

Structure thermique des lithosphères océaniques et interaction lithosphère-asthénosphère: impact des failles transformantes

Caroline Dumoulin

Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Nantes

Collaborations: *Gaël Choblet*

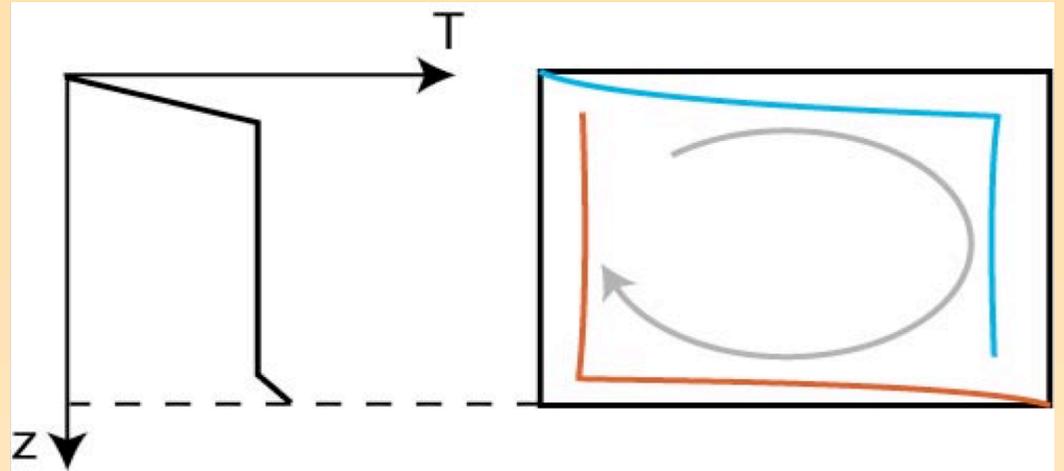
Marie-Pierre Doin (ENS Paris)

Olivia Golle

- la lithosphère thermique

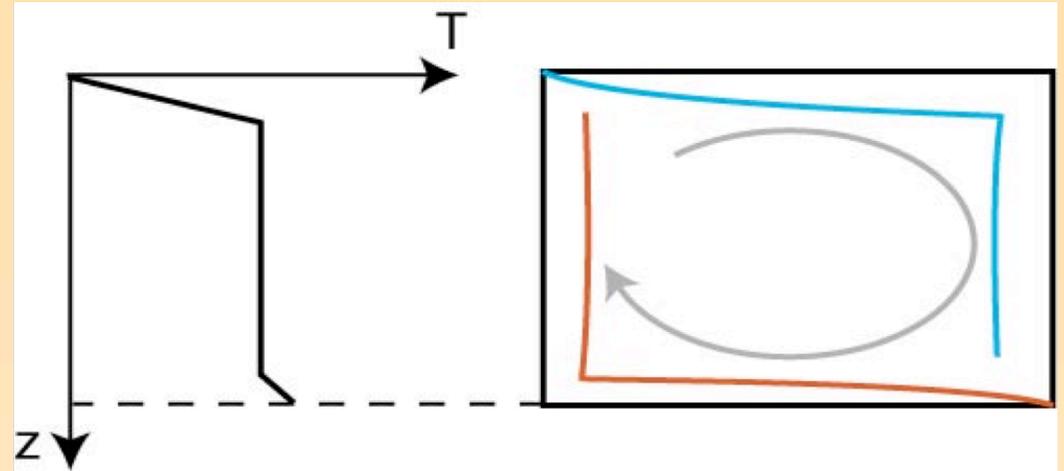
- la lithosphère thermique

- CLT froide de la convection

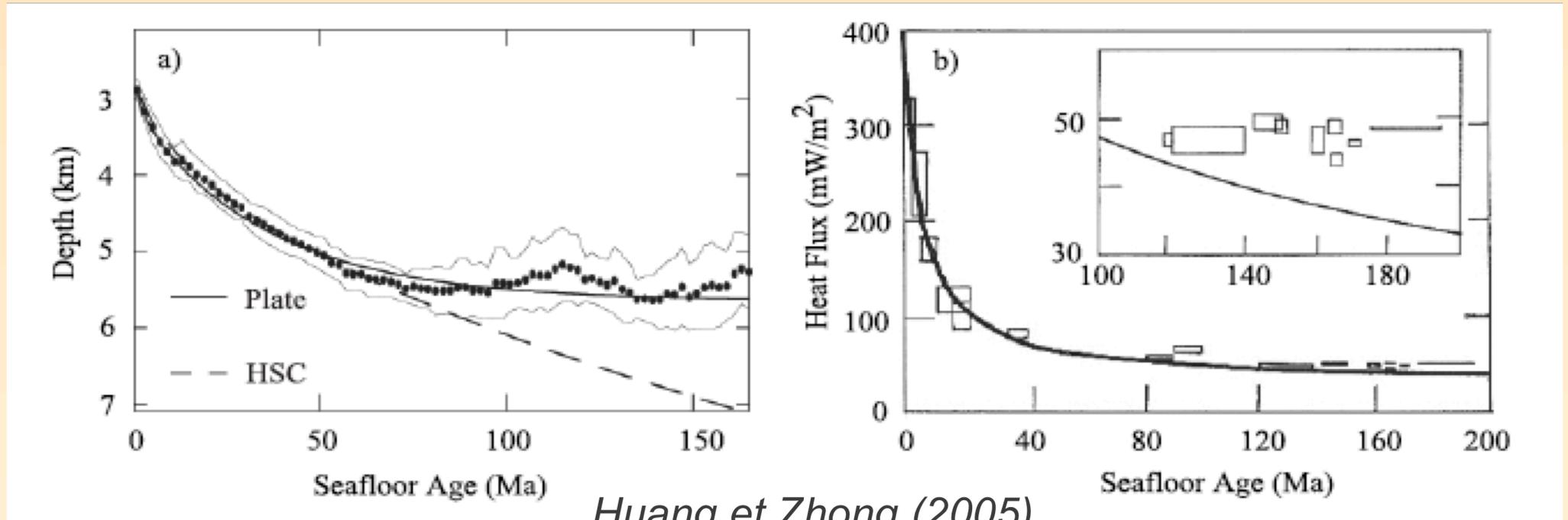


- la lithosphère thermique

- CLT froide de la convection



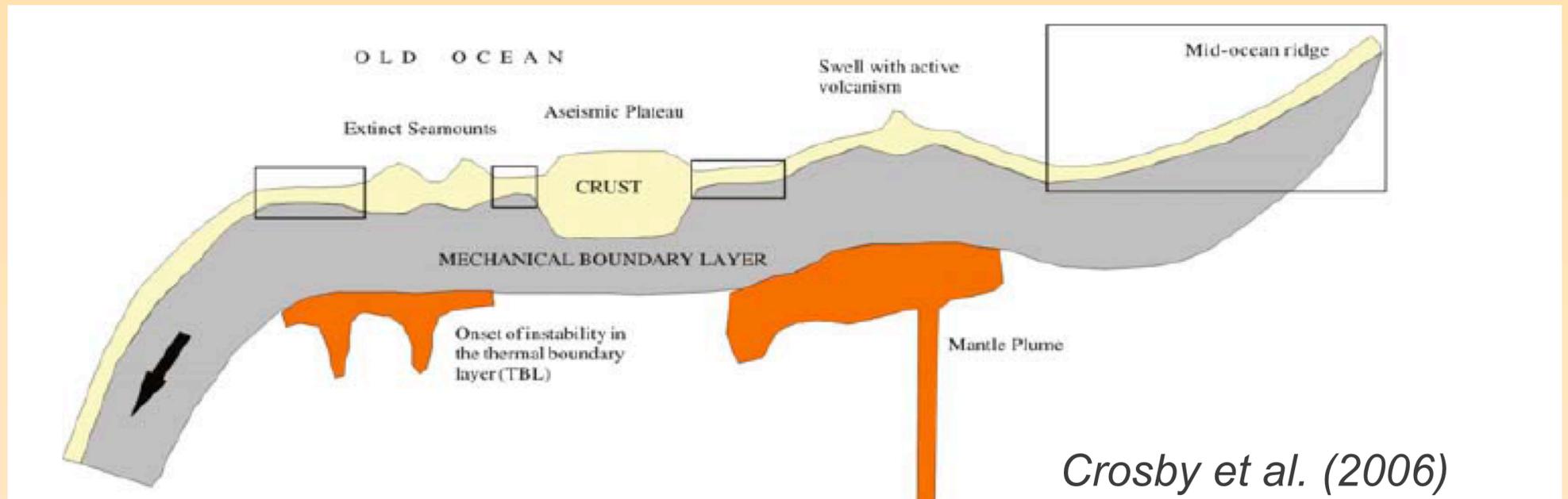
- les modèles de refroidissement



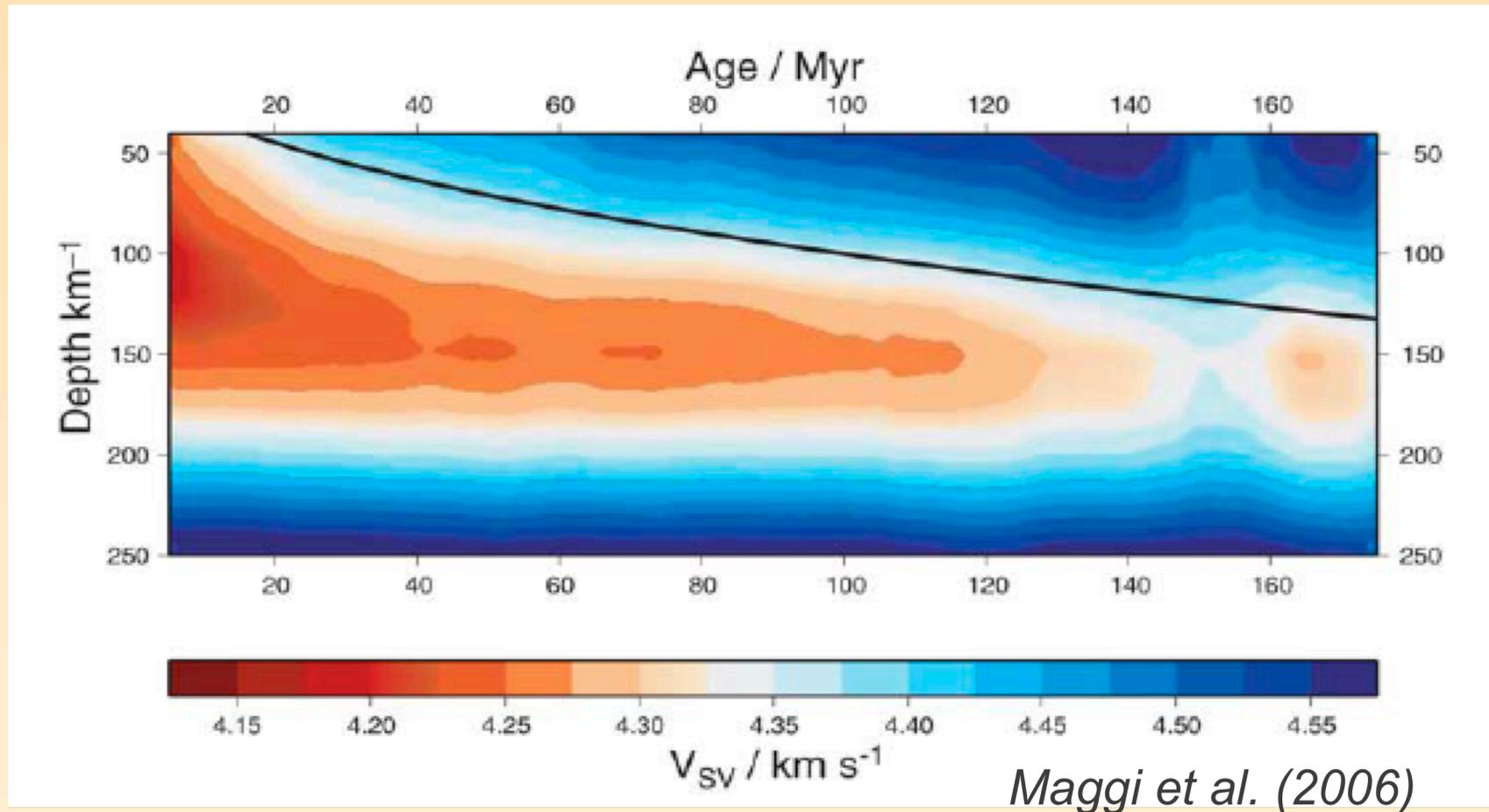
Huang et Zhong (2005)

aplatissement des fonds océaniques?

aplatissement des fonds océaniques?



aplatissement des fonds océaniques?



- existence de la convection petite échelle?

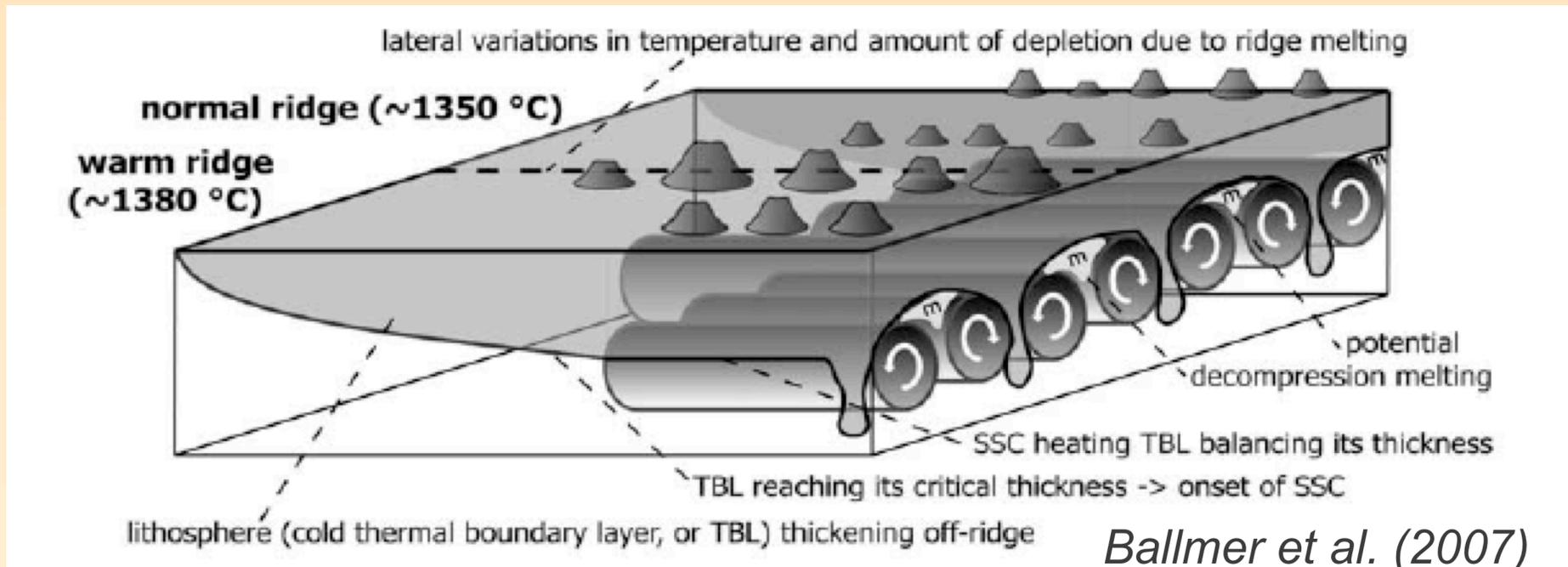
- existence de la convection petite échelle?
 - viscosité asthénosphérique

- existence de la convection petite échelle?
 - viscosité asthénosphérique
 - anisotropie

- existence de la convection petite échelle?
 - viscosité asthénosphérique
 - anisotropie
 - anomalies du géoïde, amplitudes et longueurs d'onde des anomalies gravi + signature thermique/dynamique du géoïde

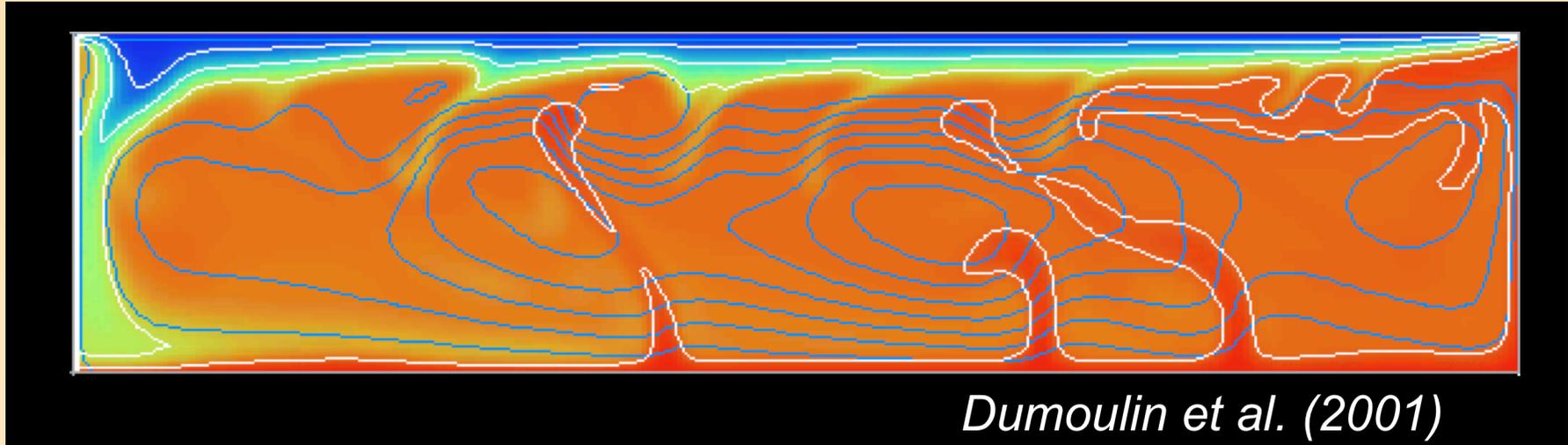
- existence de la convection petite échelle?
 - viscosité asthénosphérique
 - anisotropie
 - anomalies du géoïde, amplitudes et longueurs d'onde des anomalies gravi + signature thermique/dynamique du géoïde
 - volcanisme intraplaque non associé à des points chauds

- existence de la convection petite échelle?
 - viscosité asthénosphérique
 - anisotropie
 - anomalies du géoïde, amplitudes et longueurs d'onde des anomalies gravi + signature thermique/dynamique du géoïde
 - volcanisme intraplaque non associé à des points chauds

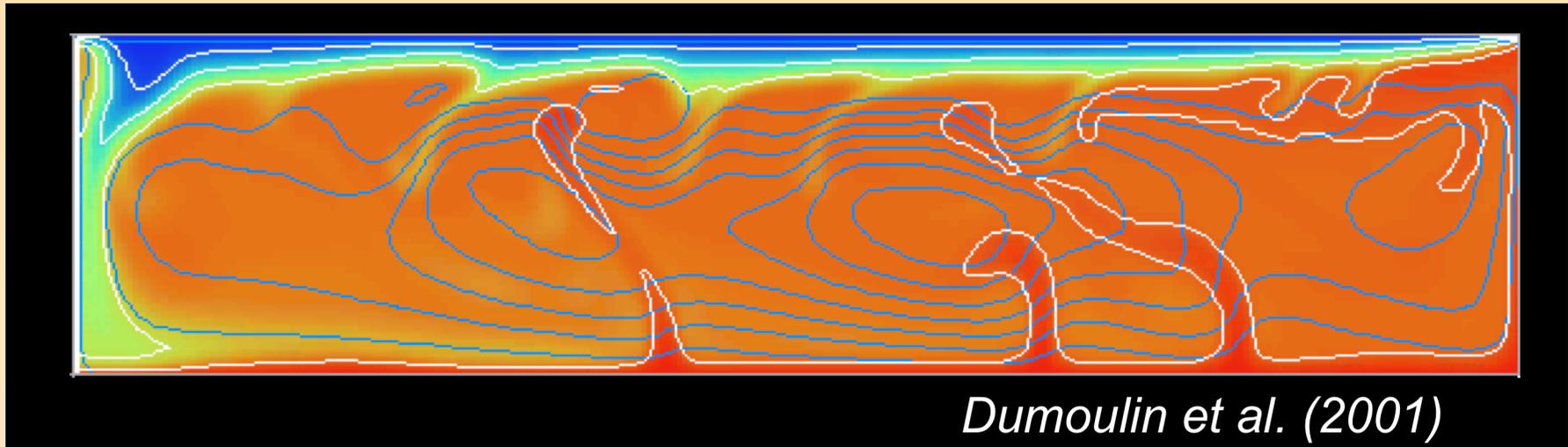


- études précédentes sur les lithosphères océaniques

- études précédentes sur les lithosphères océaniques

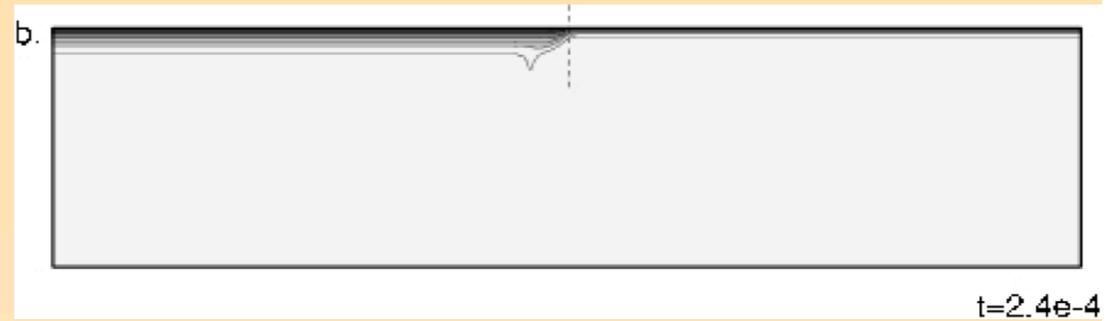
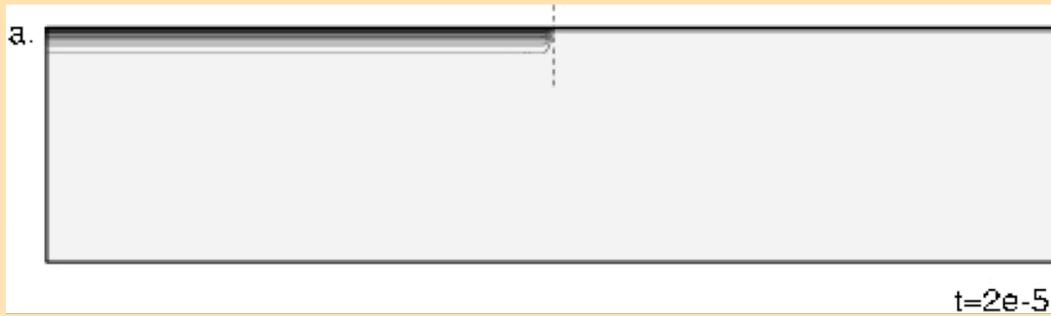


- études précédentes sur les lithosphères océaniques



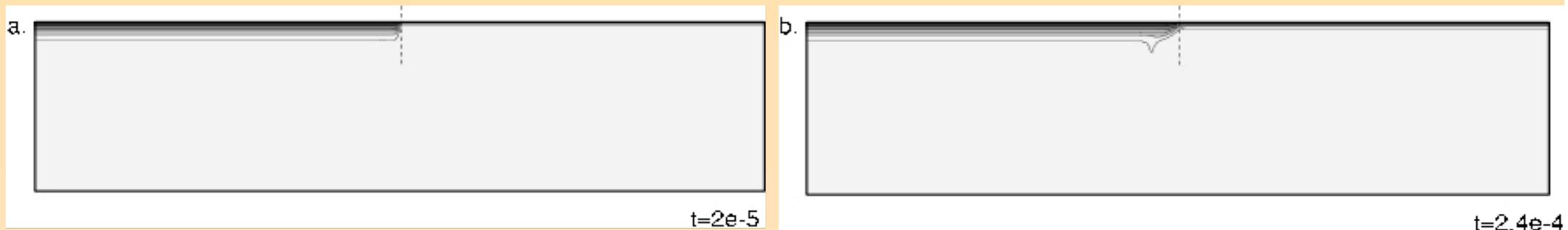
⇒ Impact des failles transformantes?

⇒ Impact des failles transformantes?

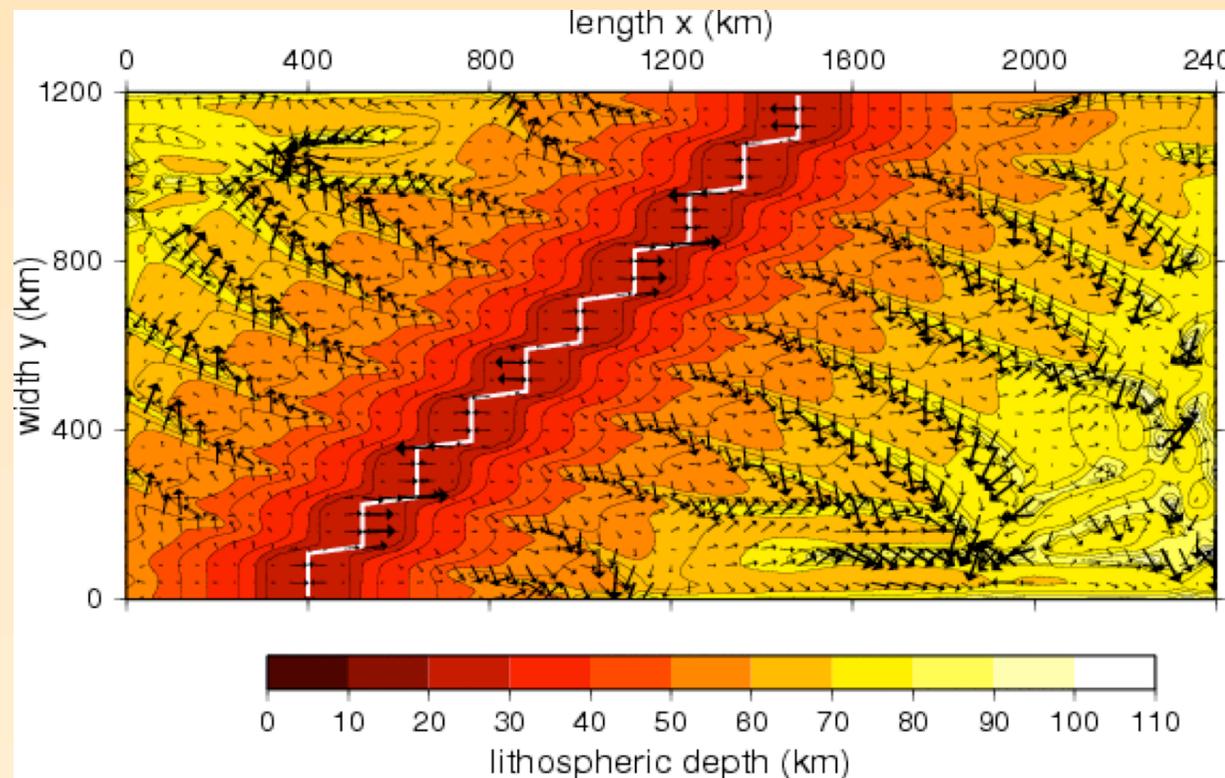


Dumoulin et al. (2005)

⇒ Impact des failles transformantes?



