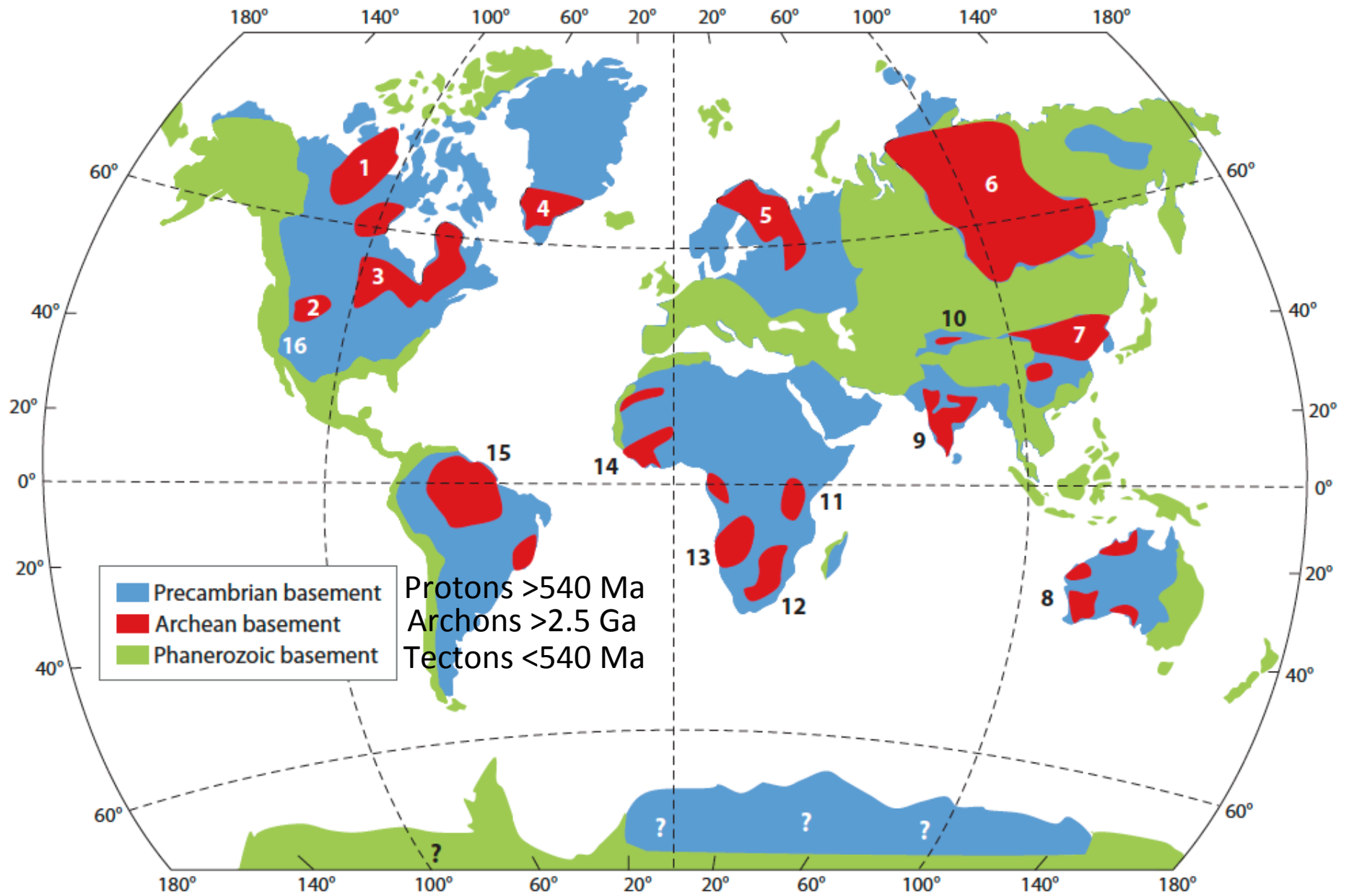


Structure et dynamique du système Lithosphère/Asthénosphère

6-La lithosphère continentale

Barbara Romanowicz - Cours 2013
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France
18 Novembre 2013

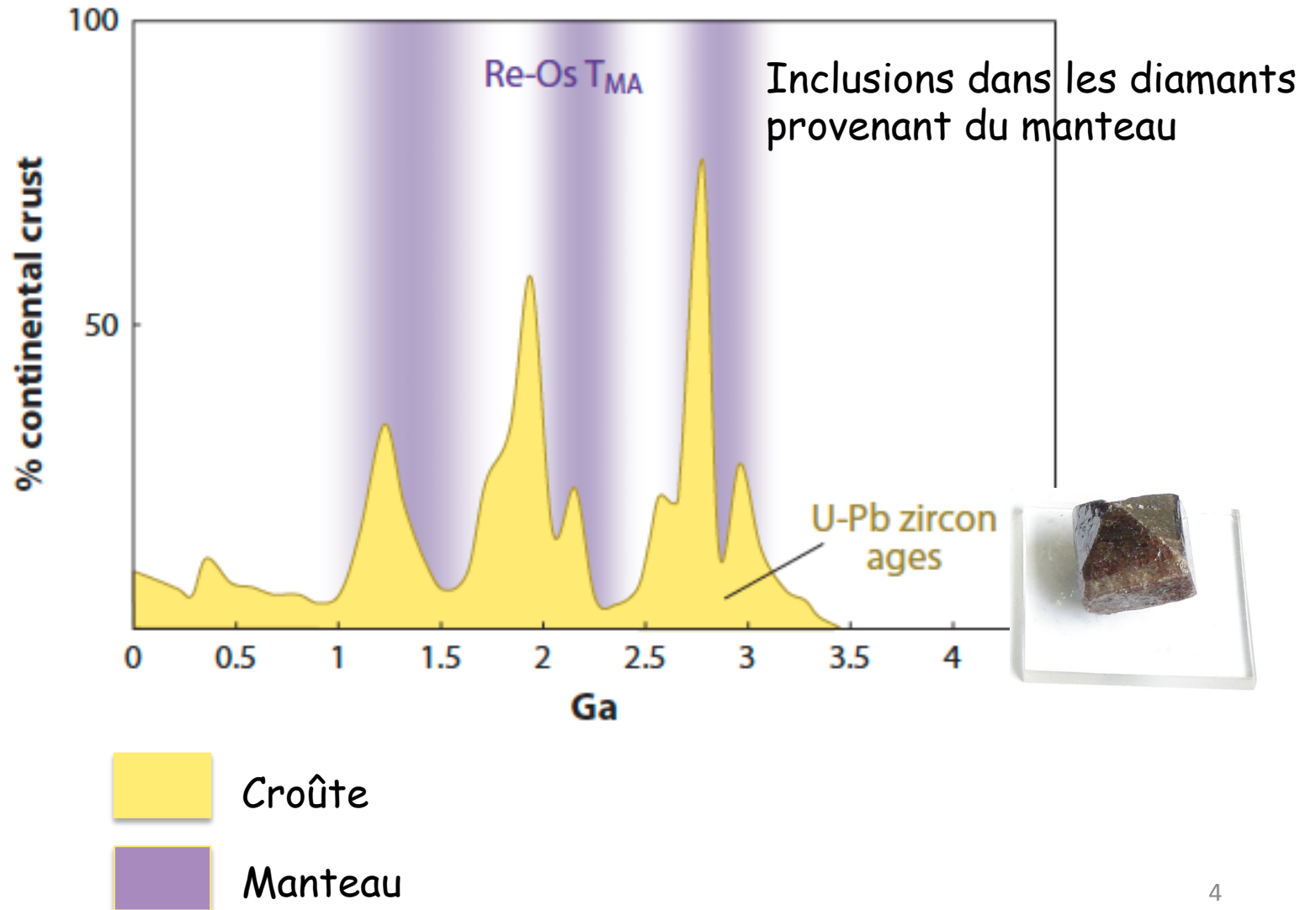
Age de la croûte continentale



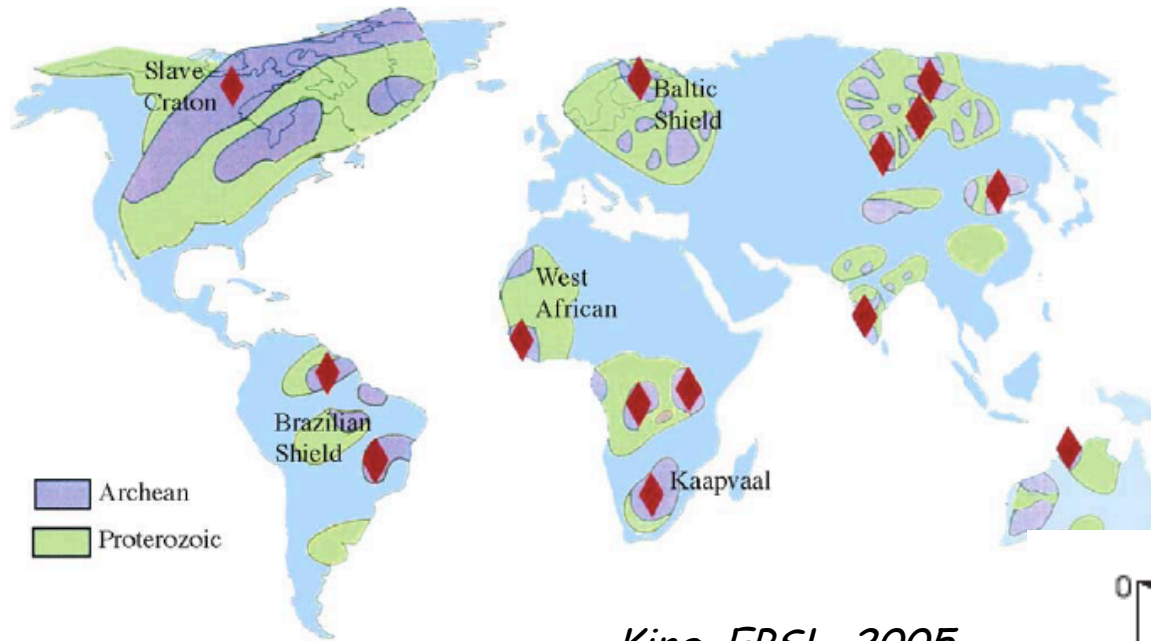
Ages de la croûte et du manteau dans les cratons

- Age de la croûte continentale:
 - Datation des zircons ($ZrSiO_4$) par la méthode de datation U-Pb
 - Les plus vieux 4,408 Ga (Australie, Jack Hills)
 - Formés par cristallisation de magma - très résistants, très peu de Pb à l'origine, mais conservent l'uranium,
- Age du manteau sous la croûte cratonique:
 - Inclusions silicates et sulfides dans les diamants
 - 3.5 Ga pour les diamants d'Afrique du Sud (Richardson et al., 1984), confirmé par datation Re-Os des inclusions de sulfides
 - Système $^{187}Re-^{188}Os$
 - Os compatible, Re relativement incompatible
 - Le résidu de la fusion partielle sera enrichi en Os et appauvri en Re par rapport au manteau de référence (conserve le rapport original $^{187}Os/^{188}Os$) de la roche, qui donne l'âge de séparation de celle-ci du manteau en convection
 - Ce système est moins sensible que d'autres à la contamination par métasomatisme
- Correspondance nette entre l'âge de la croûte et celui du manteau sous-jacent
 - 2.4-2.8 Ga: croûte archéenne
 - 1.4-2.1 Ga: croûte protérozoïque
 - 0.3-0.7 Ga: régions tectoniquement actives

Distribution des âges de la croûte et du manteau dans les continents



La lithosphère est froide sous les cratons



King, EPSL, 2005

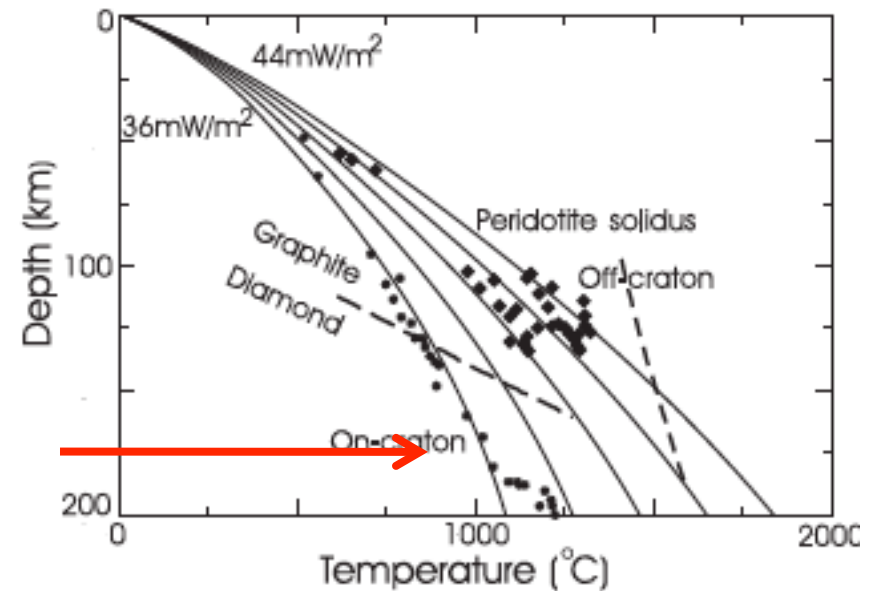
◆ Champs de diamants



Xenolithes:

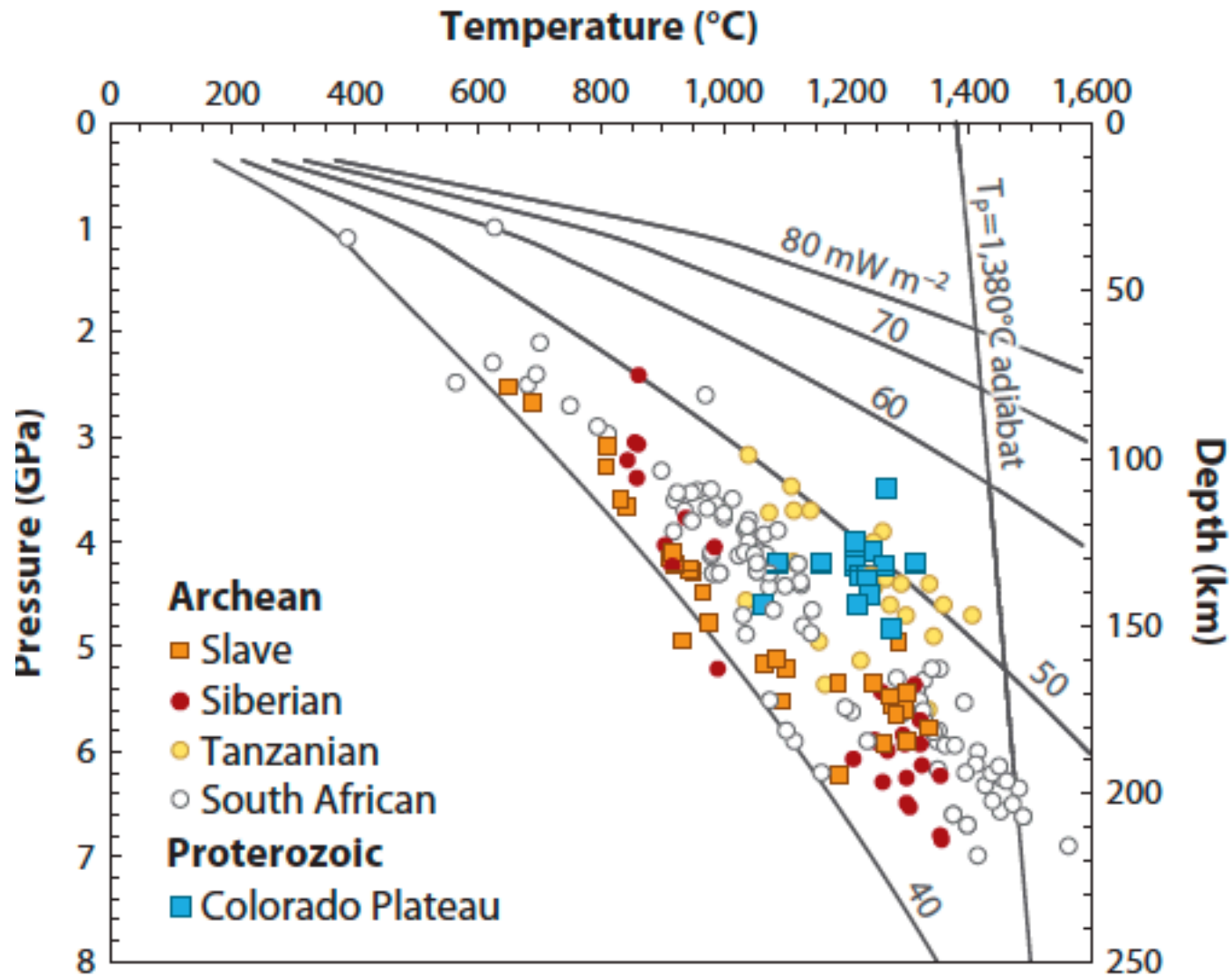


thermobarométrie

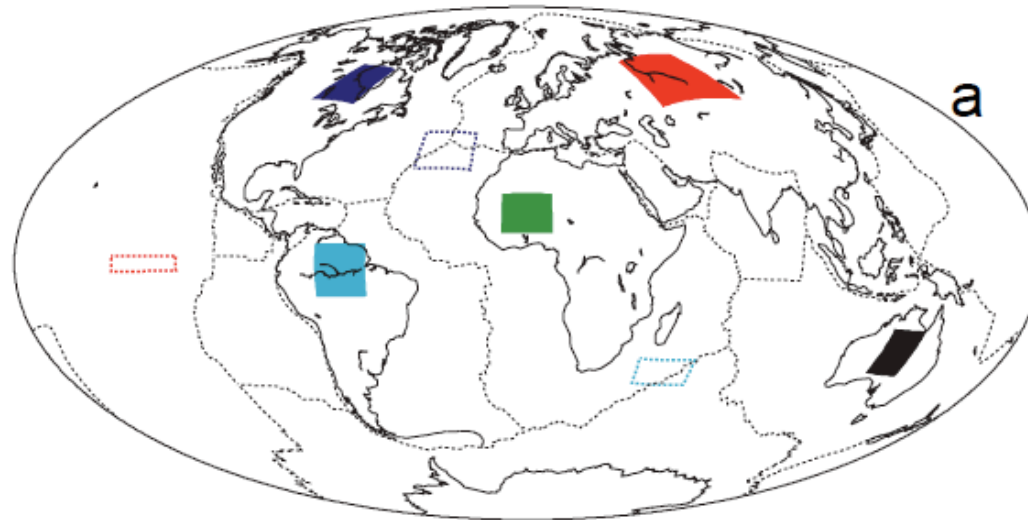


O'Neill and Moresi, 2003

Géothermes basés sur l'analyse des xénolithes archéens et protérozoïques



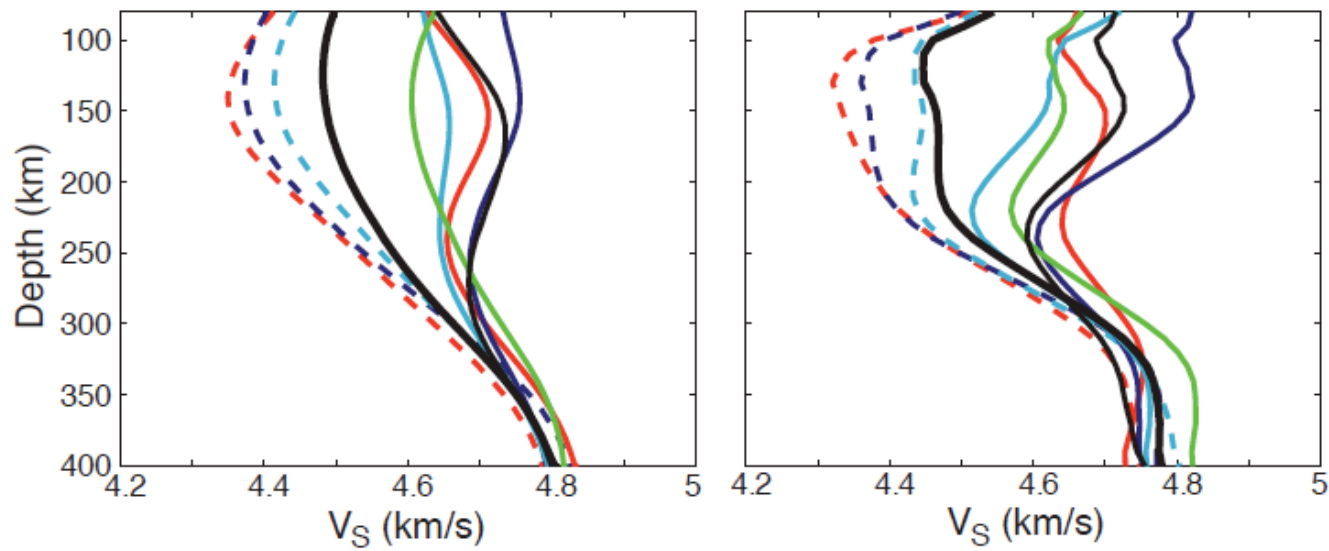
Différences océans/continents dans les profils de vitesses sismiques V_S



Kustowski et al., 2008

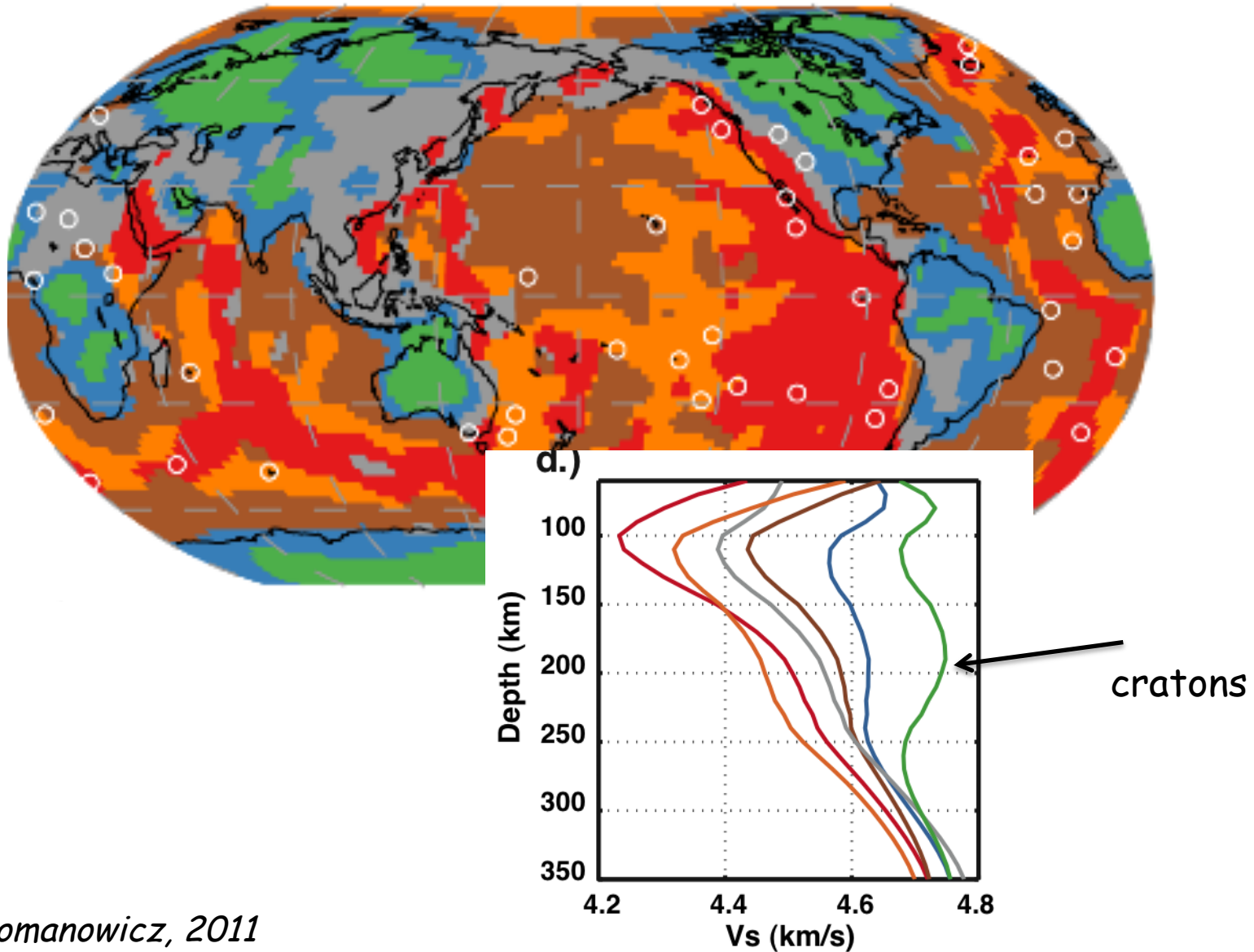
b

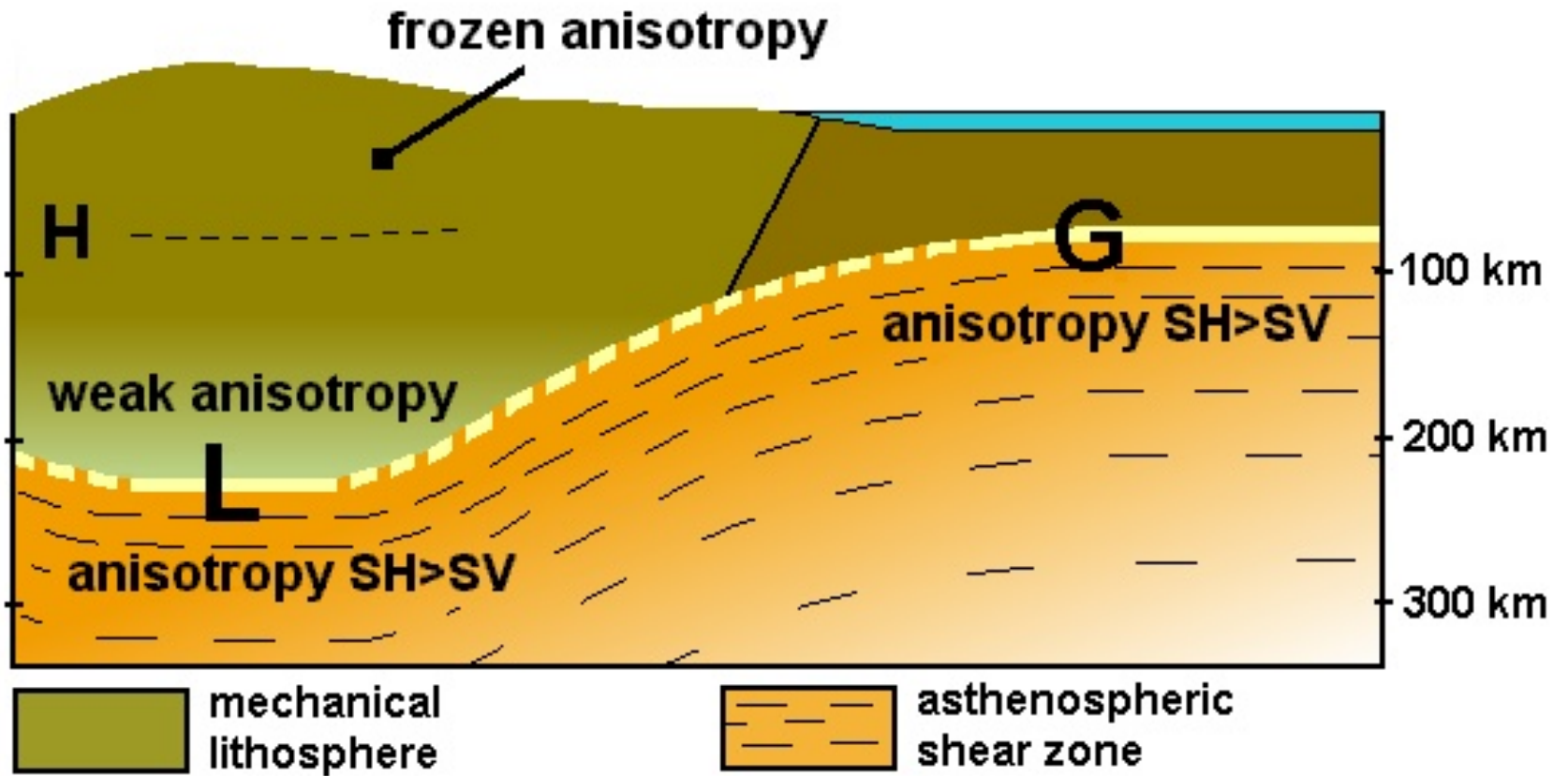
Cammarano and Romanowicz, 2007



Romanowicz (2009)

