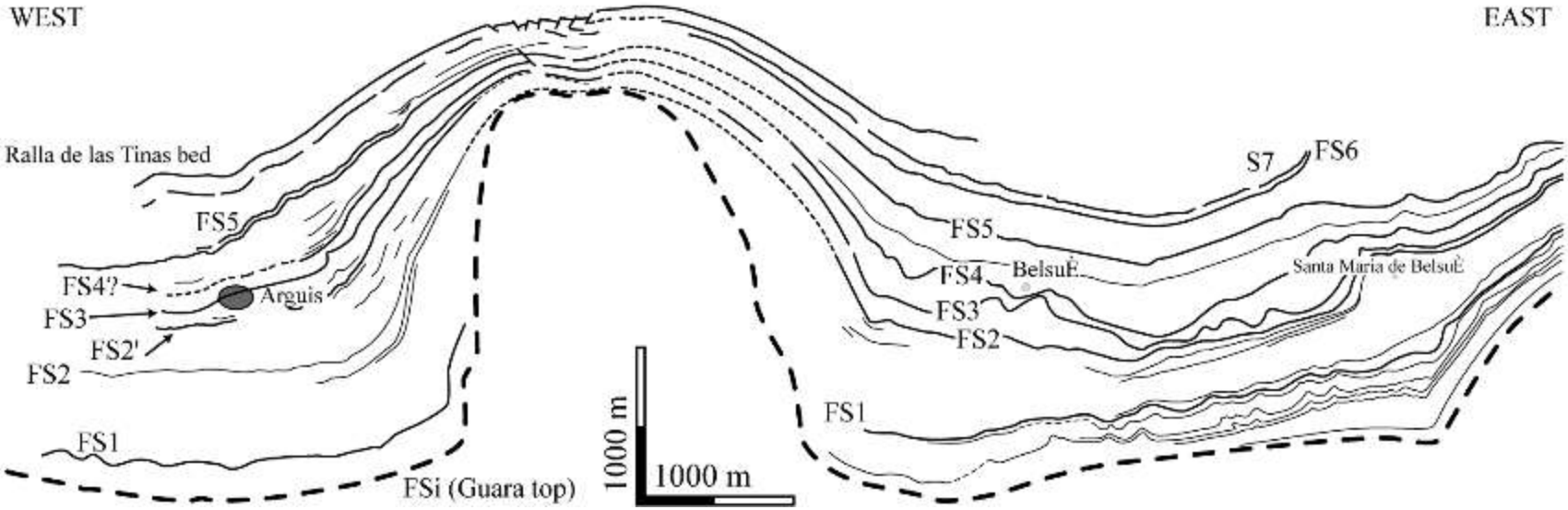
LE RENOUVEAU DES MARGES PASSIVES



(Séranne, 1979; Guennoc et al. 1994)

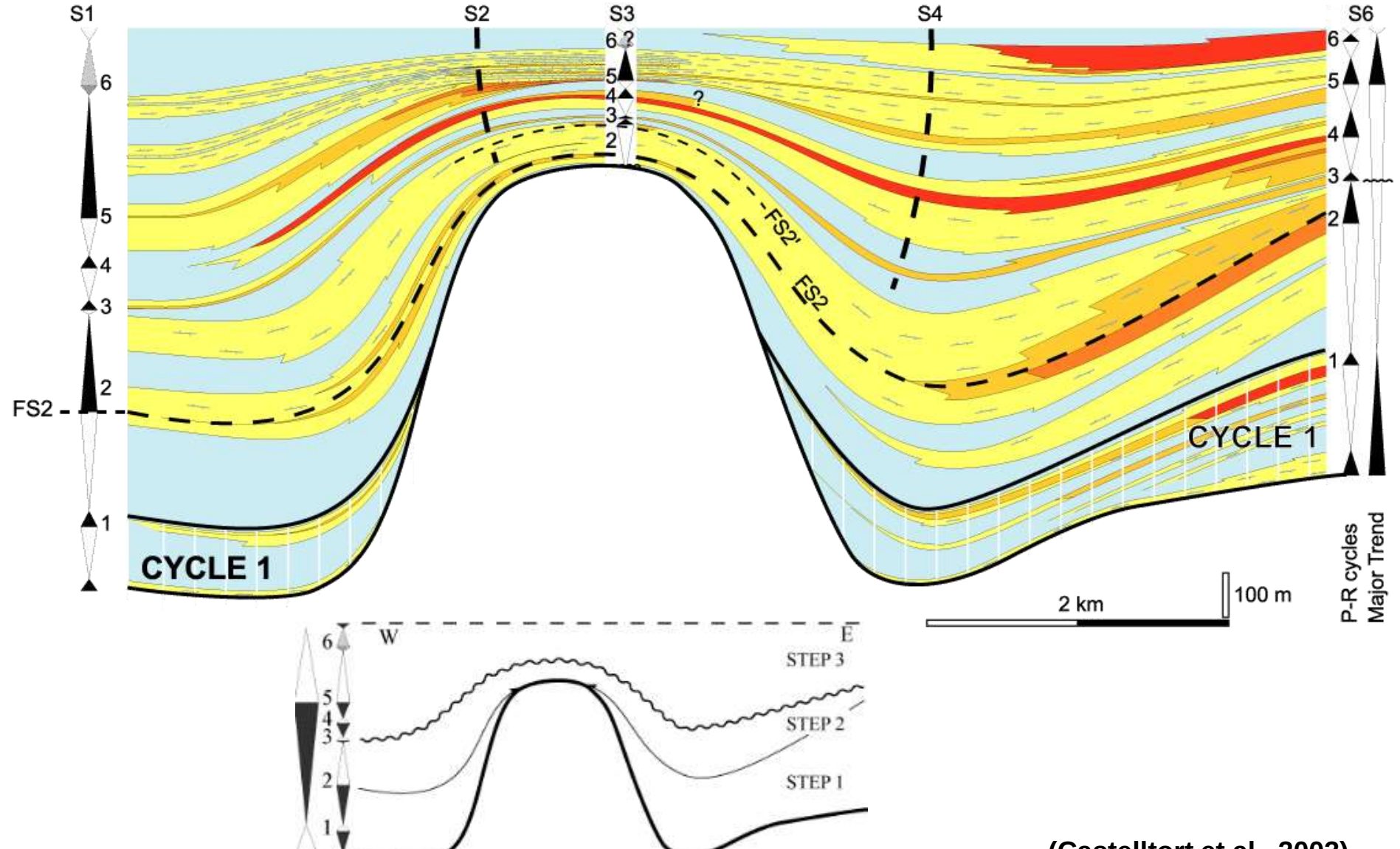
RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION





(Castelltort et al., 2003)

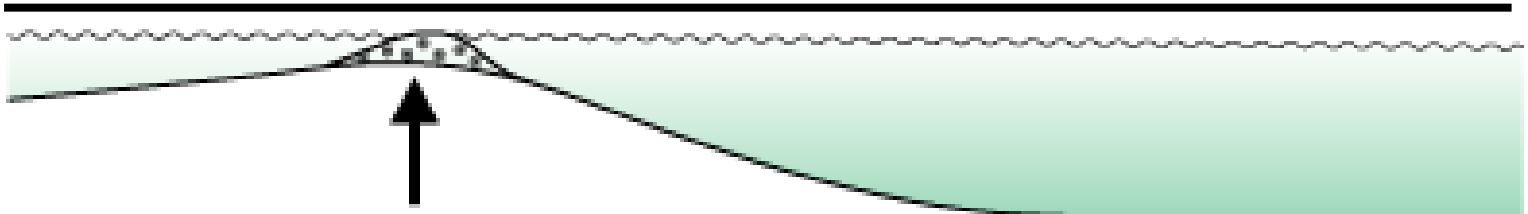
RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION



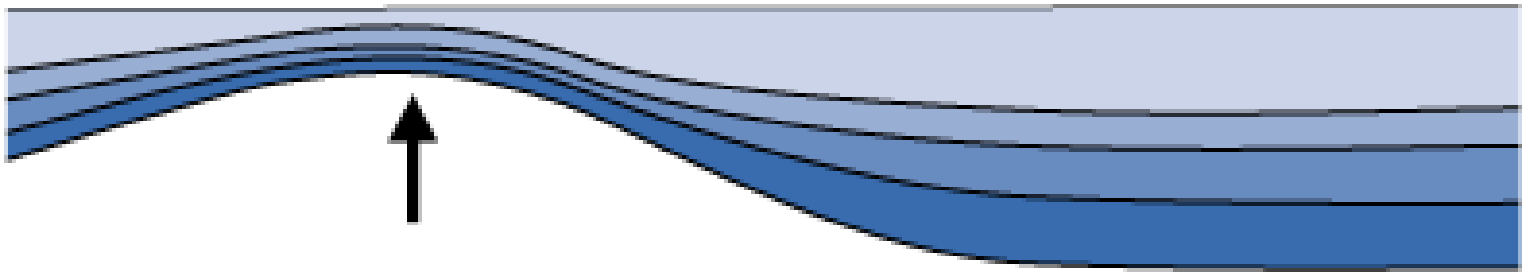
(Castelltort et al., 2003)

RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION

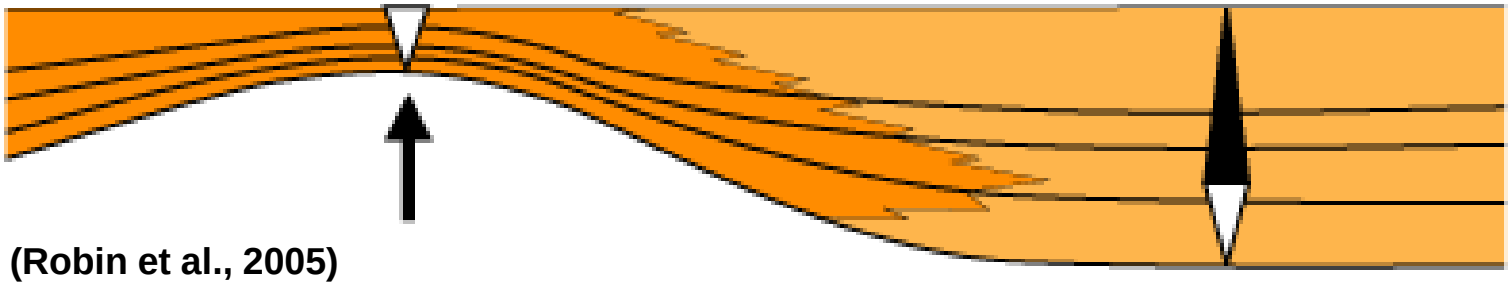
subsidence ⇩ depositional profil



subsidence ⇩ sedimentary thickness



subsidence ⇩ stratigraphic sequences



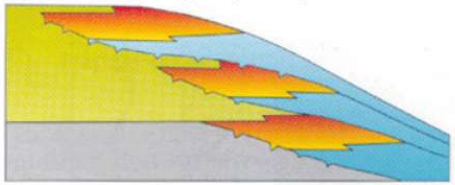
(Robin et al., 2005)

RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION

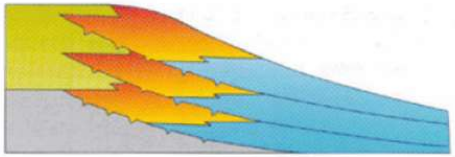
a/s
accommodation
sedimentation

architecture
stratigraphique

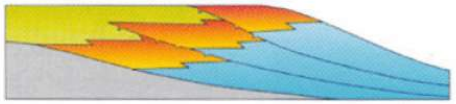
a/s > 1
rétrogradation



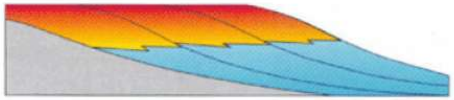
a/s = 1
aggradation



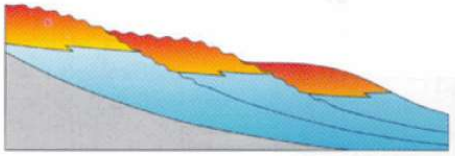
0 < a/s < 1
progradation



a/s = 0
progradation

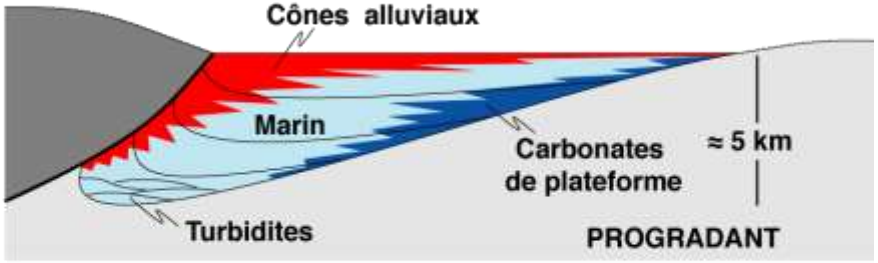


a/s < 1
progradation



BASSIN COMPRESSIF
BASSIN D'AVANT-PAYS

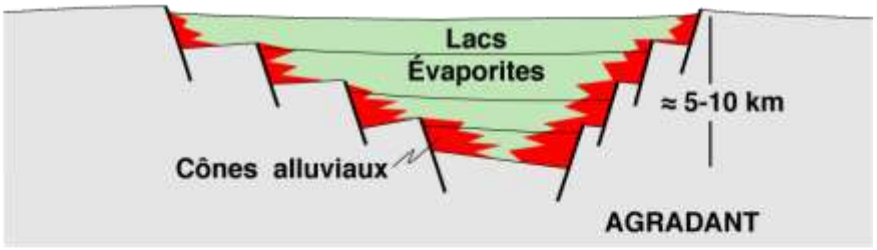
20 - 40 Ma



BASSIN EXTENSIFS

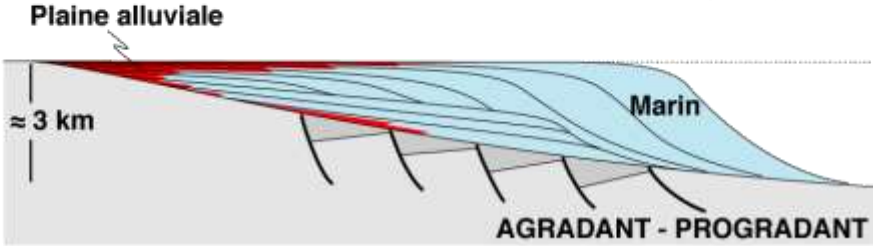
RIFT

5 - 20 Ma



MARGE PASSIVE

100 - 200 Ma



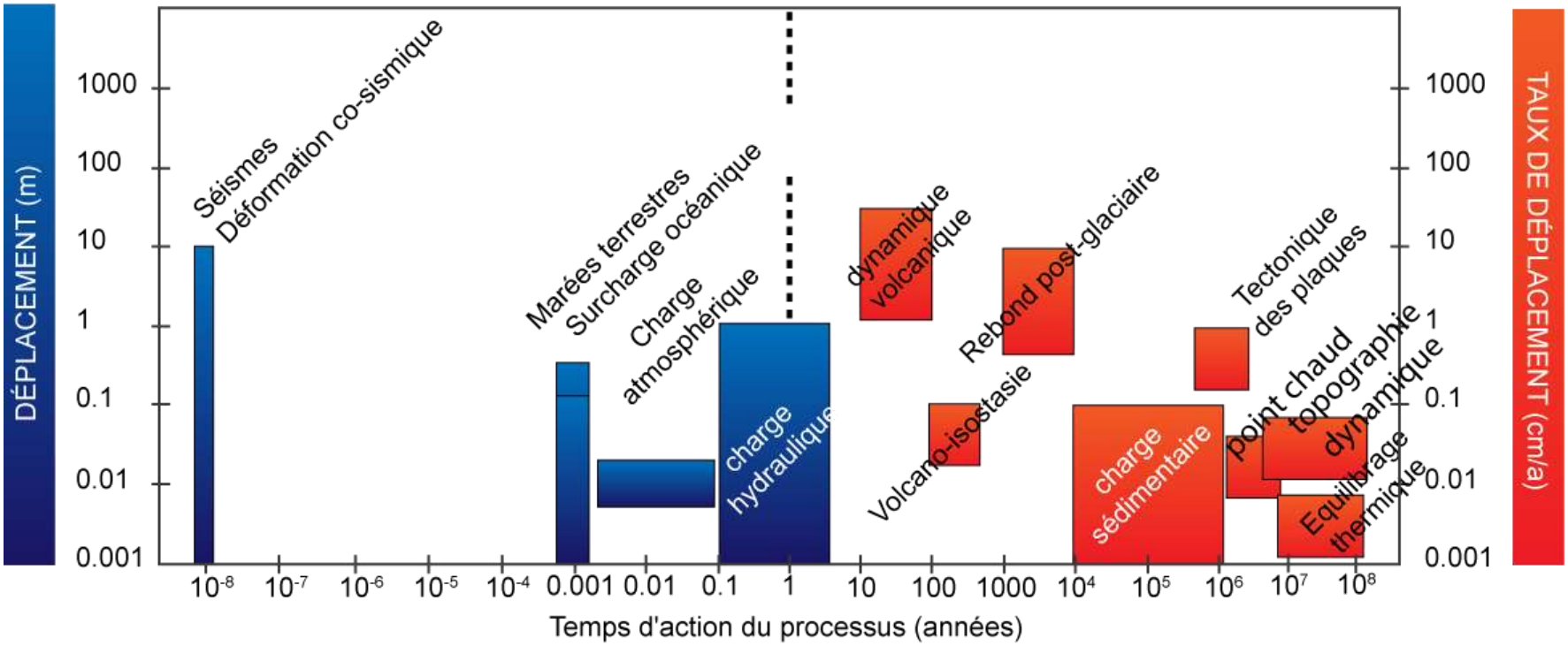
RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION

Un processus de déformation est caractérisé par :

-Une amplitude de mouvement,

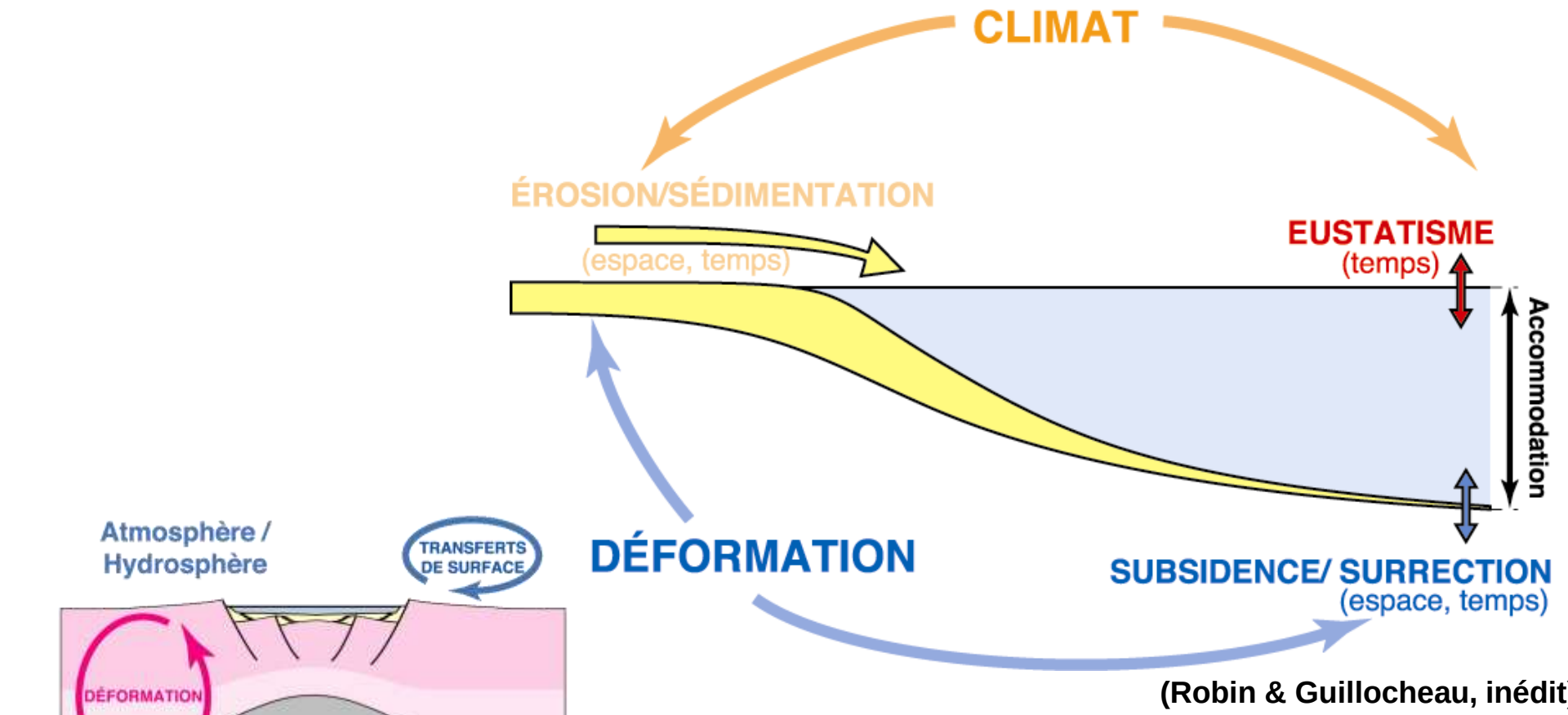
-Une durée caractéristique

-Une longueur d'onde

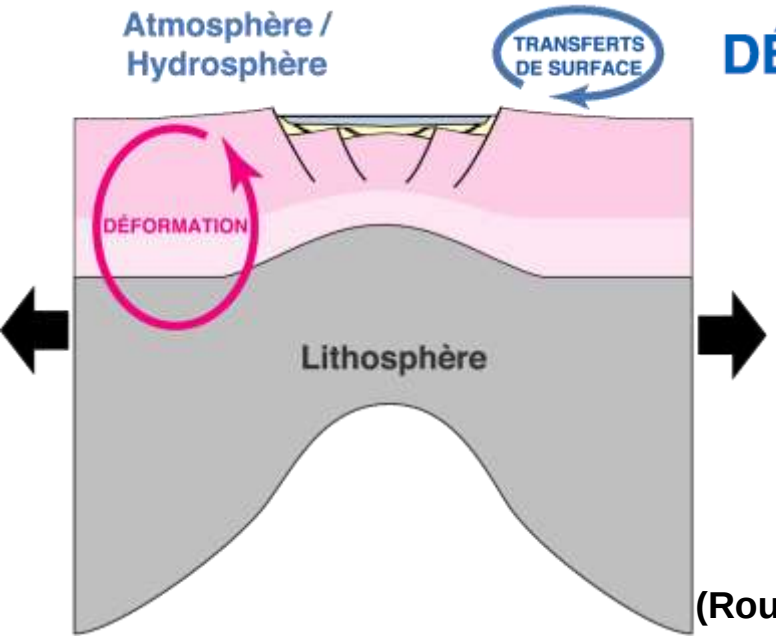


O Dauteuil, inédit

RELATIONS TECTONIQUE - SEDIMENTATION



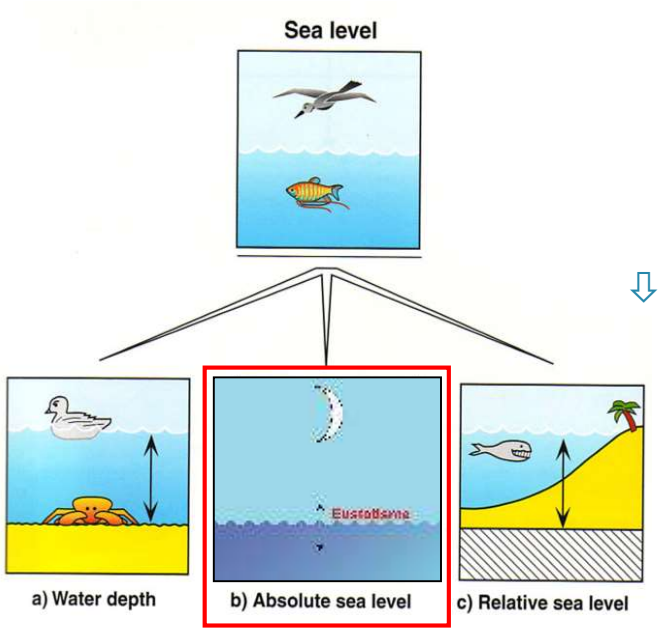
(Robin & Guillocheau, inédit)



(Rouby, 2002)

LE SIGNAL EUSTATIQUE

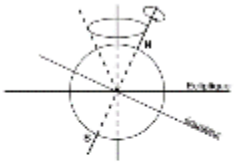
⇩ Troisième niveau marin



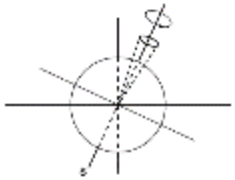
(Homewood et al., 1999)

⇩ Glacio- ou climato - eustatisme

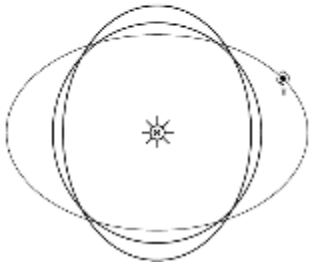
PRECESSION : 21 000 ans



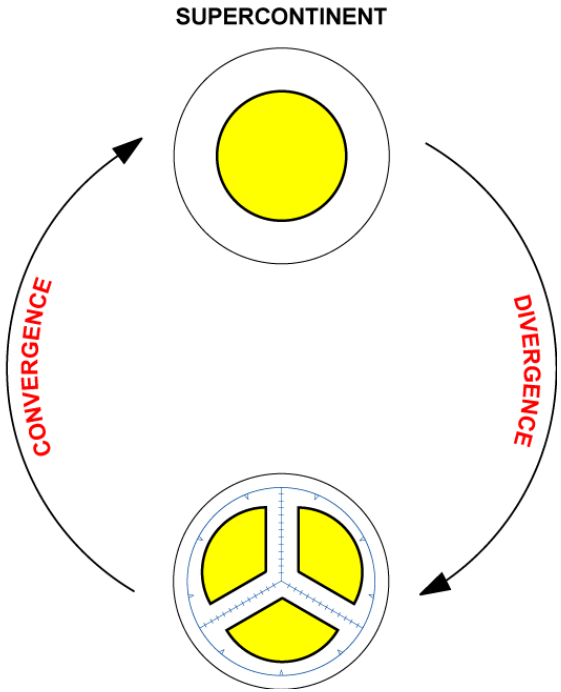
OBLIQUITÉ : 40 000 ans



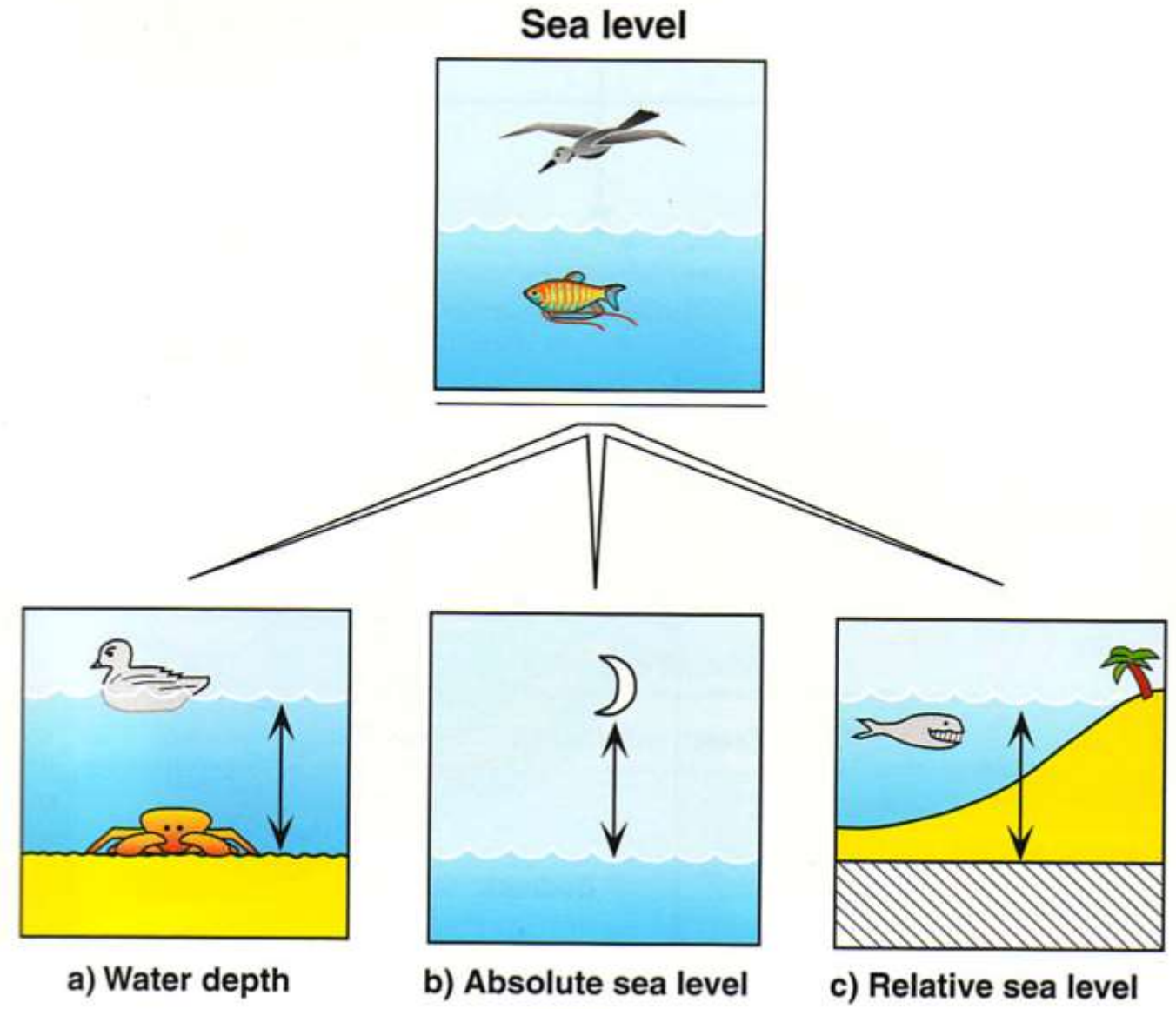
EXCENTRICITÉ DE L'ORBITE : ≃ 100 000 ans



⇩ Tectono - eustatisme



LE SIGNAL EUSTATIQUE



(Homewood et al., 1999)

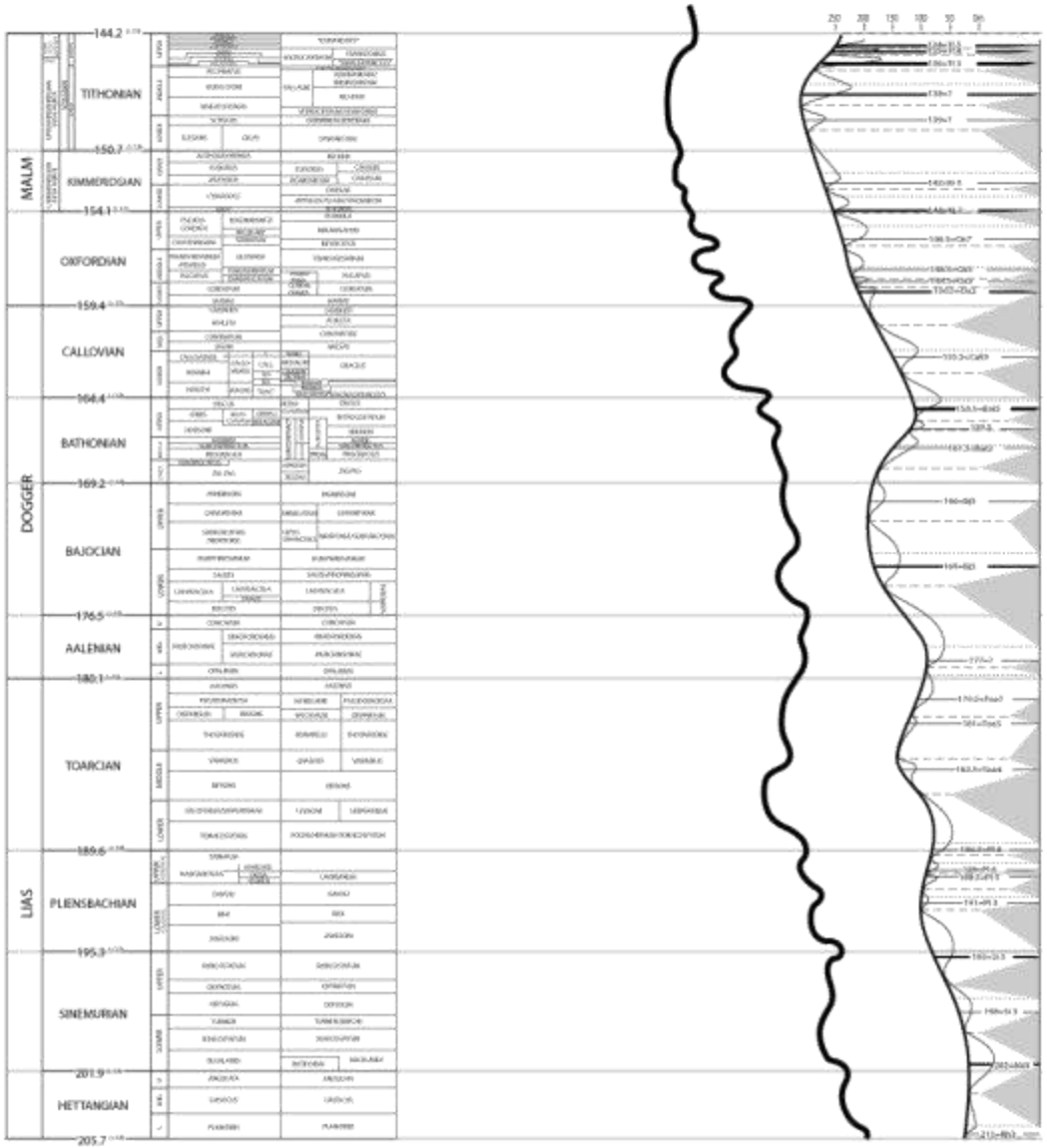
LES FACTEURS DE CONTRÔLE

CHARTE BIOCHRONOSTRATIGRAPHIQUE

Hardenbol et al. (1998)

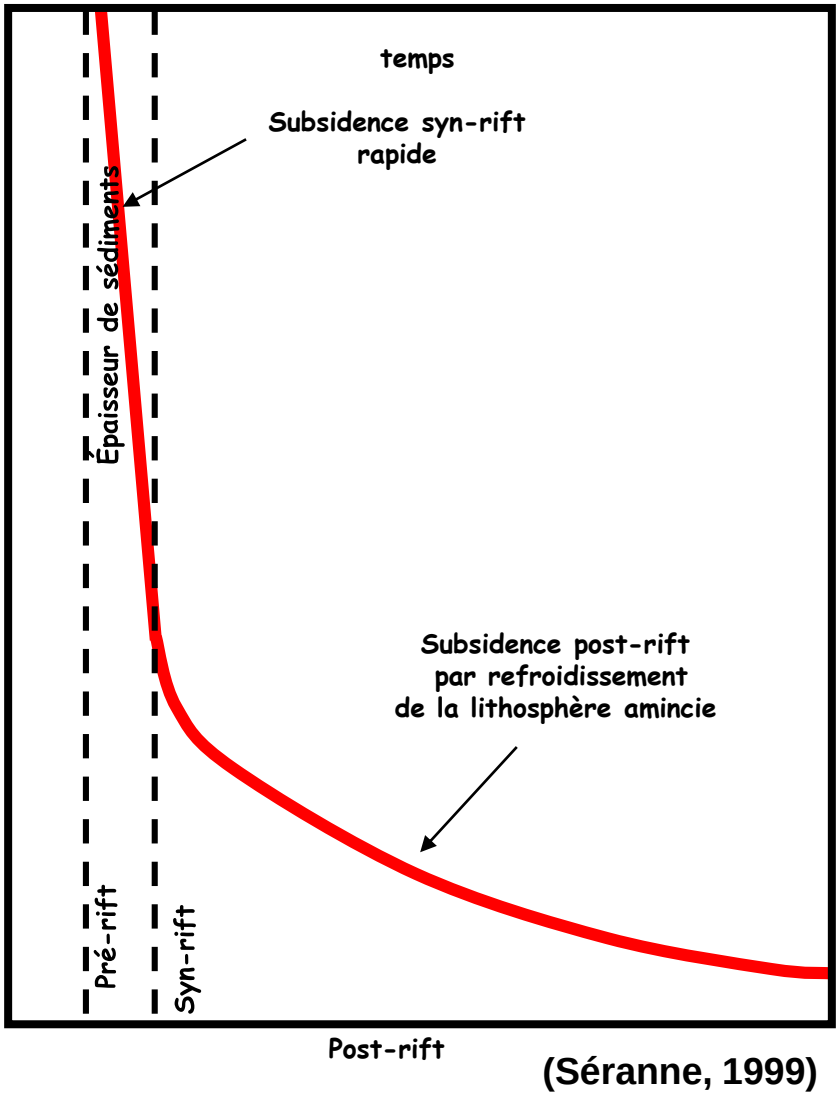
CHARTES EUSTATIQUES

Hallam (1988) Hardenbol et al. (1998)



(Haq et al., 1987)

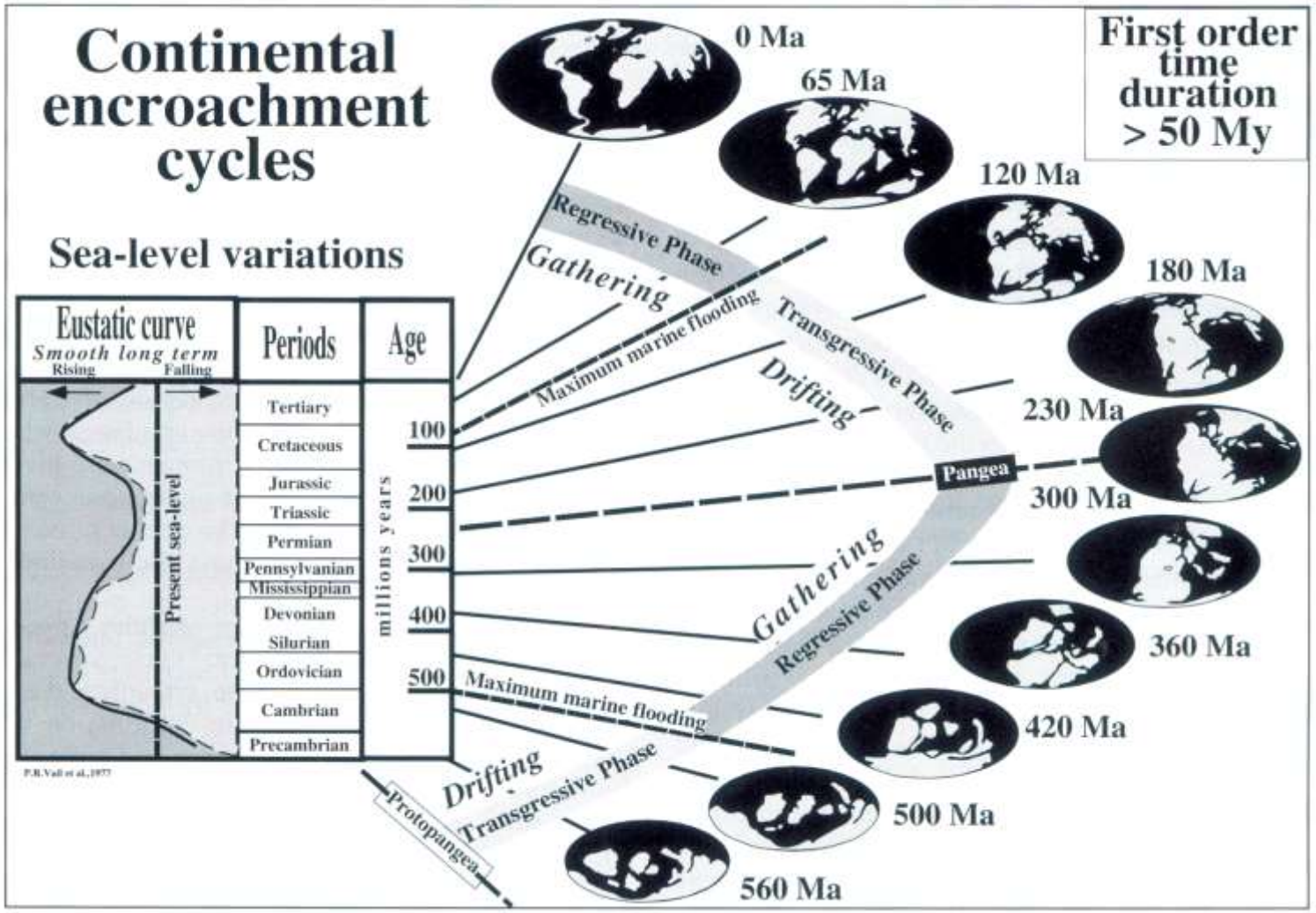
LES FACTEURS DE CONTRÔLE



(Séranne, 1999)

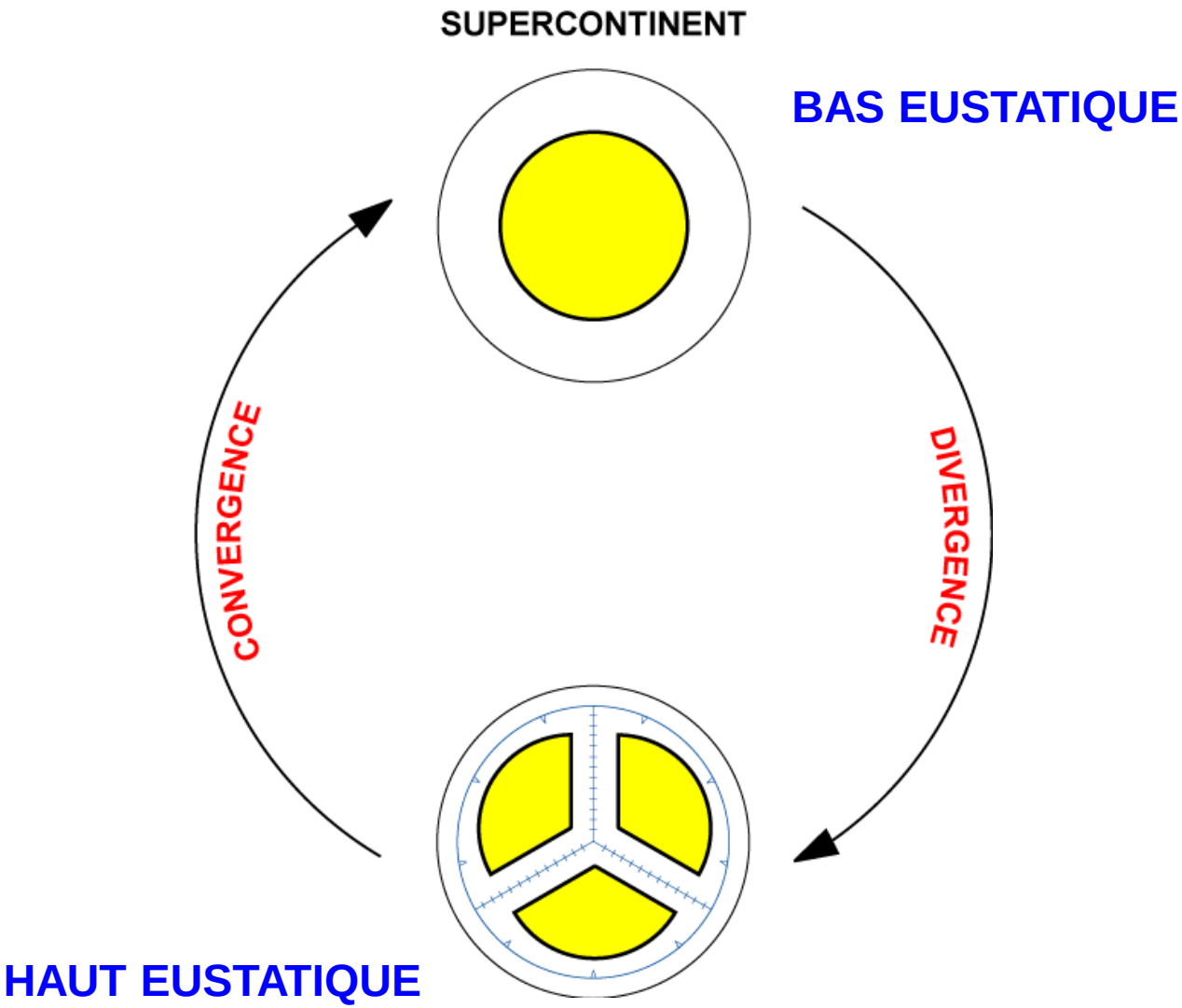
- **Vitesse de croissance des rides?**
- **Age moyen des fonds océaniques?**

LES FACTEURS DE CONTRÔLE

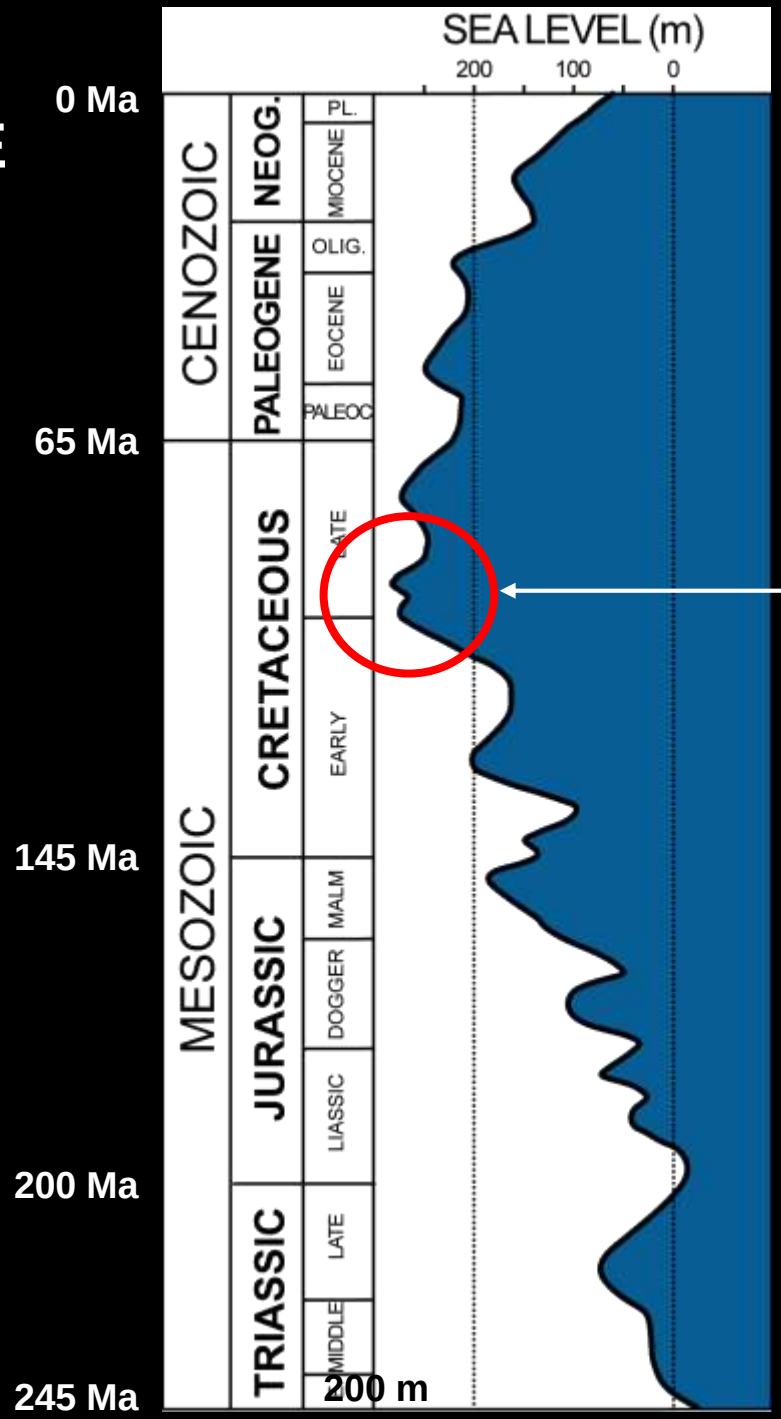


(Duval et al., 1997)