Dumoulin et al. (2005)



Morency et al. (2005)

Partie I: Présentation du modèle

Partie II: Résultats et applications aux domaines
océaniques

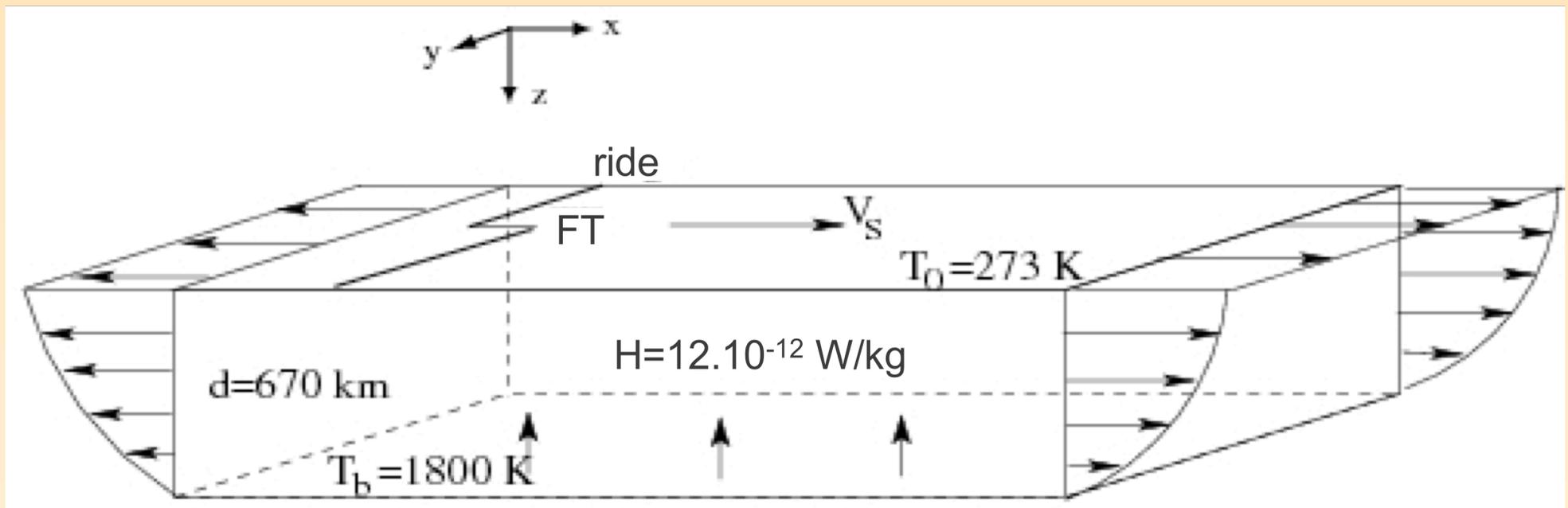
Partie III: Rôle de la fusion partielle

Partie I: Présentation du modèle

- Géométrie cartésienne, 3-D (4x2x1)

- Géométrie cartésienne, 3-D (4x2x1)
- Résolution des équations de conservation de la masse, de l'énergie et du moment

- Géométrie cartésienne, 3-D (4x2x1)
- Résolution des équations de conservation de la masse, de l'énergie et du moment
- Conditions aux limites et dimensionnement



- Rhéologie :

- Rhéologie :
 - newtonienne (fluage par diffusion)

- Rhéologie :
 - newtonienne (fluage par diffusion)
 - ⇒ viscosité indépendante de $\dot{\varepsilon}$

- Rhéologie :
 - newtonienne (fluage par diffusion)
 - ⇒ viscosité indépendante de $\dot{\varepsilon}$
 - viscosité (T)

- Rhéologie :

- newtonienne (fluage par diffusion)

- ⇒ viscosité indépendante de $\dot{\varepsilon}$

- viscosité (T)

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-b \frac{T - T_0}{\Delta T}\right)$$

b relié à l'énergie d'activation

ν_0 viscosité dynamique de surface

- Rhéologie :

- newtonienne (fluage par diffusion)

⇒ viscosité indépendante de $\dot{\varepsilon}$

- viscosité (T)

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-b \frac{T - T_0}{\Delta T}\right)$$

b relié à l'énergie d'activation

ν_0 viscosité dynamique de surface

= linéarisation d'une loi d'Arrhénius

$$\nu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

- Rhéologie :

- newtonienne (fluage par diffusion)

⇒ viscosité indépendante de $\dot{\varepsilon}$

- viscosité (T)

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-b \frac{T - T_0}{\Delta T}\right)$$

b relié à l'énergie d'activation

ν_0 viscosité dynamique de surface

= linéarisation d'une loi d'Arrhénius

$$\nu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

- pas de dépendance à la P

- Rhéologie :

- newtonienne (fluage par diffusion)

⇒ viscosité indépendante de $\dot{\epsilon}$

- viscosité (T)

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-b \frac{T - T_0}{\Delta T}\right)$$

b relié à l'énergie d'activation

ν_0 viscosité dynamique de surface

= linéarisation d'une loi d'Arrhénius

$$\nu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

- pas de dépendance à la P

- pas de dépendance au contenu en eau

- Rhéologie :

- newtonienne (fluage par diffusion)

⇒ viscosité indépendante de $\dot{\epsilon}$

- viscosité (T)

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-b \frac{T - T_0}{\Delta T}\right)$$

b relié à l'énergie d'activation

ν_0 viscosité dynamique de surface

= linéarisation d'une loi d'Arrhénius

$$\nu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

- pas de dépendance à la P

- pas de dépendance au contenu en eau

- pas de dépendance à la taille de grain

- Nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{\alpha \rho_0 g \Delta T d^3}{K \nu_b}$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha (T - T_0))$$

équation d'état du matériel

- Nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{\alpha \rho_0 g \Delta T d^3}{K \nu_b}$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha (T - T_0))$$
 équation d'état du matériel

⇒ variations des paramètres (11 simulations)

- Nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{\alpha \rho_0 g \Delta T d^3}{K \nu_b}$$

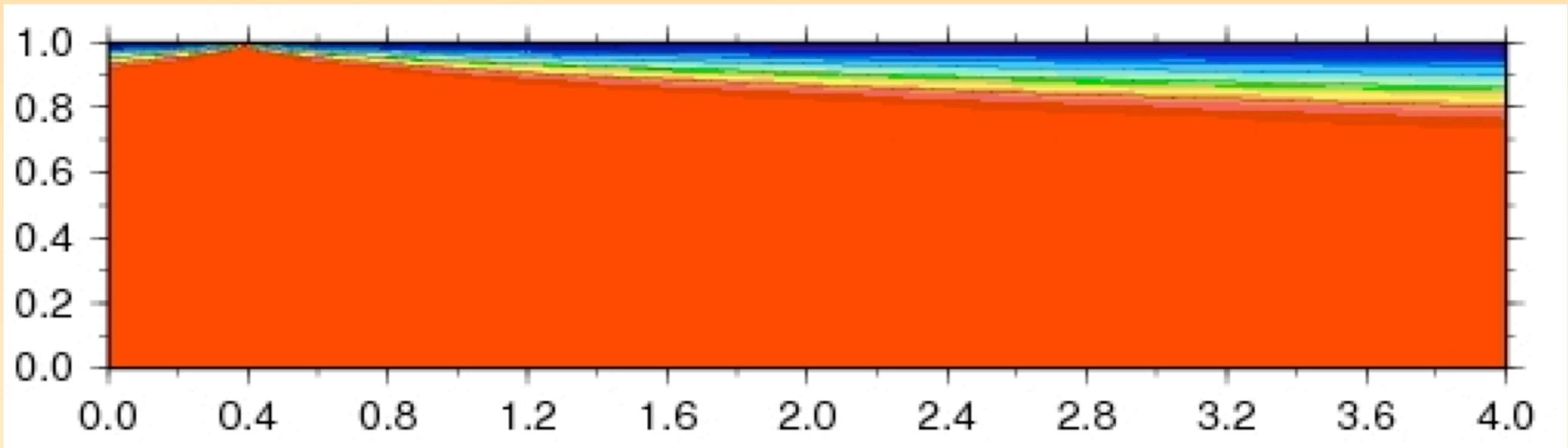
$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha (T - T_0))$$
 équation d'état du matériel

⇒ variations des paramètres (11 simulations)

vitesse d'accrétion	0,5 à 5,65 cm/an
longueur de la FT (offset en âge à la FT)	210 à 840 km (4 à 45 Ma)
énergie d'activation	176 à 264 kJ/mol
nombre de Rayleigh (viscosité asth.)	10^7 à $1,64 \times 10^8$ ($6,51 \times 10^{19}$ à $3,97 \times 10^{18}$ Pa.s)

- Déroulement d'une simulation:
 - champ de T initial = modèle de refroidissement d'un 1/2 espace

- Déroulement d'une simulation:
 - champ de T initial = modèle de refroidissement d'un 1/2 espace

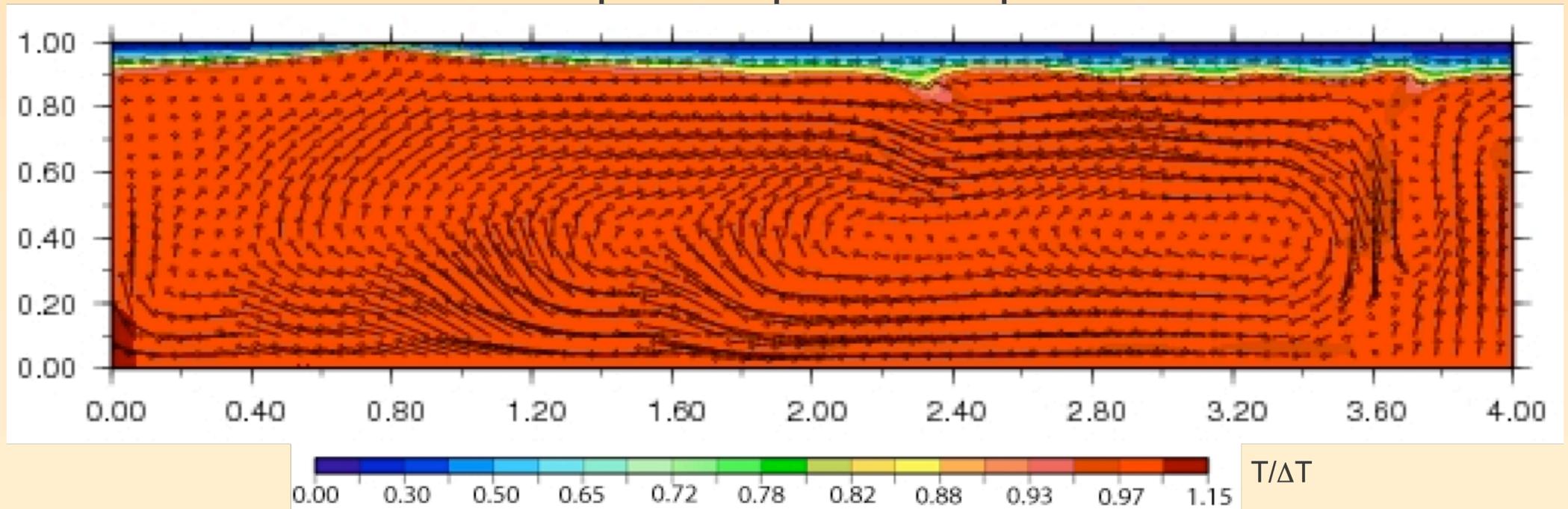


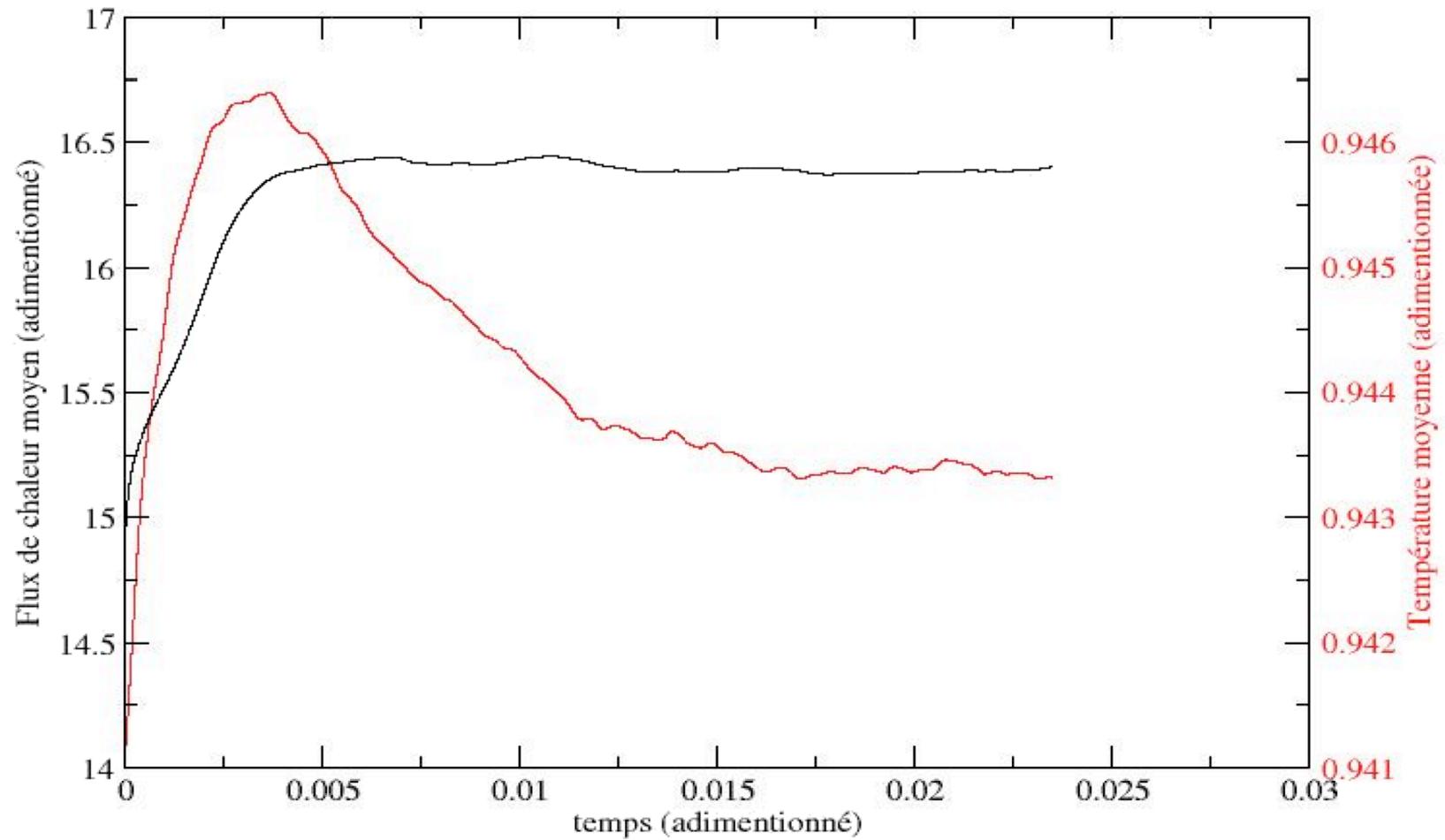
- Déroulement d'une simulation:

- champ de T initial = modèle de refroidissement d'un 1/2 espace



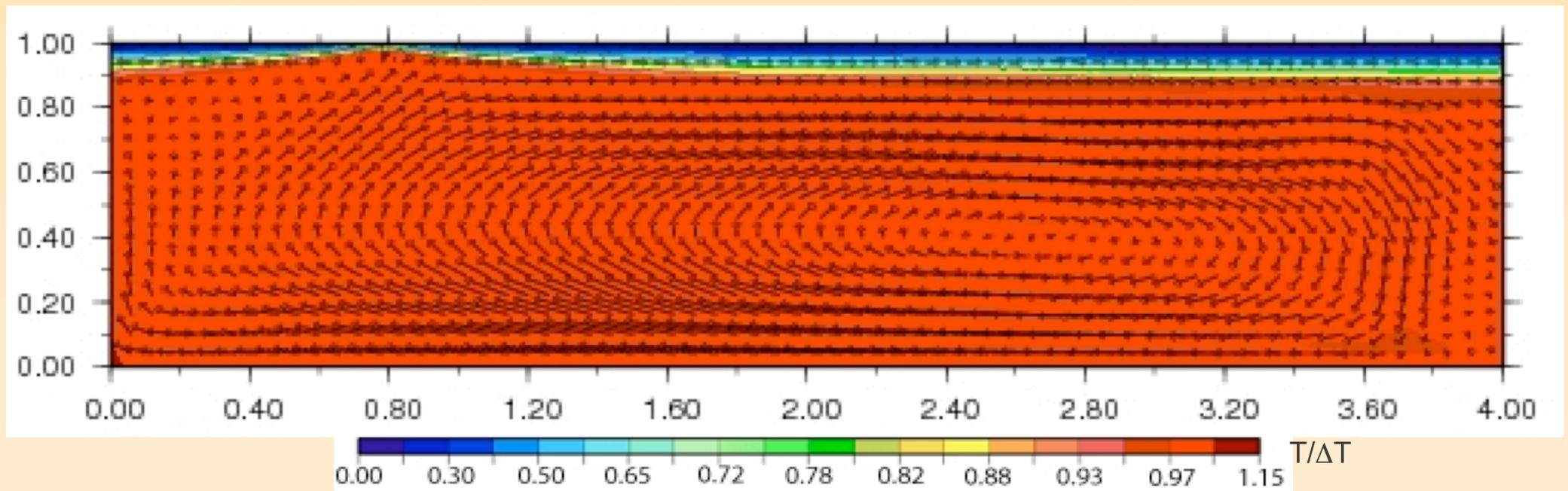
- on atteint l'équilibre quasi-statique





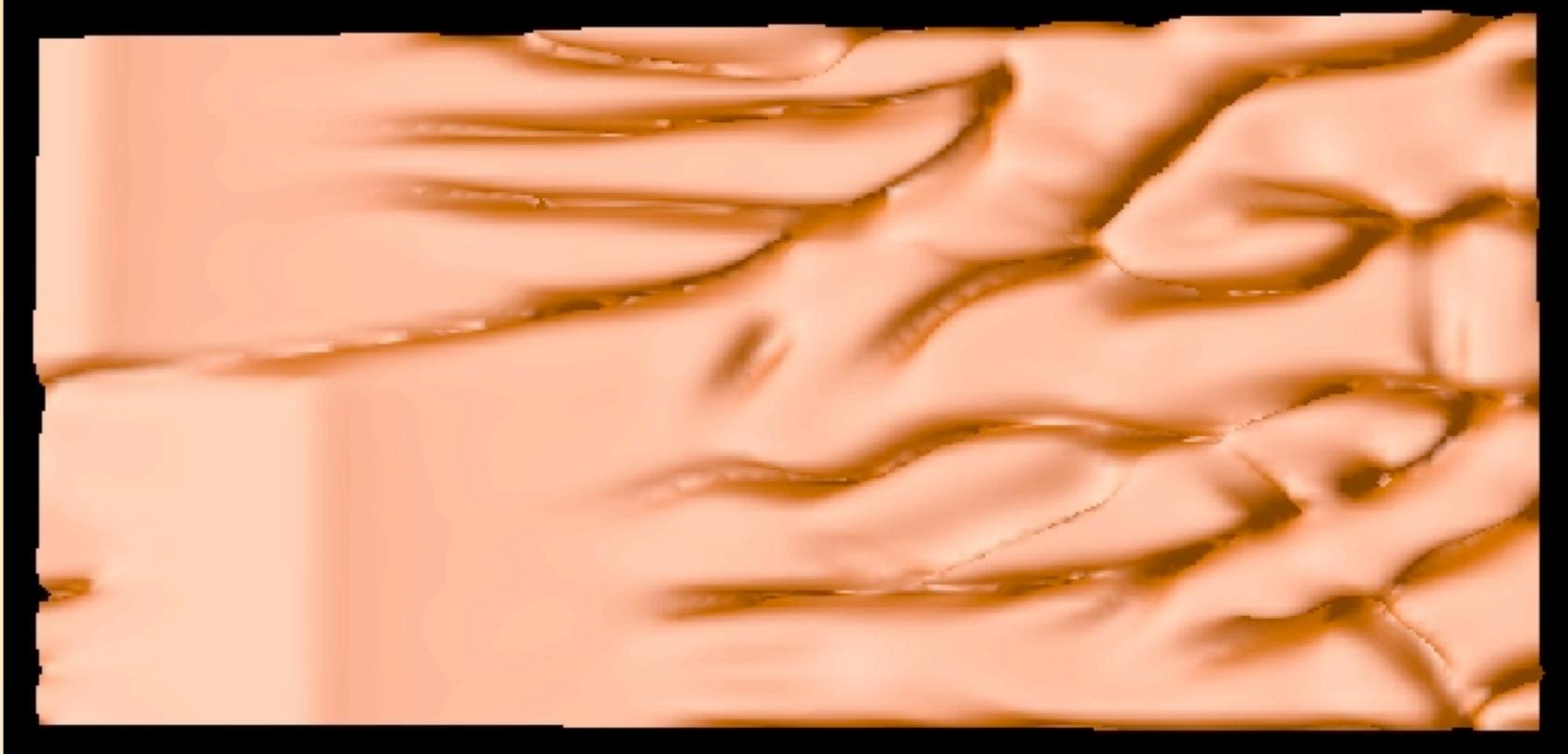


- on calcule un champ moyen (pas de signification réelle)



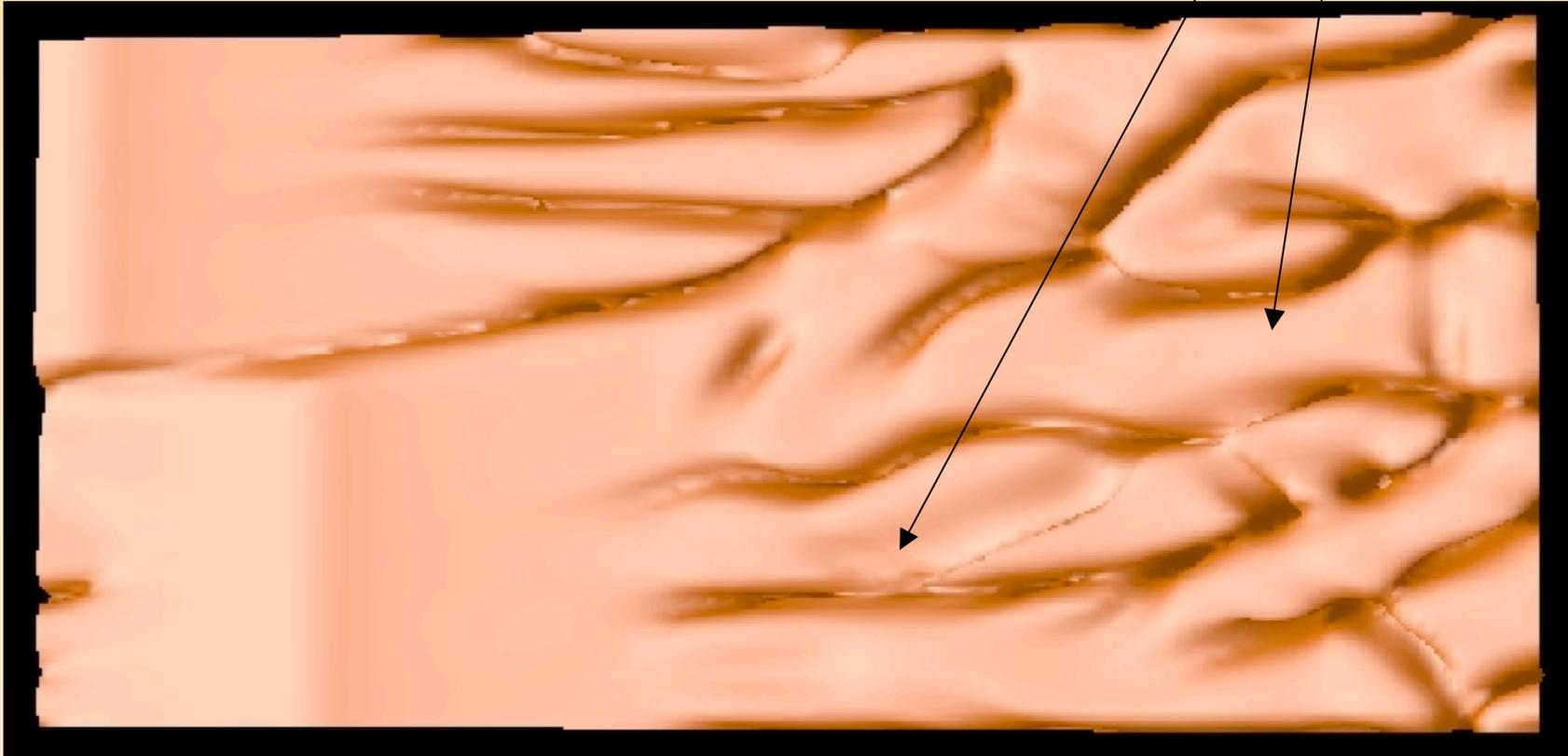
Partie II: Résultats et applications aux domaines océaniques