Régionalisation du modèle SEMum par analyse de "clusters" en spécifiant N=6 régions

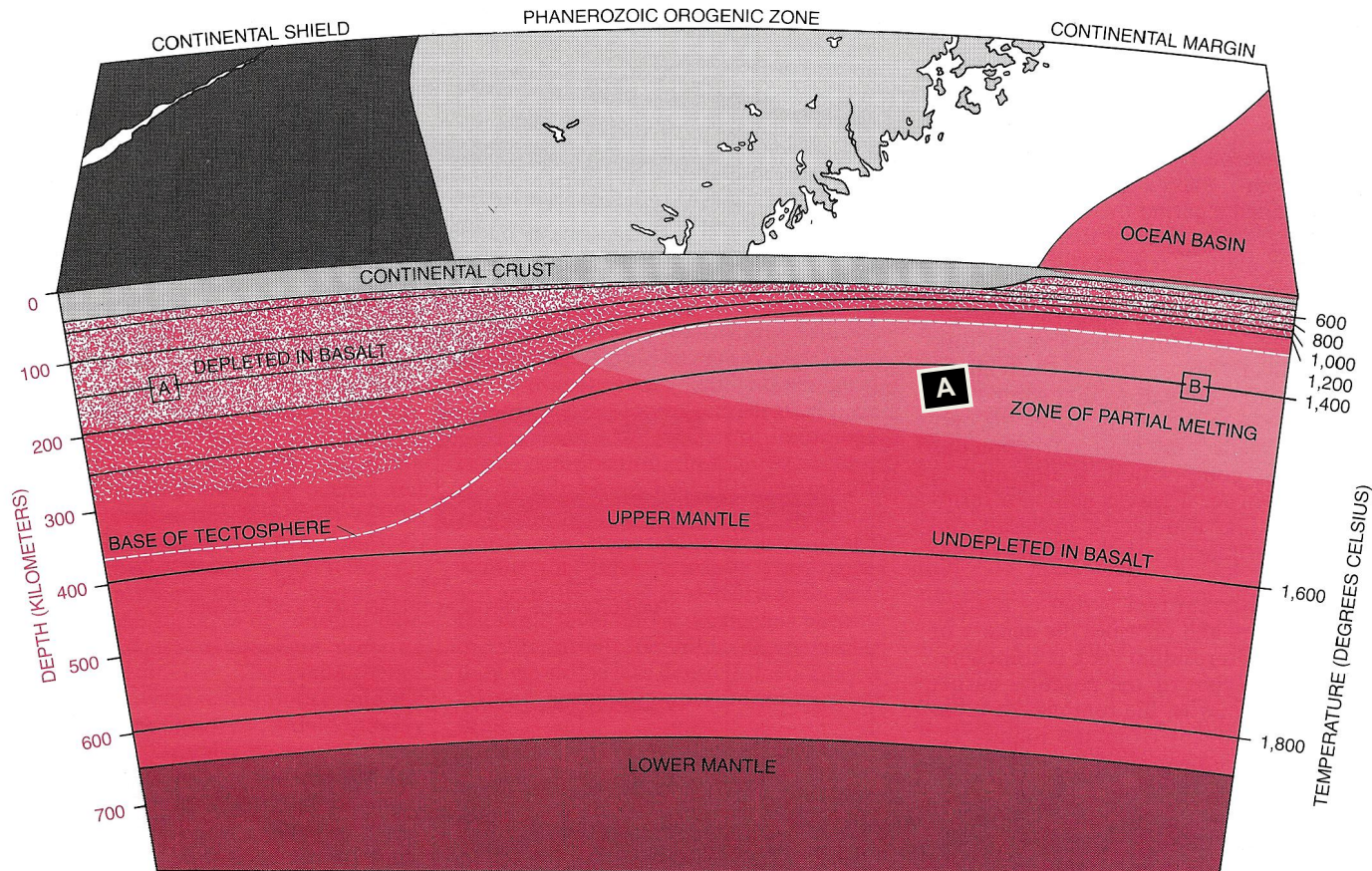




L = LAB = Lithosphere-Asthenosphere boundary

Gung et al., Nature, 2003

Hypothèse isopicnique

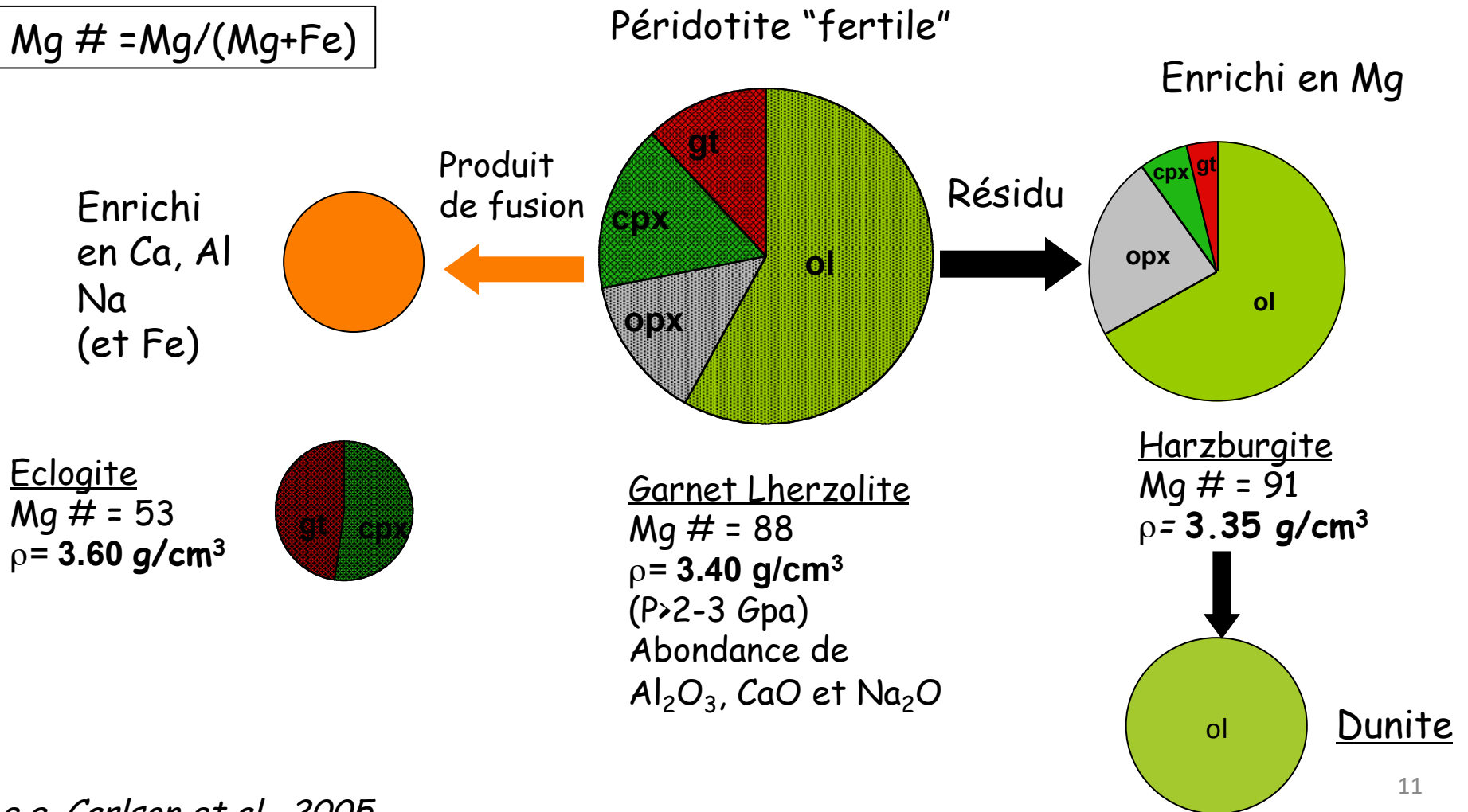


Jordan,
1978

La différence de température entre la lithosphère cratonique et le manteau convectif est compensée du point de vue de la densité par l'appauvrissement en Fe et Al par rapport à Mg, au cours du processus de fusion partielle.

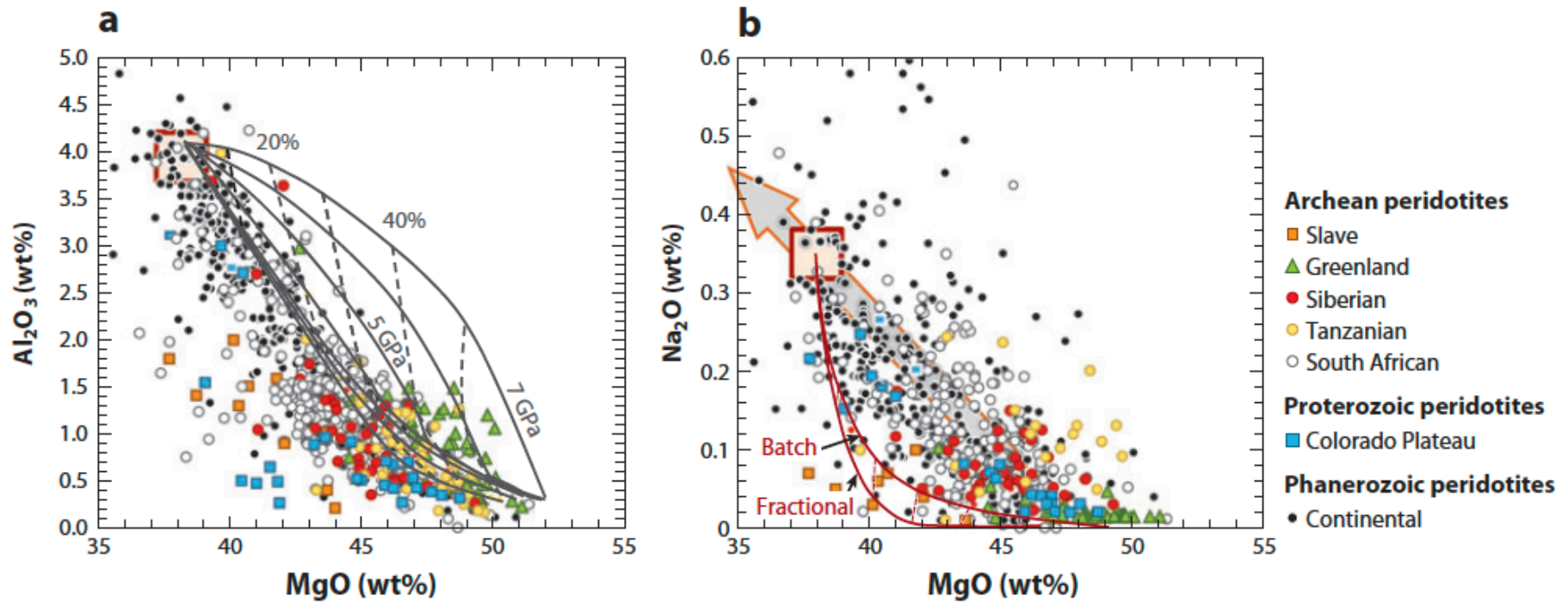
Composition de la lithosphère cratonique: fusion partielle de roche mantellique

$$\text{Mg \#} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$$



e.g. Carlson et al., 2005

Composition des péridotites et comparaison avec courbes de fusion partielle

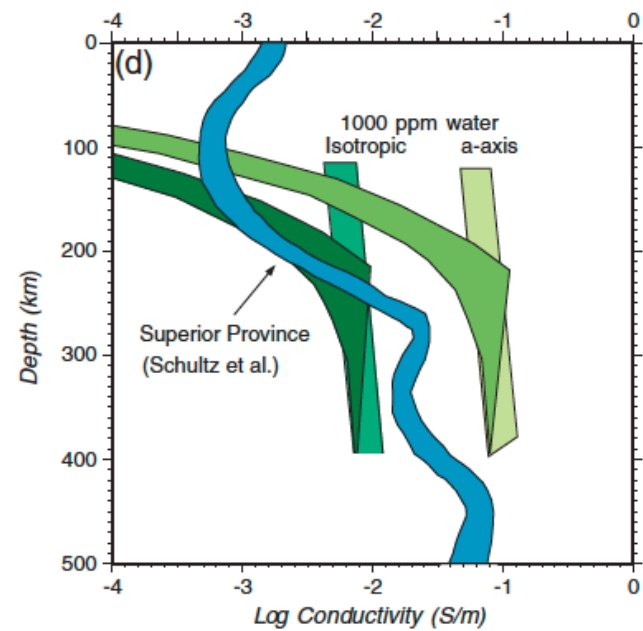
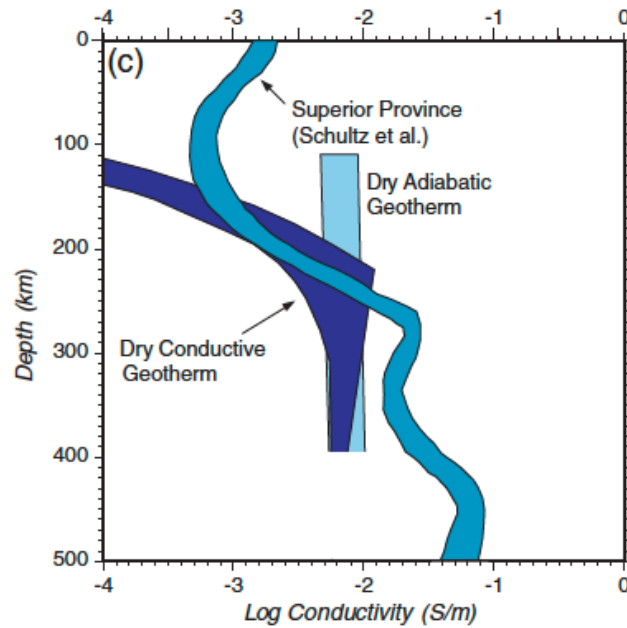
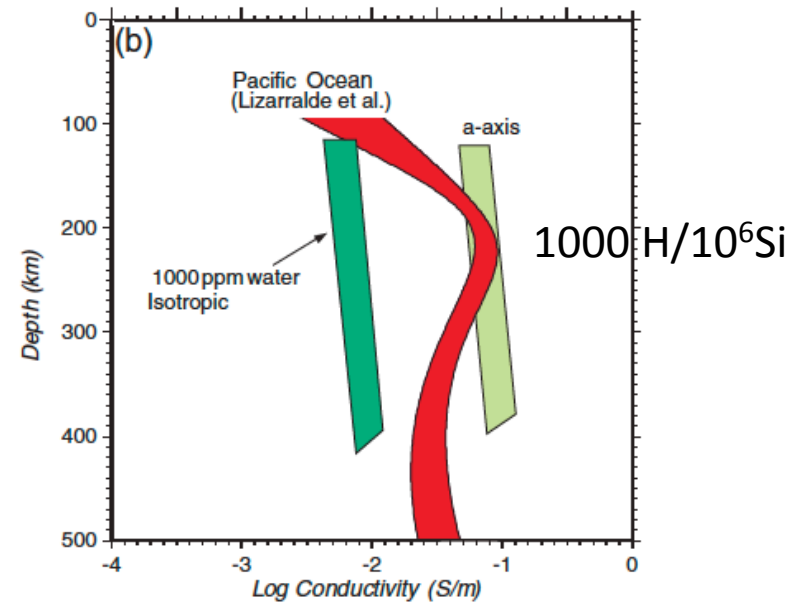
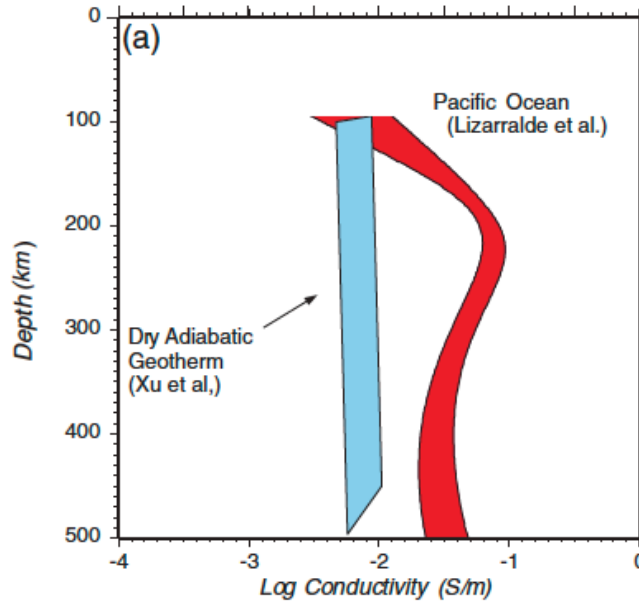


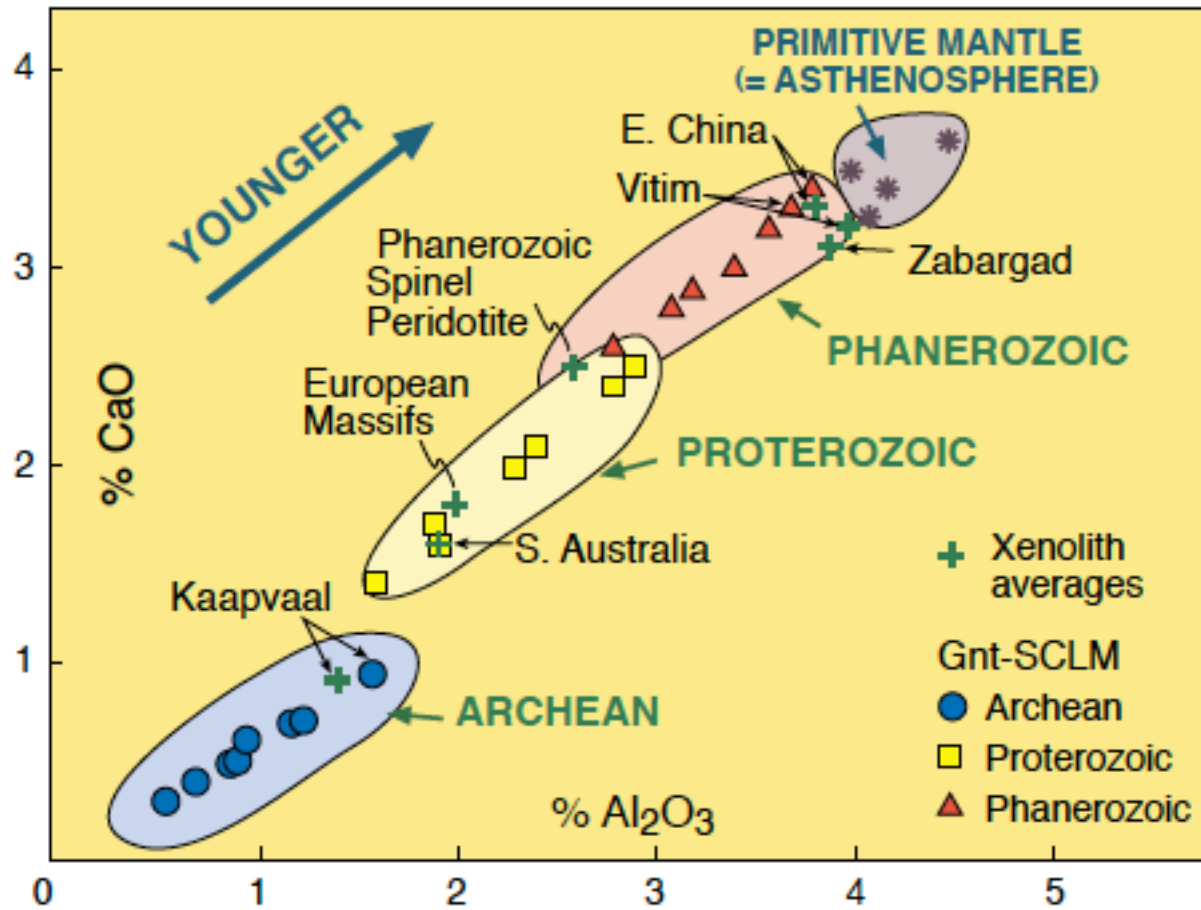
Lee et al., 2011

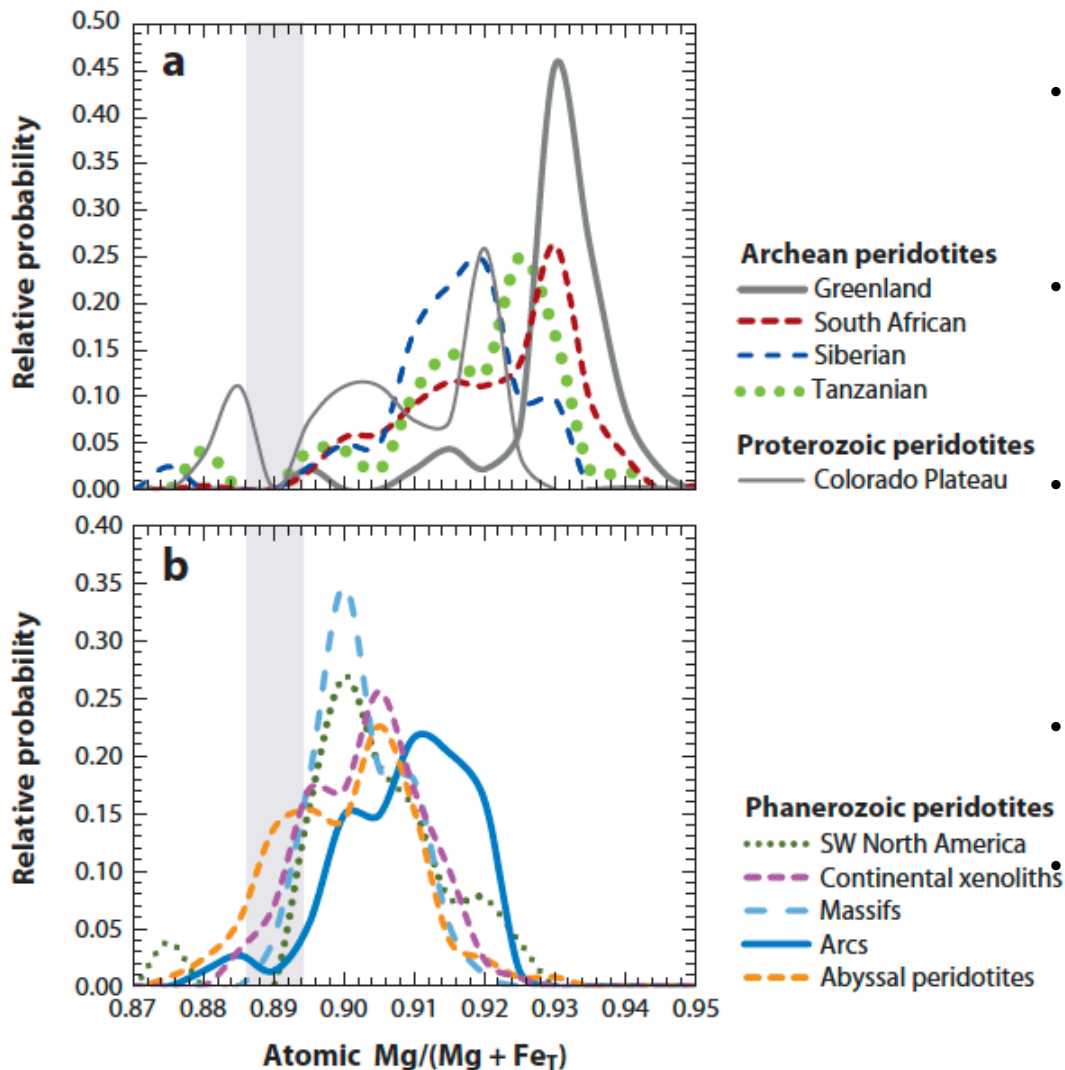
-> Autres éléments incompatibles:

- K, Th, U -> radioactivité passe dans le produit de la fusion -> concentration dans la croûte
- H₂O -> réduit le solidus de 300°C à 100 km, et jusqu'à 1000°C à 350 km, réduit aussi la viscosité d'un facteur 20-500 -> résidu de la fusion est plus sec et plus visqueux.

Conductivité électrique







- **Péridotites archéennes avec Mg# > 0.92** sont le résidu de 30-50% de fusion partielle par rapport à un manteau de référence ("primitif") à T~ 1,500-1700°C
- Pressions estimées: si pas de grenat au moment de la fusion partielle: ~4-5GPa - mais le grenat aurait pu disparaître si le degré de fusion partielle était extrême.
- Pression initiale de fusion pourrait être 7-8 Gpa (250 km) ou elles pourraient avoir été formées à pression plus faible et déplacées ensuite à plus grande profondeur
- **Péridotites phanérozoïques:** <30% de fusion partielle et T~1300-1500°C

Hypothèse de formation de la lithosphère Archéenne par panaches mantelliques chauds: fusion commence à haute pression donne beaucoup de fusion partielle aux profondeurs faibles

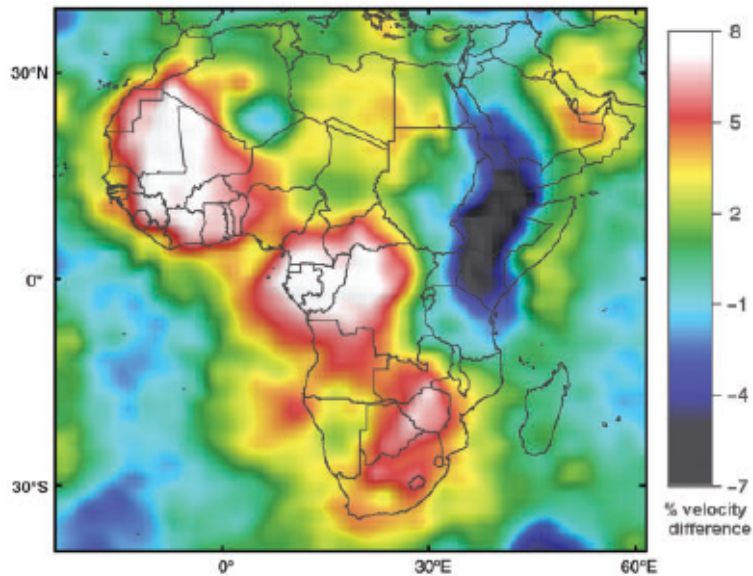
- Mais la plupart des caractéristiques peuvent être expliquées par fusion à basse pression

Conséquences de la fusion partielle sur les caractéristiques de la lithosphère continentale

- Péridodite appauvrie est moins dense que la fertile à la même T:
 - Réduction dans la proportion de grenat et augmentation du rapport Mg/Fe,
 - ->2% de réduction de densité à T donnée (Schutt and Lesher, 2006)
 - Par contre peu d'effet sur Vs et Vp: n'explique pas les très fortes valeurs des vitesses sismiques dans les cratons

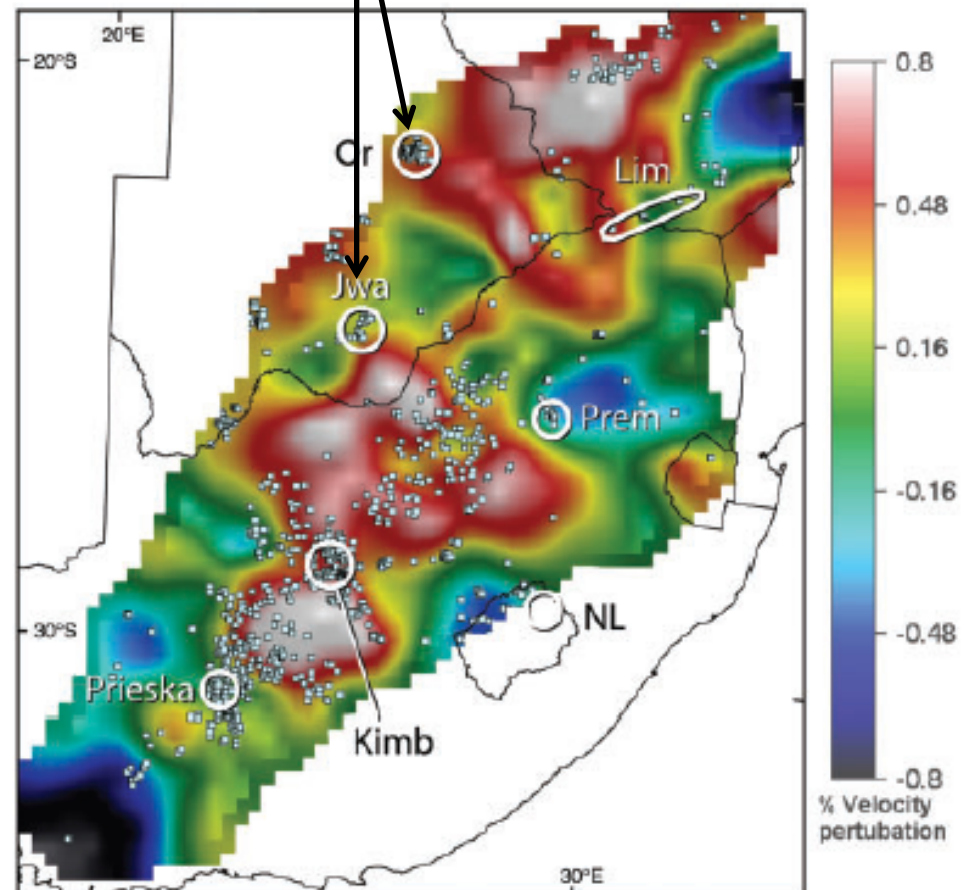
Influence du métasomatisme?