LE CYCLE DE WILSON



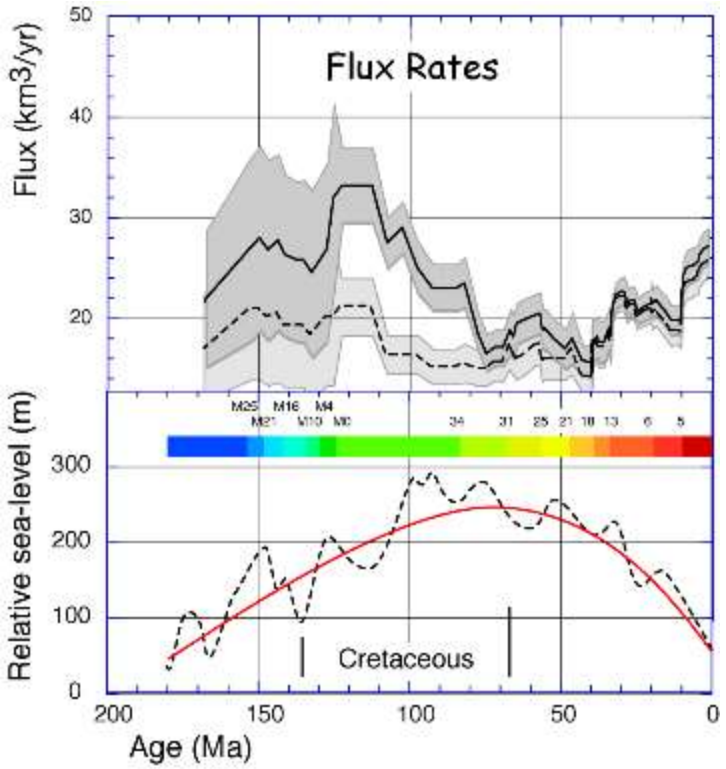
HAQ's SEA LEVEL CURVE

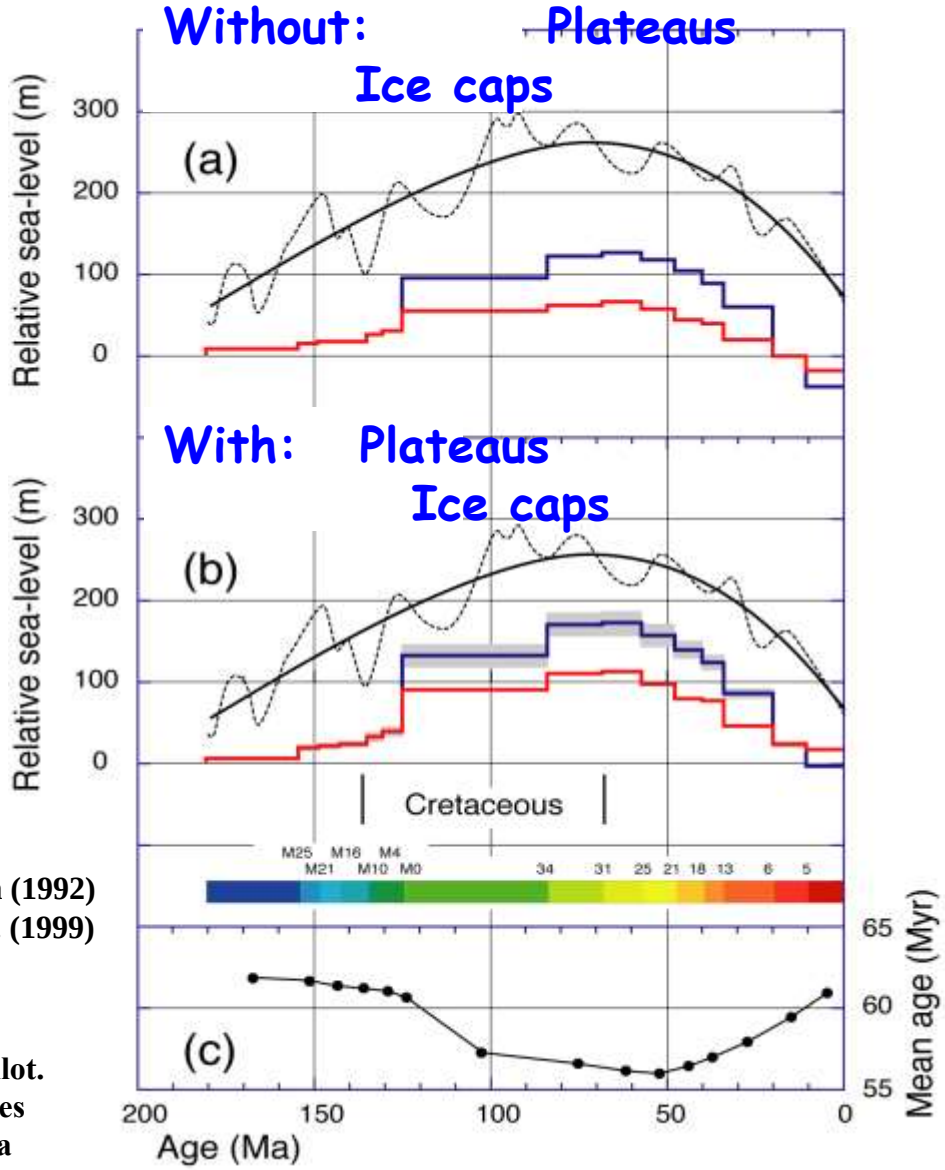


(Haq *et al.*, 1987)

LE SIGNAL EUSTATIQUE

CORRELATION between Mean Age of Oceanic Lithosphere and Long term eustatic sea level





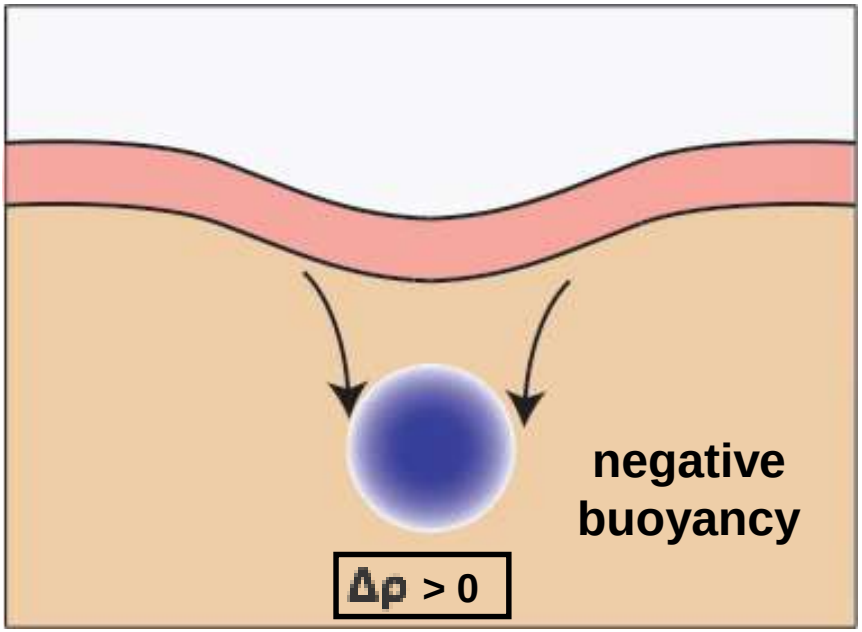
h=f(t) following: Stein & Stein (1992)
Humler et al. (1999)

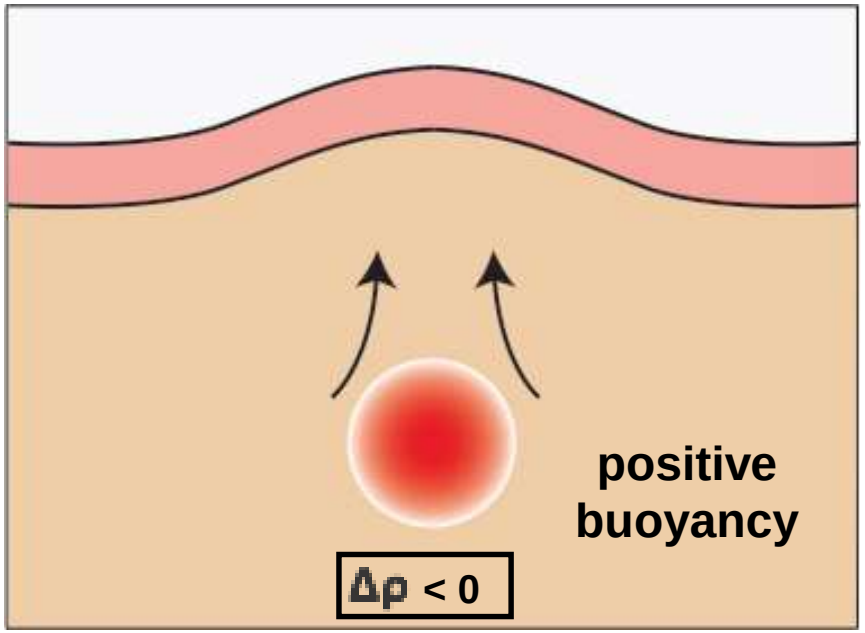
J.P. Cogné, E. Humler and V. Courtillot. Mean age of oceanic lithosphere drives eustatic sea-level change since Pangea breakup. Earth Planet. Sci. Lett., 245, 115-122, 2006.

LE SIGNAL EUSTATIQUE

EFFECT OF MANTLE PROCESSES: DYNAMIC TOPOGRAPHY ?

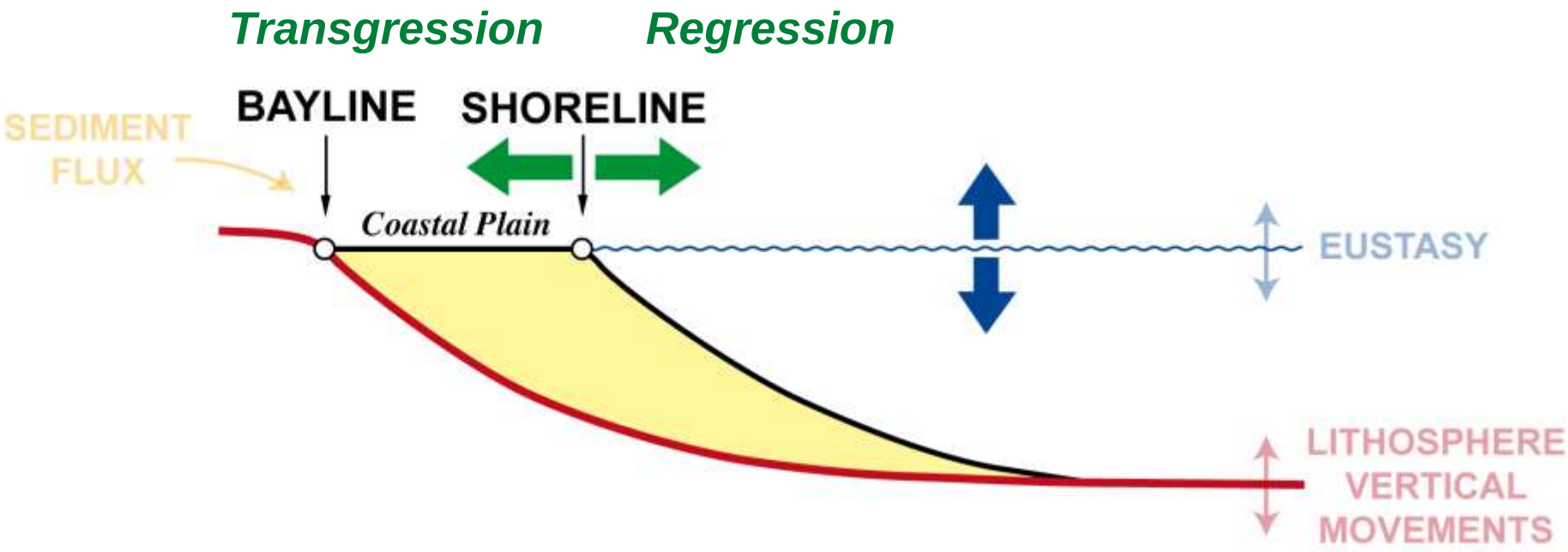
Deformation of solid earth	**+/- 1 500 m (Lithgow-Bertelloni & Gurnis, 1993)**
	+/- 3 000 m (Ricard *et al.*, 1993)
Duration	**x10 Ma**
Possible eustatic effect	**+/- 80 m (Husson & Conrad, 2006)**
	1m/Ma (Conrad & Husson, 2009)



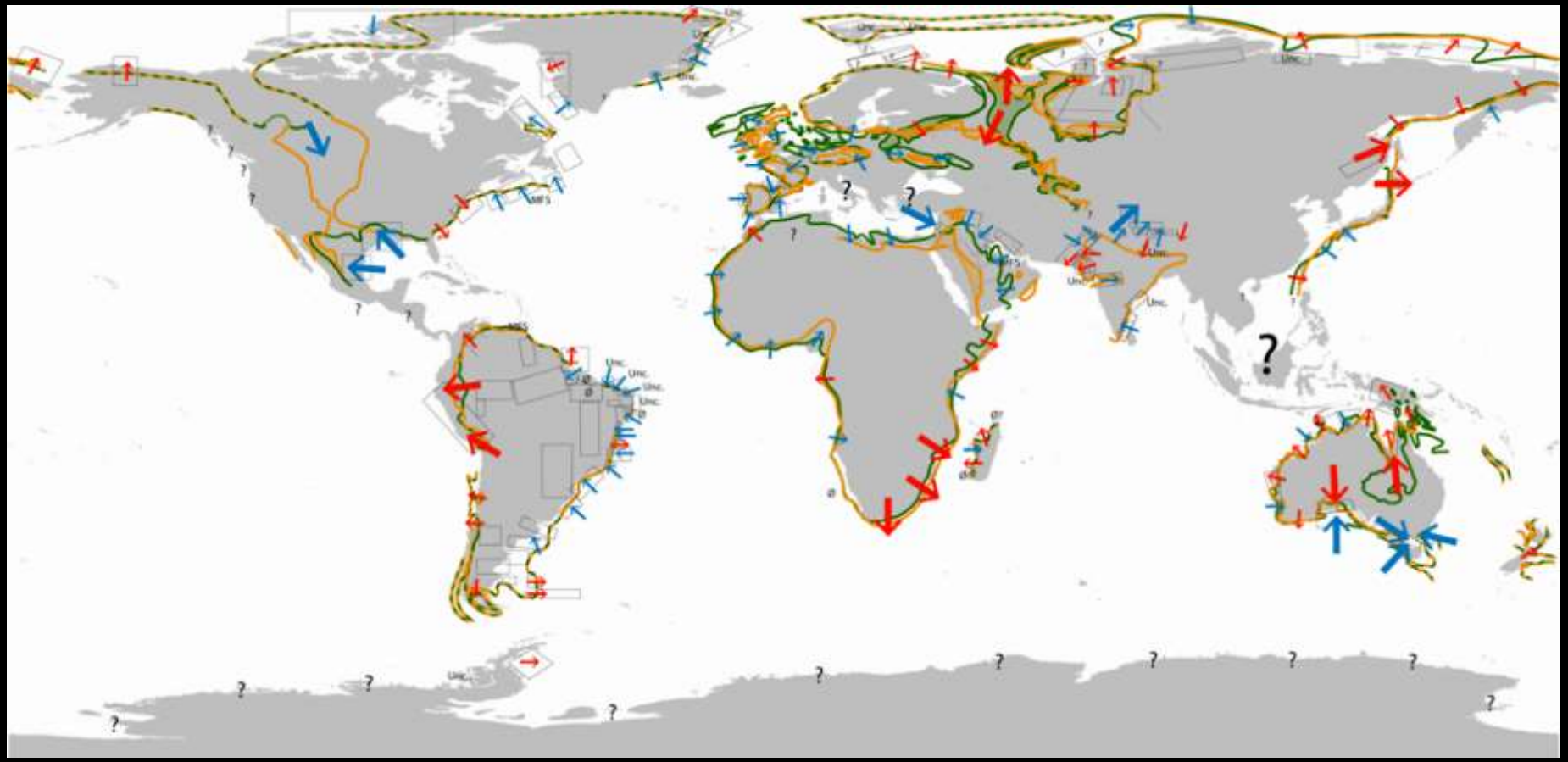


- ✓ **Local variations** $\lambda > 1000$ km
- ✓ **World ocean volume variations**

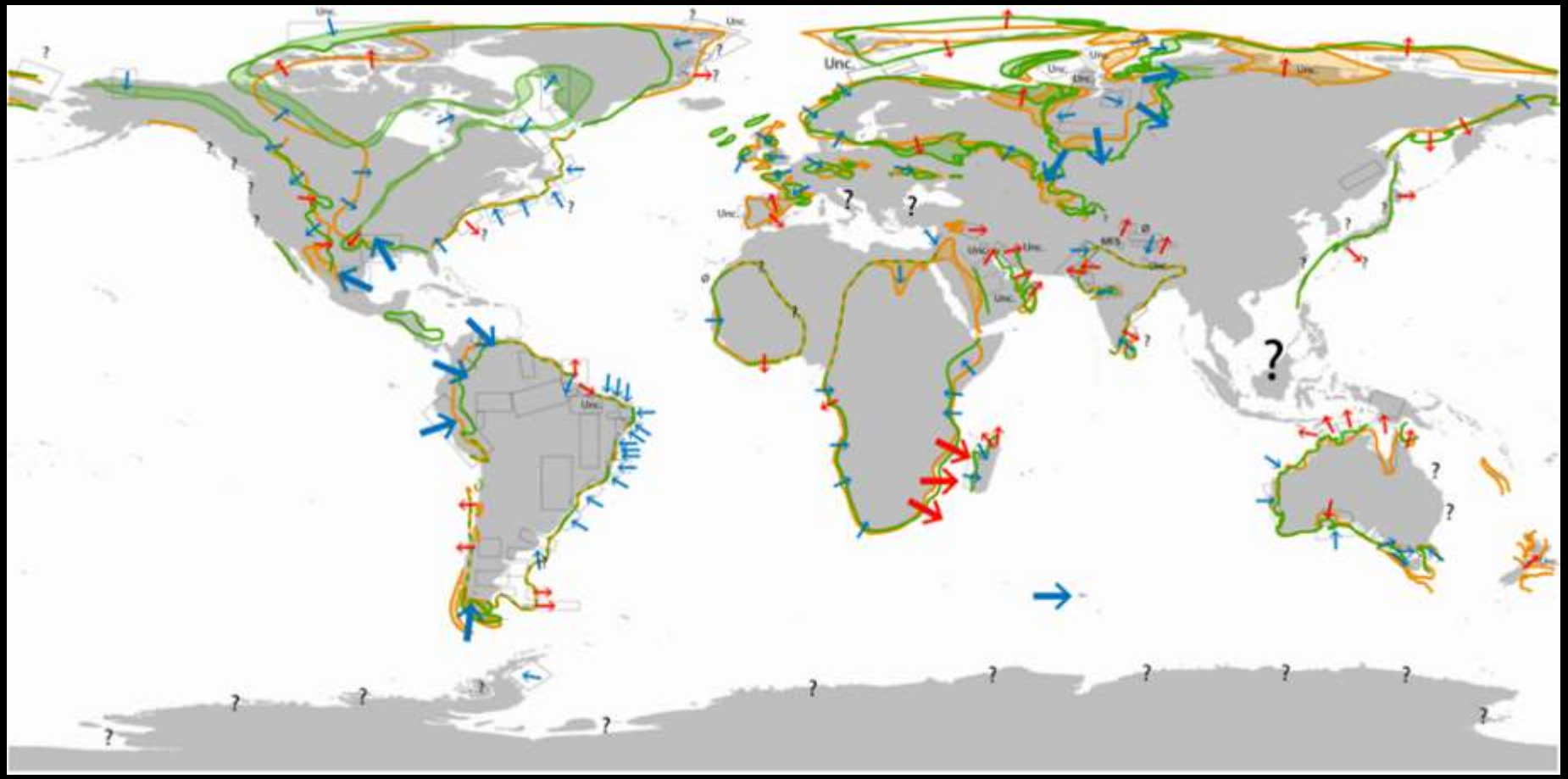
LE SIGNAL EUSTATIQUE



ALBIAN – CENOMANIAN : 100 Ma



CENOMANIAN – TURONIAN: 94 Ma



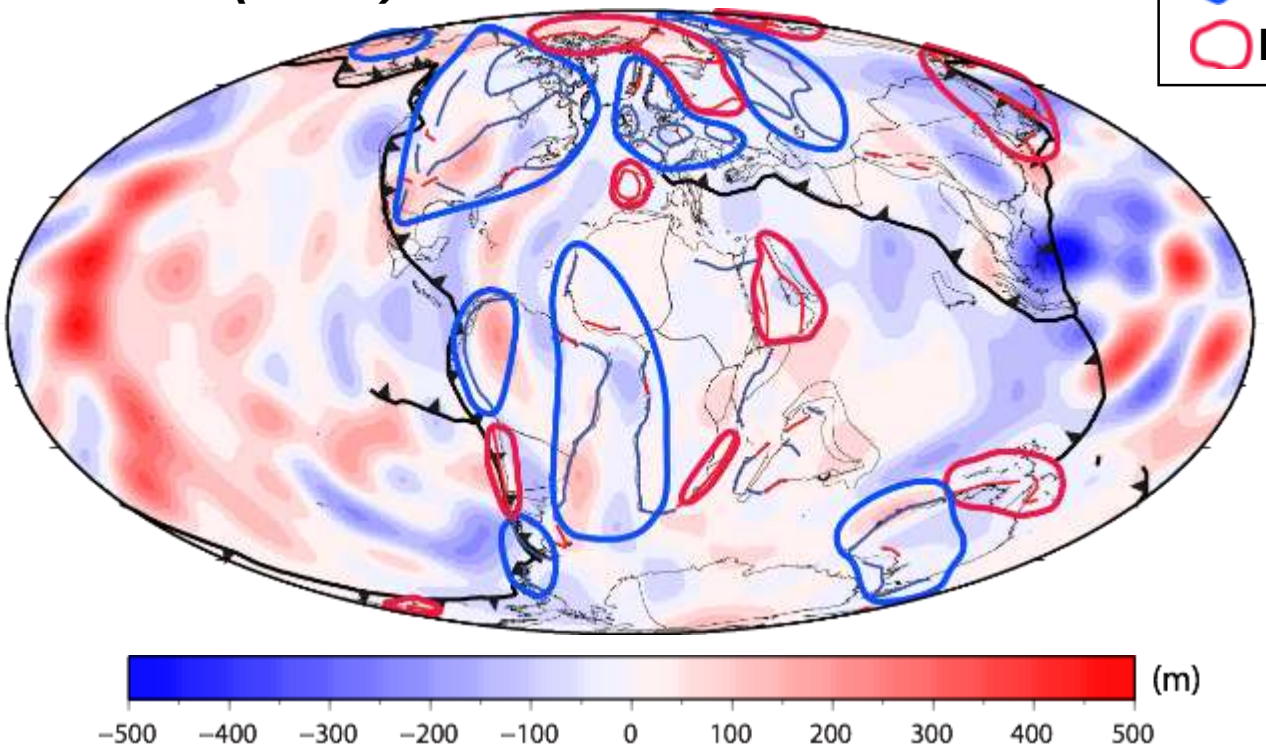
SHORELINES: Cenomanian
Turonian
TRANSGRESSION
REGRESSION

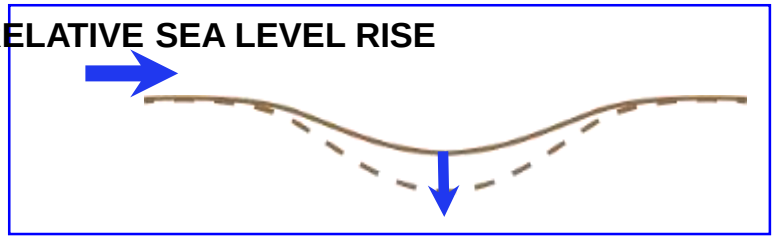
SIGNAL EUSTATIQUE & TOPOGRAPHIE DYNAMIQUE

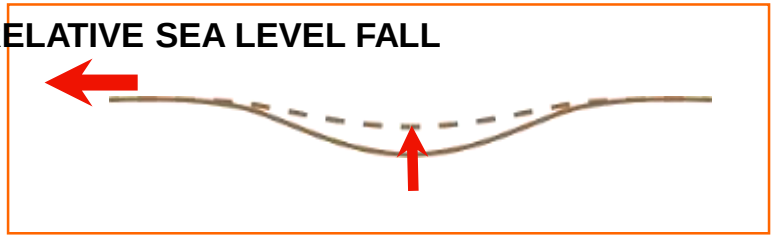
AMPLITUDE VARIATIONS OF THE DYNAMIC TOPOGRAPHY VERTICAL MOVEMENTS

(based on Müller *et al*., 2008, using model predictions at 100 and 90 Ma)

Cenomanian - Turonian (94 Ma)

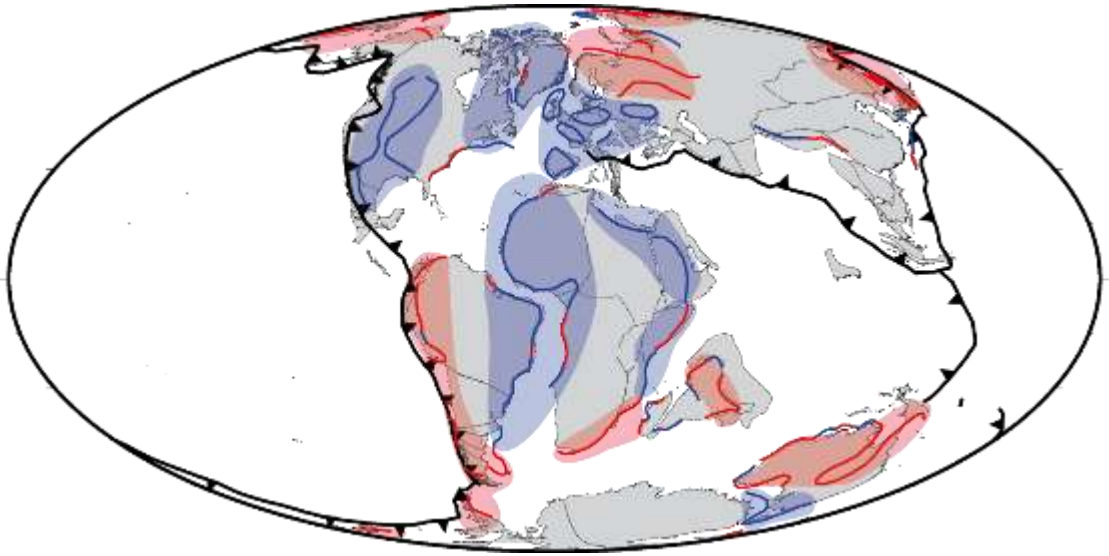




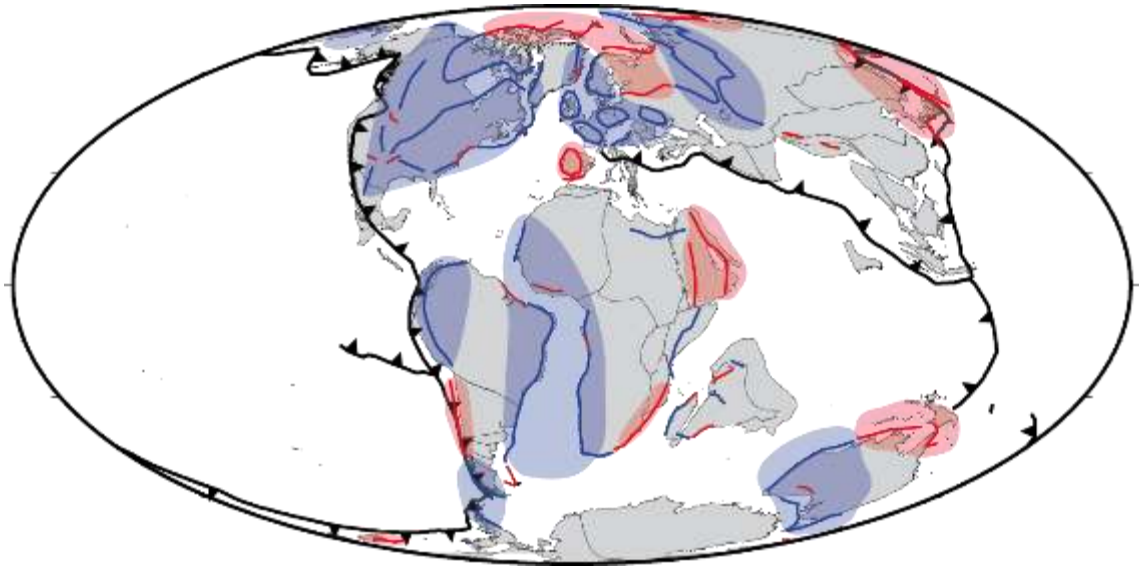


SIGNAL EUSTATIQUE & TOPOGRAPHIE DYNAMIQUE

ALBIAN – CENOMANIAN: 100 Ma



CENOMANIAN – TURONIAN: 94 Ma



- ✓ **MAXIMUM FLOODING: Turonian (94-92 Ma)**
- ✓ **NO WORLD-SCALE TRANSGRESSION**

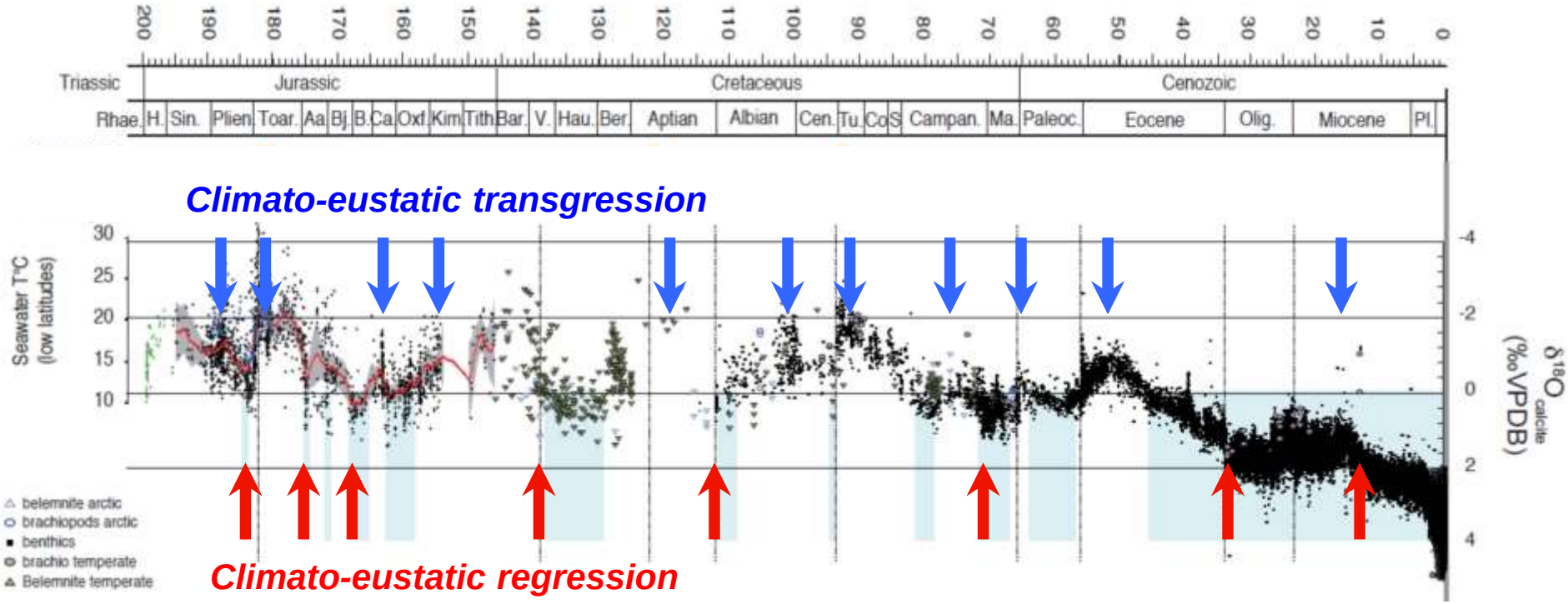
Processes ?

Transgression

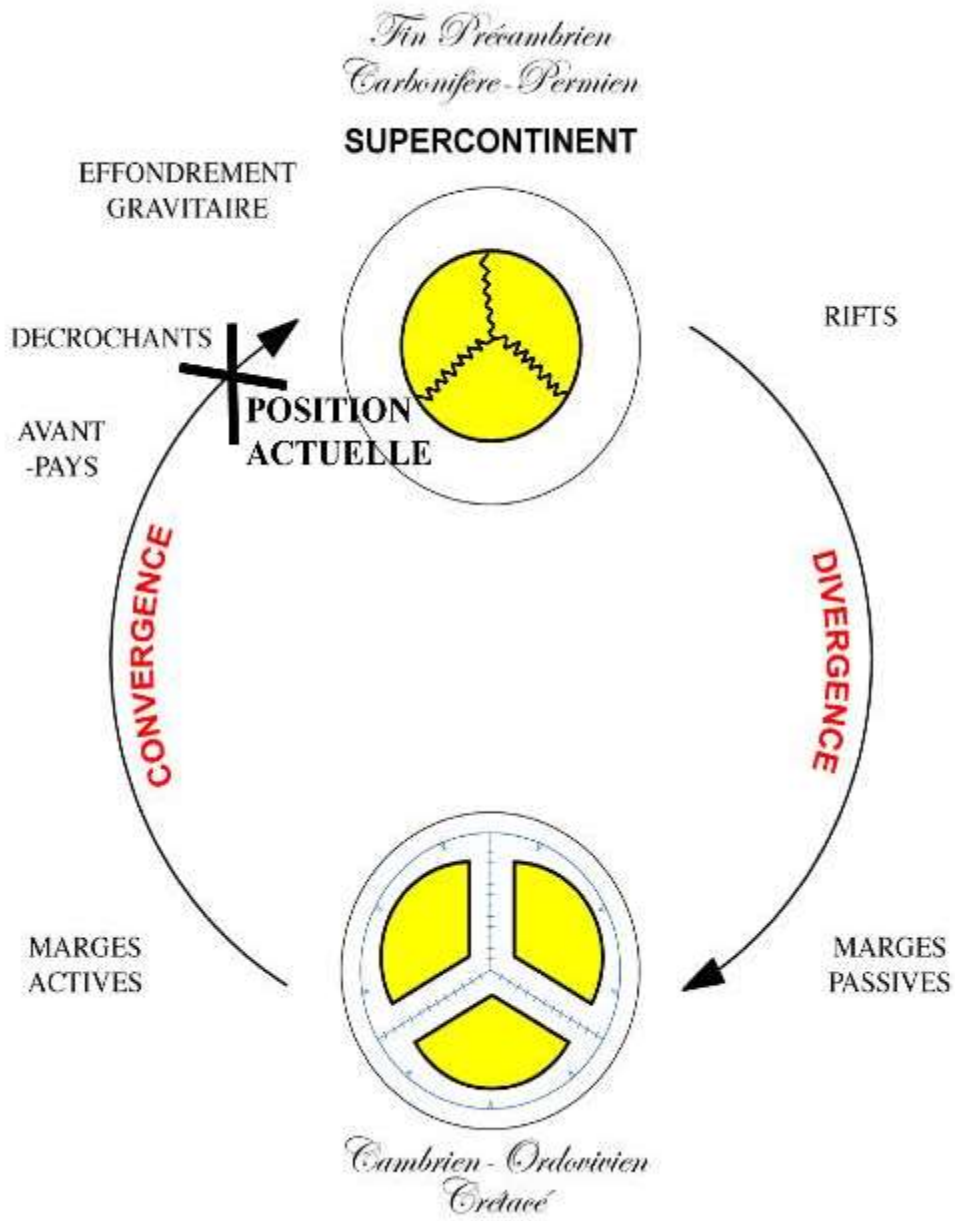
Regression

LE SEUL SIGNAL EUSTATIQUE GLOBAL : LE CLIMATO-EUSTATISME ?

Sea water temperature variations since 200 Ma: a proxy of climato-eustasy?



LE RELIEF DE LA TERRE



CREATION DE RELIEFS :

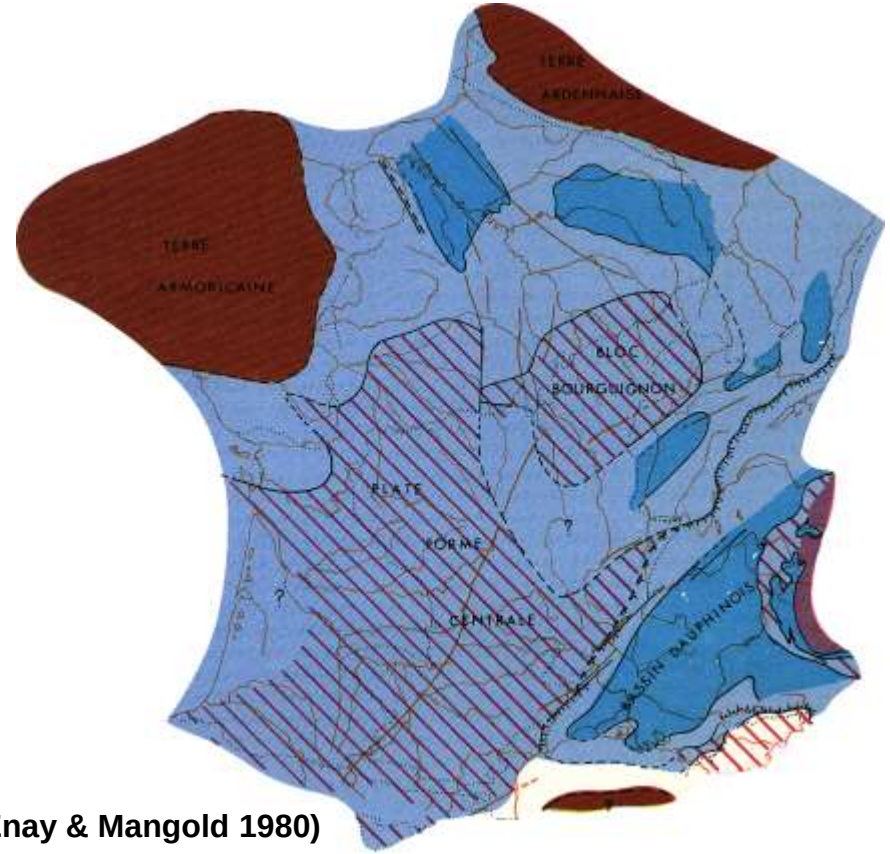
- **Les domaines extensifs**
- **Les domaines compressifs**
- **Le volcanisme**

LE RELIEF DE LA TERRE

⇩ QUELLE HYPSOMETRIE POUR L'ANCIEN

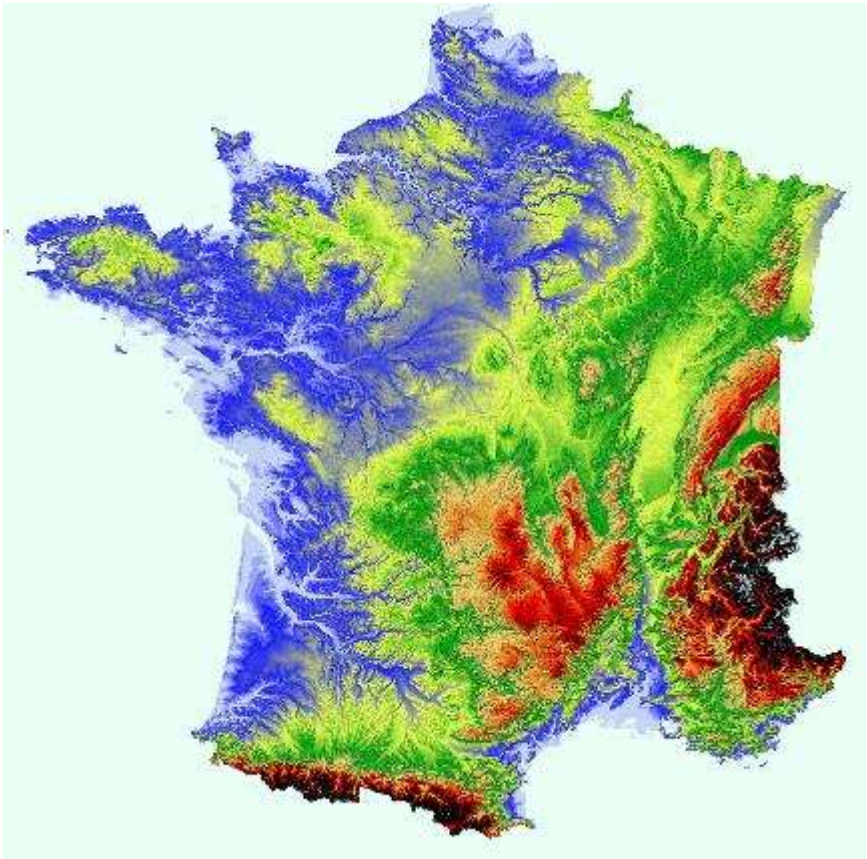
LA DISTRIBUTION ACTUELLE DES ALTITUDES CONTINENTALES
EST - ELLE SIMILAIRE A CELLE DU JURASSIQUE TERMINAL / BASE CRETACE?

OXFORDIEN BASAL :

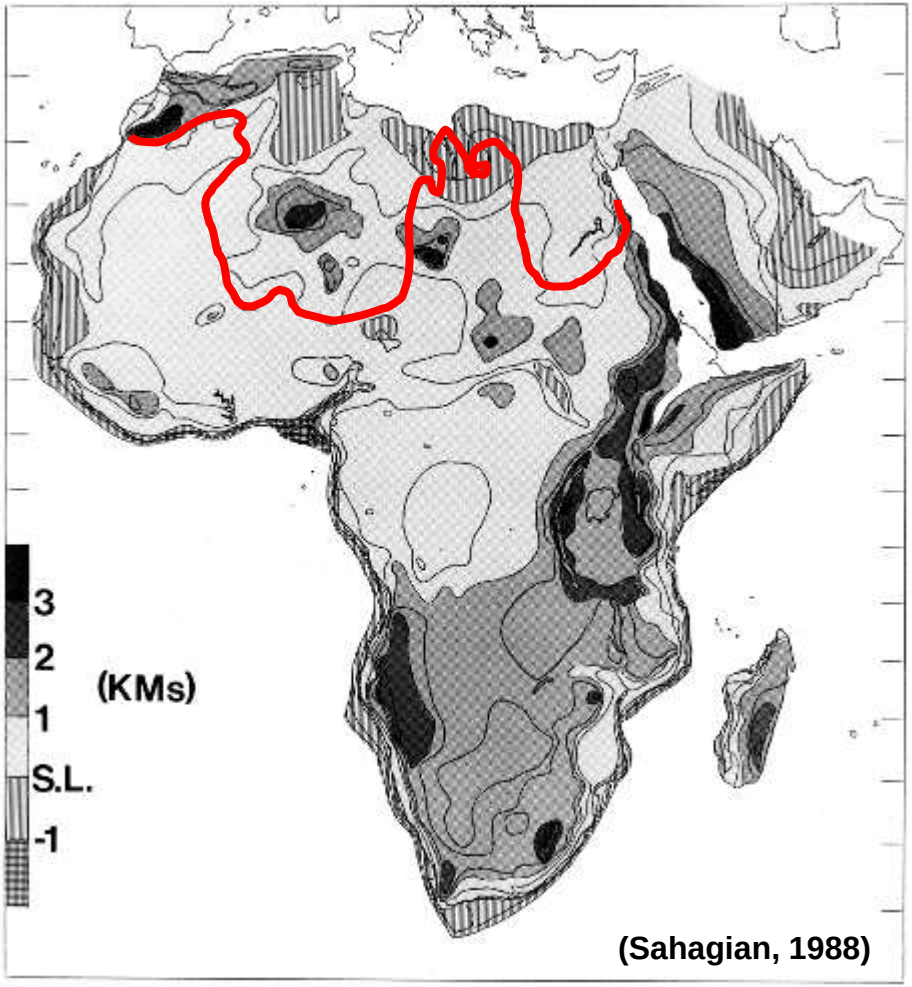


(Enay & Mangold 1980)

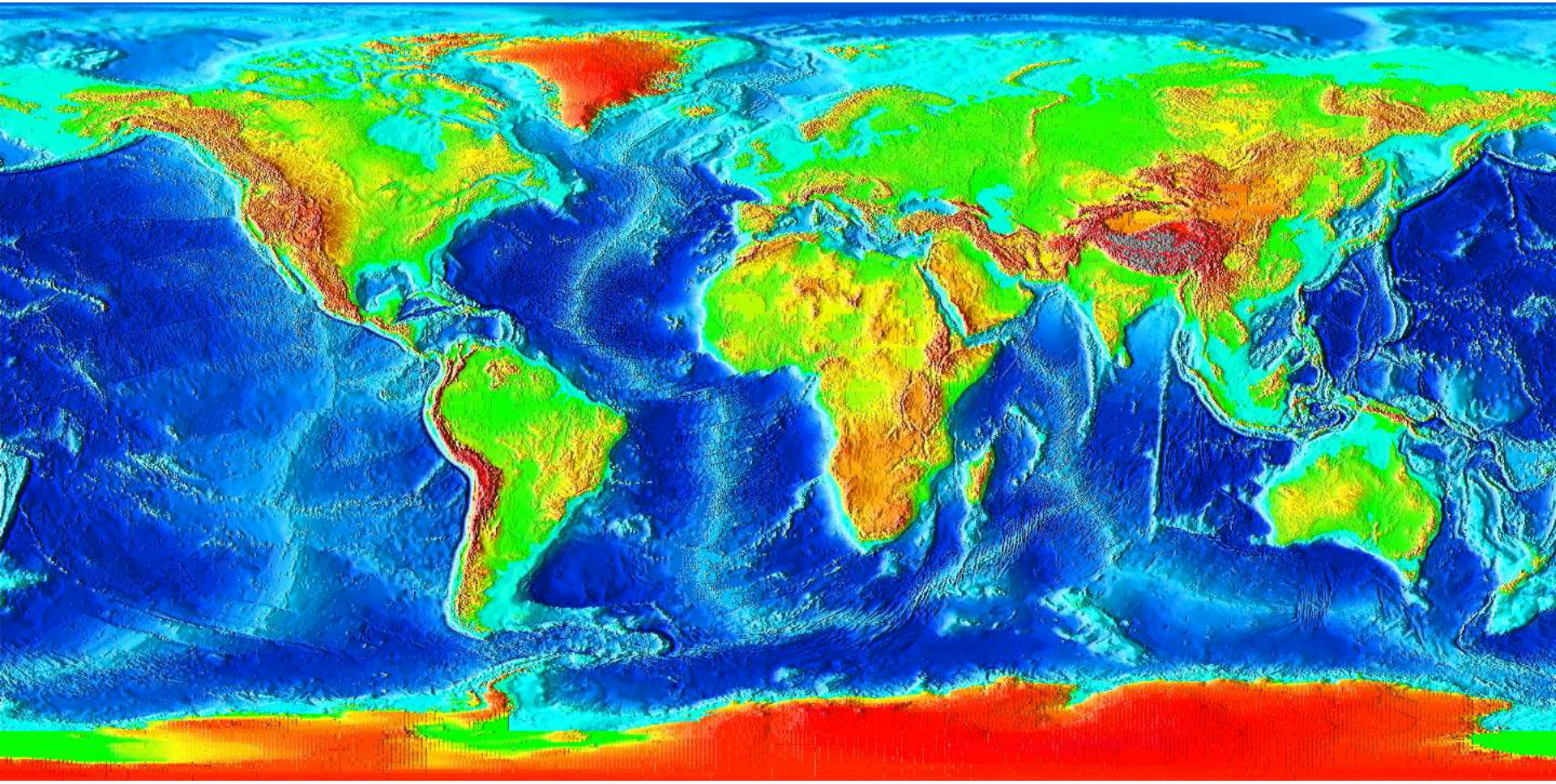
ACTUEL :