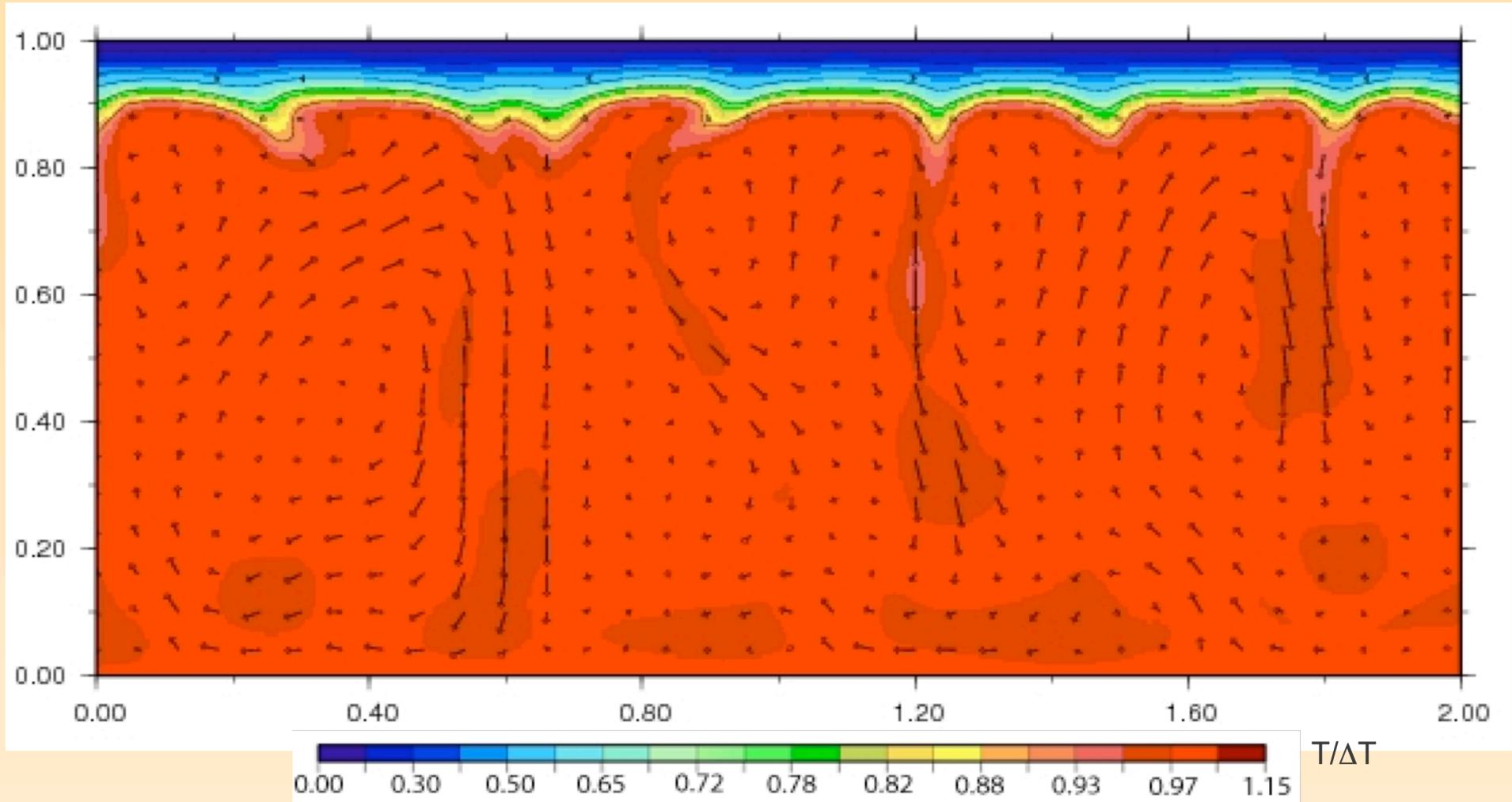
- Description de l'écoulement

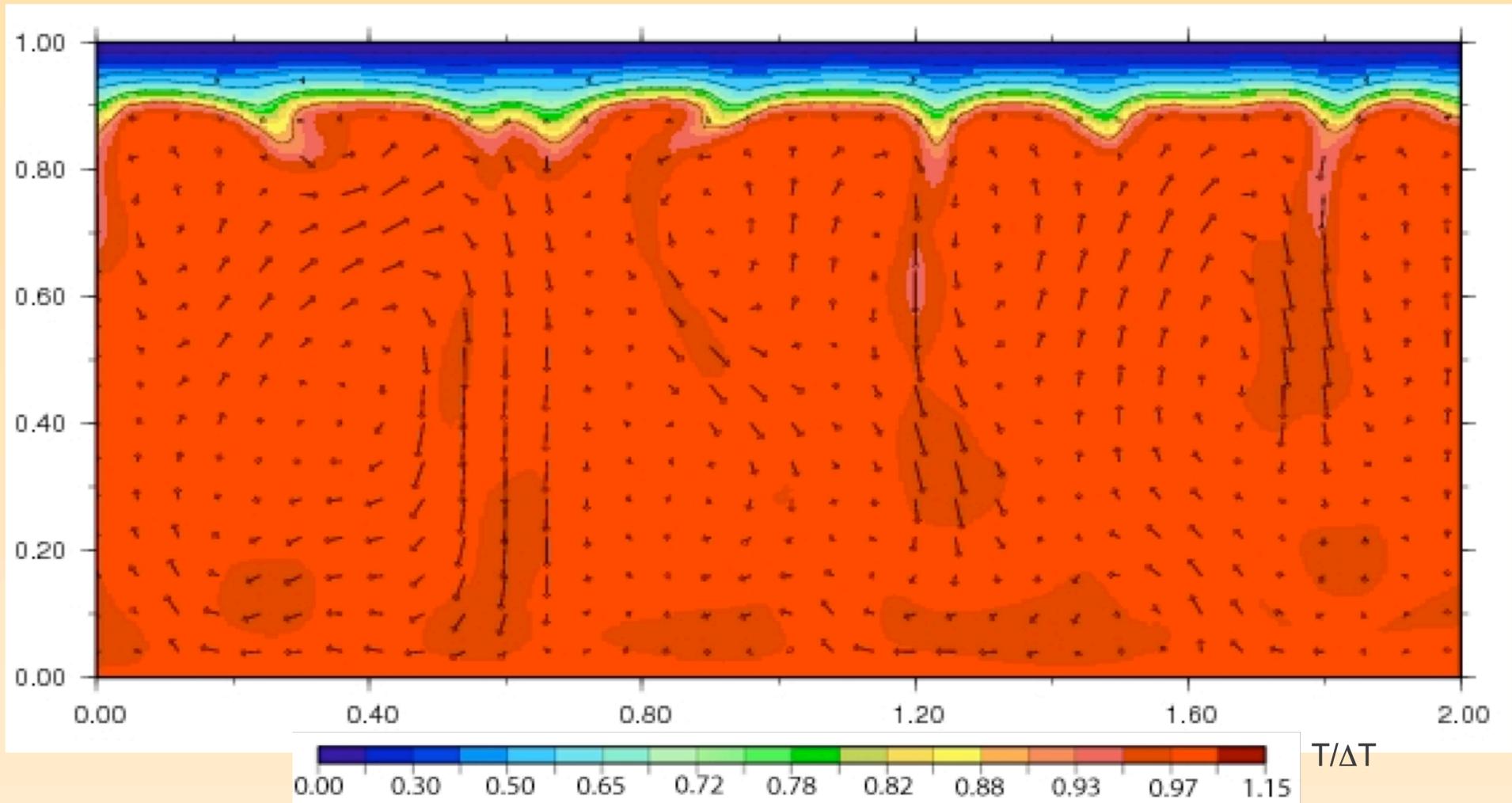


- Description de l'écoulement

rouleaux de Richter

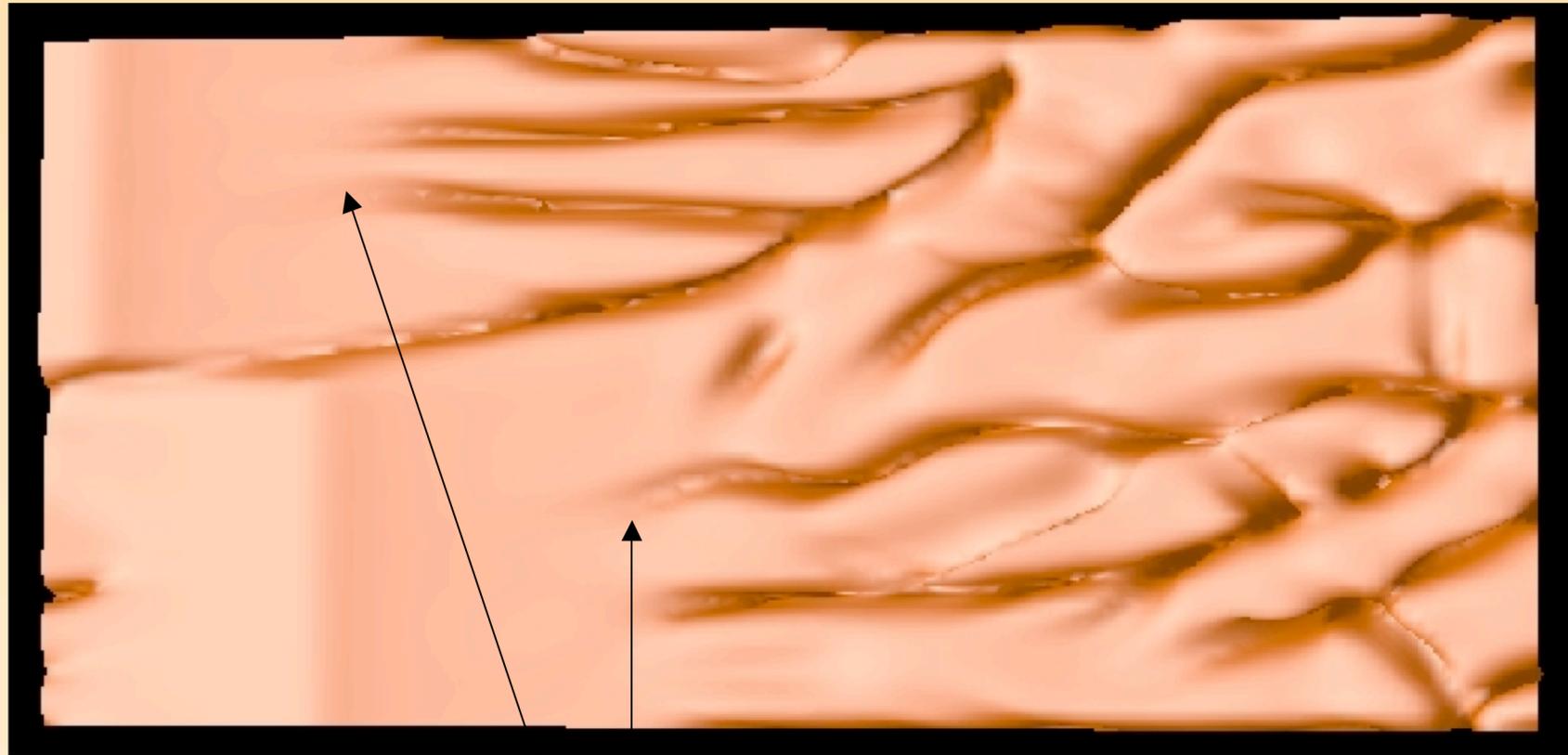




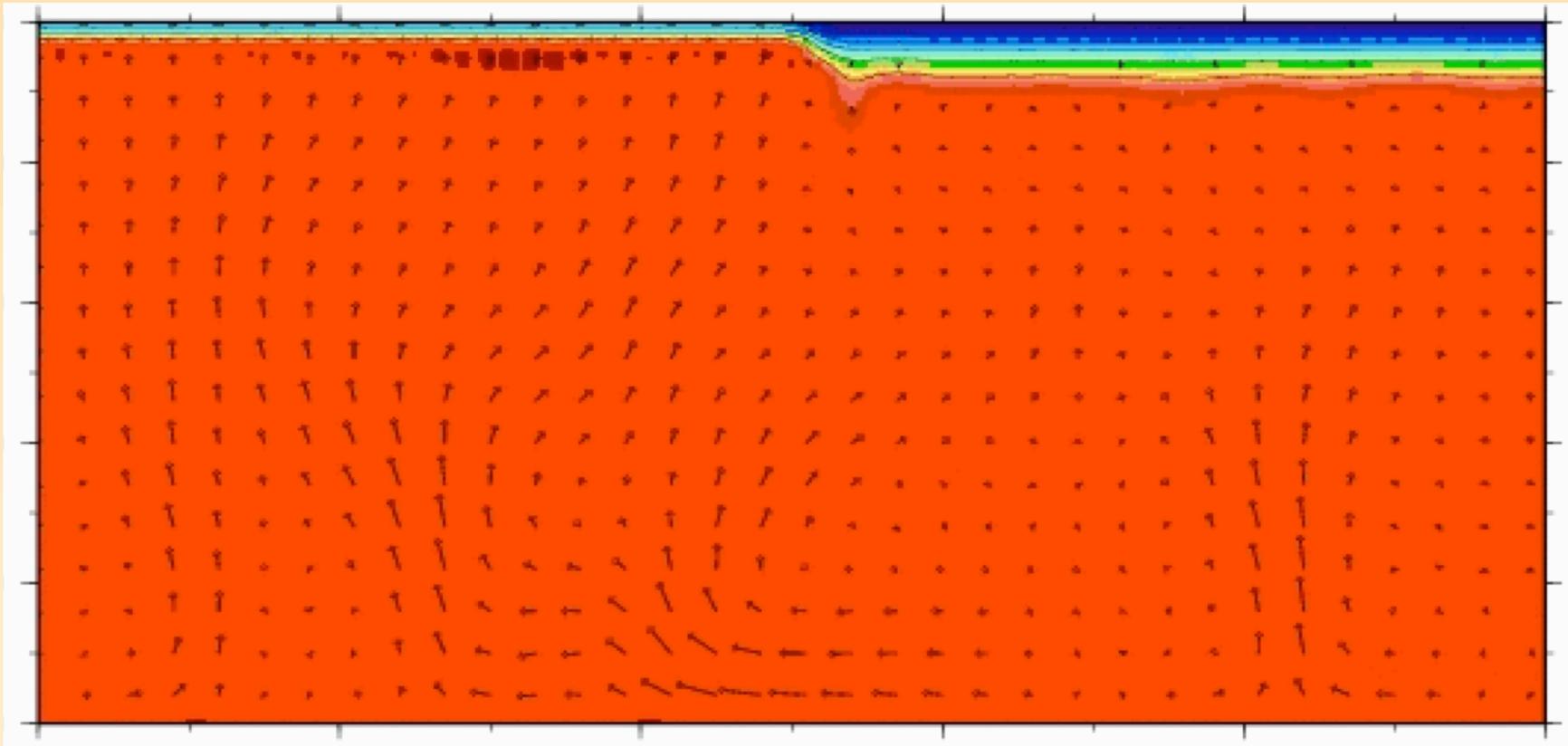


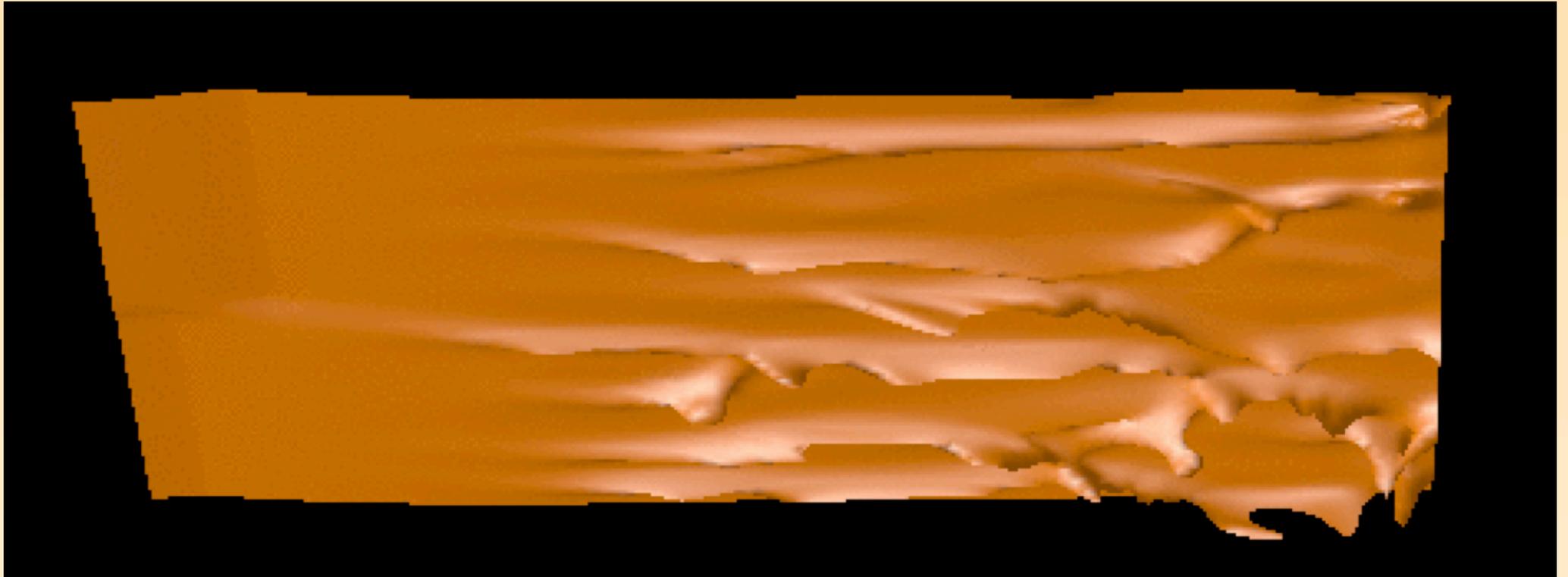
2 échelles d'écoulement: - grande échelle (forcée)
- «petite» échelle (inst. thermiques)



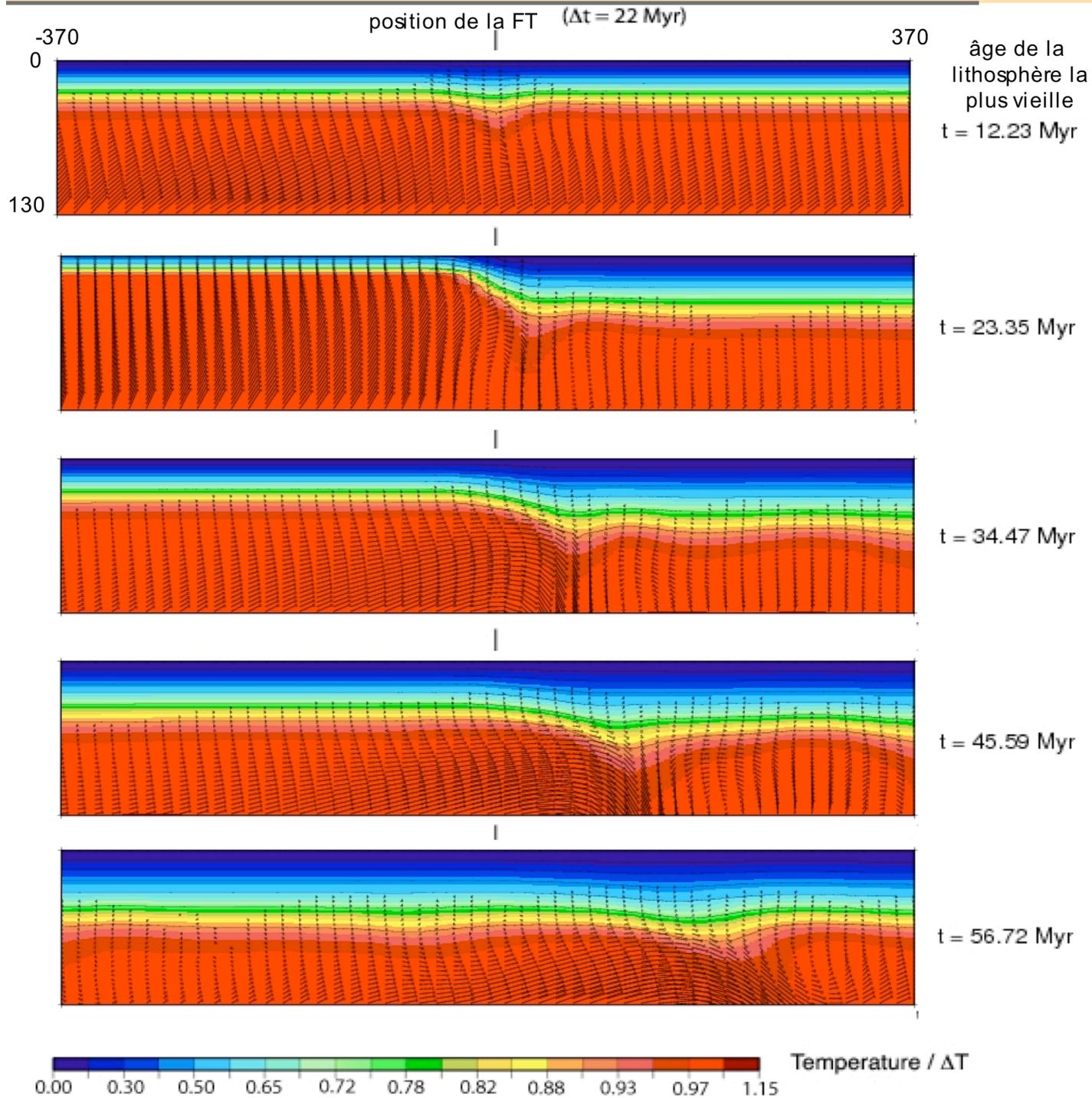


démarrage de la convection petite échelle





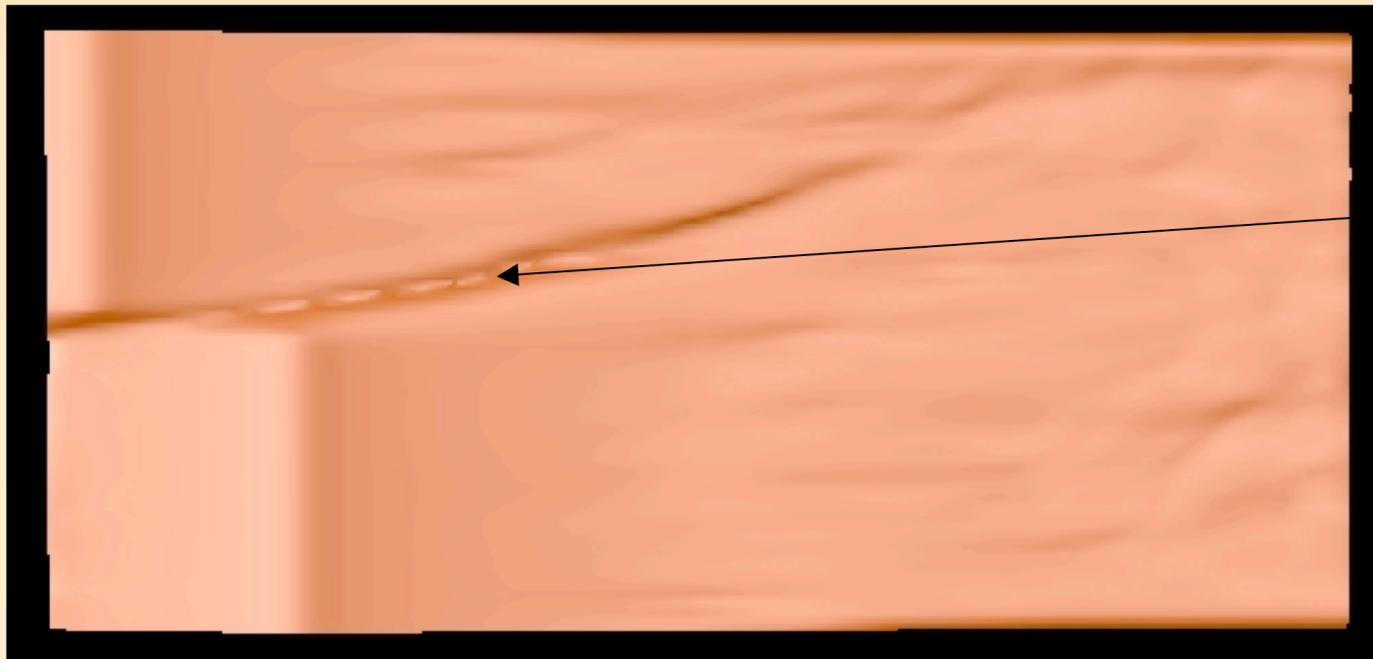
Partie II: Résultats et applications aux domaines océaniques