- Composition estimée de la lithosphère archéenne dans la plupart des cratons: lherzolites appauvries avec une forte proportion d'olivine et d'orthopyroxène-> difficile d'expliquer les fortes vitesses sismiques Vs et Vp.
 - > mesures biaisées représentent des roches provenant des marges de vitesse plus faibles des blocs lithosphériques: affectées par métasomatisme (Griffin, 2009)?
 - > La lithosphère archéenne d'origine serait formée de harzburgites et dunites très appauvries (aussi appauvries en Fer) qui satisfont mieux les données sismiques et de gravité mais qui sont peu échantillonnées (Norvège de l'Ouest?)
 - Densité similaire mais vitesses plus élevées
 - > Différence importante entre le manteau archéen et les régions affectées par métasomatisme ou plus jeunes: dichotomie? Changement de régime de convection entre l'Archéen et les ères plus récentes?



Tomographie Vs sous l'Afrique
à 100-175 km de profondeur
Vs (max) ~ 4.79-4.91 km/s
(Grand, 2006)

Xenolithes et xenocrystes bien
caractérisés

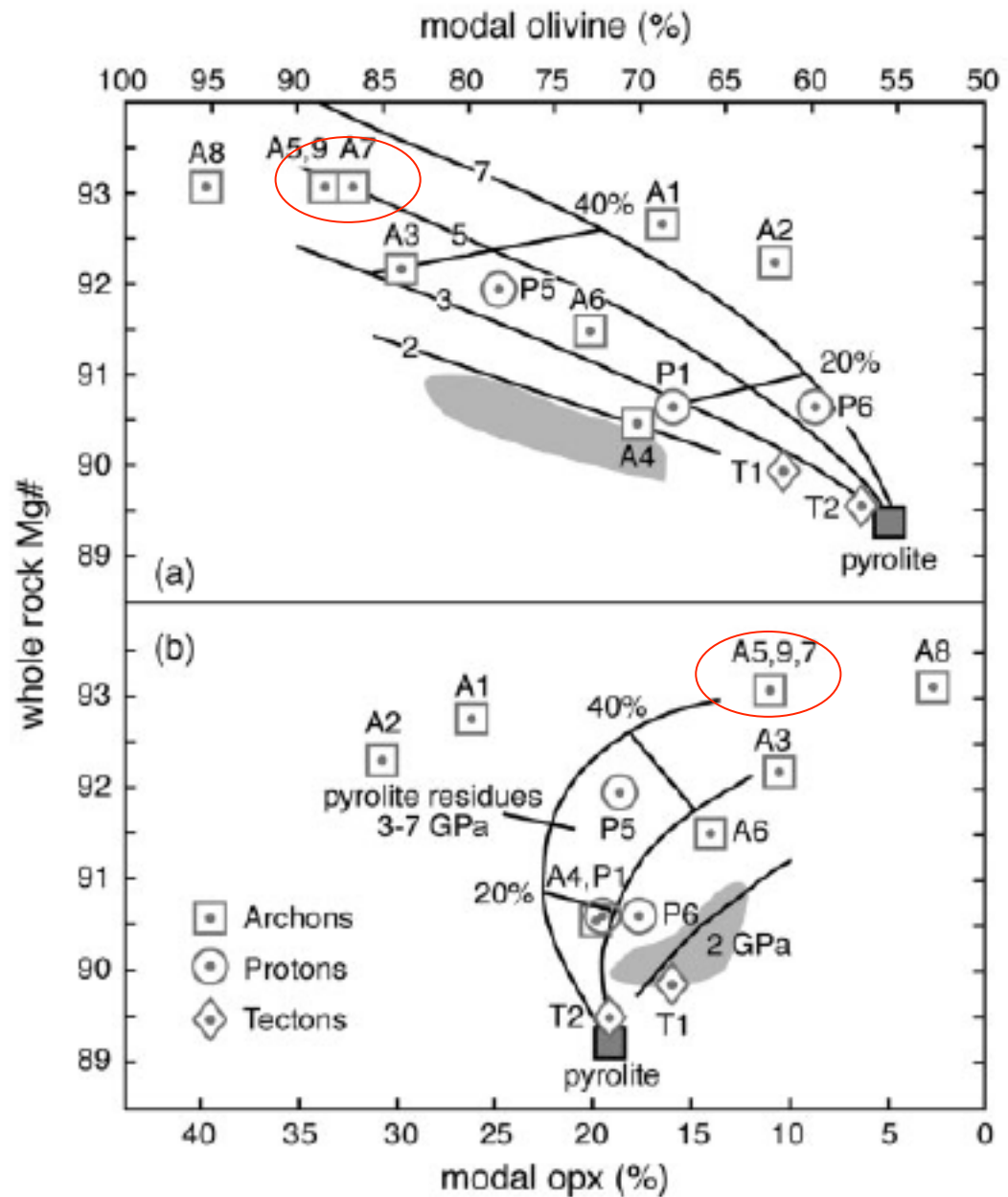


Tomographie Vs sous le craton de
Kalahari à 200 km de profondeur
et distribution des kimberlites

A9: Composition archéenne
préférée

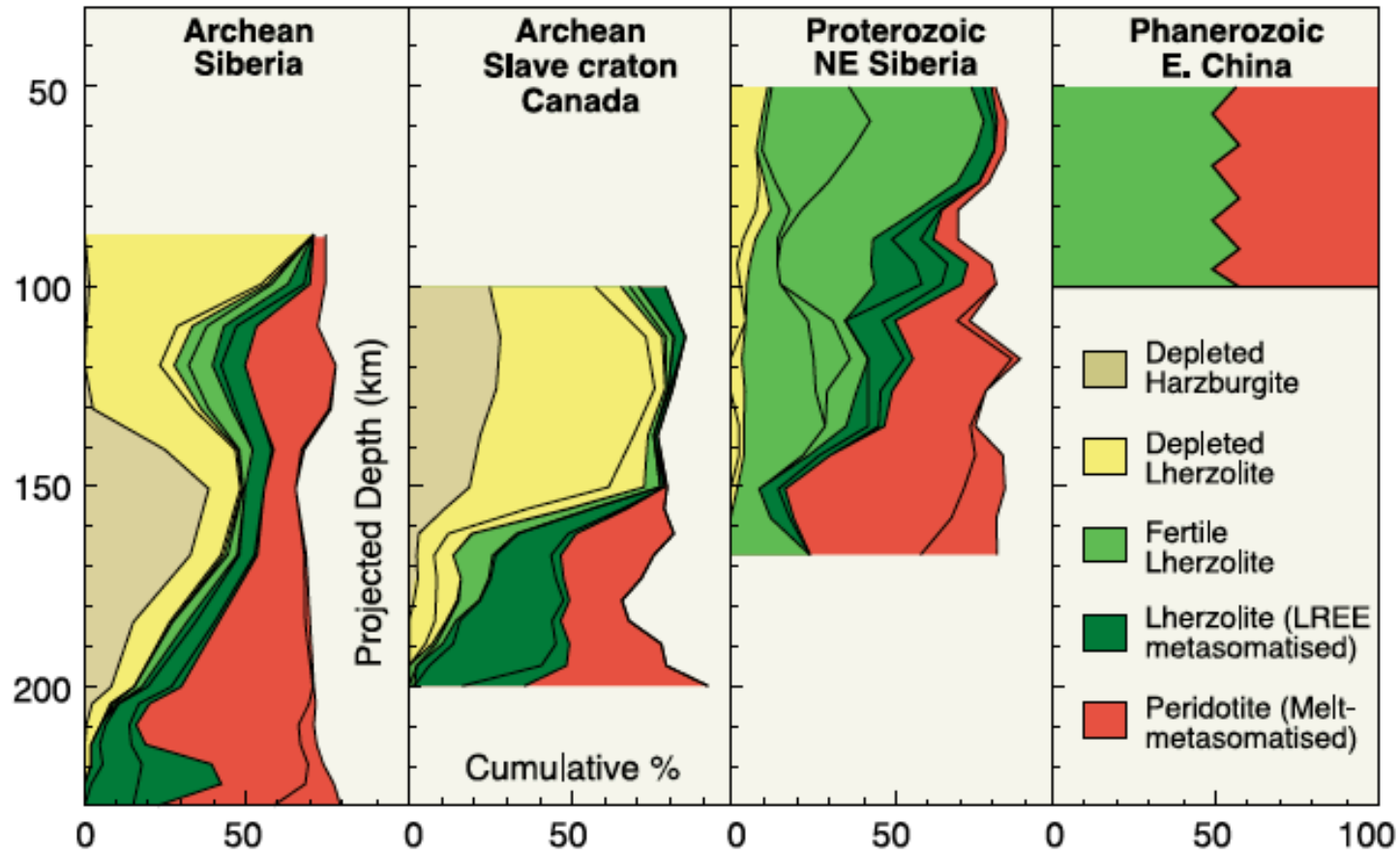
>50% fusion partielle
à 5 GPa (100 km
de profondeur)

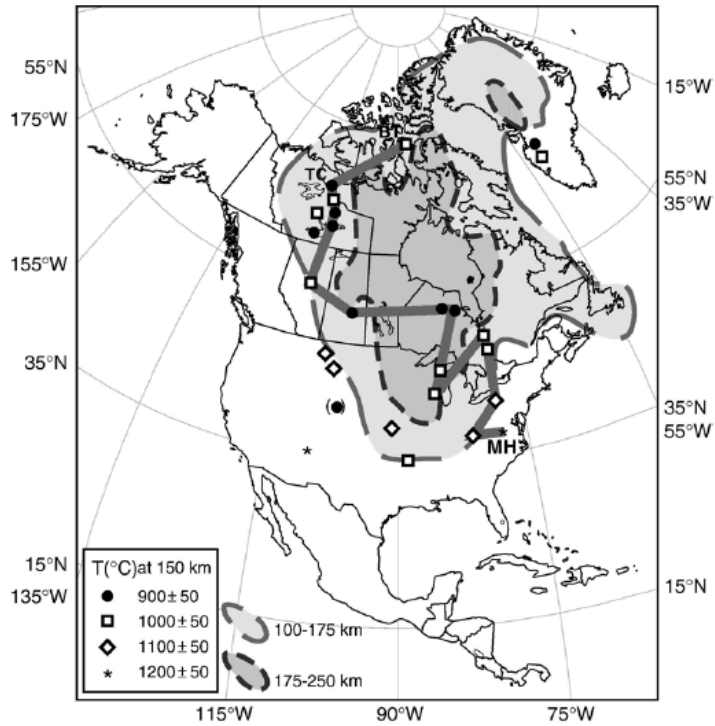
A5: harzburgites de Norvège
A7: harzburgites du Groenland



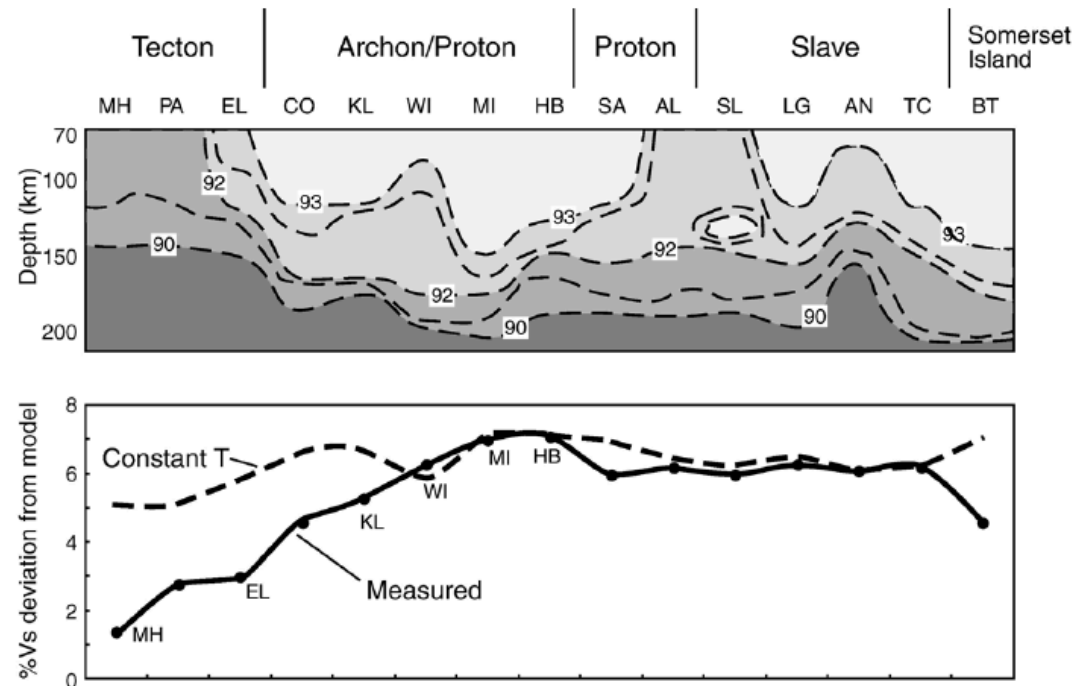
$$\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$$

Variations de la composition avec la profondeur



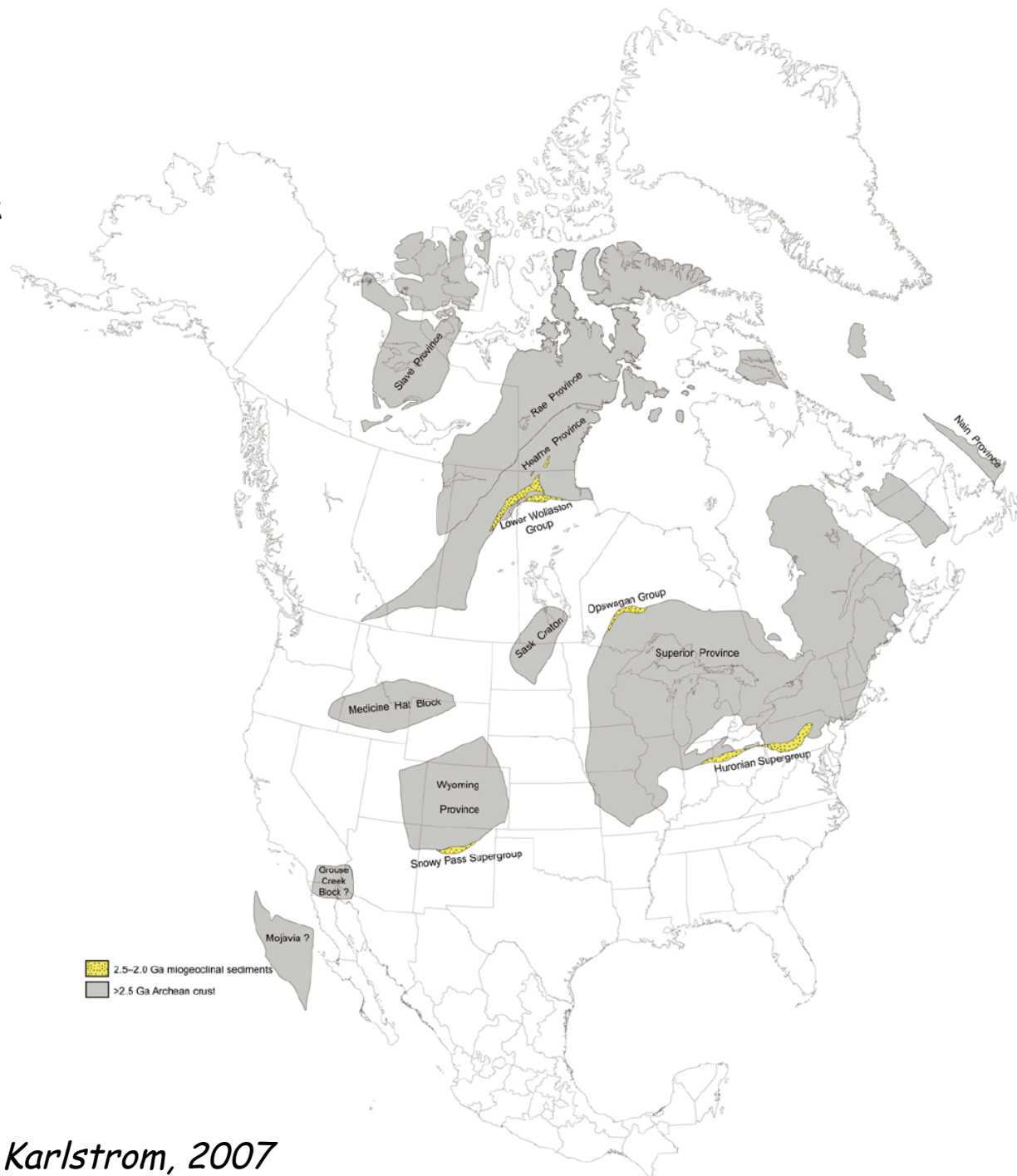


Correspondance entre stratification chimique et vitesses sismiques



Provinces
Archéennes:

Croûte > 2.5 Ga

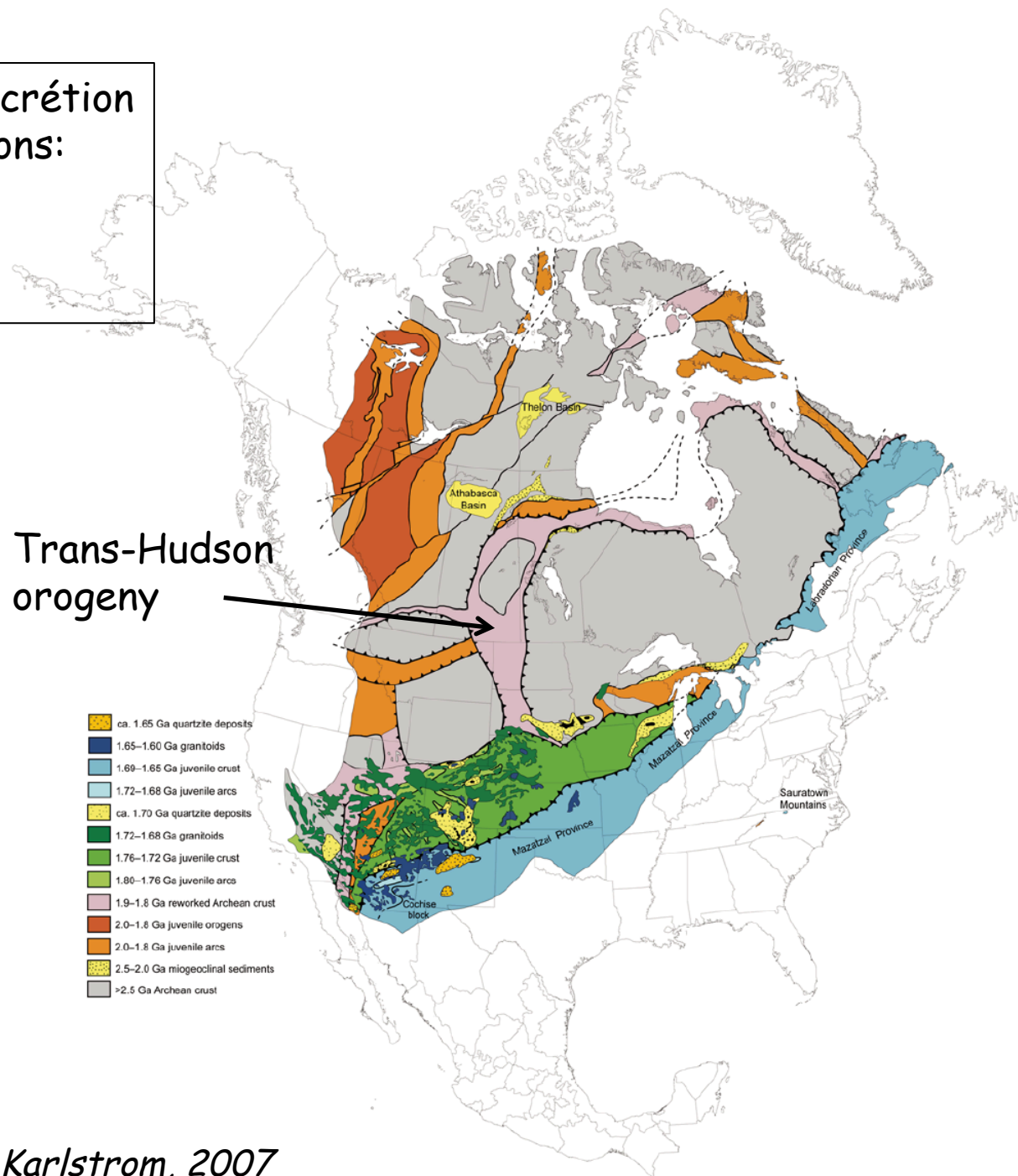


Période d'accrétion
et de collisions:
2.0-→1.6 Ga

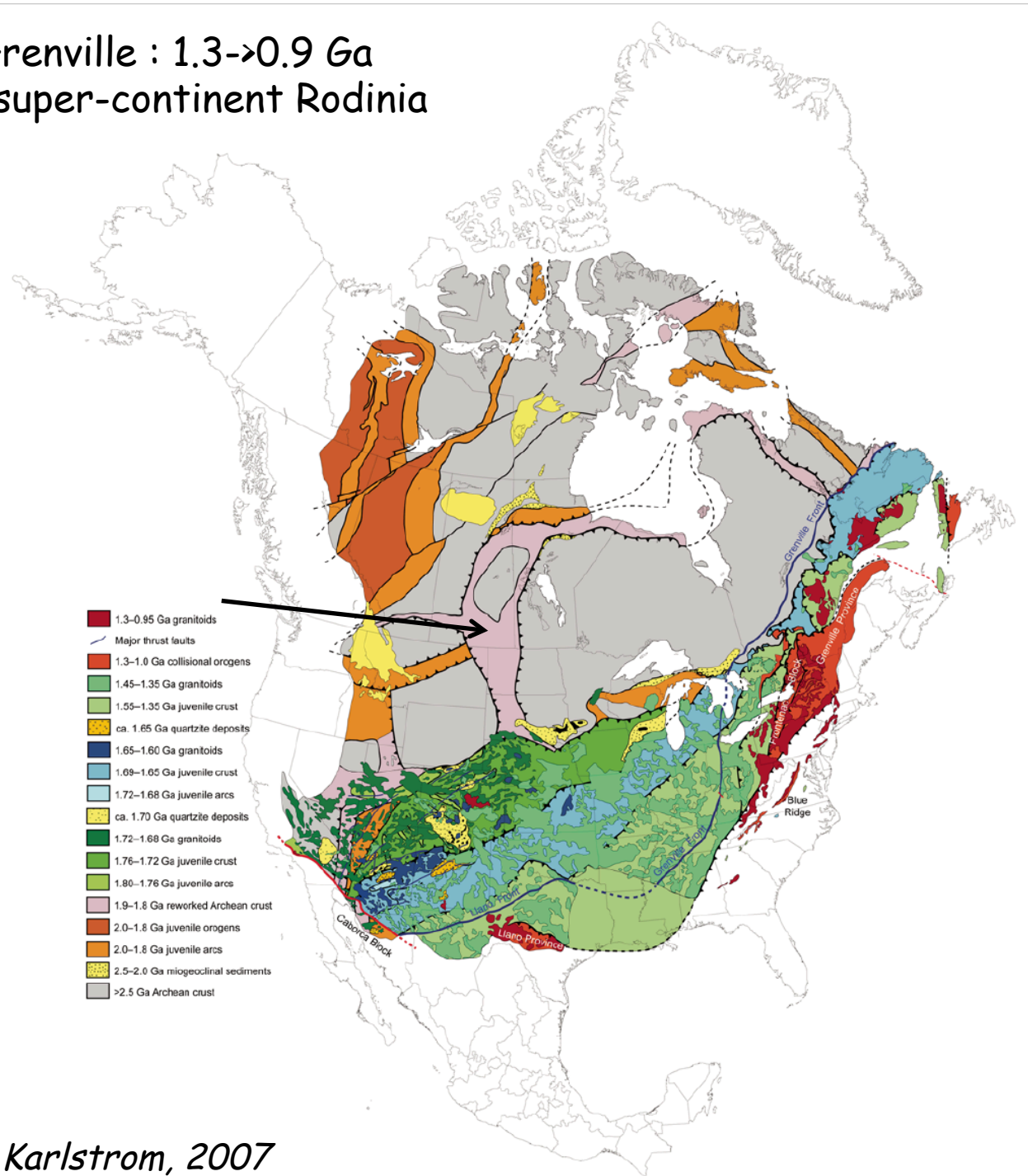
-> craton

Trans-Hudson
orogeny

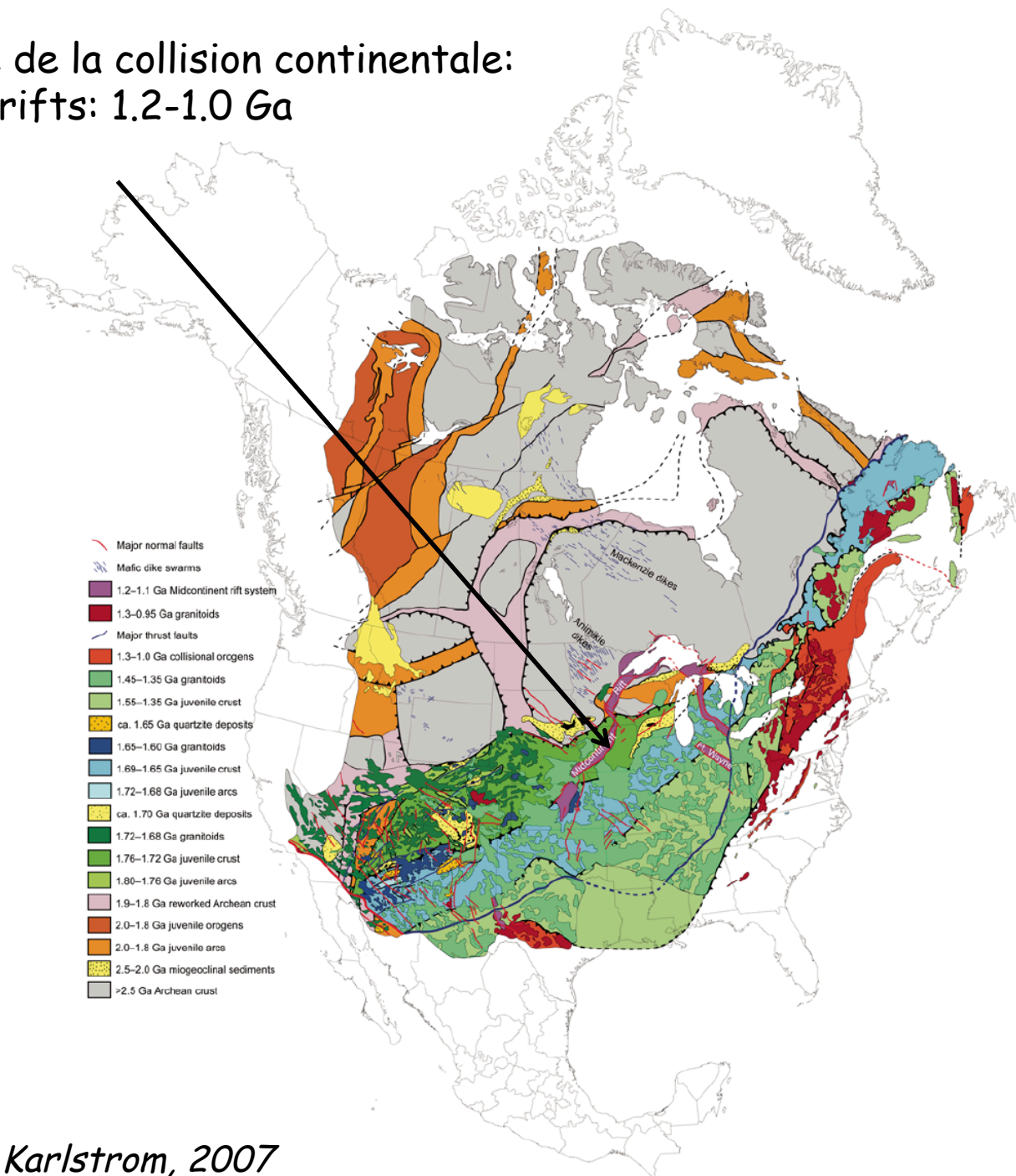
- ca. 1.65 Ga quartzite deposits
- 1.65–1.60 Ga granitoids
- 1.69–1.65 Ga juvenile crust
- 1.72–1.68 Ga juvenile arcs
- ca. 1.70 Ga quartzite deposits
- 1.72–1.68 Ga granitoids
- 1.76–1.72 Ga juvenile crust
- 1.80–1.76 Ga juvenile arcs
- 1.9–1.8 Ga reworked Archean crust
- 2.0–1.8 Ga juvenile orogens
- 2.0–1.8 Ga juvenile arcs
- 2.5–2.0 Ga miogeoclinal sediments
- >2.5 Ga Archean crust



