# Le rifting continental en Afrique de l'Est: contraintes des données géodésiques

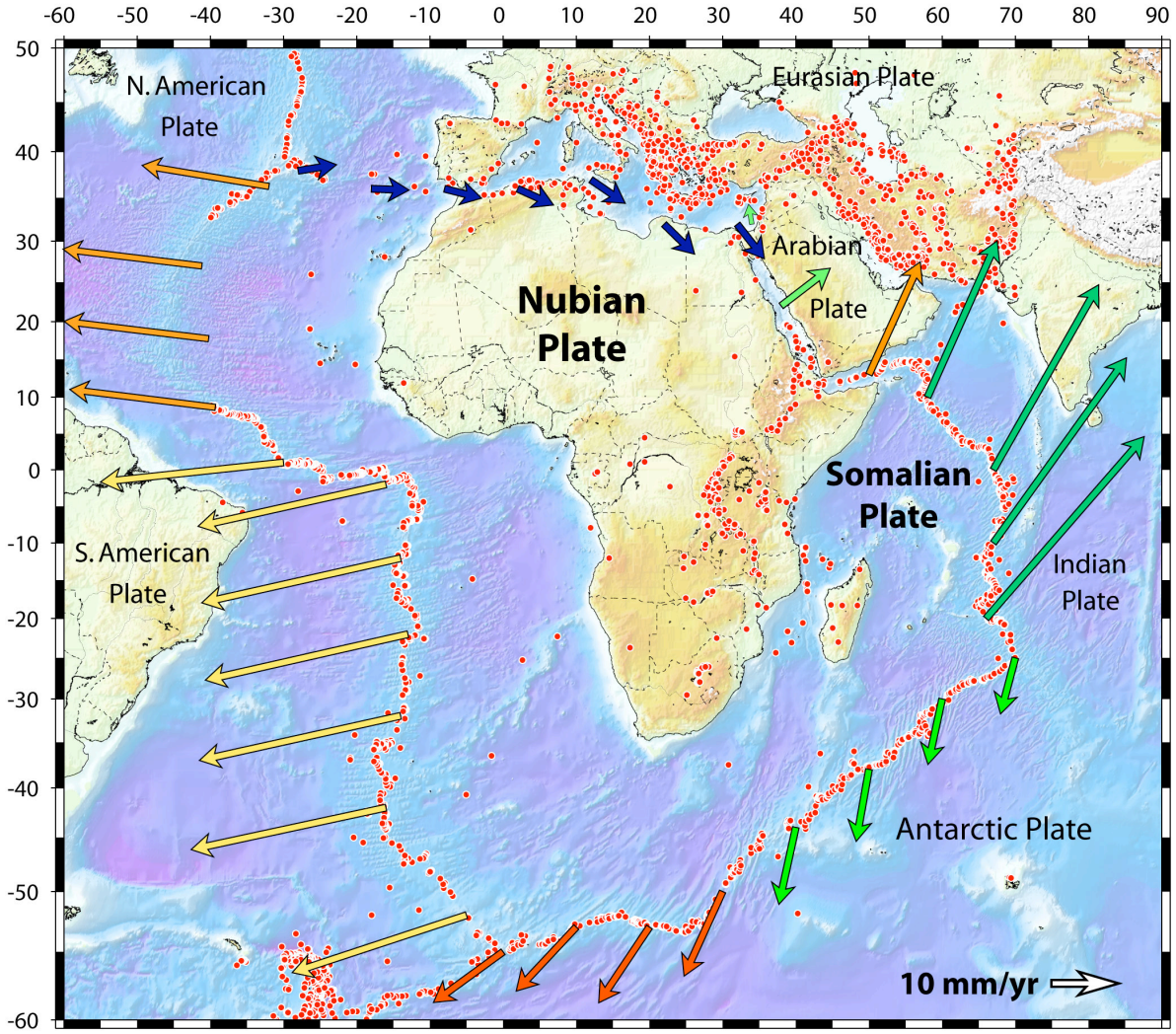
Eric Calais, Sarah Stamps, Laura Bennati, Lucy Flesch *(Purdue University, IN, USA)*
Elifuraha Saria *(Ardhi University,Dar Es Salaam, Tanzania)*
Elias Lewi, Atalaye Ayele *(Geophysical Observatory, University of Addis Ababa, Ethiopia)*
Timothy Wright, Ian Hamling *(University of Leeds, UK)*
Nicolas d'Oreye *(Natural History Museum, Luxembourg)*
Julie Albaric, J. Déverchère, J. Perrot, A. Deschamps *(Univ. Brest, IUEM, France)*
Cindy Ebinger *(University of Rochester, NY, USA)*
Roger Buck, S. Nooner *(Lamont-Doherty Geophysical Observatory, Palisades, NY)*
Chris Hartnady *(UMVOTO (Pty) Ltd, South Africa)*

# L'Afrique et le Rift Est Africain

- Une large masse continentale séparée entre plaques Nubienne et Somalienne

- Le rift est africain = 5000 km de frontière de plaque entre Nubie et Somalie
  - Sismicité modérée, qqs M>7
  - Coïncide avec une région de topo élevée (> 1000 m)
  - Cinématique actuelle très mal connue

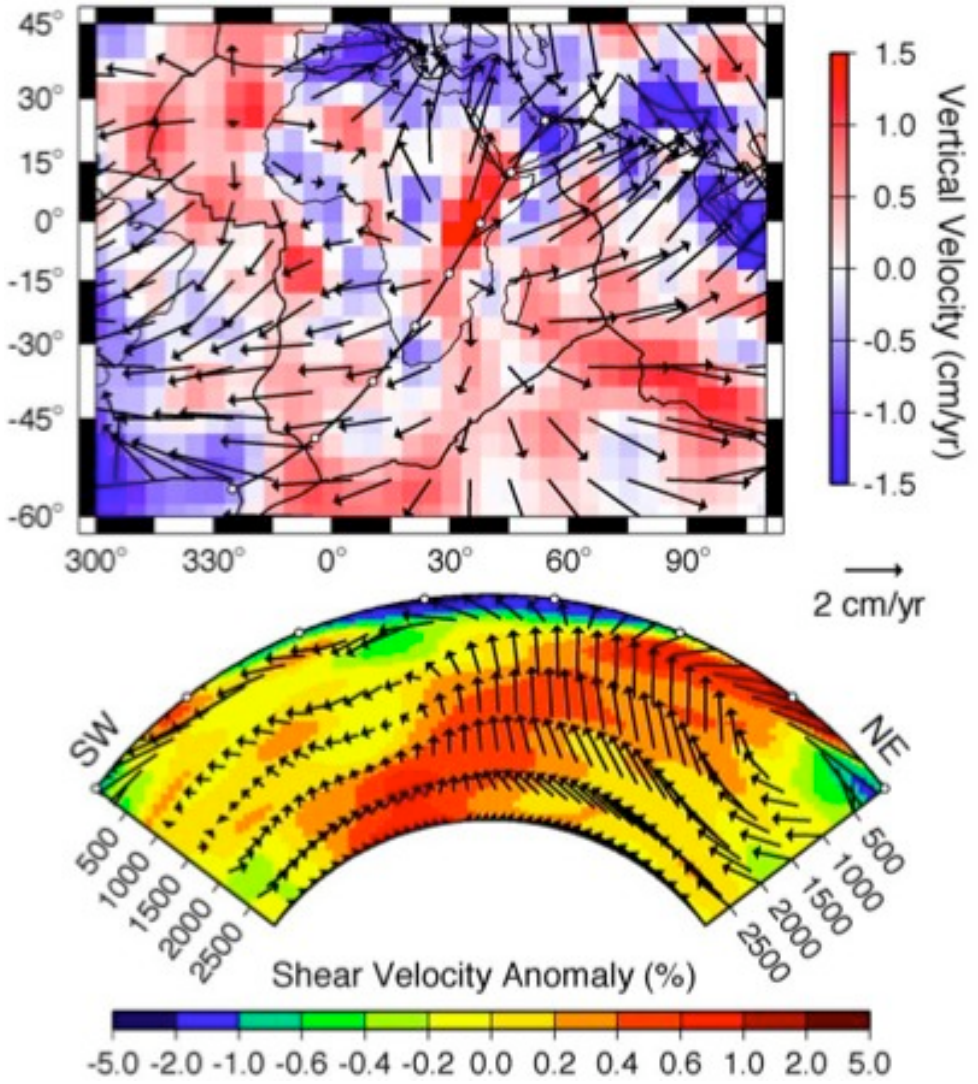
- Afrique bordée de rides M.O. => contraintes intraplaques dominées par:
  - Gradients latéraux d'énergie potentielle
  - Tractions du manteau à la base de la lithosphère




Vitesses actuelles des plaques par rapport à la Nubie

# Rôle des tractions du manteau?

- Le REA coïncide avec le sommet du “Superplume Africain”:
  - Anomalie positive de vitesses sismiques…
  - …associée à un un flux de matière divergent…
  - …cohérent avec les déplacements en surface…
- Problèmes:
  - Le superplume est-il réellement une anomalie de densite >0 – anomalie de composition?
  - Flux de matière pas nécessairement couplé à la lithosphère?




Behn et al., 2004; Ritsema et al., 1999

# Rôle des forces de volumes dans la lithosphère?

- Coblenz and Sandiford (1994): les forces de volumes dans le continent africain génèrent des contraintes extensives dans le REA => expliquerait la rupture continentale?
- Davis and Slack (2002): surrection en Afrique de l'est et sud (=> contraintes extensives) + érosion thermique du manteau lithosphérique dans le REA (par convection petite échelle) = rupture continentale
- Problèmes: et les rifts cratoniques "froids"?