LE RELIEF DE LA TERRE

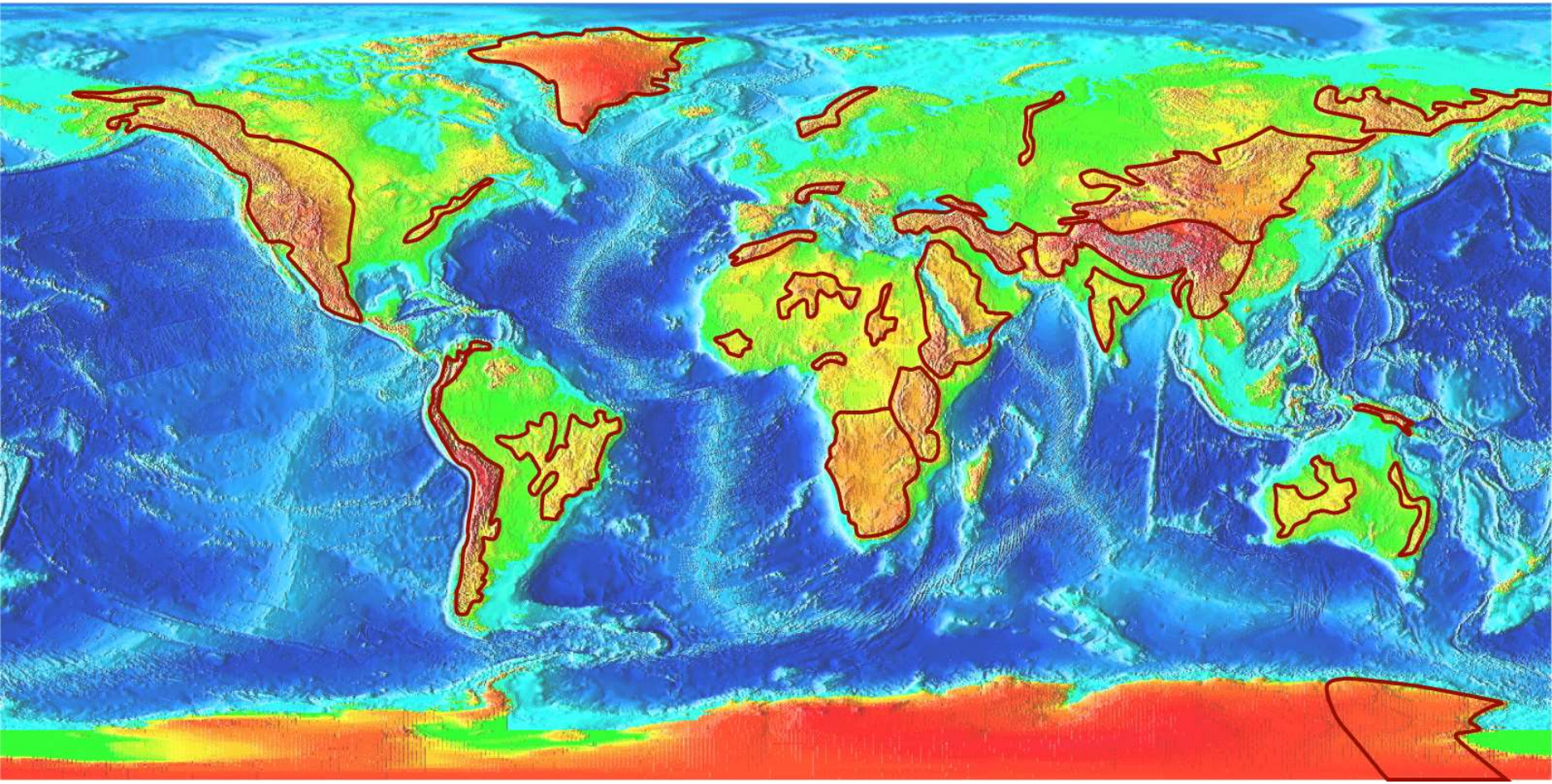


LE RELIEF DE LA TERRE

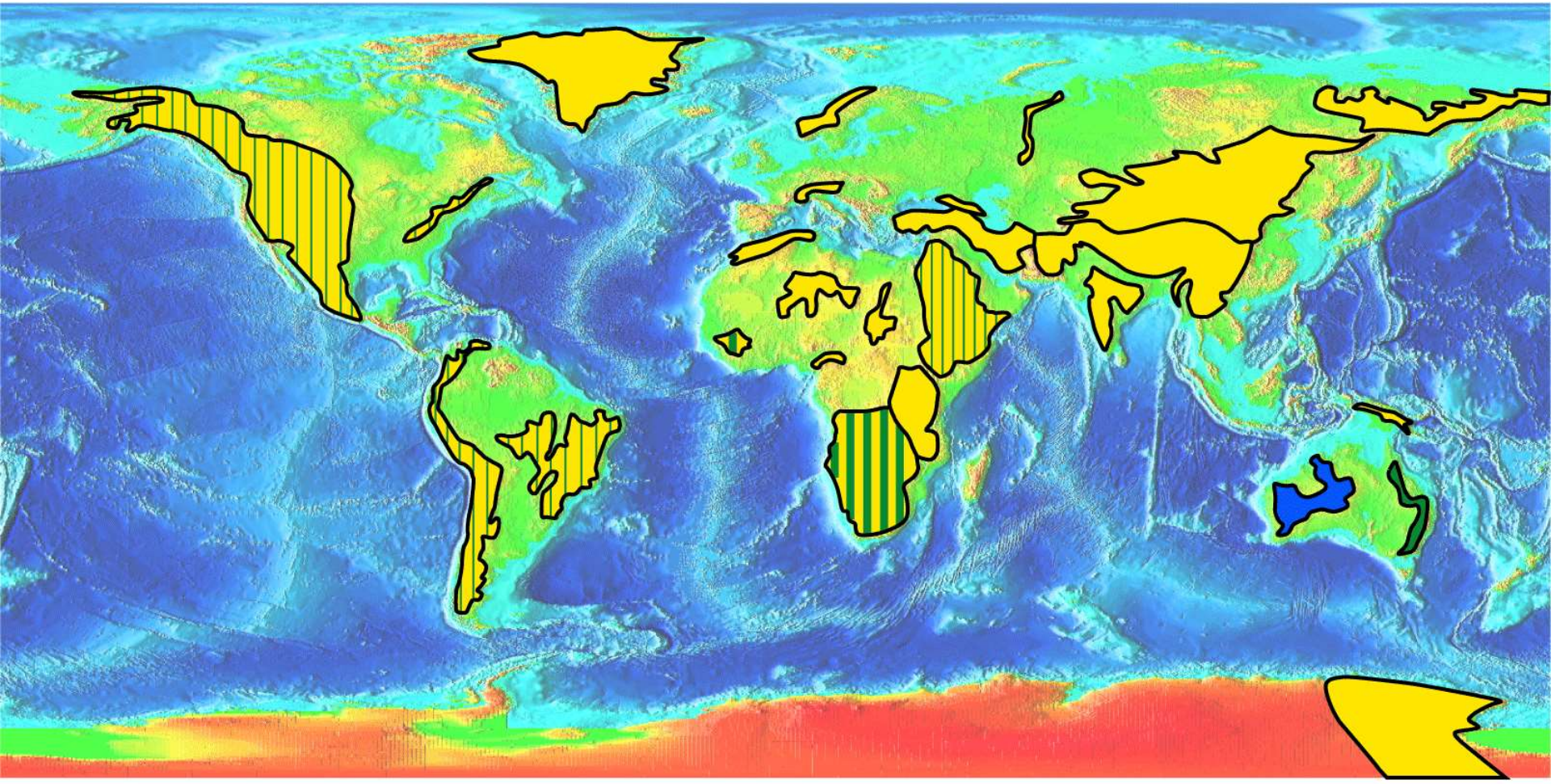


(NOAA)

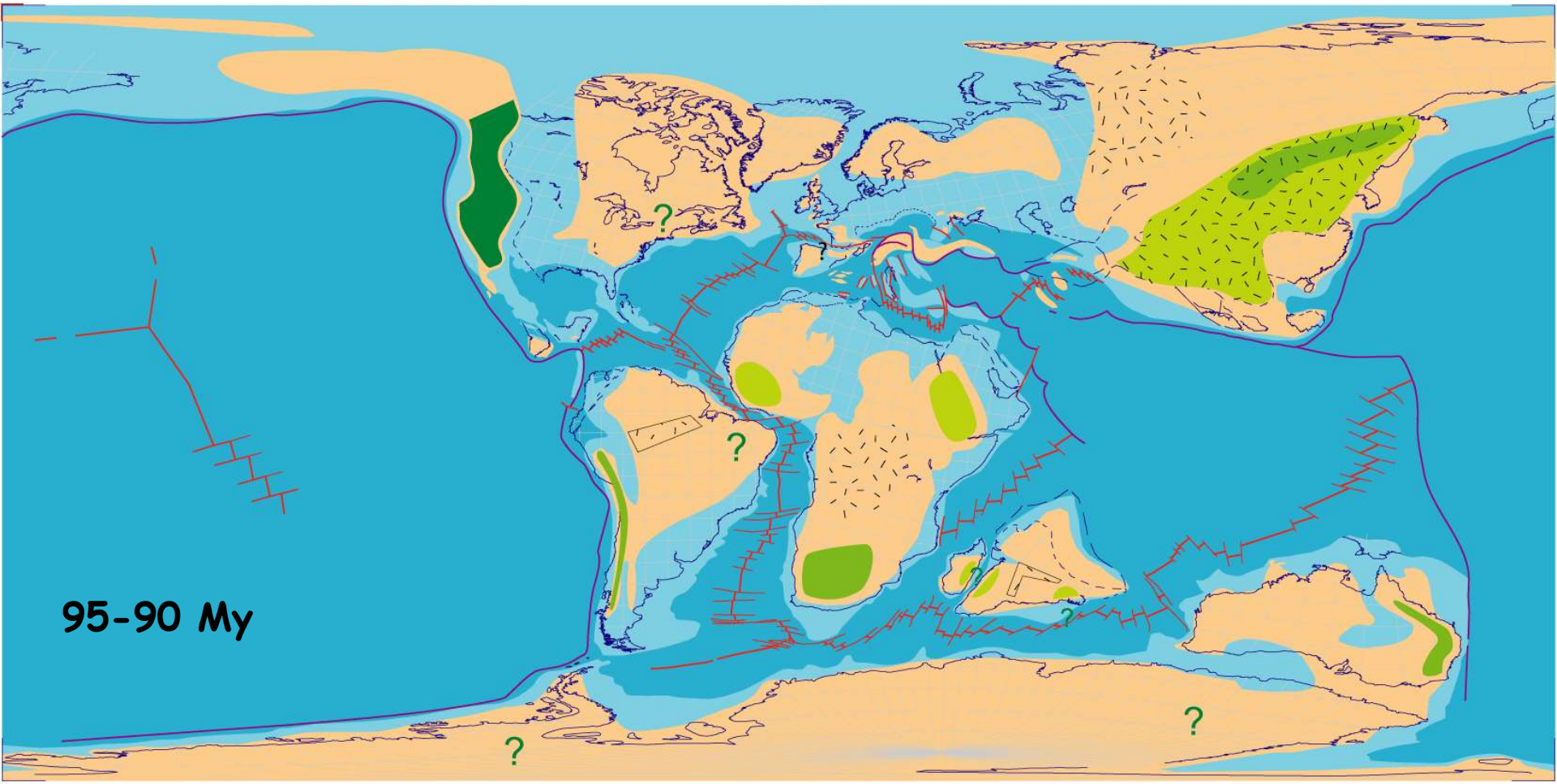
LE RELIEF DE LA TERRE



LE RELIEF DE LA TERRE



LE RELIEF DE LA TERRE AU CENOMANIEN



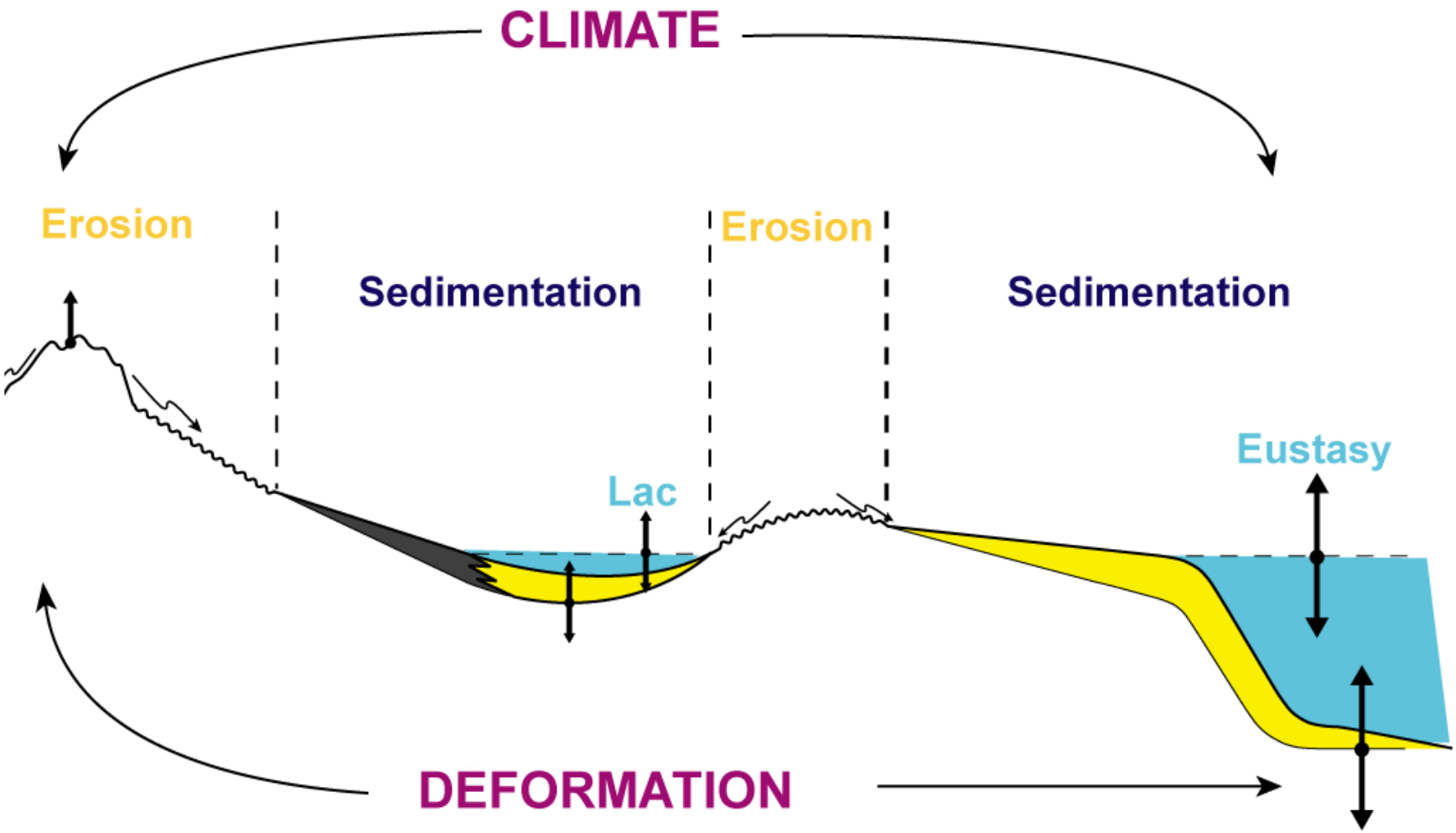
Paleoelevation

O 1.5-2 km

Continental subsiding area

Shallow marine subsiding area

LES FLUX SEDIMENTAIRES

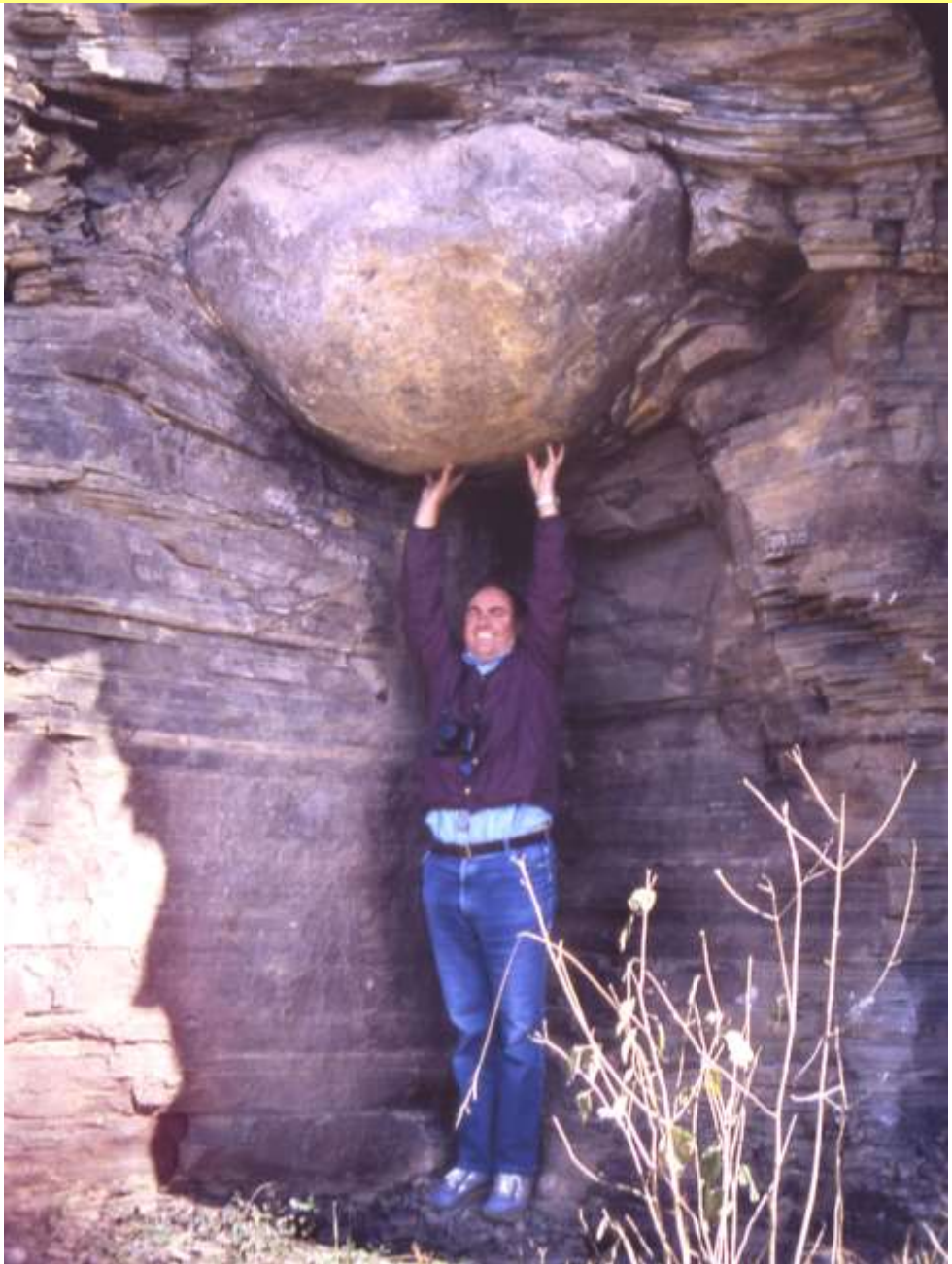


(Bourquin, 2004)

LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT

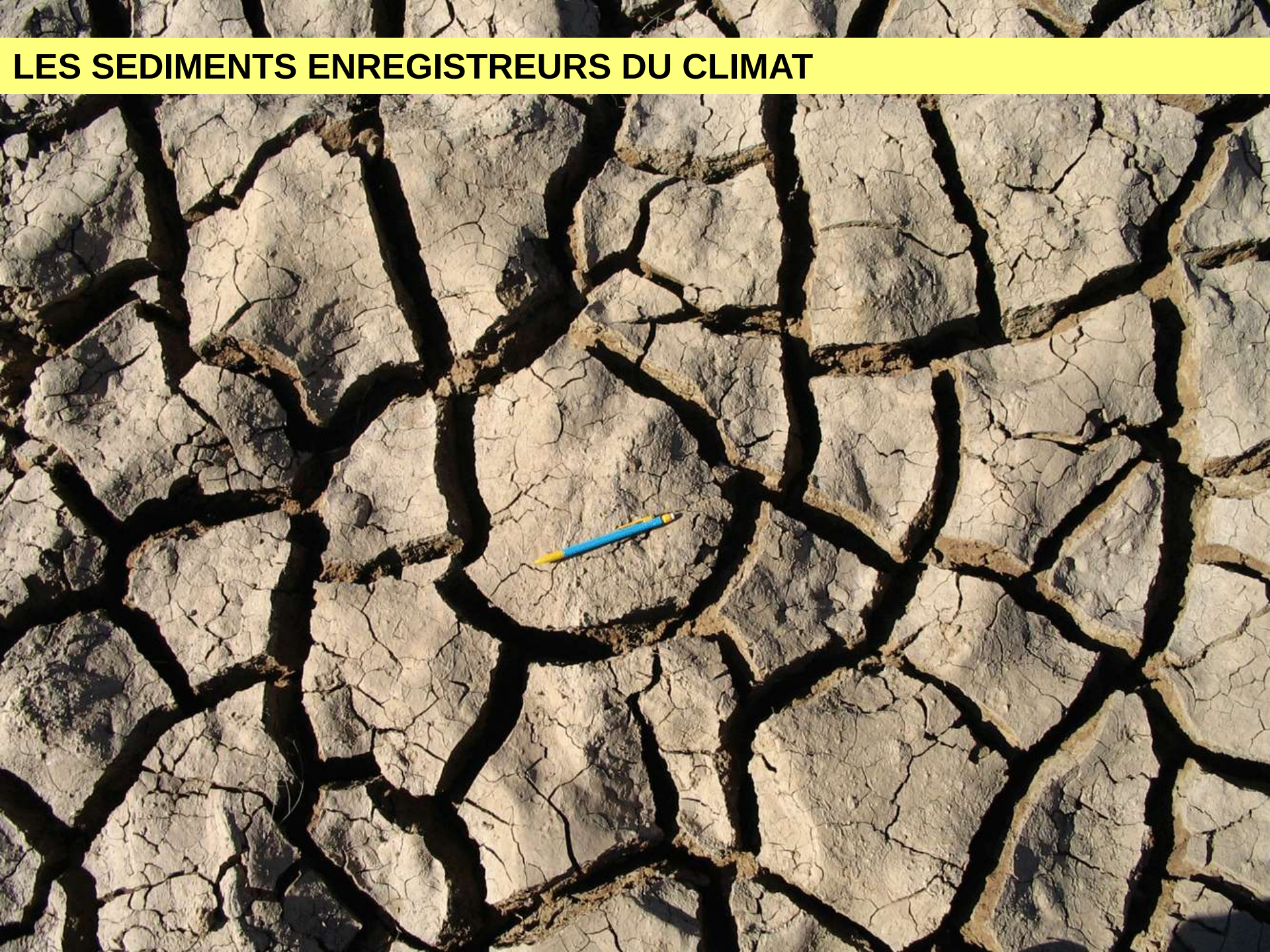
BASSIN DE MURZUQ (Libye)
ORDOVICIEN TERMINAL

LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT

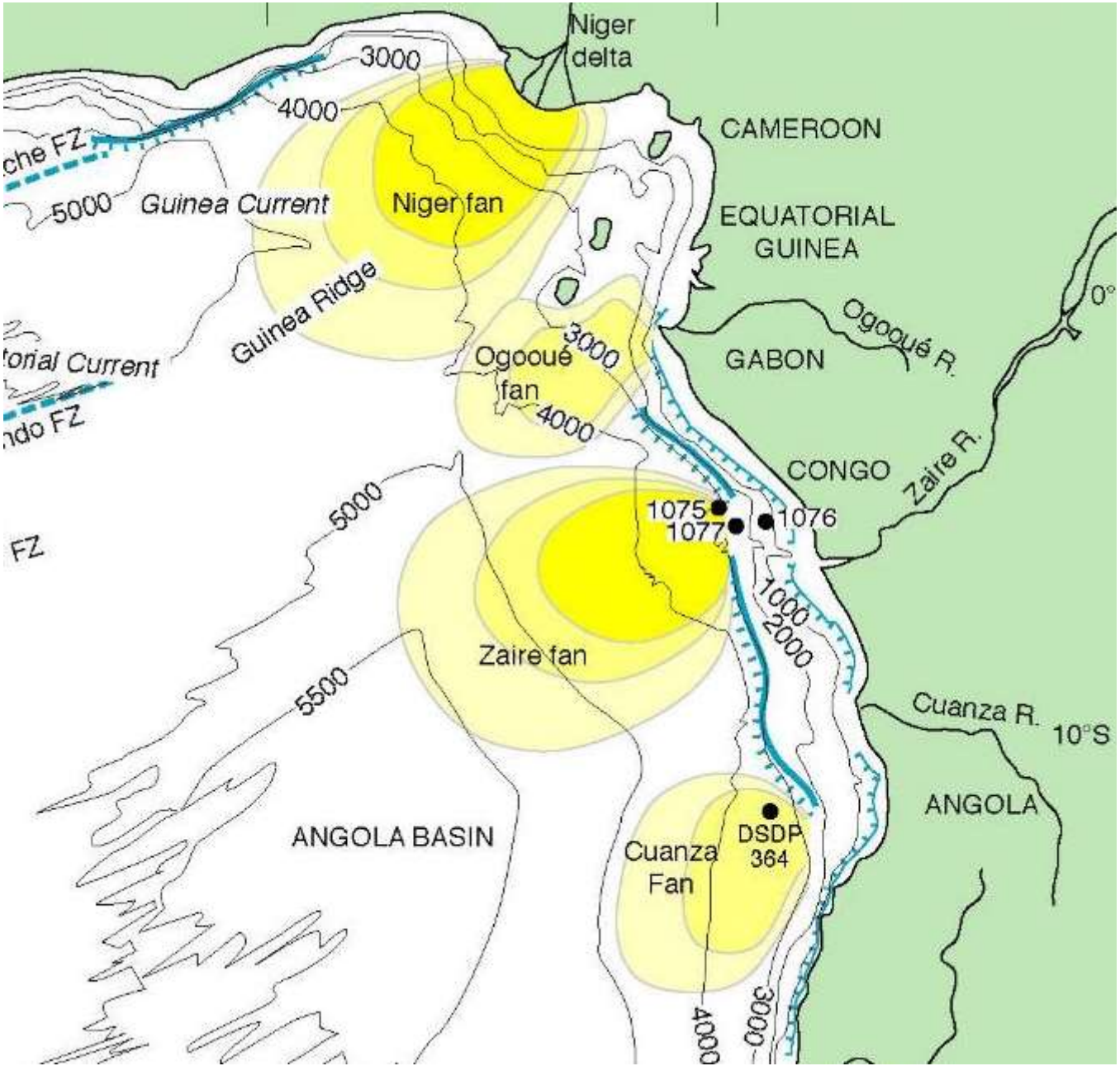


BASSIN DE PARANA (Brésil)
PERMO-CARBONIFERE
(photo : Max DEYNOUX)

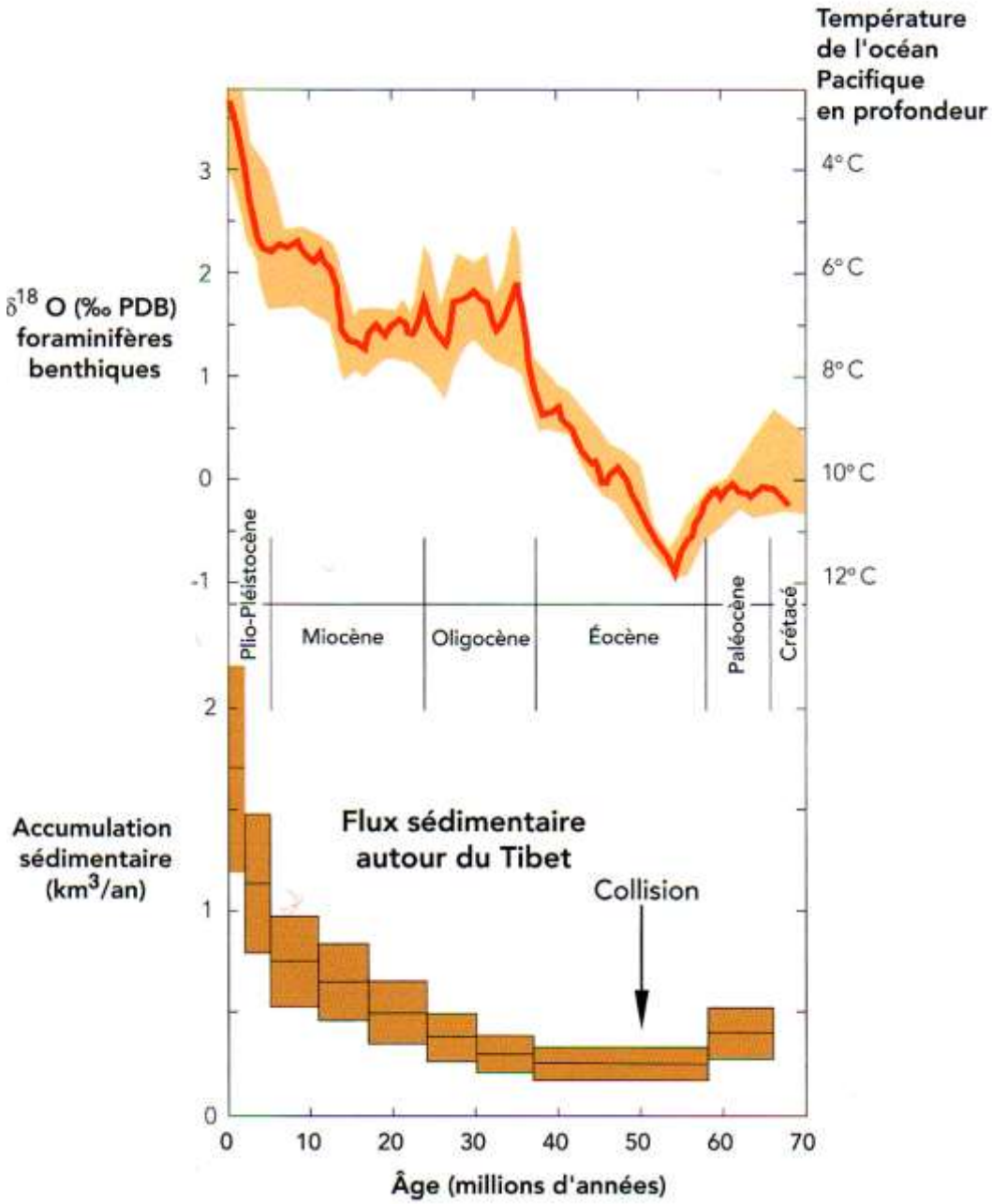
LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT



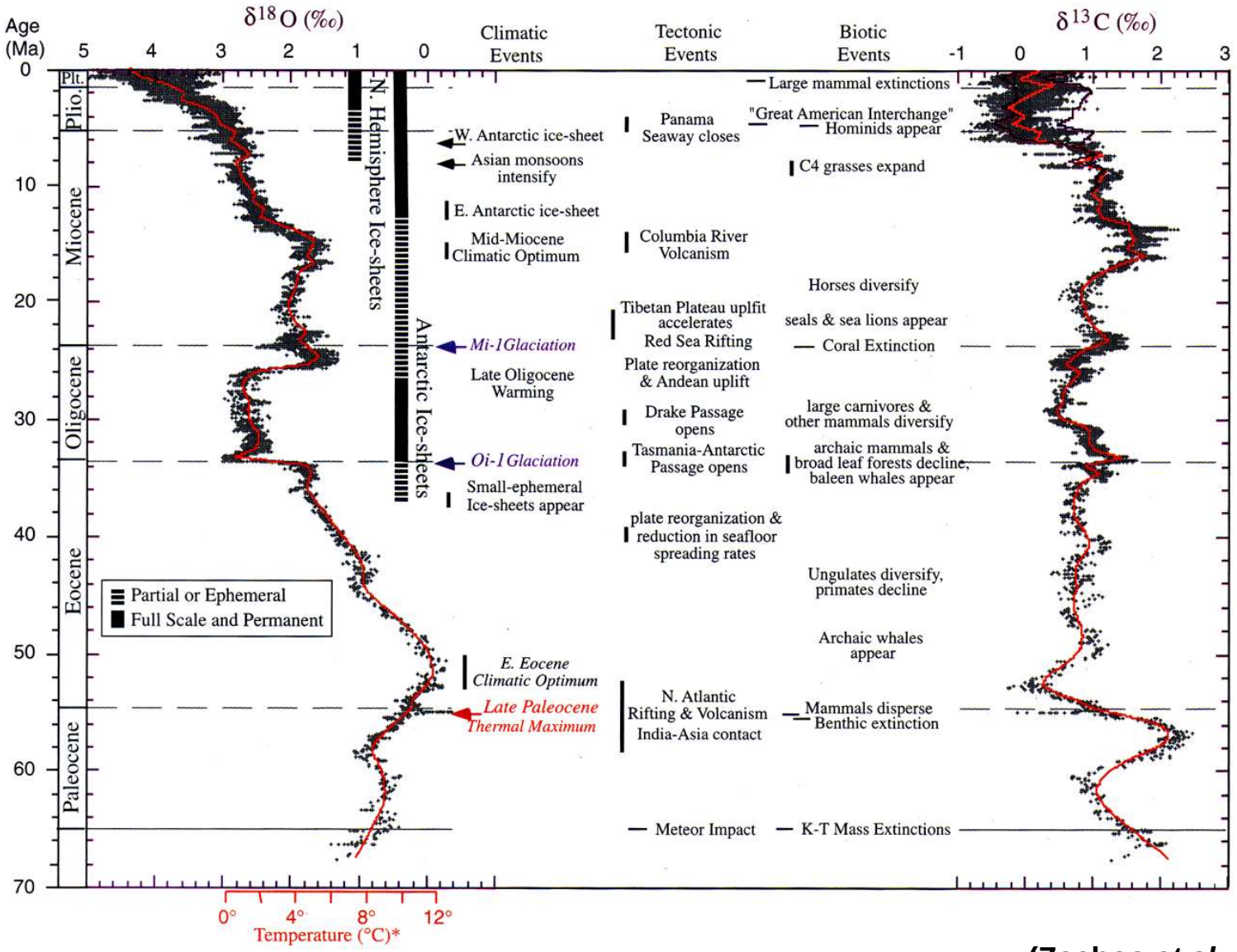
LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT



LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT

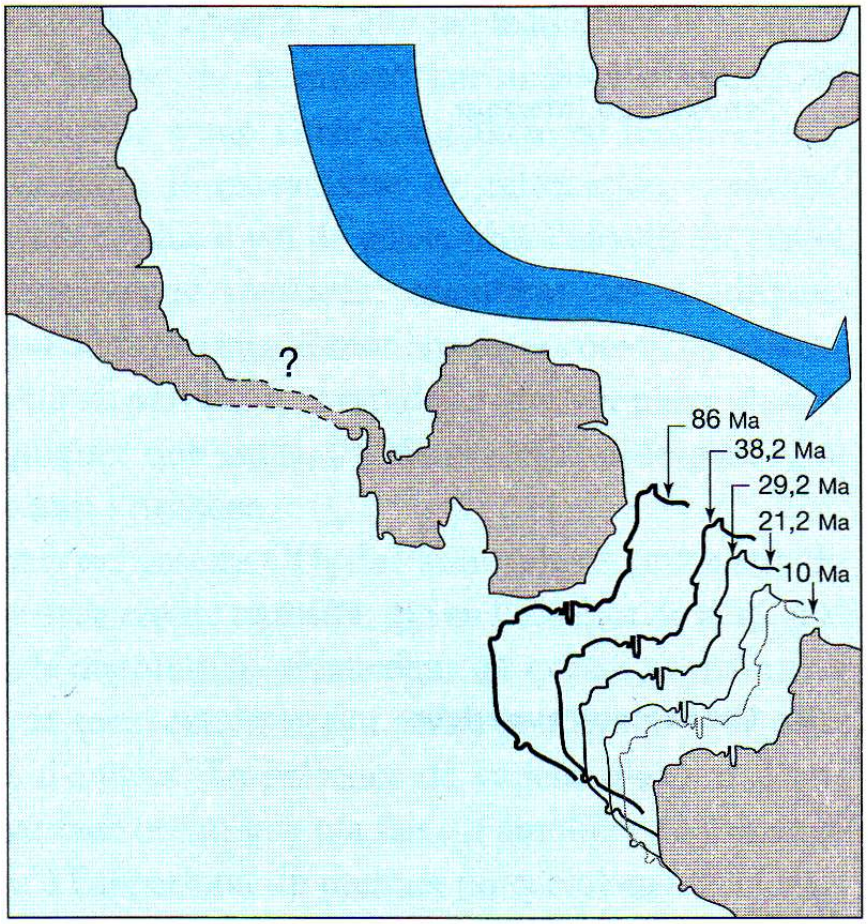


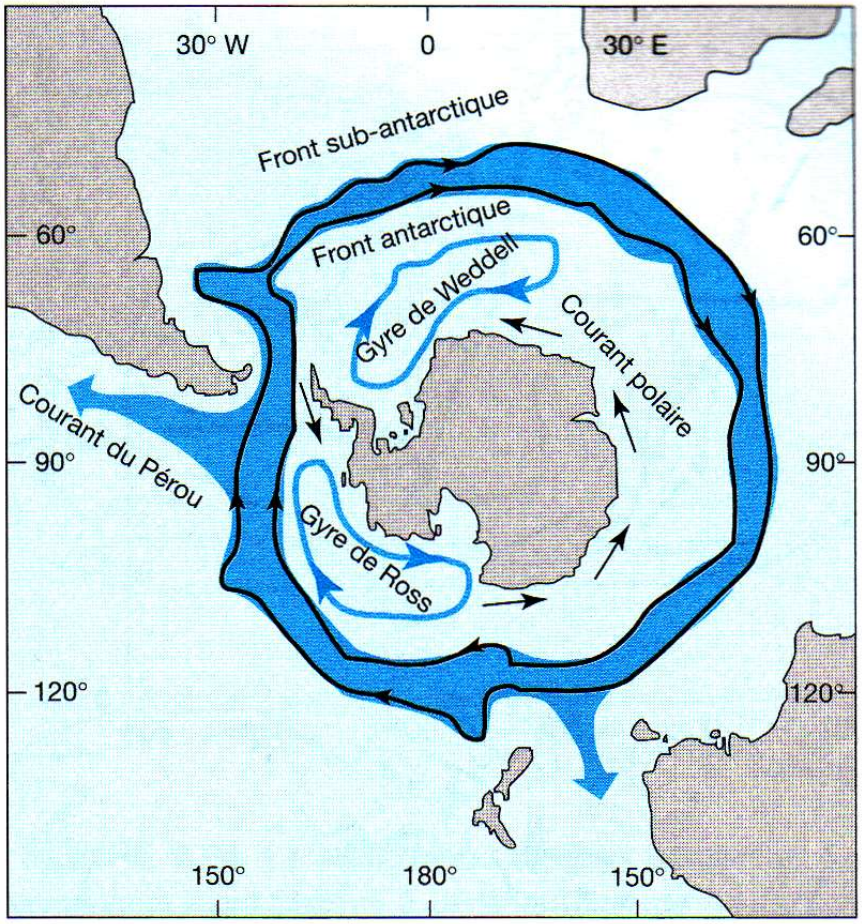
LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT



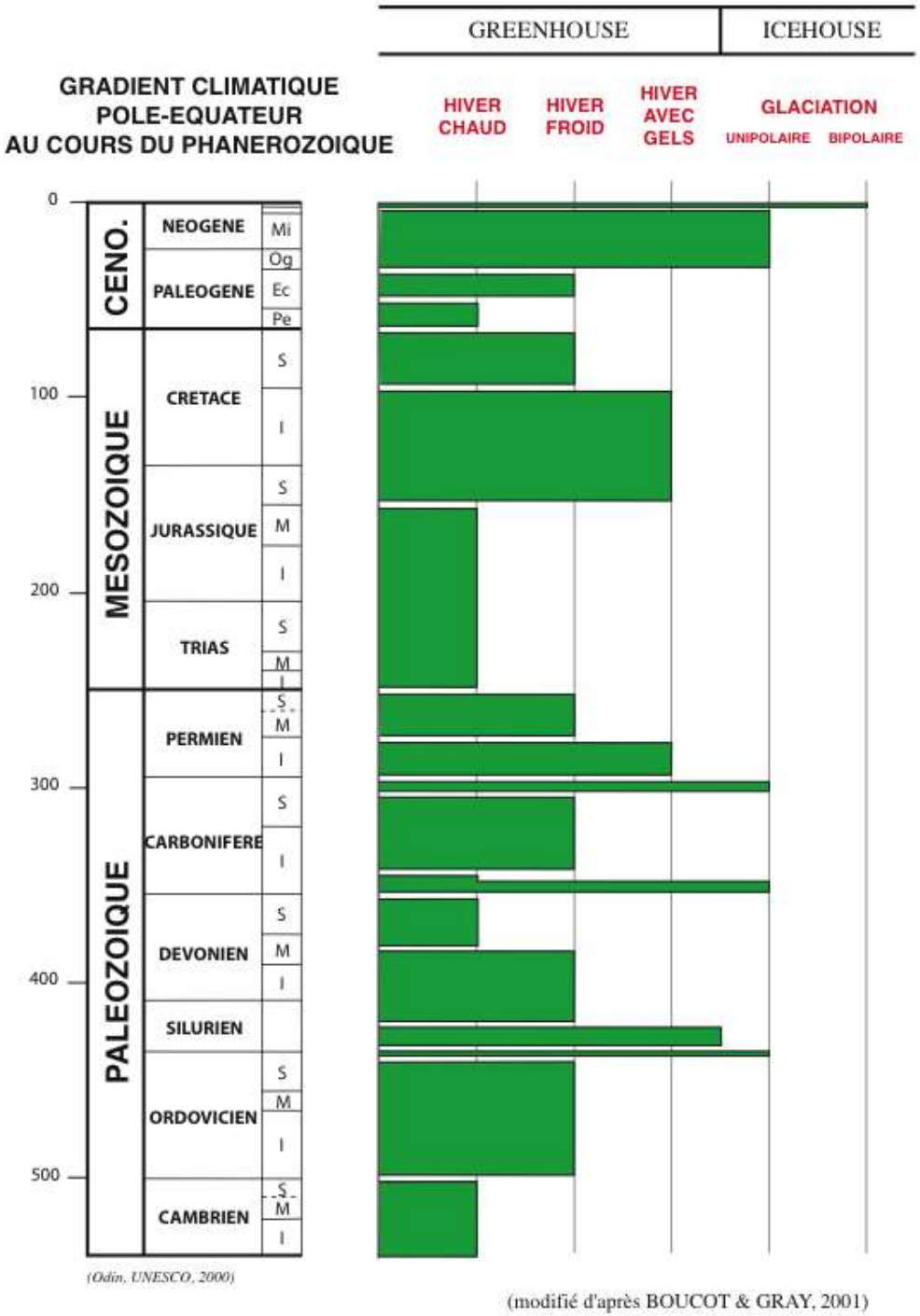
(Zachos *et al.*, 2001)

LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT





LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT



LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT

Contrôle géodynamique : le cycle de Wilson

- **Position des continents**
- **Altitude moyenne des continents**
- **Bilan d'altération des continents**
- **Circulation océanique**

Contrôle astronomique : les cycles de Milankovitch

Cycle du Carbone

- **Altération des silicates**
- **Volcanisme**
- **Végétation**

LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT

La Snow - Ball

730 Ma Sturtienne
650-630 Ma Marinoenne
Contexte panafricain
Tectonique Varangienne
Masse continentale à l'équateur?

Ordovicienne : l'Hirlantienne

durée 1 Ma?
les faciès du Sahara

La Famenien - Turnesienne

Masse contientale au pôle Sud
Post chaine eo-varisque
Post apparition des plantes vasculaires

La Permo-Carbonifère

Masse continentale au pôle et fortes altitudes
Chaine Hercynienne
Post carbonifère : végétation

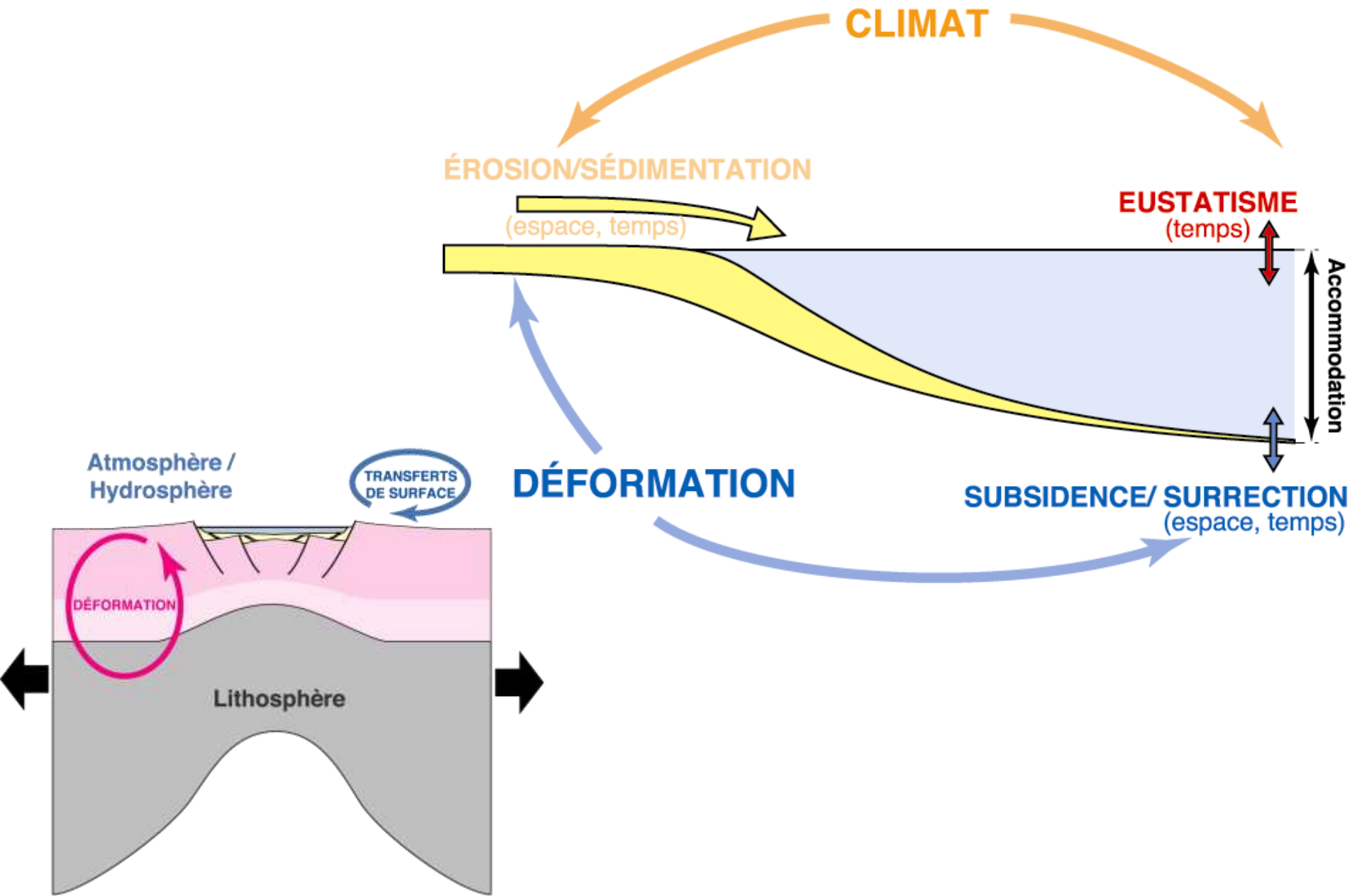
A l'Oligocène (24 Ma)