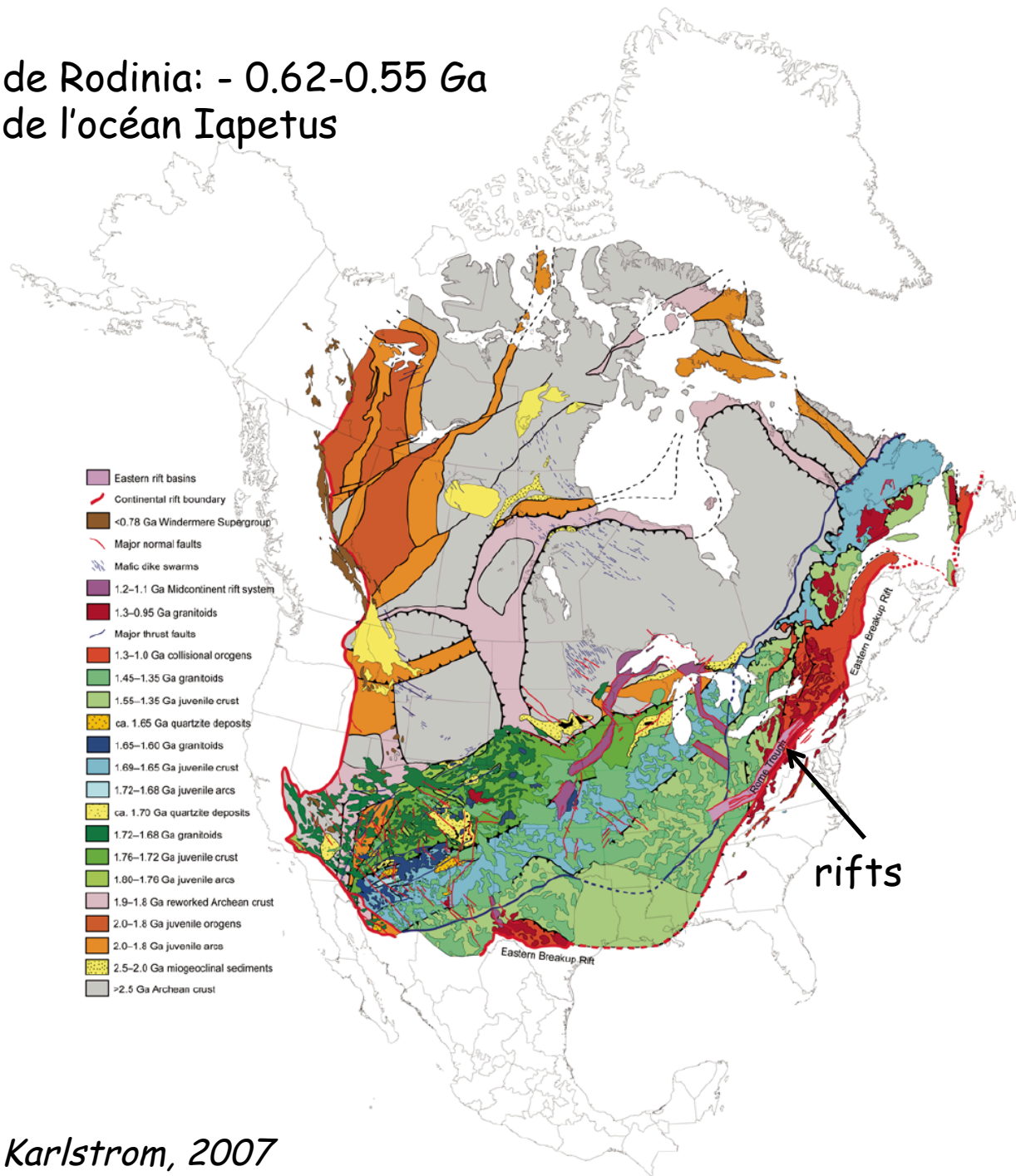
Orogénie de Grenville : 1.3-→0.9 Ga Formation du super-continent Rodinia



Conséquence de la collision continentale: Système de rifts: 1.2-1.0 Ga

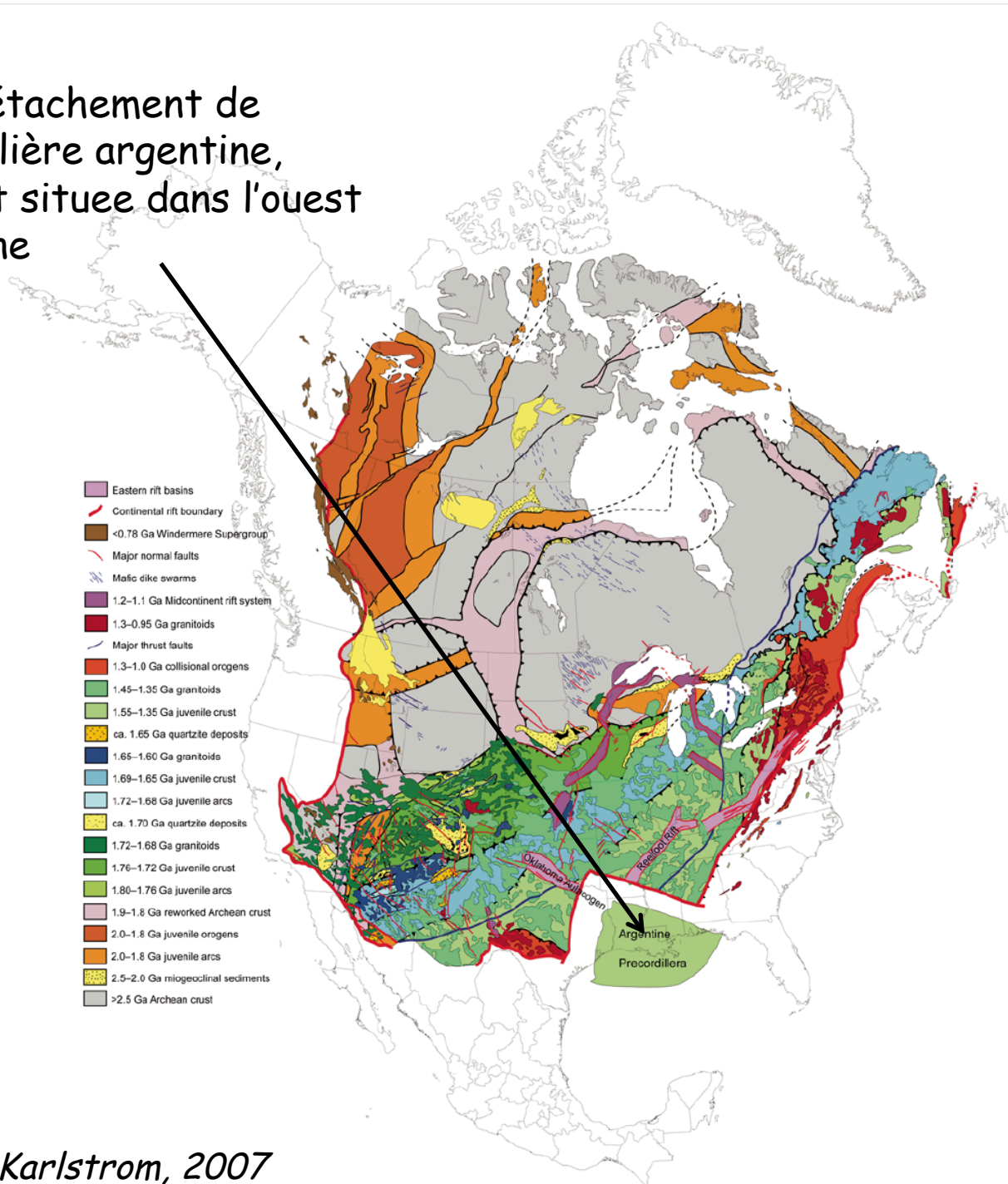


Dispersion de Rodinia: - 0.62-0.55 Ga Ouverture de l'océan Iapetus



0.535 Ga: détachement de la pré-cordillère argentine, actuellement située dans l'ouest de l'Argentine

- Eastern rift basins
- Continental rift boundary
- <0.78 Ga Windermere Supergroup
- Major normal faults
- Mafic dike swarms
- 1.2–1.1 Ga Midcontinent rift system
- 1.3–0.95 Ga granitoids
- Major thrust faults
- 1.3–1.0 Ga collisional orogens
- 1.45–1.35 Ga granitoids
- 1.55–1.35 Ga juvenile crust
- ca. 1.65 Ga quartzite deposits
- 1.65–1.60 Ga granitoids
- 1.69–1.65 Ga juvenile crust
- 1.72–1.68 Ga juvenile arcs
- ca. 1.70 Ga quartzite deposits
- 1.72–1.68 Ga granitoids
- 1.76–1.72 Ga juvenile crust
- 1.80–1.76 Ga juvenile arcs
- 1.9–1.8 Ga reworked Archean crust
- 2.0–1.8 Ga juvenile orogens
- 2.0–1.8 Ga juvenile arcs
- 2.5–2.0 Ga miogeoclinal sediments
- >2.5 Ga Archean crust

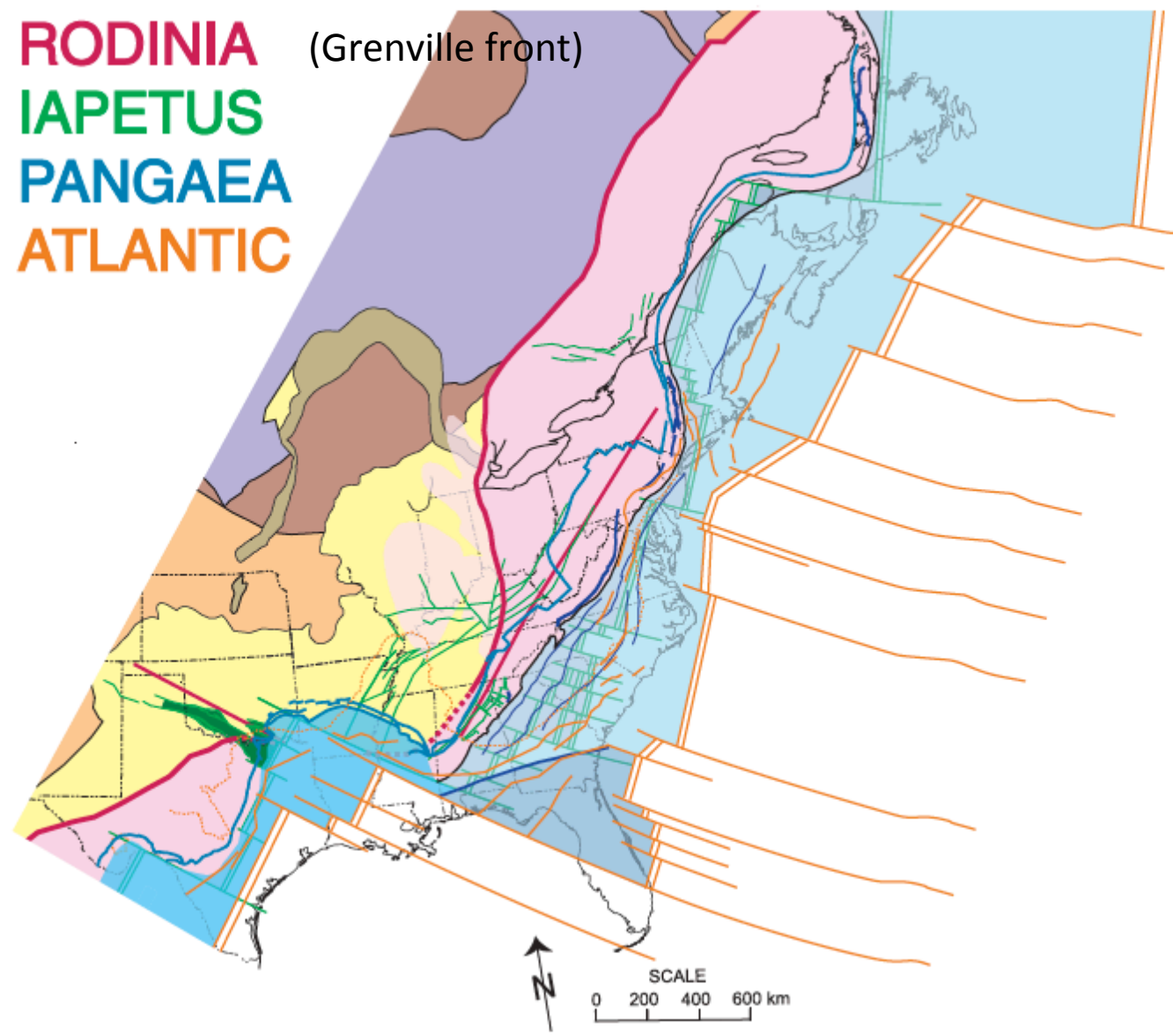


1350- 1000 Ma **RODINIA** (Grenville front)

->800~530Ma **IAPETUS**

~300 Ma **PANGAEA**

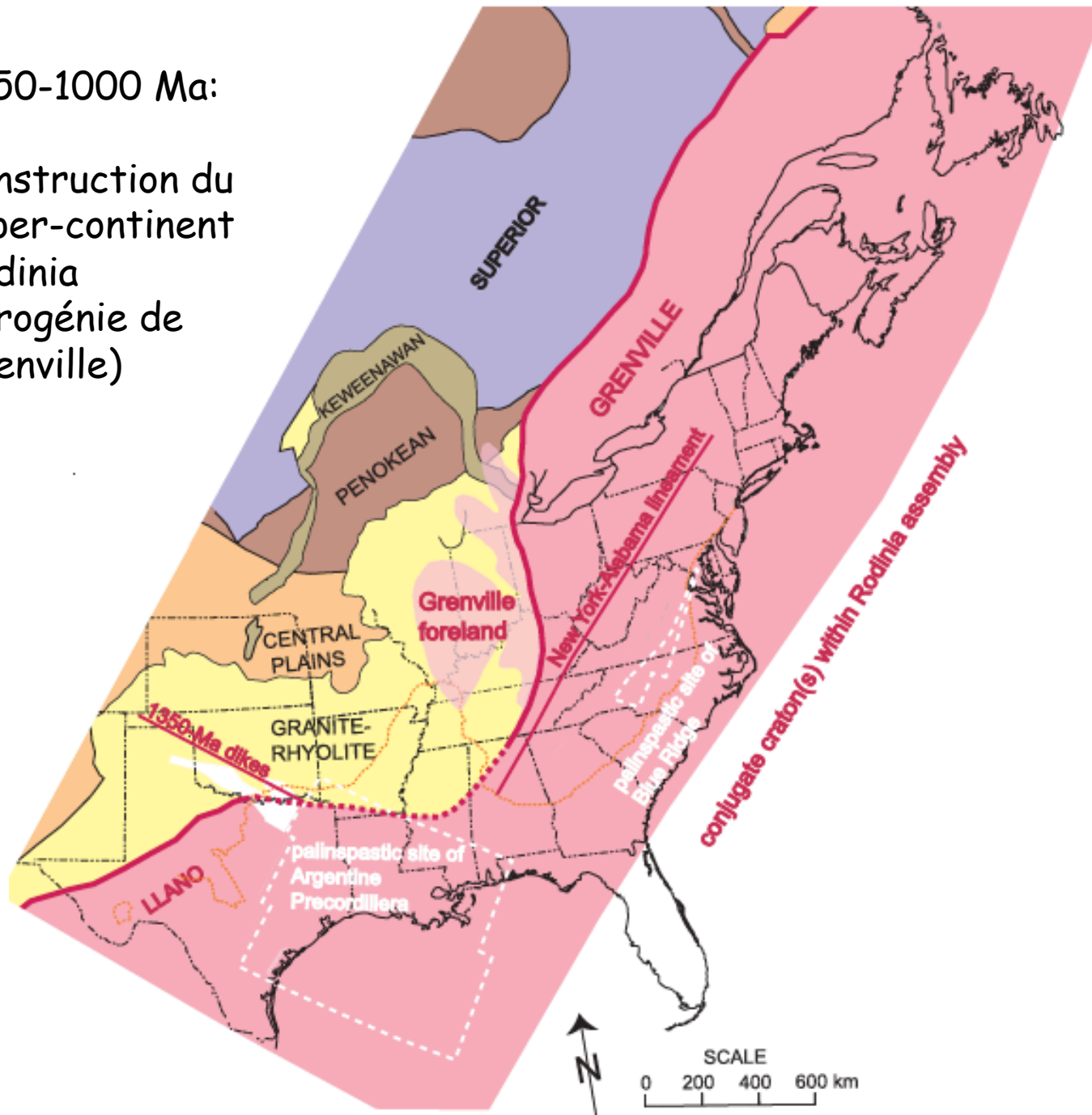
~160 Ma **ATLANTIC**



Héritage tectonique: rôle dans l'évolution de la lithosphère continentale?

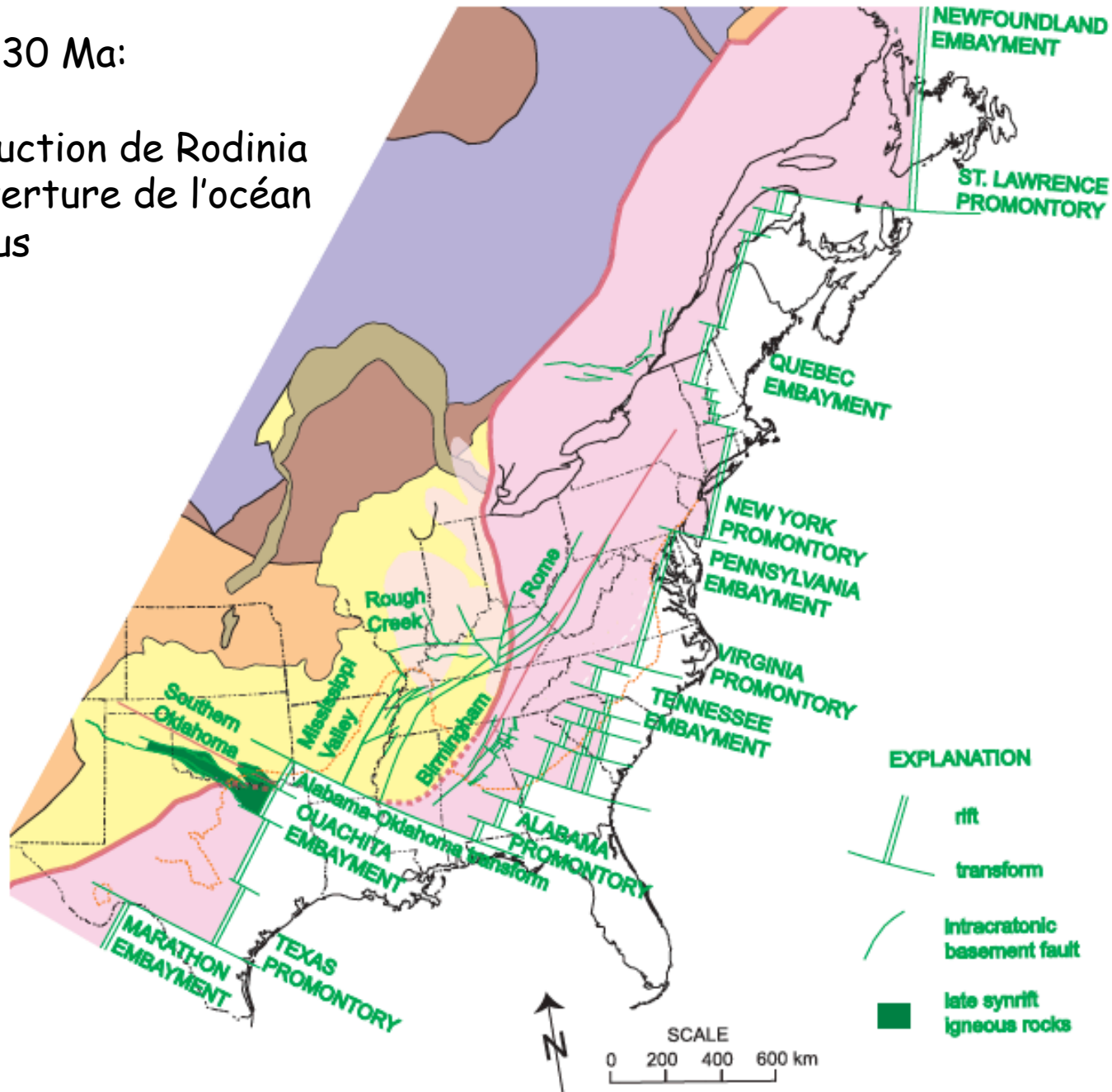
1350-1000 Ma:

Construction du
super-continent
Rodinia
(Orogénie de
Grenville)



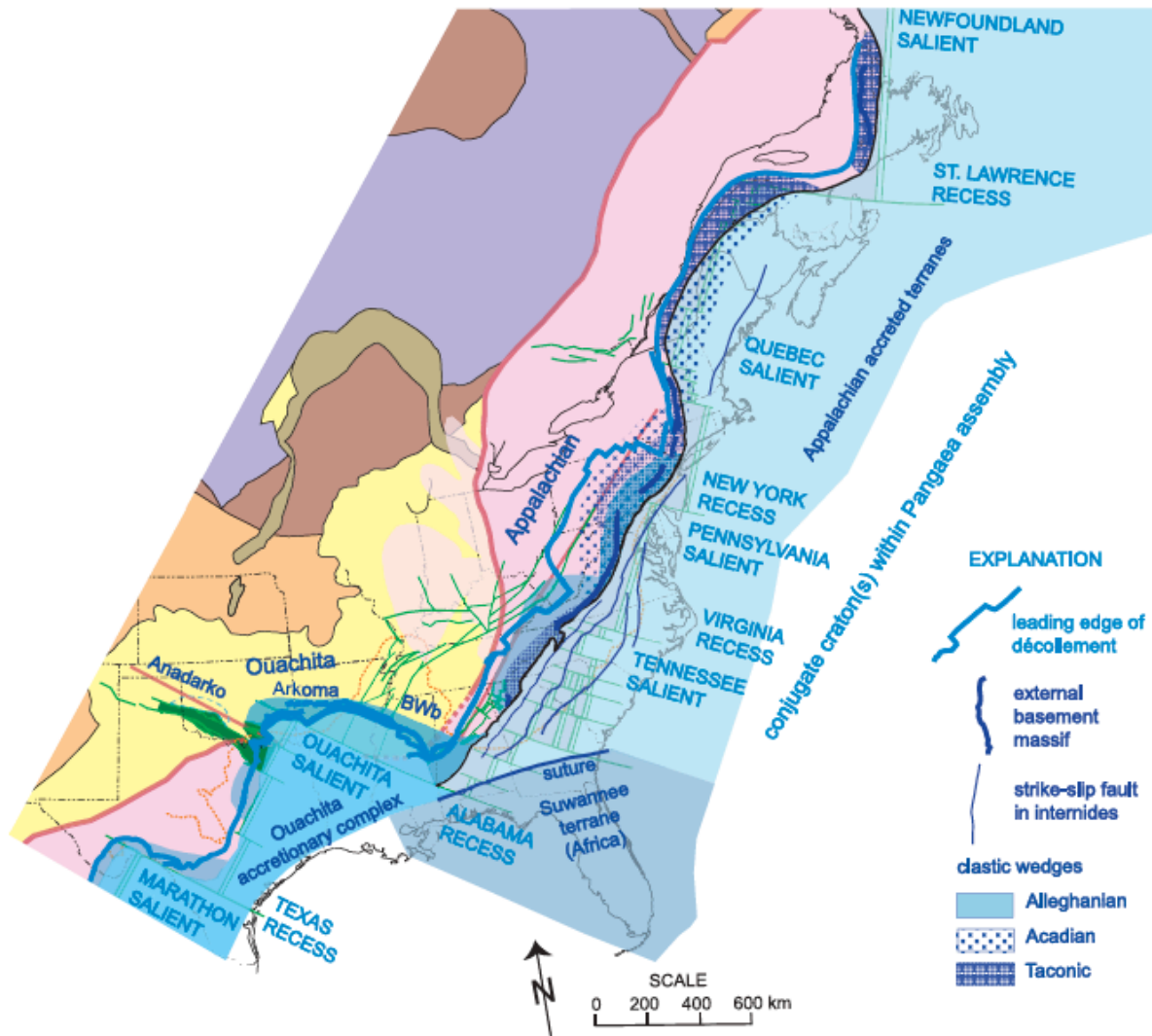
800-530 Ma:

Destruction de Rodinia
et ouverture de l'océan
Iapetus

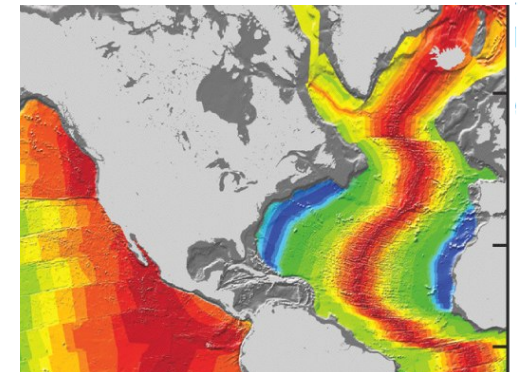
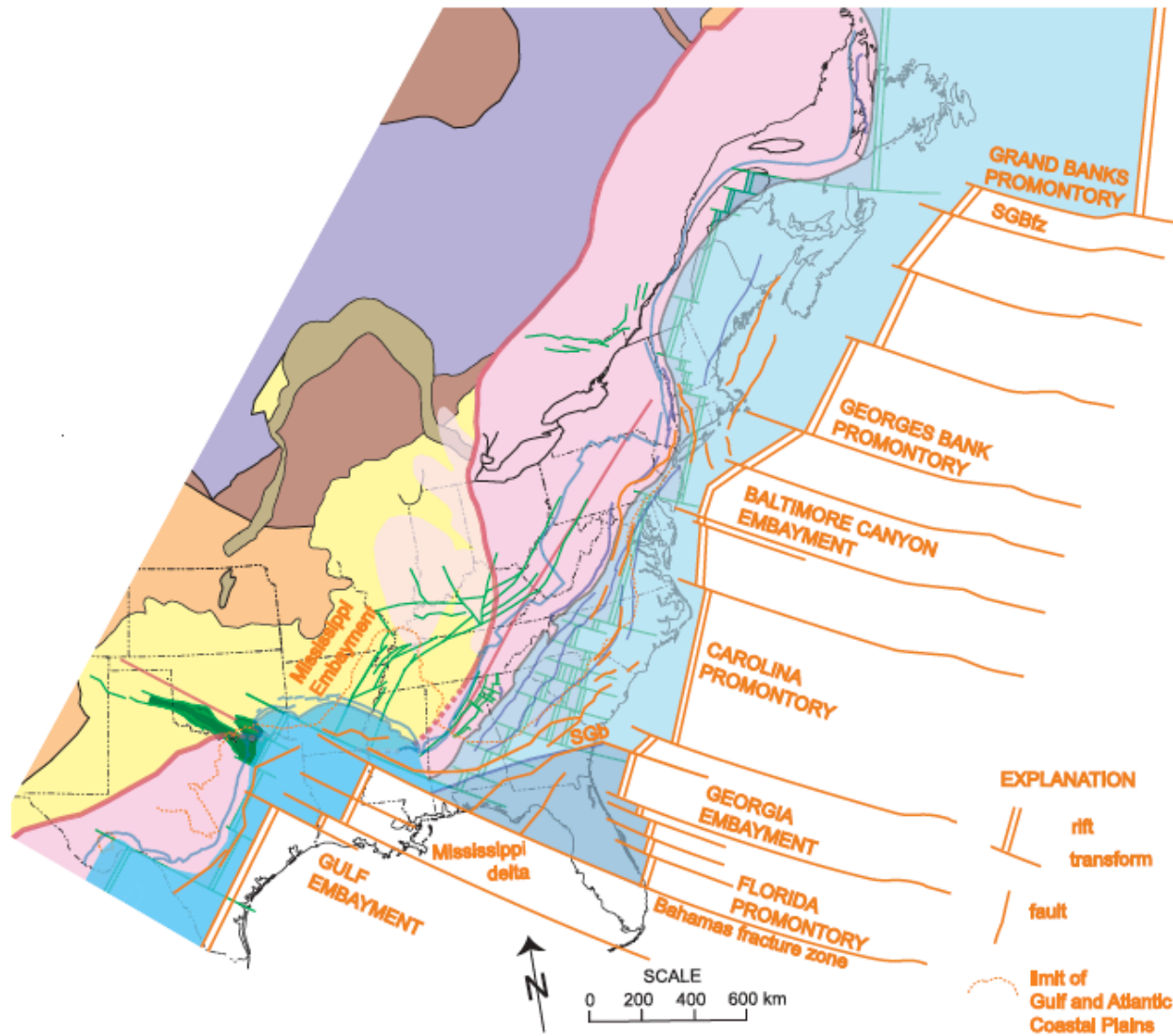


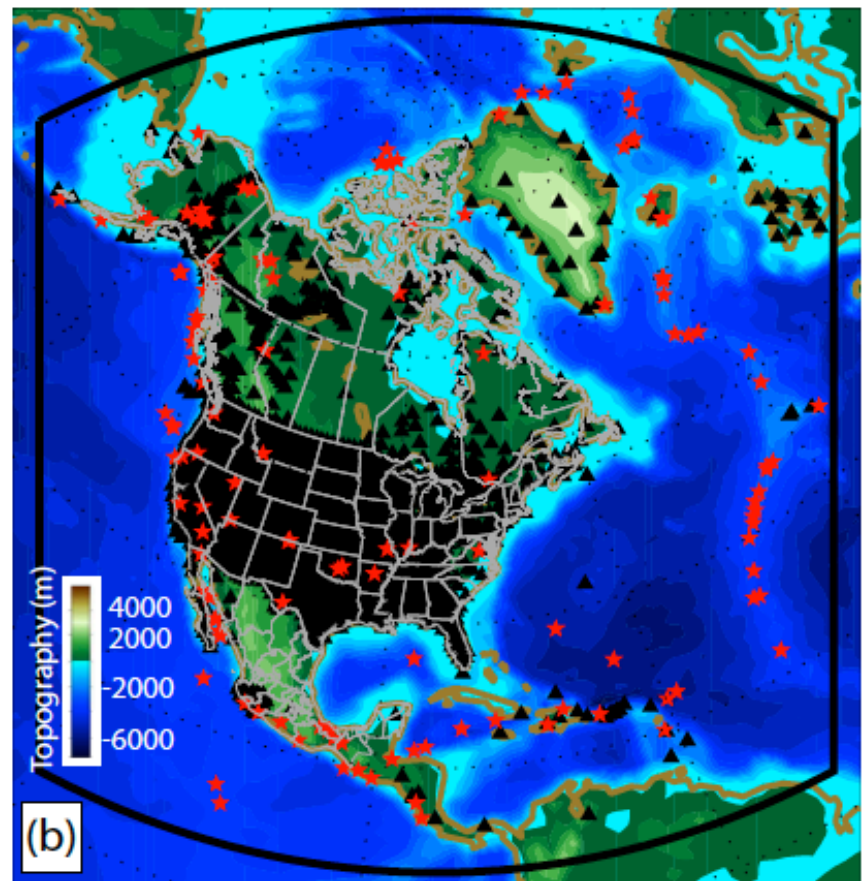
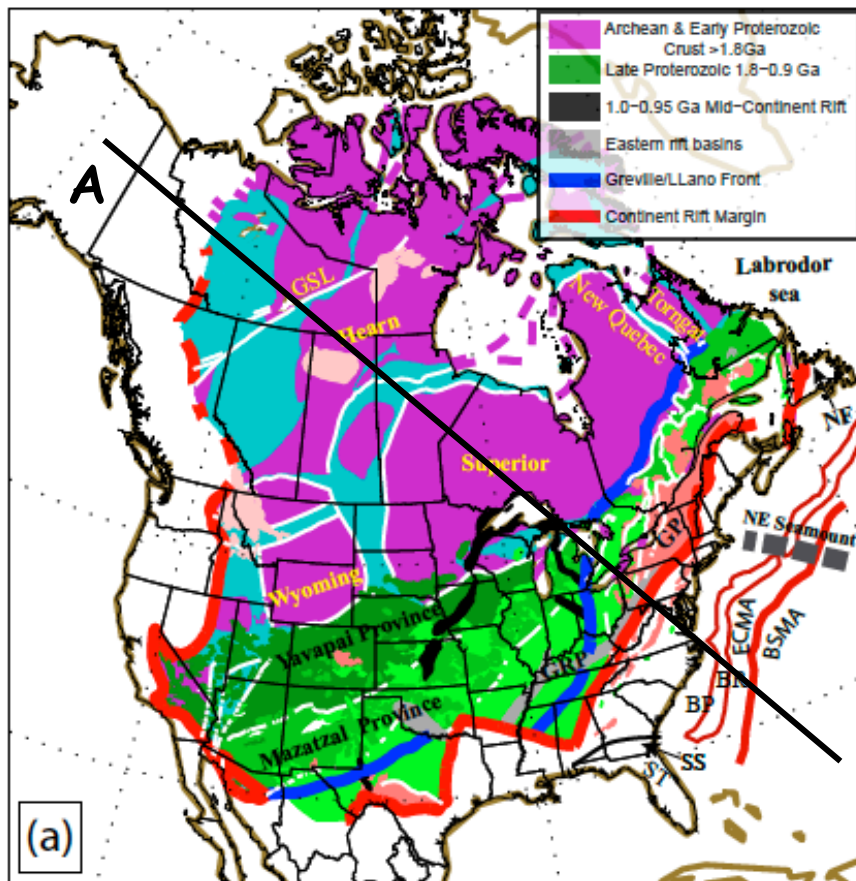
Thomas, 2006

~300 Ma:
Construction du super-continent Pangea (Orogénie des Appalaches)

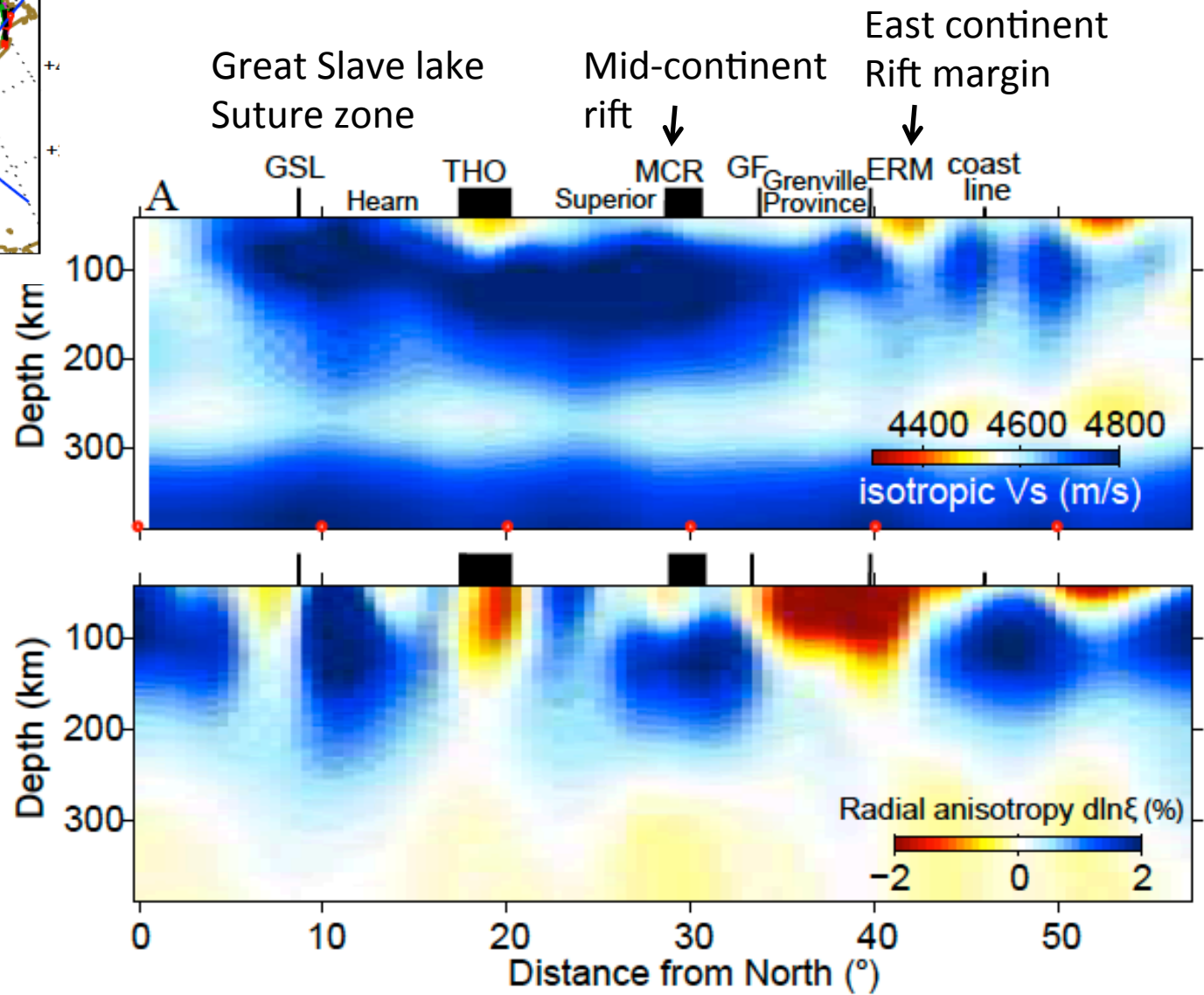
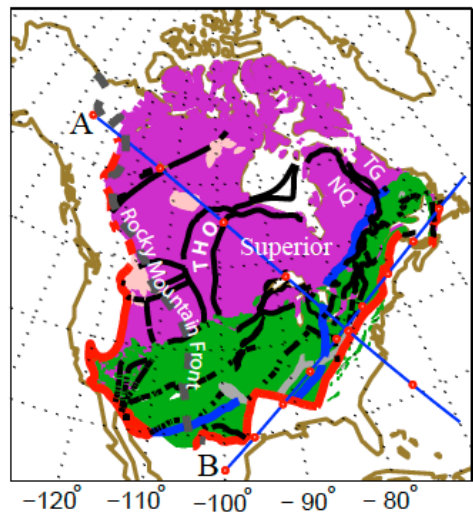


~160 Ma: Démantèlement de Pangea et ouverture de l'Océan Atlantique

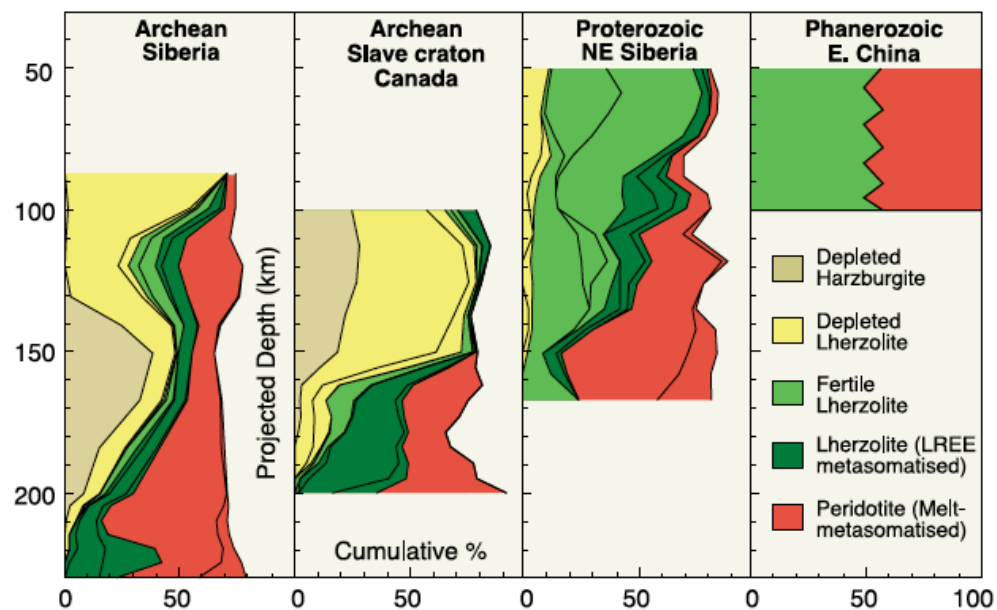




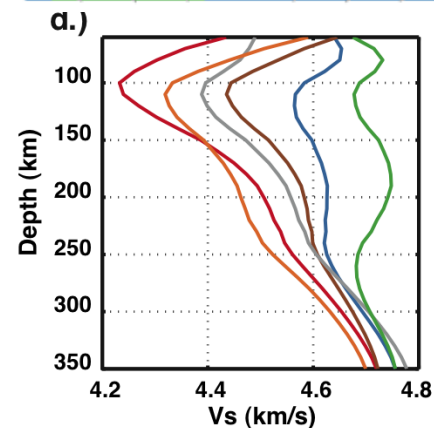
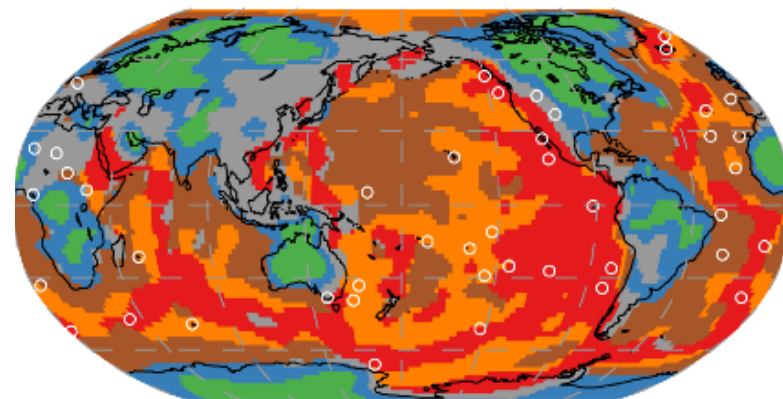
Yuan et al., 2013



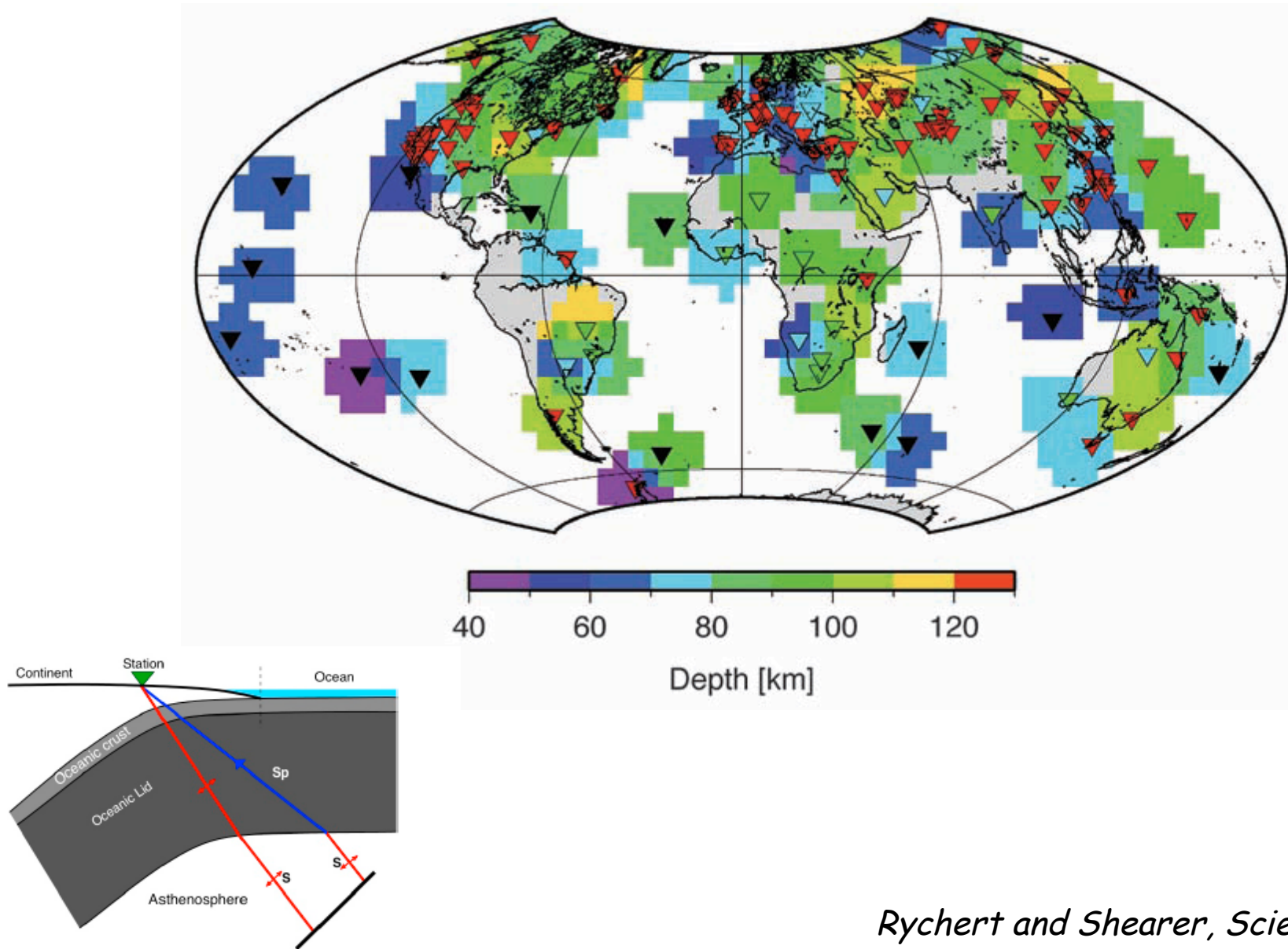
Stratification de la lithosphère continentale: Sismologie, géodynamique, pétrologie

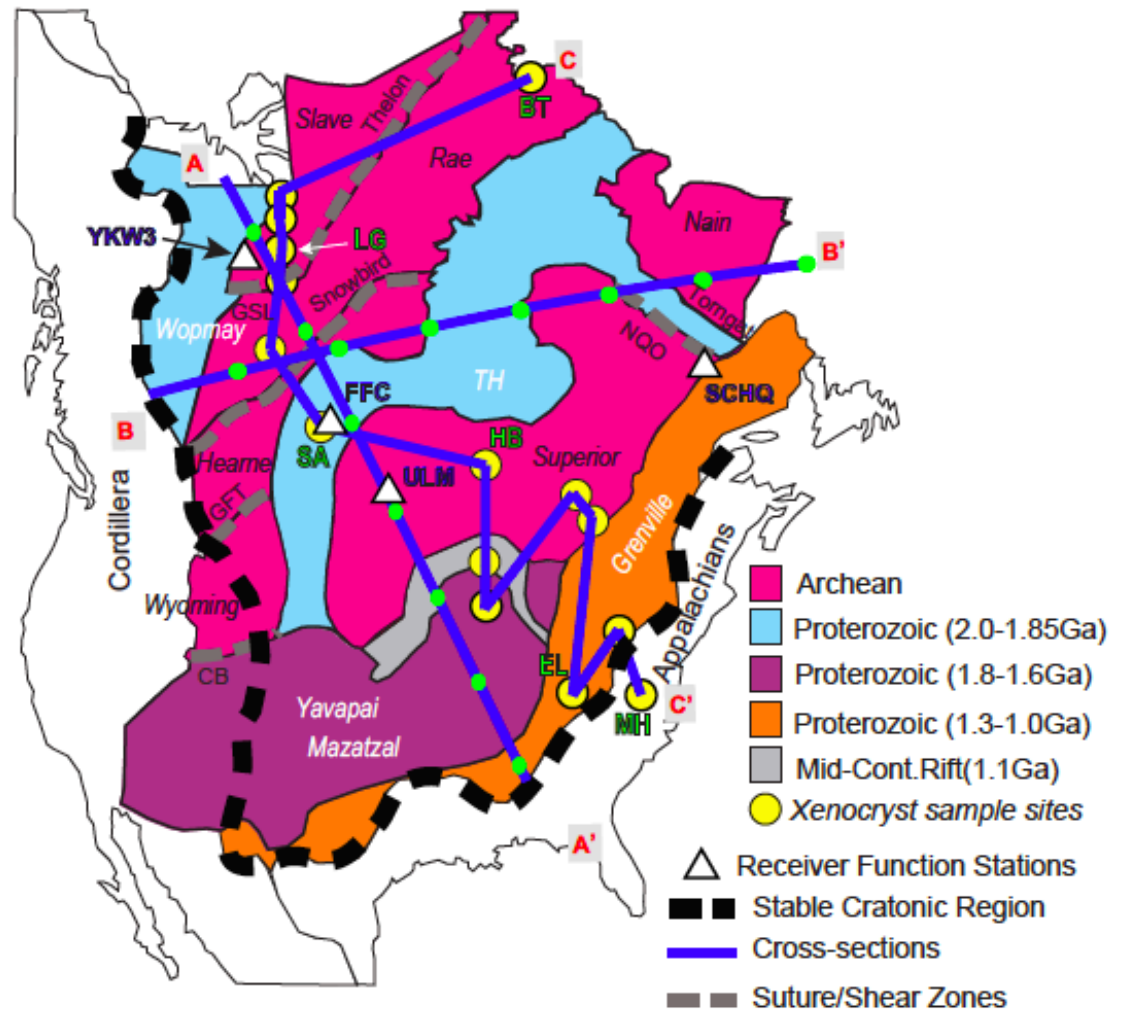


O'Reilly et al., 2001



Détection de ce qui pourrait être la LAB par analyse globale des ondes Converties ("fonctions récepteurs")