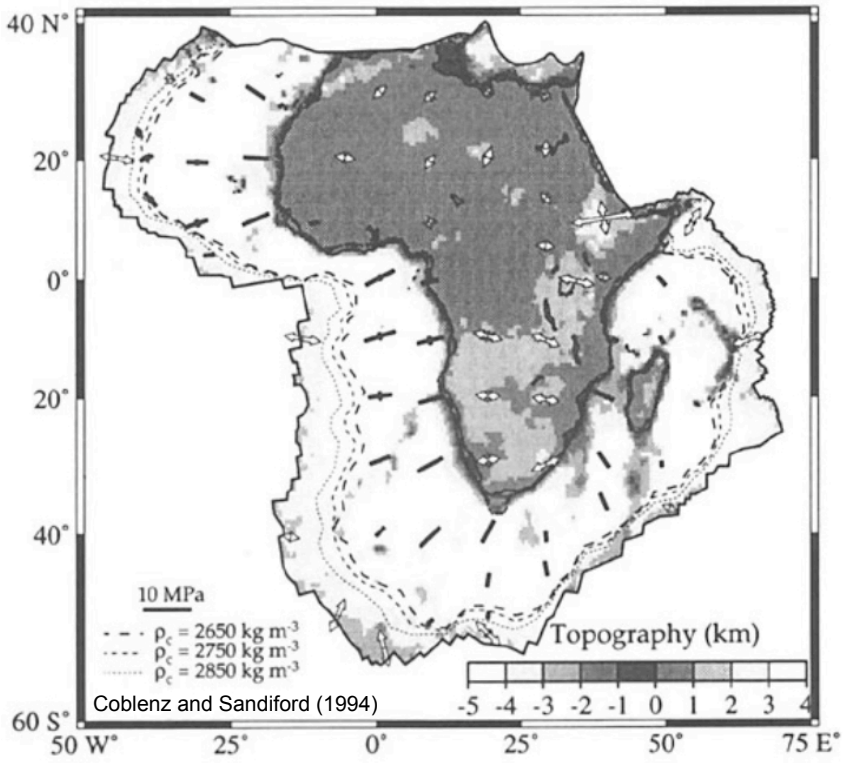
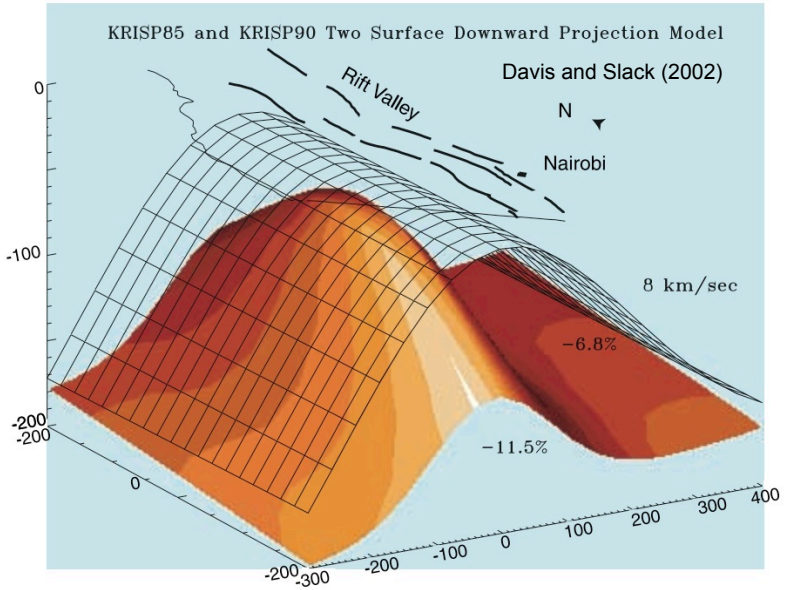
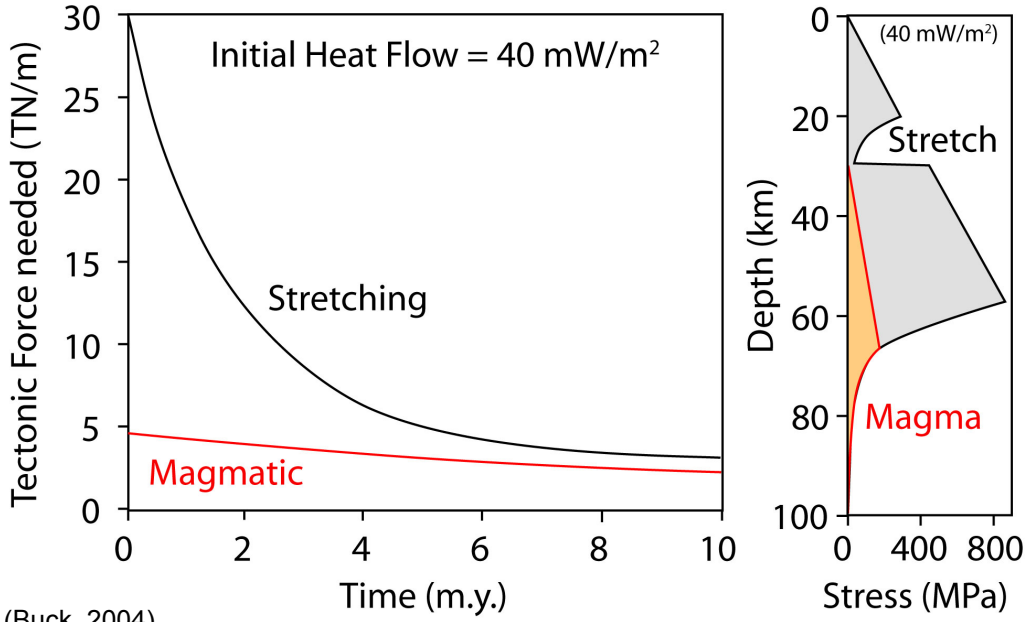



**Figure 3. Predicted tectonic stresses for African plate at selected element locations. Solid bars indicate compression; open arrows indicate tension.**

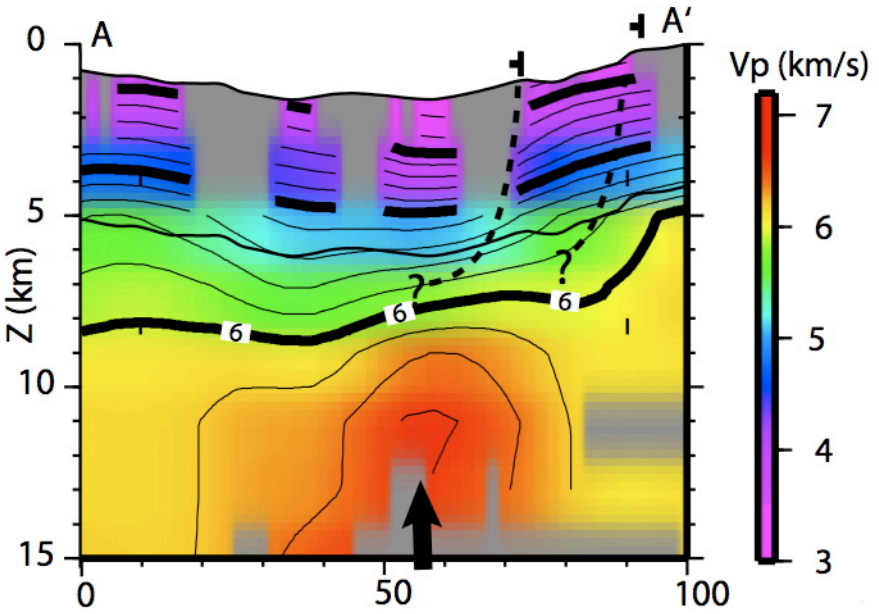


# Rôle du magma?

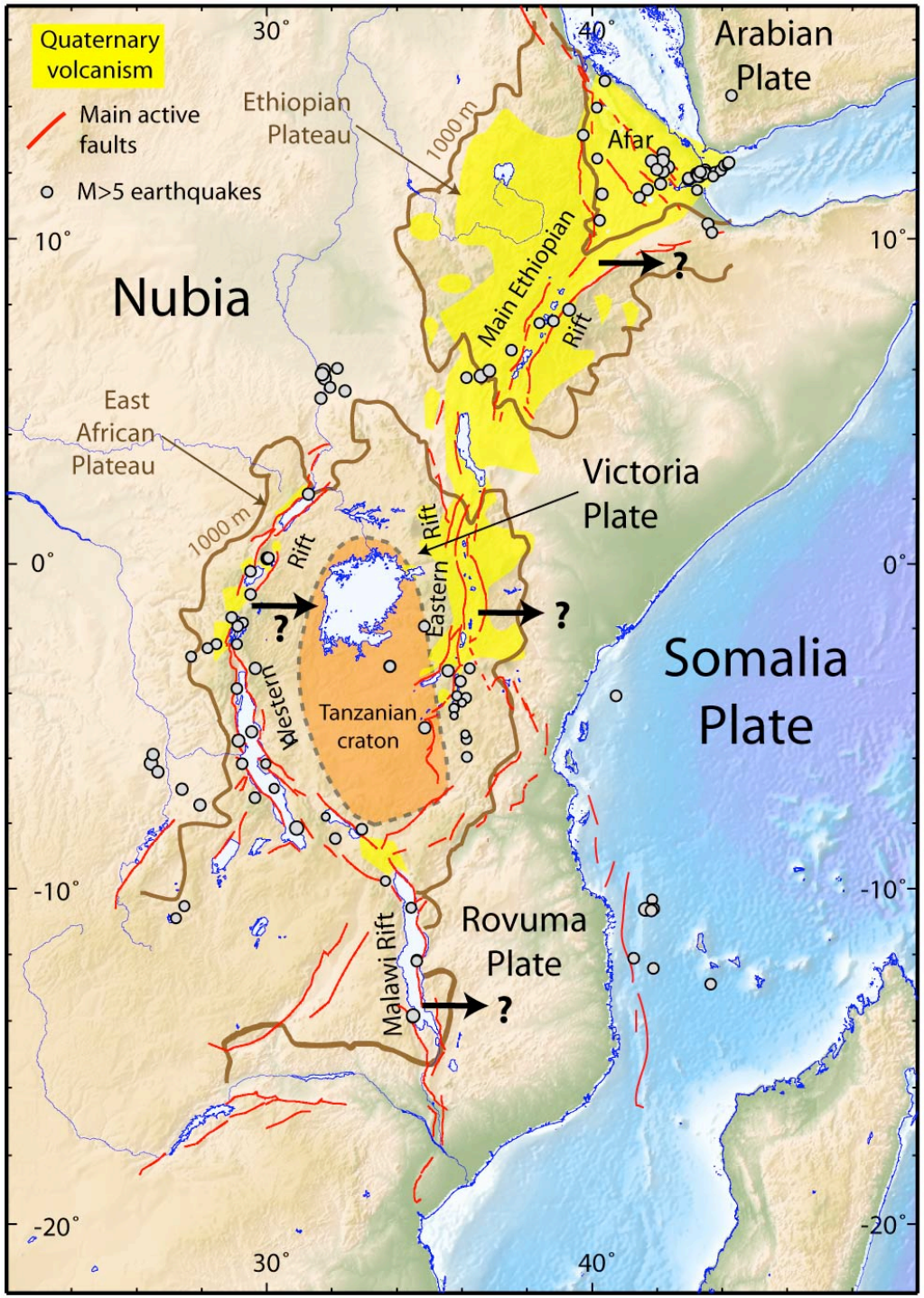
- Buck (2004): si un apport continu de magma est disponible, la rupture de la lithosphère peut se faire à un niveau de contrainte réduit.
- Rift Est Africain:
  - Tomo sismique => conditions de fusion partielle présentes dans certains segments (e.g. Keranen et al. 2006)
  - Anisotropie sismique => en accord avec des “lentilles” de fusion partielle (e.g. Kendall et al., 2006)
  - Événement intrusif récent dans le bassin Natron (Calais et al., 2008)
- Problèmes:
  - Nécessite du magmatisme continu et en large volume
  - Implique une résistance mécanique très faible dans la croute sup: M7?
  - Tous les segments ne sont pas magmatiques?




(Buck, 2004)




Keranen et al., 2006: Mafic intrusions in the crust in northern MER



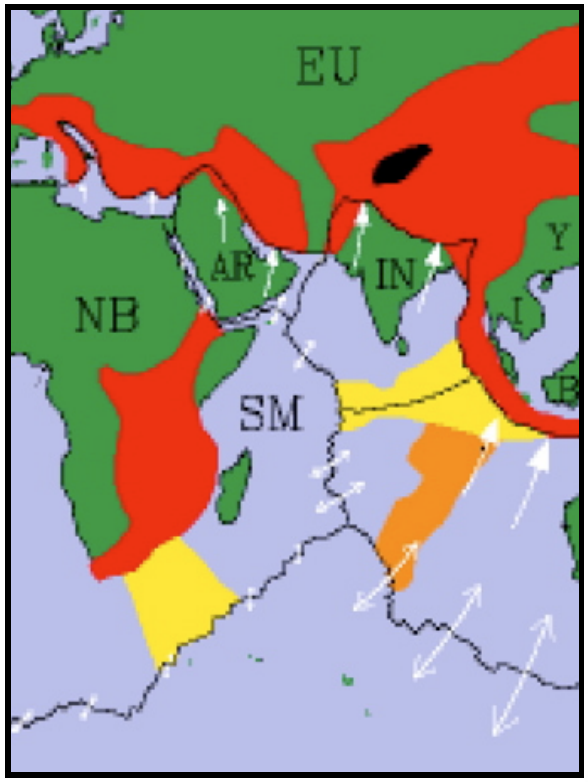

## Le Rift Est Africain:

- 5000 km de frontière de plaque divergente entre Nubie et Somalie
- Des hauts plateaux et des bassins allongés formant 4 branches principales
- Des basins bordes par des failles actives sismogéniques (moins dans la branche est)
- Importantes quantités de volcanisme Q (moins dans la branche ouest)
- Ouverture océanique en Afar → rifting naissant au Mozambique ⇒ un laboratoire naturel pour étudier la rupture continentale.