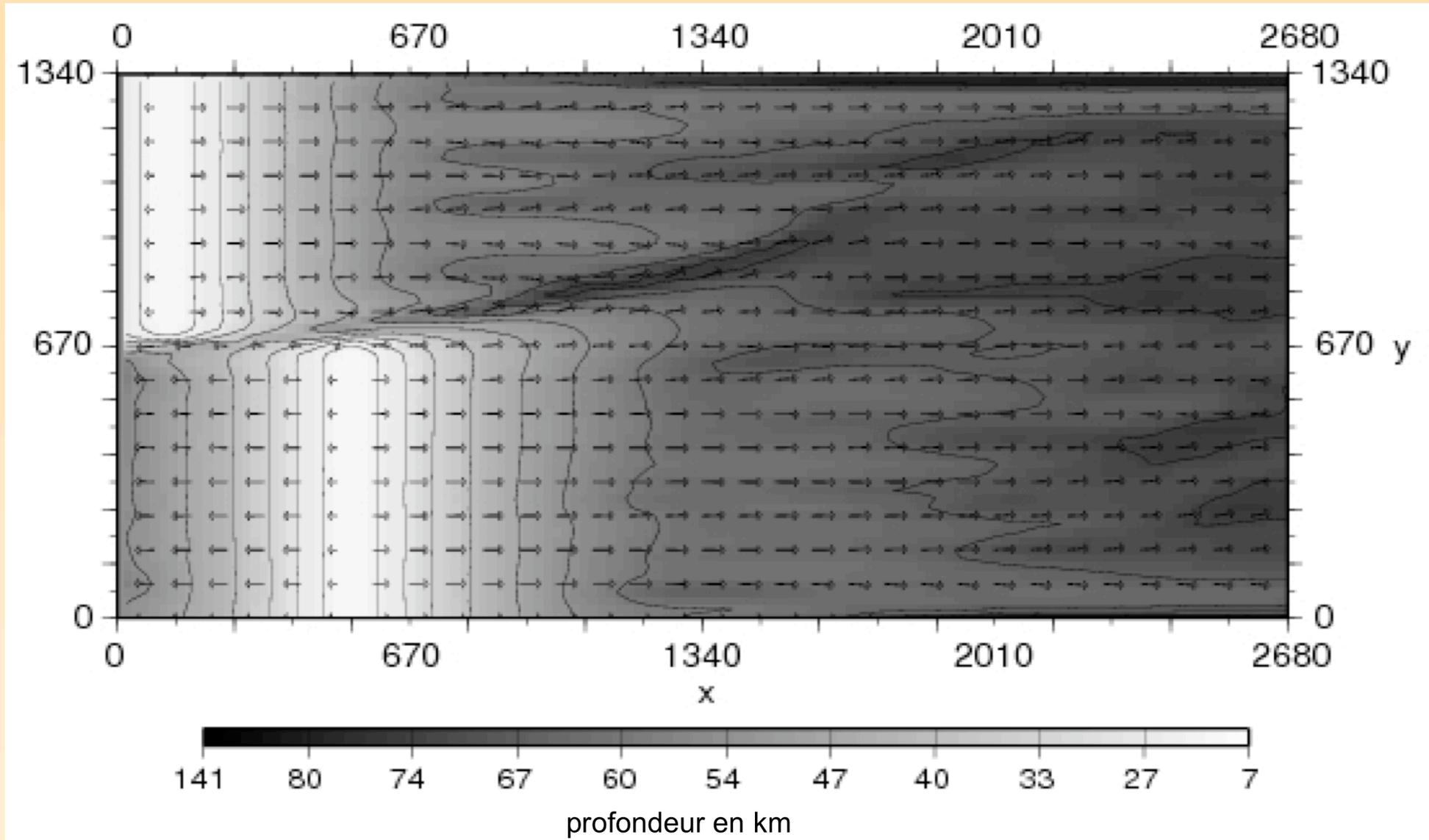
à la zone transformante:
«edge-driven» convection



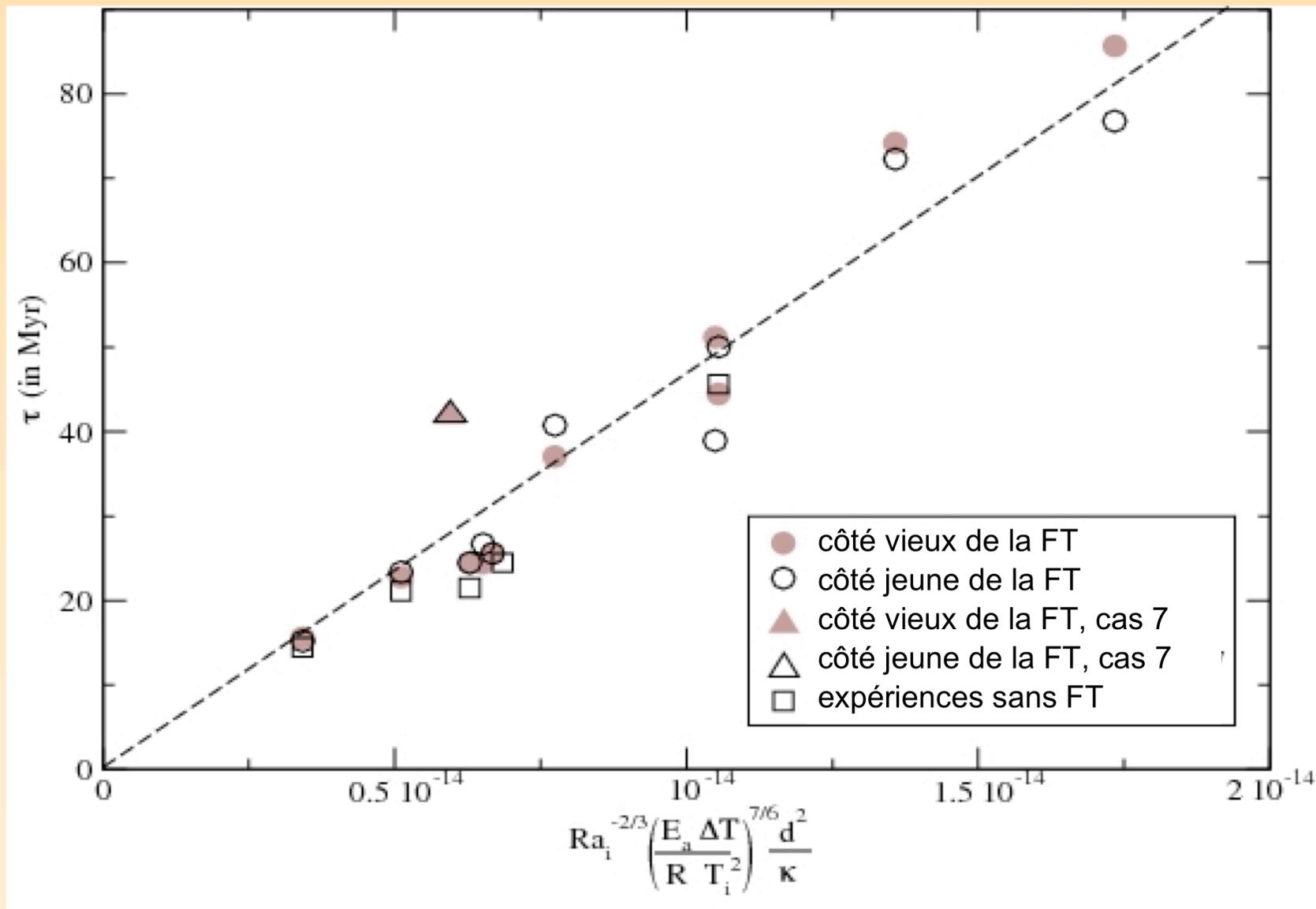
Résultats de simulations à 2D
(Huang et al., 2003;
Dumoulin et al., 2005)



trace de la faille
transformante



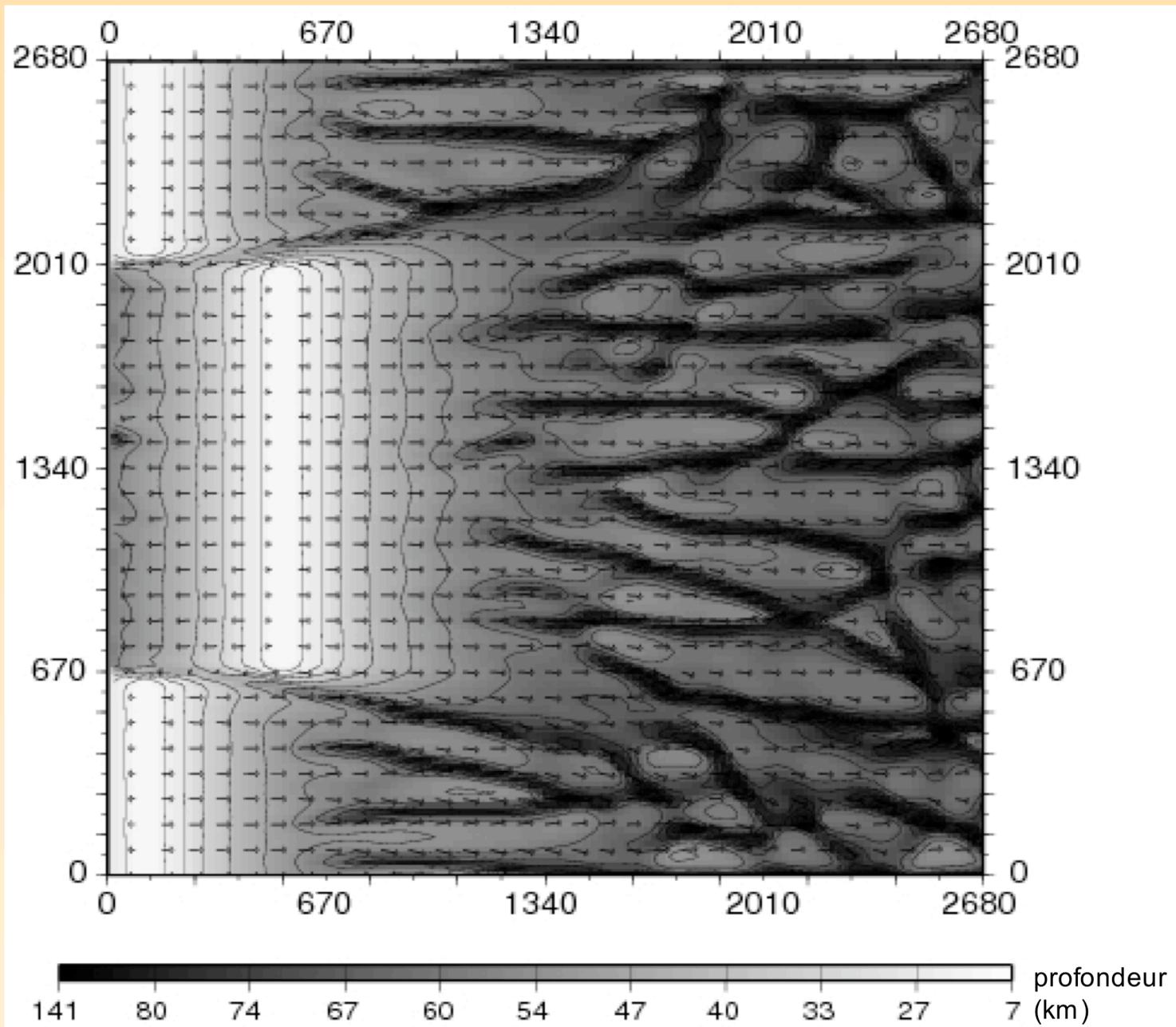
- «onset» de la convection petite échelle

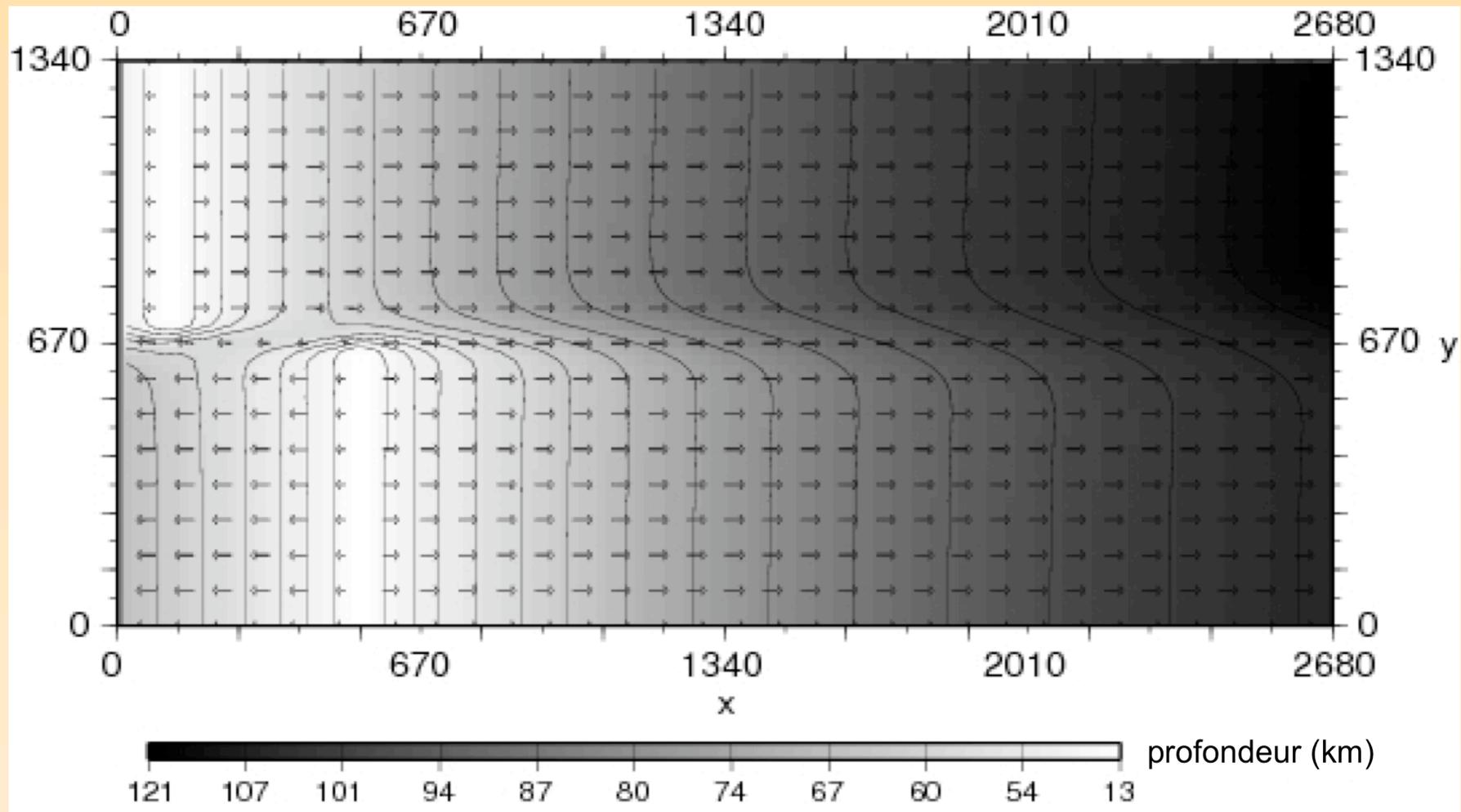


- Trace de la FT: quantification et conséquences

- Trace de la FT: quantification et conséquences
 - rôle des conditions aux limites?

- Trace de la FT: quantification et conséquences





nbe de Ra nul: écoulement imposé par la diffusion thermique et les conditions aux limites

- contrôle de l'angle de la trace de la FT?

- contrôle de l'angle de la trace de la FT?

⇒ deux phénomènes en compétition:

- contrôle de l'angle de la trace de la FT?

⇒ deux phénomènes en compétition:

1. cisaillement dû à l'accrétion
(V_s : vitesse de surface)

- contrôle de l'angle de la trace de la FT?

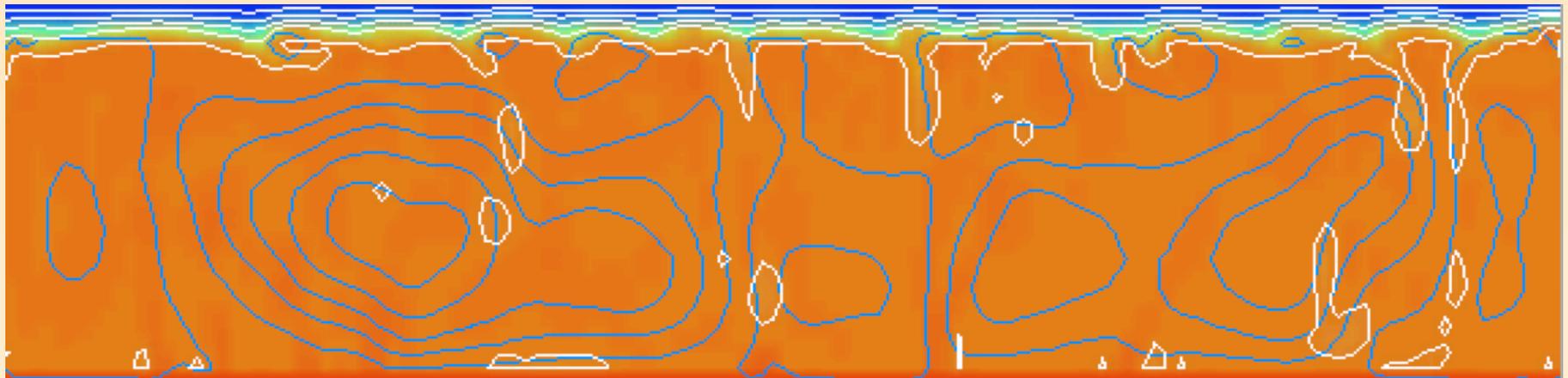
⇒ deux phénomènes en compétition:

1. cisaillement dû à l'accrétion
(V_s : vitesse de surface)
2. flottabilité des instabilités thermiques
(v_i : vitesse moyenne interne)

- contrôle de l'angle de la trace de la FT?

⇒ deux phénomènes en compétition:

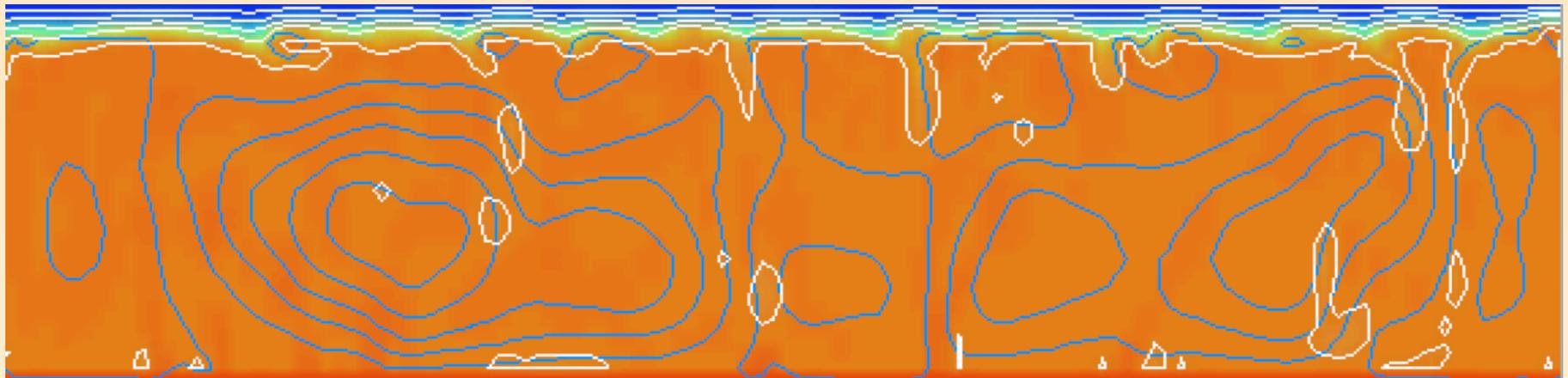
1. cisaillement dû à l'accrétion
(V_s : vitesse de surface)
2. flottabilité des instabilités thermiques
(v_i : vitesse moyenne interne)



- contrôle de l'angle de la trace de la FT?

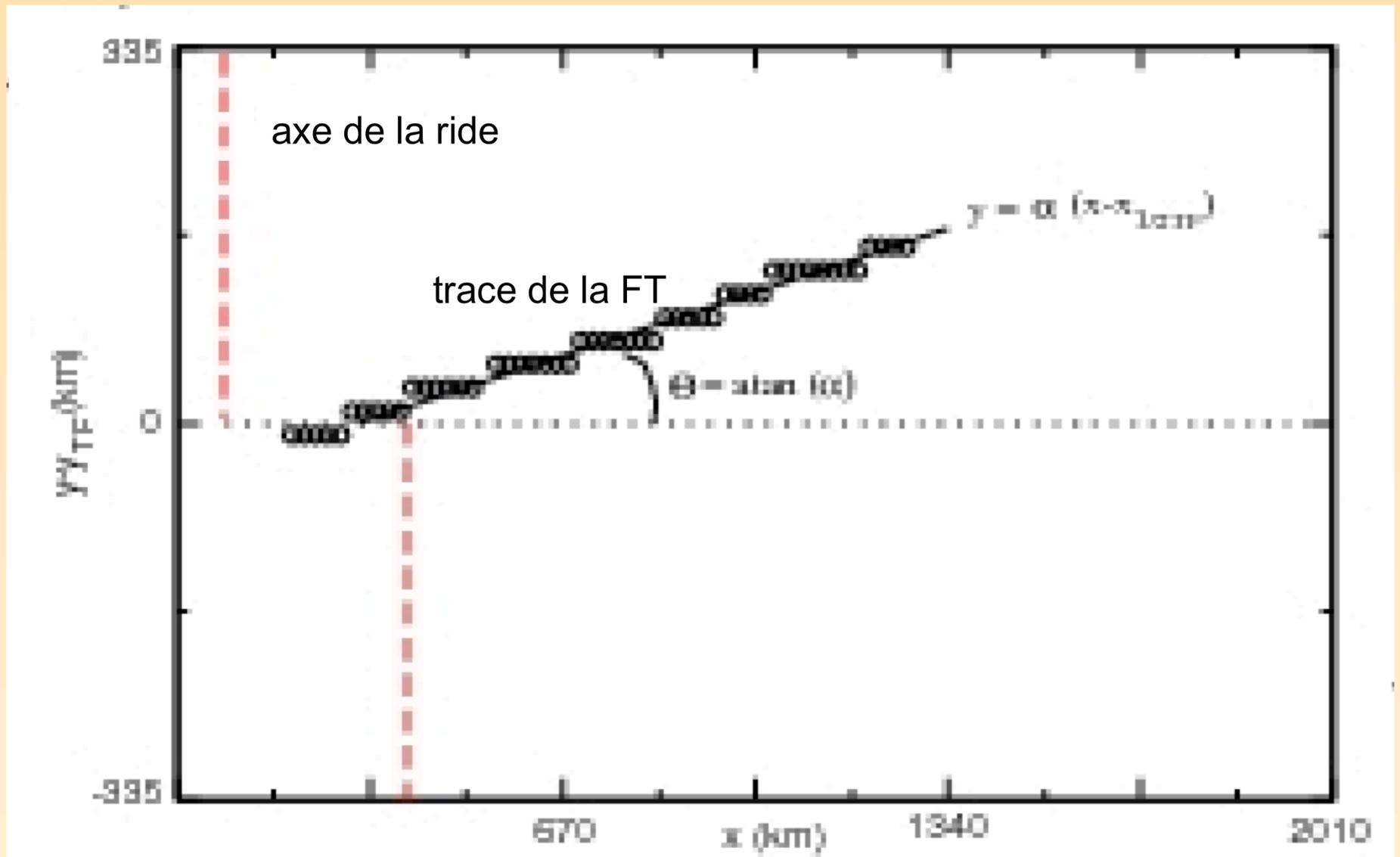
⇒ deux phénomènes en compétition:

1. cisaillement dû à l'accrétion
(V_s : vitesse de surface)
2. flottabilité des instabilités thermiques
(v_i : vitesse moyenne interne)

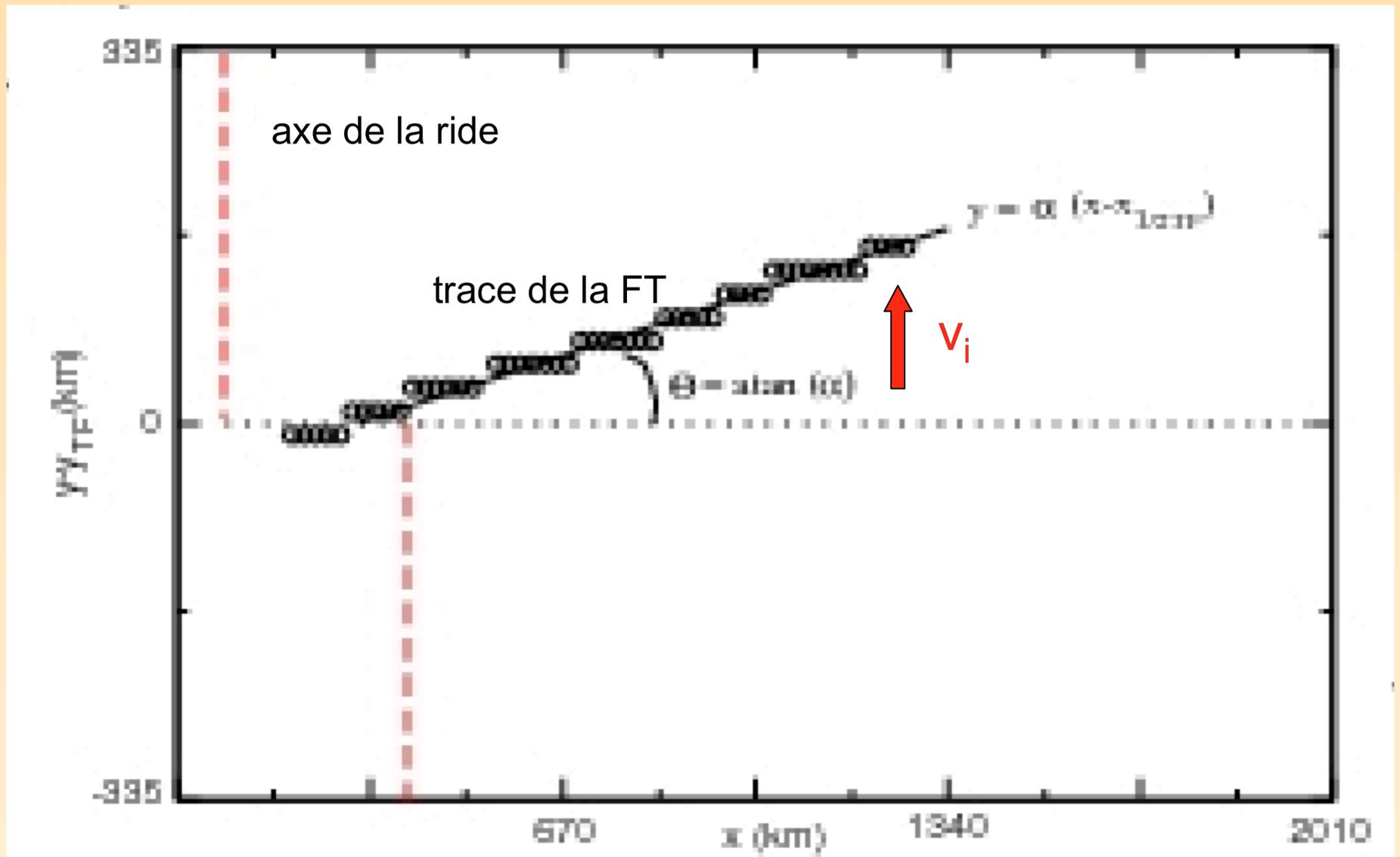


$$v_i = 0.385 \left(Ra_i \frac{RT_i^2}{E_a \Delta T} \right)^{1/2} \frac{K}{d} \quad \text{Solomatov et Moresi (2000)}$$