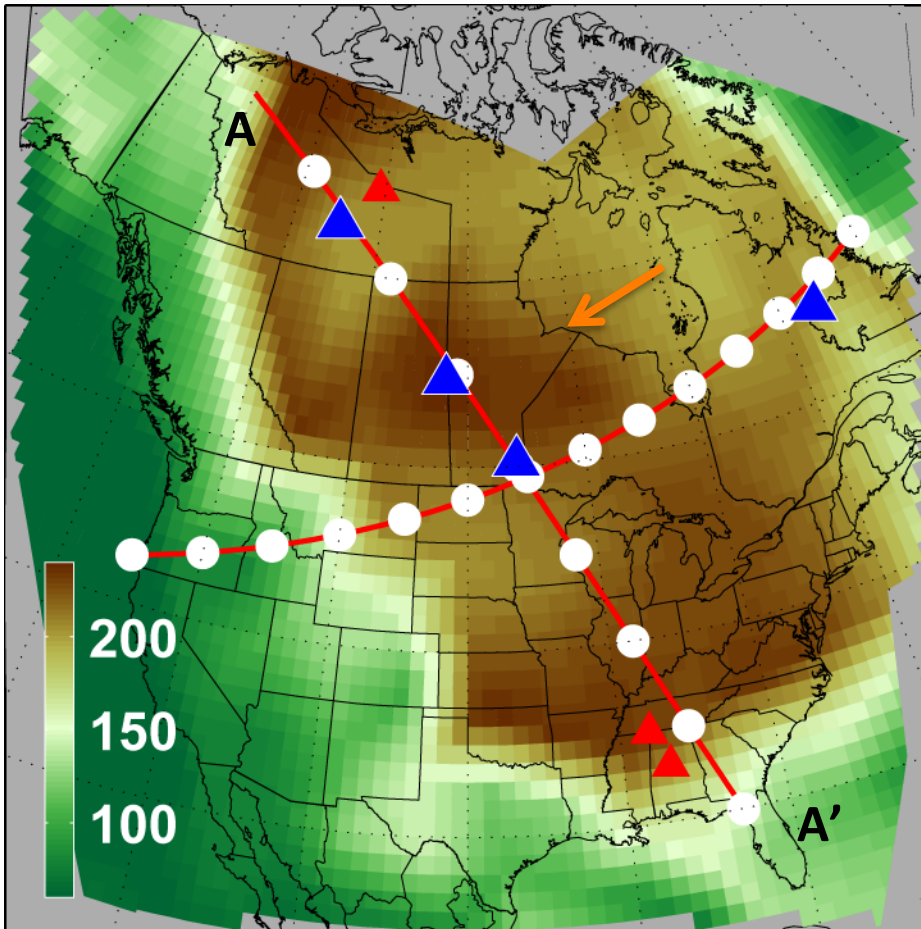




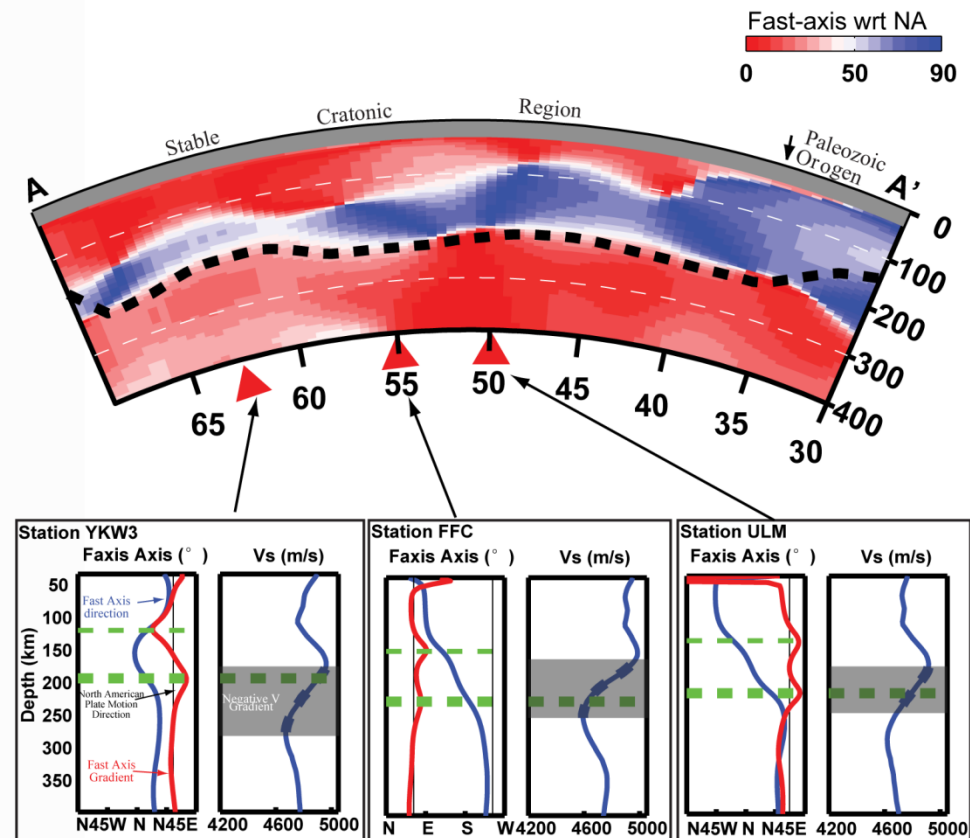
Carte géologique: Canil,, 2008

Anisotropie azimuthale dans le craton nord-Américain

Epaisseur de la lithosphère



Déviatoin de la direction de l'axe rapide par rapport à l'APM



YKW3

FFC

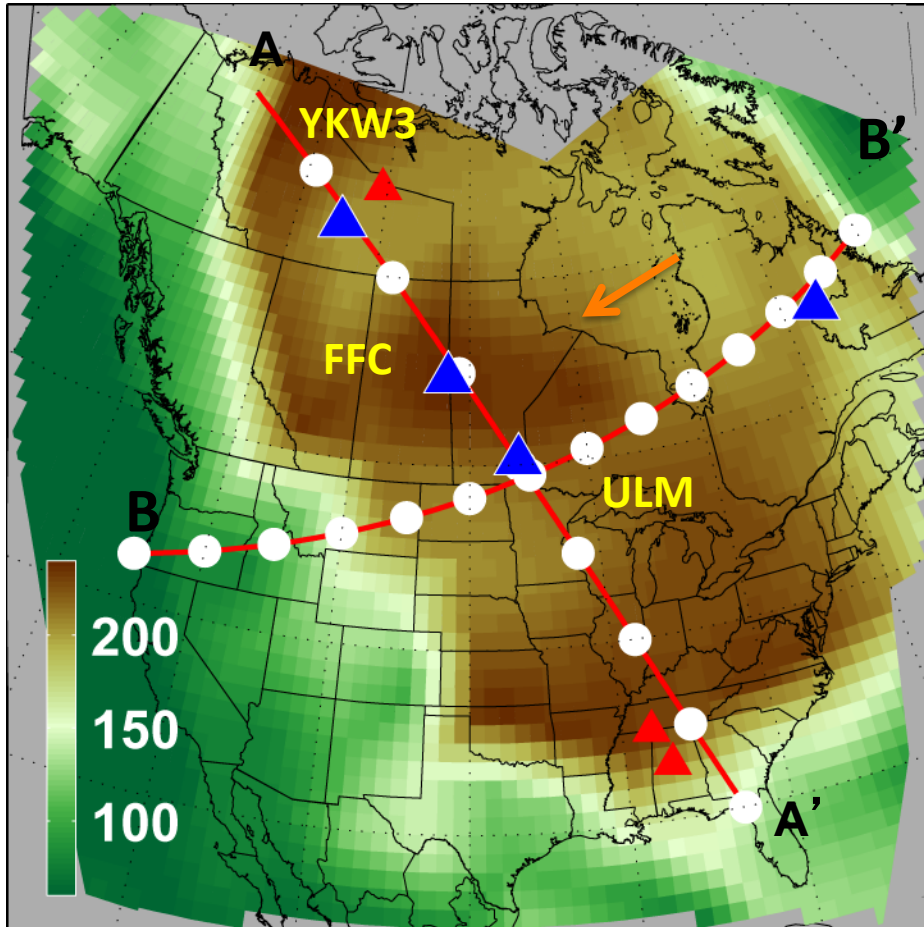
ULM



NAmerica APM

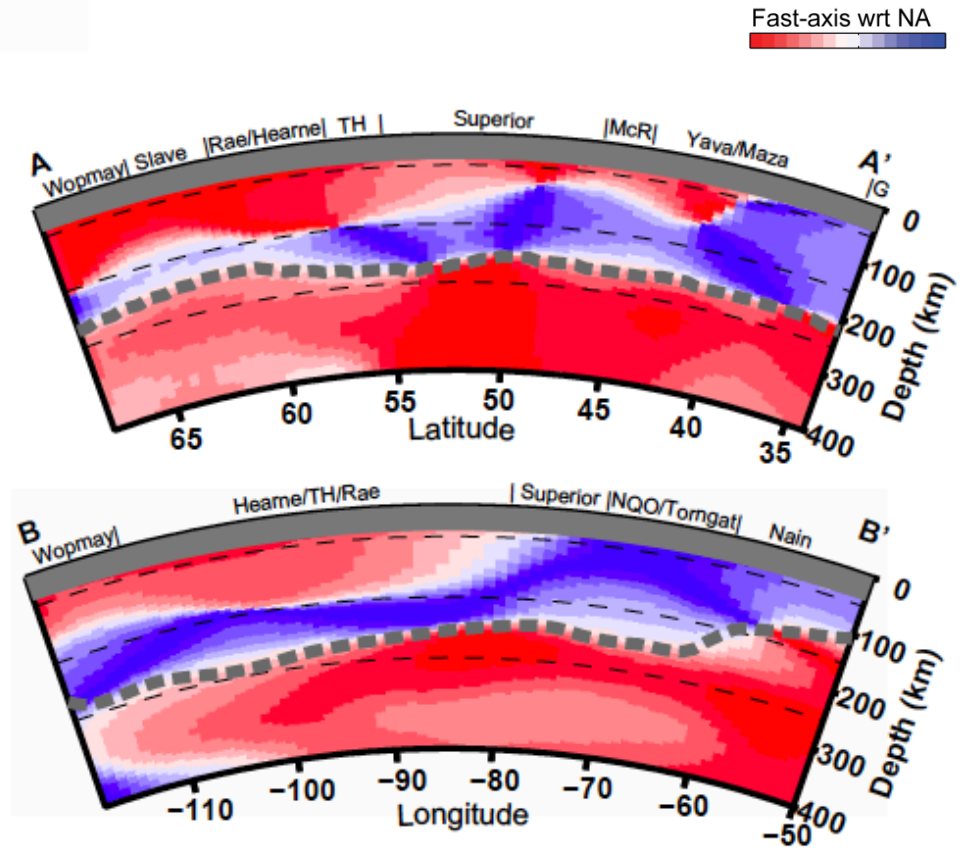
Yuan and Romanowicz, 2010

Epaisseur de la lithosphère

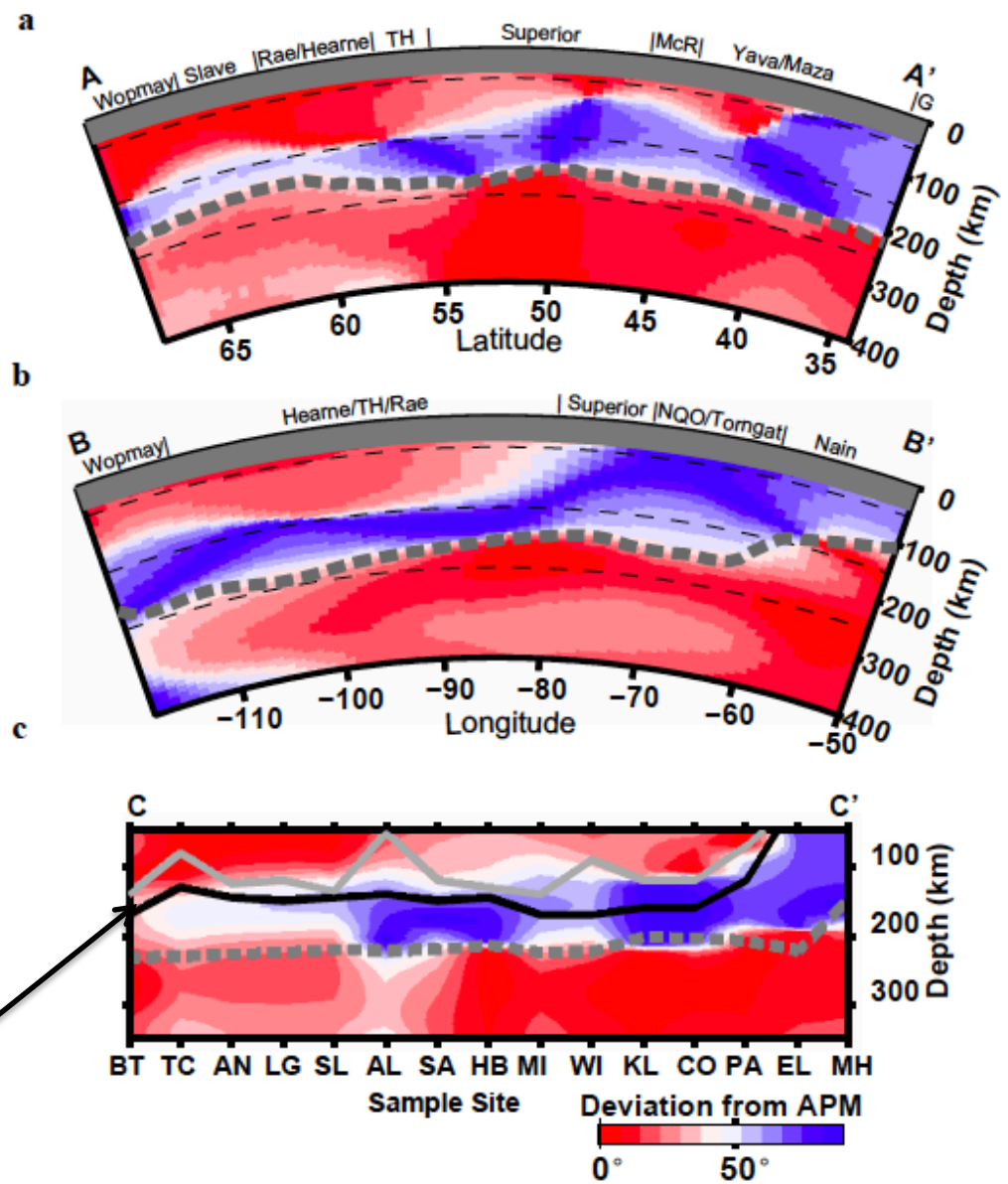
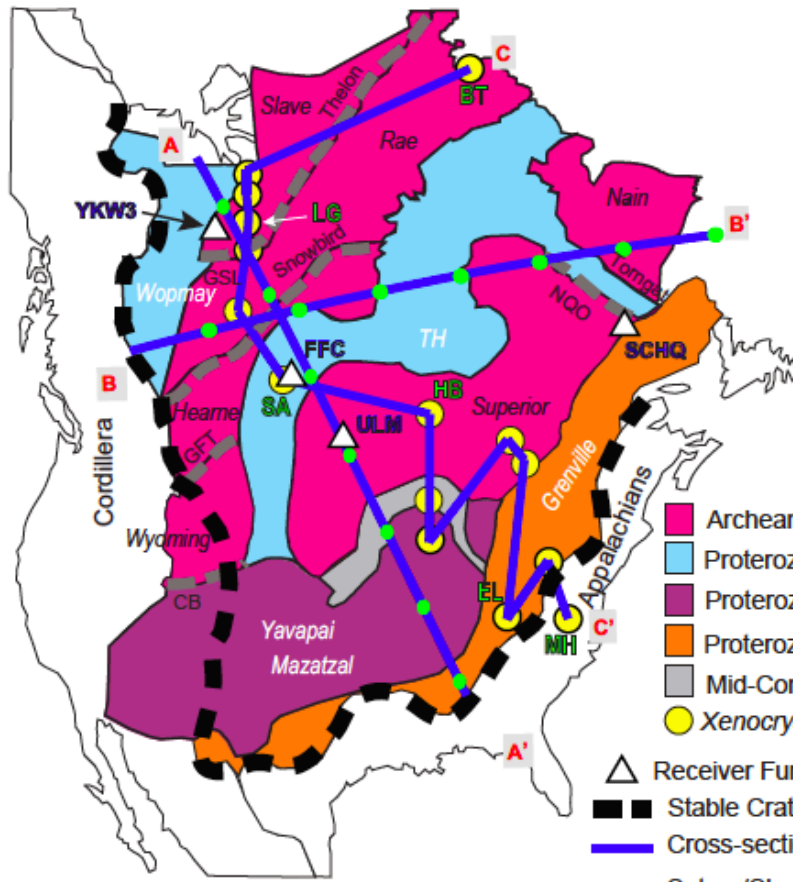


← NAmerica APM

Direction de l'axe rapide référé à l'APM



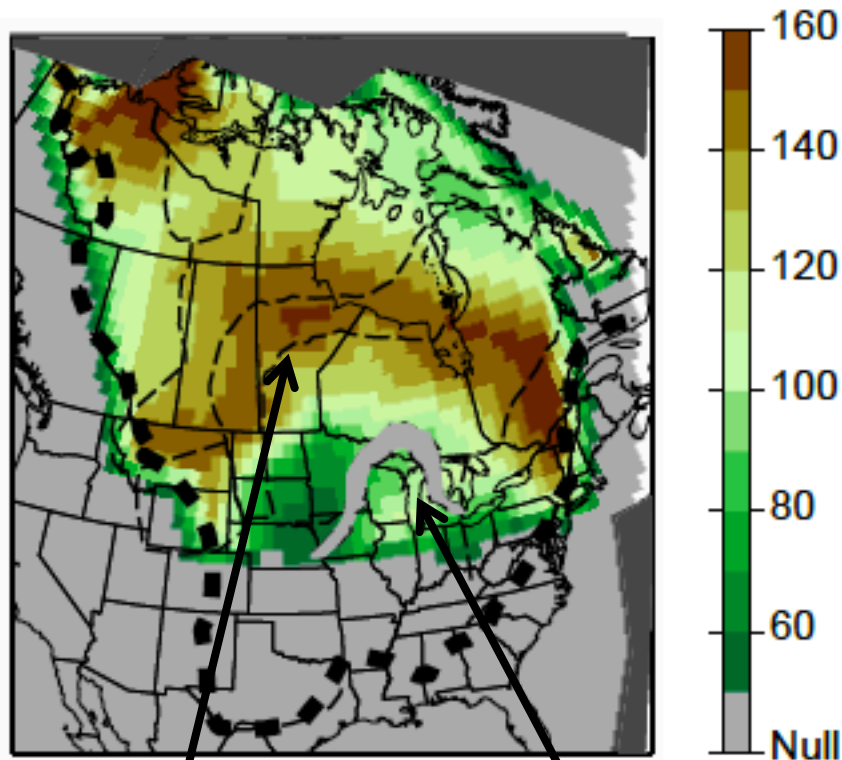
Yuan and Romanowicz, 2010



Lignes continues: % Fo (Mg)
 selon
 Griffin et al. 2004
 Grey: Fo%93
 black: Fo%92

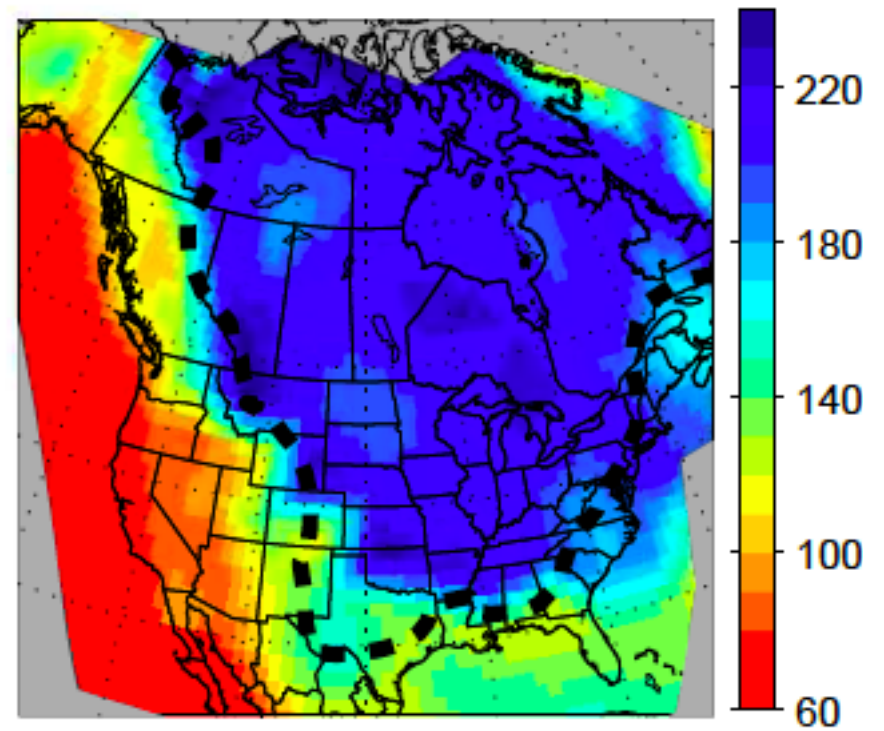
Epaisseur de la couche 1

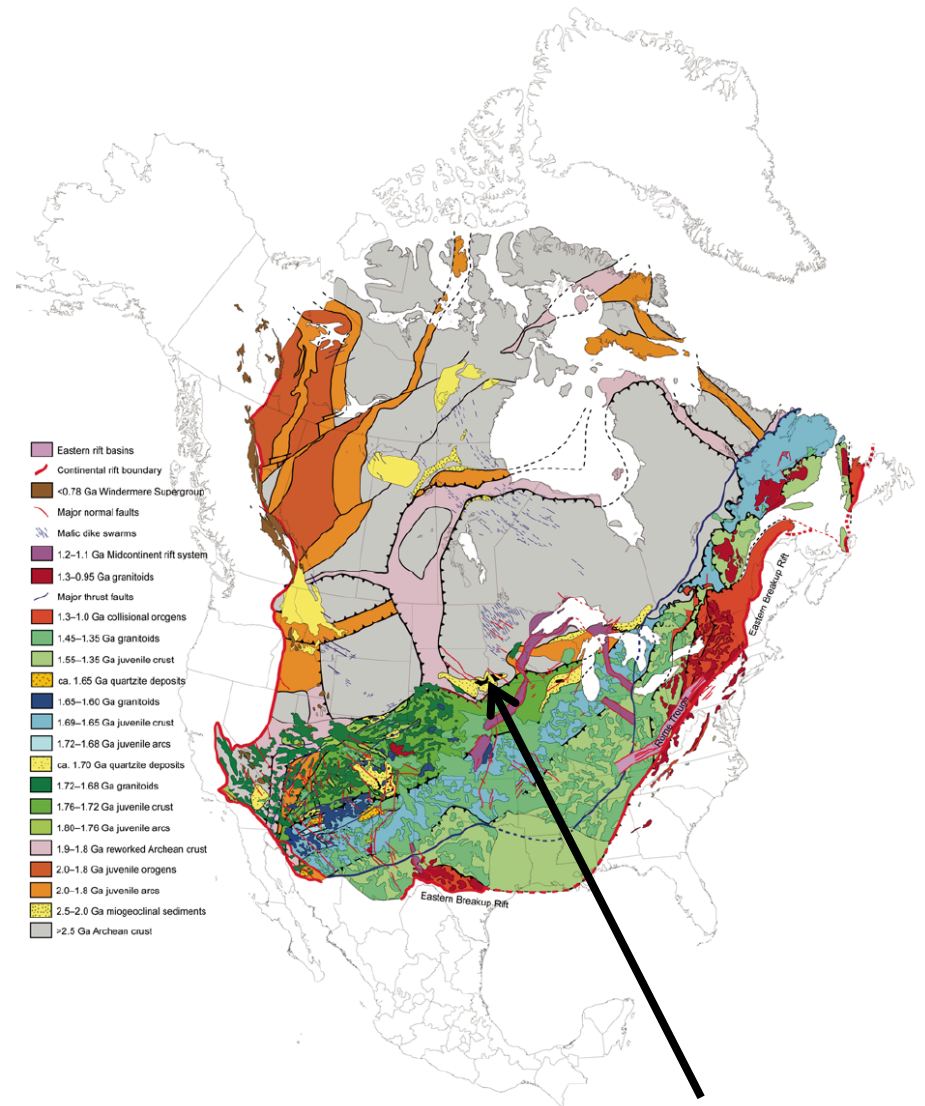
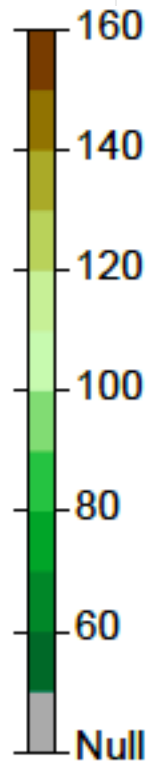
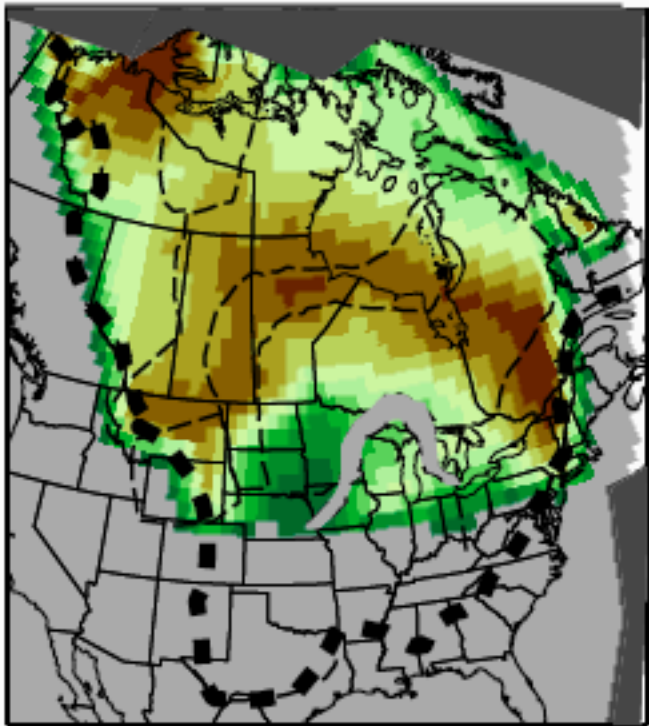
Epaisseur de la lithosphere



Trans Hudson
Orogen

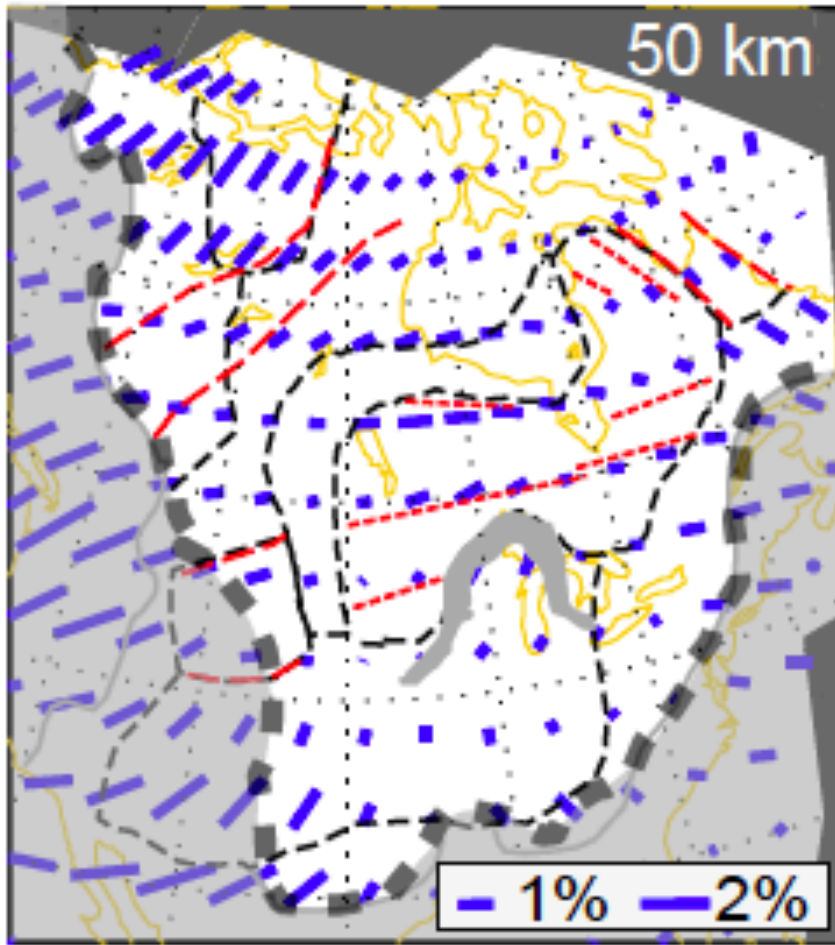
Mid-continent rift zone



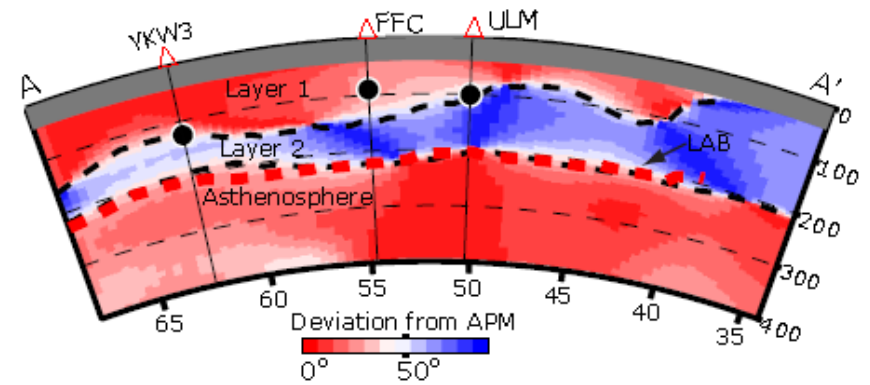


Limite de la croûte archéenne
(âge > 2 Ga)

Direction de l'axe rapide d'anisotropie dans la couche 1



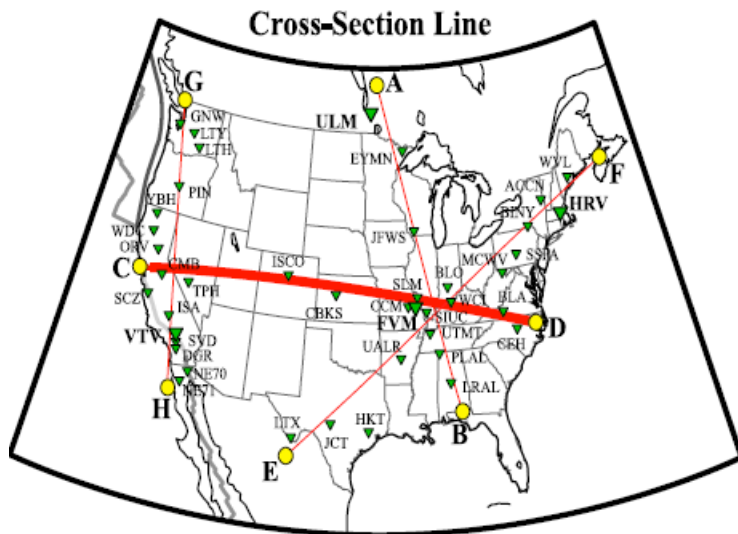
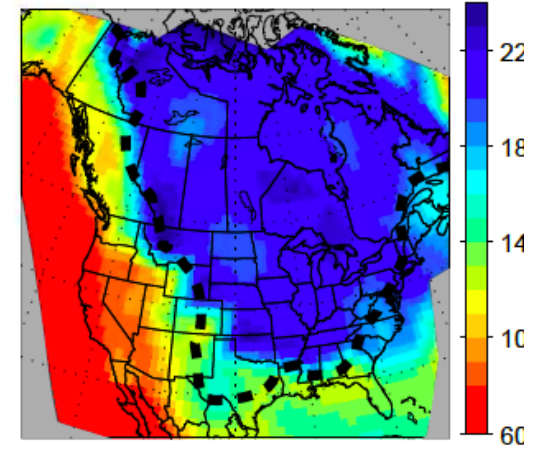
- - - Zones de suture principales
- - - 1% - - - 2%