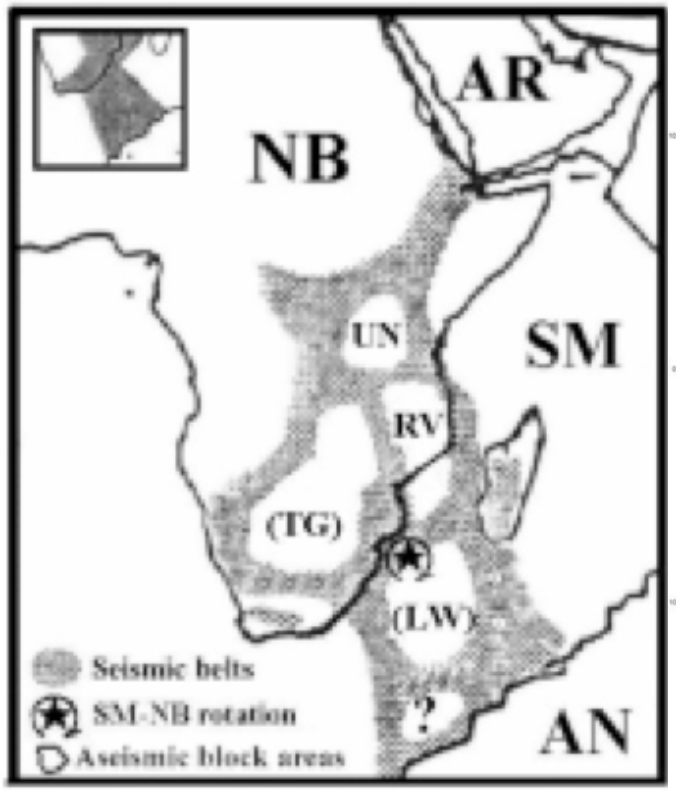
## Qqs questions ouvertes:

- Cinématique actuelle très mal connue: champ lointain (Nubie-Somalie), distribution spatiale de la déformation?
- Dynamique: comment/pourquoi la rupture continentale est-elle déclenchée et maintenue?

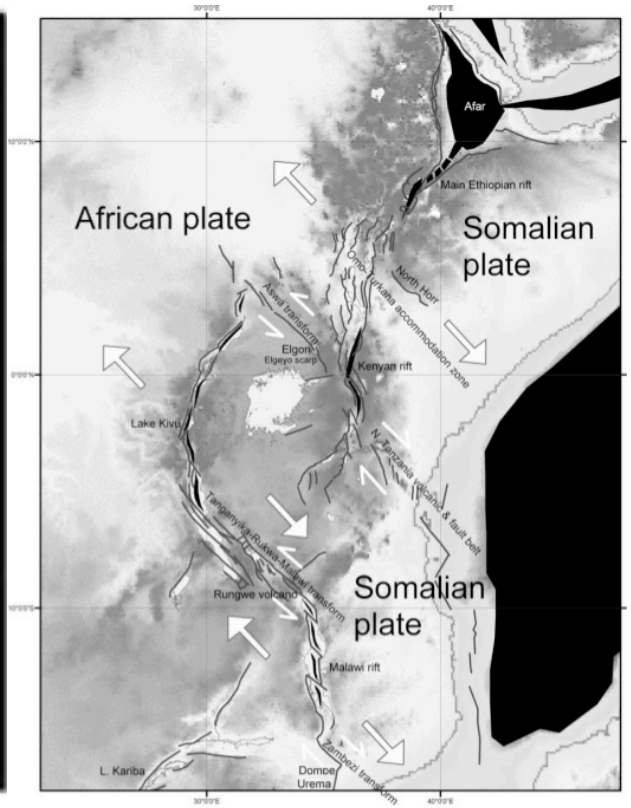
# Modèles cinématiques précédents




Gordon and Stein, 1991: une frontière de plaques diffuse



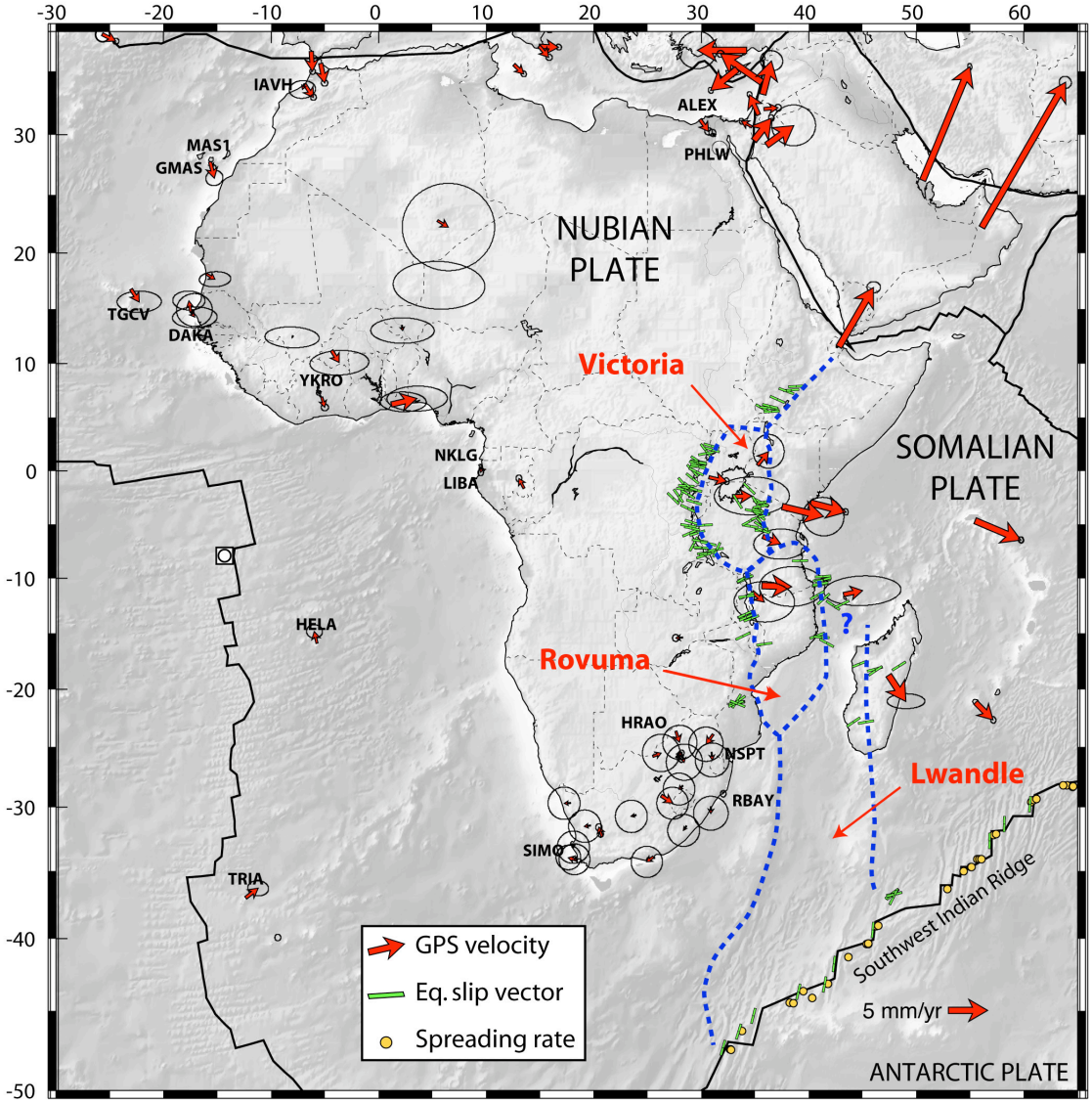

Hartnady, 2002: 4 micro-plaques à l'intérieur de la frontière Nubie-Somalie




Chorowicz, 2005: rifting oblique…

# Cinématique actuelle

- Données:
  - Vitesses GPS associées à une plaque (+ 12 vitesses GPS sur la plaque Antarctique)
  - Vecteur glissement des séismes, associés à une frontière de plaque
  - Direction des transformantes et taux d'ouverture le long de la ride SO indienne (moyenne sur 3.2 My)
- Modèle: rotations rigides, 5 plaques Nubie - Somalie - Victoria - Rovuma - Lwandle
- Estimation des vitesses angulaires des plaques par inversion jointe des vitesses GPS, vecteurs glissement, et données océaniques.



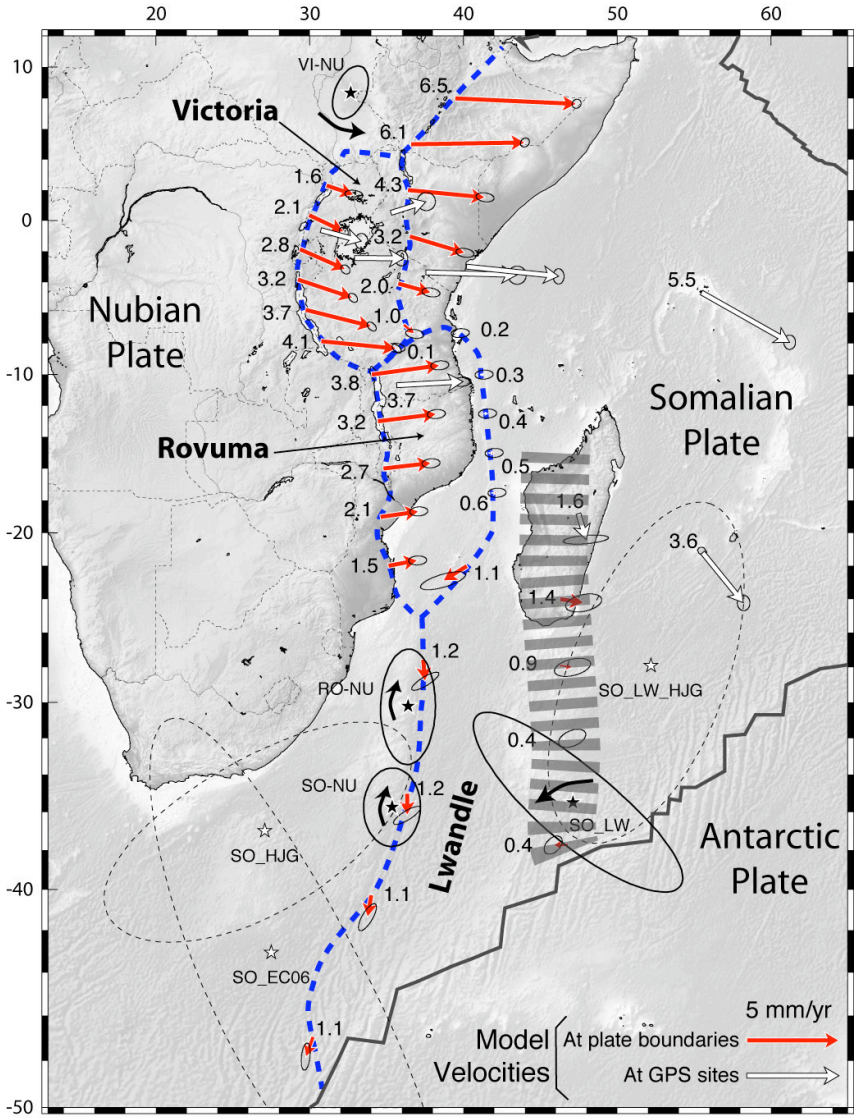
# Cinématique actuelle

- Modèle final: 3 plates dans le REA
  - Reduced chi2 = 1.4
  - GPS RMS = 0.8 mm/yr
  - ESV RMS = 14 degrees
  - Spreading rates RMS = 0.6 mm/yr

- Taux d'extension prédits augmentent du sud au nord jusqu'à ~6.5 mm/yr dans le nord de l'Ethiopie – qualitativement cohérent avec l'expression en surface des failles

- Direction d'extension ~E-W, varie un peu en fonction des plaques en jeu.