Masse continentale au pôle
Post chaine eo-varisque

Plio-Pleistocène

Masse continentale aux 2 pôles
Point chaud sous le pôle sud
Rift du Groenland

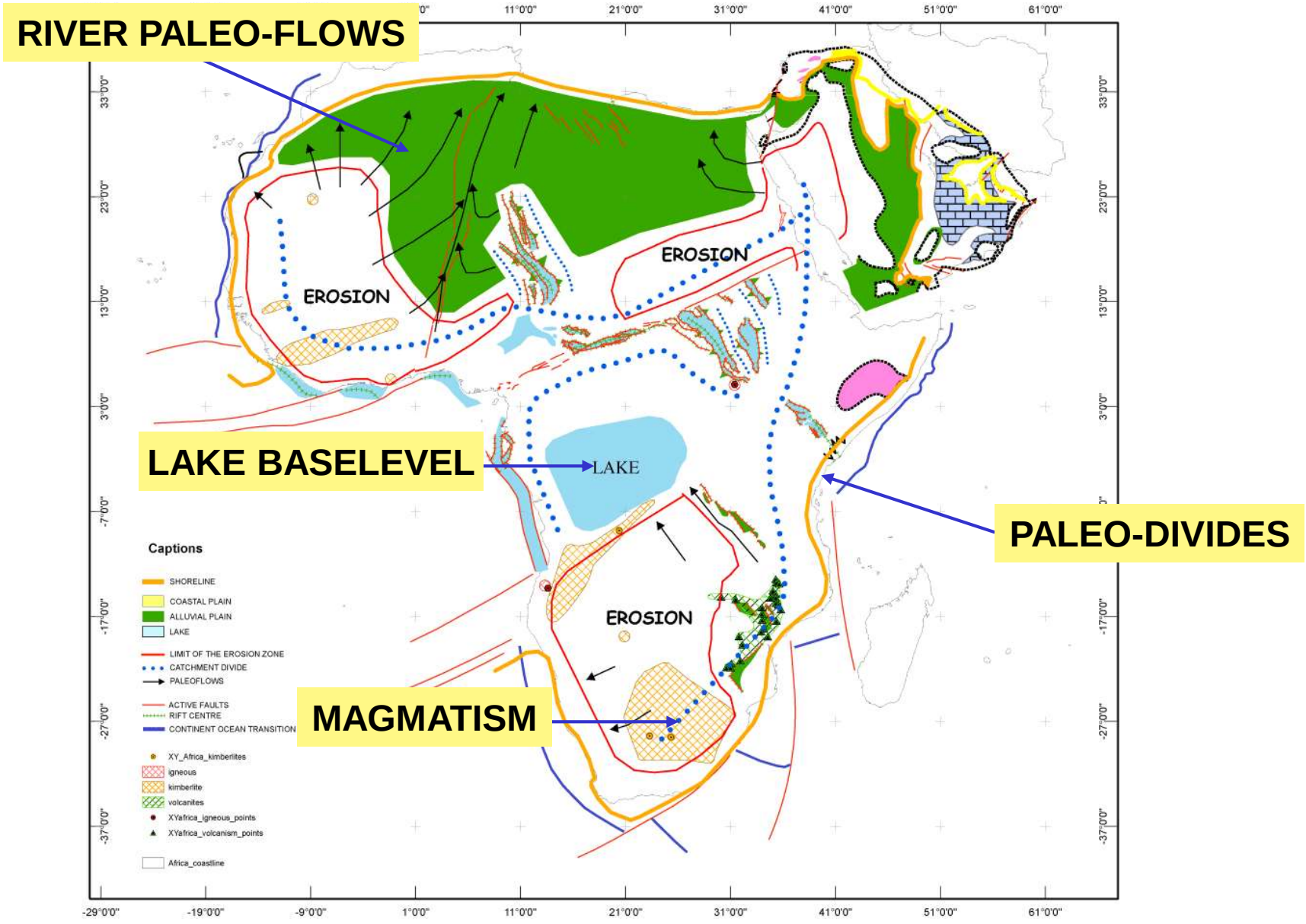
LES ARCHIVES SEDIMENTAIRES



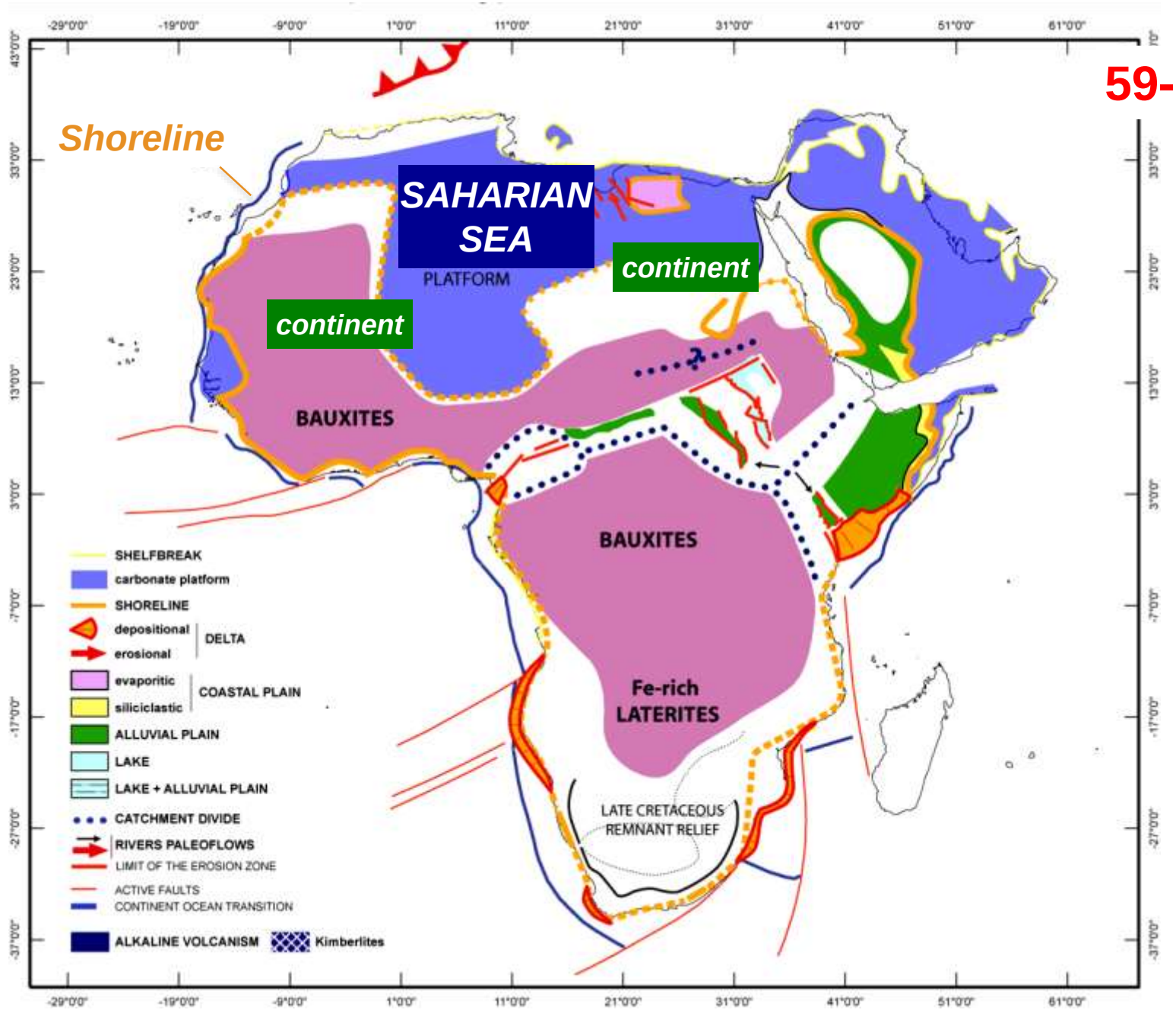
MERCI DE VOTRE ATTENTION

REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES

BARREMIAN (130-125 Ma)



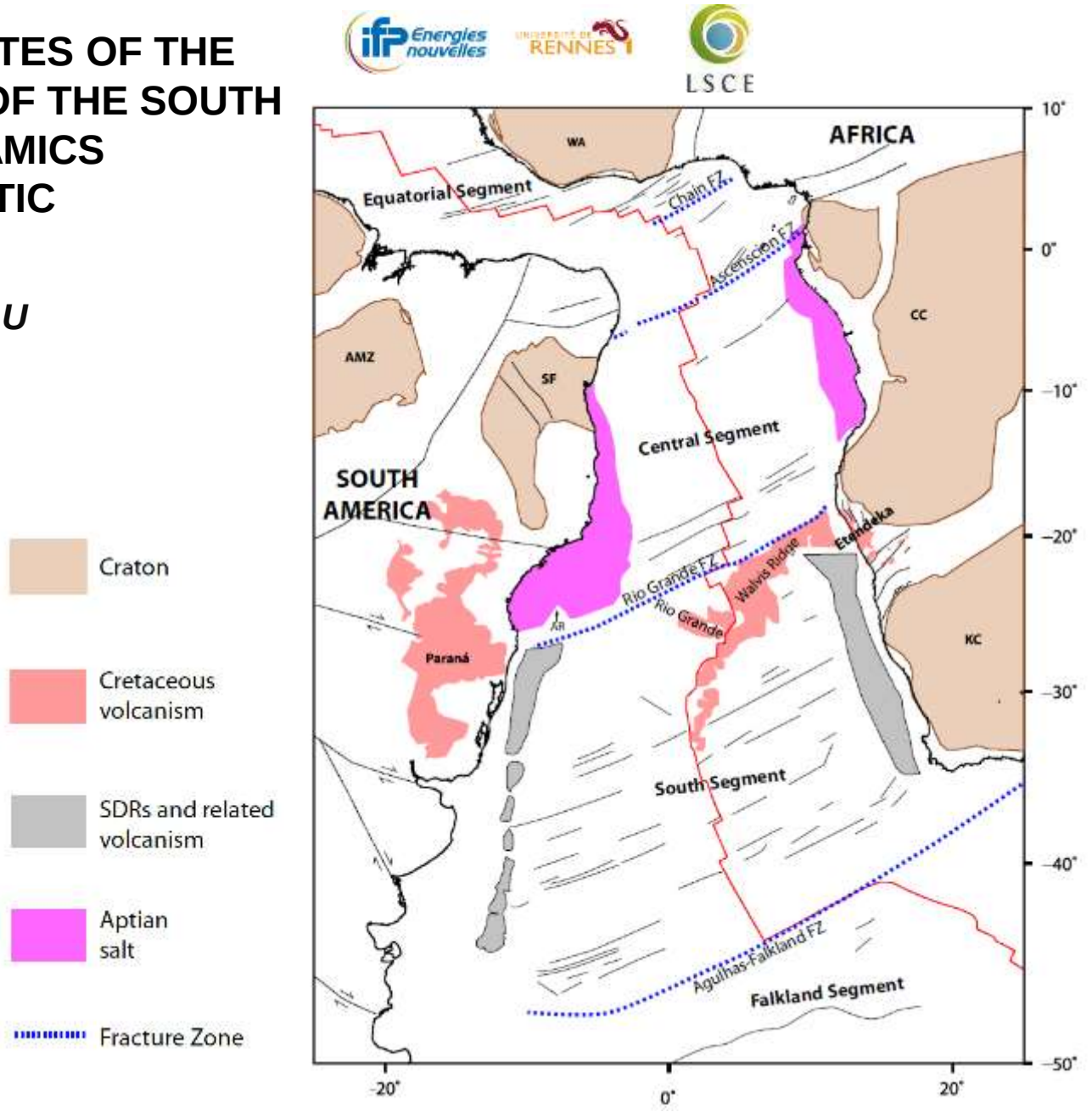
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES



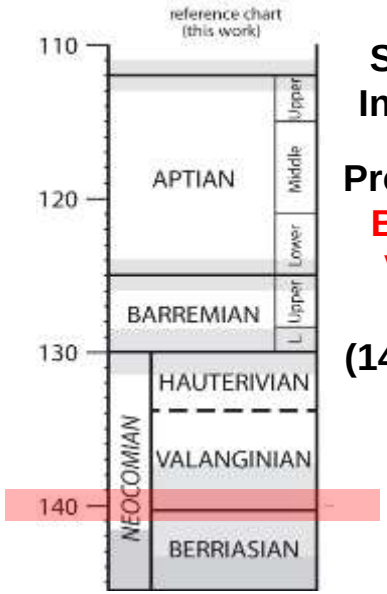
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES

THE APTIAN EVAPORITES OF THE CENTRAL SEGMENT OF THE SOUTH ATLANTIC : GEODYNAMICS CONTEXT AND CLIMATIC IMPLICATIONS

Thèse A. C. CHABOUREAU

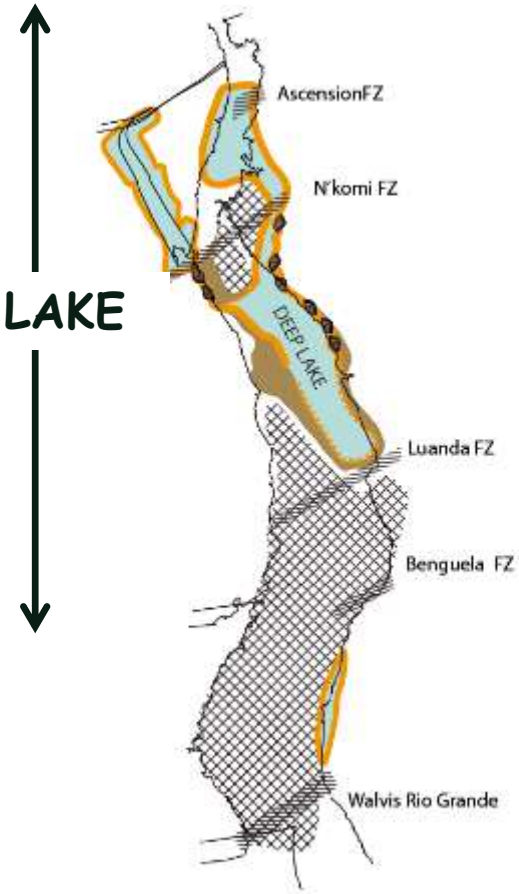


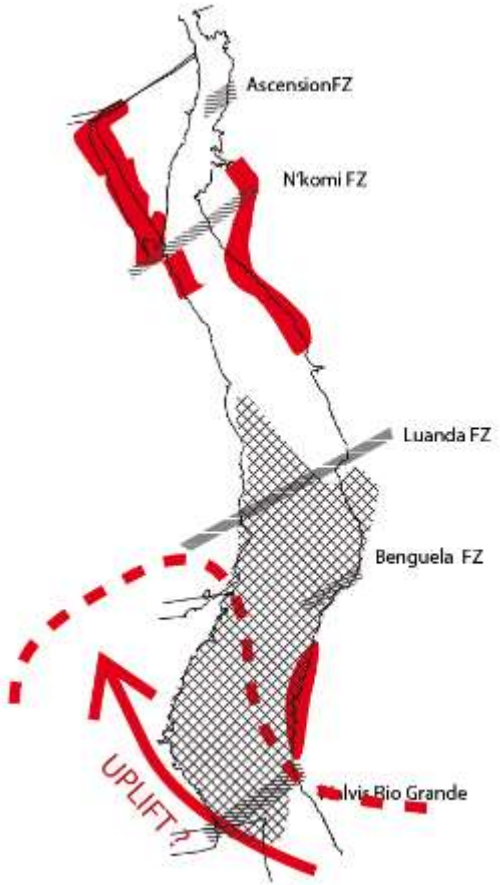
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES

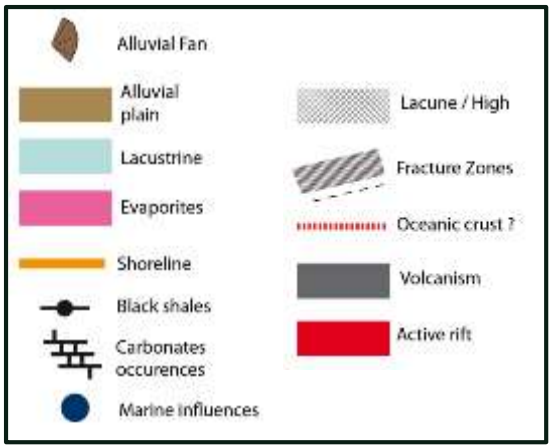


Syn-rift.
Intra AS3

Proposed age :
Berriasian – Valanginin boundary
(141 – 139 Myr)





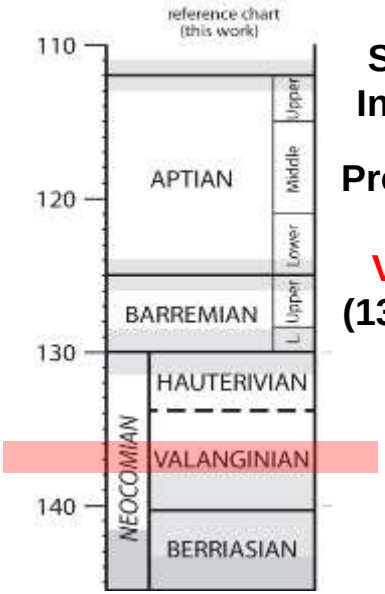


- **Deep lake to the North**
- **Hiatus to the South (except in the Namibe basin)**

- **Localised rift activity in the North**
- **Rift activity in Namibe**

Chaboureau et al. (2012)

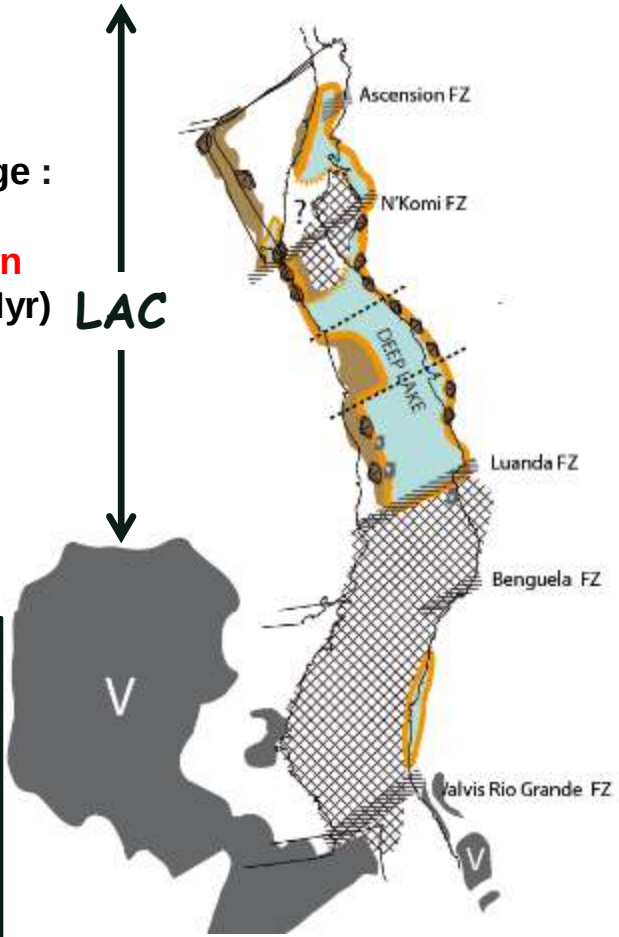
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES

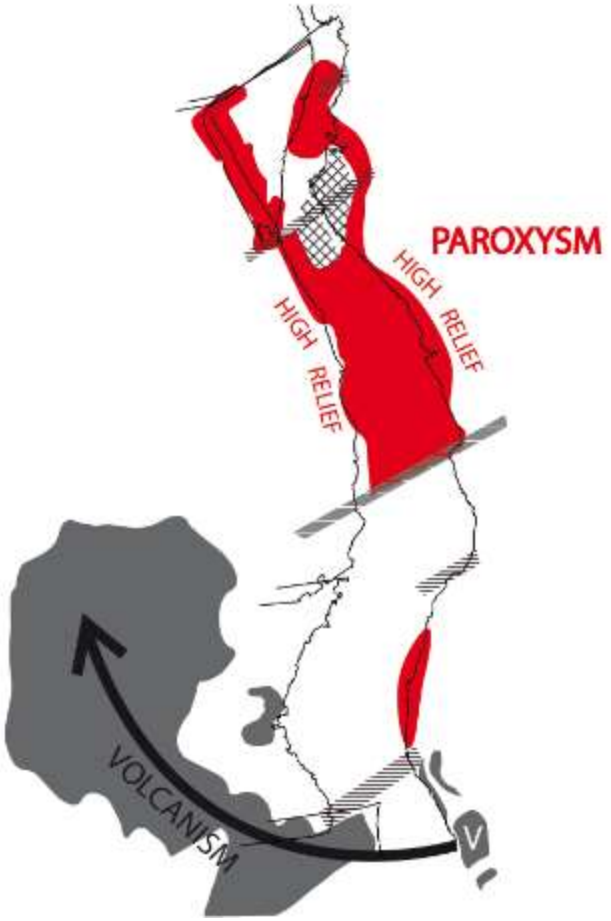


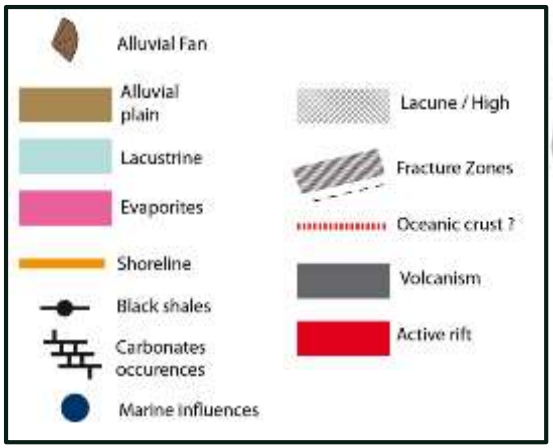
Syn-rift.
Intra AS5

Proposed age :
Intra
Valanginian
(137 – 136 Myr)

LAC





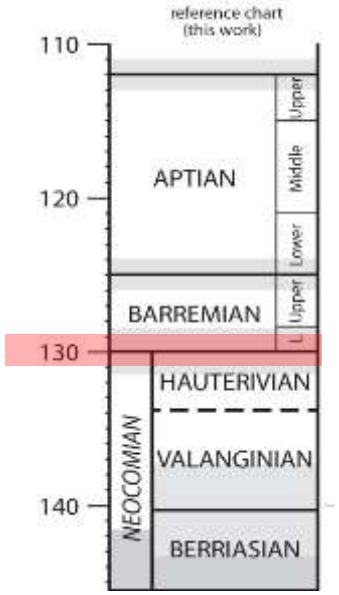


- **extension of the deep lake in the North.**
- **Hiatus to the South**
- **Volcanism in the South**

- **Paroxysm of the tift activity to the North**
- **Rift activity in Namibe**

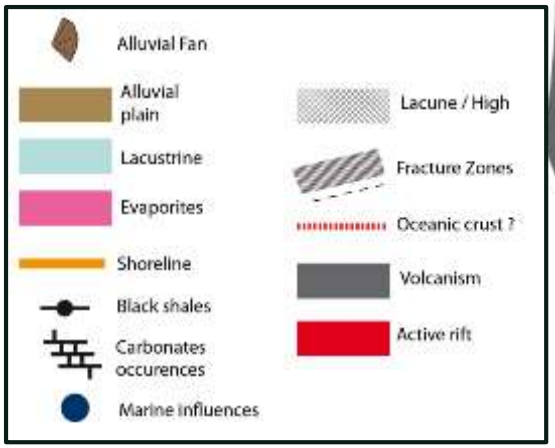
Chaboureau et al. (2012)

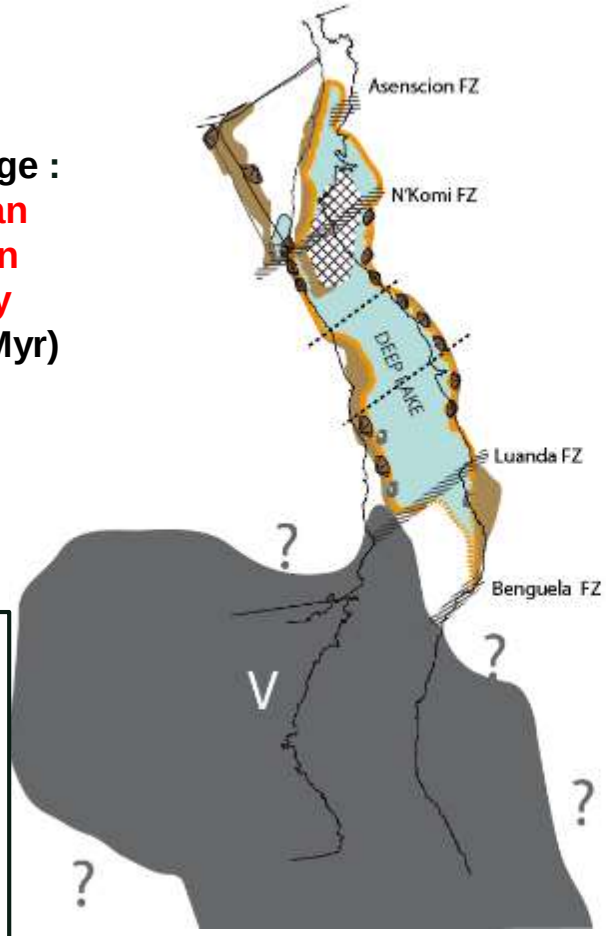
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES



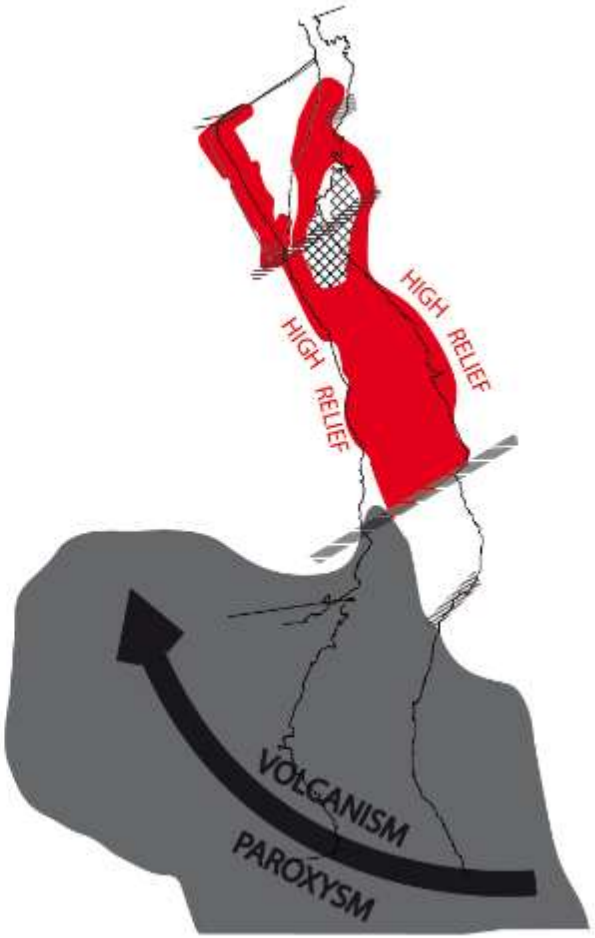
Syn-rift.
Intra AS6

Proposed age :
Hauterivian
Barrémian
boundary
(131 – 129 Myr)





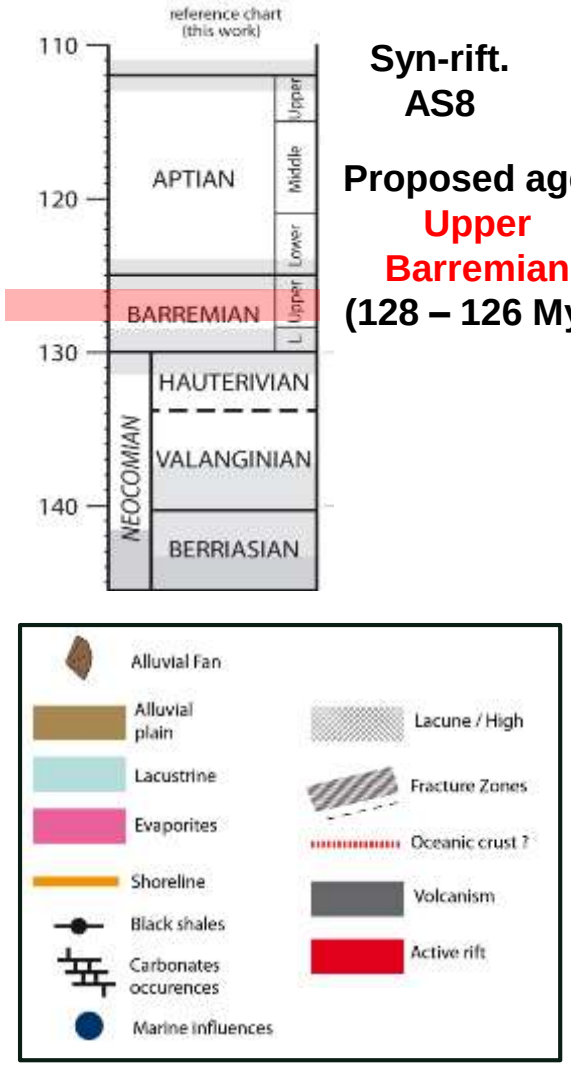
- **Deep lake in the North.**
- **Widespread volcanism to the South**



- **Rift activity in the North.**

Chaboureau et al. (2012)

REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES



Syn-rift.
AS8

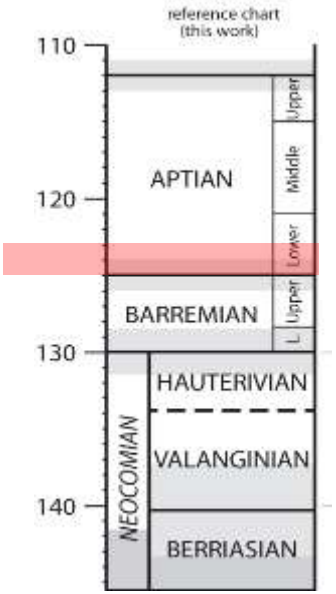
Proposed age :
Upper Barremian
(128 – 126 Myr)

- **Expansion of the lake.**
- **Shallow anoxic lake in the North**

- **Spreading of the rift activity to the South.**
- **quiet tectonic activity to the North**
- **Paroxysm to the rift activity to the South**

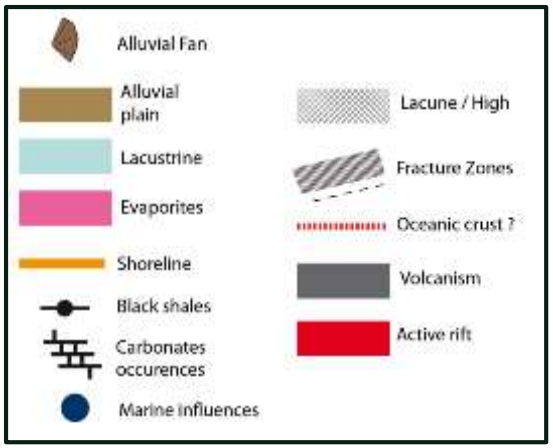
Chaboureau et al. (2012)

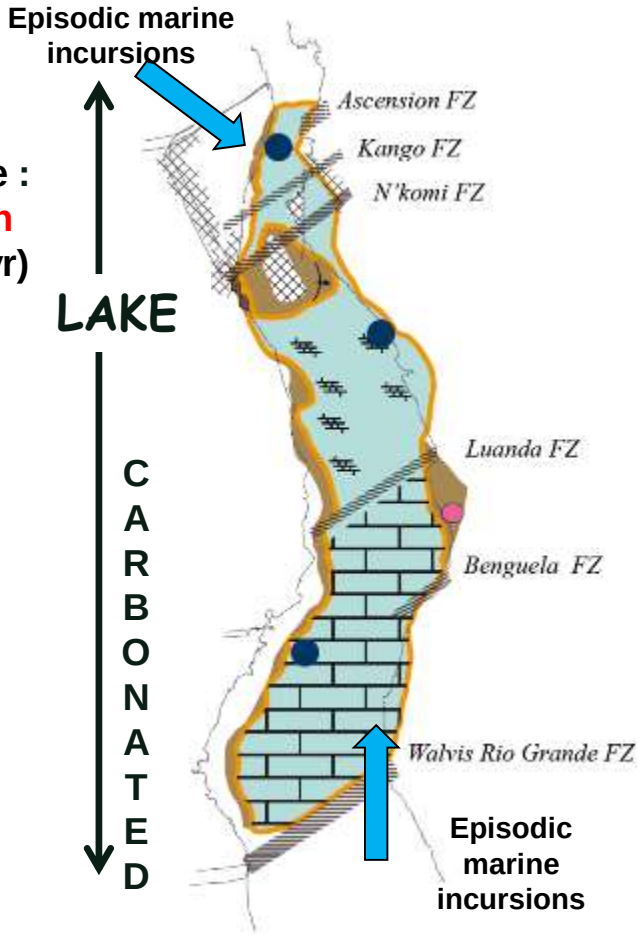
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES



Syn-rift.
AS10

Proposed age :
Lower Aptian
(124 – 123 Myr)



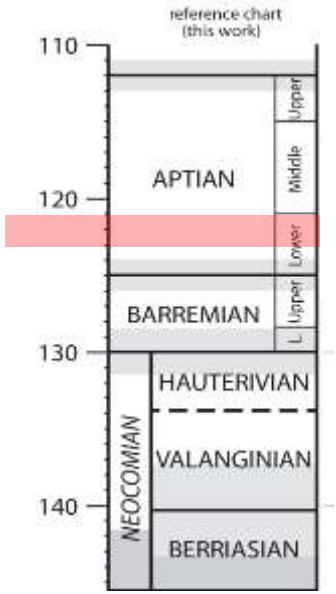


- **Widespread carbonated lake**
- **First marine flooding**
- **Flattening of the rift shoulders**

- **Rift activity in transition to the SAG phase.**

Chaboureau et al. (2012)

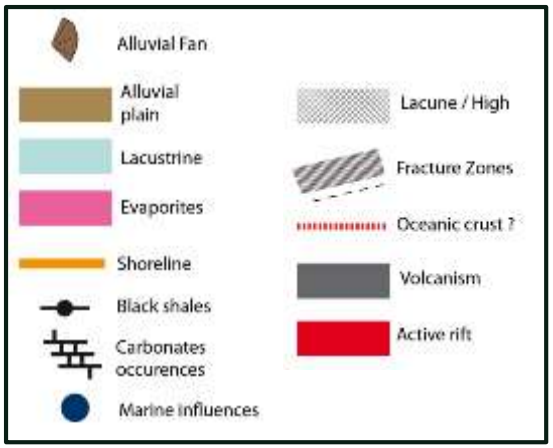
REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES

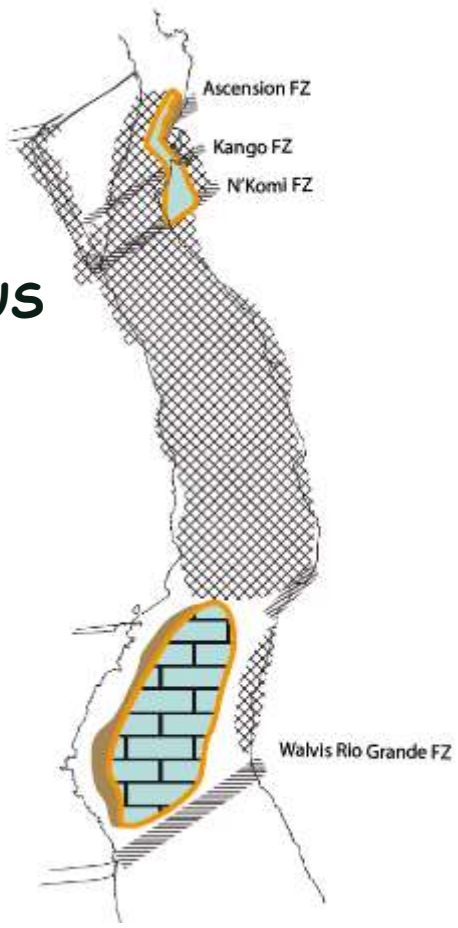


Syn-rift.
AS11

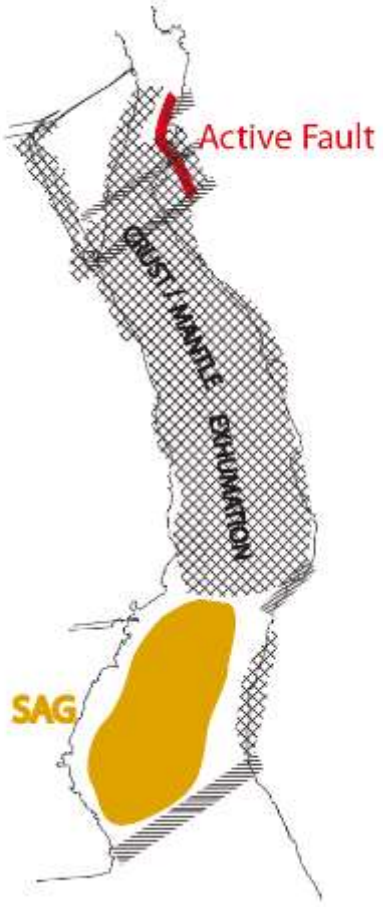
Proposed age :
Lower Aptian
(123 – 121 Myr)

HIATUS





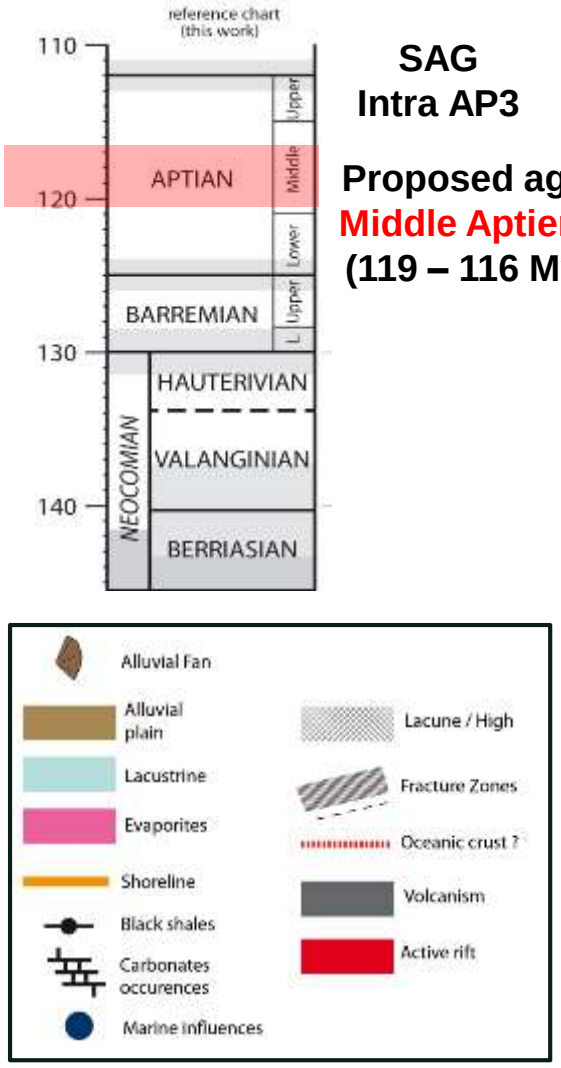
- **Widespread hiatus**
- **Carbonated lake in the southern part**



- **Rift activity in transition to the SAG phase.**

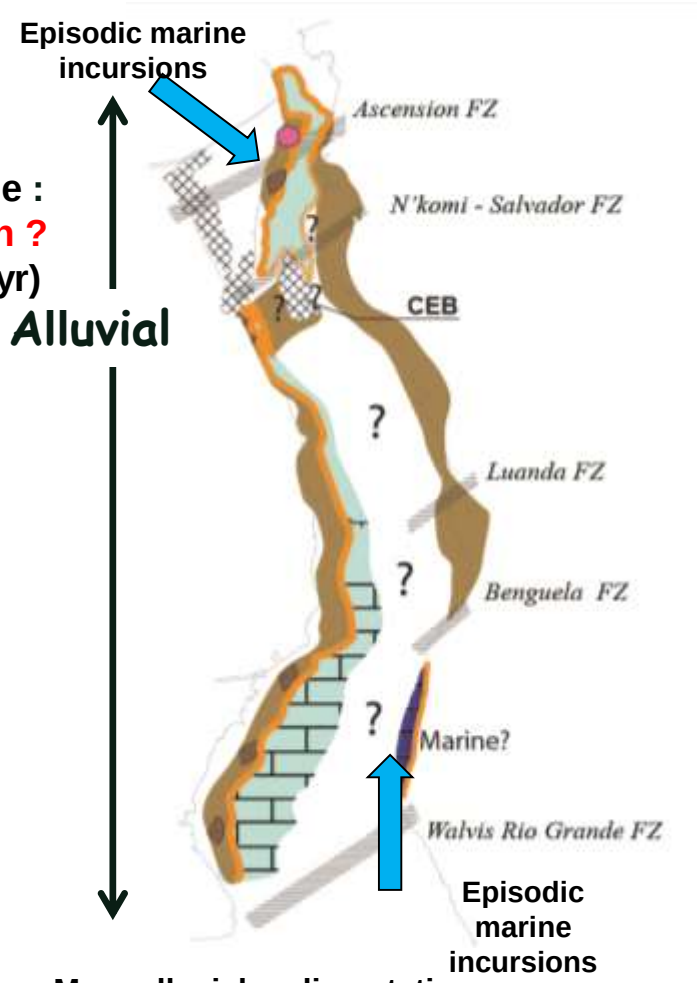
Chaboureau et al. (2012)

REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES



SAG
Intra AP3

Proposed age :
Middle Aptien ?
(119 – 116 Myr)

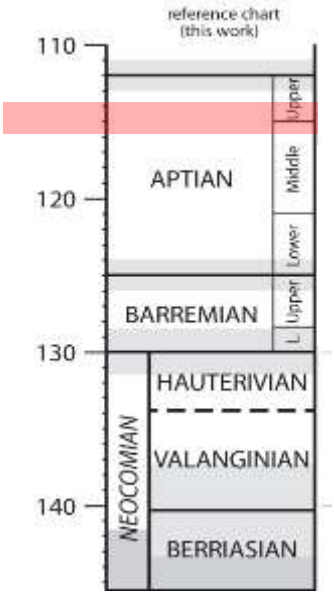


- **More alluvial sedimentation**
- **Carbonated lake in the South**
- **Flattening of the rift shoulders**
- **Marine incursions.**

- **SAG PHASE**

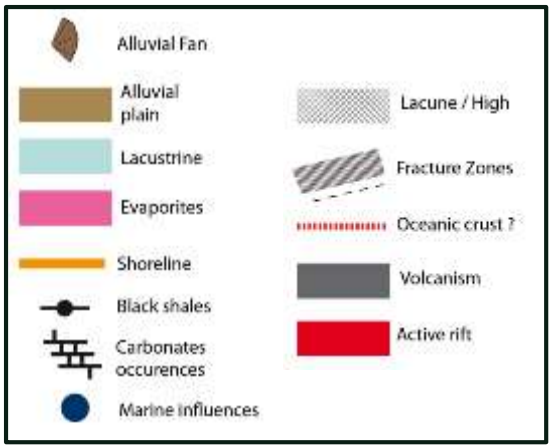
Chaboureau et al. (2012)

REPENSER LES CARTES PALEOGEOGRAPHIQUES

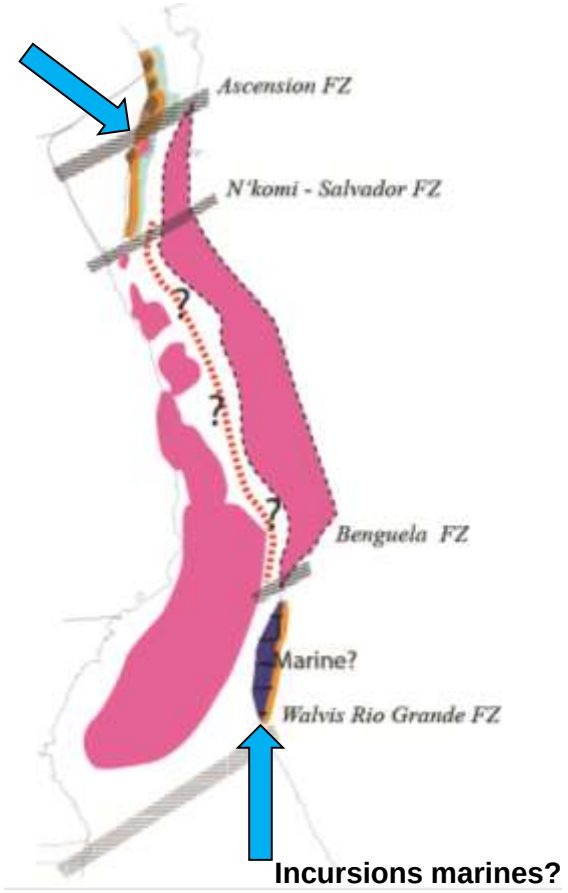


SAG
Intra AP4

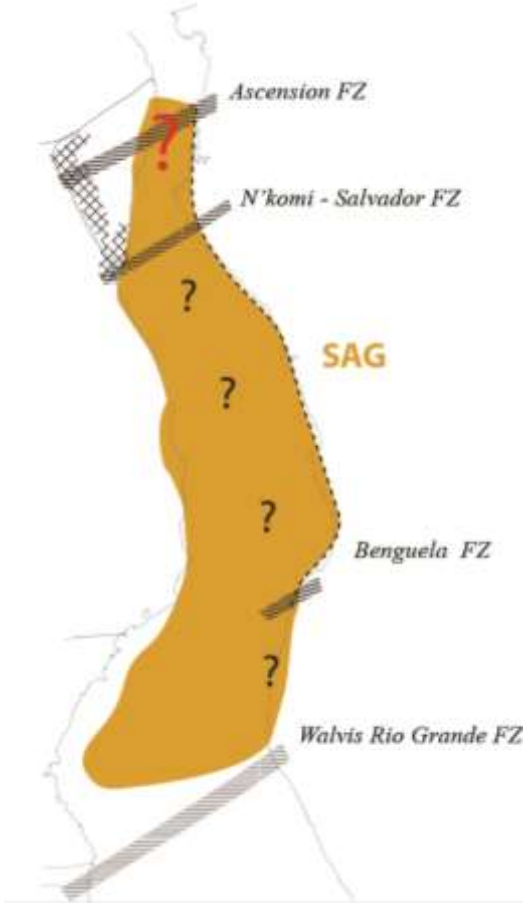
Proposed age :
Middle-Upper Aptien?
(116 – 114 Myr)



Incursions marines



• **Salt**



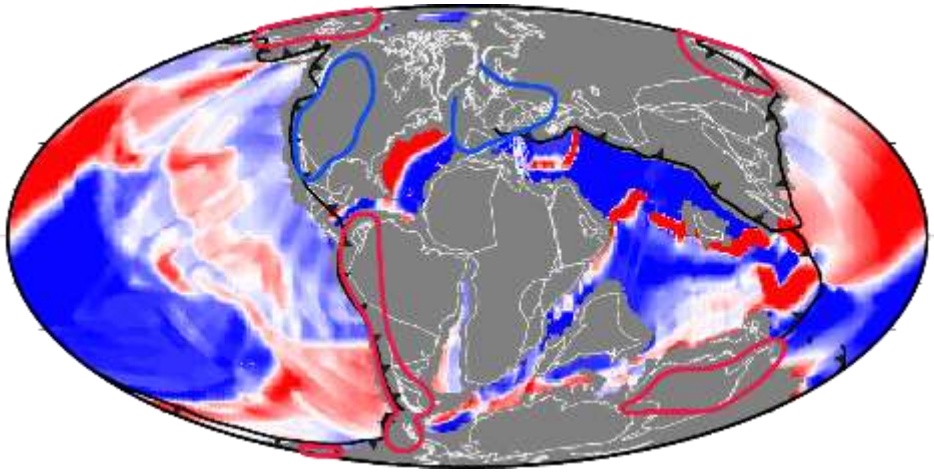
•**SAG**

Chaboureau et al. (2012)

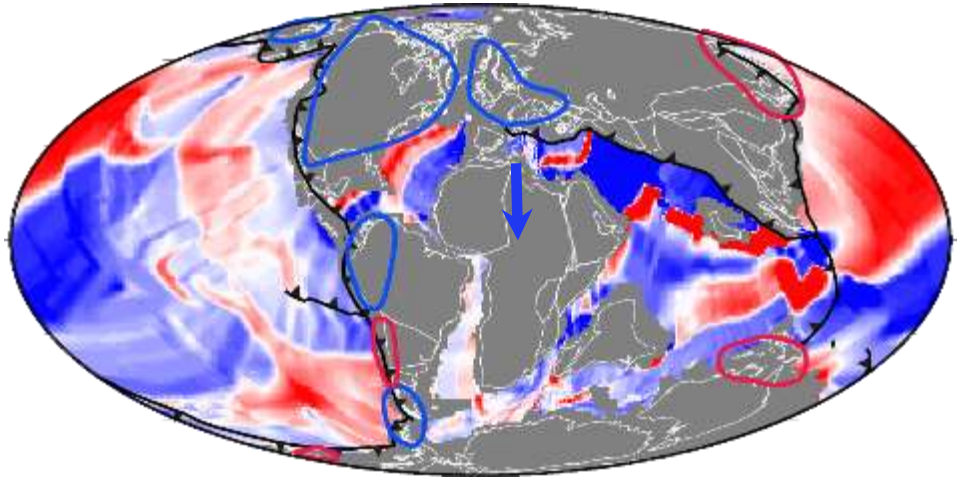
INTERPRETATION : DYNAMIC TOPOGRAPHY

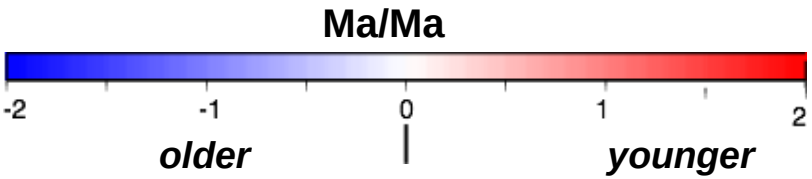
LITHOSPHERE AGE VARIATION

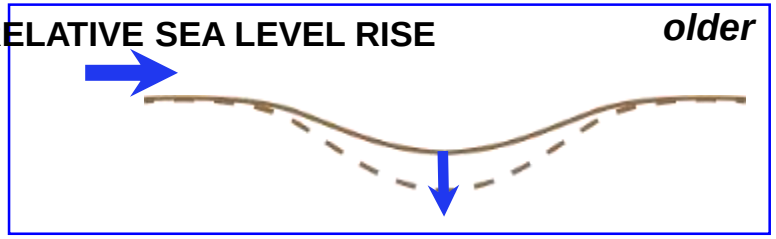
110-100 Ma *Albian – Cenomanian (100 Ma)*

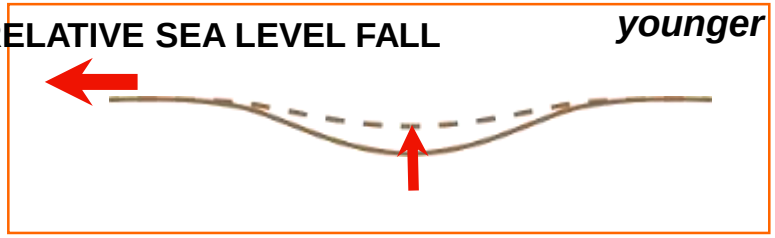


100-90 Ma *Cenomanian - Turonian (94 Ma)*





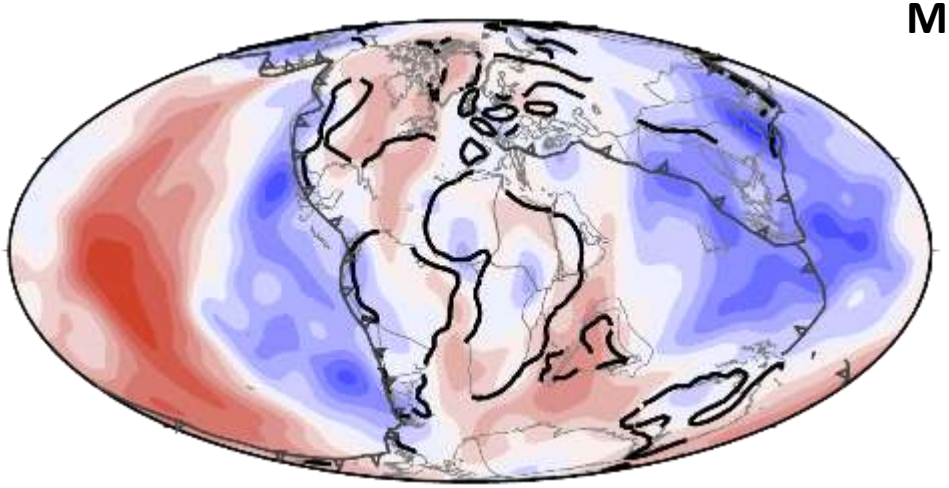




Transgression

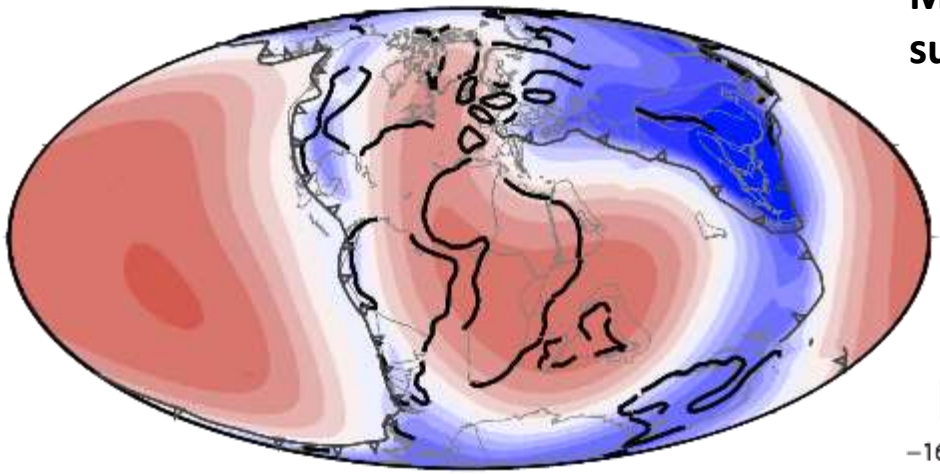
Régression

INTERPRETATION : DYNAMIC TOPOGRAPHY



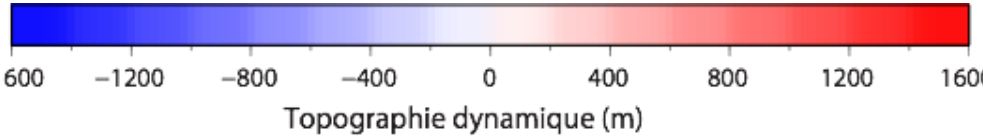
Model based on present-day tomography

(Müller *et al*., 2008)



Model based on the past location of the subductions

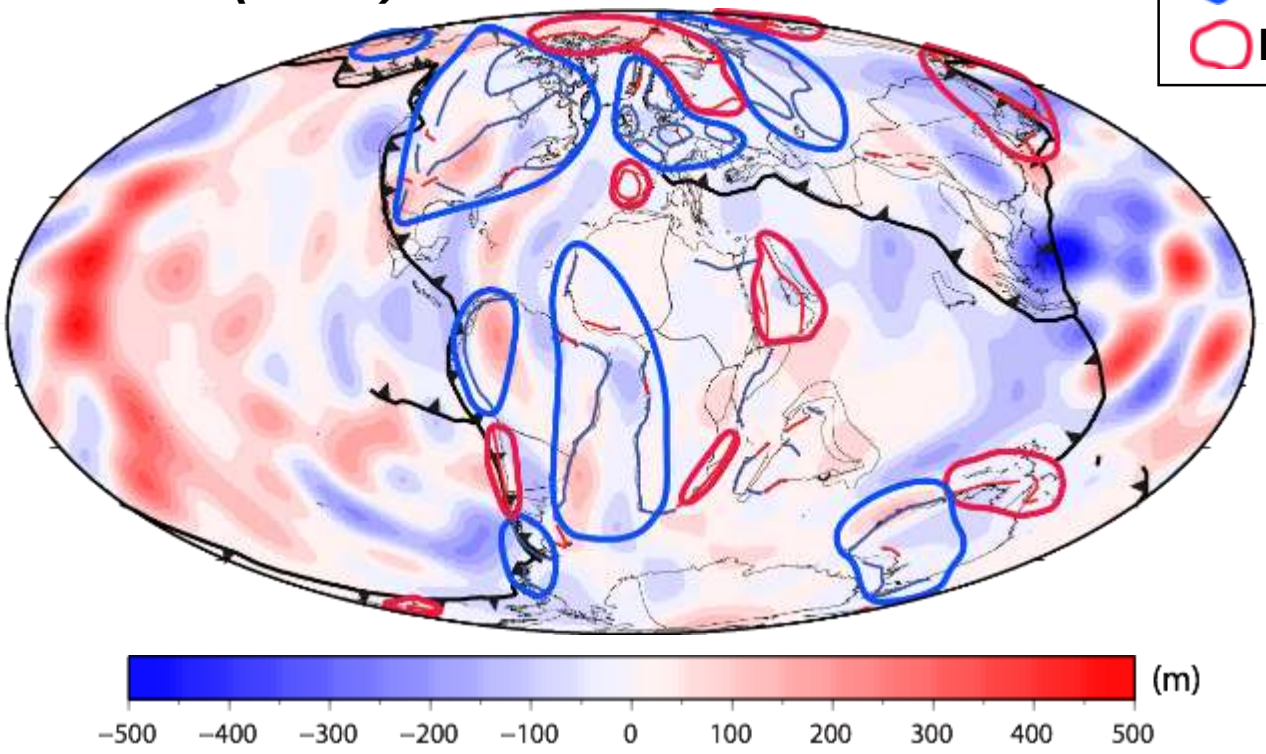
(Flament *et al*.)