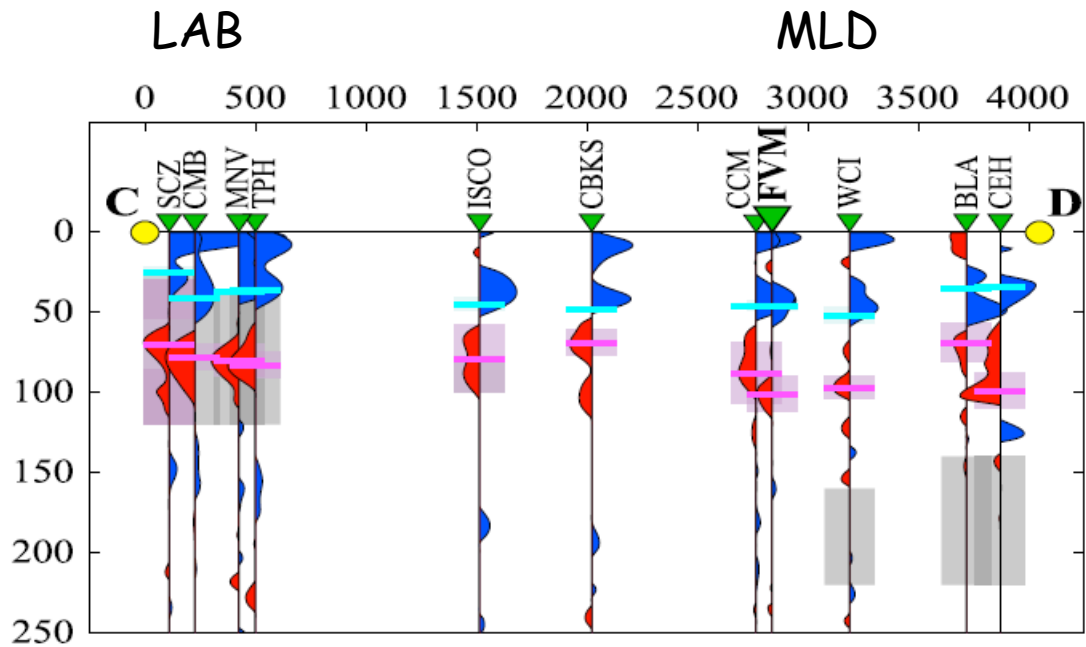
Ces résultats expliquent également les Interprétations divergentes des Observations de splitting de SKS sur le Craton nord-Américain:

- 1) SKS reflète l'anisotropie "gelée" dans la lithosphère (Sliver, 1996)
- 2) SKS reflète l'écoulement actuel dans l'asthénosphère (Vinnik et al. 1994)⁴³

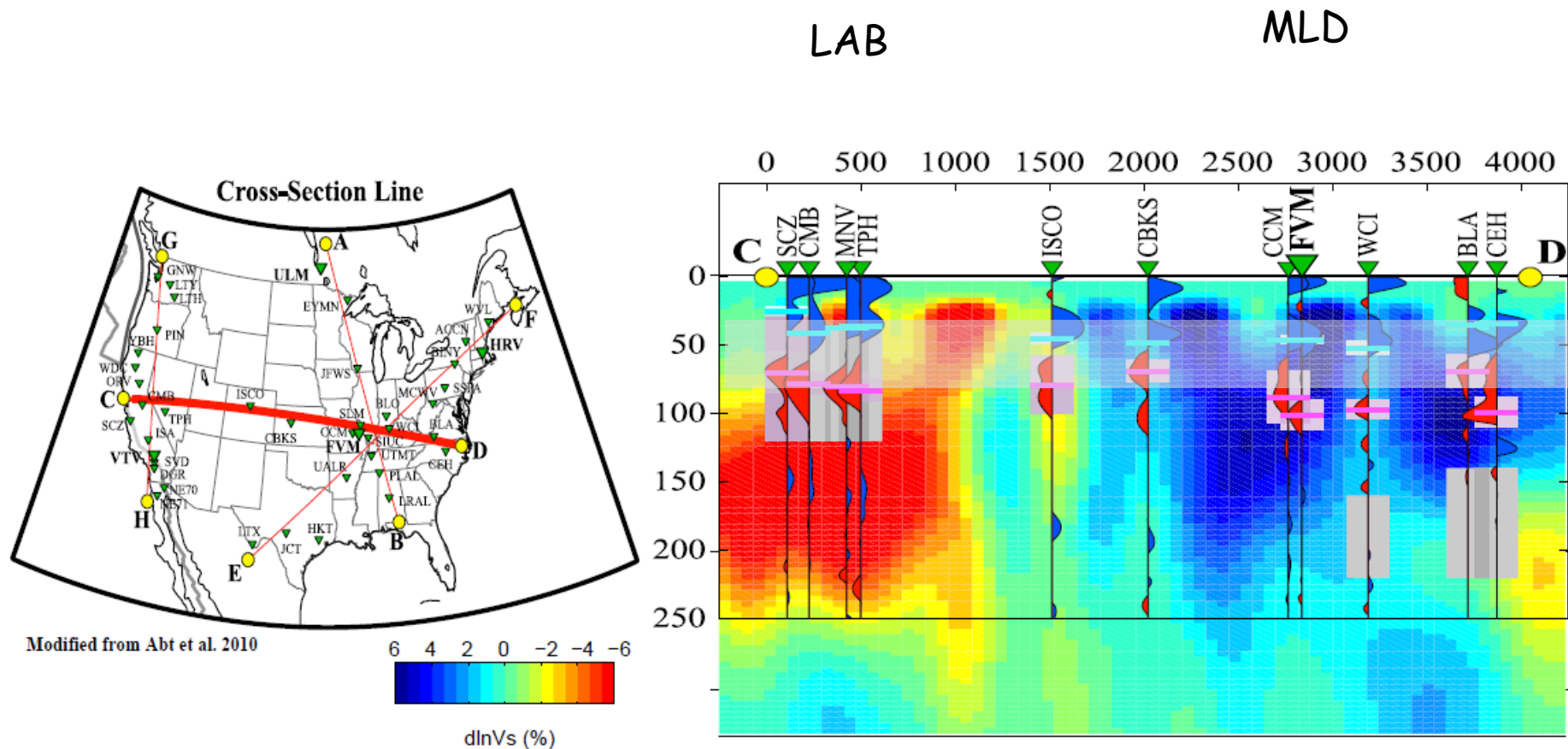
LAB dans l'Ouest des Etats Unis et la MLD dans le craton se trouvent à peu près à la même profondeur

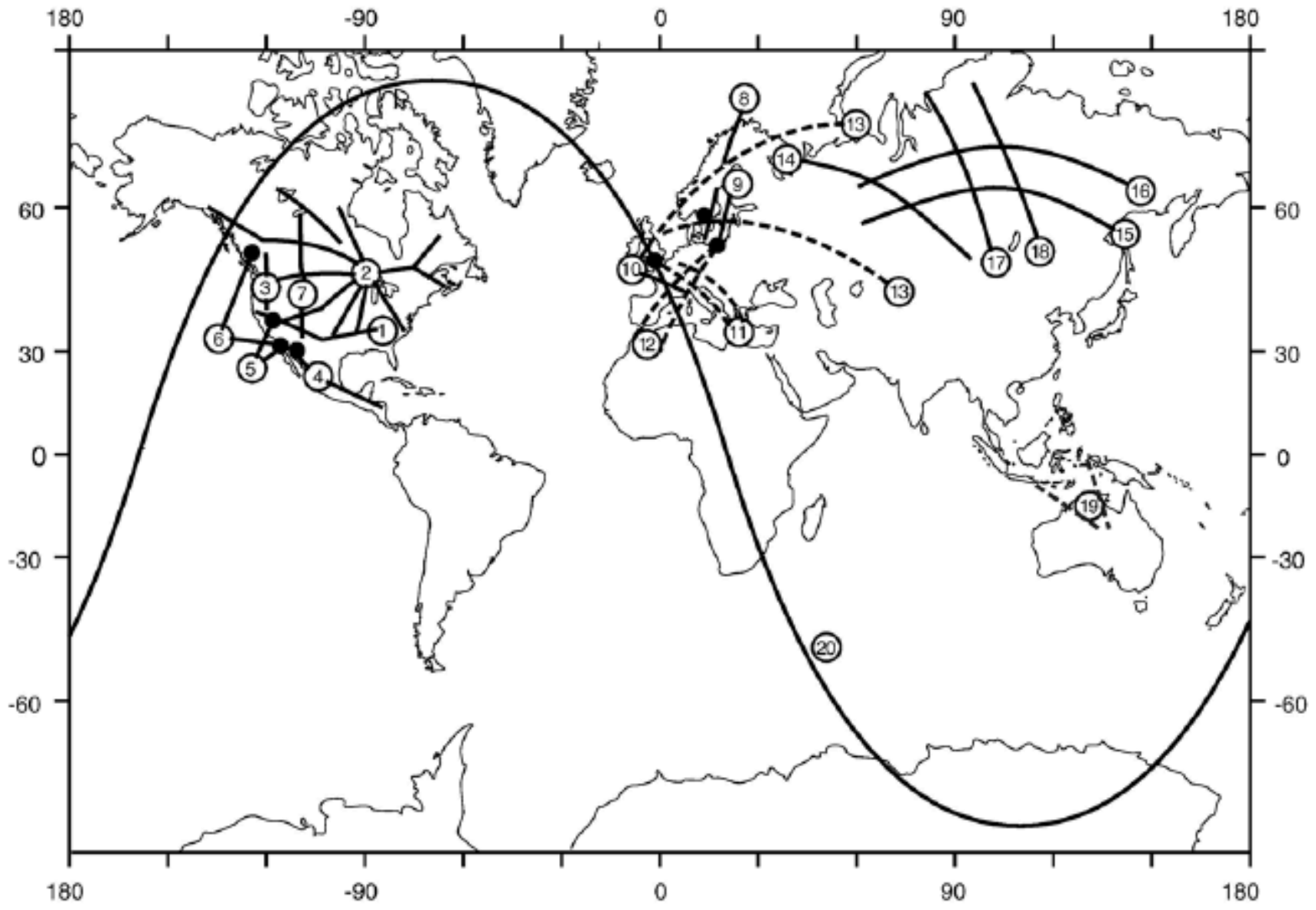


Modified from Abt et al. 2010

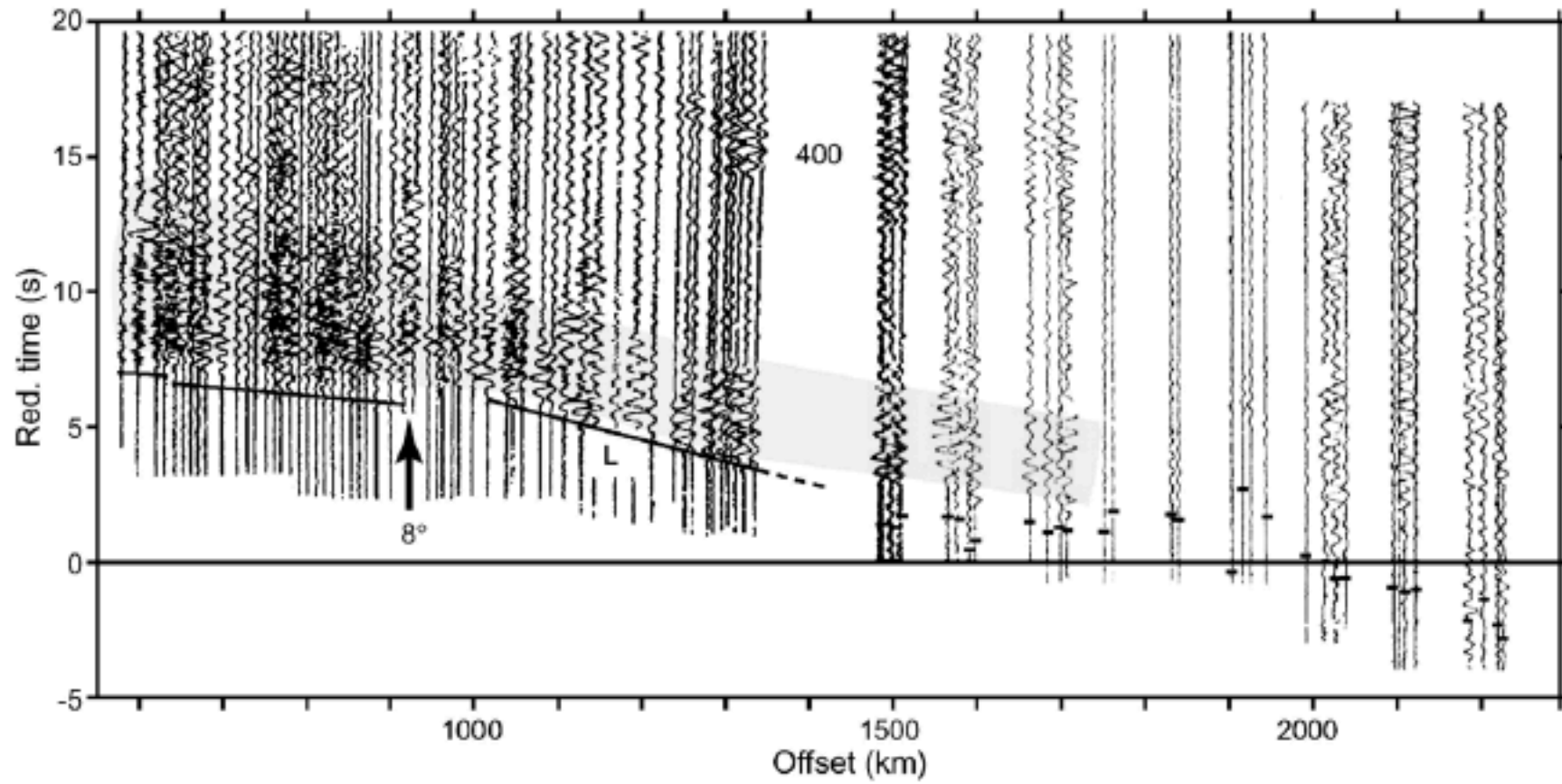


- LAB: limite lithosphère/asthénosphère
- MLD: au milieu de la racine de vitesse V_s élevée dans le craton, détectée également par l'anisotropie azimuthale

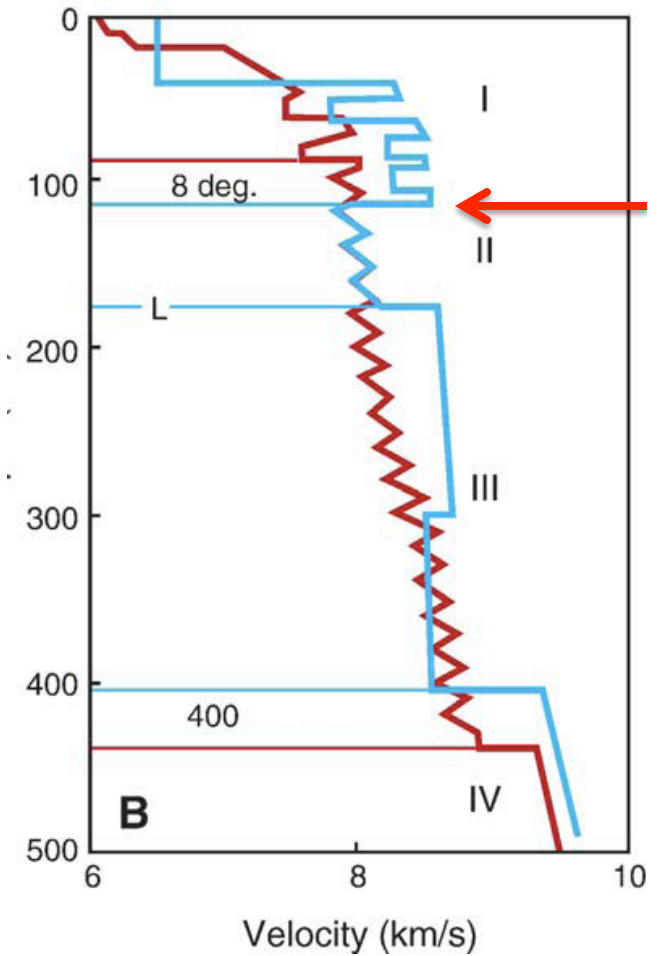
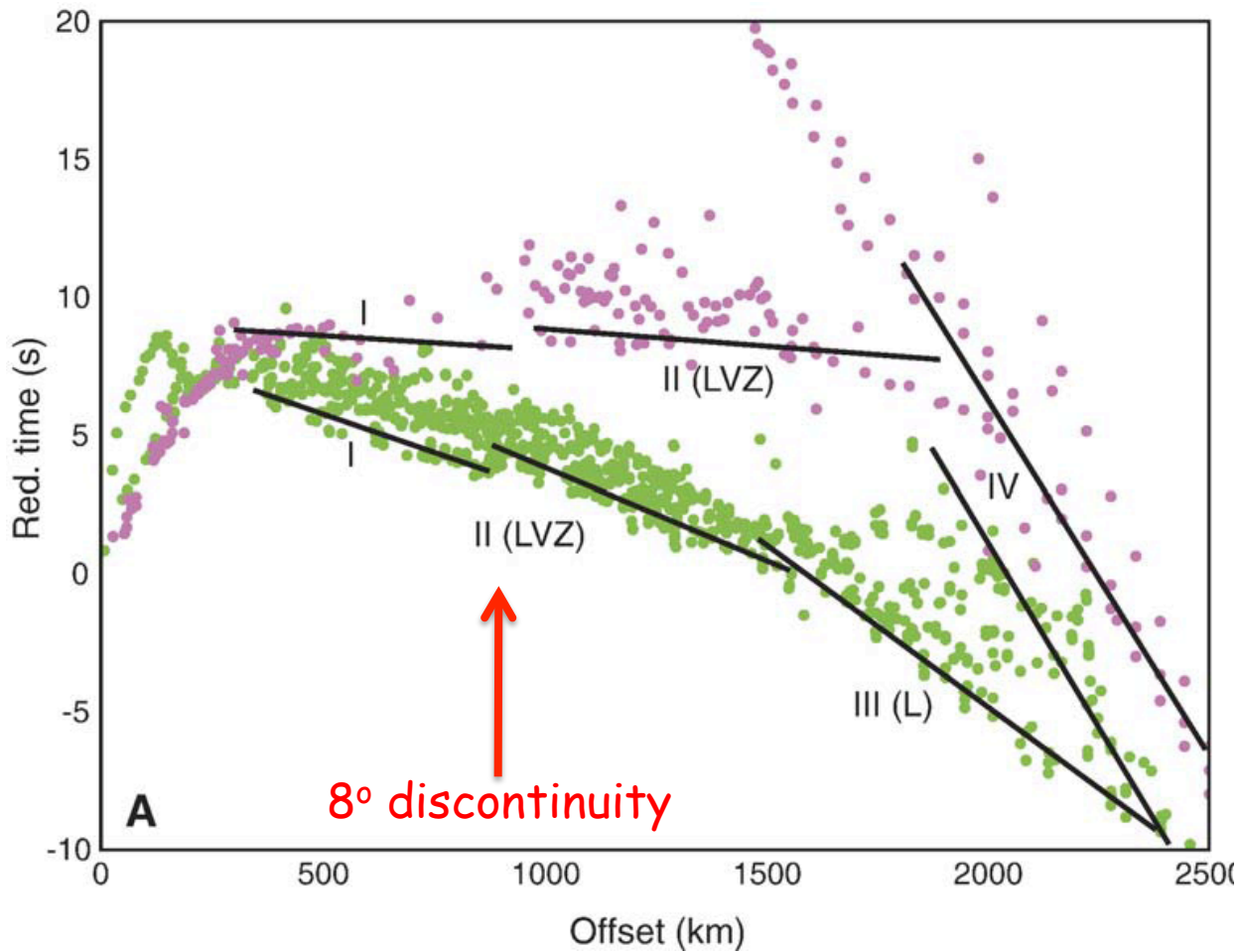




"Early Rise" profiles 8 et 9

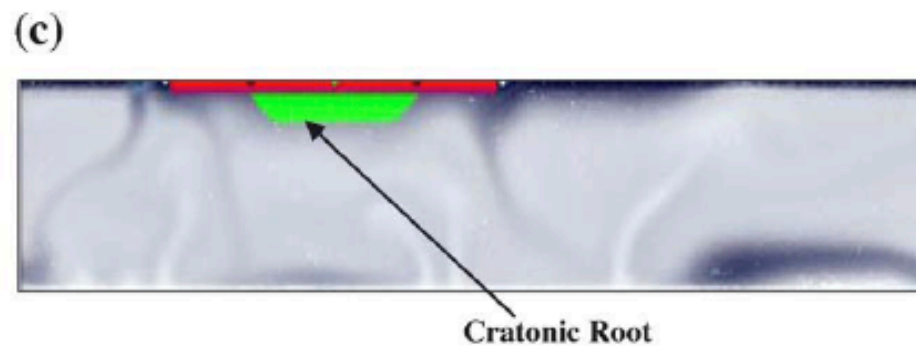
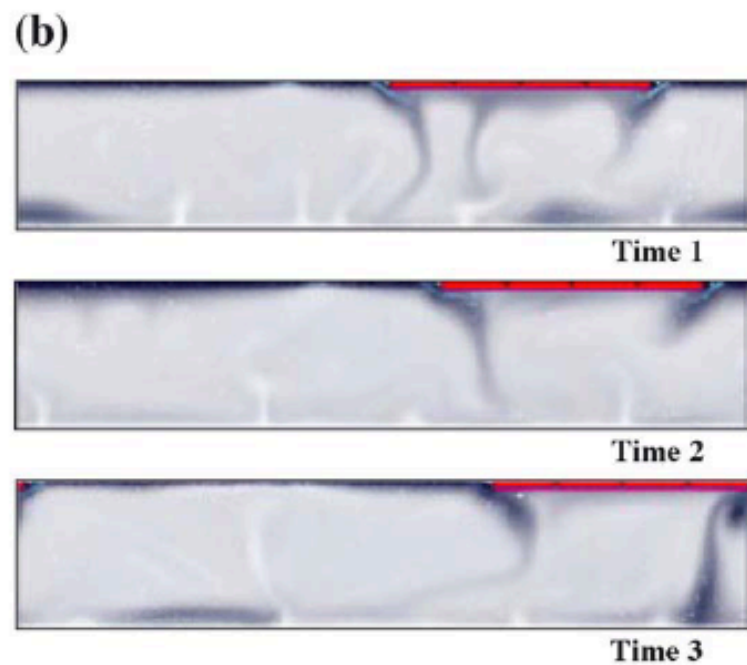
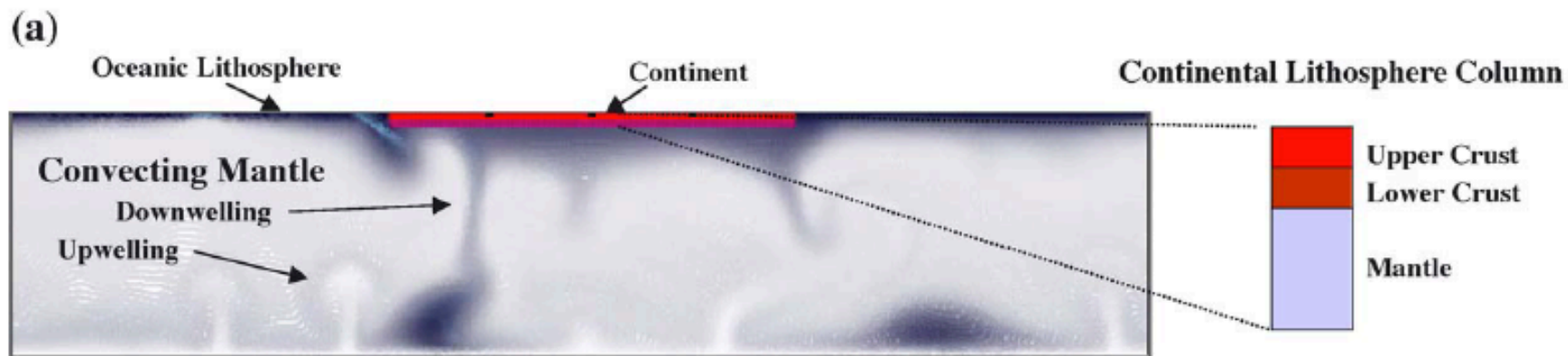


Profils sismiques de grande longueur

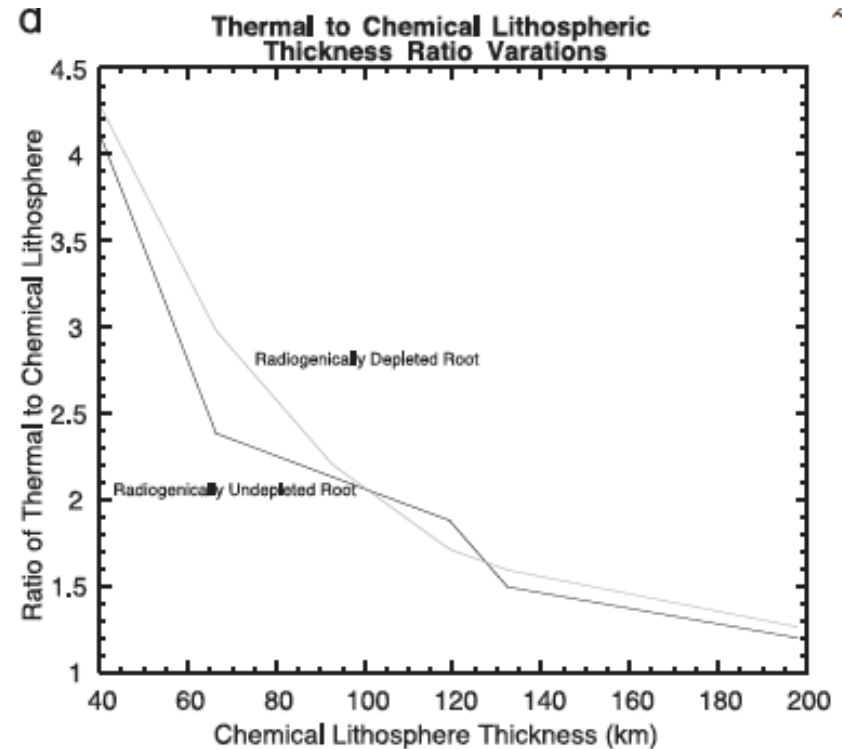
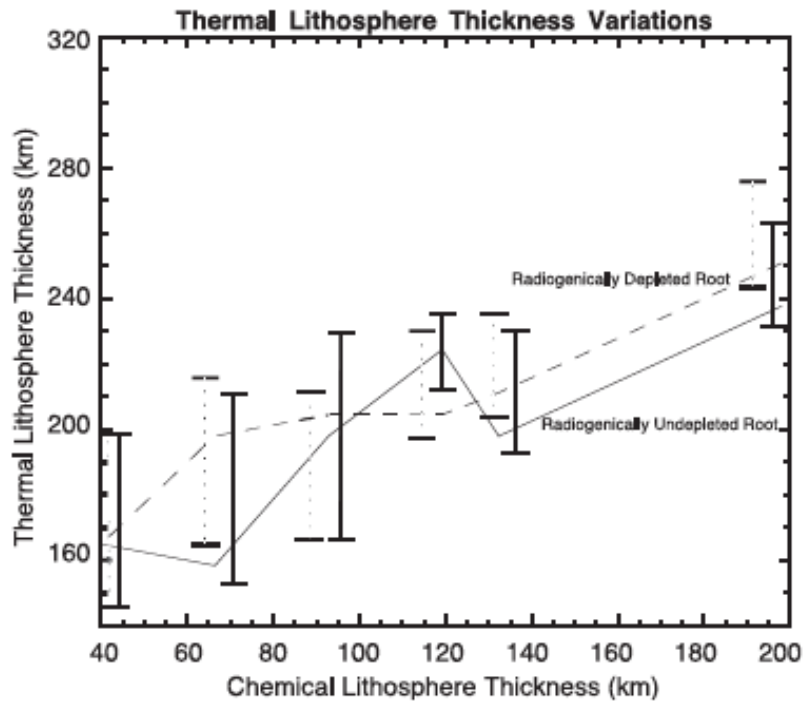