- ATTENTION: très peu de sites géodésiques…

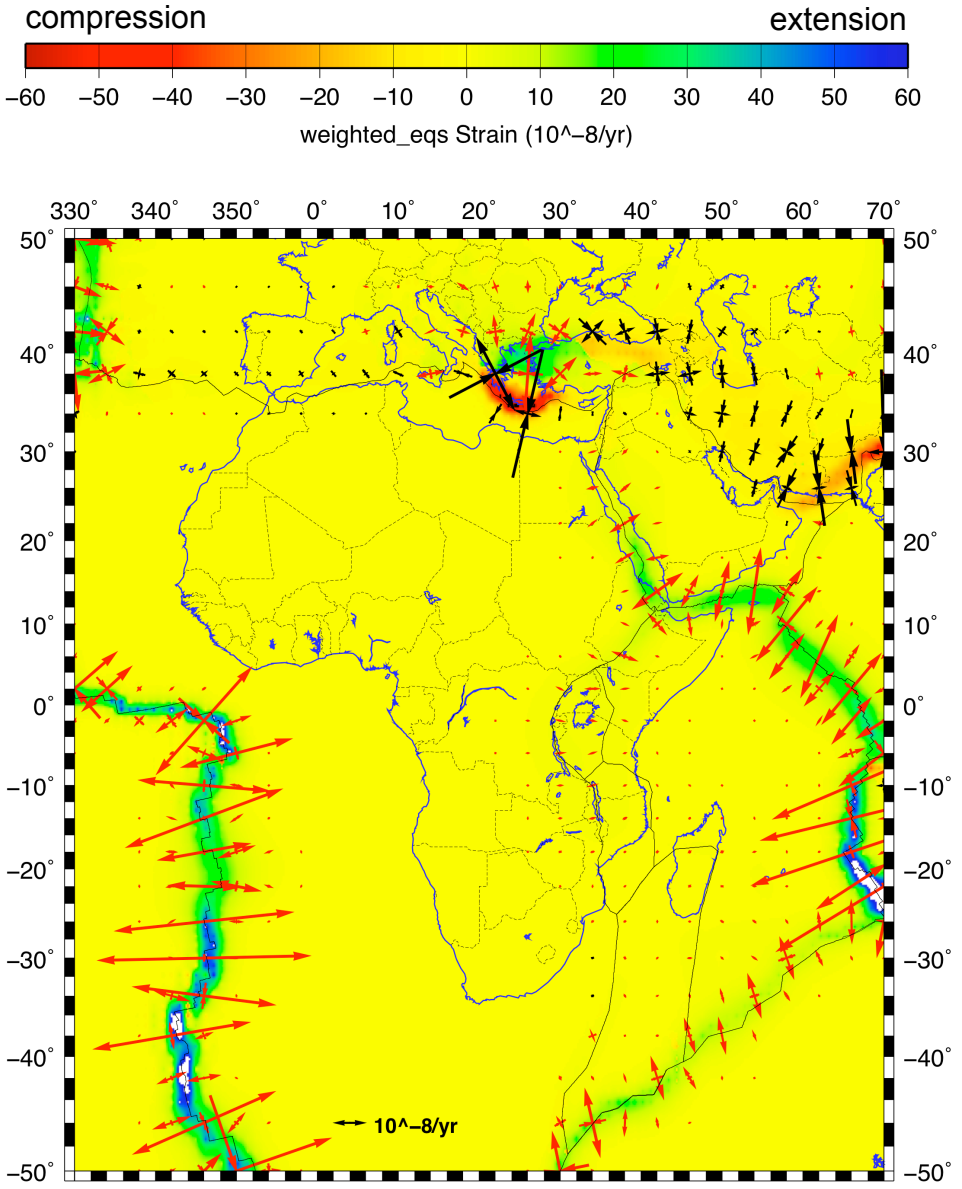



Stamps, D.S., et al. (2008), A kinematic model for the East African Rift, Geophys. Res. Lett., 35, L05304, doi:10.1029/ 2007GL032781.

# Taux de déformation

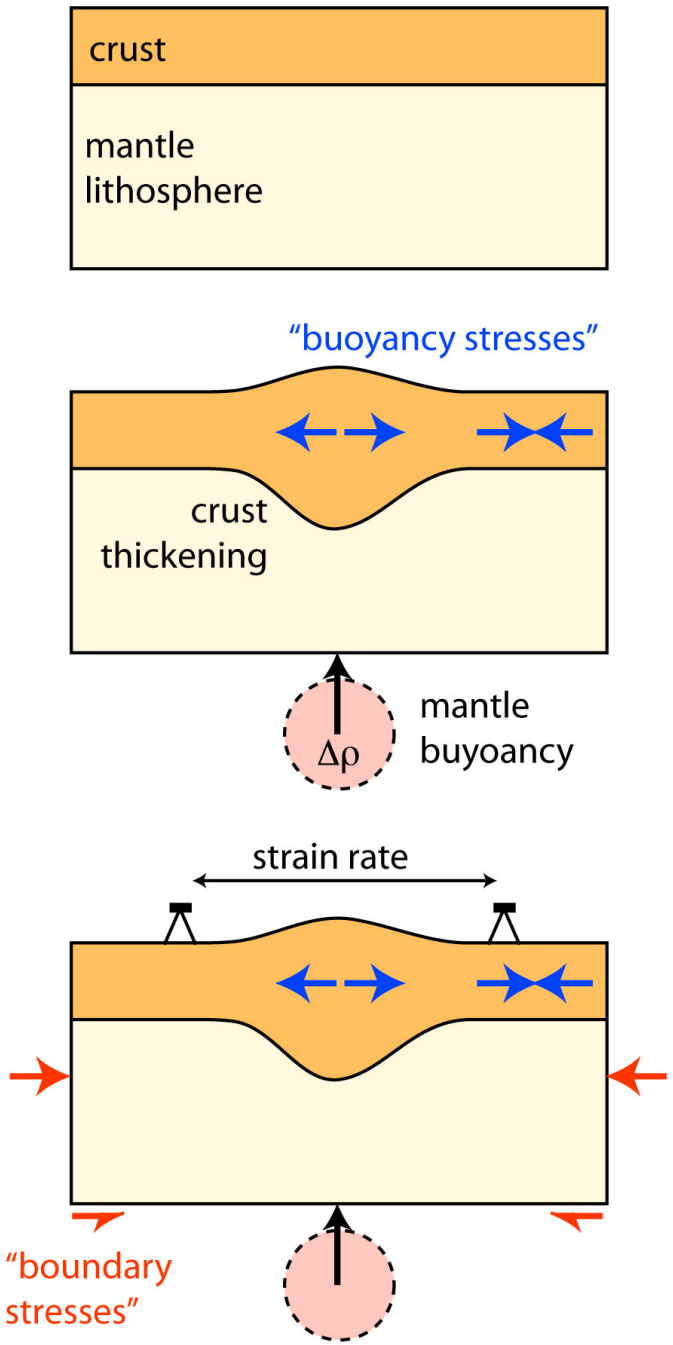
- Données:
  - Modèles cinématiques déduits de la géodésie (Stamps et al., 2008; Sella et al., 2002)
  - Vitesses GPS observées (Eurasie, Arabie, Anatolie)
  - Tenseur des moments sismiques du catalogue CMT (M>3.5)

- Résultats:
  - Déformation localisée
  - Faibles taux de déformation dans le REA
  - Taux de déformation importants le long des RMO et subductions

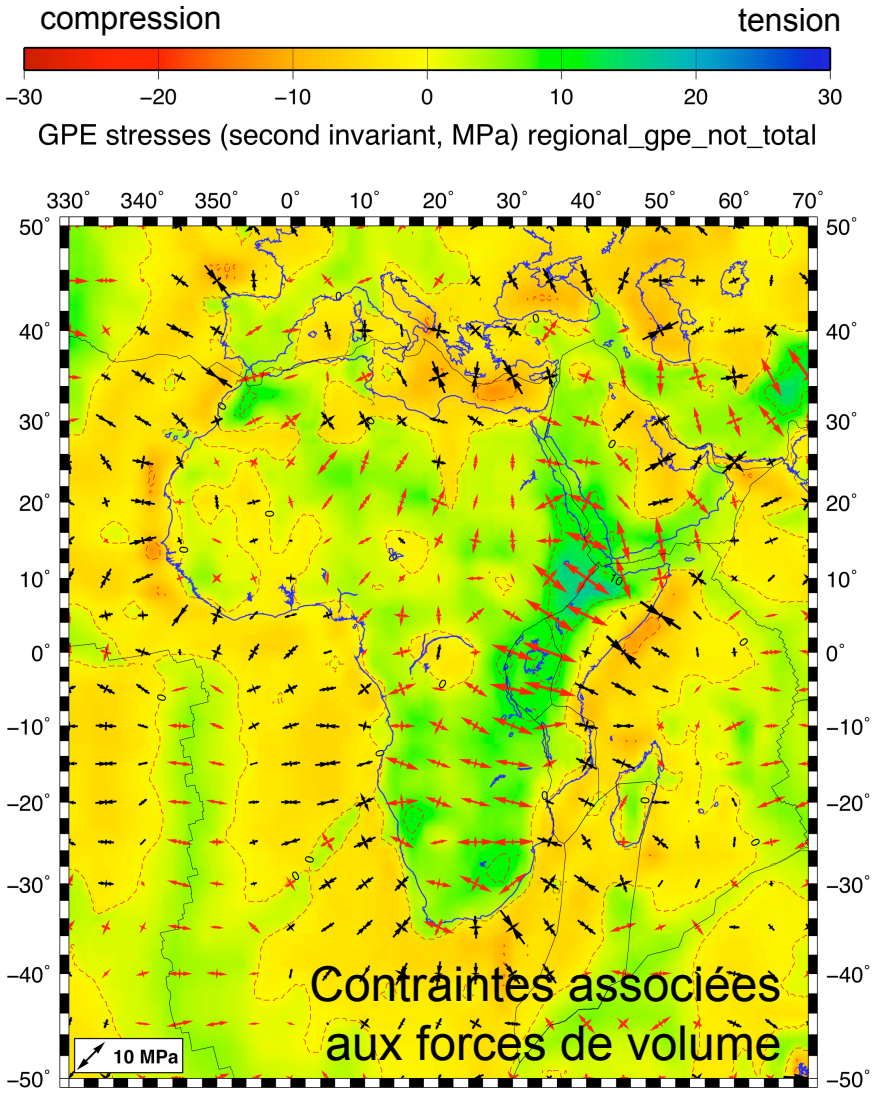


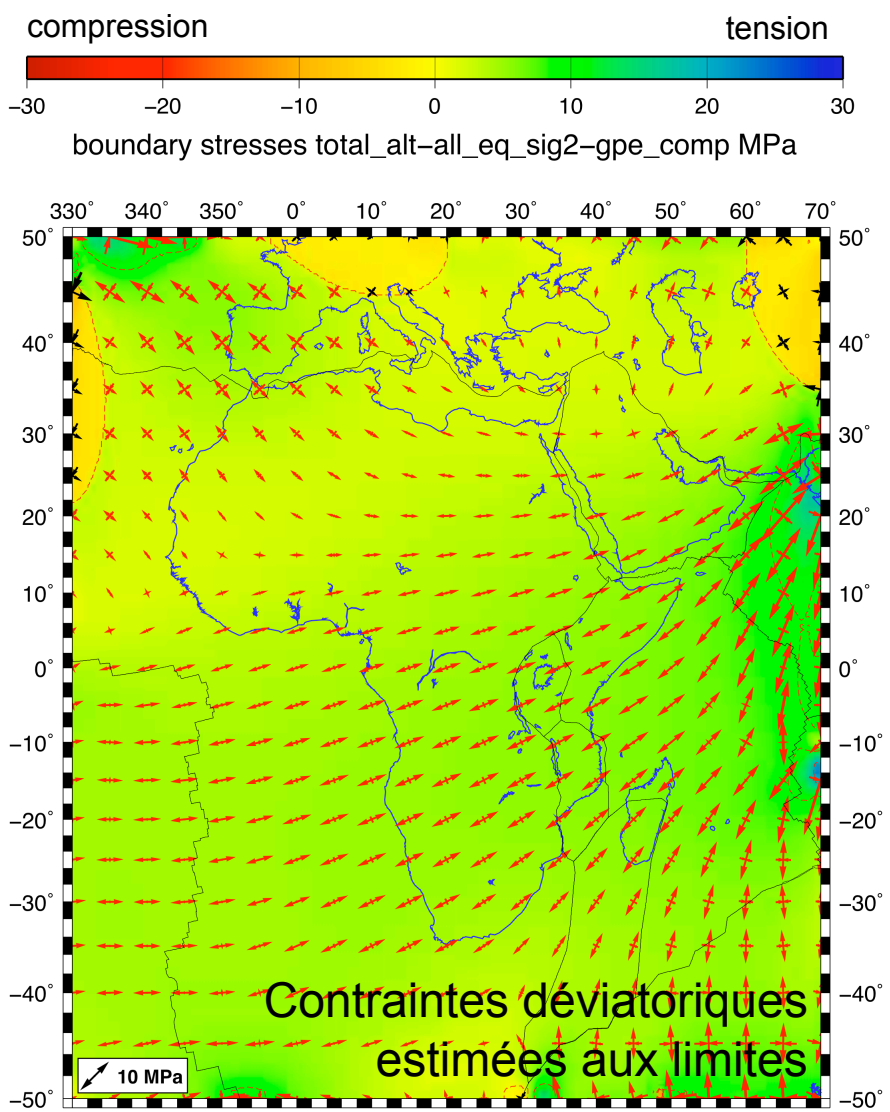
# Dynamique?