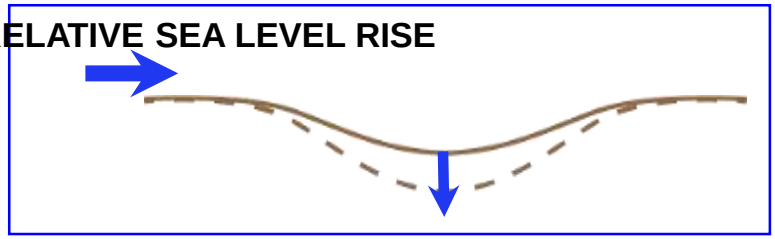


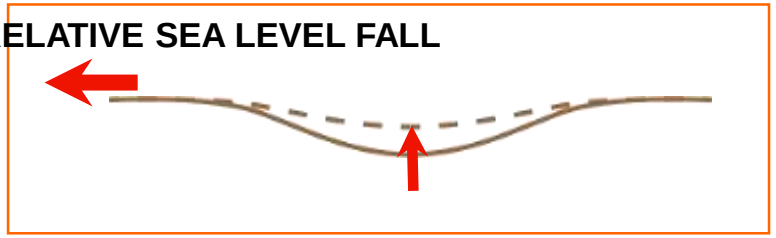
INTERPRETATION : DYNAMIC TOPOGRAPHY

PLITUDE VARIATIONS OF THE DYNAMIC TOPOGRAPHY VERTICAL MOVEMENTS
ased on Müller *et al*., 2008, using model predictions at 100 and 90 Ma)

Cenomanian - Turonian (94 Ma)



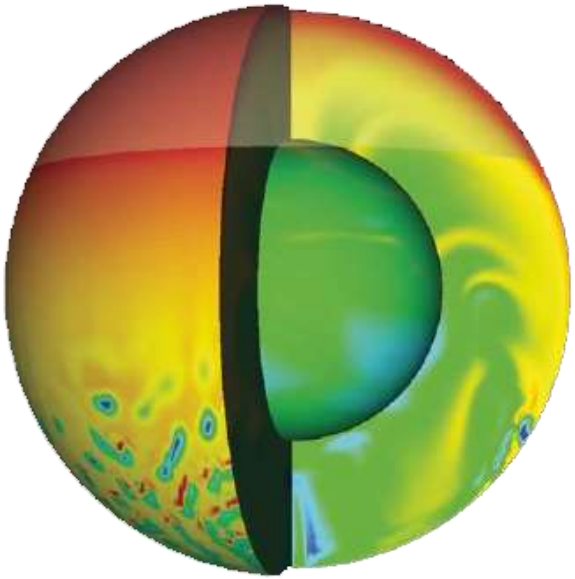




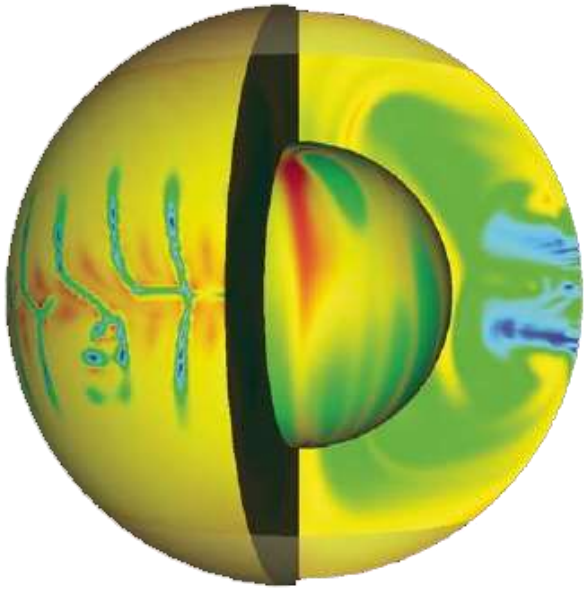
INTERPRETATION :
MANTLE GLOBAL WARMING BELOW A SUPERCONTINENT

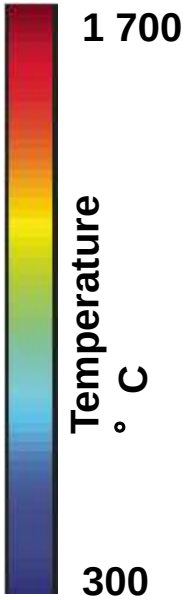
TEMPERATURE FIELD

Supercontinent



Two antipodal continents

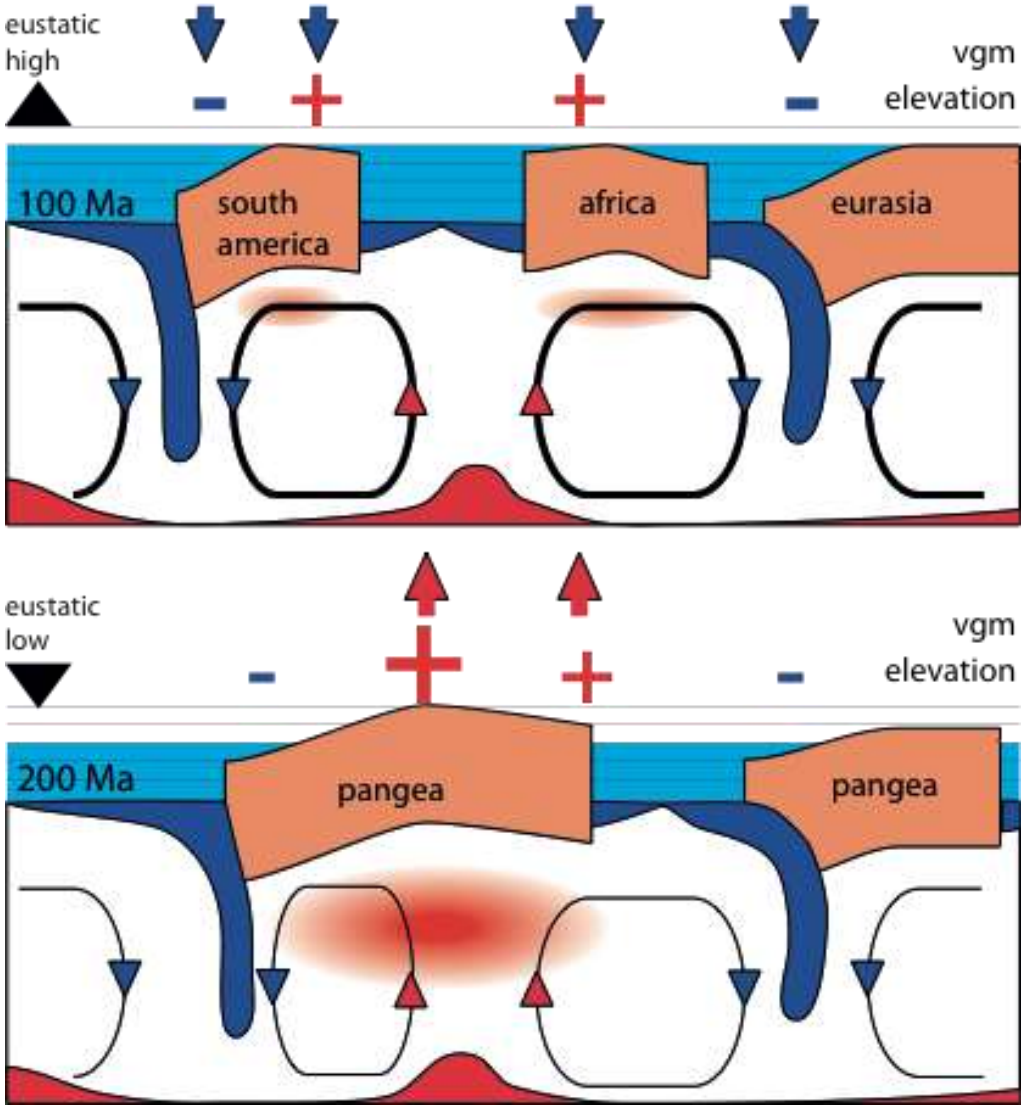




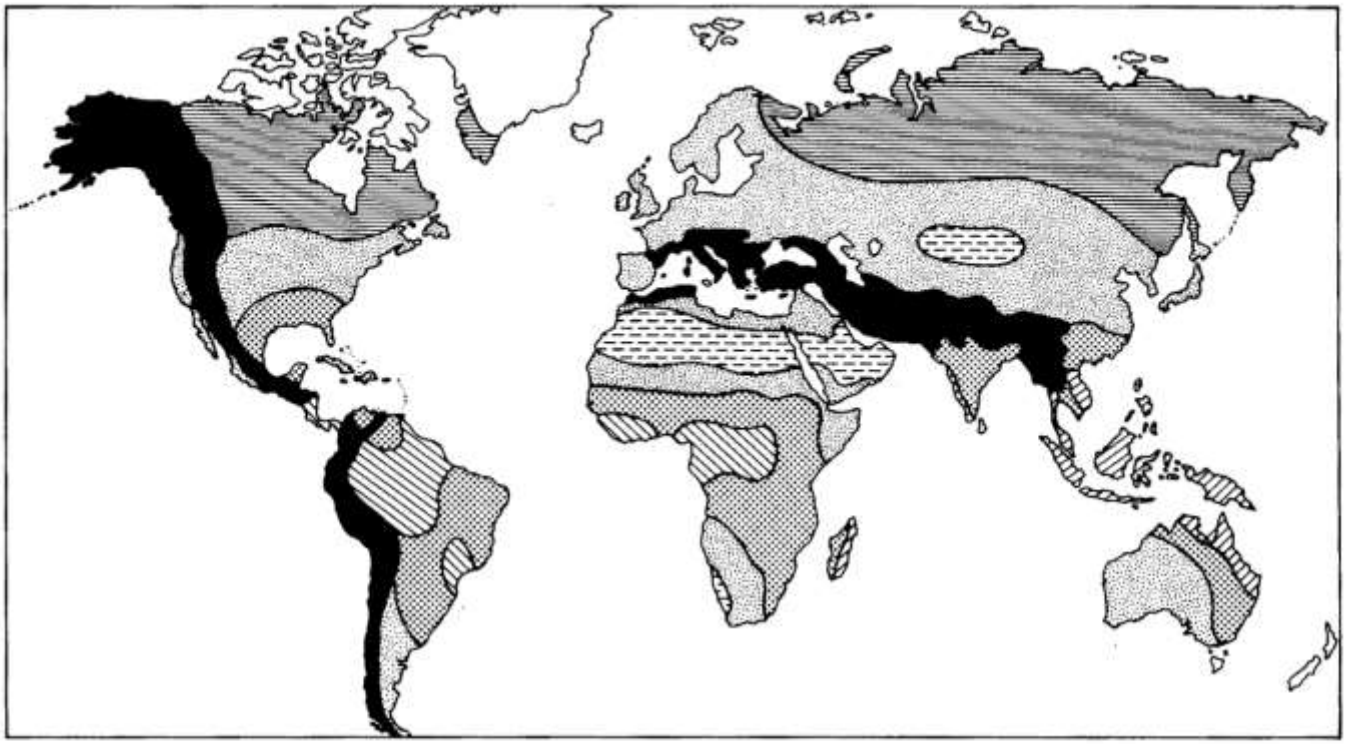
→ **Uplift**

(Coltice *et al.*, 2007)

INTERPRETATION :
MANTLE GLOBAL WARMING BELOW A SUPERCONTINENT



LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT



ALTERATION CHIMIQUE INTENSE
Kaolinite, gibbsite, oxydes et hydroxydes d'aluminium

ALTERATION CHIMIQUE INTENSE
Kaolinite, oxydes et hydroxydes de fer

ALTERATION CHIMIQUE MODEREE
Illite, smectite

REGIONS ARIDES
Faible taux d'altération chimique

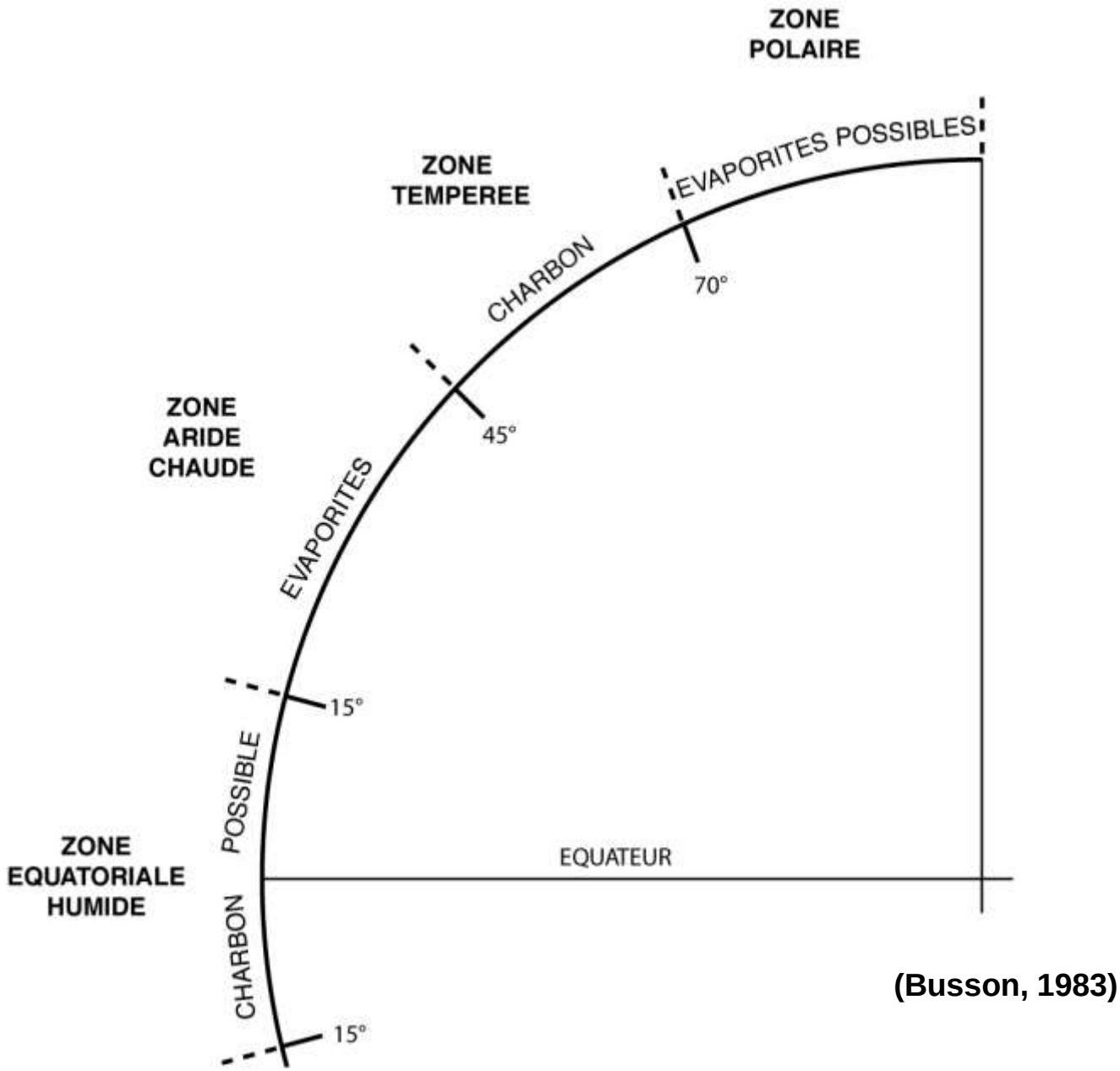
REGIONS A BASSE TEMPERATURE
Altération chimique faible

REGIONS RECOUVERTES PAR LA GLACE
Pas d'altération

REGIONS DE MONTAGNES
Altération très variable - érosion dominante

(Curtis, 1990)

LES SEDIMENTS ENREGISTREURS DU CLIMAT



(Busson, 1983)

L'évolution du concept d'isostasie *et son rôle dans la perception de la résistance de la croûte et du manteau*

Siegfried LALLEMANT

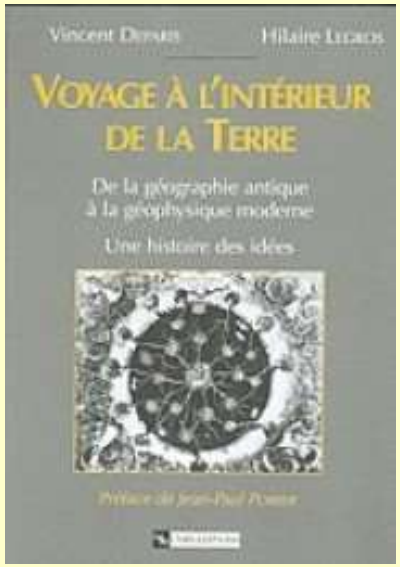
Département Géosciences-Envionnement

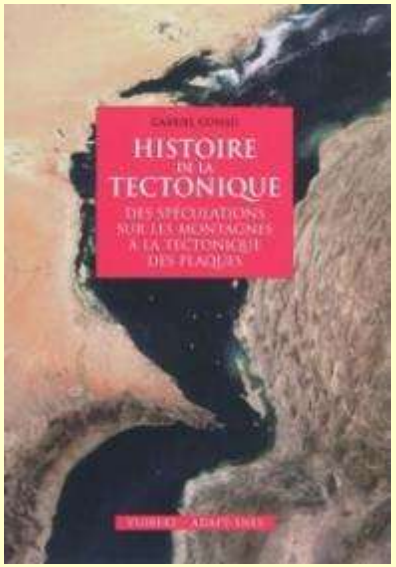
Université de Cergy-Pontoise

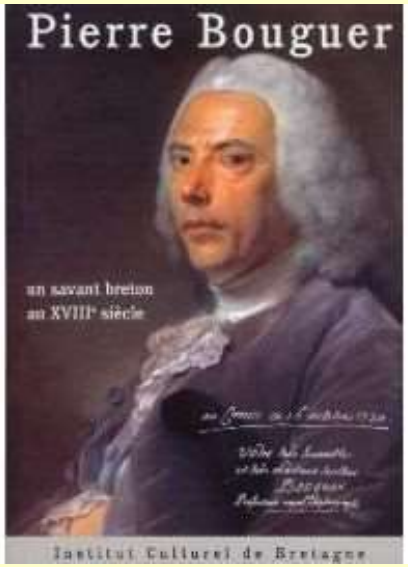
Colloque AFPSVT - Mardi 14 janvier 2014

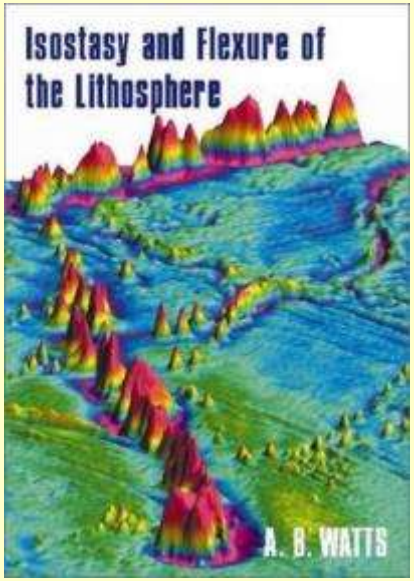
LA CROÛTE CONTINENTALE

Bibliographie *(aspects historiques)*









DEPARIS V. et LEGROS H., Voyage à l'intérieur de la Terre, 2000 (CNRS éd.)

GOHAU G., Histoire de la Tectonique, 2010, (Vuibert)

Institut culturel de Bretagne, Pierre Bouguer, un savant breton au XVIIIe siècle, 1998

ORESKES N., The rejection of Continental drift, 1999, (Oxford Univ. Press)

WATTS A., Isostasy and Flexure of the lithosphere, 2001, (Cambridge Univ. Press)

Plan

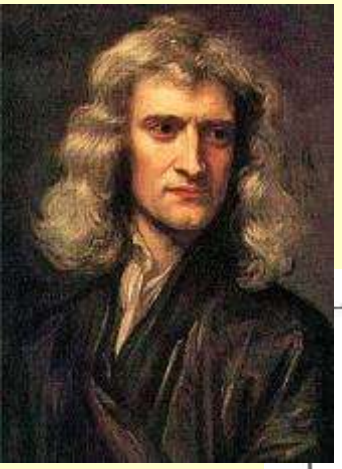
I) Aux origines du concept: le problème de Bouguer

II) Les théories de l'isostasie

III) L'isostasie à l'heure de la tectonique des plaques

IV) Une controverse moderne : « Jelly sandwich » ou « crème brûlée » ?

A l'origine, un problème géodésique
et une controverse franco-anglaise



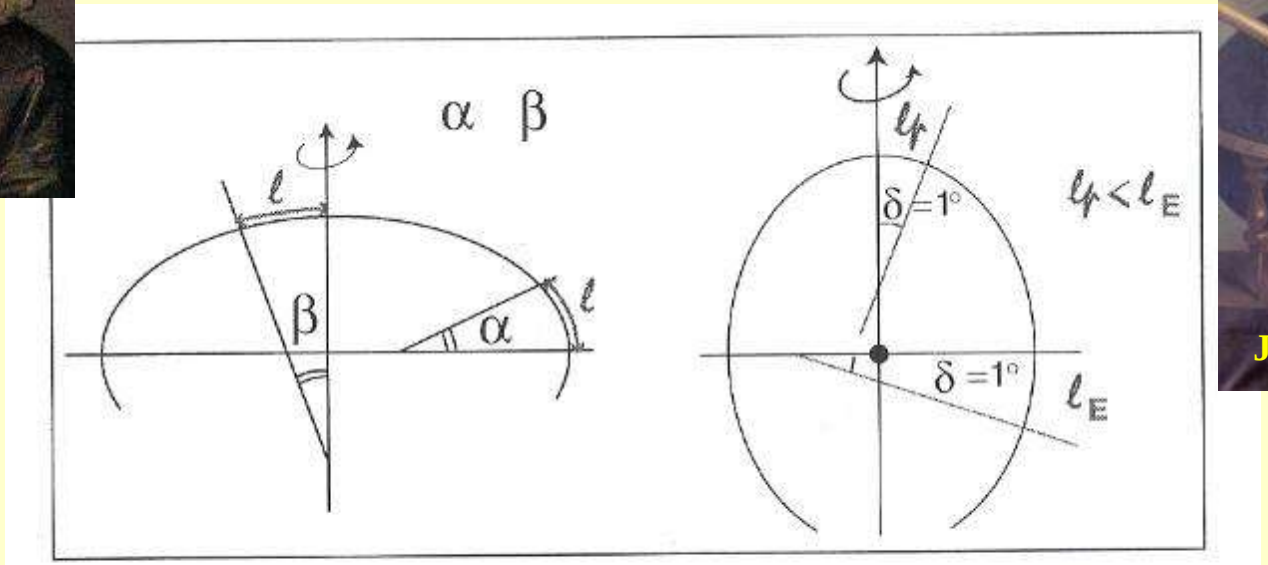


Fig. 5a

Fig. 5b

La Terre selon Newton
Forme déduite de la mécanique du corps en rotation

La Terre selon Cassini
forme déduite des triangulations en France métropolitaine

Les expéditions Laponie-Equateur

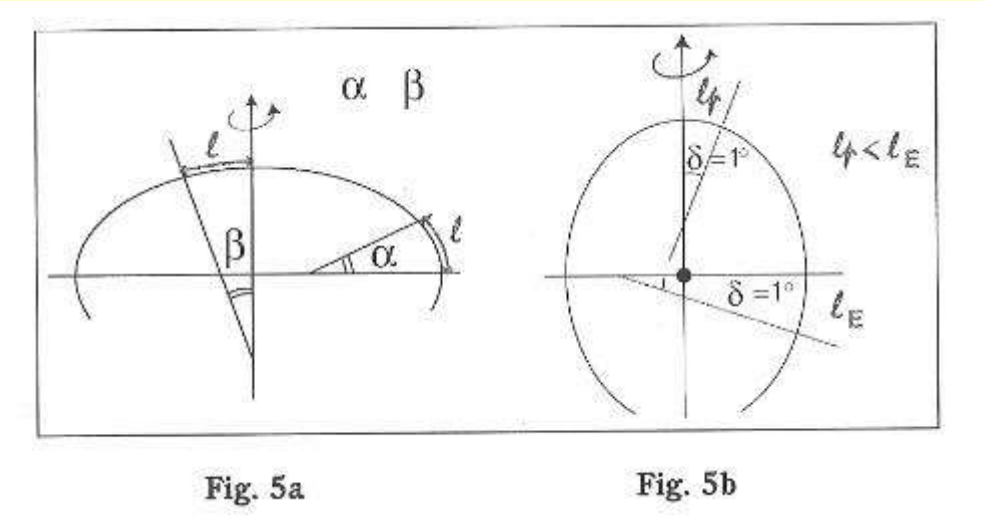


Fig. 5a Fig. 5b

- Pour régler le problème de la forme de la Terre, deux expéditions sont organisées par l'Académie des sciences de Paris sous l'impulsion de Maurepas, ministre de Louis XV.
- **Leur objectif est la comparaison des mesures de la longueur d'arc près du pôle l_p et de l'équateur l_e**, ce qui doit permettre de voir une plus grande différence qu'entre le nord et le sud de la France et confirmer ou infirmer les mesures de Cassini !

Les expéditions Laponie-Equateur (suite)

- La campagne « **équatoriale** » débute en 1735 au **Pérou**, dirigée par **La Condamine** (chimiste et géographe) avec **Godin** (astronome) **Bouguer** (mathématicien et physicien) et **Jussieu** (naturaliste). Elle ne se terminera qu'en 1743 !
- La campagne « **polaire** » débute en 1736 en **Laponie** sous la direction de **Maupertuis**, accompagné du mathématicien **Alexis Clairaut** et du physicien suédois **Anders Celsius** ainsi que de **Camus** et **Lemonnier**. Elle se termine en 1737 et ***Maupertuis aura donc la primeur du résultat*** :

La Terre est bien aplatie aux pôles !!!!

Pierre Louis Moreau de Maupertuis

et l'expédition de Laponie (1736-1737)

- L'expédition de Maupertuis en Laponie (Suède actuelle) est moins lointaine et plus facile (de bonnes cartes existent) que celle du Pérou. Son équipe achève rapidement la mesure d'un degré d'arc de méridien entre Kittis et Tornea qui confirme la théorie de Newton avec une valeur de ce degré de méridien proche du pôle nord supérieure à celle d'un degré de méridien près de Paris]. Dès lors, « ce résultat, habilement mis en scène par Maupertuis, tant à l'Académie des sciences que dans les salons parisiens et dans ses publications, engendre en quelques années la déconfiture du parti cartésien »]. Maupertuis en est auréolé de gloire. Il devient membre de la quasi-totalité des sociétés scientifiques d'Europe.

Voltaire lui rend, en vers, un vibrant hommage :

Héros de la physique, Argonautes nouveaux
Qui franchissez les monts, qui traversez les eaux
Dont le travail immense et l'exacte mesure
De la Terre étonnée ont fixé la figure.
Dévoilez ces ressorts, qui font la pesanteur.
Vous connaissez les lois qu'établit son auteur.

Maupertuis 1698-1759

Le compliment de Voltaire peut se faire plus ambigu:

Vous avez confirmé en ces lieux plein d'ennui
Ce que Newton connut sans sortir de chez lui

Charles Marie de La Condamine,

et l'expédition du Pérou (1735-1743)

- **L'expédition de La Condamine à l'Equateur est beaucoup plus ambitieuse** (mesure de 3° d'arc soit à peu près 350 km), **plus complexe et « aventureuse » dans des territoires montagneux et mal cartographiés** au préalable. Ce qui explique sa durée. Elle sera marquée par le décès de trois membres, les dissensions entre les participants restant *(Godin dilapidera une grande partie de l'argent de la mission)* qui se sépareront en 1742 *(des coureurs à pied transmettaient les mesures de l'un à l'autre)* et rentreront séparément en Europe. La Condamine explorera l'Amazone pendant son retour et ne rentrera qu'en 1744 avec une estimation légèrement différente de celle de Bouguer mais qui les opposera durablement.

La Condamine (1701–1774)

BOUGUER Pierre (1698-1758)

Mathématicien – physicien – géodésien – architecte naval nommé membre honoraire de l'académie de marine en 1752

Elu associé géomètre de l'Académie royale des sciences en 1731 – pensionnaire astronome en 1735 – directeur en 1748 et 1755

« Né au Croisic où il dirigea l'école d'Hydrographie (dès l'âge de 16 ans !), il attira en 1729 l'attention de l'Académie des sciences par des mémoires scientifiques dont un *Traité de la mâture des vaisseaux*. Il fut désigné pour participer à l'expédition qui partait en 1735 pour mesurer au Pérou la longueur d'un degré de latitude équatoriale, **élément de la résolution de la controverse sur l'aplatissement de la Terre**. Dans le cadre des réflexions sur la résolution de la longitude, il inventa un micromètre ou *héliomètre* destiné à la mesure des diamètres de la Lune et du Soleil. Parmi ses nombreux ouvrages, le novateur voire révolutionnaire *Traité du navire* dans lequel il introduisait le métacentre dans l'appréciation de la stabilité des navires, *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*, le *Traité de la manœuvre des vaisseaux*, et le *Nouveau Traité de navigation et de Pilotage* en font l'une des figures majeures de la marine savante. Ils justifièrent sa nomination parmi les dix premiers membres honoraires de l'Académie de marine. »

Texte de L. Ferreiro tiré de « Pierre Bouguer, un savant breton au XVIIIe siècle »

Pierre Bouguer
Portrait au pastel par
Jean-Baptiste Perronneau en 1753
Musée du Louvre. Photo RMN

BOUGUER Pierre (1698-1758)

« …**Il alla ensuite au Collège des Jésuites de Vannes où il excella tant en mathématiques qu'à l'âge de onze ans, le Directeur de l'école lui demanda d'enseigner les mathématiques, ce qu'il fit.**

Deux ans plus tard, ayant critiqué une proposition présentée par son professeur de mathématiques, celui-ci, offensé, défia Bouguer, alors âgé de treize ans, dans un débat public. Bouguer l'emporta haut la main sur son adversaire et le réduisit au silence ce qui entraîna le départ du professeur, couvert de honte.

Cet enfant prodige, si exceptionnellement doué, fit à nouveau ses preuves deux ans plus tard, quand la mort de son père laissa vacant le poste d'hydrographe qu'il tenait. Le jeune Bouguer posa sa candidature pour le poste et, après des hésitations initiales des autorités, il réussit l'examen rigoureux auquel il fut soumis et, en 1713, il reçut le poste de professeur d'hydrographie au Croisic. Pierre Bouguer avait juste quinze ans.

La vie de Bouguer semblait toute tracée au Croisic. Pendant presque vingt ans, il allait s'adonner à l'enseignement et à la recherche. Il tourna alors son attention sur la navigation et reçut en 1729 le prix pour la meilleure façon d'observer les étoiles en mer, puis le prix de 1731 concernant le problème de la variation des compas en mer.

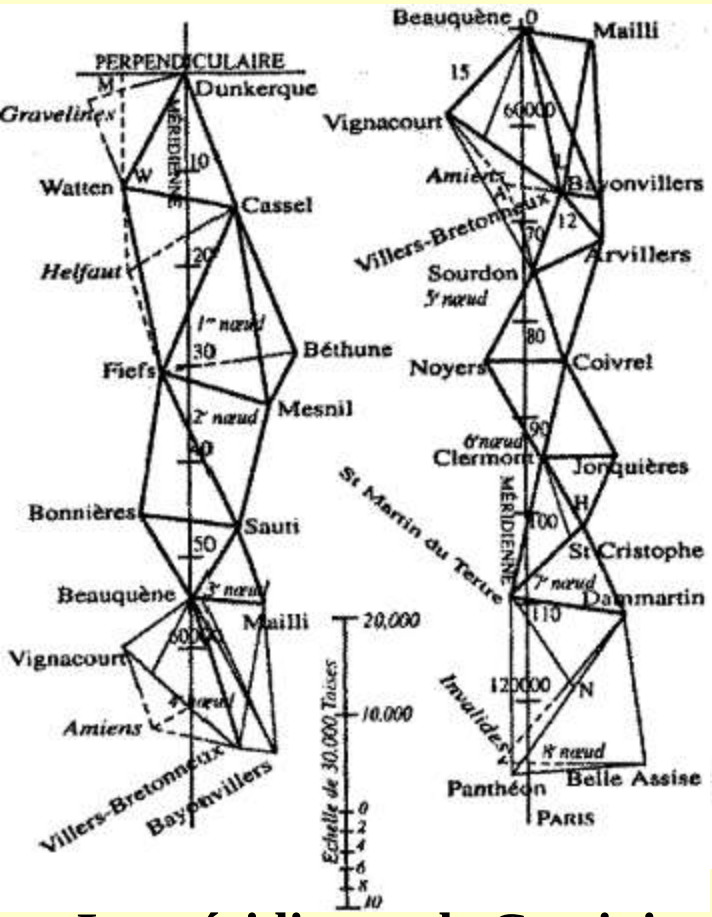
Entre temps, Bouguer avait aussi étudié l'optique et publié en 1729 un essai sur ce sujet qui, une fois de plus, attira sur lui l'attention de l'Académie des Sciences (et qui, en fait, préparait la voie de la photométrie). En 1730, Bouguer quitta Le Croisic pour Le Havre où il prit le poste d'Hydrographe Royal. Le 5 septembre 1731, l'Académie des Sciences lui donna le titre de Géométricien Associé. Bouguer avait alors trente-trois ans. »

Texte de L. Ferreiro tiré de « Pierre Bouguer, un savant breton au XVIIIe siècle »

Pierre Bouguer
Portrait au pastel par
Jean-Baptiste Perronneau en 1753
Musée du Louvre. Photo RMN

Forme de la Terre et mesure du méridien

Mesures de distances + Mesure astronomique et triangulation des latitudes



La méridienne de Cassini
Partie de Dunkerque à Paris

Etoile polaire

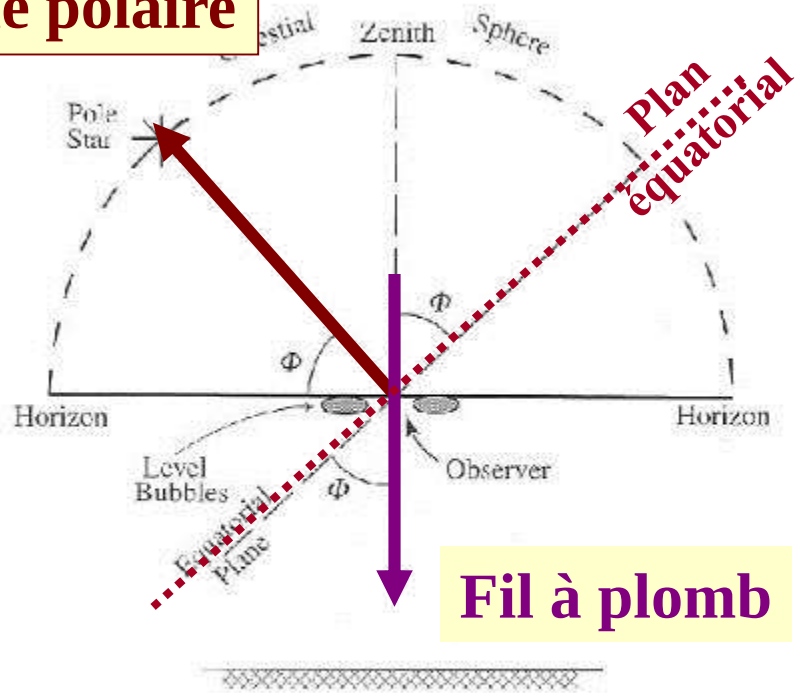


Fig. 1.1 The determination of the astronomical latitude, Φ, from observations of the pole star.

Le problème soulevé par Bouguer

- La qualité de la méthode de triangulation dépend de :
  - 1) la qualité de la mesure de distance de la line de base
  - 2) la précision de mesure des angles
  - **3) la précision de l'appréciation de la verticale**

Pierre Bouguer est un physicien très soucieux de précision de la mesure. Imprégné des théories de Newton, **il s'étonne que les mesures obtenues à l'Equateur soient aussi cohérentes alors que les masses montagneuses imposantes auraient du modifier localement l'attraction terrestre et donc dévier significativement le fil à plomb.**

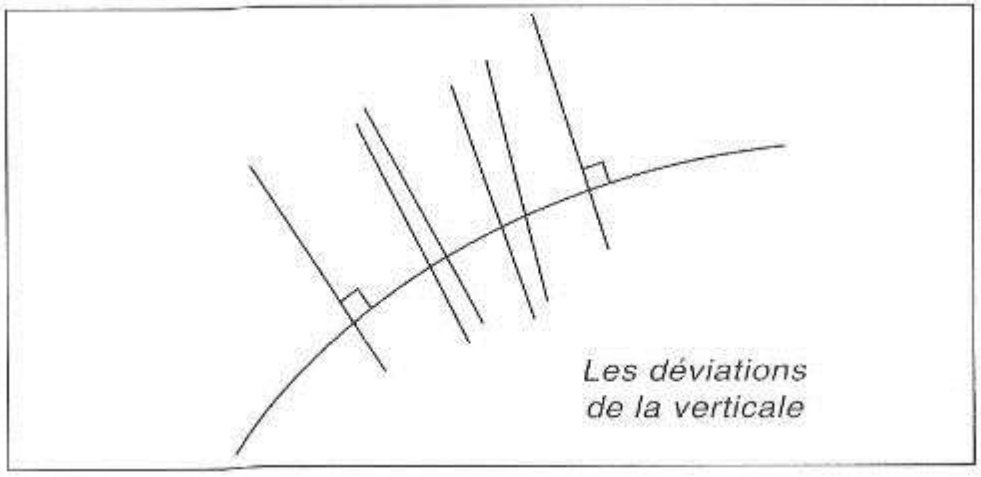


Fig. 10

Bouguer et la méthode expérimentale

« au sommet du monde »

Pour tester l'effet des reliefs sur la verticalité, Bouguer choisit un exemple « simple » : le volcan Chimborazo

le volcan Chimborazo

(situé en Équateur à environ 180 km au sud de Quito, il culmine à 6268 m d'altitude et sa base faisant 20 km de diamètre. En tenant compte de la forme générale de l'ellipsoïde, c'est le point le plus éloigné du centre de la Terre et donc …. Le point le plus haut du monde !!, détrônant ainsi l'Everest).

Bouguer et la « méthode expérimentale »

Pour « mesurer » la déviation de la verticale autour d'une masse simple (le volcan), Bouguer mesure la distance zénithale d'une même étoile de part et d'autre du volcan. Il calcule la différence angulaire, la corrige de la courbure de la Terre et obtient une valeur de 7'' qu'il compare à la valeur 1' 43'' prédite par l'attraction du volcan supposé de densité uniforme.

Il en déduit que l'attraction exercée par la montagne est beaucoup plus faible que ce qu'on attendrait de la masse de matière qu'elle représente !!!

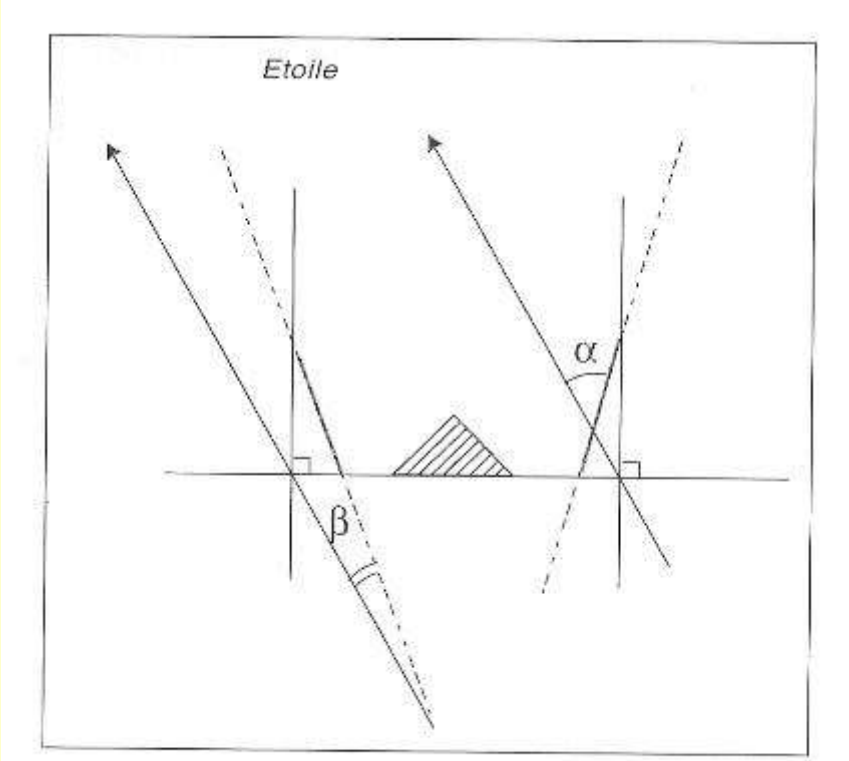


Fig. 11

Boscovich et la « compensation »

- Bouguer est suivi dans cette voie par R.G. Boscovich (ou Boscovic, *mathématicien d'origine croate*) en **1755** qui écrit:
- « Je pense que les montagnes sont dues principalement à l'expansion thermique de matériaux en profondeur là où les roches de surface sont soulevées. Le soulèvement ne signifie pas un flux ou un ajout de matière en profondeur, **le vide à l'intérieur de la montagne « compensant » les masses au dessus. »**

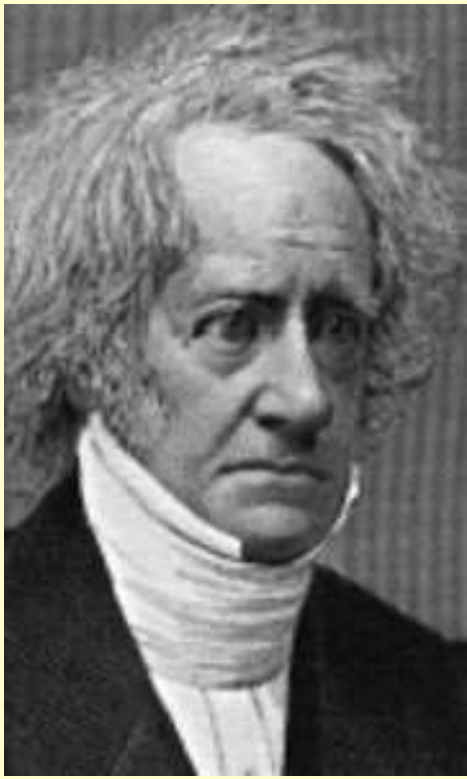
Le terme de compensation est « né »

John Frederik William Herschel

astronome *(1792-1871)*

et la croûte flottant sur un océan de lave

- Fils de l'astronome célèbre W. Hershel (découvreur d'Uranus) et admirateur du grand géologue anglais **Lyell**, **J. Hershel** propose dans une lettre adressée à ce dernier en 1836 que la couche la plus externe de la Terre ou **croûte soit en équilibre dynamique sur son substratum : un océan de lave.** Selon ses vues, **si la croûte supporte une charge comme des sédiments, elle s'enfonce chassant latéralement la lave sous-jacente**.