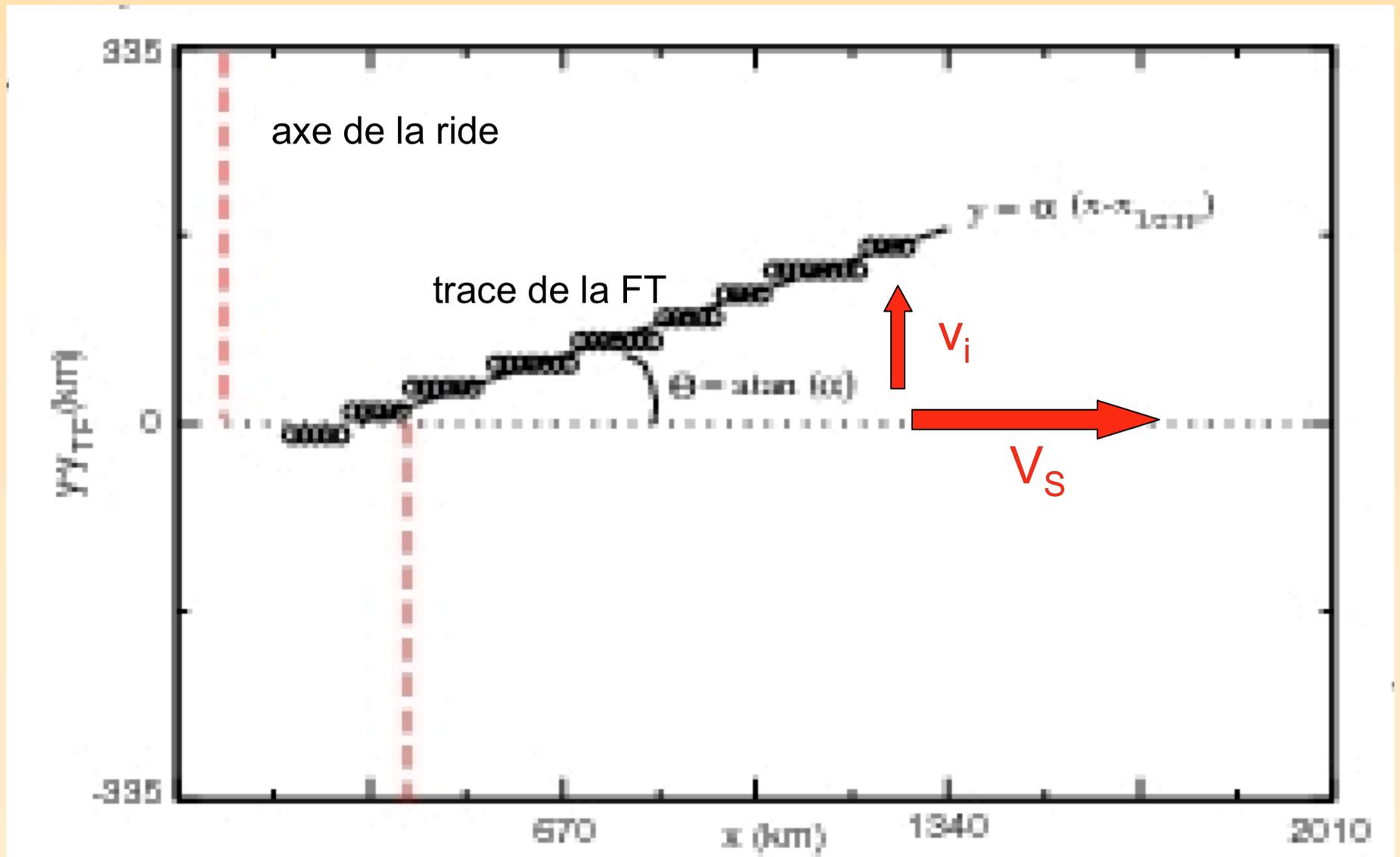
profondeur maximale de la base de la lithosphère



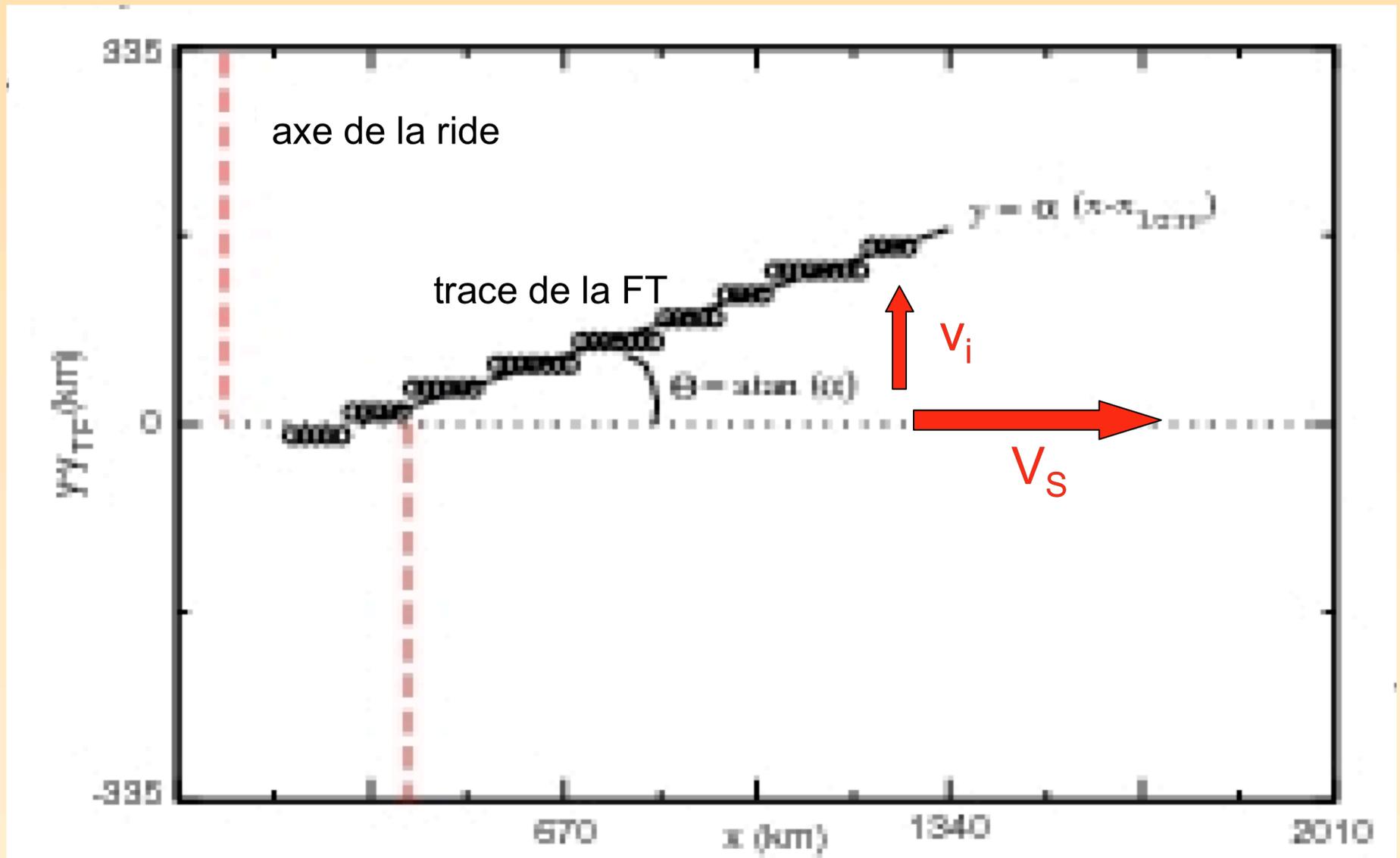
profondeur maximale de la base de la lithosphère



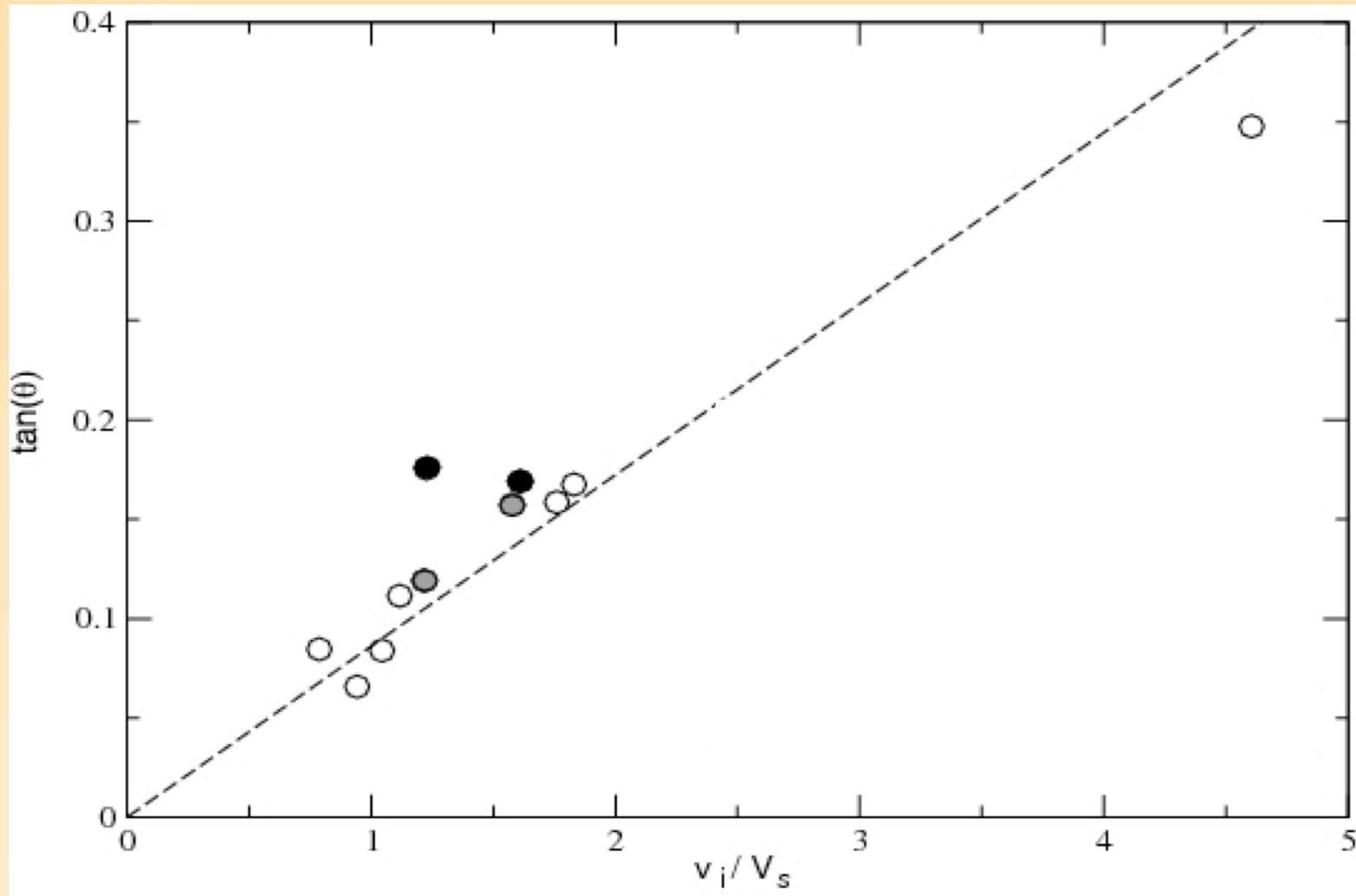
profondeur maximale de la base de la lithosphère

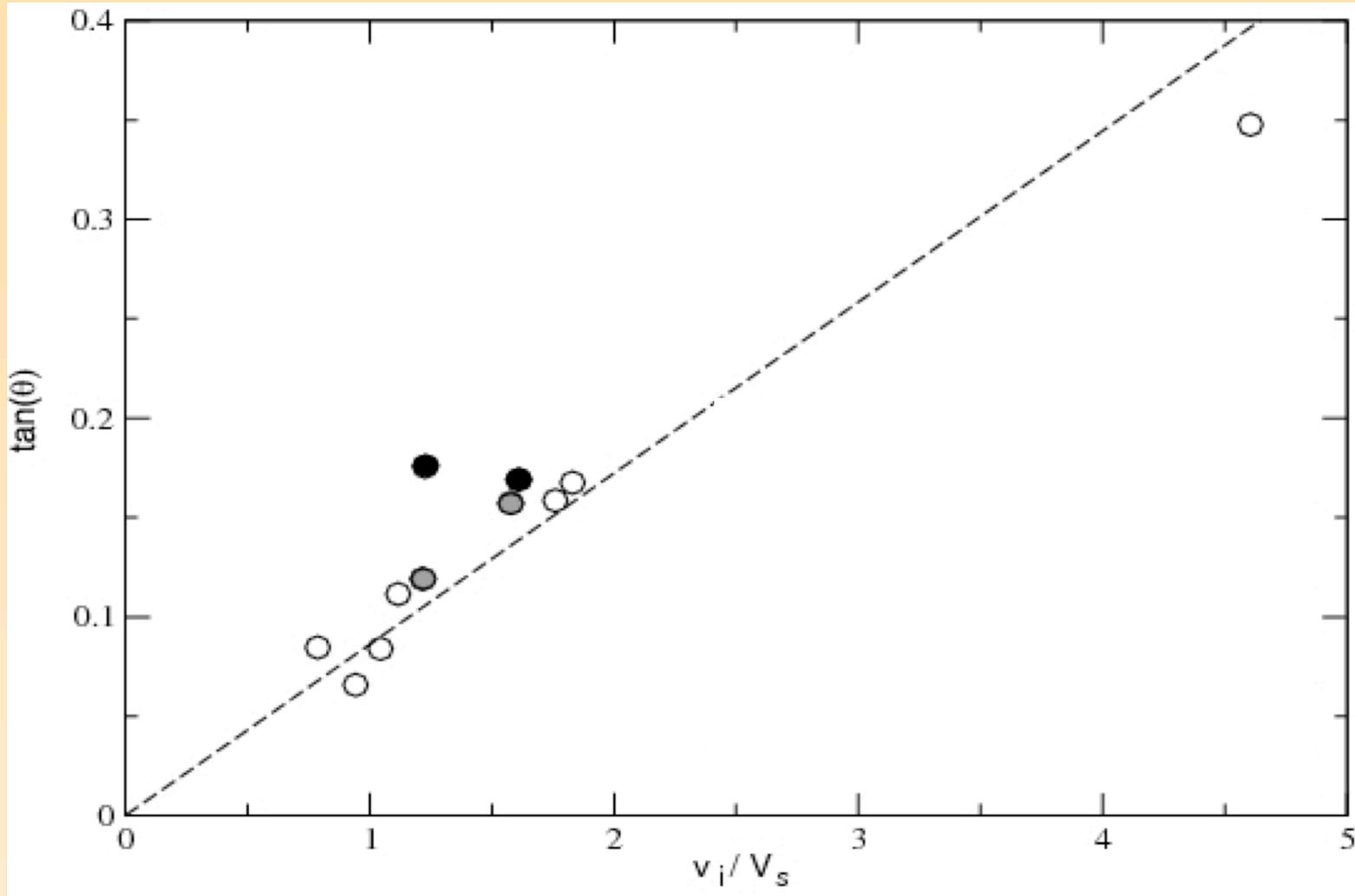


profondeur maximale de la base de la lithosphère

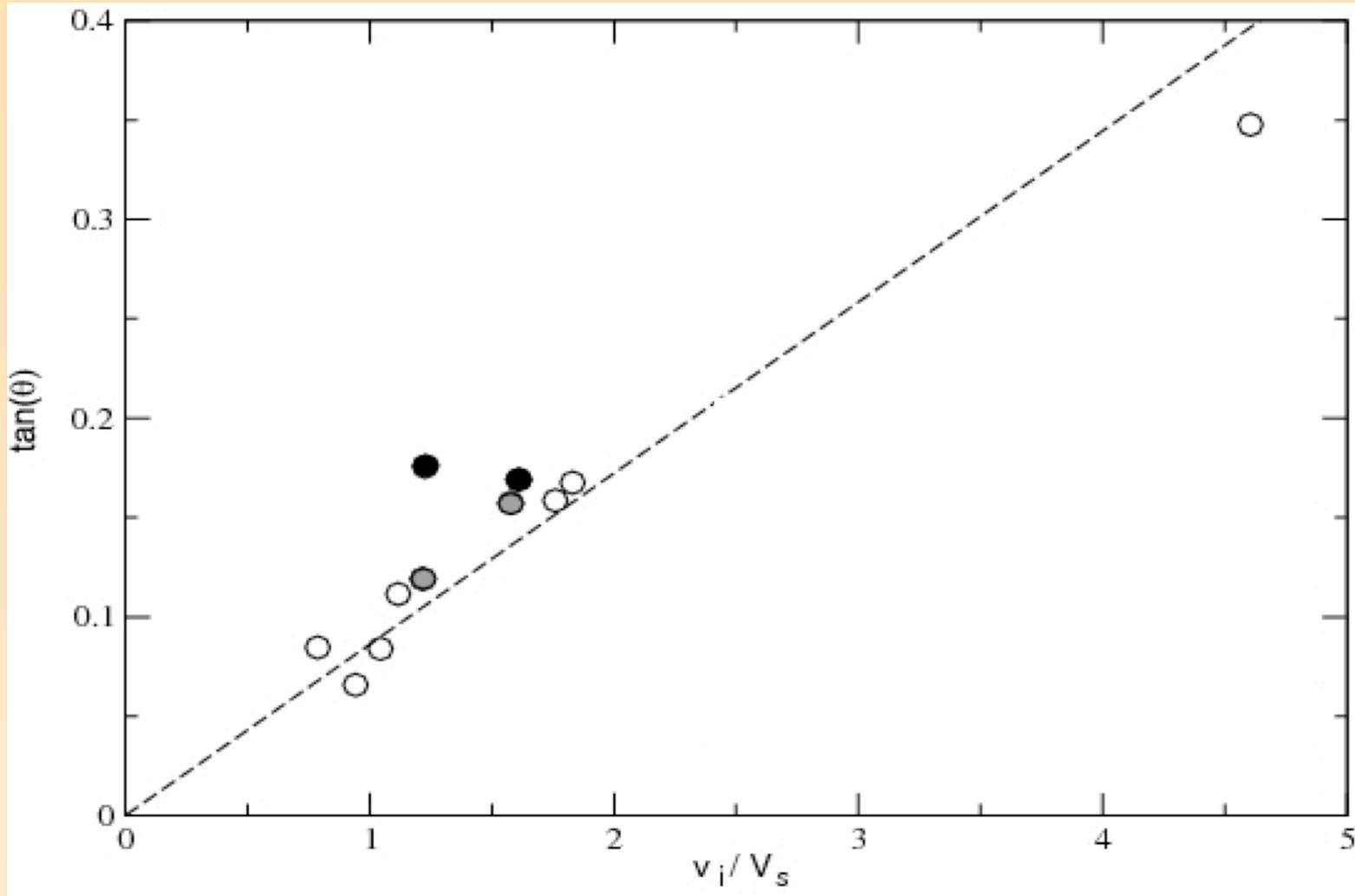


⇒ angle de la trace de la FT: $\tan \theta \propto v_i/V_s$





⇒ pb:



⇒ pb: offset en âge à la FT non pris en compte

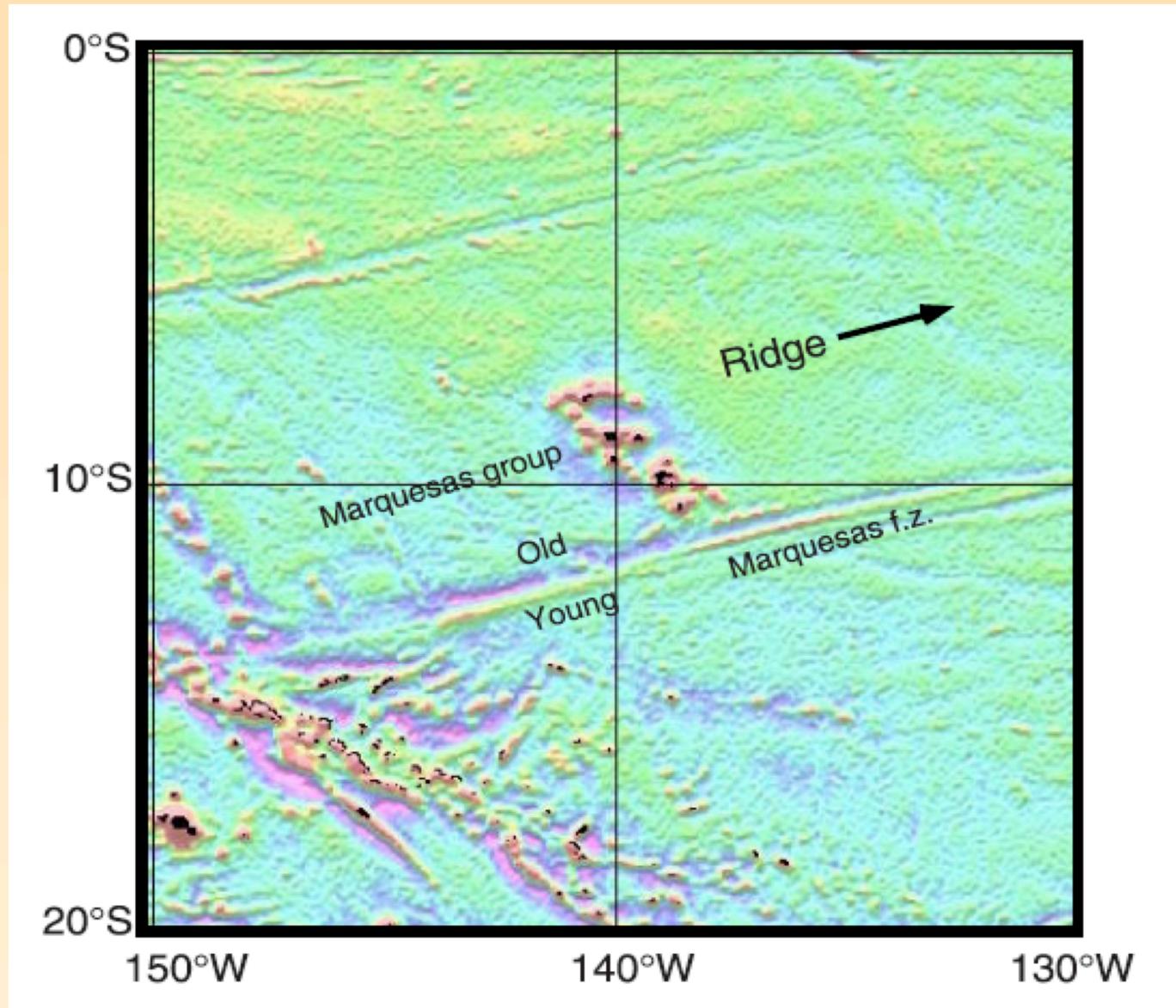
- application à la lithosphère océanique?

- application à la lithosphère océanique?

✓ volcanisme: *Sleep (2002)*

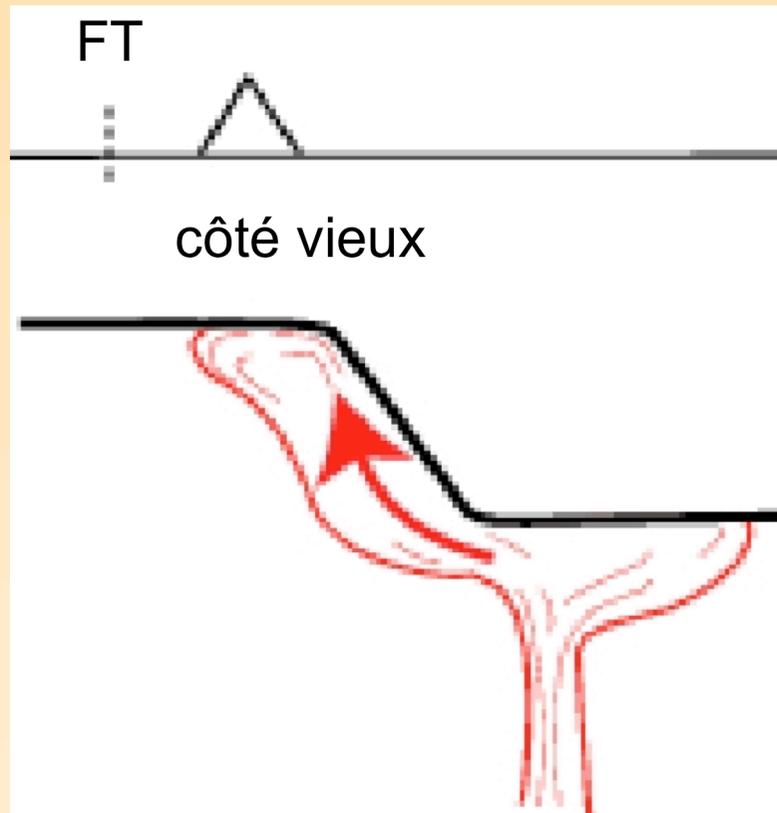
- application à la lithosphère océanique?