- Connu:
  - Forces de volume: résultent des gradients latéraux de densité.
  - Taux de déformation (en surface): GPS + séismes
- On estime les contraintes aux limites de telle sorte que les contraintes déviatoriques totales soient en accord (en style et direction) avec les taux de déformation observés (cf. Flesch et al., 2001)
- L'Afrique étant entourée de rides océaniques:
  - Rôle minimal des forces de traction sur les frontières latérales
  - Contraintes aux limites = devraient résulter essentiellement des tractions à la base de la lithosphère



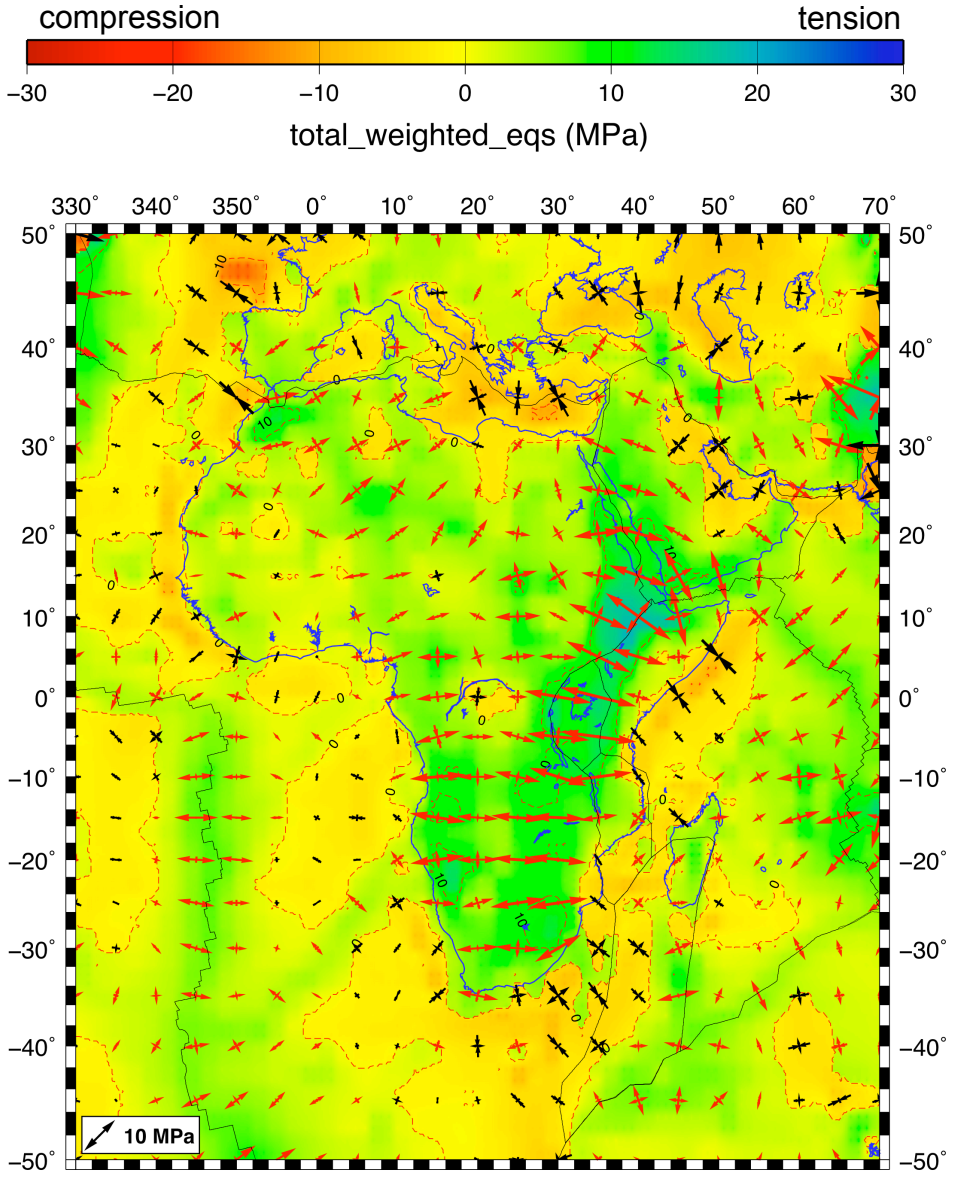
# Contraintes “de volume” et aux limites



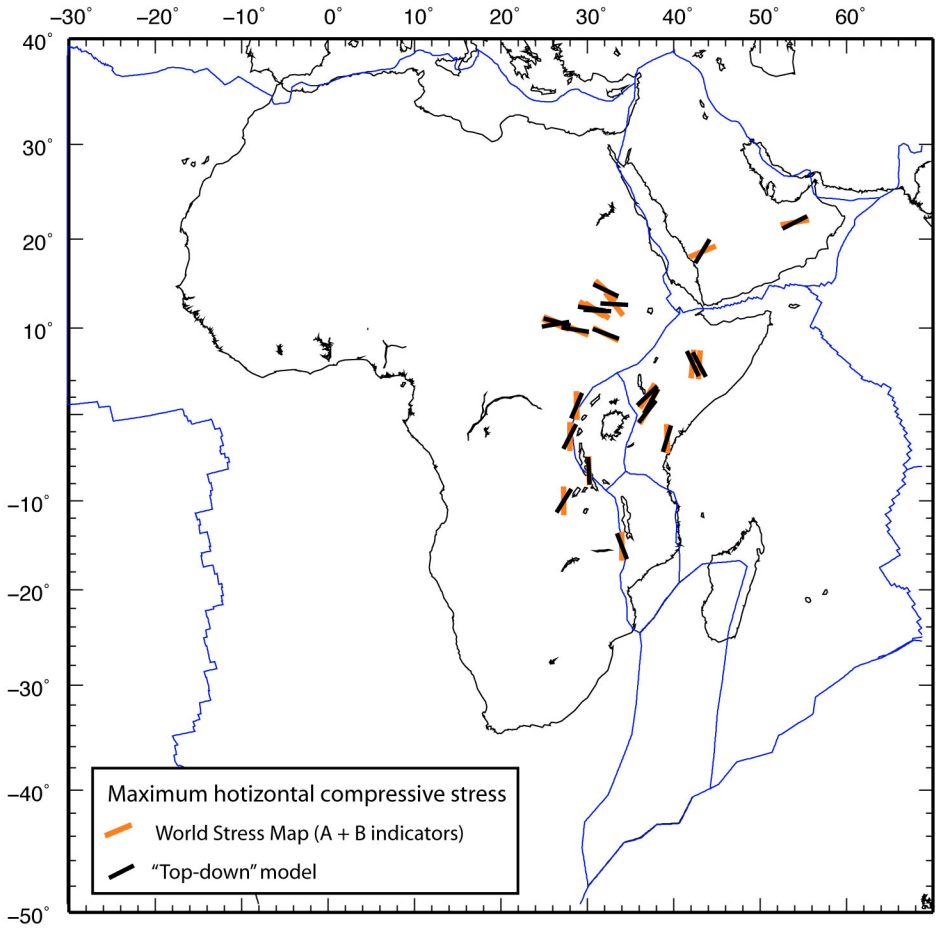



# Contraintes déviatoriques totales

- Magnitude jusqu'à ~15 MPa en Afrique de l'Est
- Tension E-W tension pour la plupart de l'Afrique, sauf petits bassins (Congo, Hoggar)
- Magnitudes les plus importantes dans le rift Ethiopien
- Les contraintes maximales sont corrélées avec la trace du REA, leurs magnitudes diminuent vers le sud.
- Les magnitudes des contraintes sont élevées hors du REA dans le sud de l'Afrique: explication de la sismicité hors-rift?



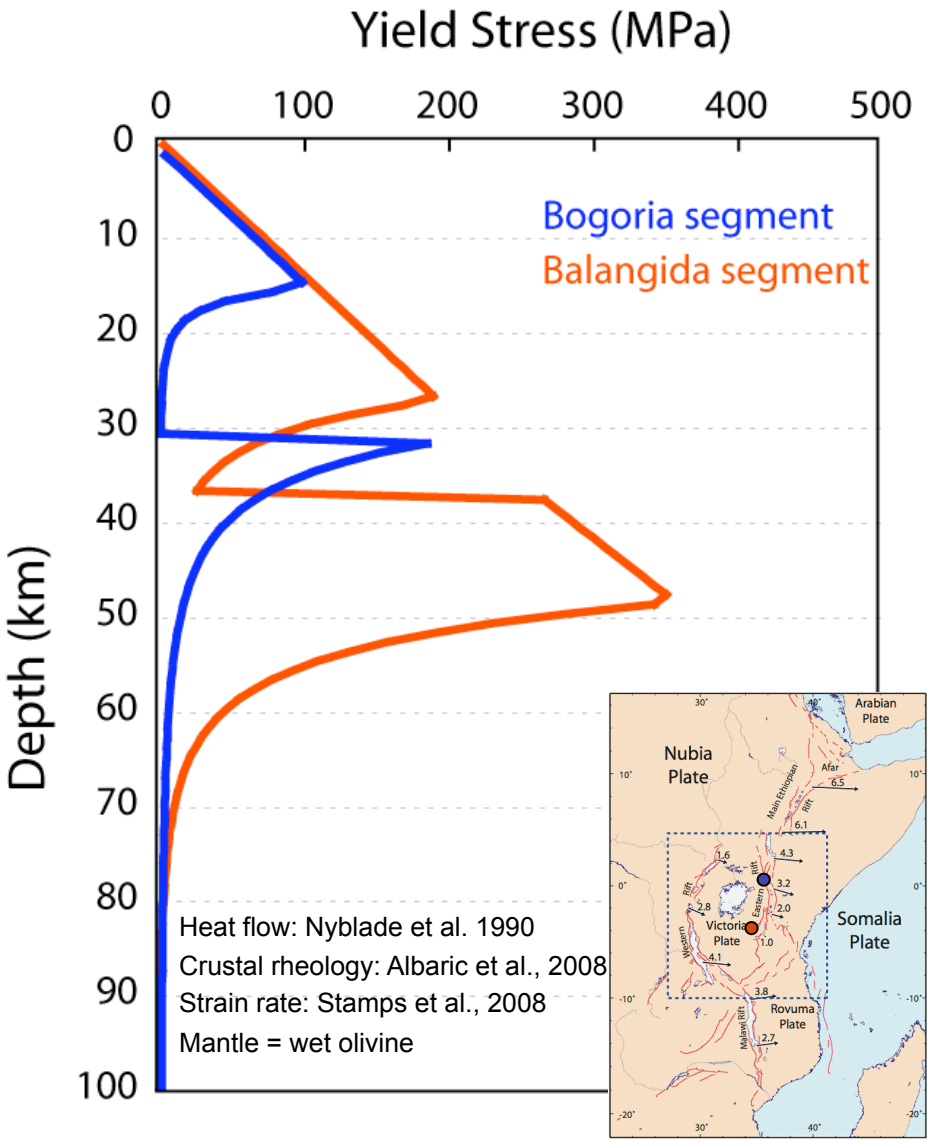
# Comparaison avec d'autres estimations des contraintes