Modèle géodynamique de la structure thermique sous les continents

- Etude de la structure thermique de la lithosphère continentale:
 - Contraintes sur le flux de chaleur à la surface et la concentration des éléments radioactifs dans la croûte -> équation de la conduction donne le géotherme continental et une estimation de l'épaisseur de la couche thermique
- Incorporation du manteau convectif (Cooper et al., 2004)
 - Inclusion d'un continent de composition chimique différente, non-deformable, stable à l'intérieur de la couche limite thermique d'un modèle de convection du manteau
 - Racines lithosphériques de composition chimique différente jouent un rôle important sur la structure thermique profonde de la lithosphère
 - Nécessaires pour obtenir une couche thermique d'épaisseur importante

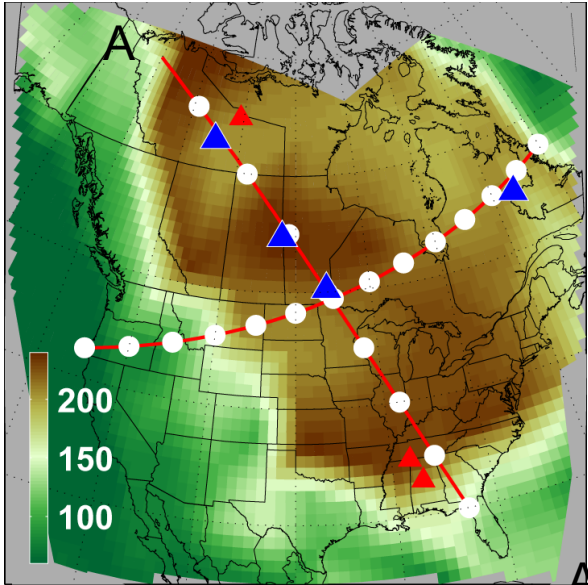


Epaisseur de la lithosphère: profondeur où la température atteint à 1% près la valeur moyenne de la température interne du manteau

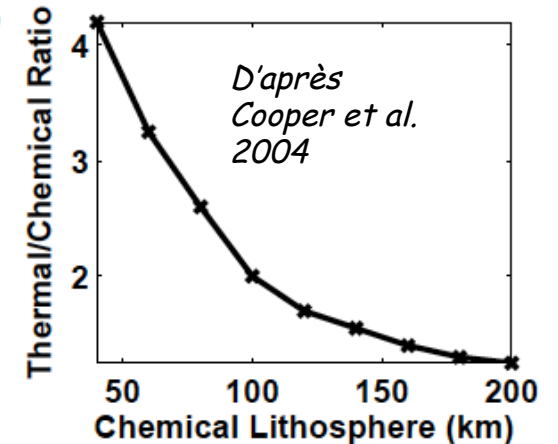
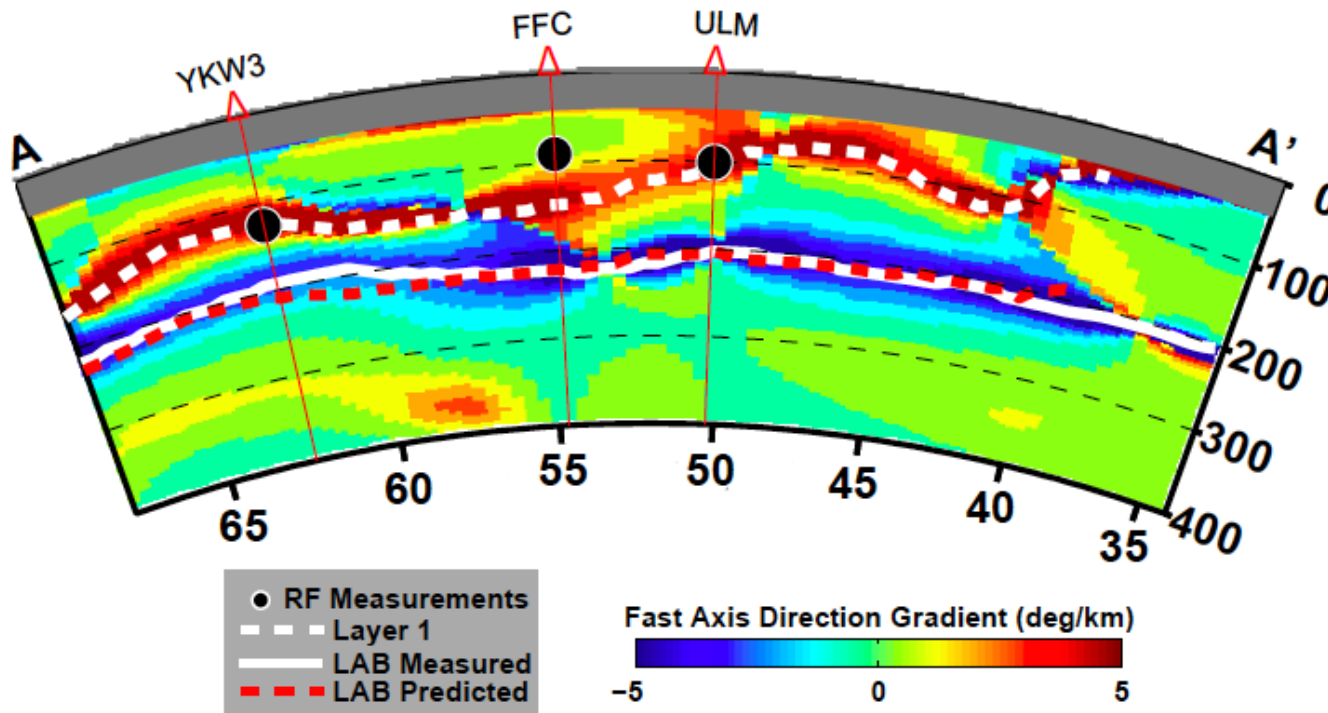


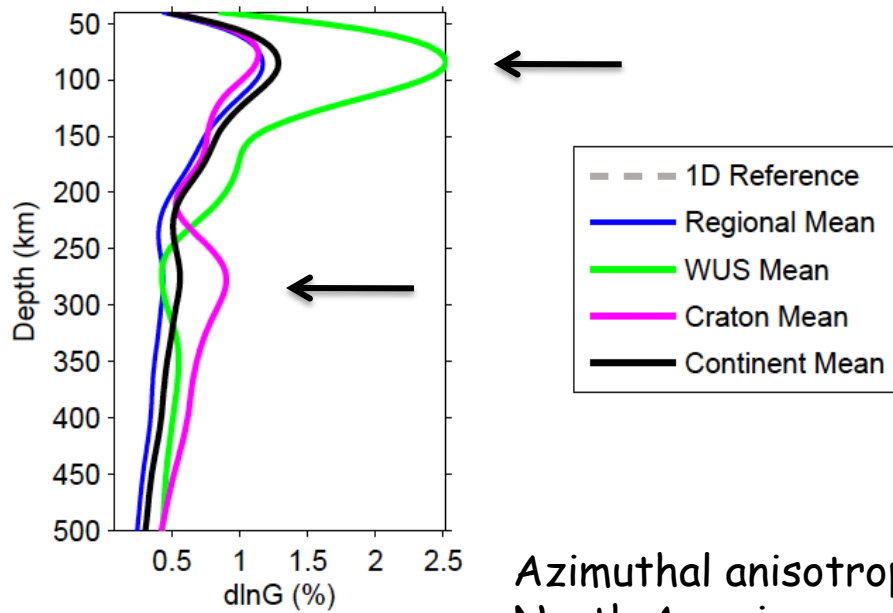
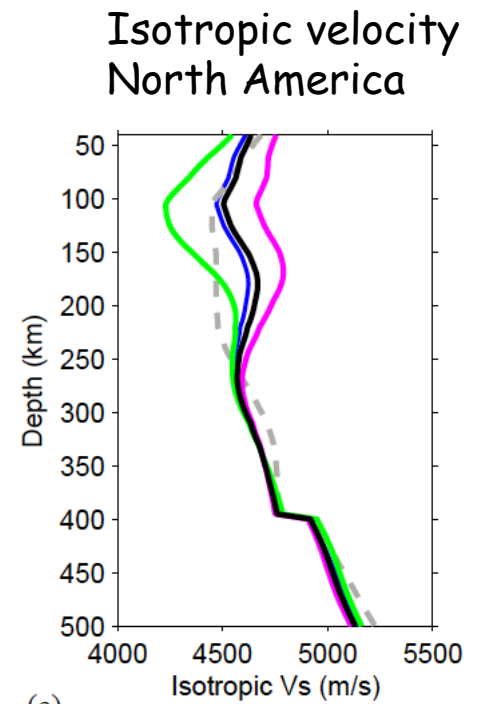
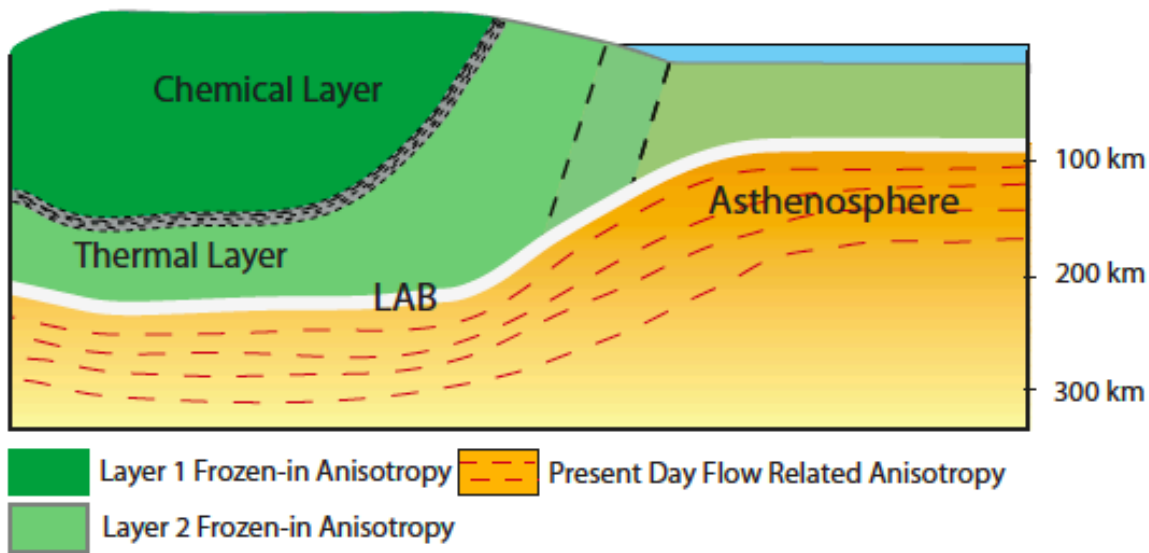
L'épaisseur de la couche thermique augmente avec celle de la couche chimique
 Rapport des épaisseurs tend vers 1

Une racine cratonique épaisse réduit la convection secondaire sous la lithosphère

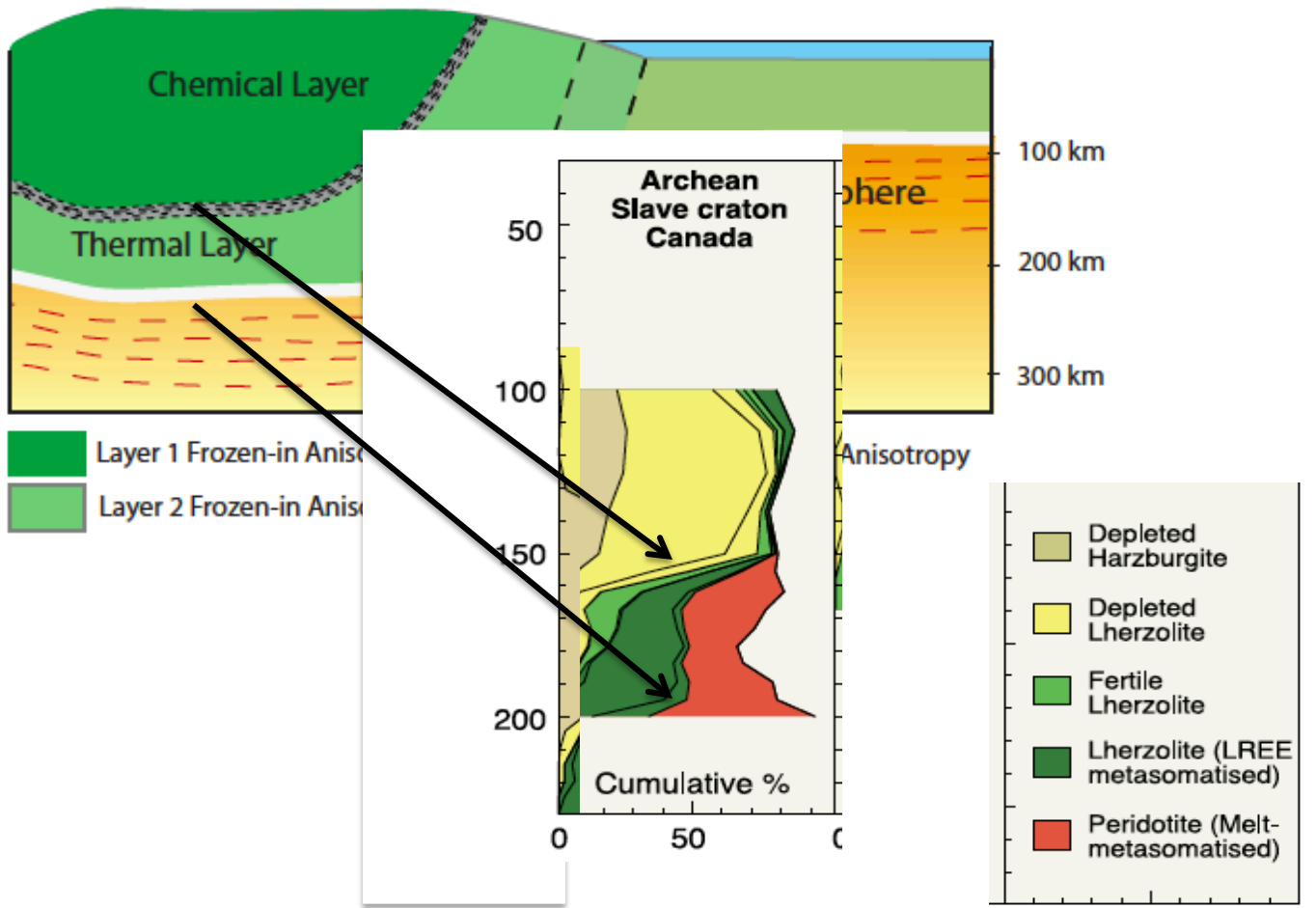


Modélisation géodynamique:
 Estimation de l'épaisseur de la
 couche thermique
 En partant d'une lithosphère "chimique"
 d'épaisseur donnée





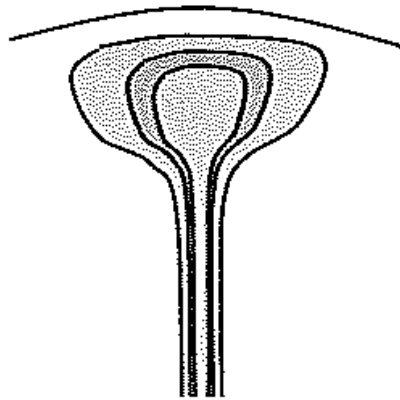
Azimuthal anisotropy
North American continent



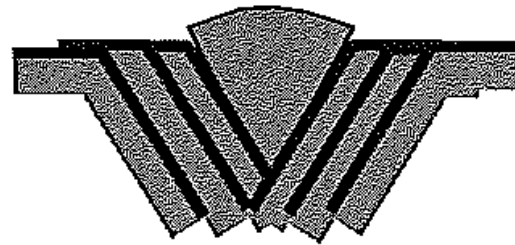
O' Reilly, 2001

Modèles proposés pour la formation de la lithosphère cratonique

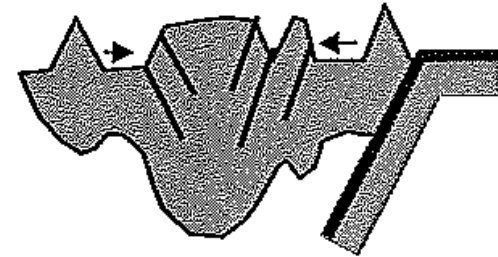
1- Grand panache



2- Empilement de plaques océaniques



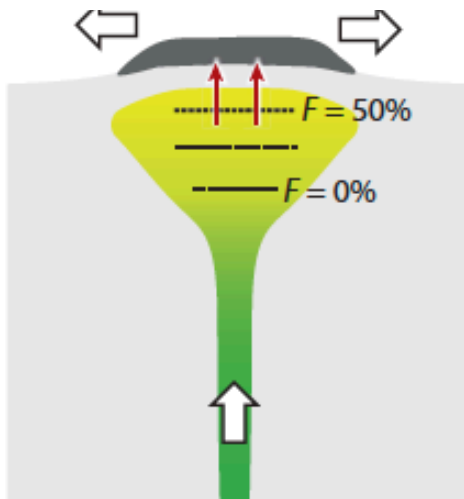
3- Accrétion dans un arrière-arc volcanique (subduction)



1- Modèle de panache

-> *Avantages:*

- 1) Fusion partielle à haute température->
 - Grande quantité de fusion,
 - Résidu très apauvri, deshydraté, de forte viscosité
 - Formation d'une couche limite chimique de densité plus faible
- 2) Formation de cratons serait alors épisodique en accord avec la distribution des âges dans les cratons
- 3) Stratification en profondeur: plus apauvri près de la surface qu'en profondeur



Li et al, 2011




- Komatiite ou basalte
- Péridotite apauvrie

-> *Inconvénients:*

- 1) Tous les cratons ne sont pas stratifiés chimiquement
- 2) On devrait avoir beaucoup de fusion partielle à 200 km, mais les températures de fusion de 1700°C enregistrées sembleraient le contredire

Imbrication successive de croûte et lithosphère océanique



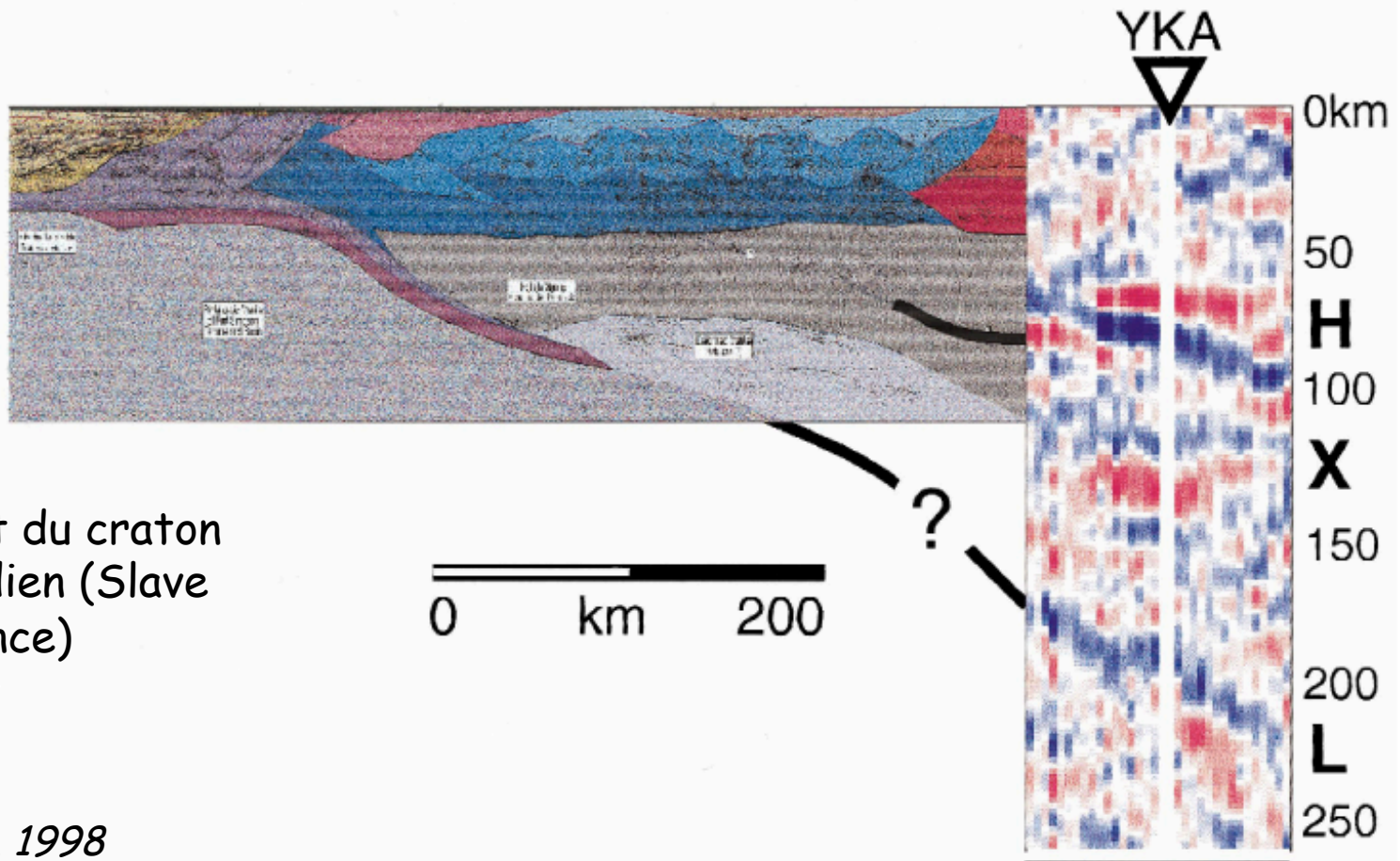
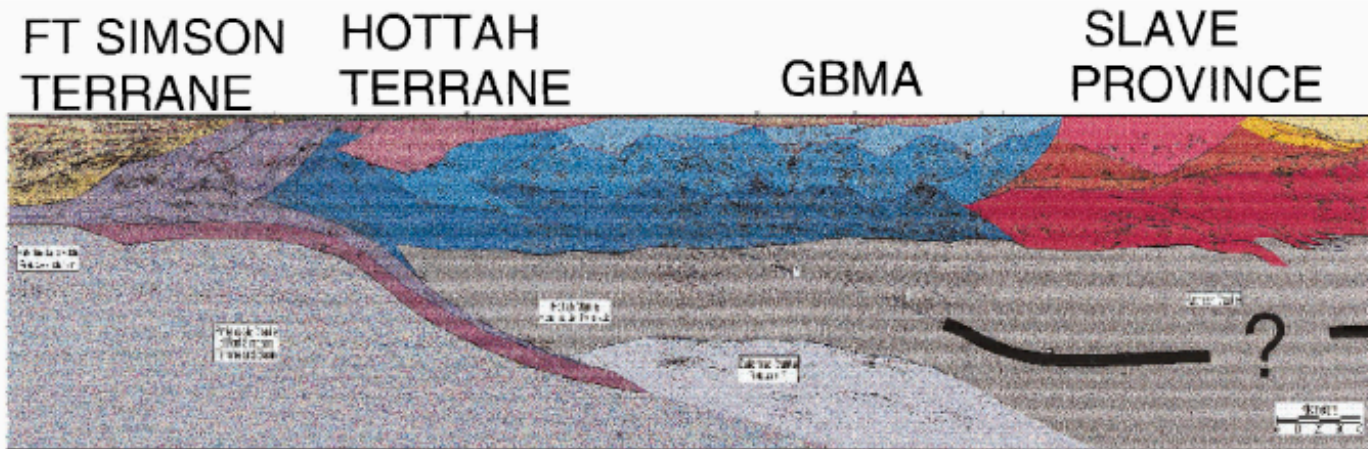
-  Komatiite ou basalte
-  Péridotite apauvrie
-  Croûte felsique (riche en Si)

-> *Avantages:*

- > Peut expliquer certaines roches cratoniques formées à basse T et P
- > Peut expliquer la présence d'interfaces inclinés dans la lithosphère continentale

-> *Inconvénients:*

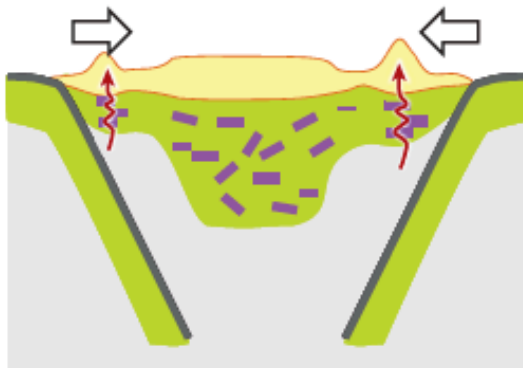
- La lithosphère océanique devrait être plus épaisse et moins dense qu'actuellement
Pas d'évidence pour des zones de faible résistance
 - > Plus plausible à l'époque protérozoïque que dans l'archéen
- Le modèle prédit plus d'éclogite que l'on n'en observe



Ouest du craton
Canadien (Slave
Province)

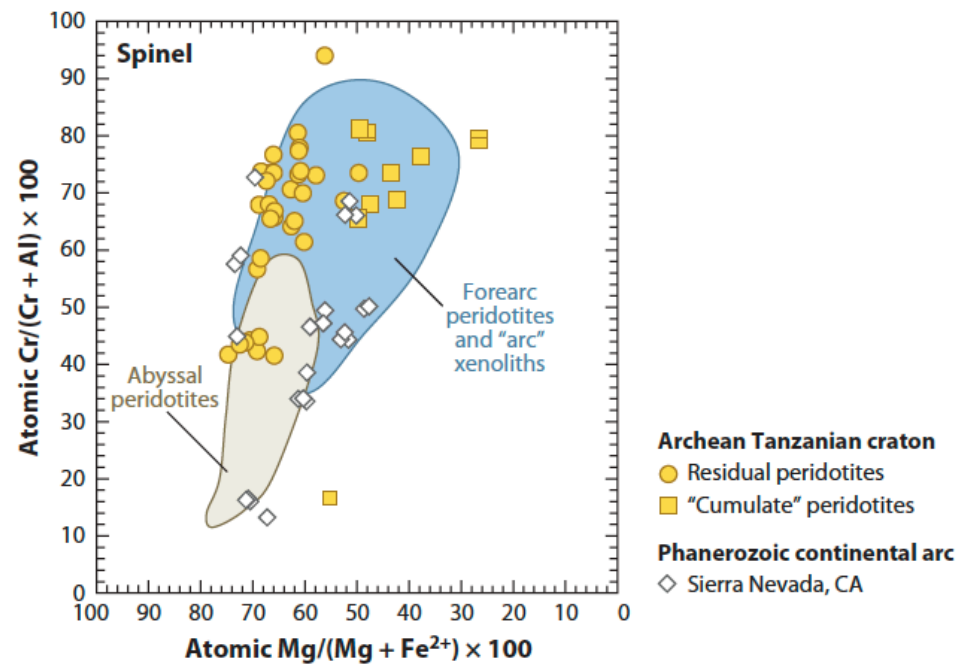
Bostock, 1998

Accrétion dans un arc et épaissement par compression (orogénie)



- Komatiite ou basalte
- Péridotite apauvrie
- Croûte felsique (riche en Si)
- Pyroxenites (pauvres en Si, riches en MgO)

-> Similarités entre les roches d'arcs modernes continentaux et celles des xénolithes de la vieille lithosphère continentale



Lequel de ces modèles permet d'expliquer l'anisotropie observée dans la lithosphère continentale (en particulier en Amérique du Nord)?