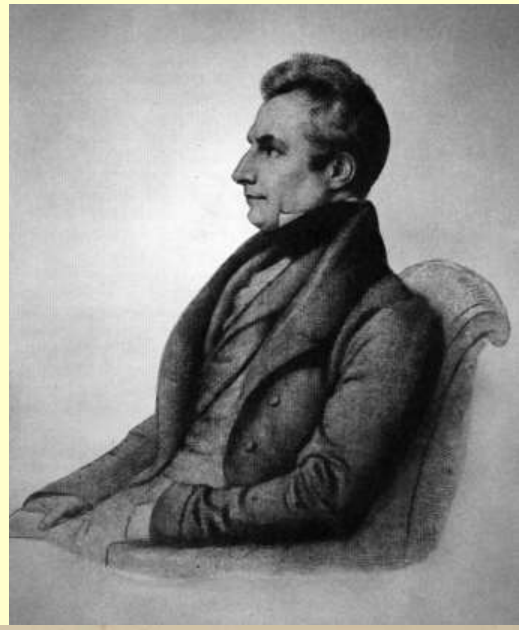


- **C'est ce type de représentation qui sera à la base de l'isostasie au sens d'Airy mais aussi de la vision des continents « flottant » de Wegener**

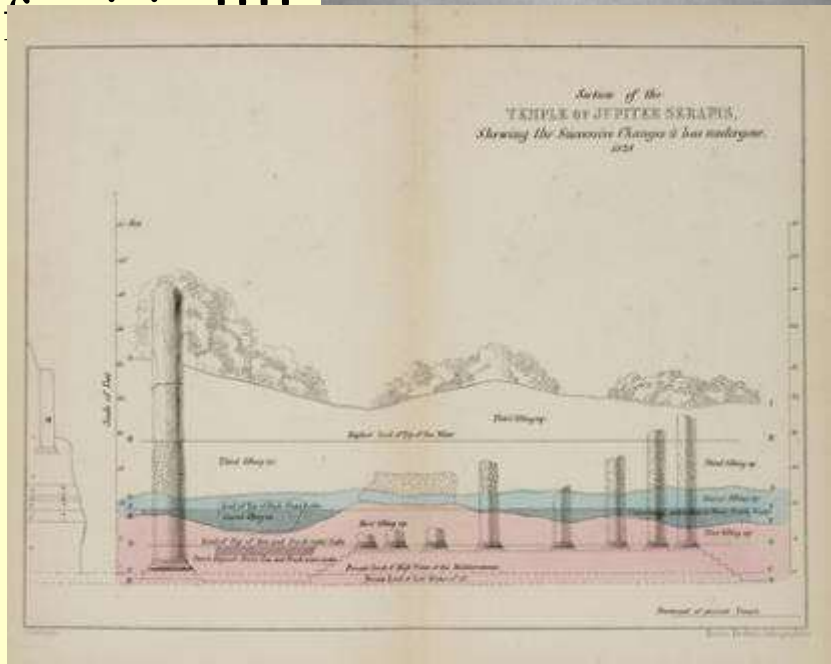
Charles Babbage *(1790-1871)*

- Mathématiciens plus connu comme le père des machines à calcul et donc des ordinateurs, Babbage est également ami avec Lyell et inclut la lettre de Hershel *(qui serait peut être restée inconnue sinon)* dans son traité de 1847 sur les beautés de la Création.

Charles Babbage *(1790-1871)*



Il y décrit aussi ses observations sur le « temple de Serapis » (200 av. J.C.) à Pozzuoli (Italie) où il observe en 1828 sur trois colonnes des encroûtements noirs à 4 mètres au dessus de leur base avec des perforations dues à des lithophages marins (modiola lithophaga). **Il en déduit une séquence de subsidence et de soulèvement entre la construction et l'observation** qu'il relie à l'expansion thermique liée au volcan acti



Le « temple de Serapis », Puzzuoli

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Serapeum_(Pozzuoli)_-2.jpg

Le « temple de Serapis », Puzzuoli

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pozzuoli_2010-by-RaBoe-15.jpg

Charles Lyell *(1797-1871)*

et le « temple de Serapis »

- A noter que le grand Géologue anglais **Charles Lyell à qui on doit le principe de l'uniformitarisme ou actualisme** exposé en 1830 dans son oeuvre majeure : "Principles of Geology: Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Causes now in Operation" (ou "**Principes de la Géologie : une tentative d'explication des changements anciens de la surface de la Terre en rapport avec les causes actuelles**") **a choisi l'image du temple de Serapis comme frontispice de son livre et l'utilise comme exemple type d'application de l'actualisme !!!!**

Charles Lyell et le « temple de Serapis »

PRINCIPLES

OF

GEOLOGY,

BEING

AN ATTEMPT TO EXPLAIN THE FORMER CHANGES
OF THE EARTH'S SURFACE,

BY REFERENCE TO CAUSES NOW IN OPERATION.

BY

CHARLES LYELL, Esq., F.R.S.

IN TWO VOLUMES.

Vol. I.

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE-STREET.

Sir G. Everest (1790-1866), *Surveyor-General of India*

En charge des levés géodésiques de l'Inde, Everest part du principe que l'ellipsoïde terrestre est bien connu.

Il peut donc comparer les mesures astronomiques (visée des étoiles) obtenues soit par rapport au fil à plomb (position «astronomique») soit par rapport à la perpendiculaire à l'ellipsoïde connu (position «géodésique»).

La différence de latitudes « géodésiques » pour deux stations situées au pied de l'Himalaya (Kaliana et Kalianpur) est 5,24" plus petite que la différence des latitudes astronomiques.

Mais Everest qui a confiance en ses déterminations « astronomiques » met en cause la précision des triangulations « géodésiques »

John Henry Pratt *(1809-1871)*

- Pratt, archidiacre de Calcutta mais aussi mathématicien formé à Cambridge, s'intéresse au problème initialement posé par Bouguer et réactualisé par Everest et, en désaccord avec ce dernier, pense que la différence est due à un effet perturbateur des masses de l'Himalaya voisin.
- Dans un article de 75 pages (!!) où il développe ses calculs à partir de la gravité de Newton, Pratt évalue la contribution de l'Himalaya sur les stations Kaliana et Kalianpur (malgré une connaissance très limitée de la topographie réelle de l'Himalaya !) et **déduit que la montagne peut engendrer une déviation de la verticale de l'ordre de 15,885"** mais **sa conclusion est qu'il n'explique pas la différence observée et que le problème doit être étudié plus en détail**.

George Biddell AIRY *(1801-1892)*

Peu après la parution de l'article de Pratt, G. Airy, professeur d'astronomie à Cambridge propose en 1855 dans un article à la «Royal Society » une autre interprétation.
Intimement persuadé que la croûte est mince et flotte sur une couche de lave plus dense qu'elle, Airy utilise l'analogie de l'Iceberg pour suggérer que les domaines d'altitude importante (grands plateaux) sont situés au dessus de domaines profonds où de la croûte légère se substitue à la lave dense.
C'est une hypothèse qu'Airy développe en seulement 3 pages et sans grands développements mathématiques et où il dit que contrairement à Pratt, il n'y a pas lieu de s'étonner des différences observées par Everest !!!

Comme son hypothèse implique des fractures au bord de la zone qui s'enfonce, Il reconnaît que son modèle pourrait ne pas s'appliquer là où la croûte est trop « résistante ».

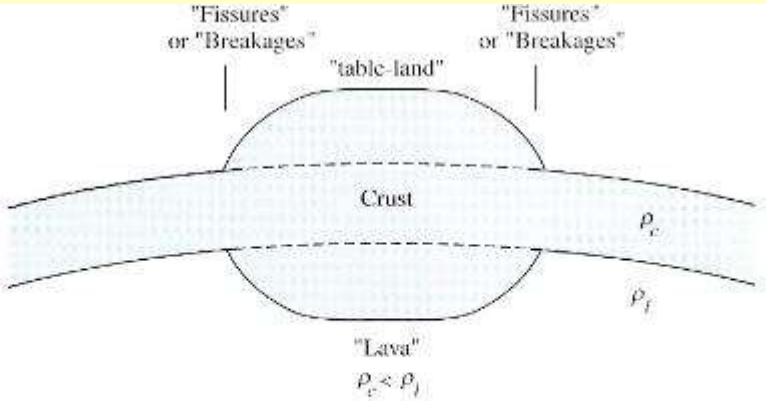


Fig. 1.14. Airy's hypothesis of a crust that "floats" upon "lava". Reproduced from Fig. 2 of Airy (1855) with permission of the Royal Society.

Isostasie au sens d'Airy

(la plus classique !)

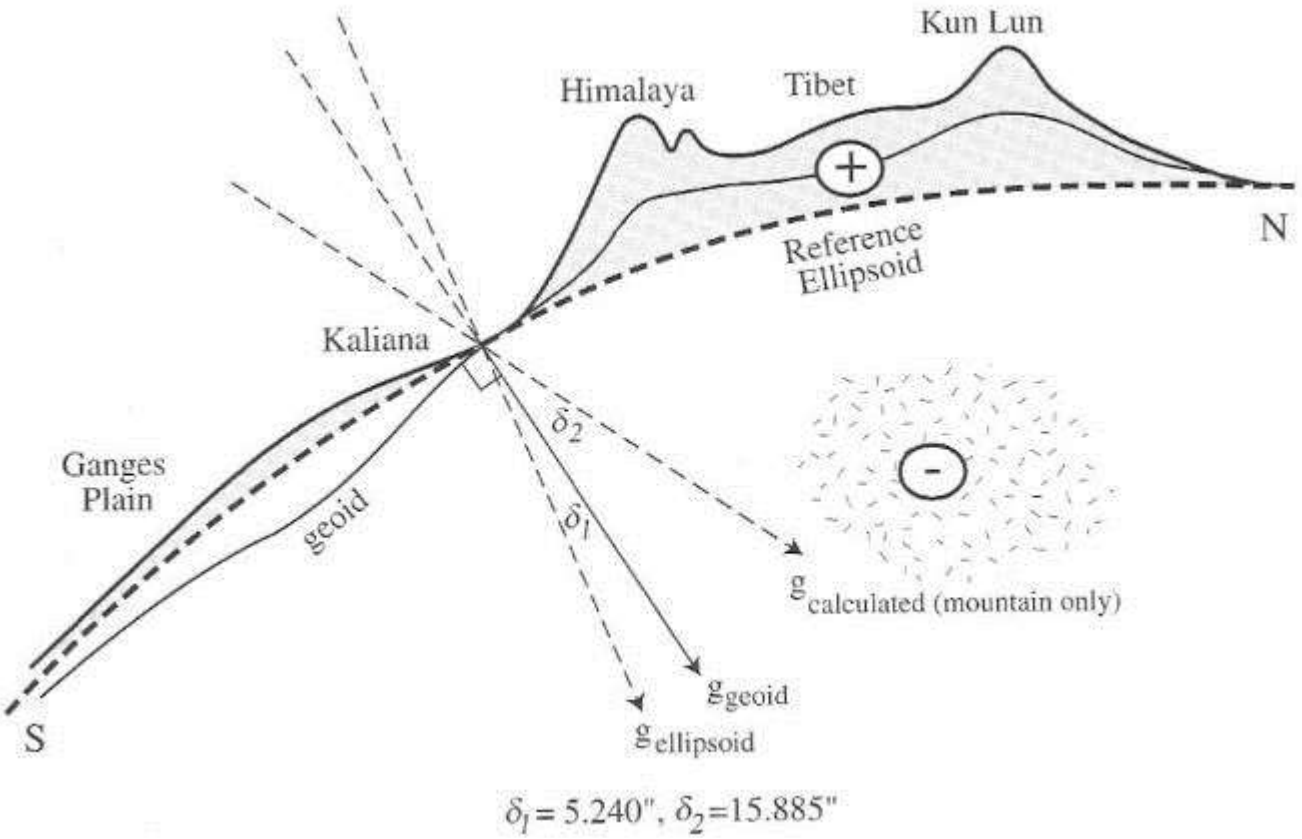


Fig. 1.12. The deflection of the vertical at Kaliana, northern India. δ_1 is the deflection determined by Everest from astronomic and geodetic observations. δ_2 is the deflection calculated by Pratt due to the mass excess of the Himalaya, Tibet and Kun Lun above sea-level. The shading schematically shows the mass deficiency that was inferred by Airy and, later, Pratt to underlie the mass excess.

Schéma de Watts, 2007

« encore » John Henry Pratt *(1809-1871)*

- **En 1858, Pratt suit les suggestions d'Airy sur la présence de déficits de masse compensant les excès de surface mais en présentant un nouveau modèle dans lequel les reliefs sont le résultat de variations de densité d'un croûte épaisse et rigide en fonction de son état thermique**

Il critique l'approche d'Airy sur 3 points :

- **1) Airy suppose une croûte mince**
- **2) Il suppose que la croûte est moins dense que la lave sous-jacente**
- **3) Le modèle d'Airy n'est pas en accord avec la théorie de la contraction de la Terre qui est dominante à cette époque.**

La vision de l'isostasie selon Pratt

- **Wegener résumera ainsi la présentation de Pratt : « Pratt se figurait l'écorce terrestre come une pâte primitivement d'épaisseur uniforme, qui en levant, en quelque sorte, s'est gonflée en certains endroits donnant naissance aux continents, les parties comprimées formant les zones océaniques. »**

La genèse des continents et des océans, 1929, 4e éd.

L'isostasie au sens de Pratt

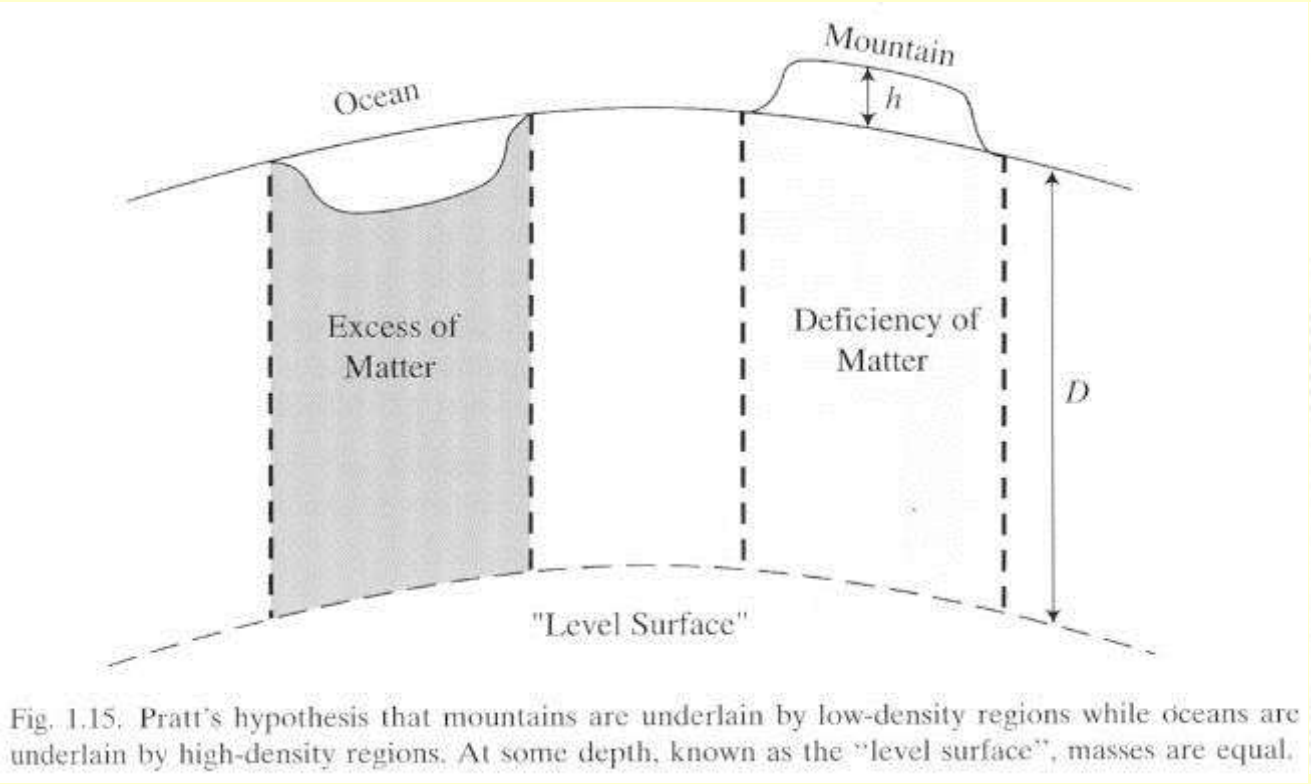


Fig. 1.15. Pratt's hypothesis that mountains are underlain by low-density regions while oceans are underlain by high-density regions. At some depth, known as the "level surface", masses are equal.

Cette controverse Pratt – Airy de 1855 n'intéressera pas la communauté scientifique avant 1881 lorsque le révérend O. Fisher reprendra l'hypothèse de Airy et surtout 1889 avec Dutton !

Clarence DUTTON *(1841-1912)*

- **Bien que les concepts existent depuis 1855, c'est C. Dutton, géologue américain, qui est l'inventeur du terme d'isostasie en 1889,**
- **Le terme est dérivé du grec, de iso (égal) et statikos (stable) ou « même équilibre stable partout ».**
- **Dutton note qu'il aurait préféré utiliser le terme « isobarie » (égale pression), qui était déjà utilisé dans un autre contexte.**
- **De fait, l'équilibre isostatique signifie qu'il existe une profondeur nommée surface de compensation au niveau de laquelle les pressions exercées par les colonnes sus-jacentes sont égales quelle que soit la topographie et/ou les variations de densité**

Les théories de l'isostasie au début du XXe siècle

John Fillmore Hayford
(1868 – 1925)

Veikko Heiskanen
(1895 – 1971)

A l'instar de J.F. Hayford, la communauté scientifique américaine adoptera le modèle de Pratt qu'il quantifie et transforme en méthode de correction pratique des levés géodésiques.
En Europe au contraire, on sera plus réceptif au modèle d'Airy que quantifiera V. Heiskanen en Suède dès 1924 en l'utilisant comme méthode de correction géodésique qui sera largement adoptée dans toute l'Europe et. A. Wegener en tirera profit dan son interprétation des océans et des continents.

Les deux modèles dans leur présentation « moderne » du XXe siècle

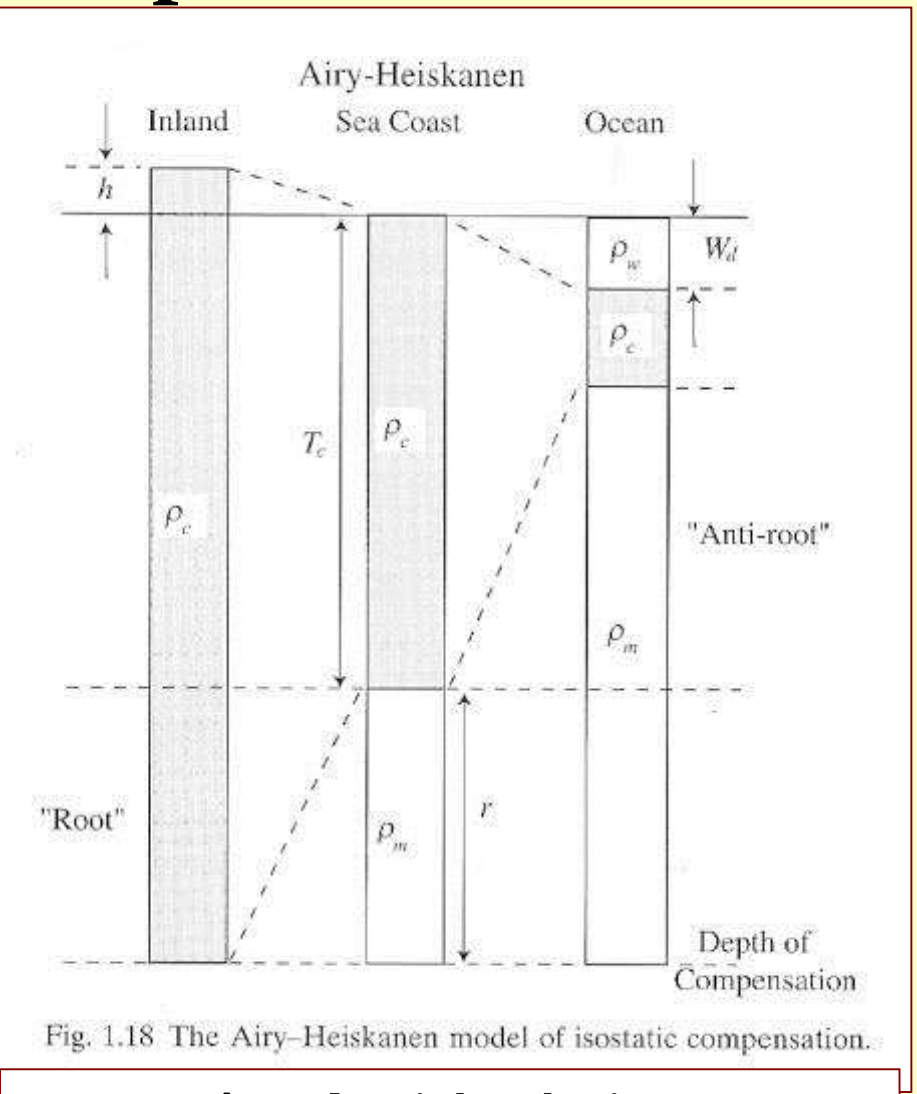
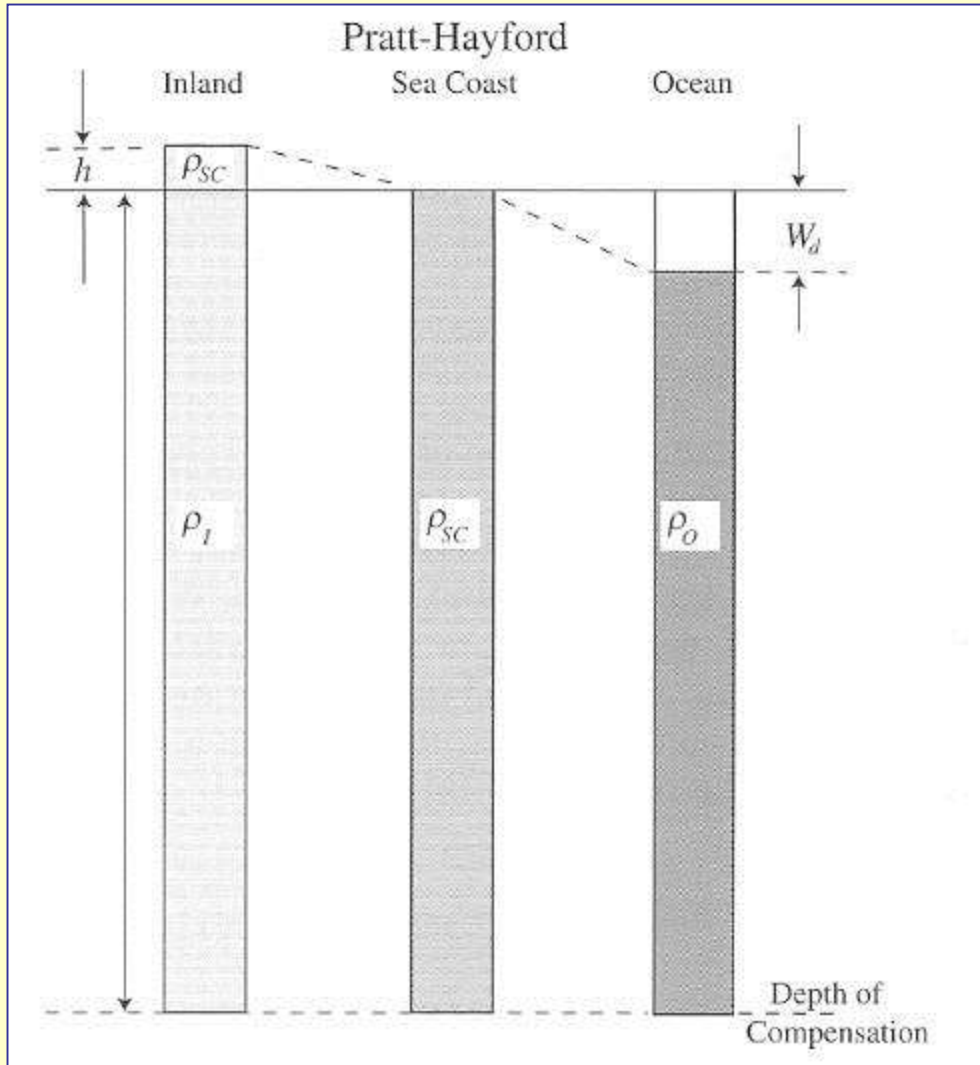


Fig. 1.18 The Airy–Heiskanen model of isostatic compensation.

Même densité et épaisseur de croûte variable



Densités variables reflétées par les altitudes

Isostasie et relief au sens d'Airy-Heiskanen

Pour une colonne homogène, la pression s'écrit

$$P=F/S$$

ou

$$P=mg/S$$

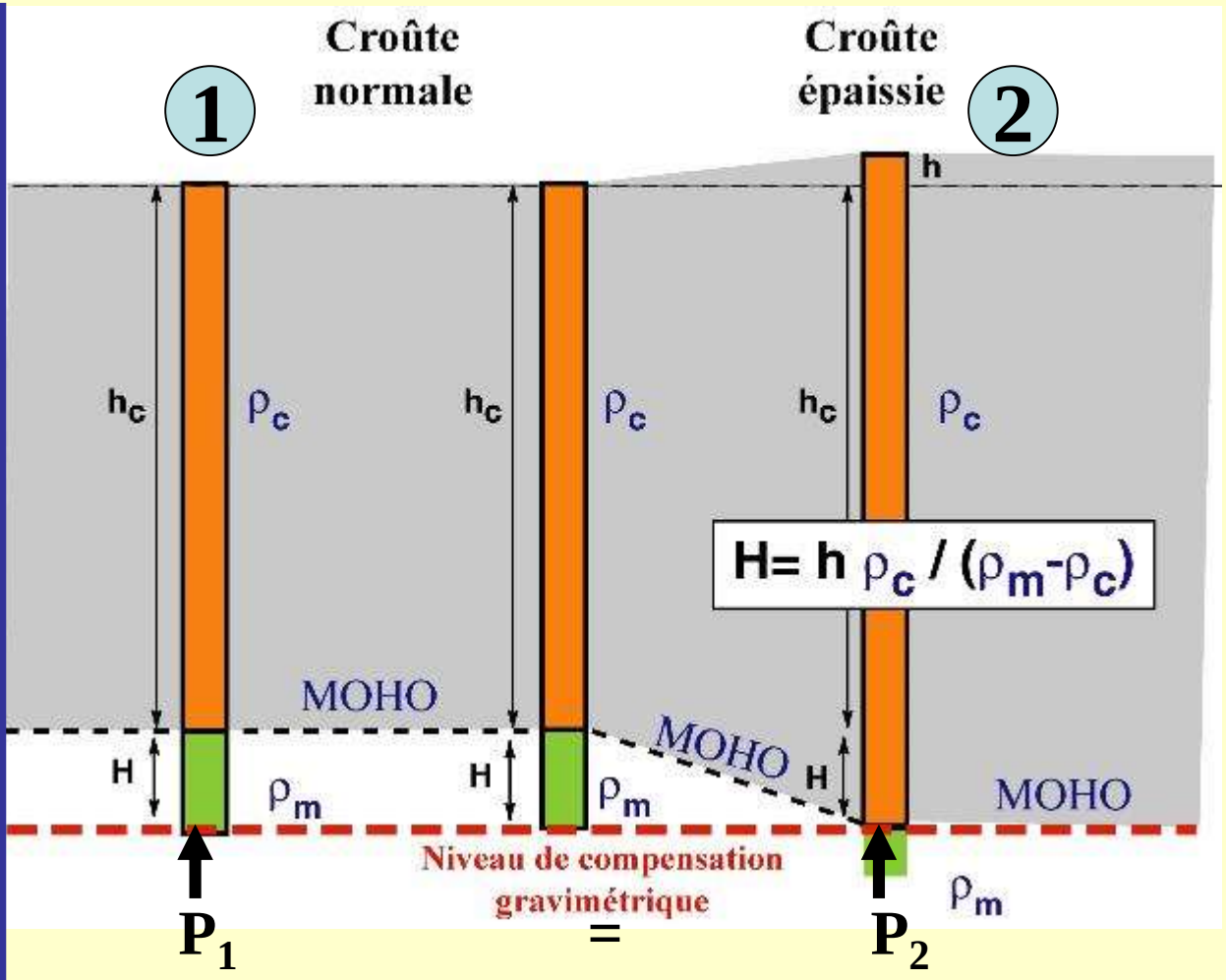
$$P=\rho Vg/S$$

soit

$$P=\rho gh$$

Pour une série de colonnes

$$P=\Sigma(\rho gh)$$



$$h_c \rho_c + H \rho_m = h \rho_c + h_c \rho_c + H \rho_c$$

$$h \rho_c = H (\rho_m - \rho_c)$$

Une confirmation partielle par la sismique réfraction

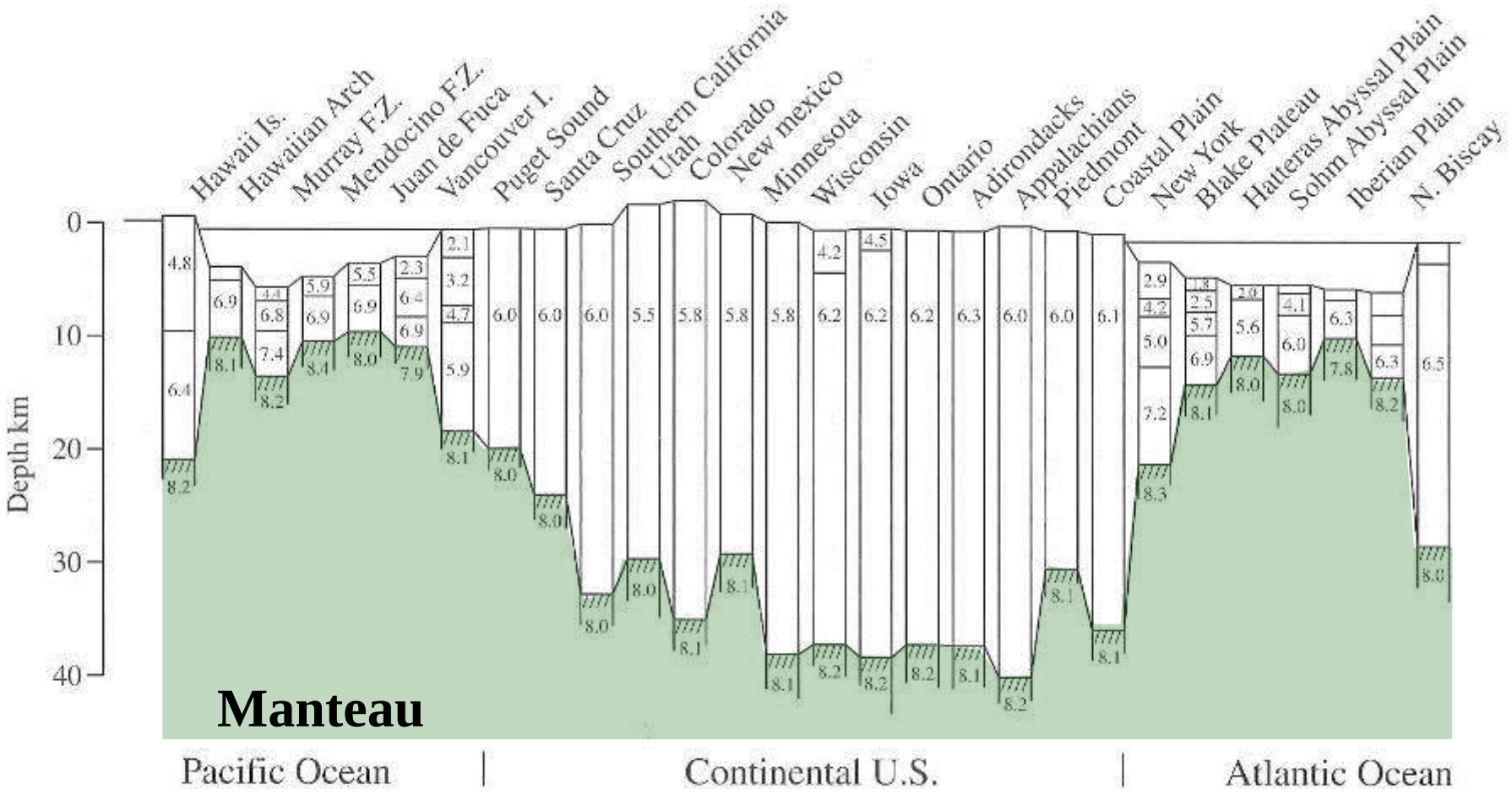
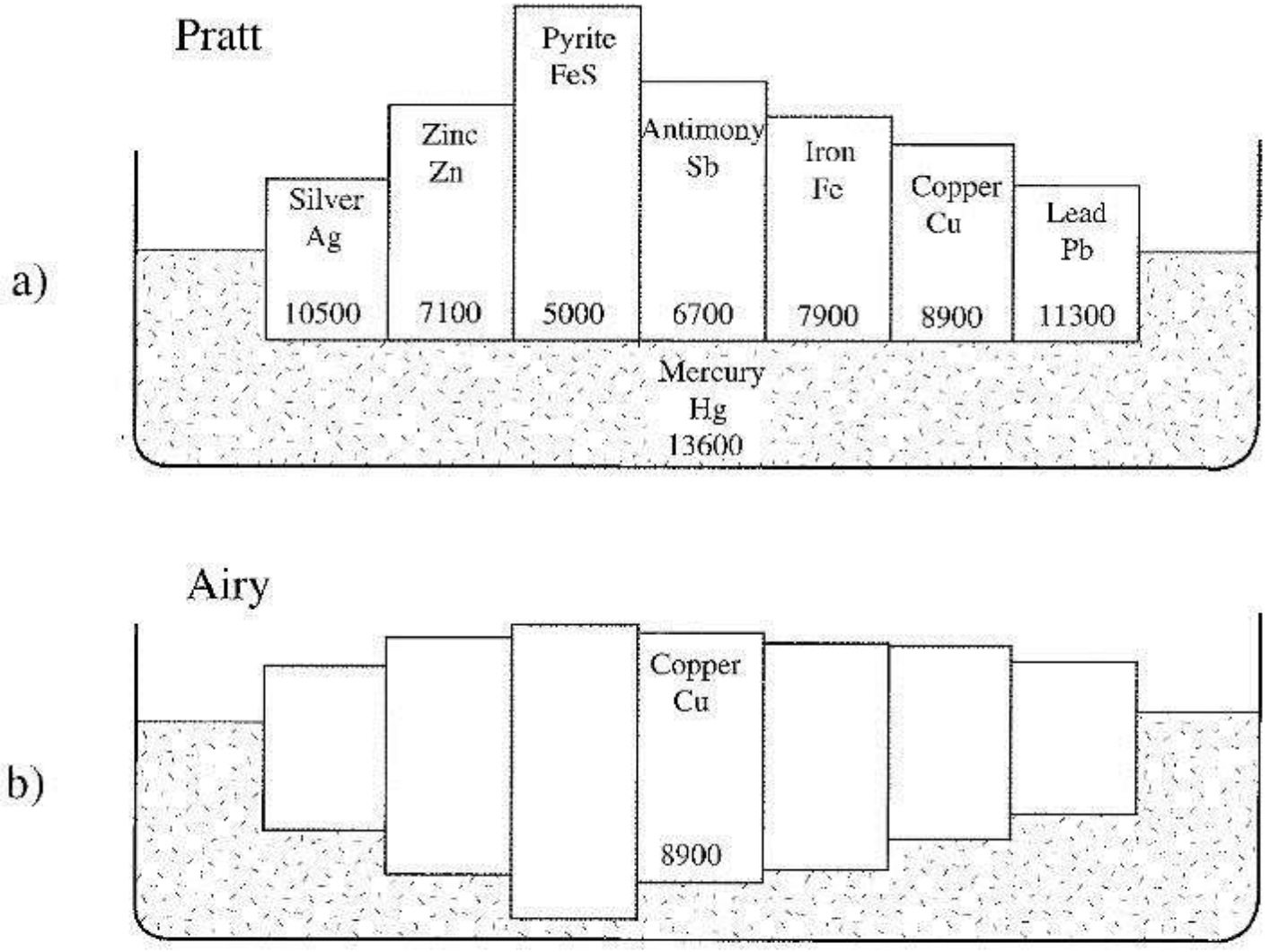


Fig. 1.32. Seismic refraction profile of the crust and upper mantle structure from Hawaii in the west, across the mainland United States, to France. The profile shows striking evidence for the Airy–Heiskanen hypothesis with mountains underlain by thick crust and oceans underlain by thin crust. Reproduced from Fig. 7-5 of Heiskanen and Vening–Meinesz (1958).

D'après Heiskanen et Vening-Meinesz, 1958



L'illustration par Bowie (1927) des hypothèses d'isostasie de Pratt (a) et Airy (b) utilisant des blocs de métal représentant le SIAL flottant sur du mercure fluide mais de masse volumique plus élevée représentant le SIMA de Suess
Niveaux de compensation gravimétrique et mécanique sont confondus !!!!!
Dans notre vision moderne, c'est la limite de l'analogie avec les Icebergs

Wegener et l'isostasie

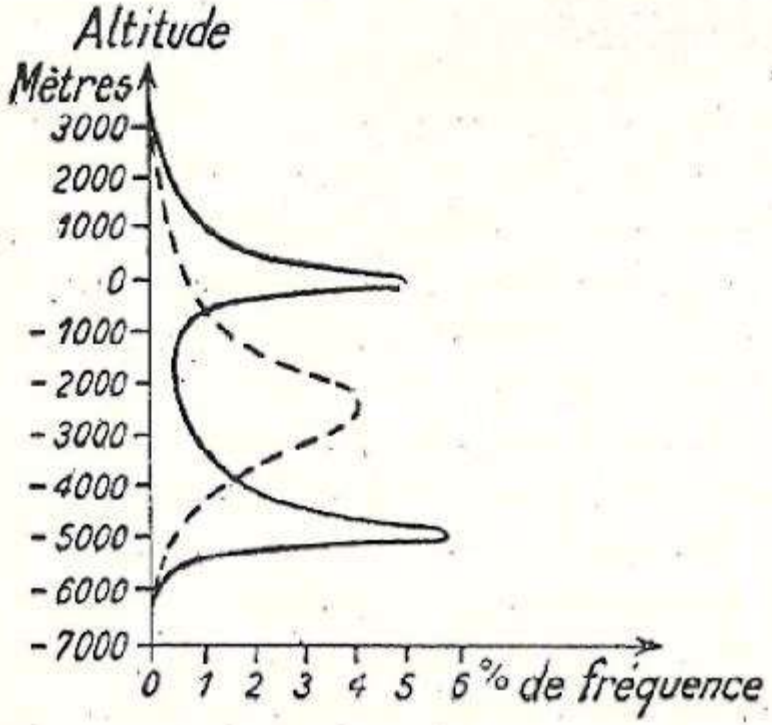


Fig. 8. — Les deux maxima de fréquence altitudinaire.

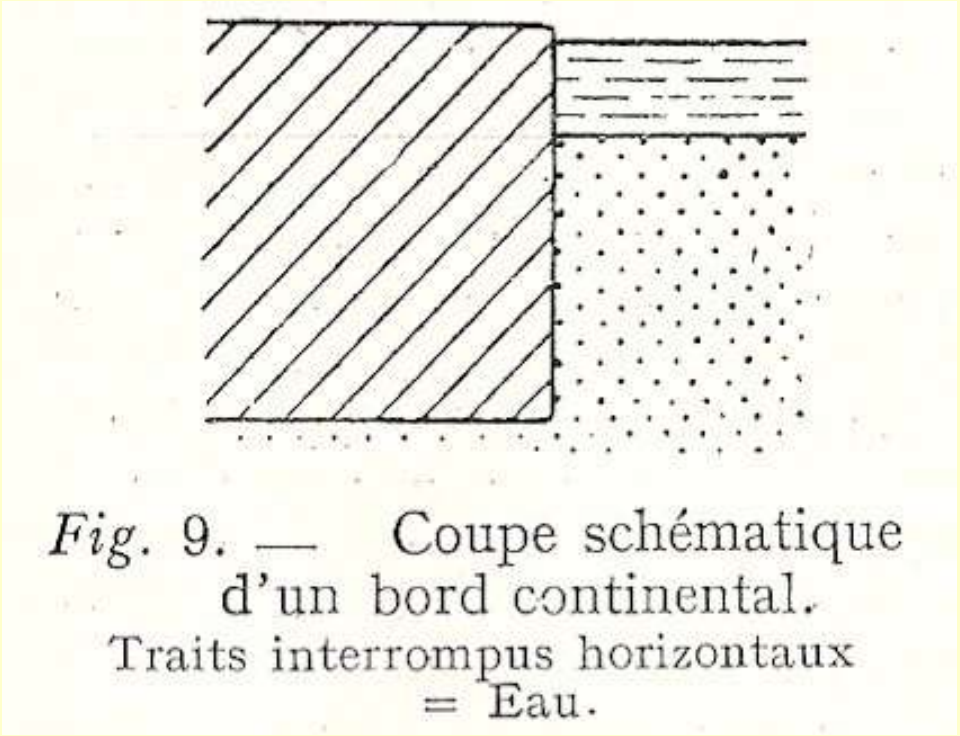


Fig. 9. — Coupe schématique d'un bord continental.
Traits interrompus horizontaux = Eau.

Wegener et l'isostasie

« Si les socles continentaux flottent réellement dans un fluide, fût-il même très visqueux, il n'y a aucun motif d'admettre qu'ils ne puissent se mouvoir que verticalement, les mouvements horizontaux étant exclus. »

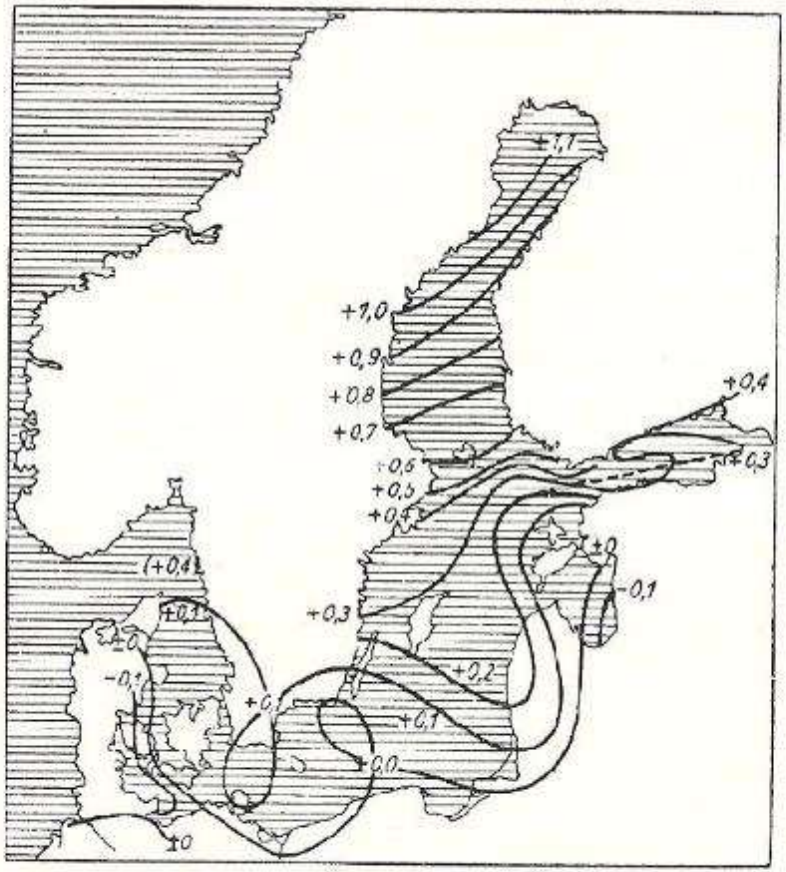
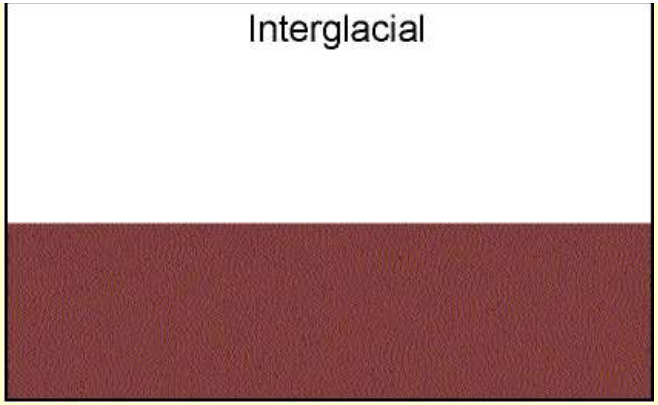


Fig. 11. — Soulèvement actuel de la région baltique compte tenu des nivellements (cm/année), d'après WITTING.

« Ceux-ci sont d'autant plus probables qu'il existe des forces qui s'exercent pendant des durées comparables à celles des périodes géologiques et qui tendent à les faire se déplacer horizontalement, comme le montrent les transports en masse des plis terrestres. »



http://www.homepage.montana.edu/~geol445/hyperglac/isostasy1/

Joseph BARRELL (1869-1919)

Lithosphère – Asthénosphère : les notions existaient en …. 1914

- La notion et les termes remontent à Joseph Barrell en ….. 1914 !!!!

Fig. 2.3. Joseph Barrell, Professor of Geology at Yale University. Portrait reproduced from Anonymous (1919). Reproduced with permission of the American Journal of Science.

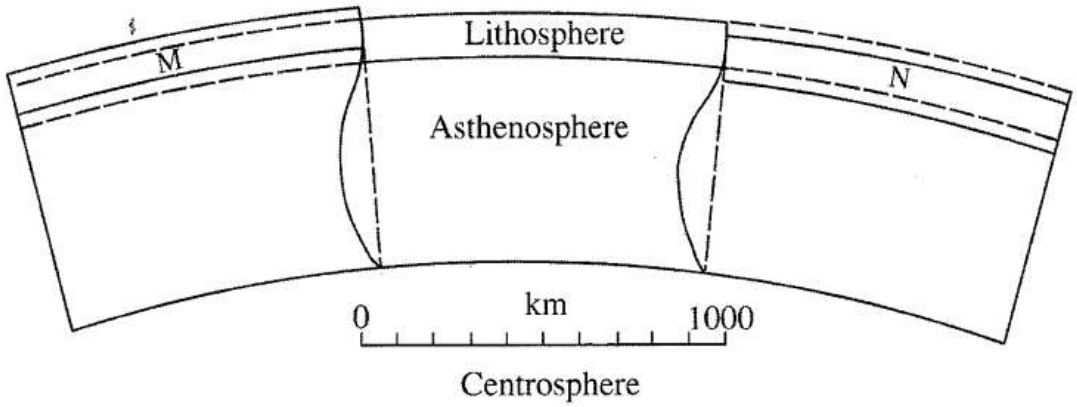


Fig. 2.4. Schematic vertical section of the outer layers of the Earth, to show the nature of the "undertow" in the asthenosphere that is necessary to restore isostatic equilibrium after modification of the lithosphere by uplift and erosion. Reproduced from Fig. 14 of Barrell (1914f) with permission of the University of Chicago Press.

Illustrations tirées de Watts, « Isostasy and flexure of the lithosphere, Cambridge, 2001

Joseph BARRELL (1869-1919)

Lithosphère – Asthénosphère en …. 1914 (suite)

Joseph Barrell prévoit même dès 1914 la nécessité de mouvements latéraux dans l'asthénosphère pour accommoder les soulèvements et enfoncements de la lithosphère!!!!