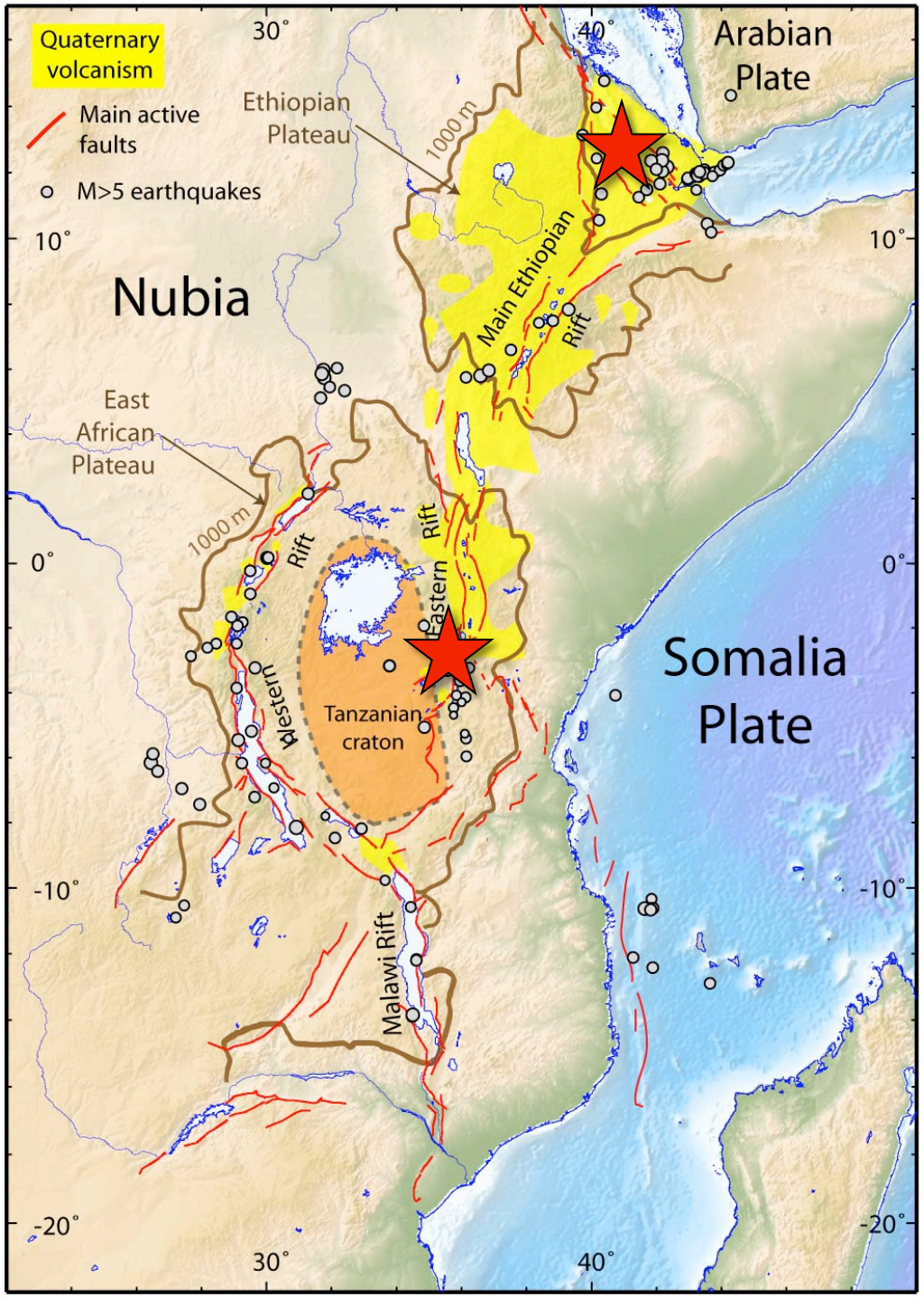



World stress map

# Résistance mécanique de la lithosphère?

- Contraintes totales ~15 MPa dans le REA
  - ~2.3 TN/m pour épaisseur 150 km
  - ~1.5 TN/m pour épaisseur 100 km
- Résistance mécanique intégrée:
  - Bogoria (chaud) ~4 TN/m
  - Balangida (froid) ~9 TN/m
- Forces de volume + traction à la base de la lithosphère:
  - Insuffisantes pour rompre une lithosphère froide (cratonique)
  - Suffisantes si le manteau lithosphérique a été érodé

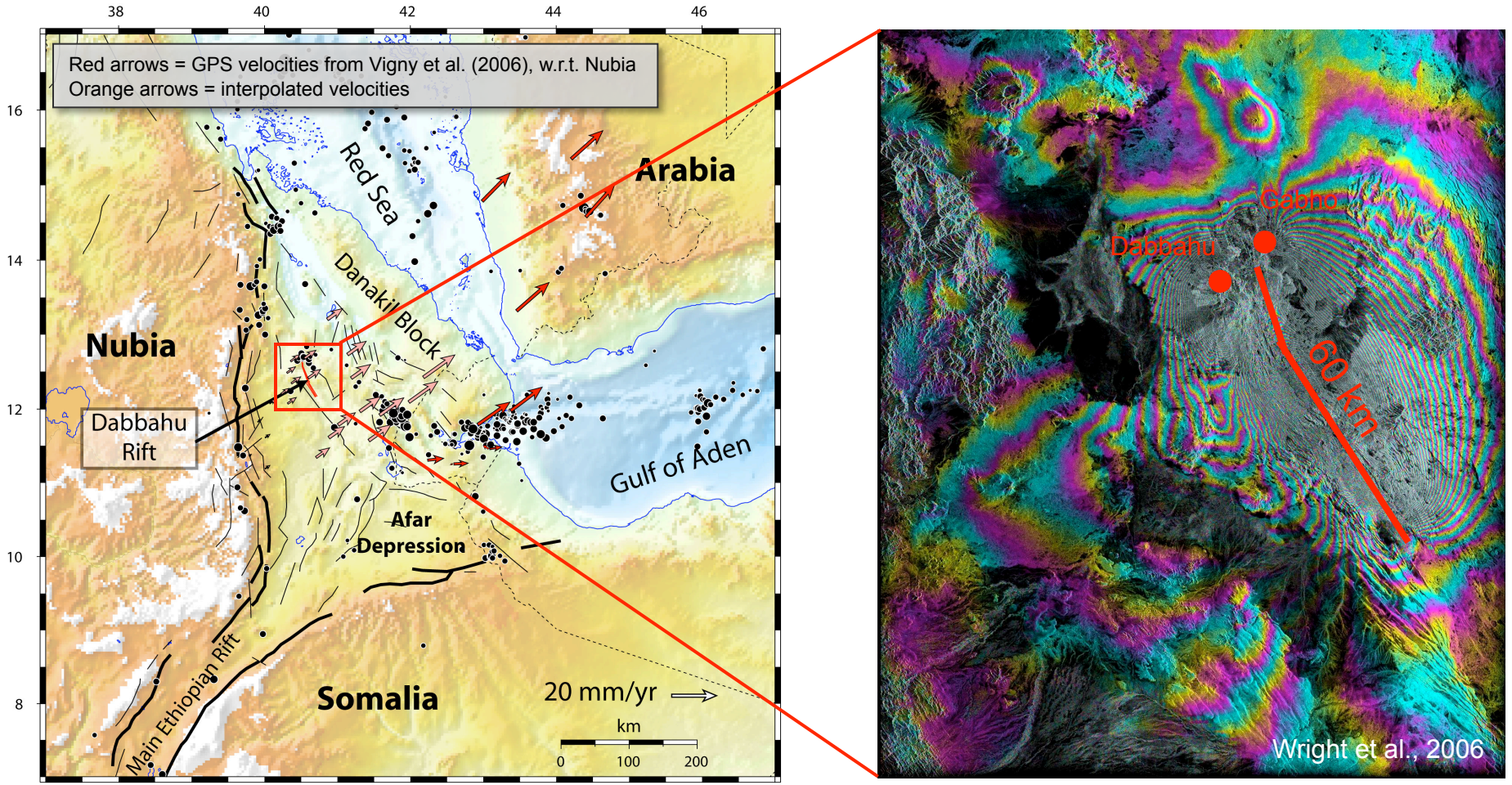



Quaternary volcanism
Main active faults
M>5 earthquakes
Ethiopian Plateau
1000 m
Arabian Plate
Nubia
Main Ethiopian Rift
East African Plateau
1000 m
Rift
Eastern Rift
Western Rift
Tanzanian craton
Somalia Plate
Malawi Rift
30°
40°
10°
0°
-10°
-20°

AFAR

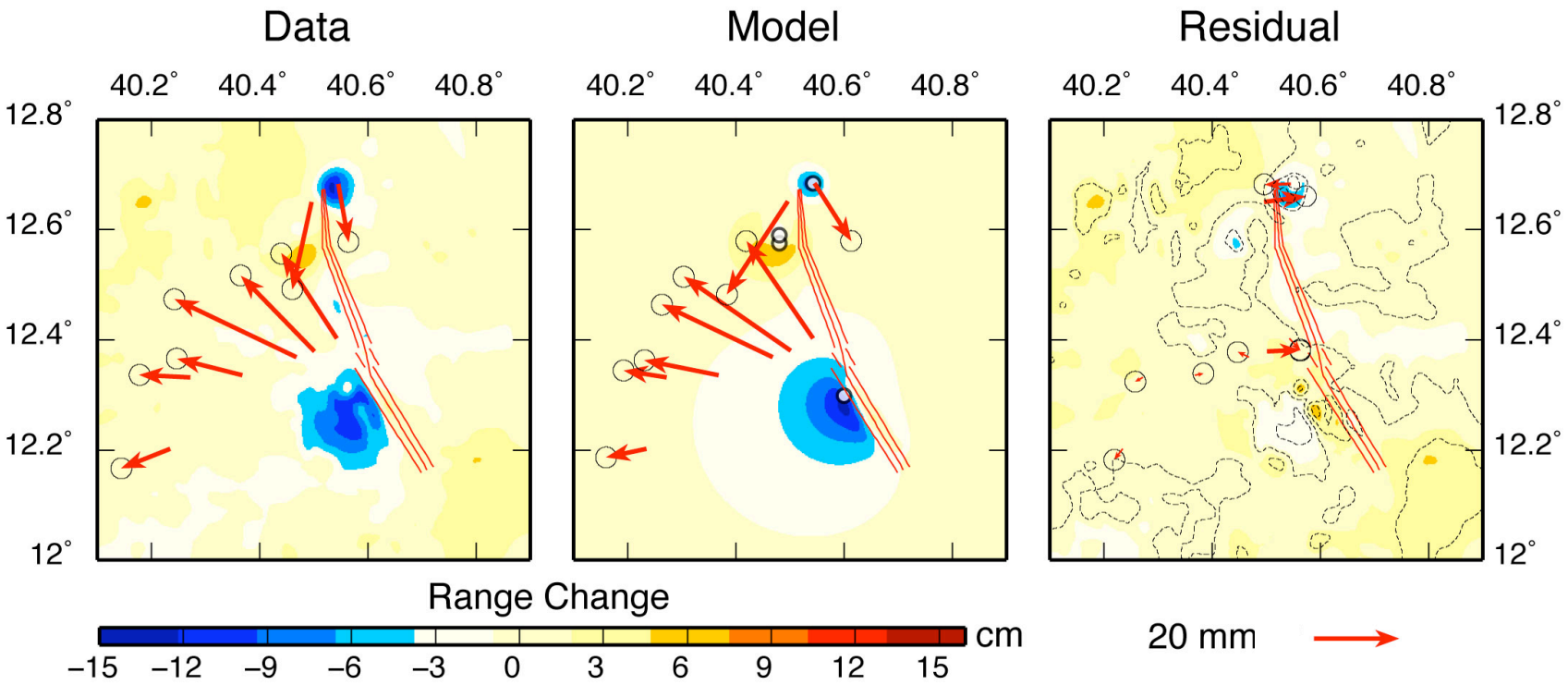
NATRON

# Une crise sismo-magmatique en Afar



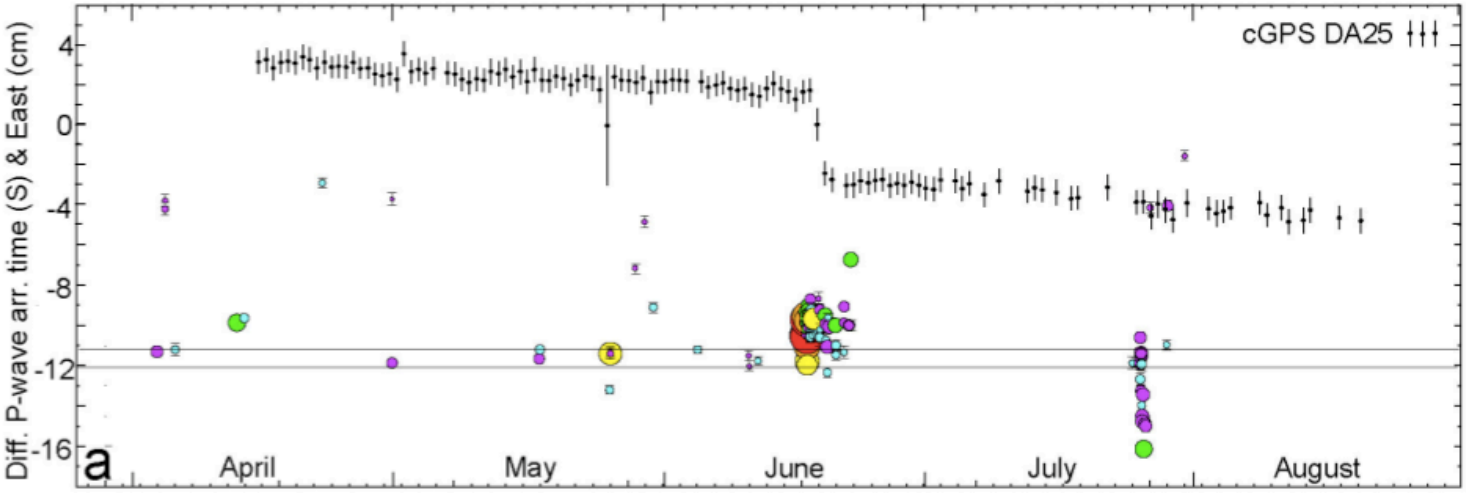

- Intrusion d'un dike de 60 km de longueur, ~10 km de profondeur, jusqu'à 8 m d'ouverture
  ⇒ Moment sismique libéré ~ 8% du moment (géodésique) total.
- Volume de l'intrusion ~2.5 $km^3$ -- 0.5 $km^3$ contribué par les volcans Dabbahu et Gabho
  ⇒ Origine du magma?