✓ volcanisme: *Sleep (2002)*



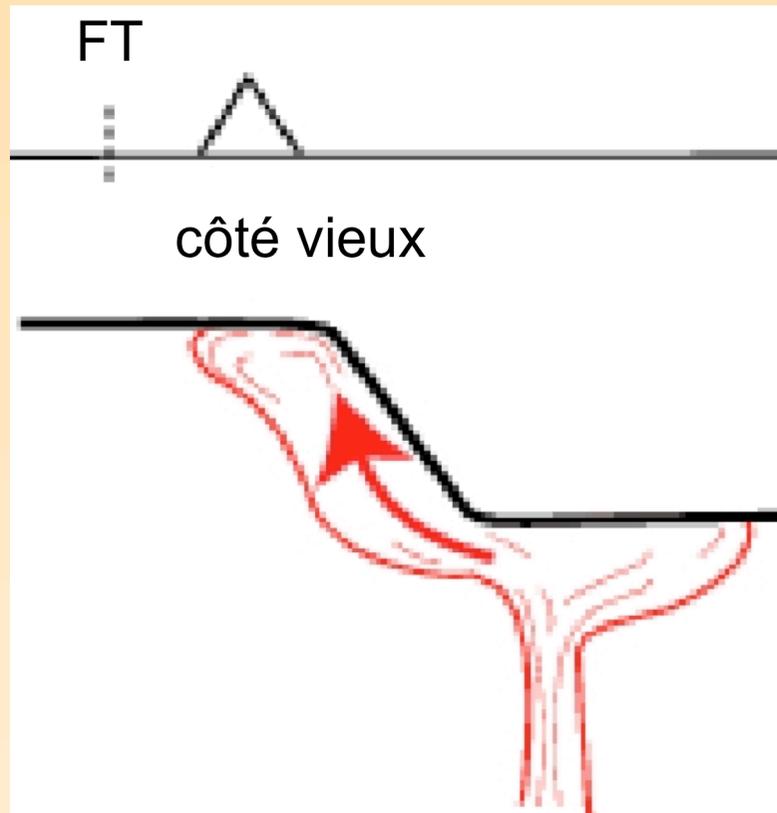
- application à la lithosphère océanique?

✓ volcanisme: *Sleep (2002)*



- application à la lithosphère océanique?

✓ volcanisme: *Sleep (2002)*



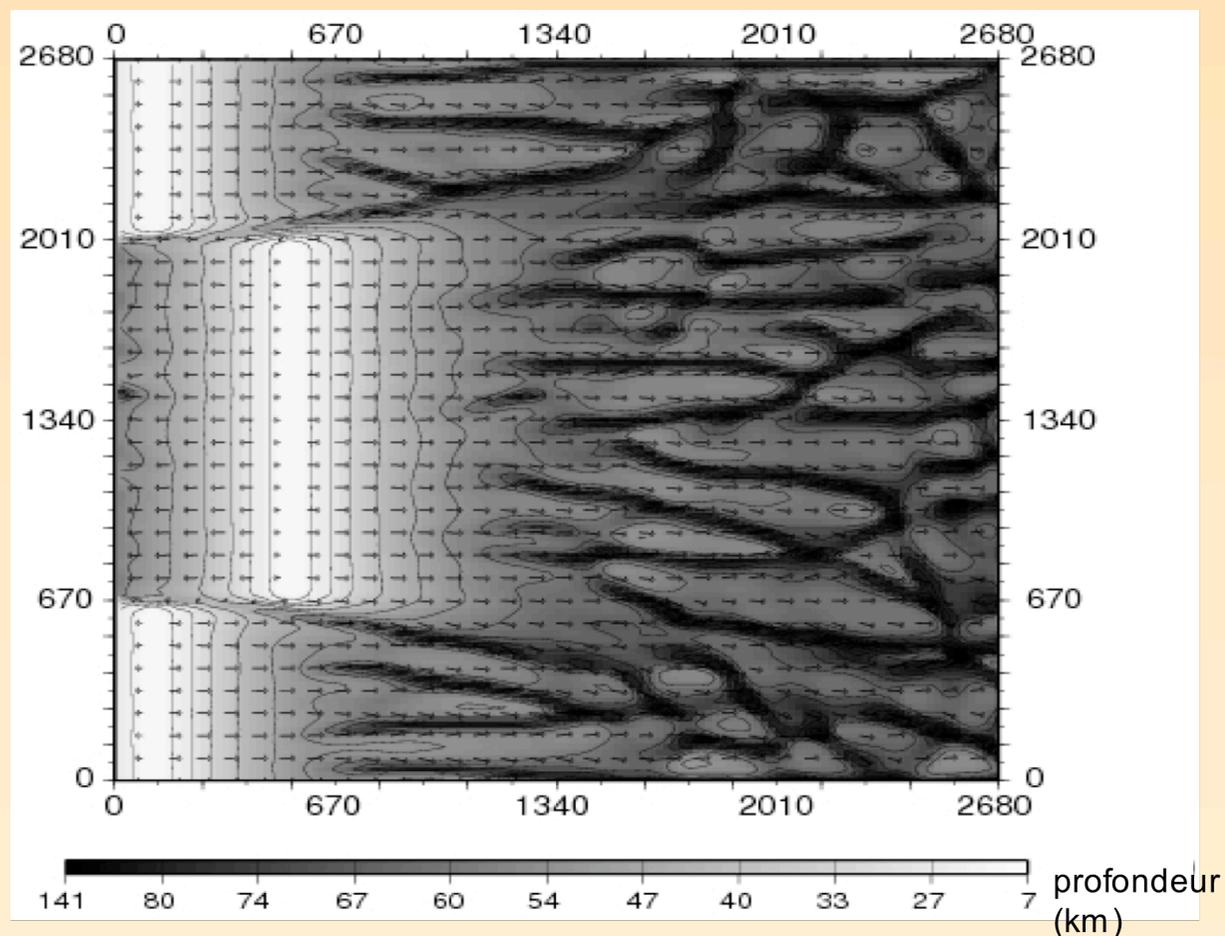
âges de mise en place < 50 Ma, proches FT, côté vieux ???

✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)

- ✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)
 - dépend de la taille de la boîte en y

- ✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)
 - dépend de la taille de la boîte en y
 - mais souvent écoulement «borné»

- ✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)
 - dépend de la taille de la boîte en y
 - mais souvent écoulement «borné»



- ✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)
 - dépend de la taille de la boîte en y
 - mais souvent écoulement «borné»
 - si succession de FT dans le même sens

- ✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)
 - dépend de la taille de la boîte en y
 - mais souvent écoulement «borné»
 - si succession de FT dans le même sens
 - ⇒ augmentation de l'angle

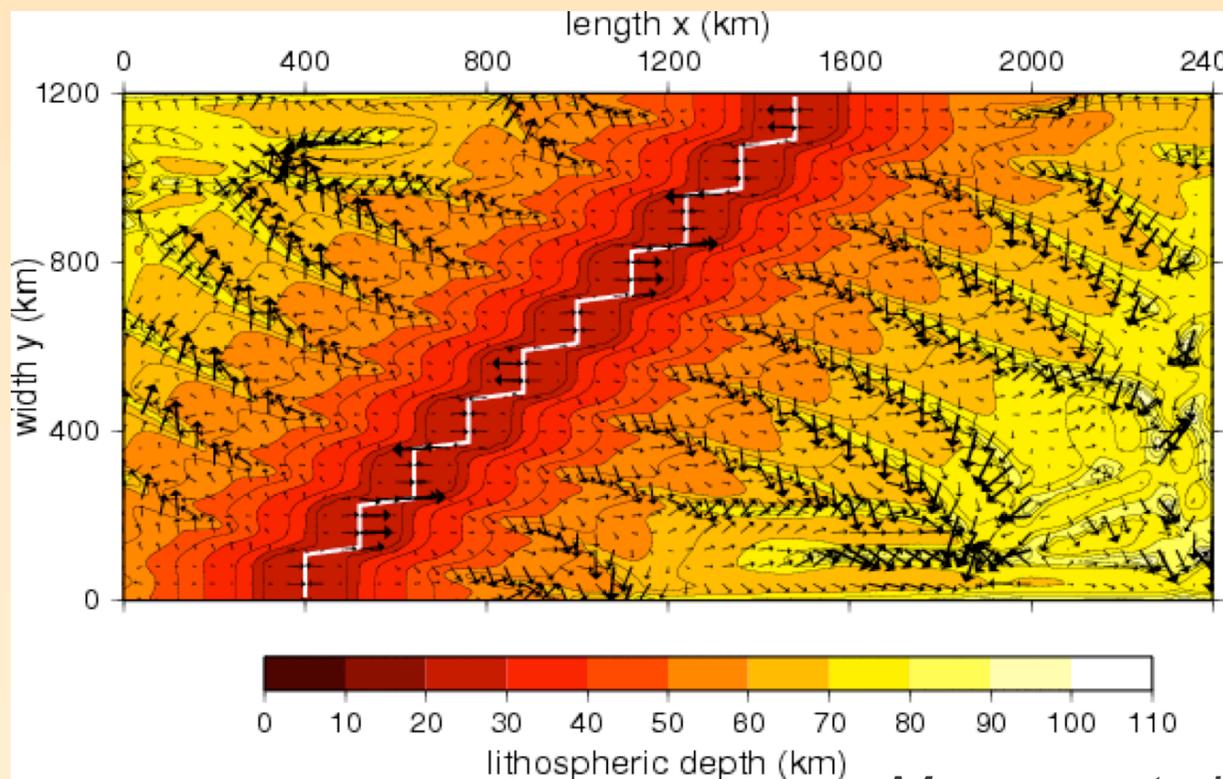
✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)

- dépend de la taille de la boîte en y

- mais souvent écoulement «borné»

- si succession de FT dans le même sens

⇒ augmentation de l'angle



Morency et al. (2005)

✓ extension de l'écoulement latéral («edge-driven»)

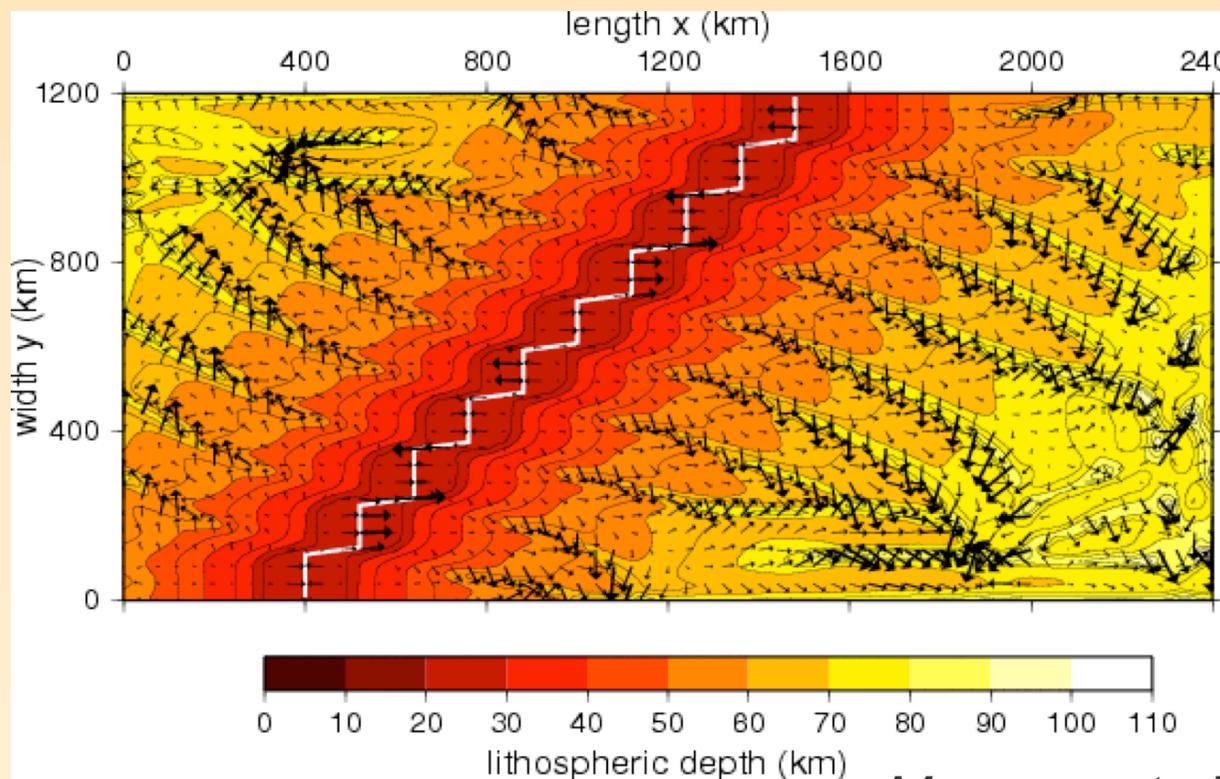
- dépend de la taille de la boîte en y

- mais souvent écoulement «borné»

- si succession de FT dans le même sens

⇒ augmentation de l'angle

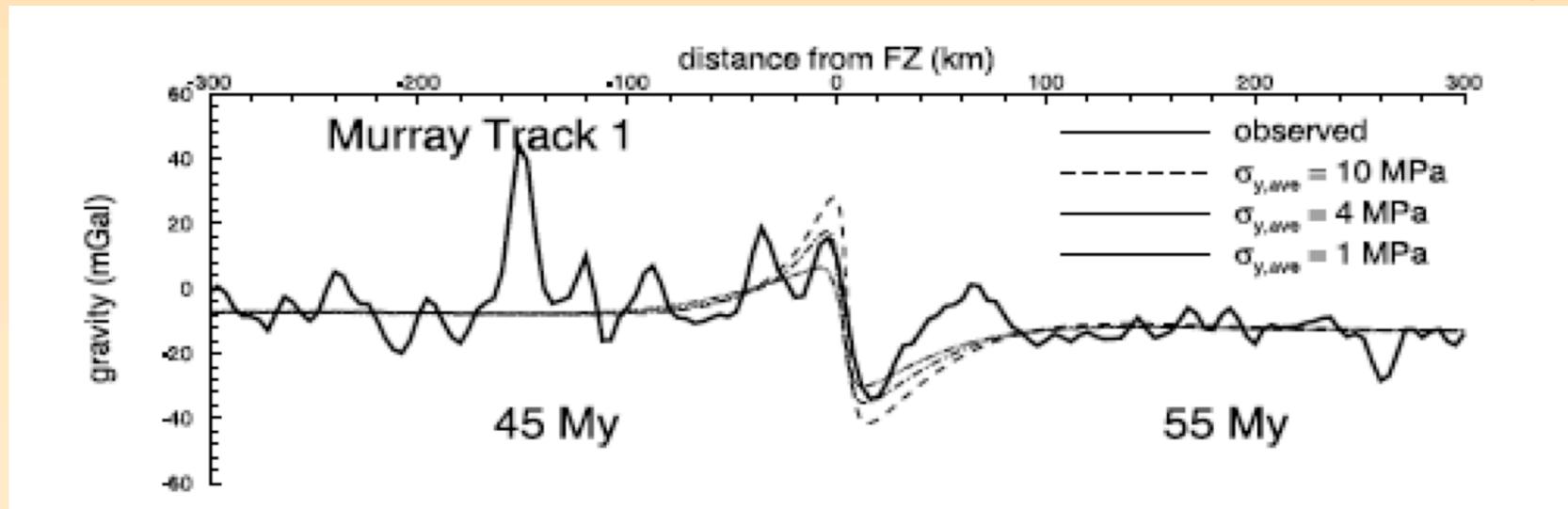
⇒ impact sur l'anisotropie?



Morency et al. (2005)

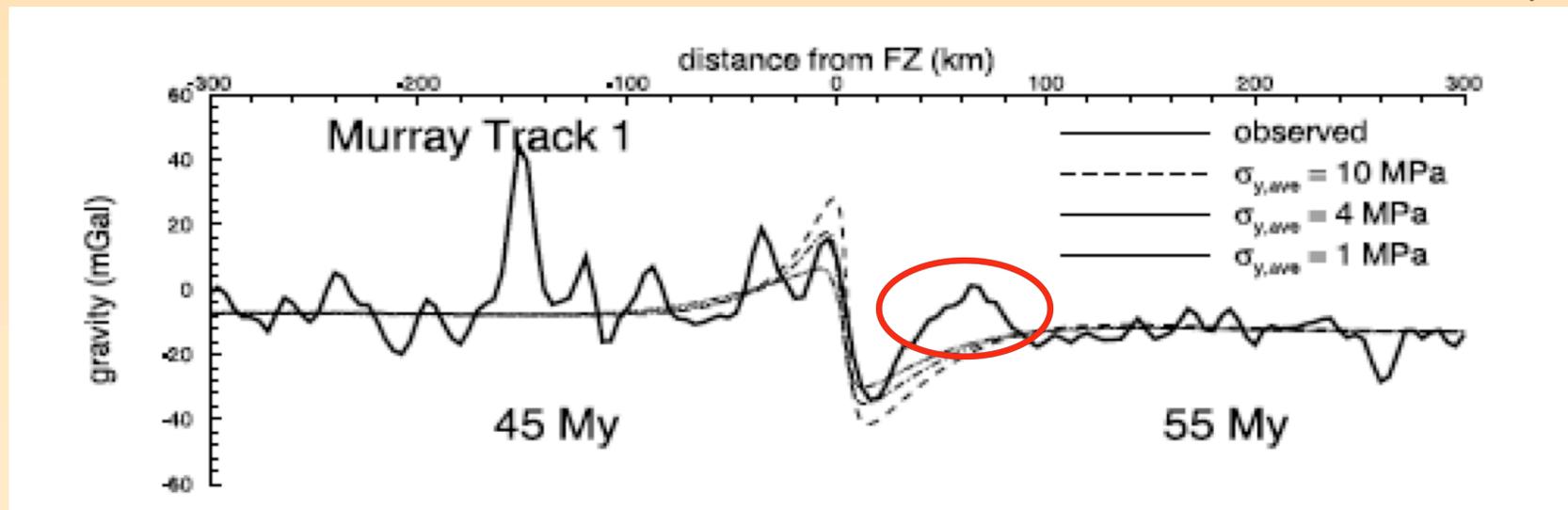
✓ anomalies de gravité

Hall et Gurnis (2005)



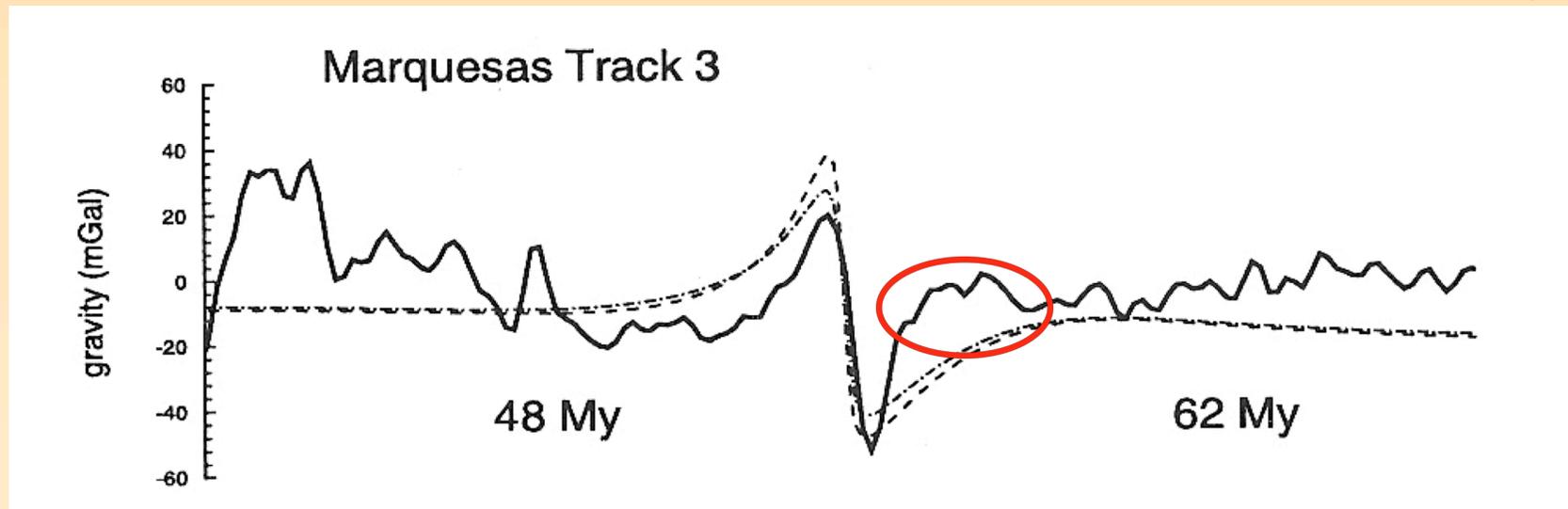
✓ anomalies de gravité

Hall et Gurnis (2005)



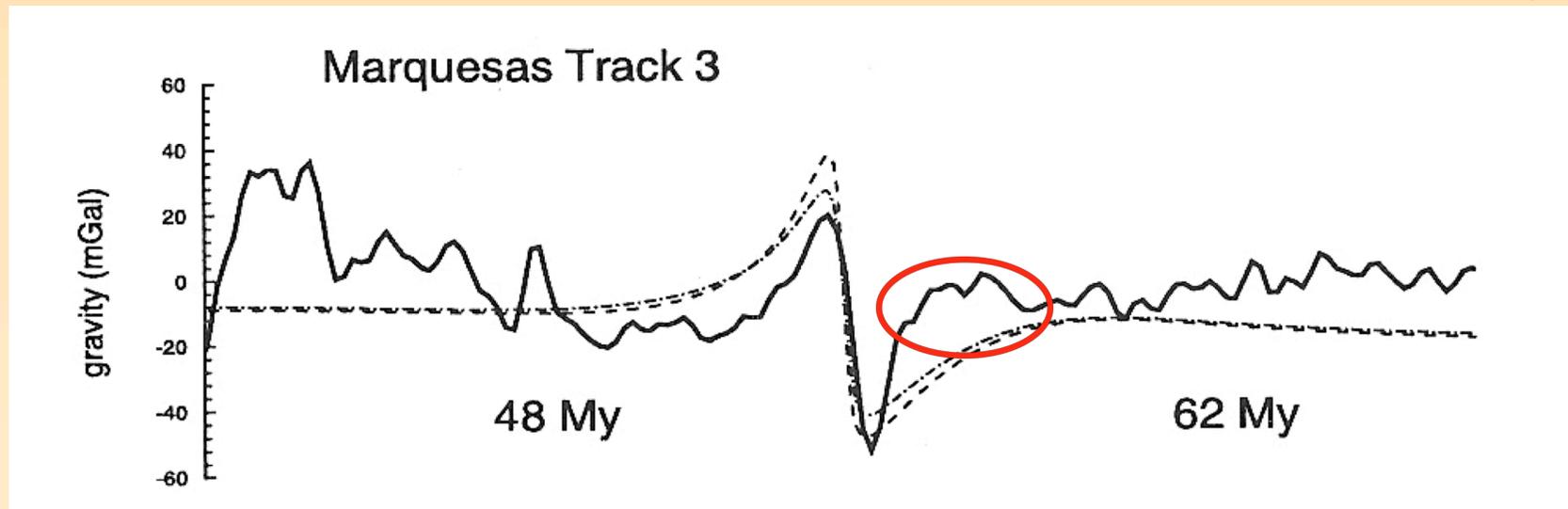
✓ anomalies de gravité

Hall et Gurnis (2005)