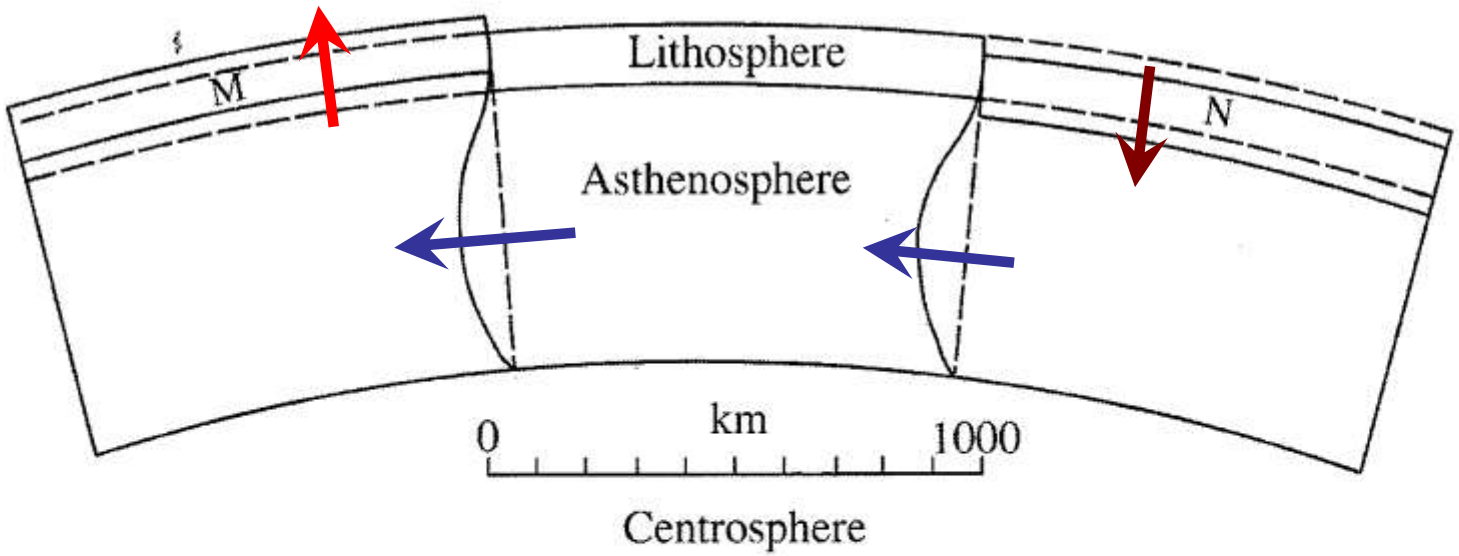


Fig. 2.4. Schematic vertical section of the outer layers of the Earth, to show the nature of the "undertow" in the asthenosphere that is necessary to restore isostatic equilibrium after modification of the lithosphere by uplift and erosion. Reproduced from Fig. 14 of Barrell (1914f) with permission of the University of Chicago Press.

Illustration tirée de Watts, « Isostasy and flexure of the lithosphere, Cambridge, 2001

- **« Bien que la comparaison des continents et des bassins océaniques montrent un haut degré de corrélation isostatique, il n'y a pas ou peu d'ajustement dans des régions de diamètres inférieur à 200-300 km. Les montagnes individuellement pourraient se dresser du fait de la rigidité de la croûte . »**

J. Barrell, « The strength of the Earth crust », 1914

Lithosphère-Asthénosphère au sens de Barrell

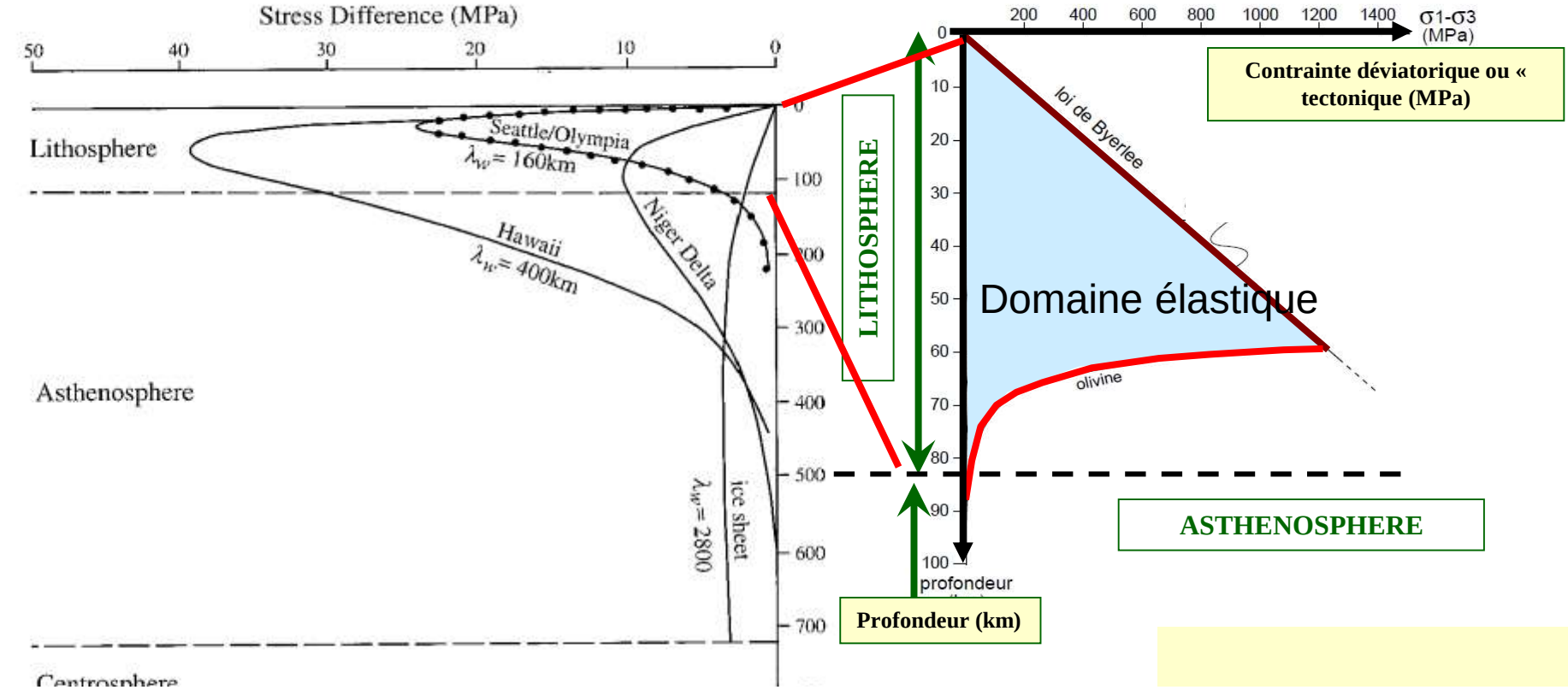


Fig. 18 de Barrell (1914) : Distribution des contraintes tectoniques supportées en profondeur par une Terre élastique en réponse à des charges s'écartant du modèle isostatique local (volcans, deltas, …). La lithosphère est la partie capable de supporter des contraintes « importantes »

Illustrations tirées de Watts, « Isostasy and flexure of the lithosphere, Cambridge, 2001

Félix Vening-Meinesz
(1887-1966)
et l'isostasie régionale au sens de la flexure

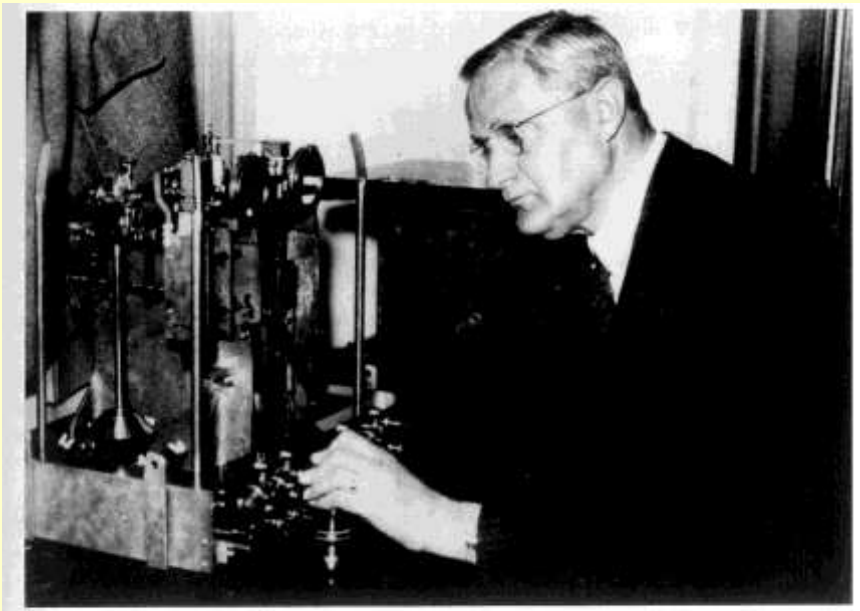


Fig. 2.10. Felix Andries Vening Meinesz, Hoofd-Curator van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, with a pendulum apparatus. Photo courtesy of the late B. J. Collette of the Vening Meinesz laboratorium, Rijksuniversiteit, Utrecht.

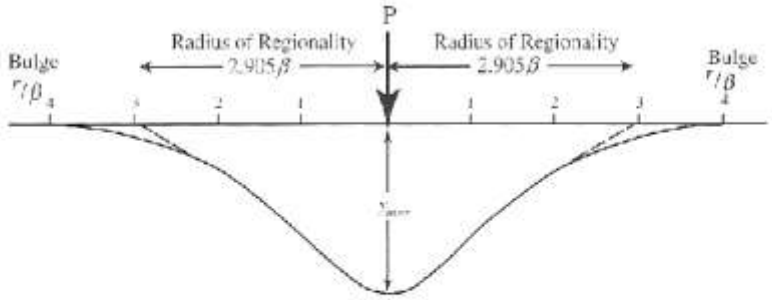


Fig. 2.12. The flexure of an elastic plate by a concentrated load P based on the formula of Hertz (1884); r is the radial distance from the load and β is a measure of the flexural strength of the plate. Vening Meinesz defined the value $r = 2.905\beta$ as the radius of regionality, R.

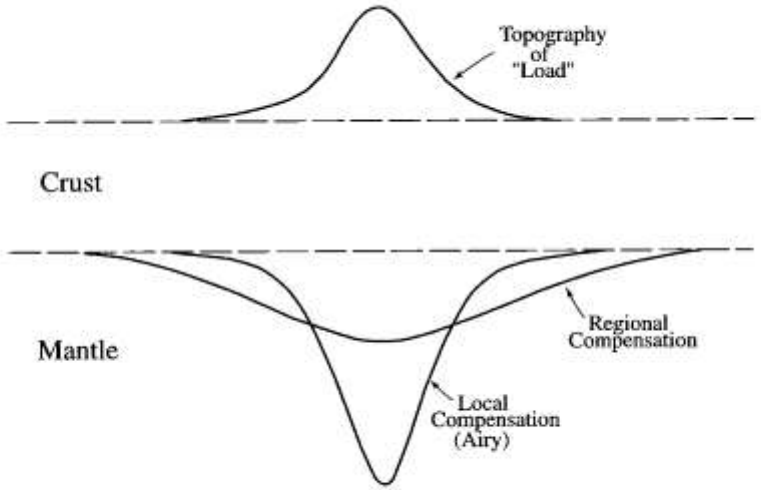
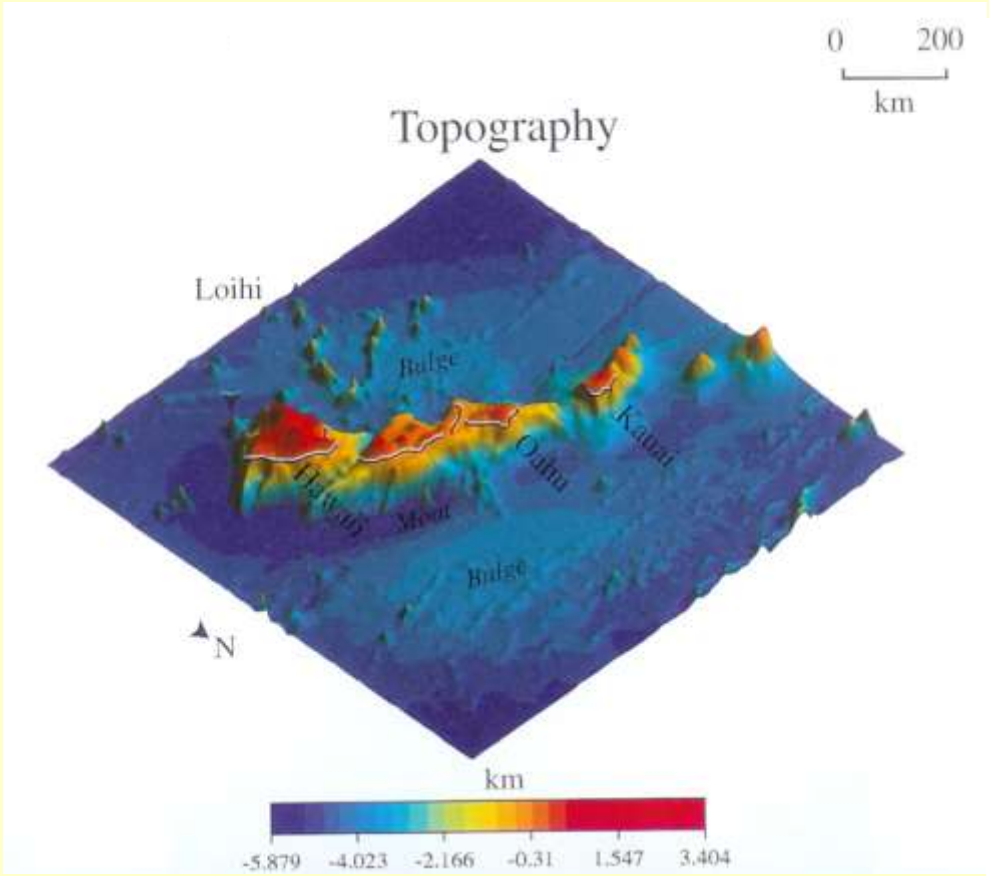
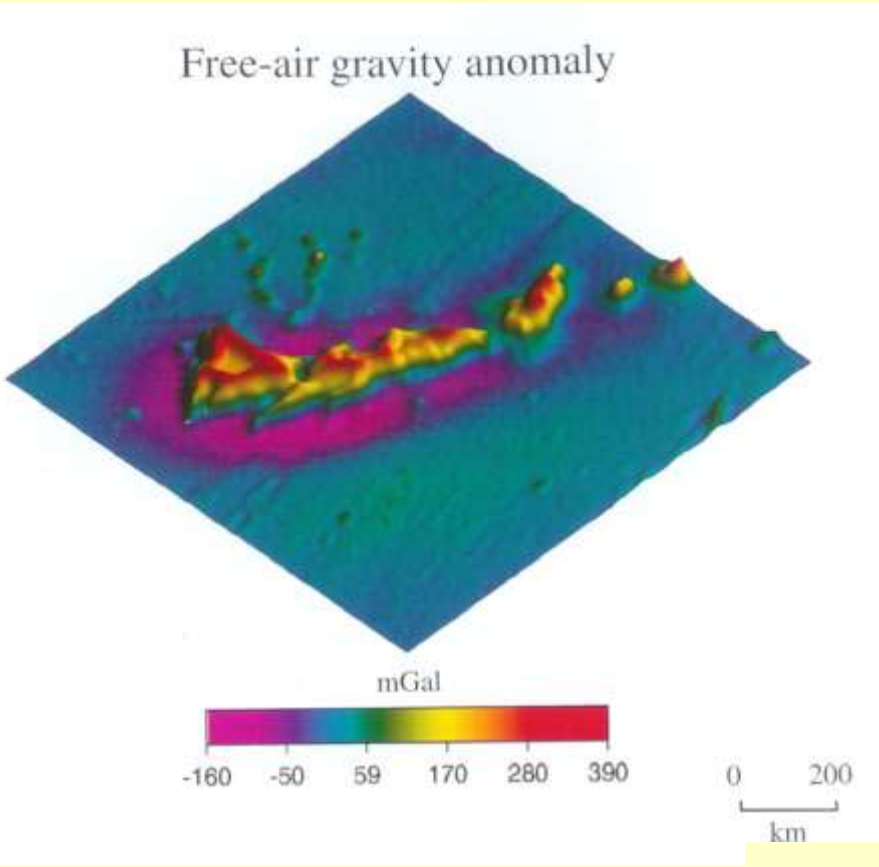


Fig. 2.11. Schematic diagram illustrating the local and regional models for compensation of a topographic load.

L'isostasie régionale à l'heure de la tectonique des plaques

Exemple tiré du sujet de CAPES SVT 2010!!!





Figurait dans mes cours bien avant
et je n'ai pas posé le sujet … alors que j'étais au jury !!

La notion de plaque lithosphérique élastique et les enveloppes rhéologiques

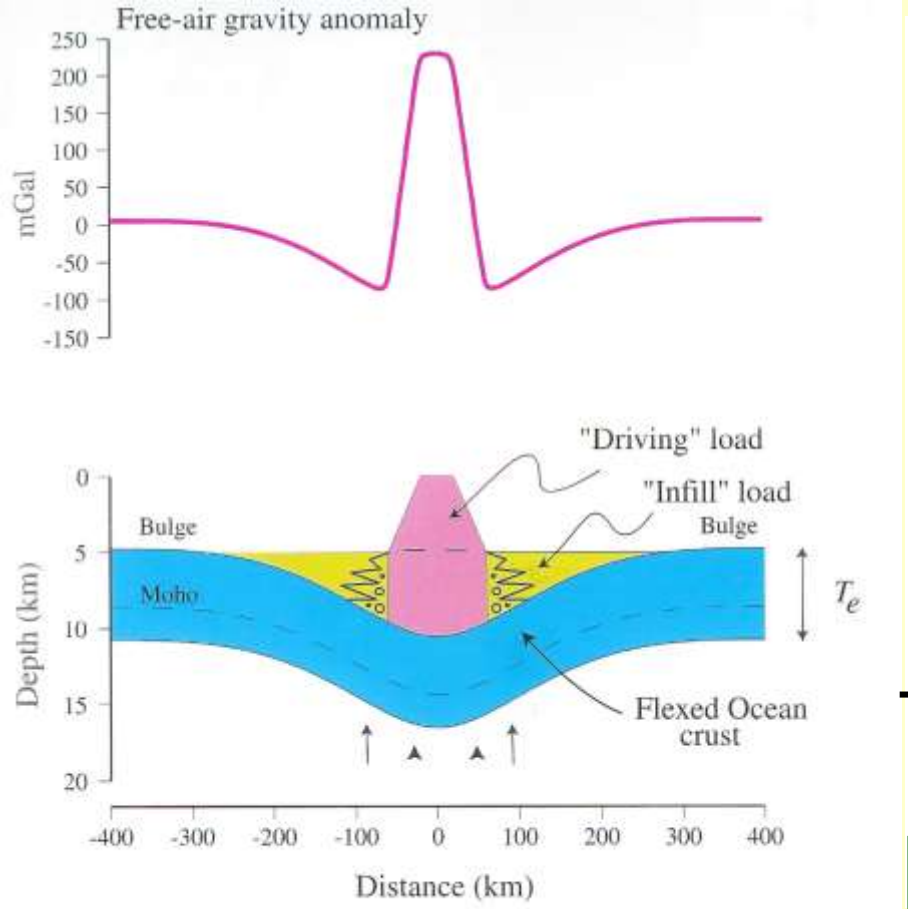
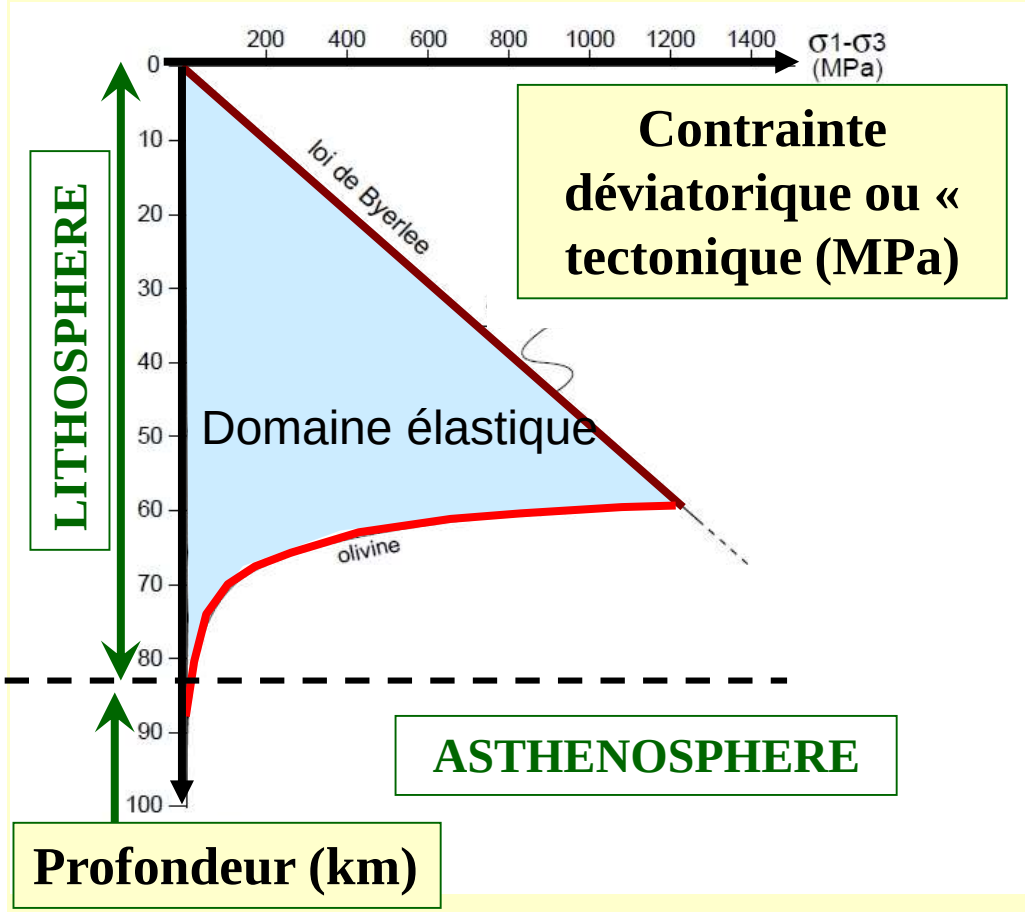
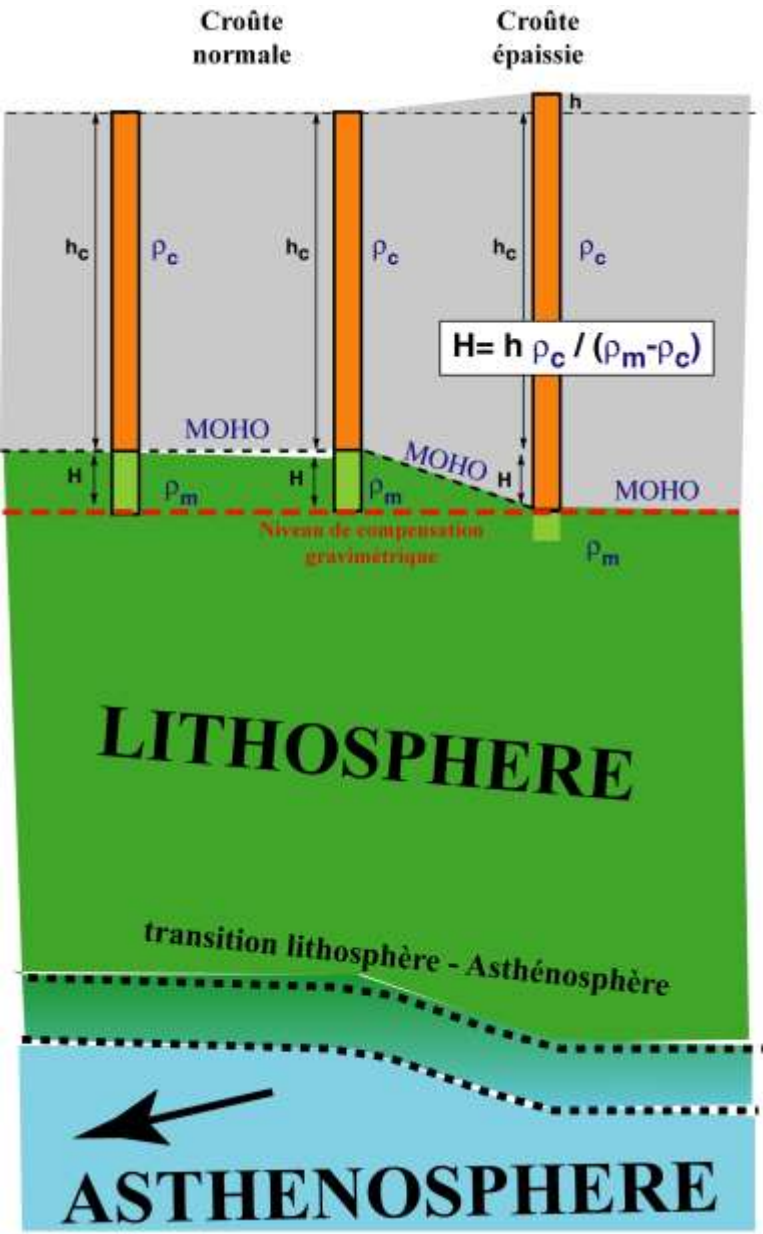
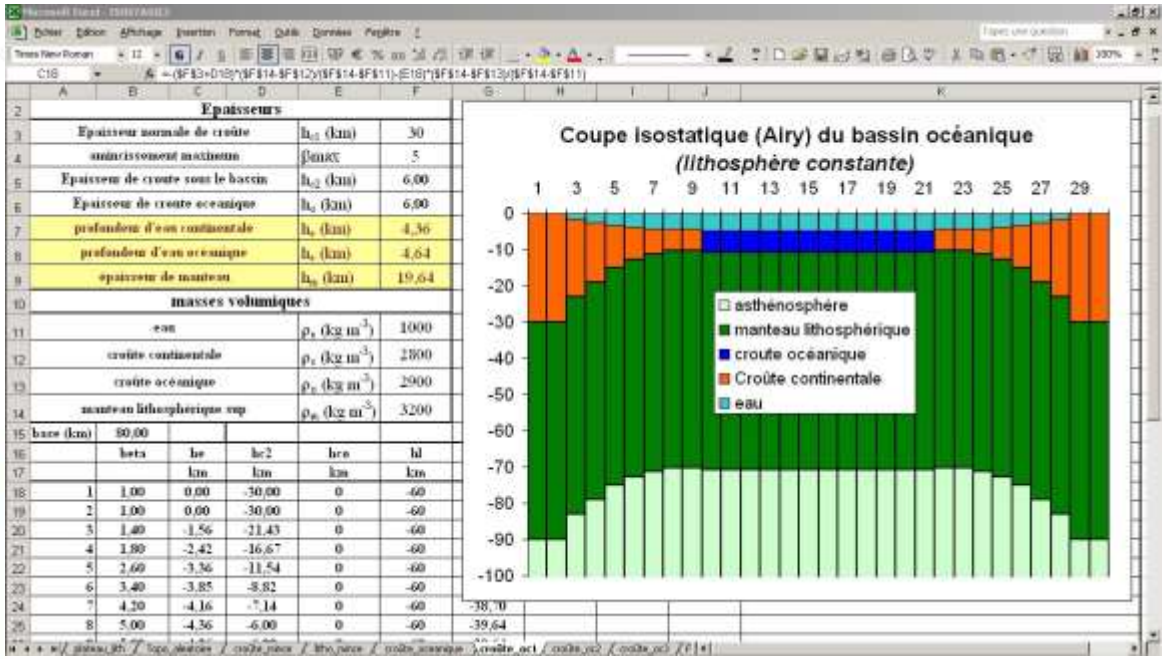


Fig. 4.15. Simple model for the gravity anomaly and flexure of the lithosphere at a seamount or oceanic island.



Isostasie et épaisseur crustale : un modèle de type AIRY



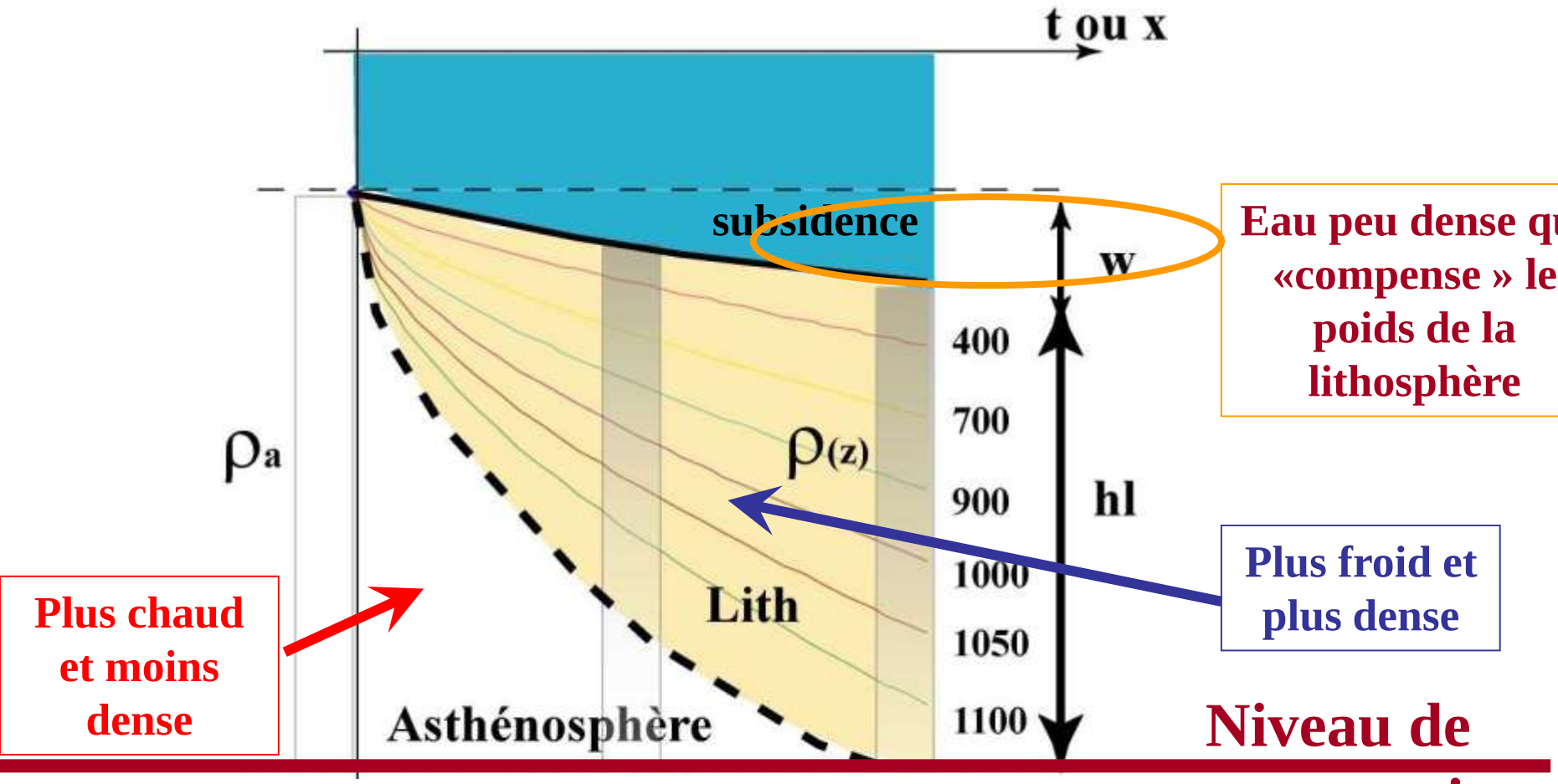


Epaisseurs		
Epaisseur normale de croûte	h_{c1} (km)	30
amincissement maximum	βmax	5
Epaisseur de croute sous le bassin	h_{c2} (km)	6,00
Epaisseur de croute océanique	h_c (km)	6,00
profondeur d'eau continentale	h_e (km)	4,36
profondeur d'eau océanique	h_e (km)	4,64
epaisseur de manteau	h_m (km)	19,64
masses volumiques		
eau	ρ_e (kg m^{-3})	1000
croûte continentale	ρ_c (kg m^{-3})	2800
croûte océanique	ρ_c (kg m^{-3})	2900
manteau lithosphérique sup	ρ_m (kg m^{-3})	3200

base (km)	80,00				
	beta	he	hc2	hco	hl
		km	km	km	km
1	1,00	0,00	-30,00	0	-60
2	1,00	0,00	-30,00	0	-60
3	1,40	-1,56	-21,43	0	-60
4	1,80	-2,42	-16,67	0	-60
5	2,60	-3,36	-11,54	0	-60
6	3,40	-3,85	-8,82	0	-60
7	4,20	-4,16	-7,14	0	-60
8	5,00	-4,36	-6,00	0	-60

Une représentation plus complète pour rappeler la différence entre niveau de compensation gravimétrique ou niveau d'équilibre du contraste de densité (MOHO) …
et zone de compensation mécanique qui permet le mouvement ductile sous la lithosphère

Isostasie et subsidence thermique : un modèle de type PRATT

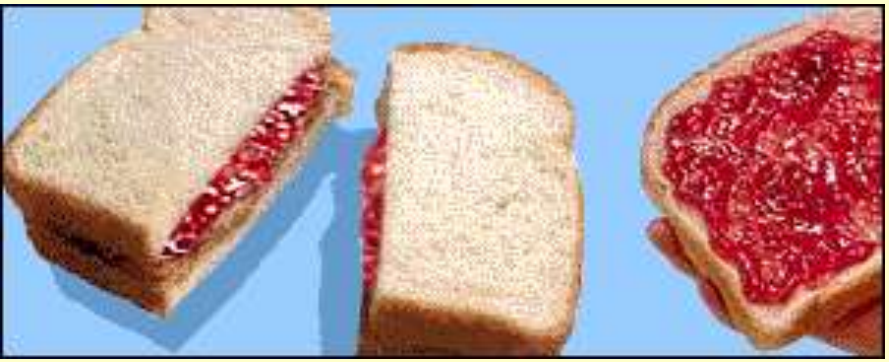


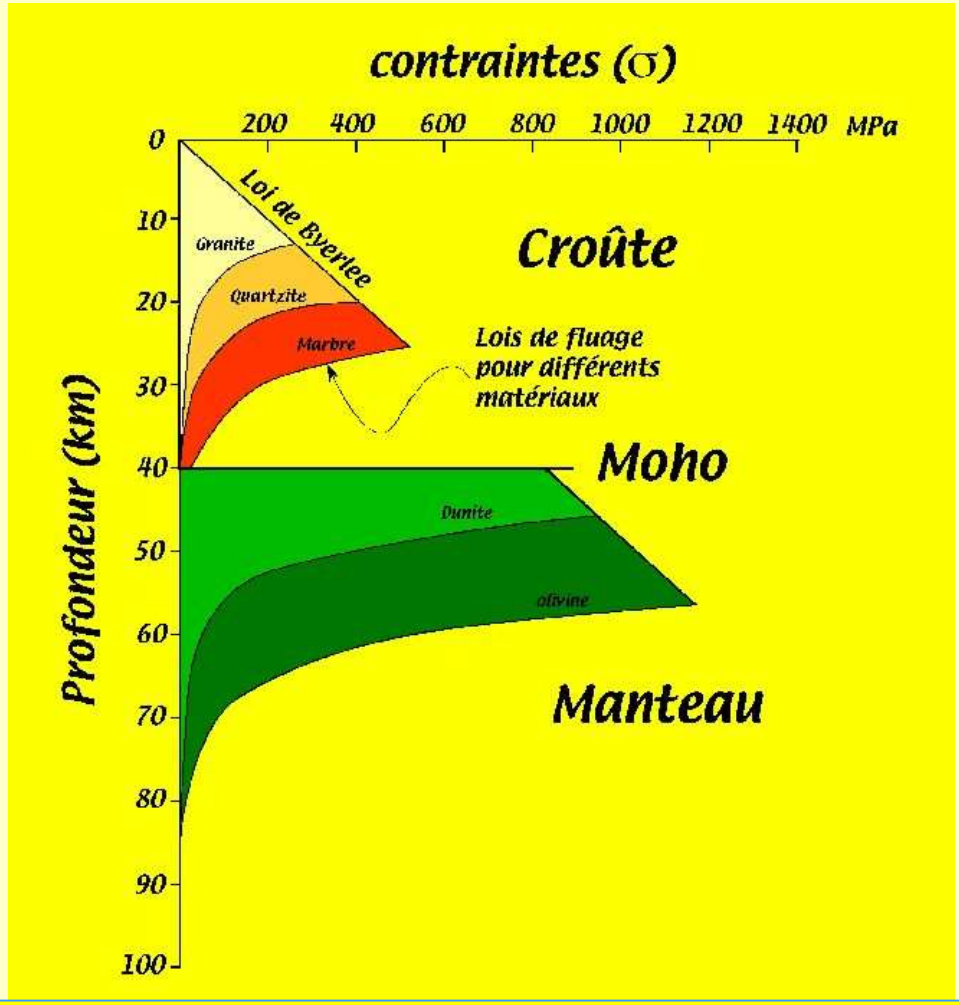
L'équilibre des colonnes donne:

$$(w + hl)\rho_a = w\,\rho_w + \int_0^{hl} \rho(z)\,dz$$

Retour à la lithosphère continentale : « Jelly sandwich or Crème brûlée » ?

La controverse des années 2000-2010





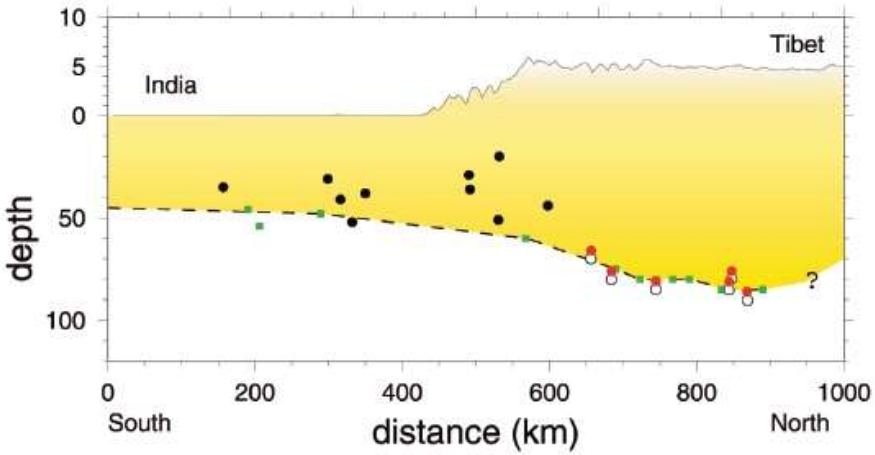
http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-profils-rheologiques.xml

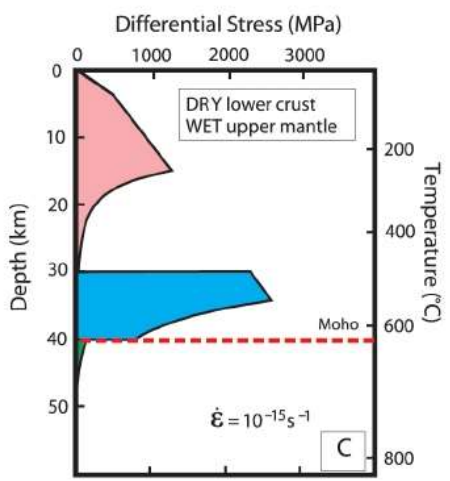
James Jackson et la « crème brûlée »

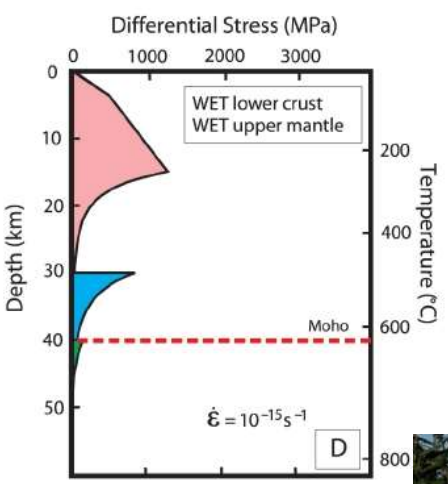
Strength of the continental lithosphere: Time to abandon the jelly sandwich?

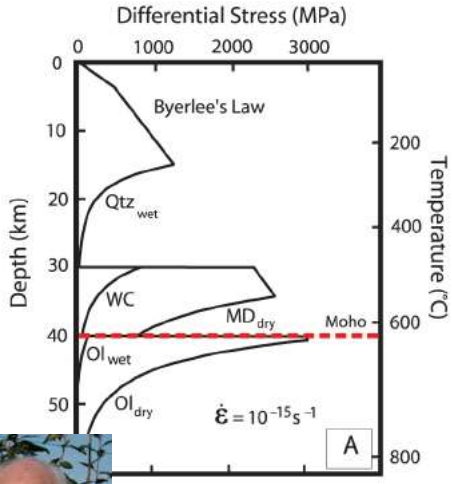
James Jackson, University of Cambridge, Department of Earth Sciences, Bullard Laboratories, Madingley Road, Cambridge CB3 OEZ, UK, jackson@esc.cam.ac.uk

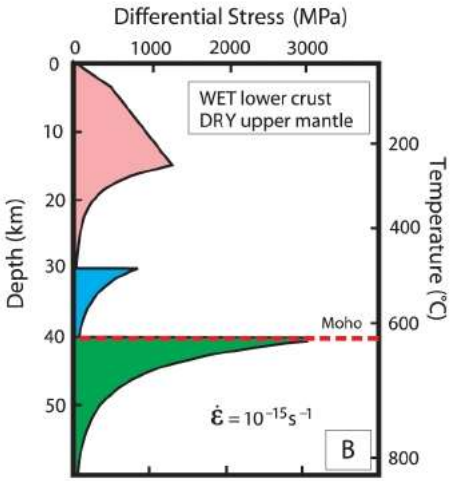
GSA TODAY 2002









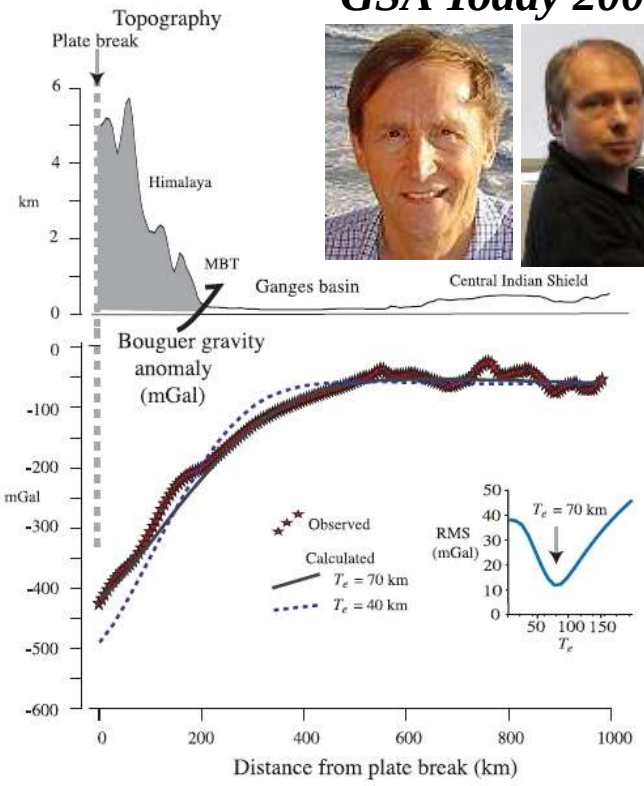


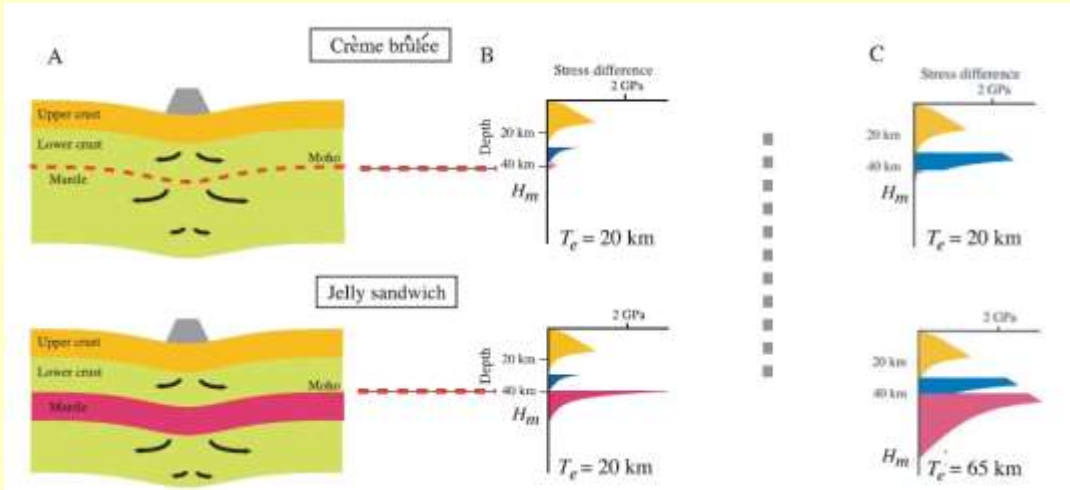
Ou le retour du « jelly sandwich »

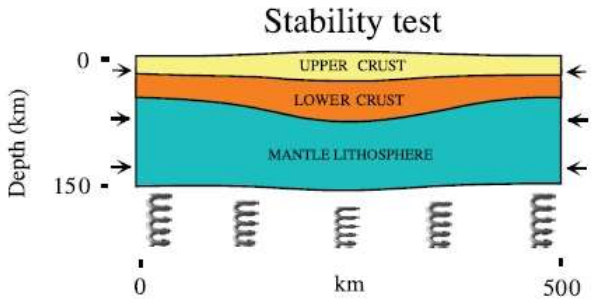
The long-term strength of continental lithosphere: "jelly sandwich" or "crème brûlée"?