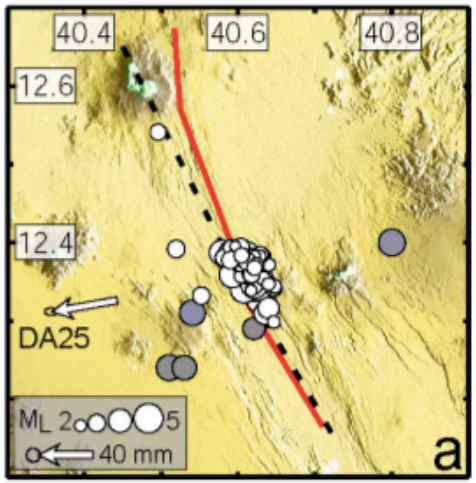
# 15 janvier –31 mars 2006

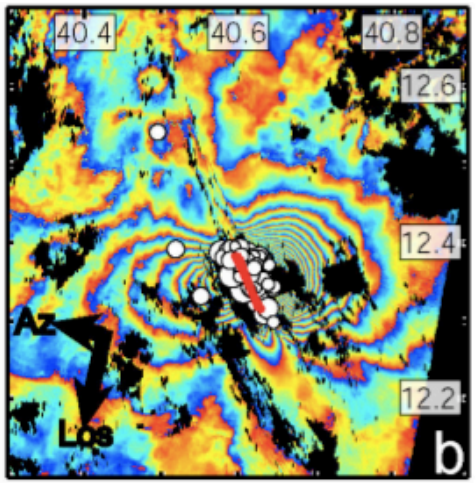


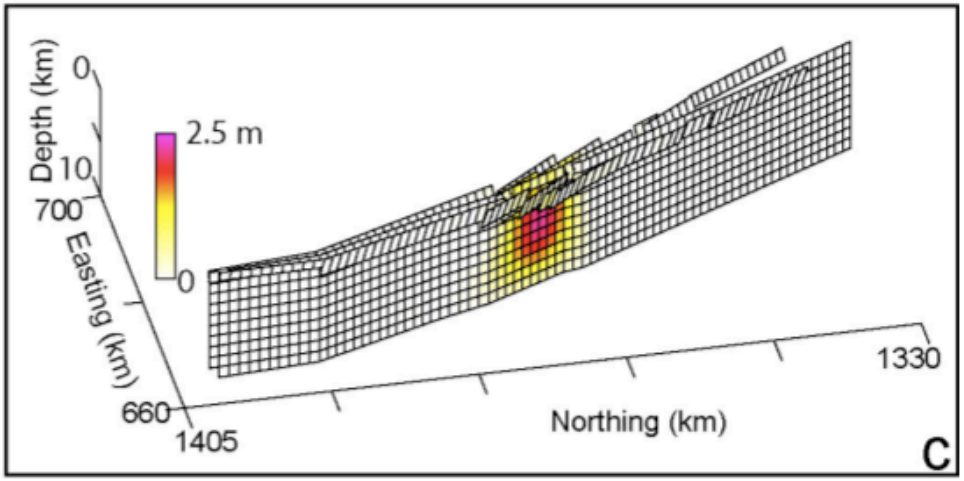

| Source | prof. (km) | ΔV (km³) |
|---|---|---|
| Ado_Ale | 11.0 | 0.048 |
| Gabho | 2.0 | 0.002 |
| Dabbahu_1 | 6.2 | -0.05 |
| Dabbahu_2 | 3.0 | 0.001 |

# L’intrusion de juin 2006



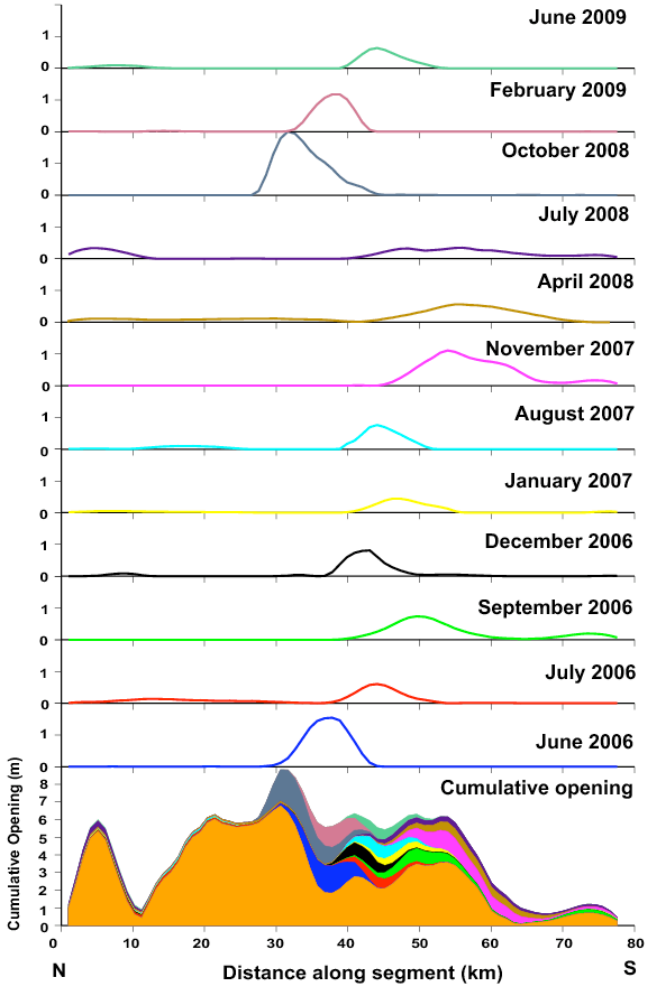



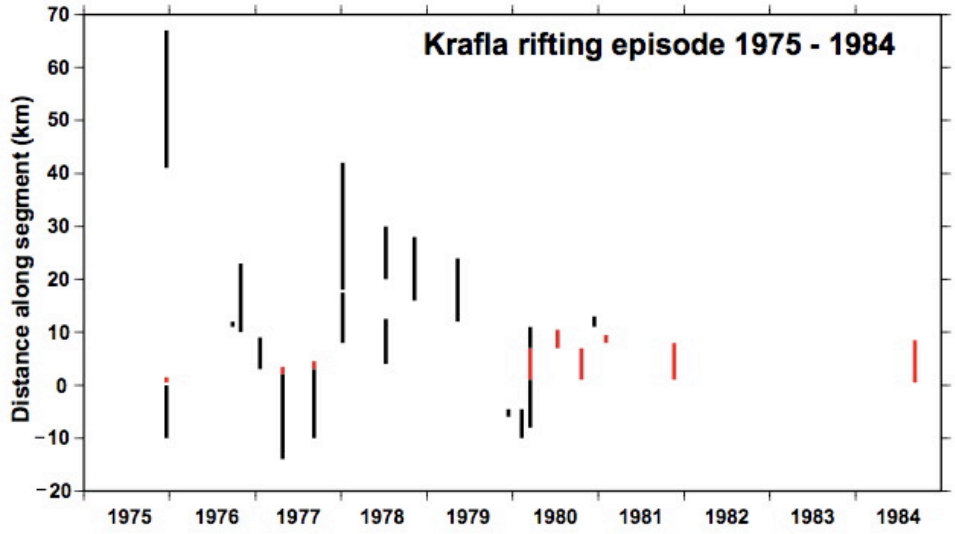



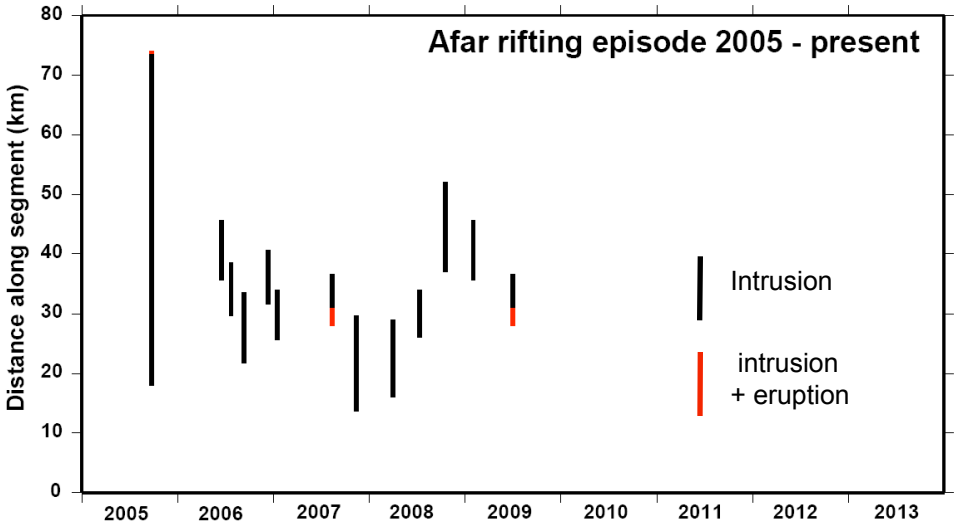

Keir et al., 2009

# 12 intrusions depuis 2005



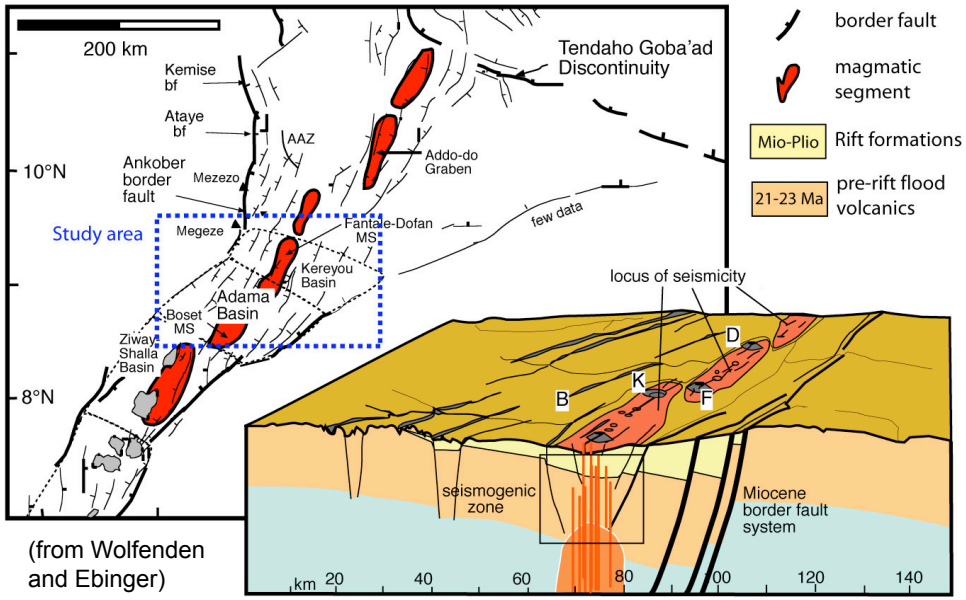

⇒ 12 nouveaux dikes, “remplissent” le déficit d’ouverture de l’événement de septembre 2005.