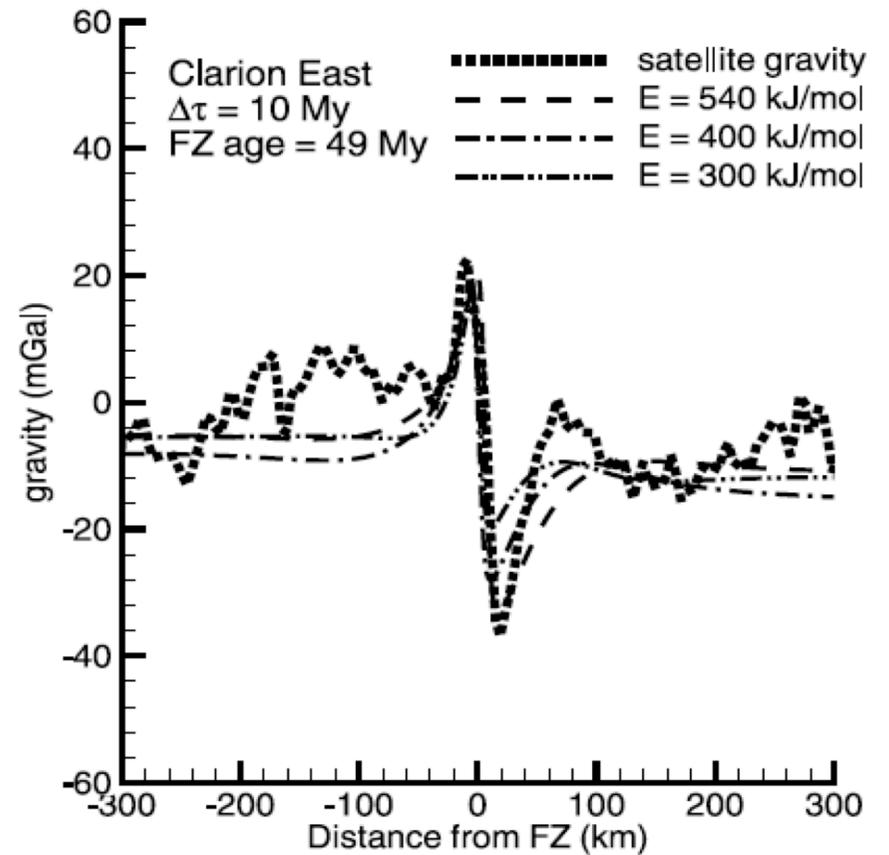
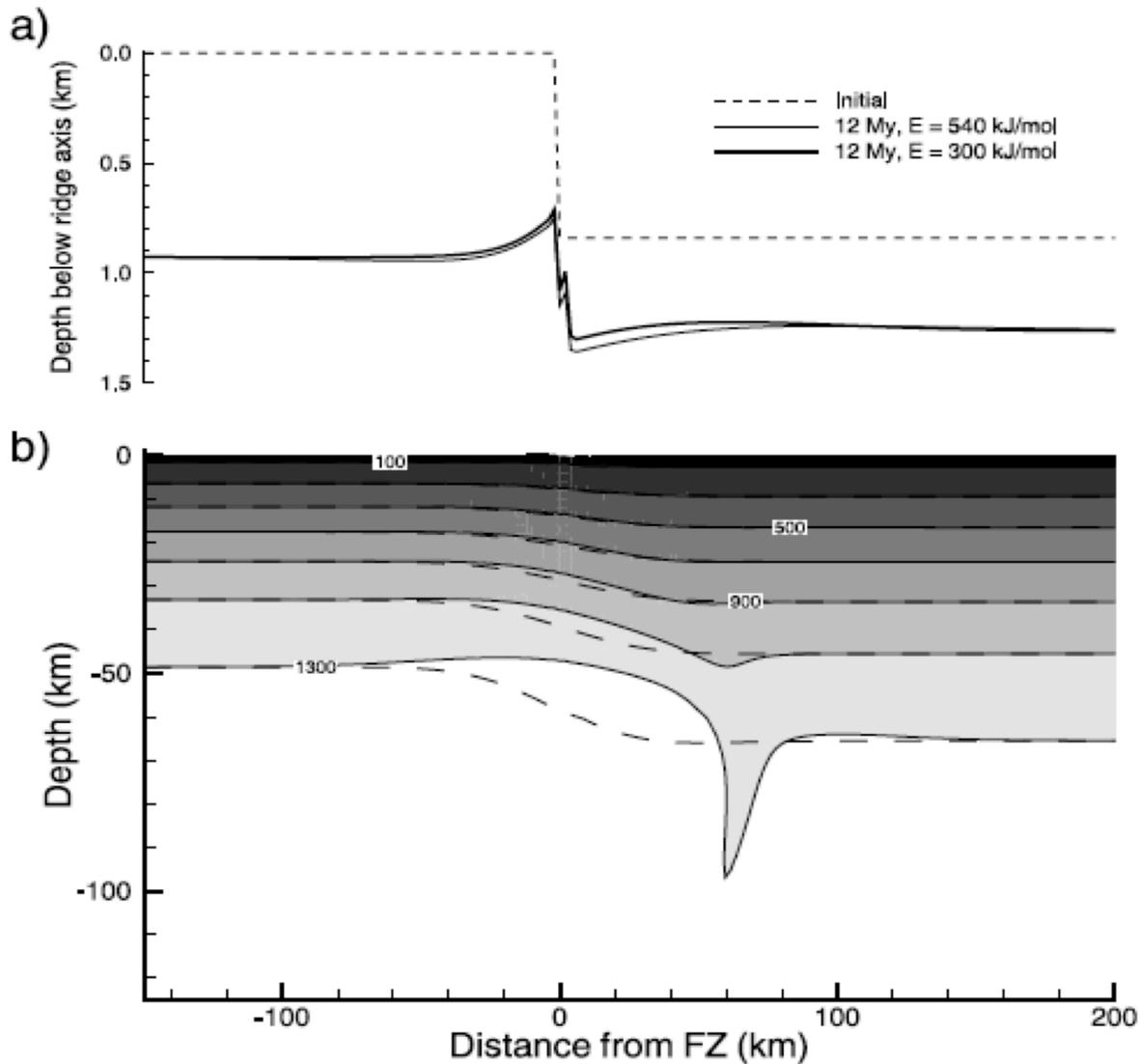


✓ anomalies de gravité

Hall et Gurnis (2005)



✓ anomalies de gravité



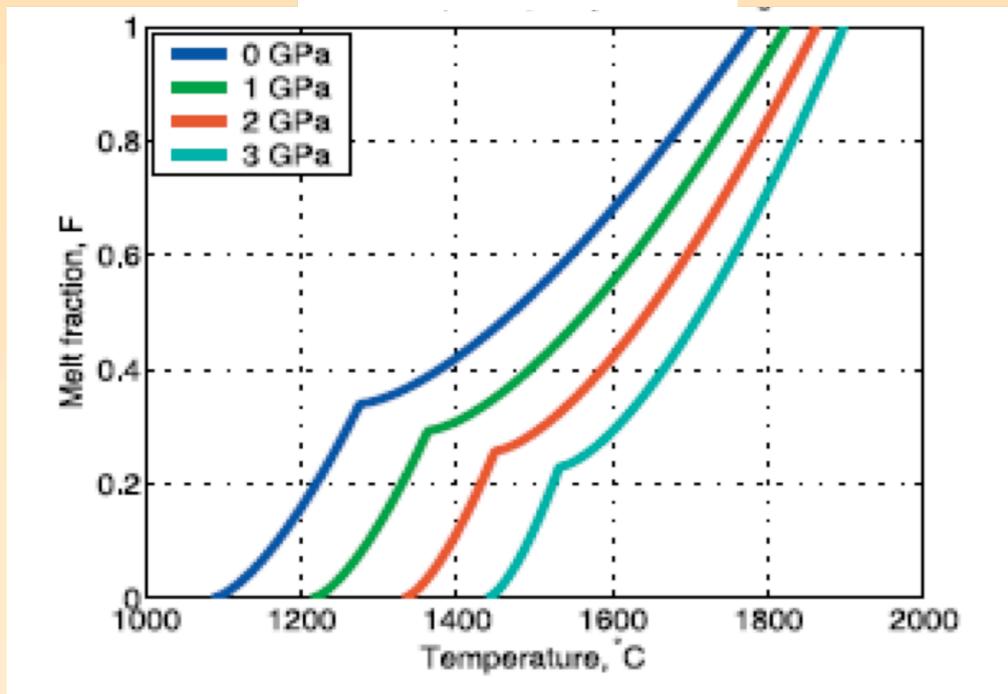
Partie III: Rôle de la fusion partielle

- Modélisation de la fusion partielle

- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

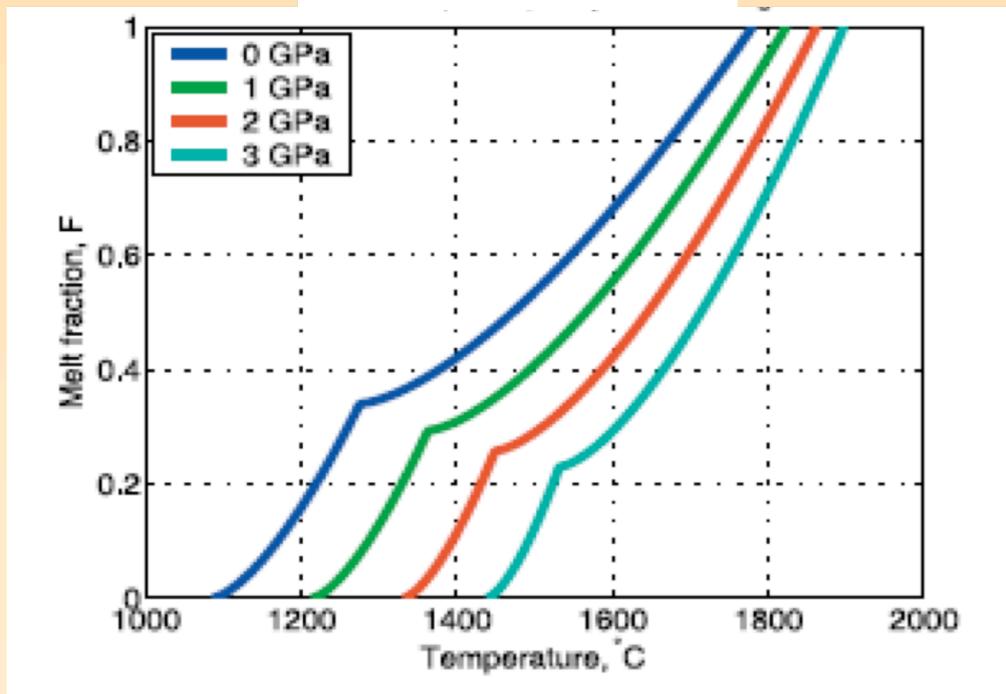
- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion anhydre



- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion anhydre

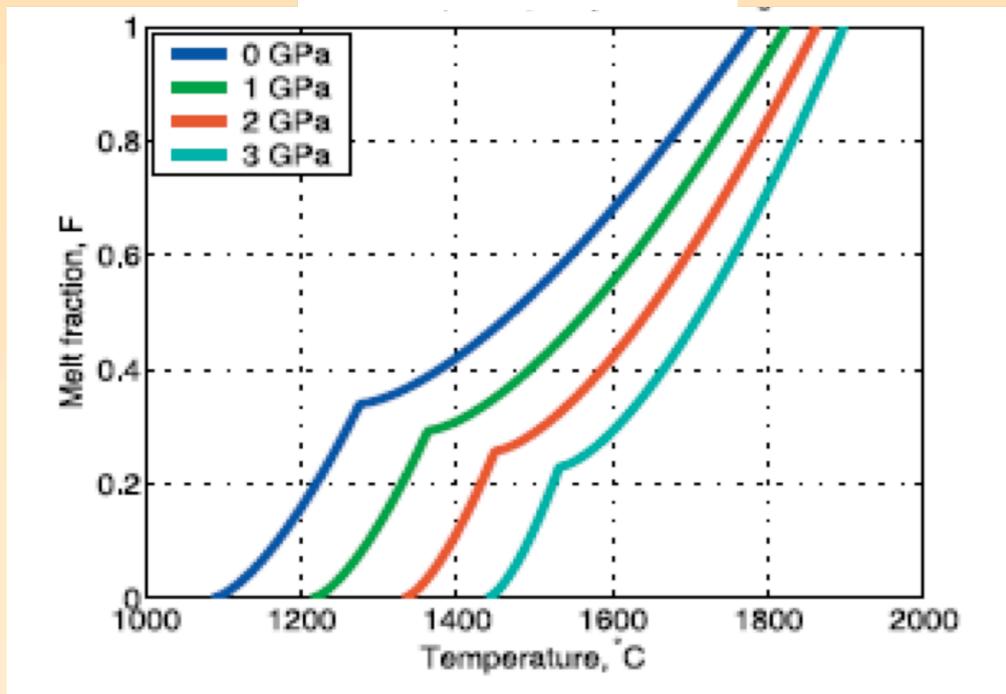


fraction modale en cpx initiale

$$F_{cpx-out} = \frac{M_{cpx}}{R_{cpx}(P)}$$

- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion anhydre



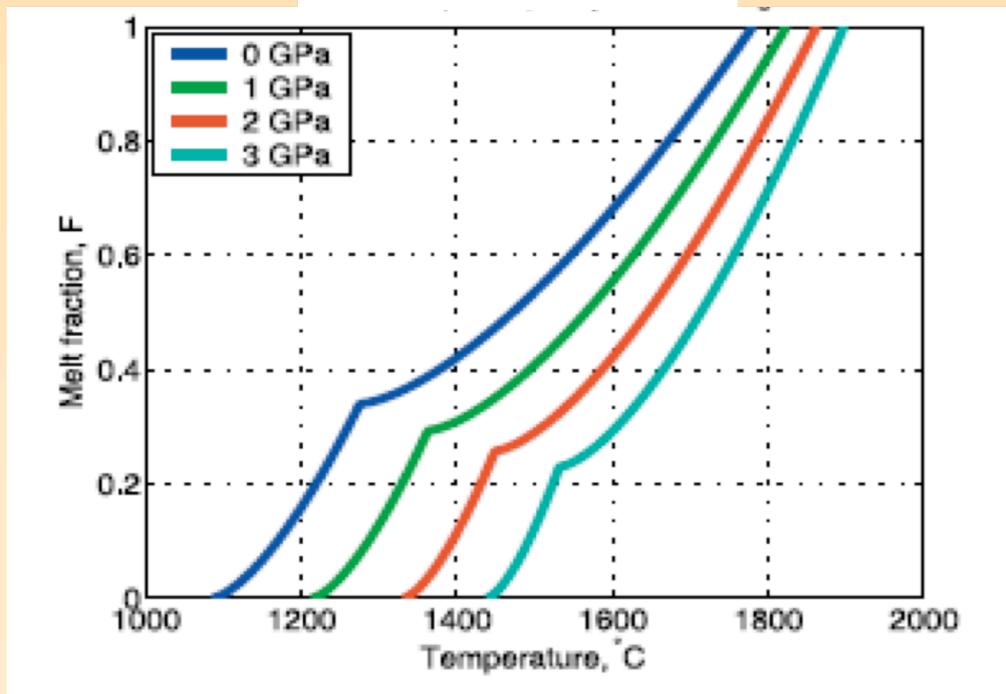
disparition du cpx

fraction modale en cpx initiale

$$F_{cpx-out} = \frac{M_{cpx}}{R_{cpx(P)}}$$

- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion anhydre



disparition du cpx

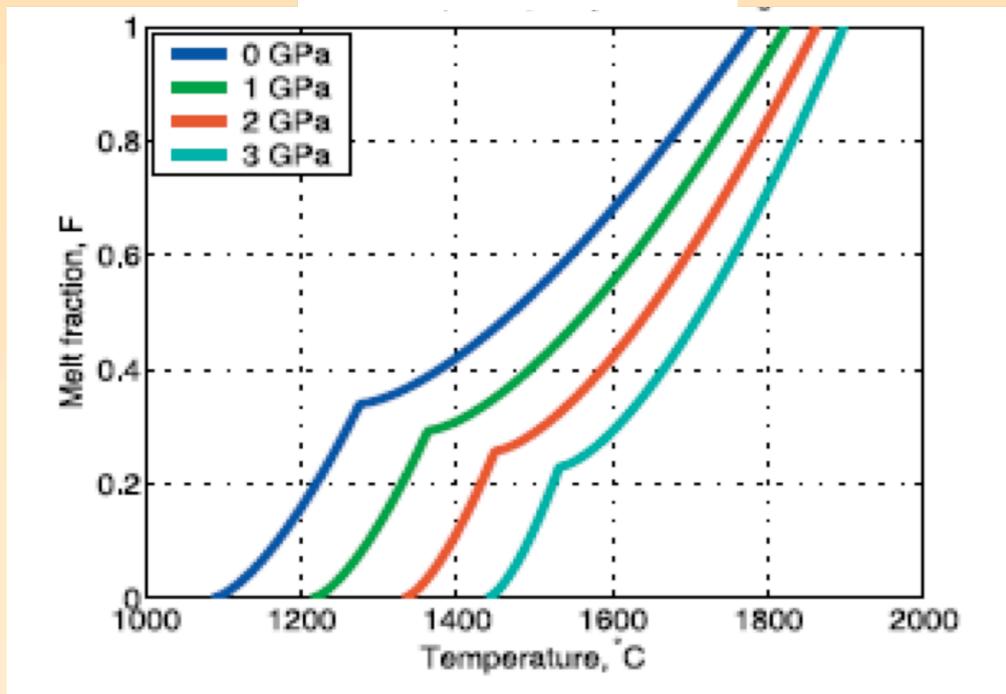
fraction modale en cpx initiale

$$F_{cpx-out} = \frac{M_{cpx}}{R_{cpx(P)}}$$

on néglige l'impact sur F de l'épuisement de la phase Al

- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion anhydre



disparition du cpx

fraction modale en cpx initiale

$$F_{cpx-out} = \frac{M_{cpx}}{R_{cpx(P)}}$$

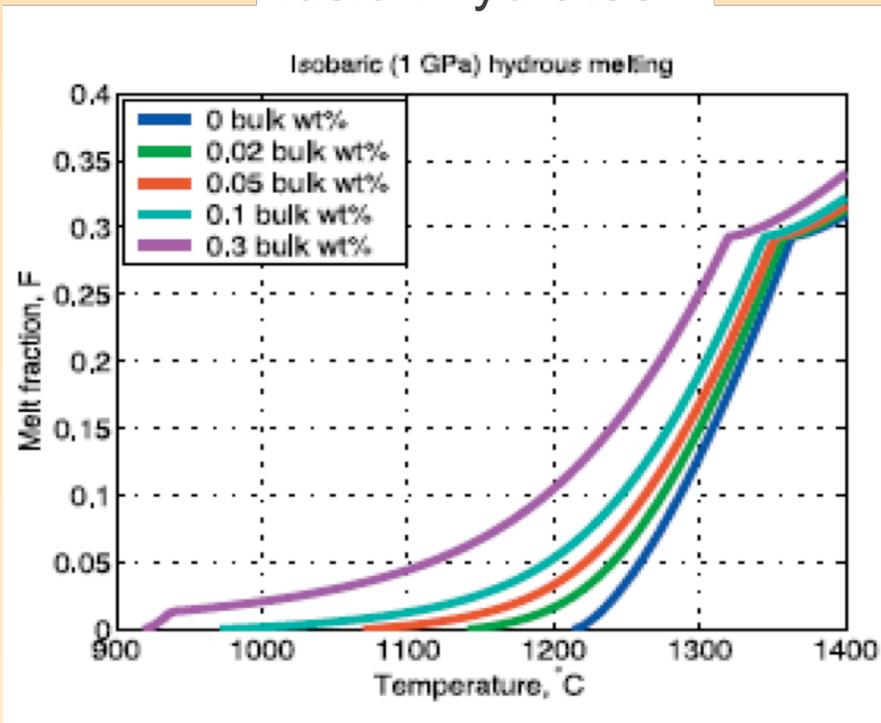
on néglige l'impact sur F de l'épuisement de la phase Al

on ne considère pas le liquidus de l'hartzburgite car F trop faible

- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

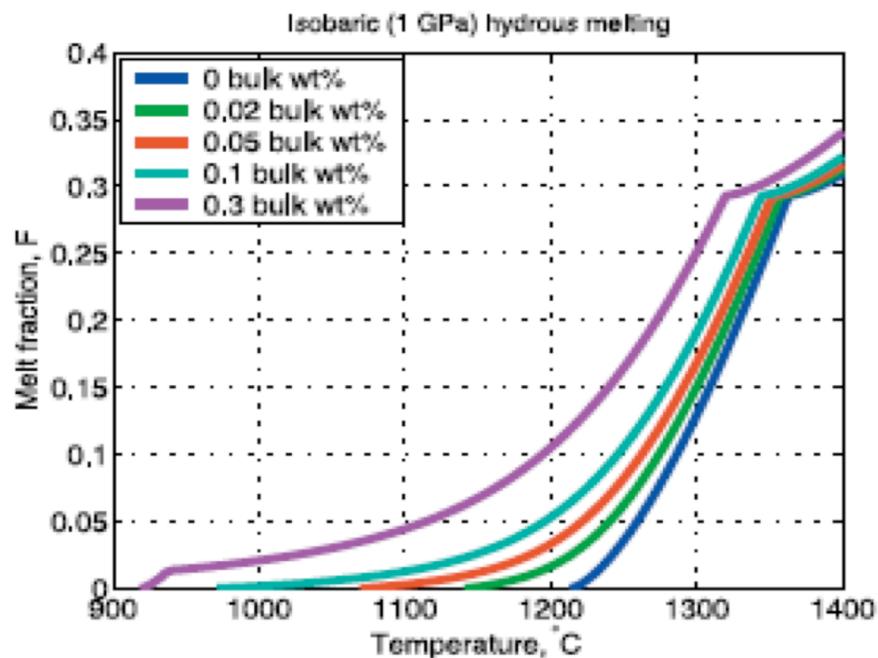
- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion hydratée



- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion hydratée

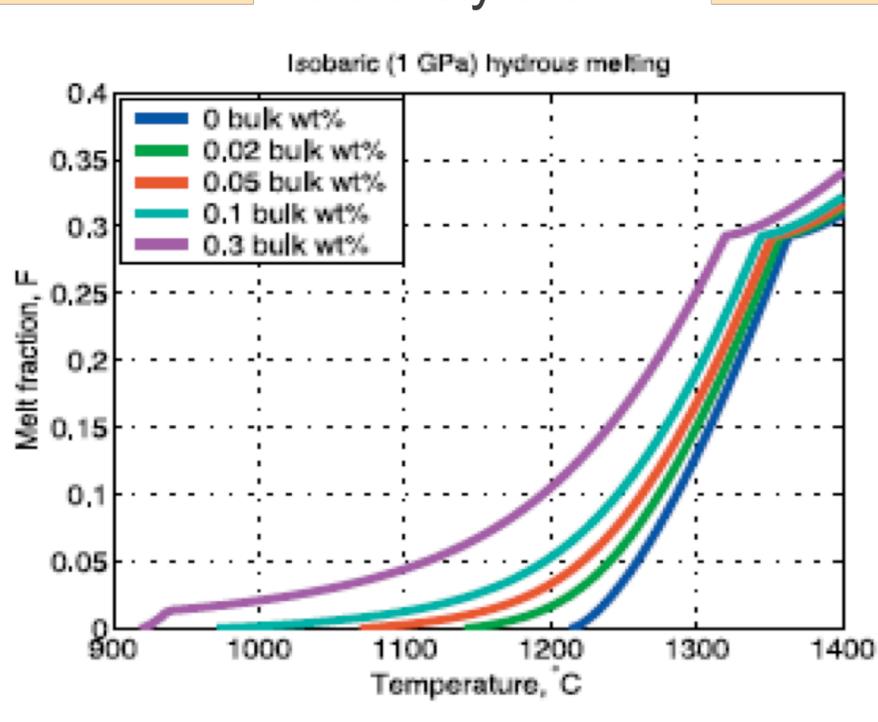


% d'eau dans le liquide

$$X_{H_2O} = \frac{X_{H_2O}^{bulk}}{D_{H_2O} + F(1 - D_{H_2O})}$$

- Modélisation de la fusion partielle
 - paramétrisation de *Katz et al. (2003)*

fusion hydratée



% d'eau dans le liquide

$$X_{H_2O} = \frac{X_{H_2O}^{bulk}}{D_{H_2O} + F(1 - D_{H_2O})}$$

$$\Rightarrow F(P, T, X_{H_2O})$$

- extraction du liquide: formation de croûte
(porosité maximale: 2%)

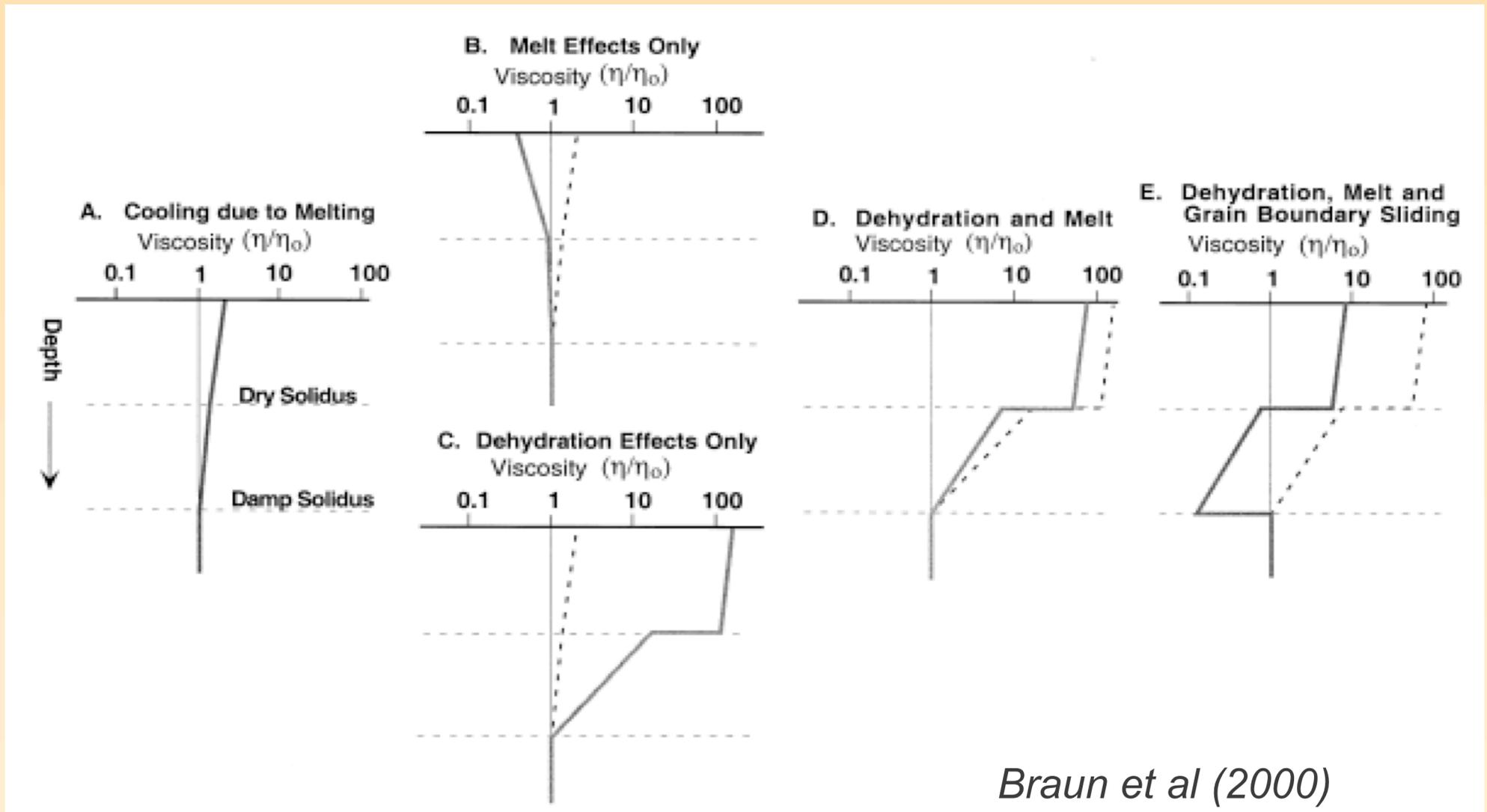
- extraction du liquide: formation de croûte
(porosité maximale: 2%)