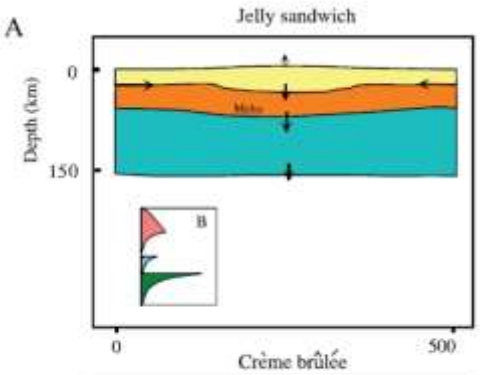
E.B. Burov, *Laboratoire de Tectonique, University of Paris 6, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France, evgenii.burov@lgs.jussieu.fr, and* **A.B. Watts,** *Department of Earth Sciences, University of Oxford, Parks Road, Oxford OX1 3PR, UK, tony.watts@earth.ox.ac.uk*

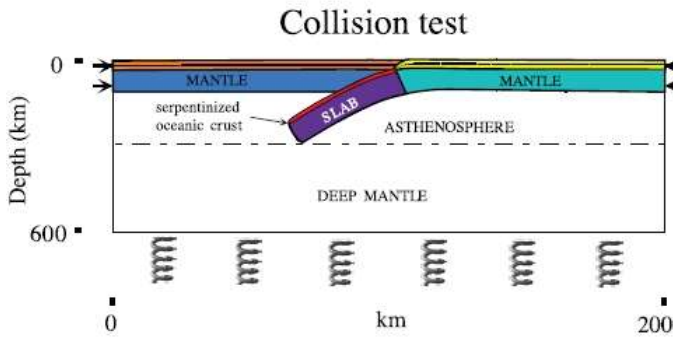
GSA Today 2006

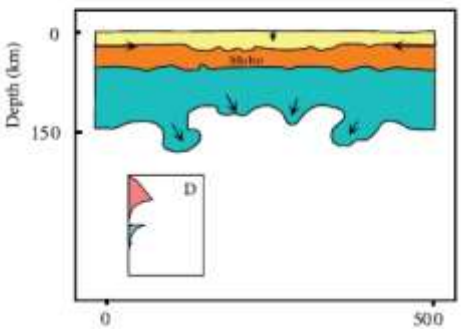








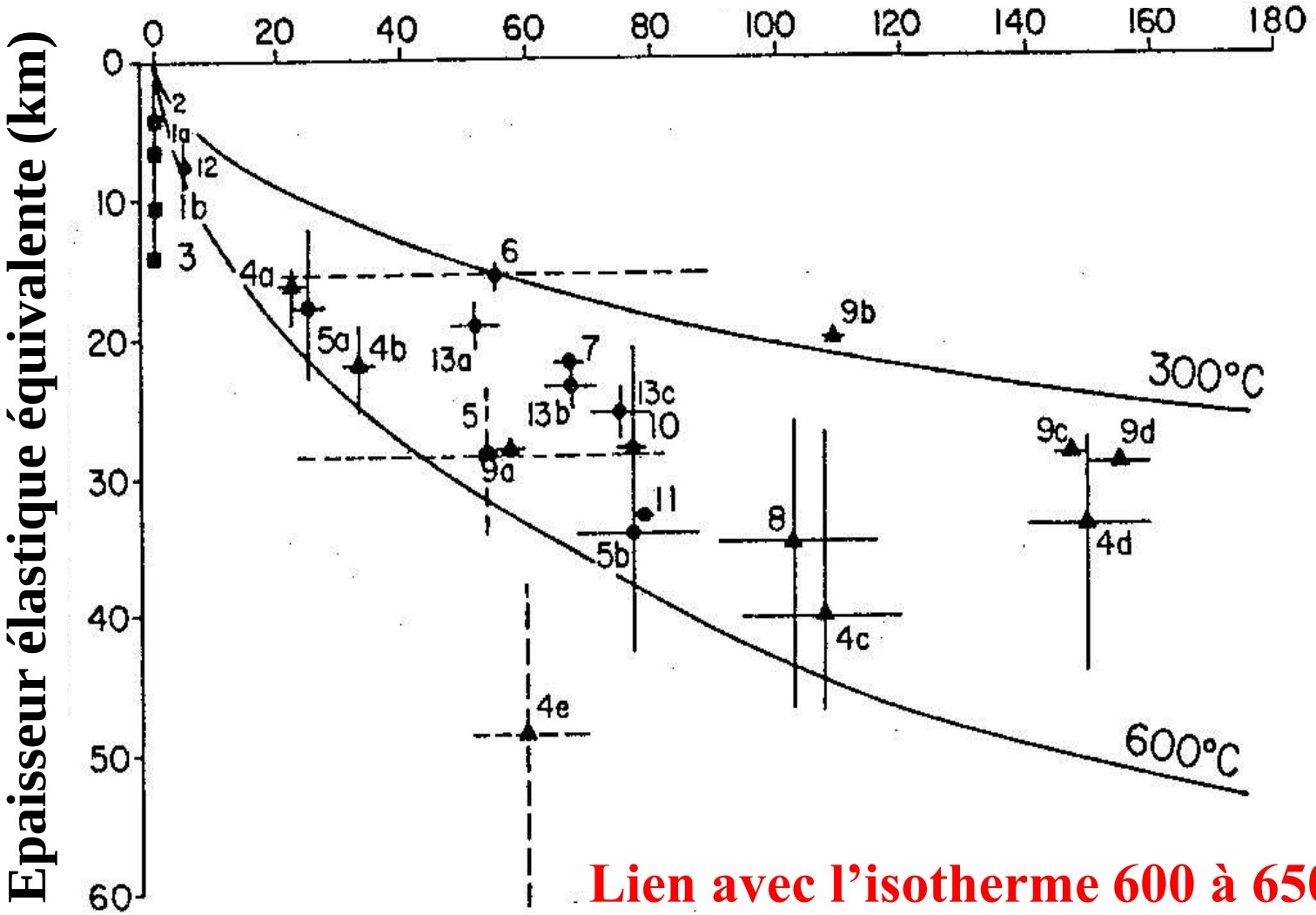




QUELQUES CONCLUSIONS

- **Les modèles d'isostasie ont été des solutions élégantes proposées au problème géodésique soulevé par Bouguer**
- **L'existence des deux modèles de Pratt et Airy est liée à l'acceptation ou non d'une croûte mince plus rigide flottant sur une enveloppe fluide et dense.**
- **Le modèle d'Airy a été un argument crucial pour la théorie de Wegener et on peut mettre en relation l'opposition Pratt-USA vs Airy-Europe avec la « géographie » du rejet de la « dérive des continents »**
- **Les trois modèles historiques (Airy, Pratt et Vening-Meinez) sont complémentaires et ont trouvé leur place dans la tectonique des plaques**
- **Si le modèle mécanique de la lithosphère océanique est bien admis, il existe encore des controverses sur les contributions respectives de la croûte et du manteau à la rigidité de la lithosphère continentale**

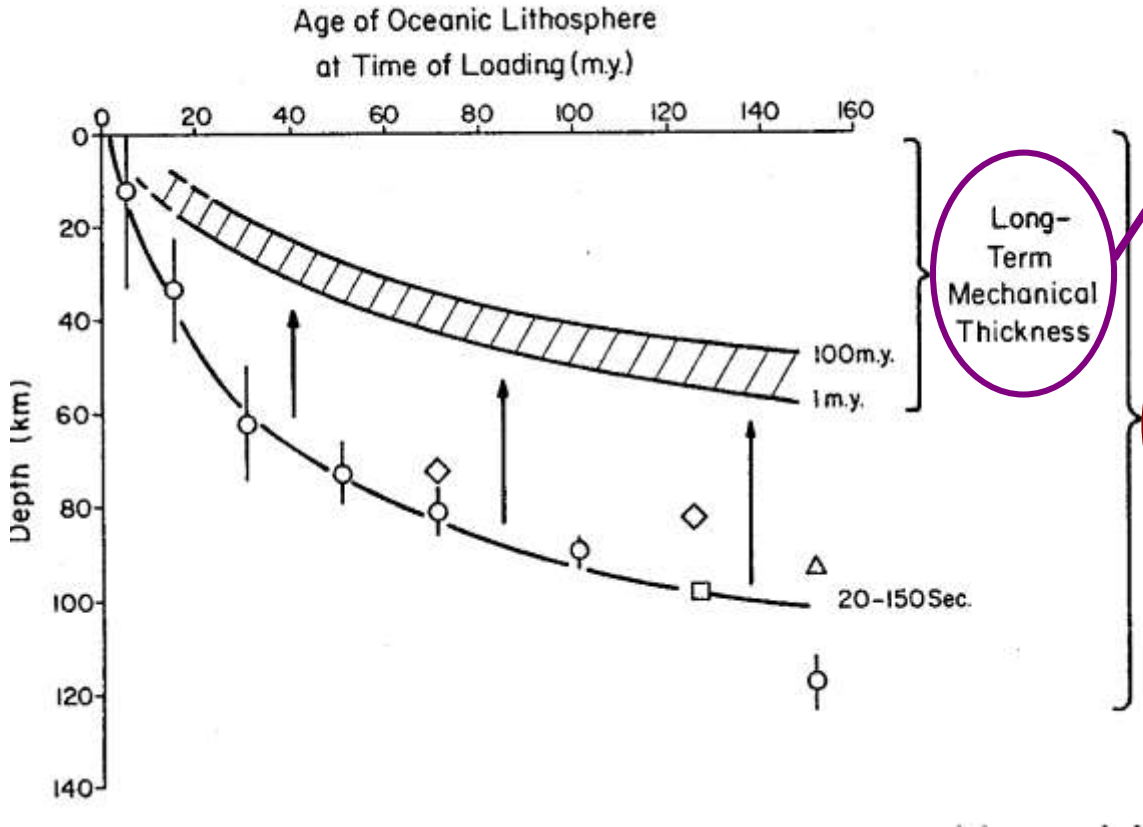
La « lithosphère élastique »



Lien avec l'isotherme 600 à 650°

Des lithosphères différentes suivant les constantes de temps

L' «Epaisseur Elastique Equivalente» de la lithosphère ne correspond qu'à une partie de la lithosphère thermique et sismologique !!!!



Lithosphère élastique « géologique »

Lithosphère sismologique Et thermique

Classe de terrain, investigation, jeux ...

Un bilan de recherche pour concevoir des démarches innovantes

Colloque AFPSVT – 14 janvier 2014

Michèle Prieur & Eric Sanchez, EducTice-S2HEP, IFE ENS de Lyon

1. La classe de terrain, modalité pédagogique
2. Articuler recherche et pratique pour concevoir des classes de terrain innovantes
3. Classe de terrain : démarche et outils pour l'investigation scientifique
4. Perspectives

1. La classe de terrain, modalité pédagogique

La classe de terrain : une attente institutionnelle

Programme classe terminale de la série scientifique

B.O.

n° 8, 13 octobre 2011

Sortie géologique

« une pédagogie active fondée sur le concret »

→ *« la démarche d'investigation »*

→ *« l'approche de la complexité des situations réelles », « des activités pratiques réelles »*

→ *« construction des compétences »*

Thème : Le domaine continental et sa dynamique

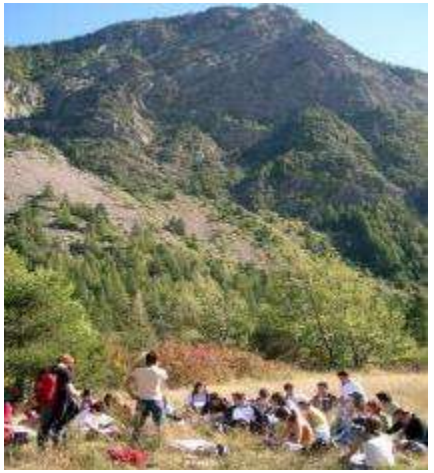
« Recenser, extraire et organiser des données de terrain entre autres lors d'une sortie »

ifé INSTITUT FRANÇAIS DE L'ÉDUCATION

Le terrain comme lieu d'apprentissage : une innovation ?

- **La classe de terrain - Programme première S** (BO, 2002)

→ Des activités inscrites dans le cadre d'une démarche scientifique
→ Accès au réel



- *"passans par quelques prez ou autres lieux herbus, visitoyent les arbres et plantes, et en emportoyent leurs pleines mains au logis* »

F. Rabelais, 1534

→ Ponocrates promeut une méthode d'enseignement qui le conduit à effectuer des promenades avec son élève Gargantua

Enquête (2005) : la classe de terrain dans l'enseignement des sciences de la Terre

Objectifs et pratiques des enseignants

- Conduire une démarche d'investigation
- Construire des connaissances
- Travail de groupe
- Formation technique

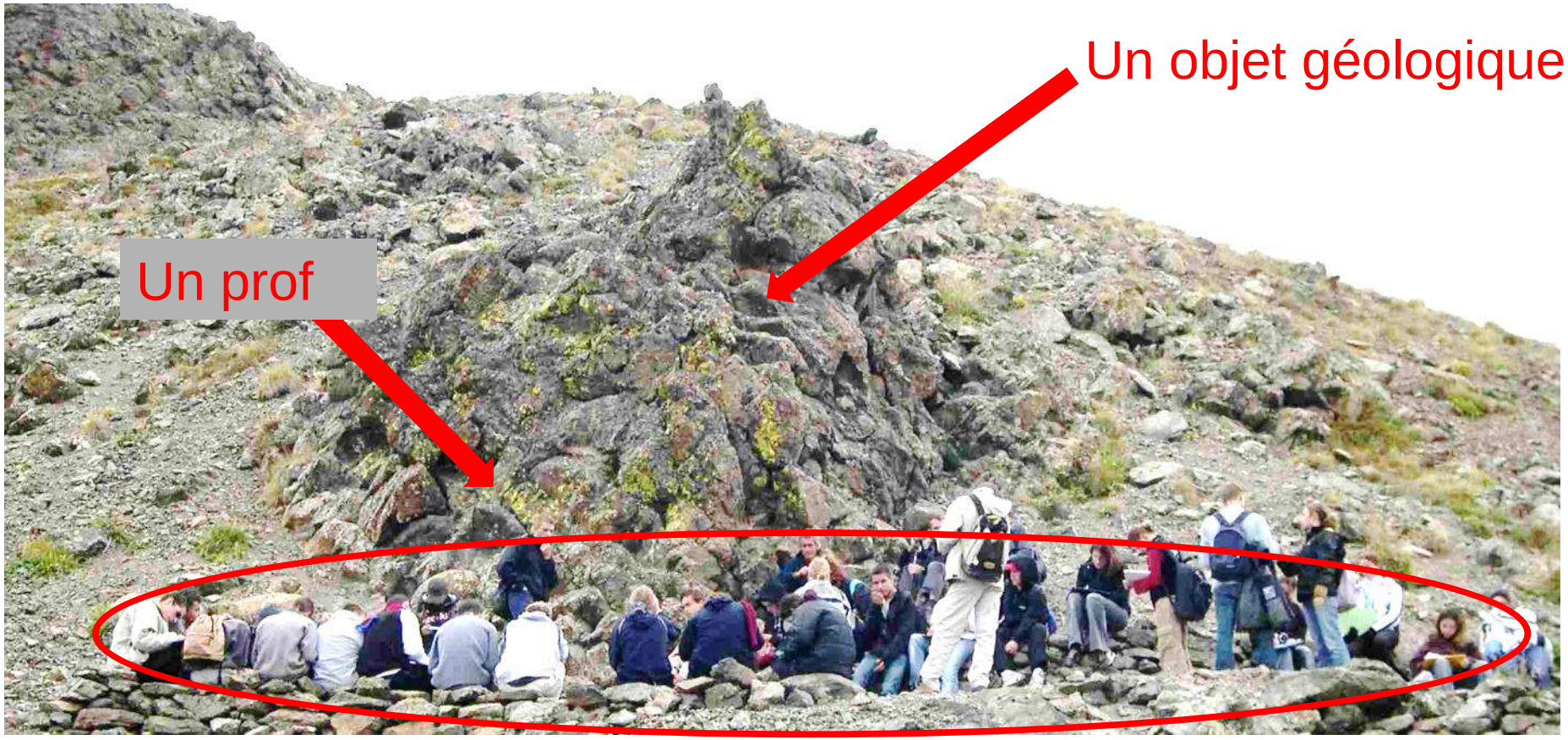
des paradoxes

La classe de terrain pour :

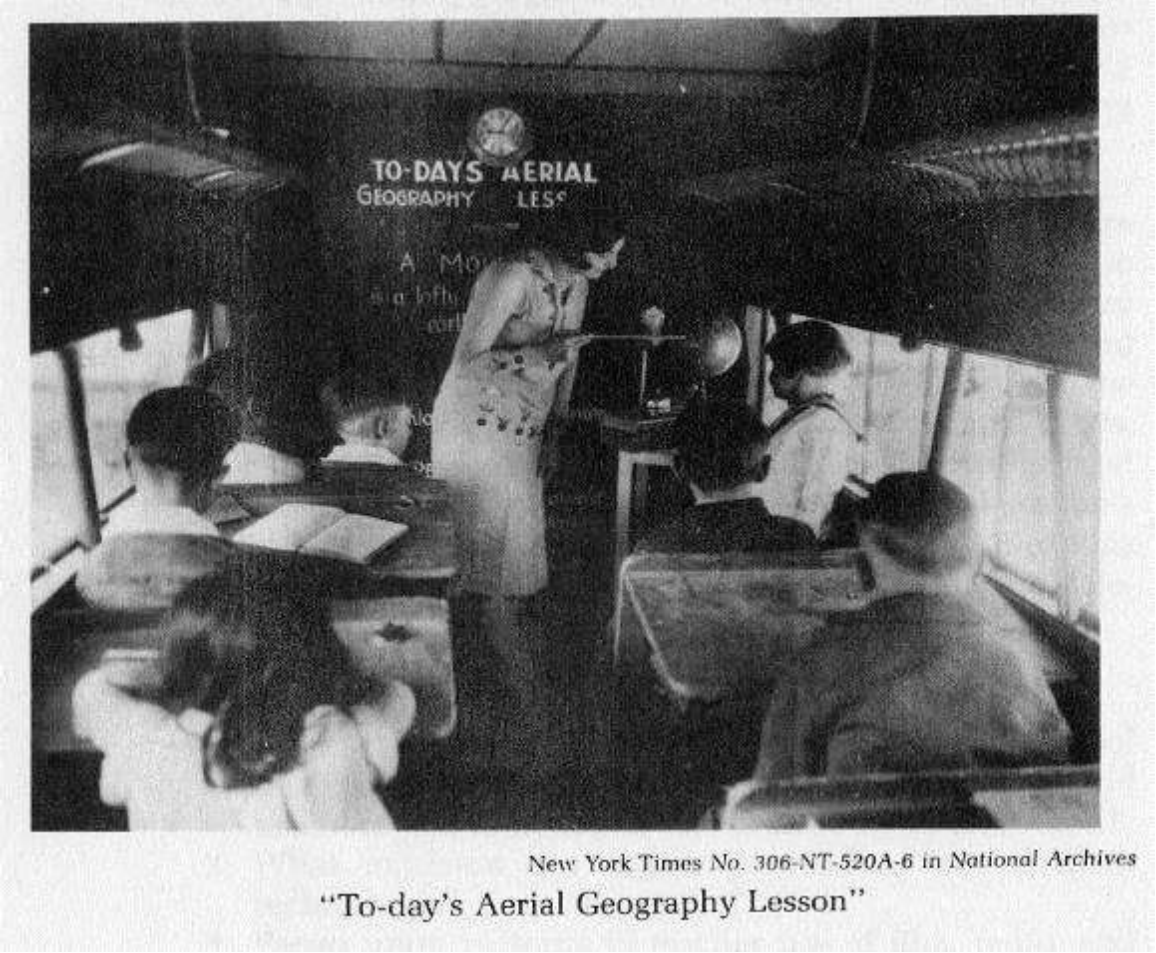
- « se confronter au réel », « découvrir »

Sanchez E., Prieur M., Fontanieu V. (2005) L'enseignement des sciences de la Terre : Que font les élèves sur le terrain ? *XXVIèmes JIES*. Chamonix

Un risque…



…un cours magistral en "plein air"



New York Times No. 306-NT-520A-6 in National Archives

"To-day's Aerial Geography Lesson"

2. Articuler recherche et pratique pour innover (2005 – 2014)

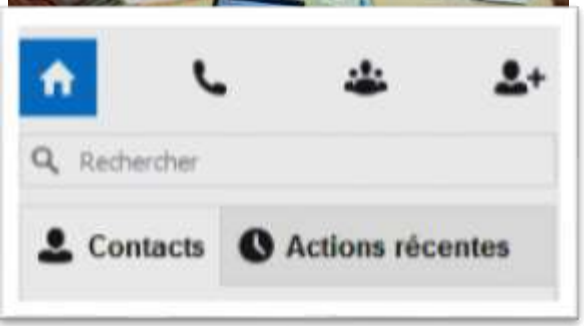
Une recherche *fondamentale finalisée*

- Articuler recherche et pratique
- Approche systémique des situations d'apprentissage

Une méthodologie de type *Design based research*

Wang, F., & Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. Educational Technology Research and Development. *Educational Technology Research and Development, 53*(4), 5-23.

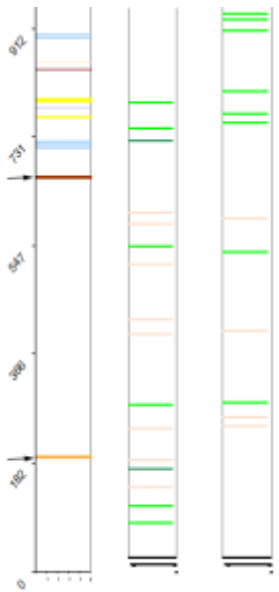
DBR : une collaboration chercheur - enseignant



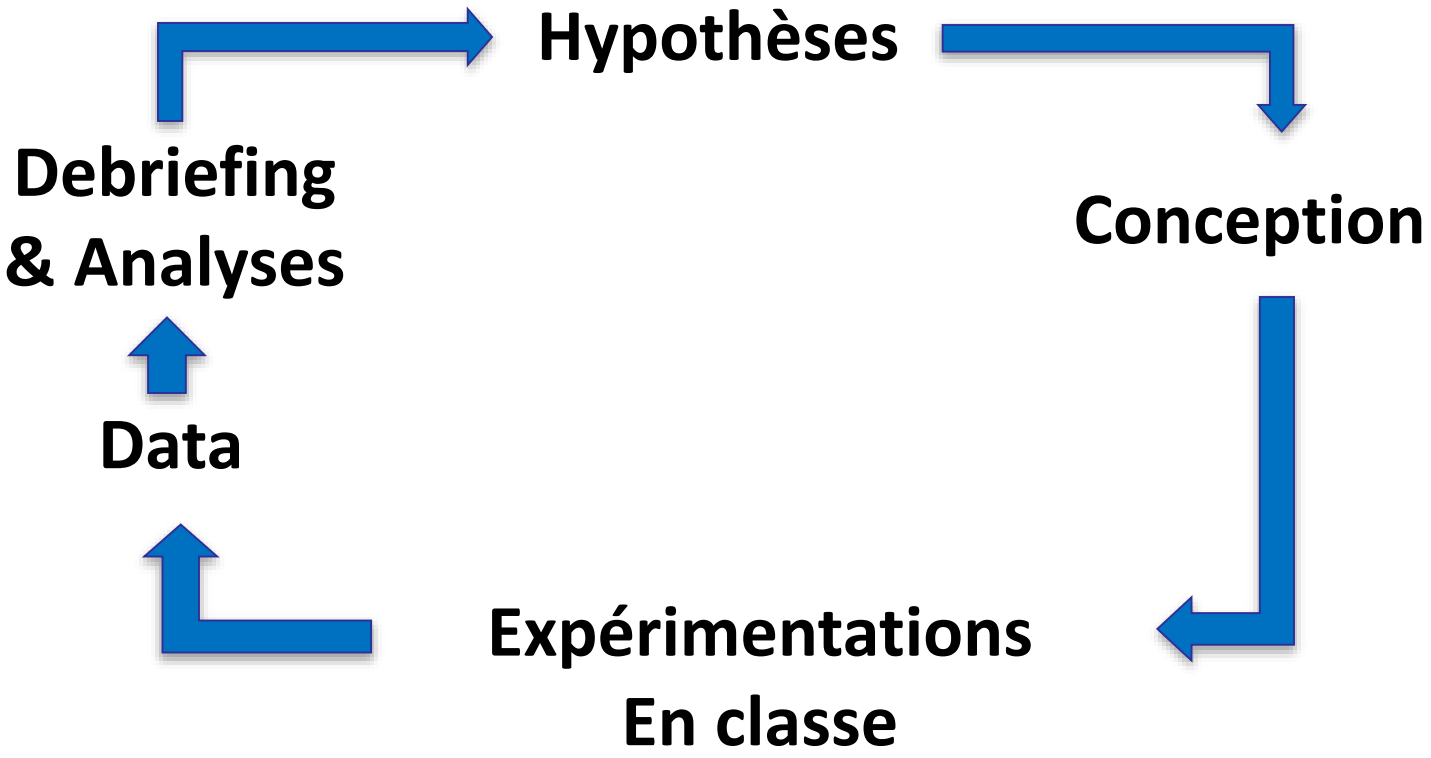
- Co-conception et co-analyse des données
- Vers des praxéologies partagées
- Des enseignants associés à l'IFE – Des LéA
- Des enseignants chargés d'étude : *brokers*

DBR : Expérimentations

- Observation classe
- Traçage
- Focus group
- Questionnaire



DBR : un processus itératif



DBR : objectifs

Pragmatique

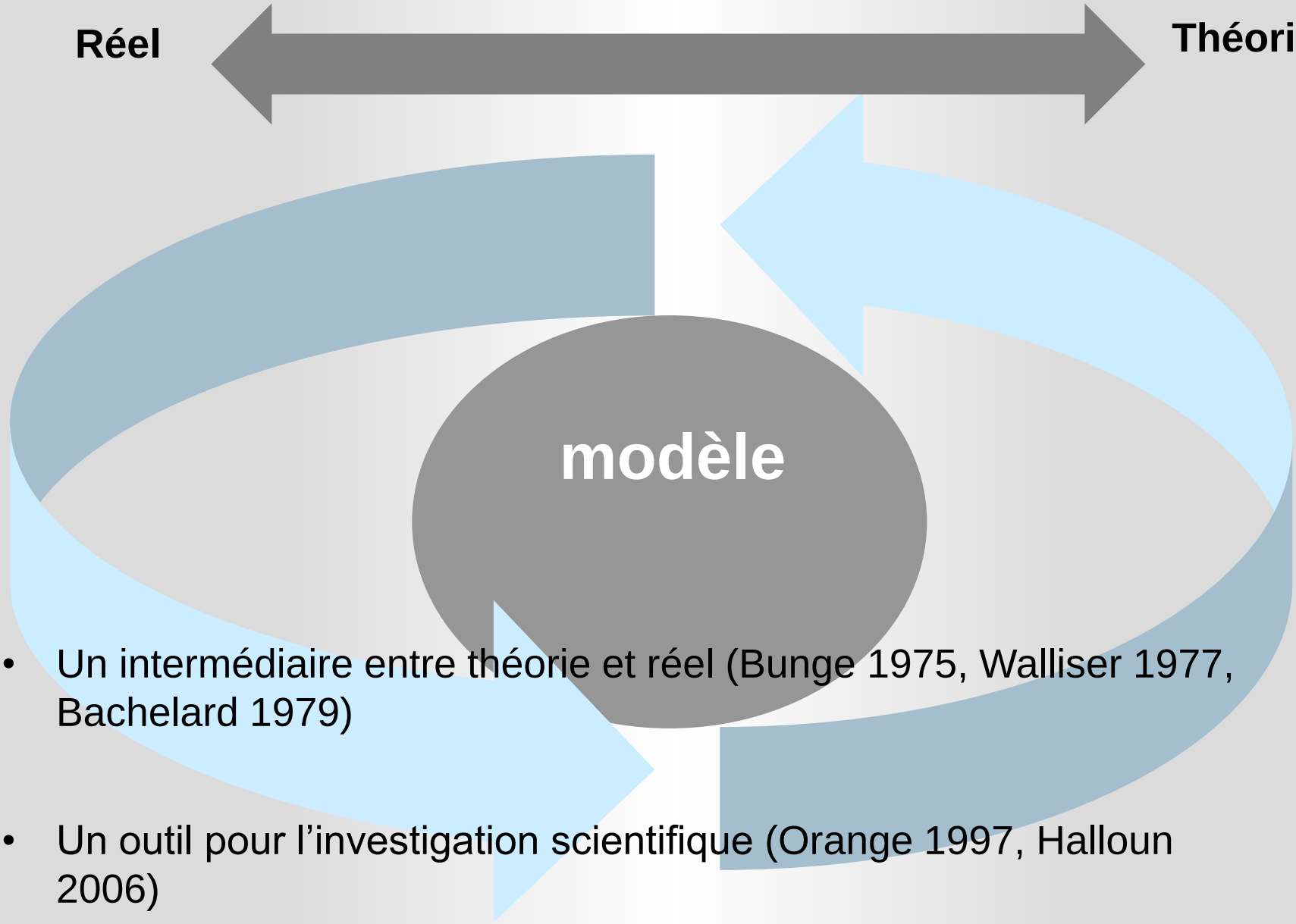
Innovation

Formation

Heuristique

3. Classe de terrain : démarches et outils pour l’investigation scientifique

Modèle et investigation scientifique



- Un intermédiaire entre théorie et réel (Bunge 1975, Walliser 1977, Bachelard 1979)
- Un outil pour l'investigation scientifique (Orange 1997, Halloun 2006)

Le scénario d'une classe de terrain

En quoi les Alpes sont elles une chaîne de collision ?

Préparation
2h

Terrain
2 jours

Exploitation
2h

Séance 1 : préparer la classe de terrain

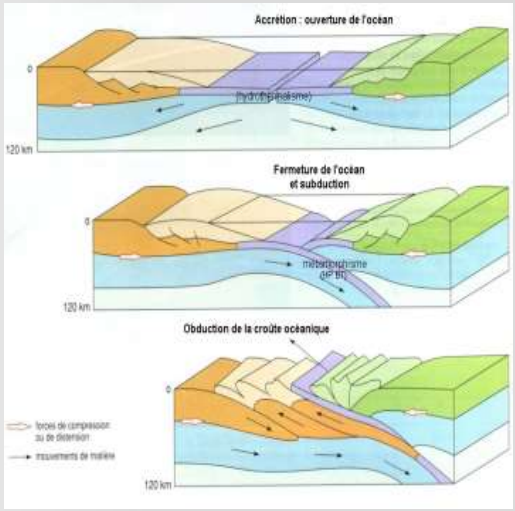
Réel ⟵ **modèle** ⟶ **Théorie**

Analyse du modèle

Conception du protocole

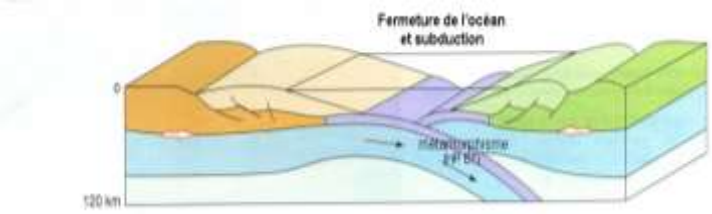
Modèle

Modèle d'une chaine de collision



Analyse du modèle et conception d'un protocole d'observation

- Identifier les caractéristiques et les propriétés d'un modèle de chaîne de collision



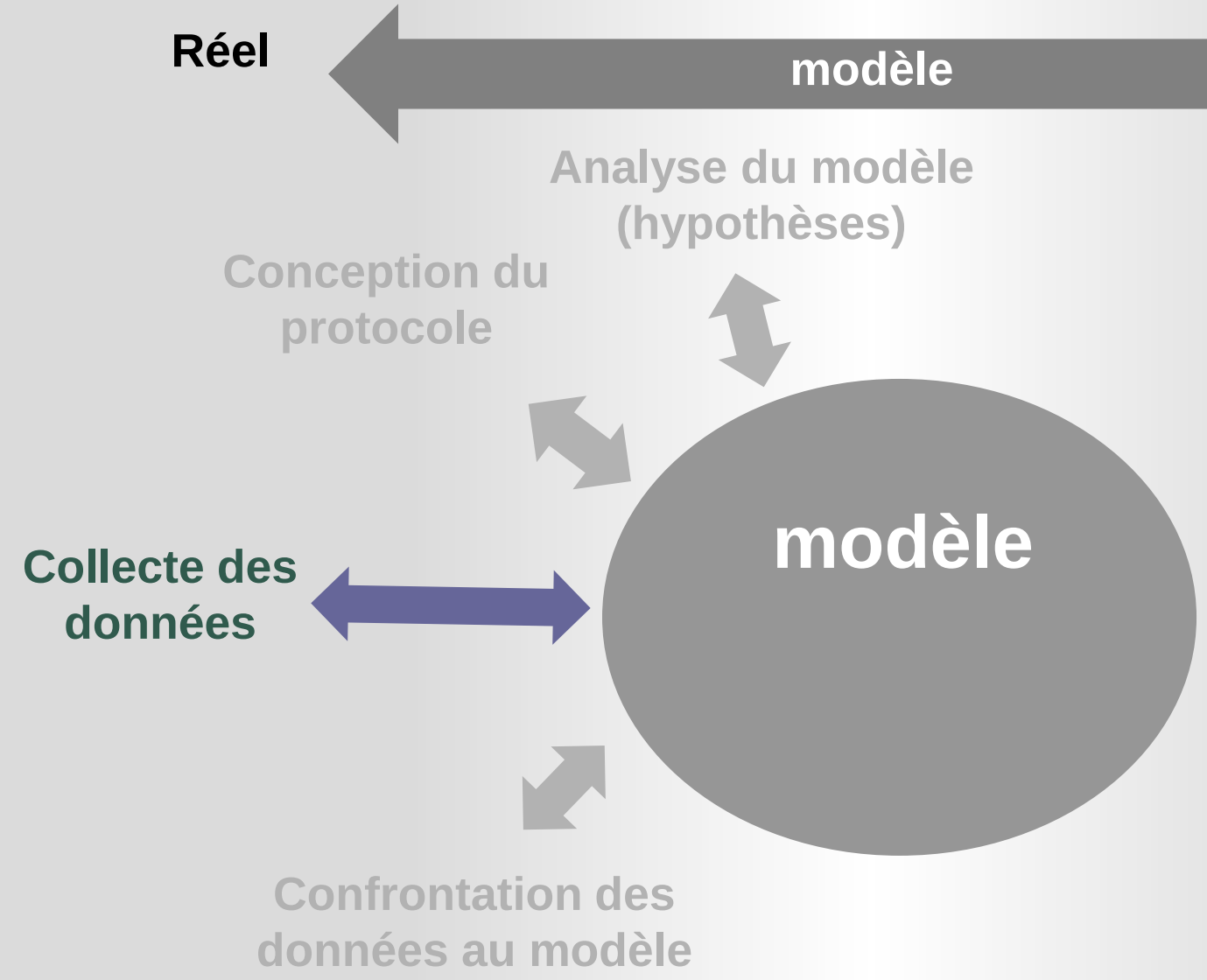
Plongement de la lithosphère :→ métamorphisme MP-BT et HP-BT

- Faire des prévisions sur les traces observables

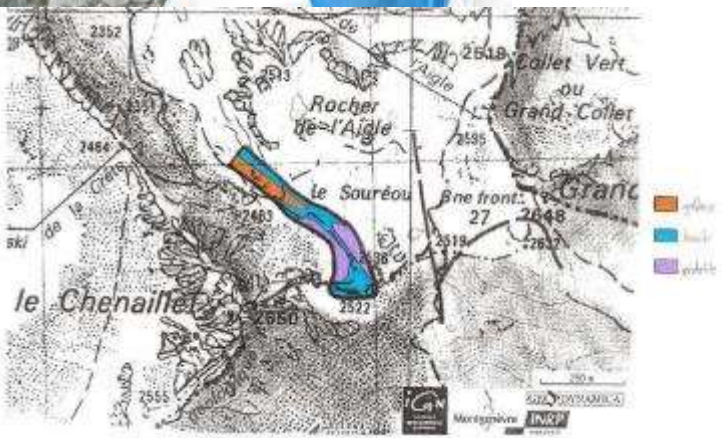
Roches et minéraux : → SB, éclogite

Auréoles réactionnelles

Séance 2 : la classe de terrain



Des activités de terrain diversifiées



Séance 3 : Exploitation classe de terrain

Réel ← **modèle** → **Théorie**

Analyse du modèle (hypothèses)

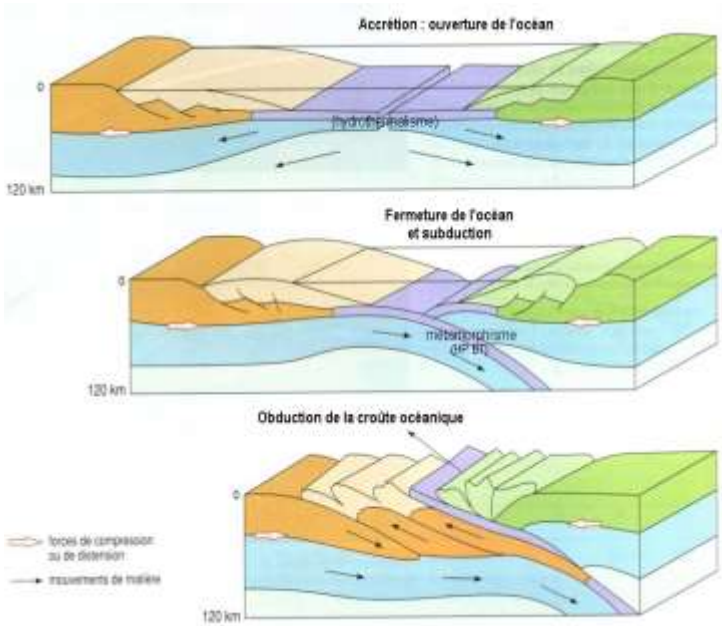
Conception du protocole

modèle

Collecte des données

Confrontation des données au modèle

Traiter et confronter les données au modèle pour l'instancier et identifier des limites

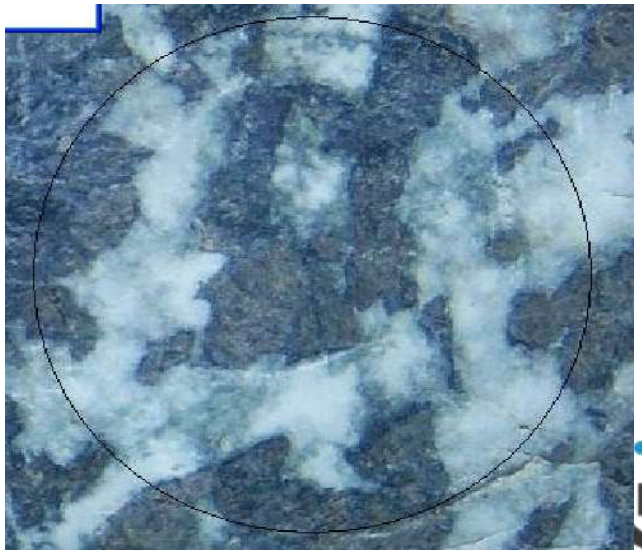


Informations

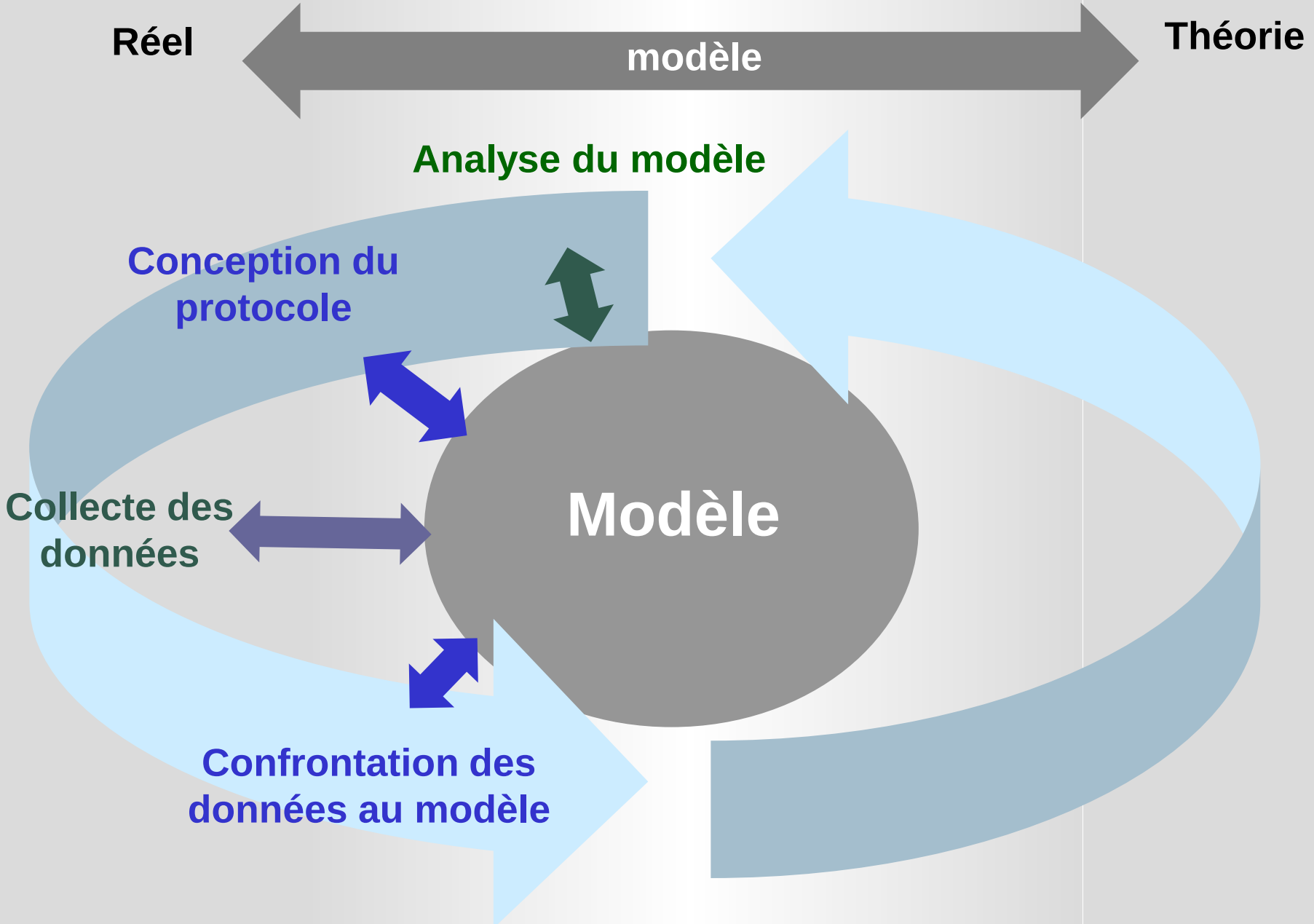
Titre : Minéraux reliques

Source : vide

Commentaire : On peut voir du pyroxène entouré de glaucophane. Ce qui indique que le pyroxène (qui se forme en Basse-Température et Basse-Pression) a été formé avant le glaucophane qui lui se forme en Basse-température et Moyenne-Pression. La pression étant liée à la profondeur, on remarque alors que la lithosphère a plongé.

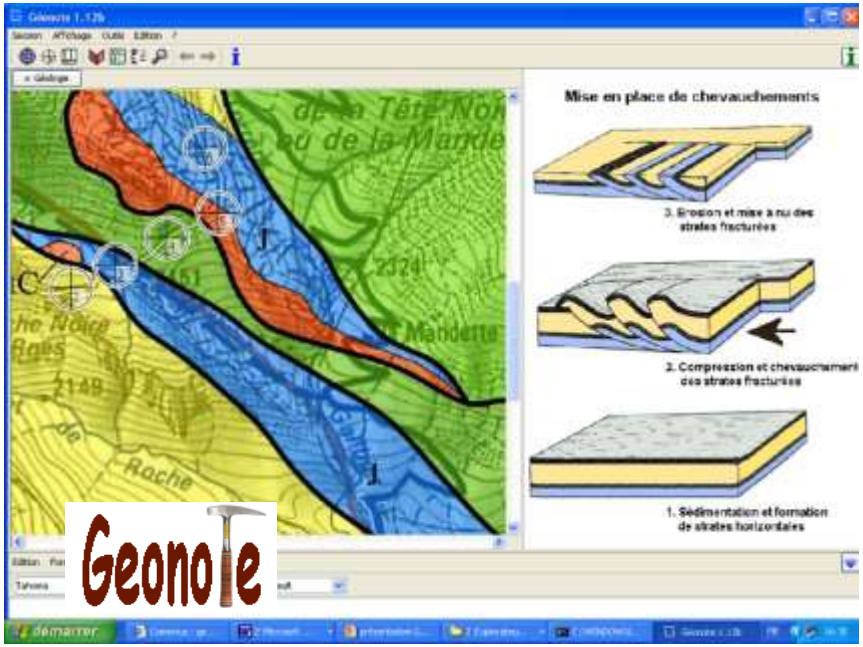


Sanchez, E. (2008). Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la Terre ? *Education & Didactique, 2*(2), 97-122.

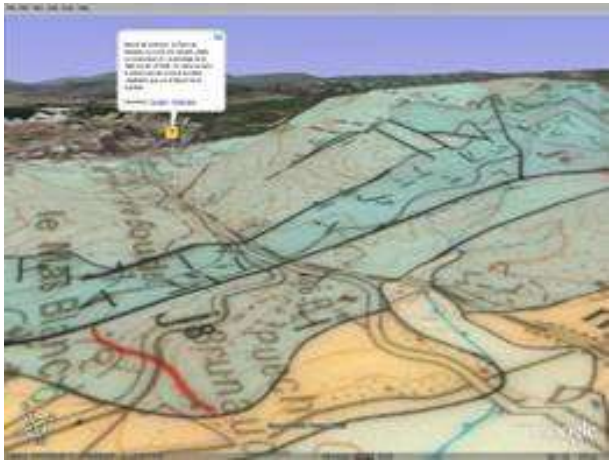


Le numérique pour la classe de terrain (2005)

- **Recueil – analyse de données**
- **Espace**
  échelle, orientation, référentiel, 3D/2D, géolocalisation



Le numérique pour la classe de terrain (2005- 2014)



Nomadisme – Intégration

2005 -2014 : de l'observatoire des pratiques géomatiques à Geomedia.lab

Observatoire des pratiques géomatiques (2005-2012)
Réflexion sur les usages et les enjeux des outils géomatiques dans l'enseignement secondaire

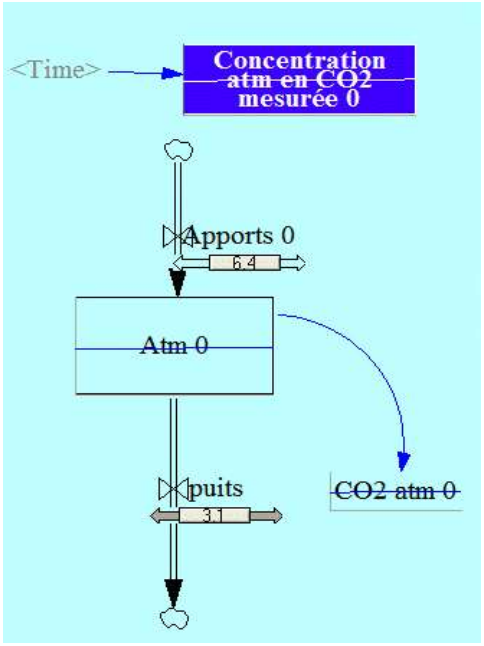
Geomedia.lab
Incubateur d'innovations techno-pédagogiques en lien avec l'usage des géomedias

http://eductice.ens-lyon.fr/EducTice/recherche/geomatique

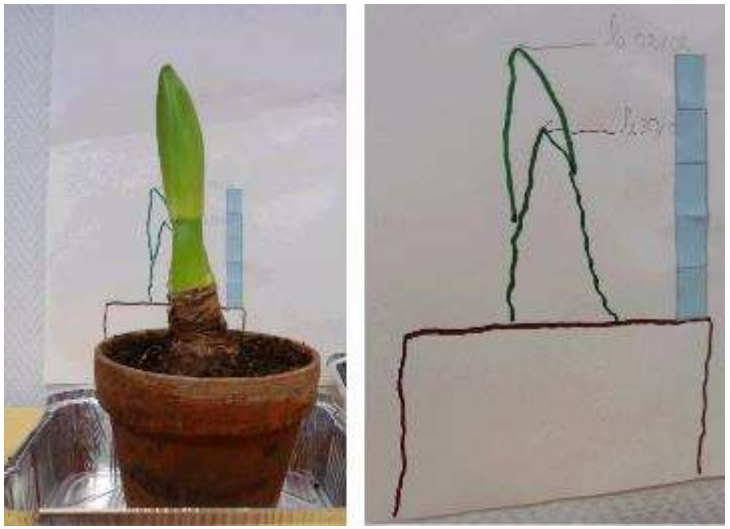
4. Perspectives pour la classe de terrain

Complexité et apprentissage

Articuler les disciplines par une approche codisciplinaire



Prieur, M., Sanchez, E., Aldon, G. (2011)



Aldon G., Monod-Ansaldi R., Prieur M. (à paraitre)

La codisciplinarité pour appréhender la complexité des objets géologiques

- Géologie - biologie – botanique…
- SVT, maths, SPC, géographie…

ANR « apprentissage » Edition 2013

Apprentissage avec les jeux épistémiques numériques

- Jeu play : situations d'apprentissage ludiques
- Résolution de problèmes complexes
- Approche par compétences

→ Jeu de pistes pour la classe de terrain au lycée (tablettes numériques)

ANR « apprentissage » Edition 2013

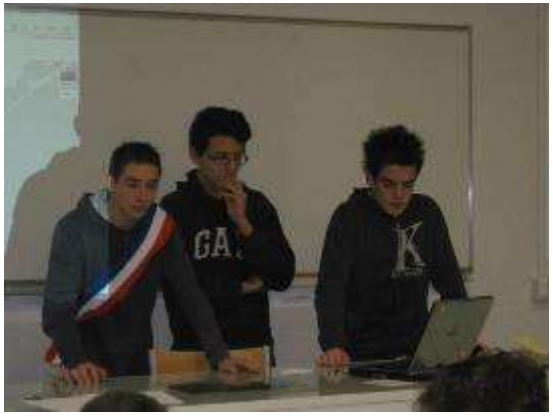
ge ludiques (jeu play)
s complexes
ces

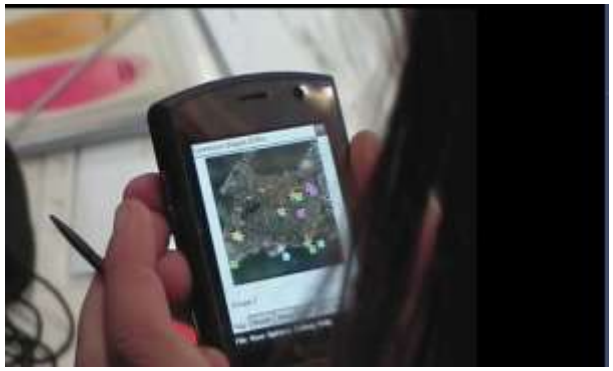
Apprentissage avec les jeux épistémiques numériques
Usages-Technologies-Méthodologies

- Concevoir 3 Jeux Epistémiques Numériques (JEN)
- Concevoir un modèle de JEN (dimensions techniques et pédagogiques)
- Développer une méthodologie originale (design-based research & traces numériques d'apprentissage)

Développer des jeux épistémiques numériques

Situations d'apprentissage ludiques (jeu play)
Résolution de problèmes complexes
Approche par compétences





Social Sciences and Humanities Research Council of Canada
Conseil de recherches en sciences humaines du Canada

Sanchez, E, Lison, C, & Kramar, N. (2013). *Digital Play and Epistemological Belief Changes: A Case Study about Sustainable Development. Paper presented at the ESERA 2013, Cyprus.*