Hamling et al., GJI, 2009

# Le nord du rift Ethiopien

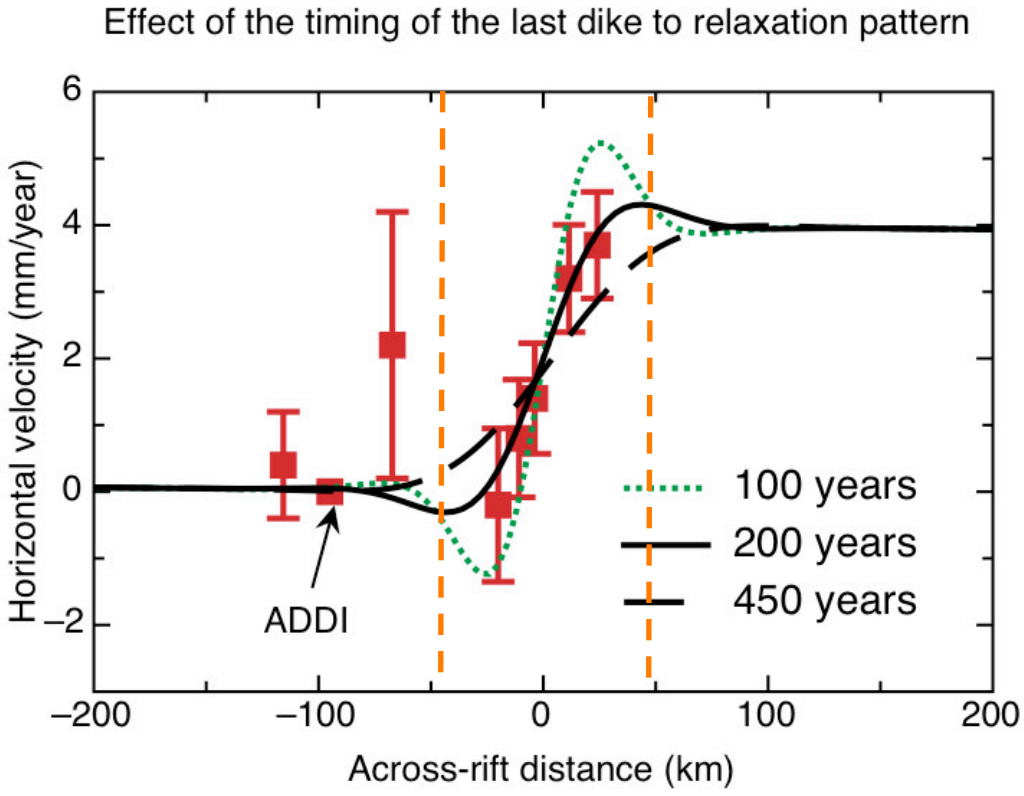



(from Wolfenden and Ebinger)

- Failles bordières ~inactives
- Centres magmatiques dans le rift
- Indication d'intrusions magmatiques en profondeur (tomographie, anisotropie sismique)

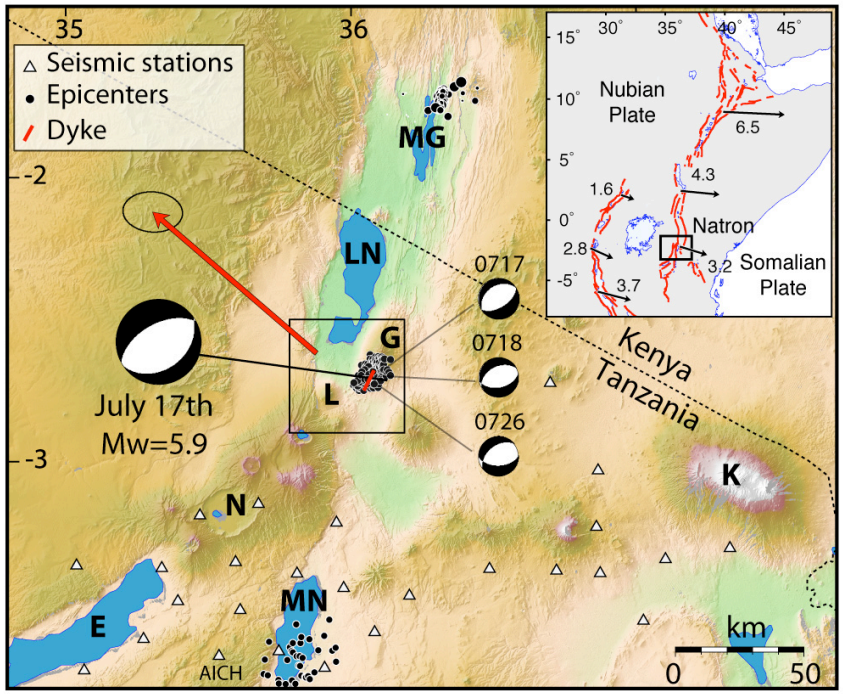
# Le nord du rift Ethiopien

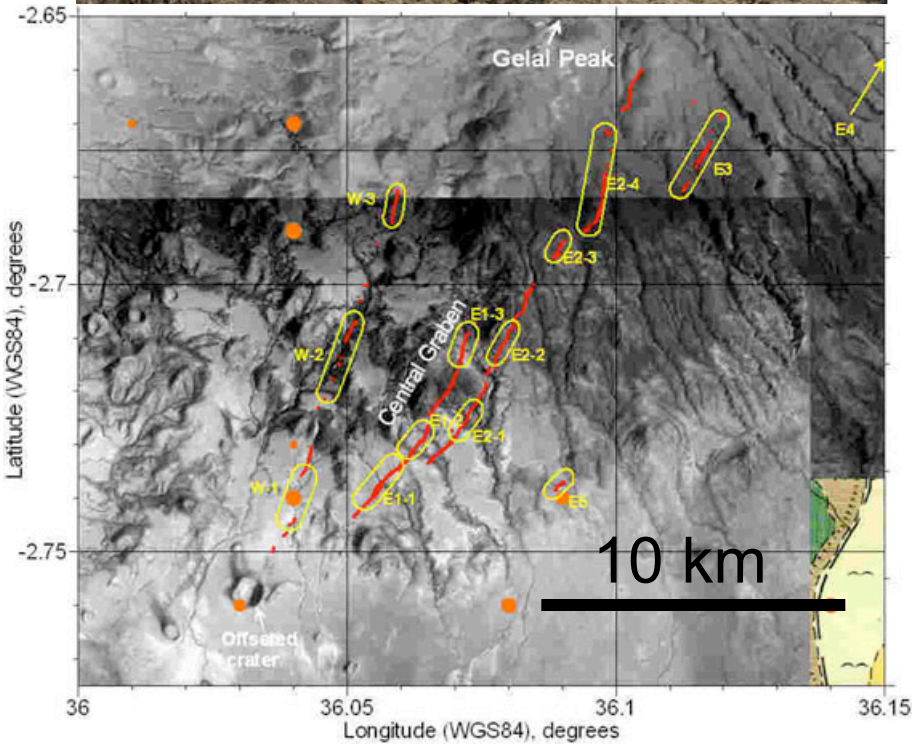
- Résultats GPS (Bilham et al., 1999)
  - Déformation localisée à l'intérieur du rift
  - Pas d'accumulation de déformation sur les failles bordières
- Données GPS cohérentes avec un modèle de relaxation viscoélastique suivant la mise en place d'un dike il y a ~200 ans (éruption du Fantale en1830?)




(model by R. Qin, data from Bilham et al., 1999)

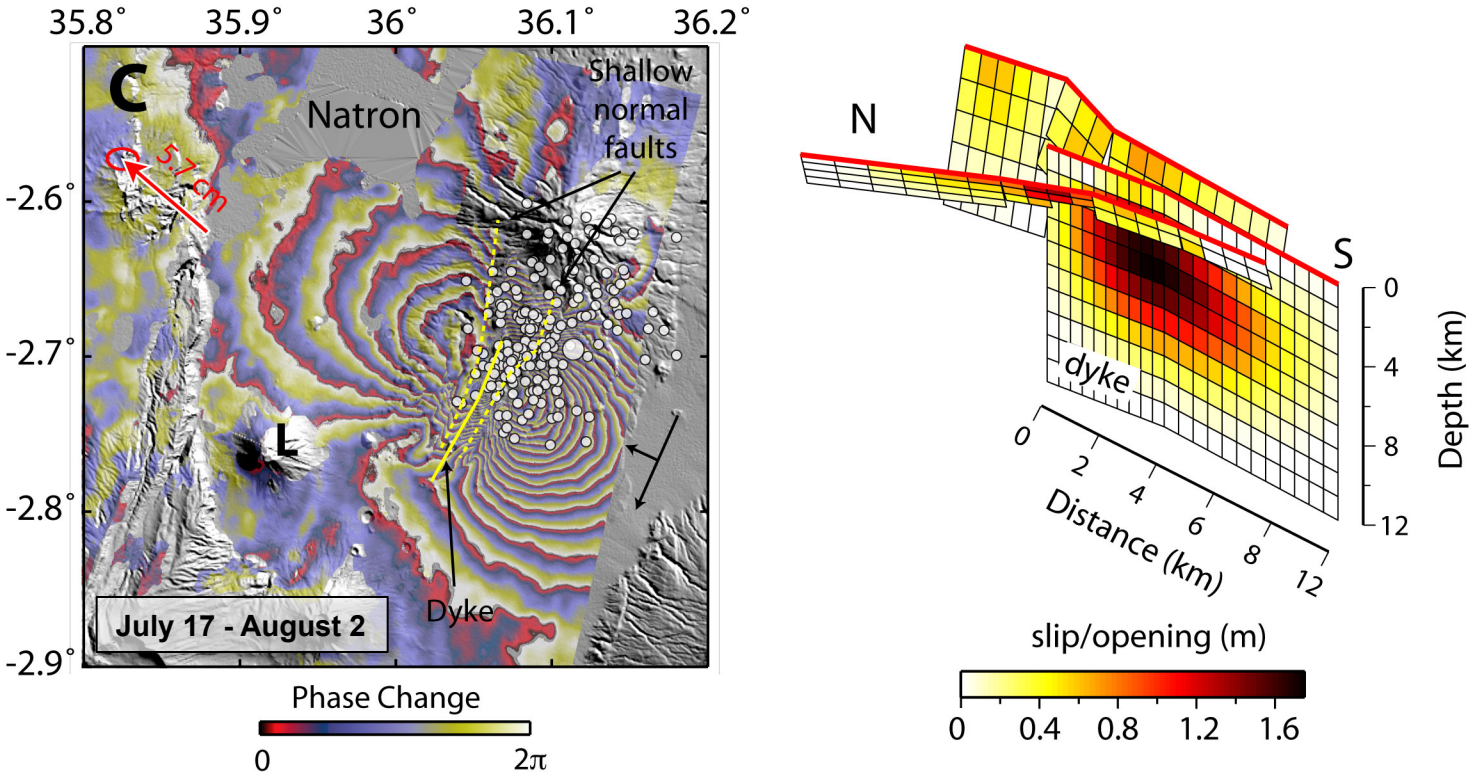
# L’intrusion de Natron, juillet 2007






- Branche est, bordure du craton tanzanien
- Rift jeune (<5 Ma), amincissement crustal limité
- Crise sismique:
  - 12 juillet 2007: mb=4.4 and 4.5
  - 17 juillet : Mw=5.9 (profondeur 4.7 km)
  - Activité sismique continue en aout, décroît rapidement en septembre
- Renouveau d’activité volcanique de l’Ol Doynio Lengai

# L’intrusion de Natron, juillet 2007




- Subsidence jusqu’à 1.5 m d’un petit fossé, soulèvement et extension de part et d’autre
- Ouverture d’un dike et mouvement sur failles normales superficielles
- Moment sismique total = $4.0 \times 10^{18}$ (Mw = 6.5)
- Moment sismique cumulé obserée = $1.4 \times 10^{18}$

=> 65% asismique

# Conclusions

- Un premier modèle cinématique pour le REA – à confirmer et améliorer avec plus de mesures géodésiques…
- Dynamique à grande échelle: forces de volume + tractions du manteau insuffisants pour causer la rupture de la lithosphère continentale (cratonique) en Afrique de l'Est?
- Récents événements de rifting avec intrusion de magma:
  - Les dikes accommodent une part significative de la divergence: « quanta » qui mènent à la rupture continentale et à la divergence des plaques.
  - Afar: rift (quasi-) océanique, longue séquence de rifting => grande quantité de magma disponible
  - Natron: phase précoce du rifting, peu d'amincissement crustal => « magma-assisted rifting » (cf. Buck, 2004)?
- … mais il y a aussi des séismes importants (M7+) dans le REA et des segments ~amagmatiques…