- fraction modale initiale de cpx: 17%,
contenu en eau de la péridotite initiale: 0,125%

- extraction du liquide: formation de croûte (porosité maximale: 2%)
- fraction modale initiale de cpx: 17%,
contenu en eau de la péridotite initiale: 0,125%
- chaleur latente de fusion

- extraction du liquide: formation de croûte (porosité maximale: 2%)
- fraction modale initiale de cpx: 17%,
contenu en eau de la péridotite initiale: 0,125%
- chaleur latente de fusion
- hypothèse: c'est la quantité de liquide dans la matrice solide qui joue sur les propriétés physiques et non sa composition chimique

- Rôle sur la viscosité



Braun et al (2000)

- Rôle sur la densité

- Rôle sur la densité
 - diminution de la densité en fonction de la quantité de liquide: $-\Delta\rho.\phi$

- Rôle sur la densité

- diminution de la densité en fonction de la quantité de liquide: $-\Delta\rho.\phi$

- diminution de la densité du résidu car oxyde de Fe (incompatible) plus lourd qu'oxyde de Mg (réfractaire)

- Rôle sur la densité

- diminution de la densité en fonction de la quantité de liquide: $-\Delta\rho.\phi$

- diminution de la densité du résidu car oxyde de Fe (incompatible) plus lourd qu'oxyde de Mg (réfractaire)

- et phase alumineuse plus lourde (>30km)

- Rôle sur la densité

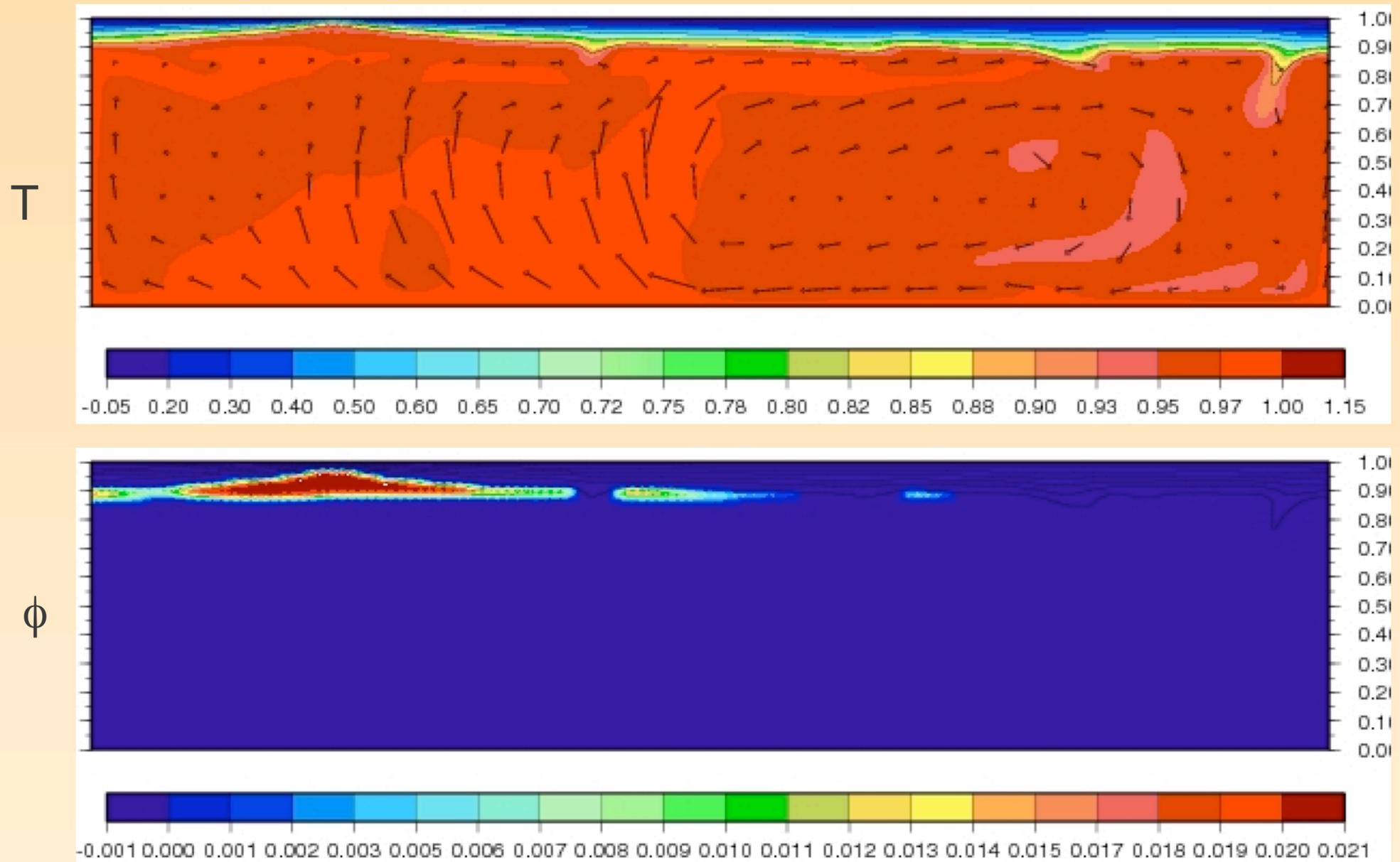
- diminution de la densité en fonction de la quantité de liquide: $-\Delta\rho.\phi$

- diminution de la densité du résidu car oxyde de Fe (incompatible) plus lourd qu'oxyde de Mg (réfractaire)

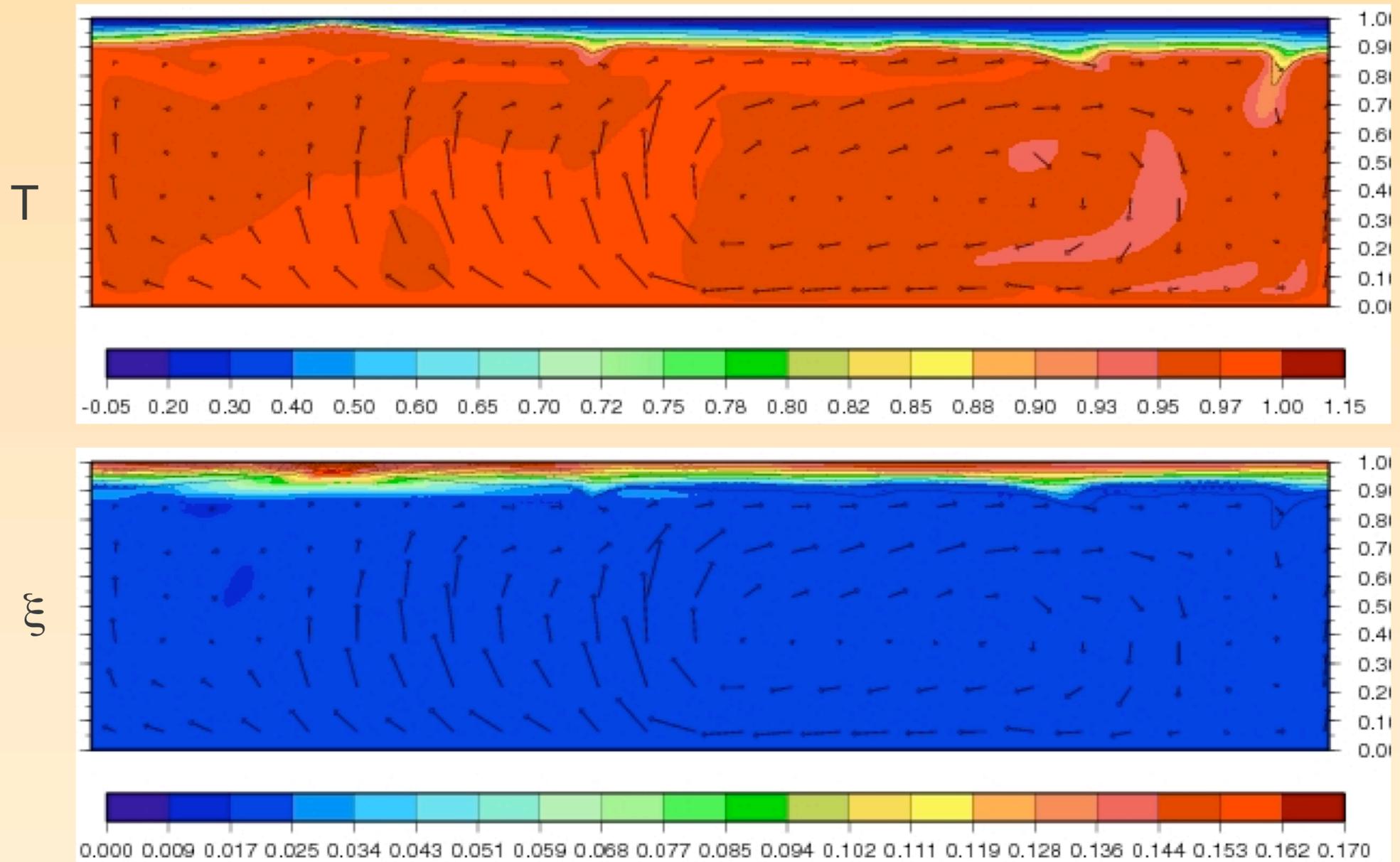
- et phase alumineuse plus lourde (>30km)

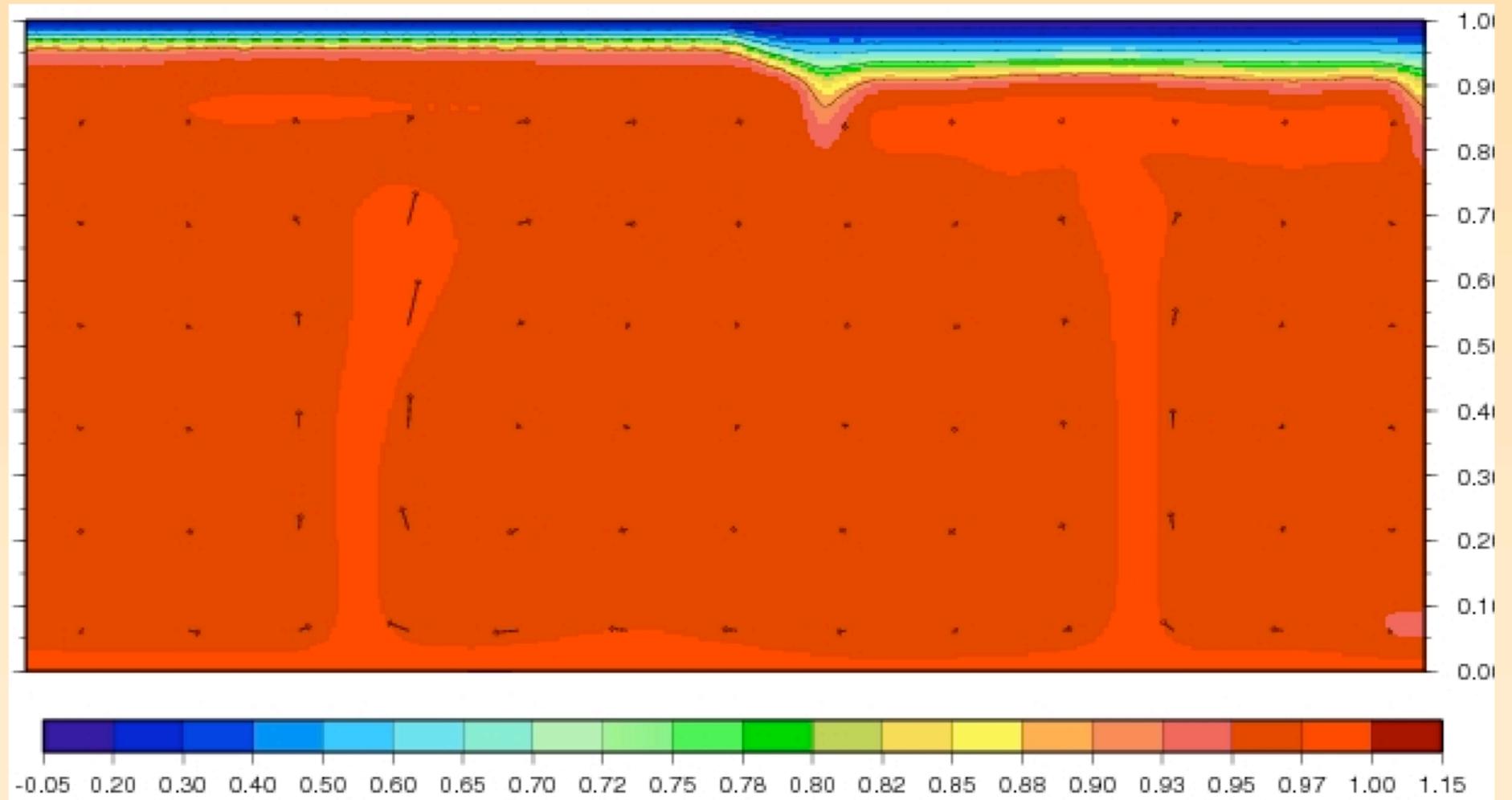
- $$- (\Delta\rho_{\text{depl}}/\rho_0).\xi$$

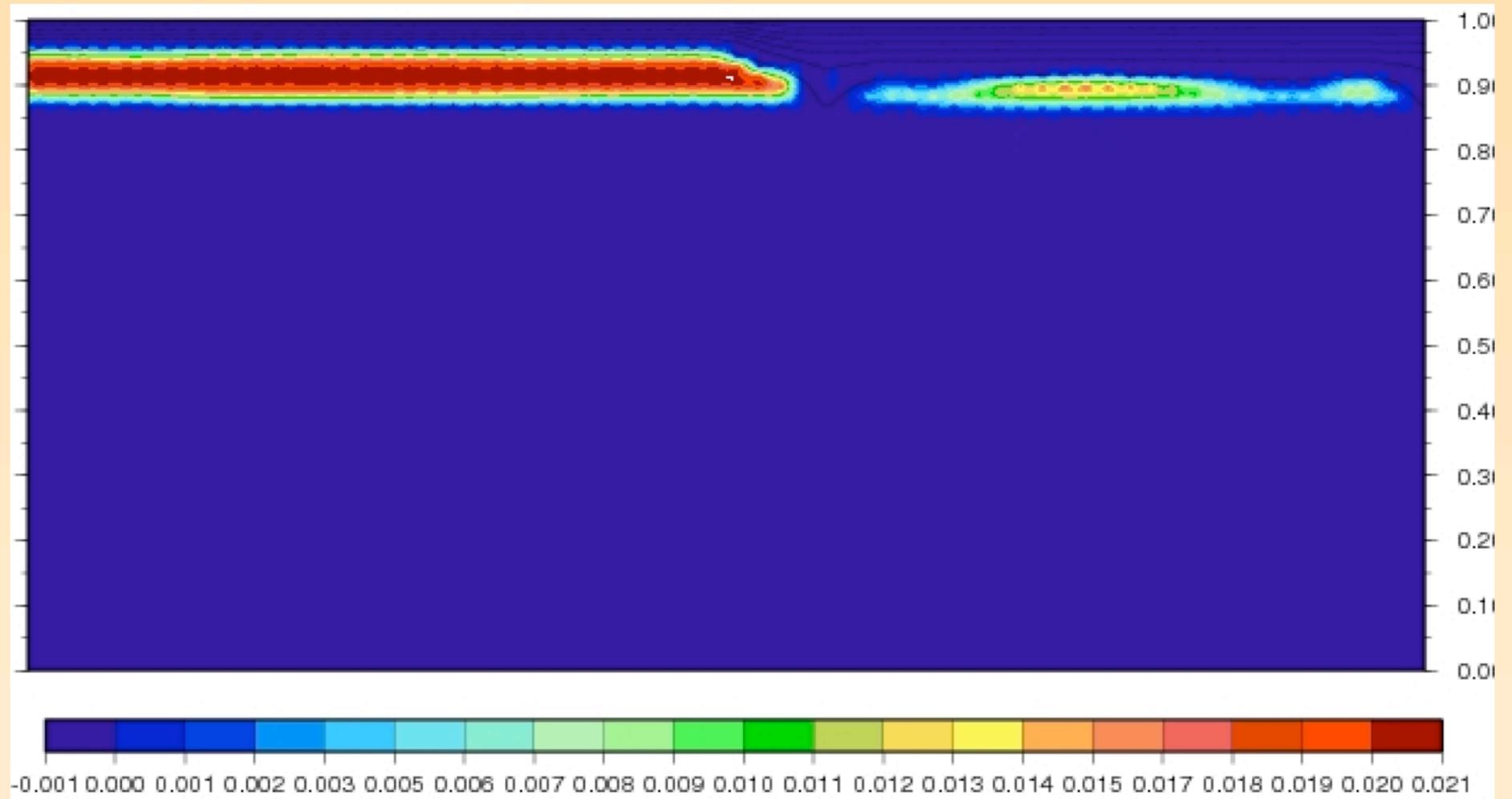
- Résultats sans changement de la viscosité et de la densité

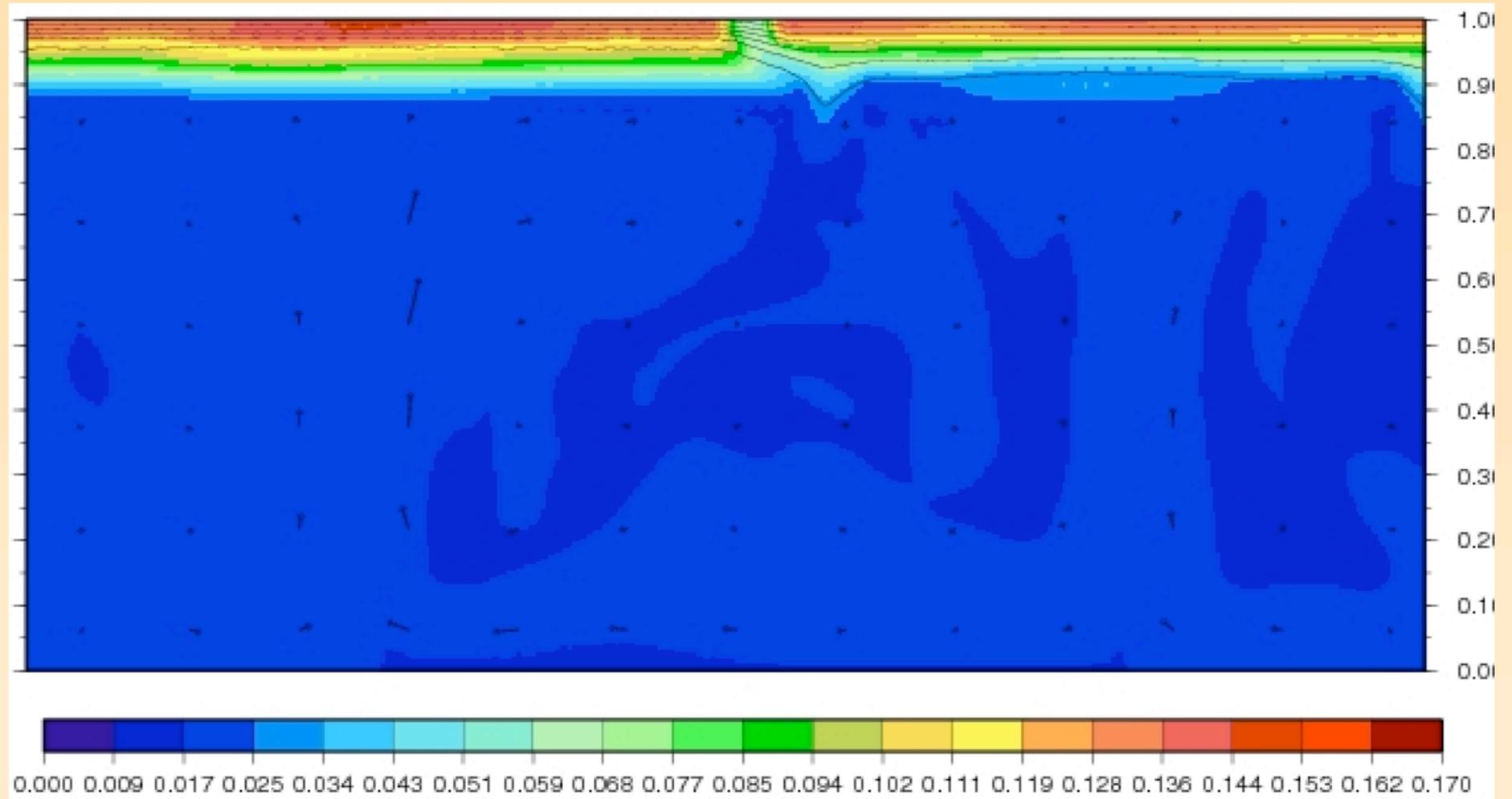


- Résultats sans changement de la viscosité et de la densité

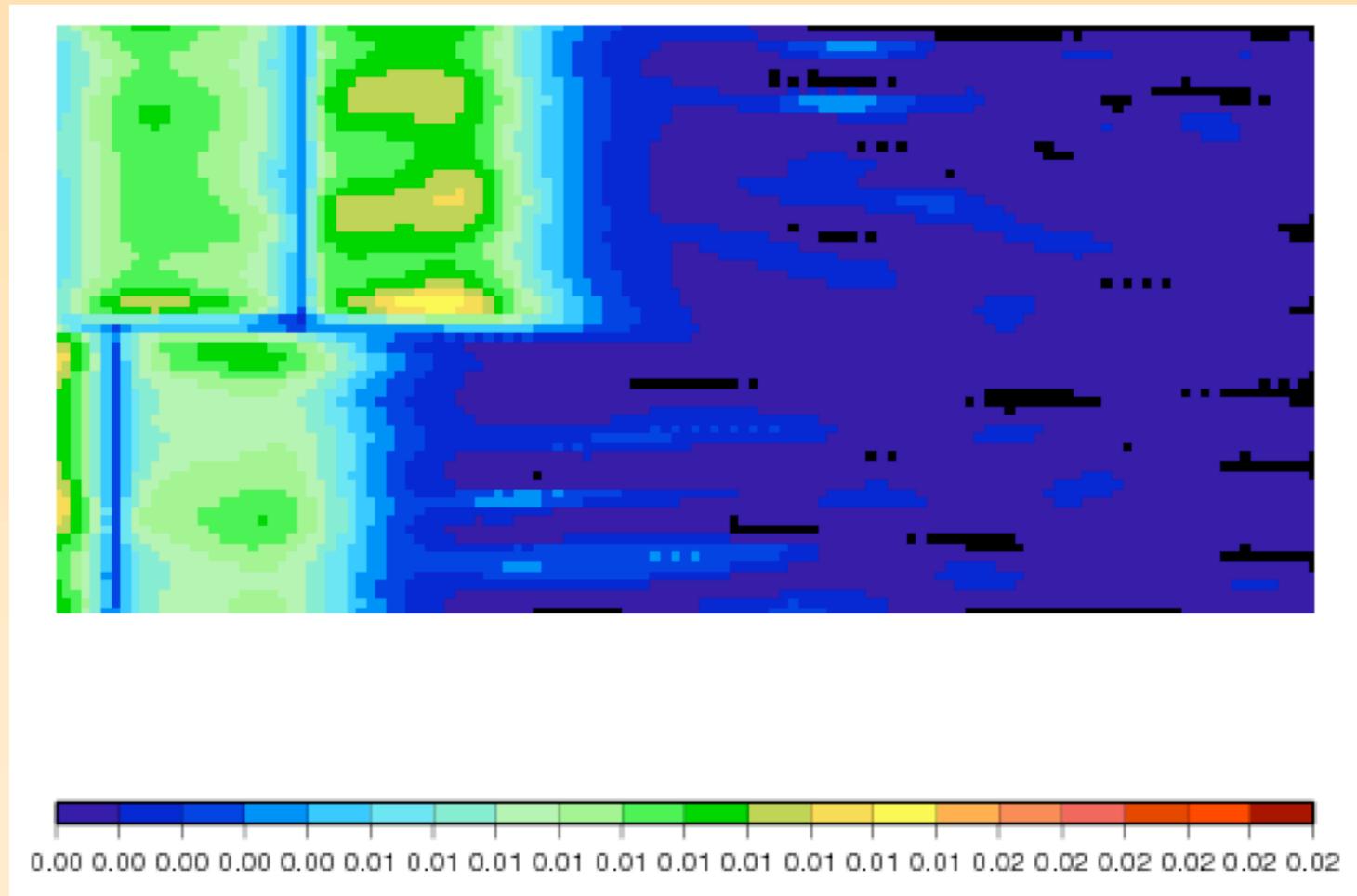








épaisseur de croûte



Conclusions

- démarrage de la convection petite échelle
inchangé
- structure thermique de la lithosphère perturbée
près des FT: «edge-driven» convection
 - ⇒ variation d'épaisseur lithosphérique
dissociée de la zone transformante
en surface: impacts sur les observables?
- introduction de la fusion partielle ⇒ ?