

Convection mantellique

Interactions lithosphère – asthénosphère

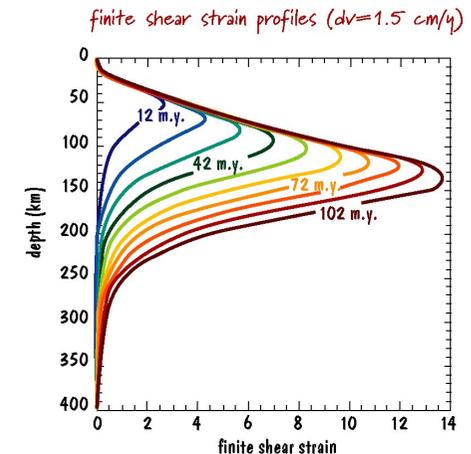
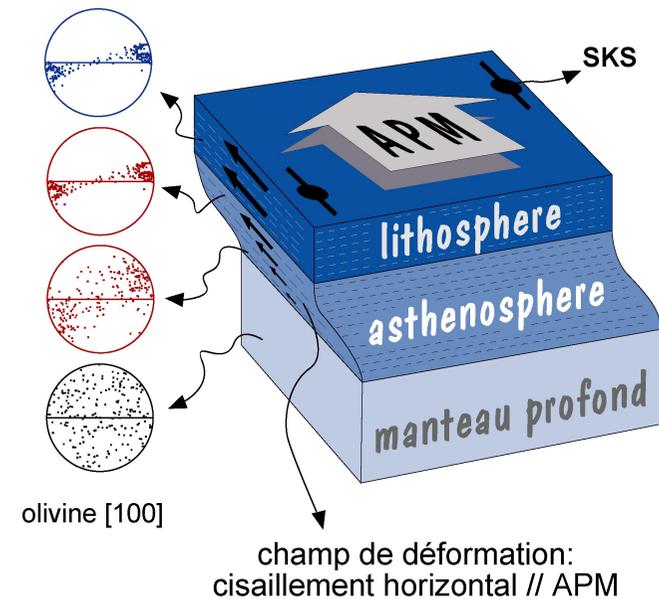
A. Tommasi – D. Arcay

convection et tectonique de plaques
= système unique

couplage ?

- **thermique** : échanges de chaleur
- **mécanique** : entraînement visqueux

- **thermo-mécanique**: écoulement contrôlé par dT
- **chimiques** : fluides (magmas) et réactions



Principe de la modélisation de la convection (analogique/numérique)

1. Nécessité d'utiliser des analogues aux matériaux terrestres

Mais: résultats exp. utiles seulement si extrapolables aux conditions terrestres
→ Si l'analogue présente les mêmes **critères de similarité** que la réf. terrestre

2. Comment: adimensionner le problème

Dimensions du modèle \neq dimensions de la Terre

*Respecter les **rappports** entre les **variables** qui caractérisent la physique des processus en jeu*

3. Objectif de l'expérimentation: Tester un lien de cause à effet

- *Approcher les conditions terrestres en les simplifiant*
 - *Obtenir une loi de comportement entre paramètres d'entrée et de sortie...
(«Scaling law »)*
- ...pour reproduire au 1er ordre les observations terrestres*

Nombres sans dimension caractéristiques en convection

Fluide de viscosité η , densité de référence ρ_0 , diffusivité κ
 Equation d'état: $\rho = \rho_0(1 - \alpha(T - T_0))$

1. Nombre de Prantl: Pr

Caractérise les propriétés méca./thermiques

$$Pr = \eta / (\rho \kappa)$$

Rapport des épaisseurs des couches limites thermique et cinématique

$Pr \ll 1$ diffusion très rapide

$Pr(\text{Manteau terrestre})$? Conséquences ?

2. Nombre de Reynolds: $Re = v_s * L * \rho_0 / \eta$

Caractérise l'écoulement (laminaire ou turbulent)

3. Nombre de Rayleigh: Ra

$Ra = \text{force motrice} / \text{forces résistantes}$

Convection si $Ra \gg 1$

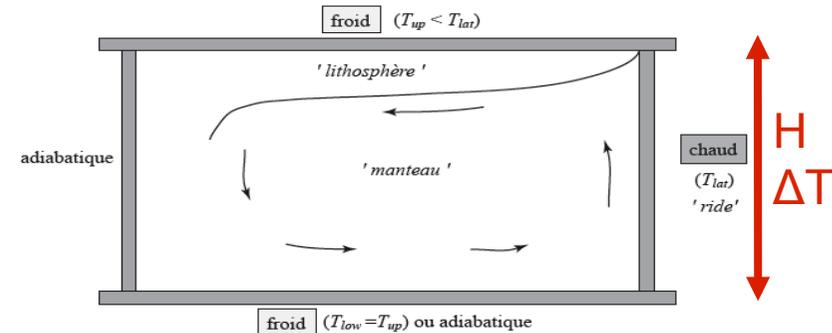


FIG. 5.1 – Principe de l'expérience : la circulation à grande échelle est imposée par un chauffage latéral (analogue d'une ride médio-océanique). On impose une condition supérieure froide. La couche limite thermique froide qui en résulte est l'analogue de la lithosphère océanique.

$$Ra = \frac{\alpha \rho_0 g \Delta T H^3}{\kappa \nu}$$

3. Nombre de Nusselt: Nu Quantifie l'efficacité du transport de la chaleur

Flux de chaleur moyen en surface q

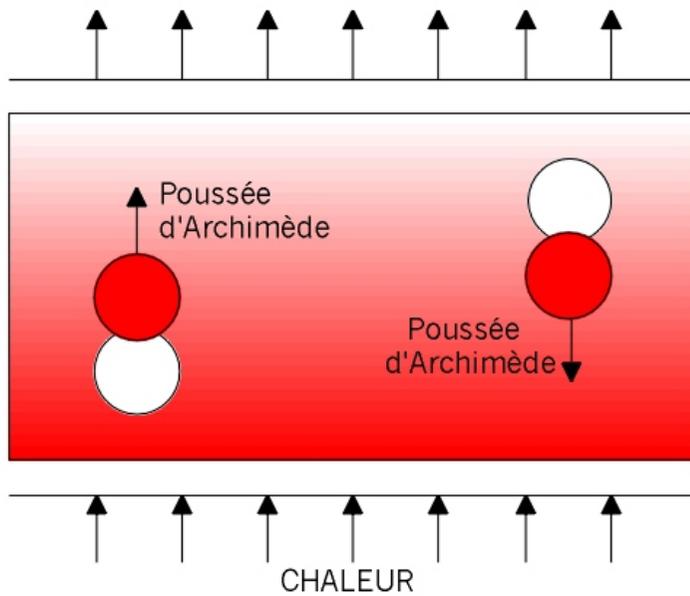
$Nu = q / \text{Flux si transport uniquement conductif} : Nu = qH / (k\Delta T)$

$Nu(\text{Terre})$??

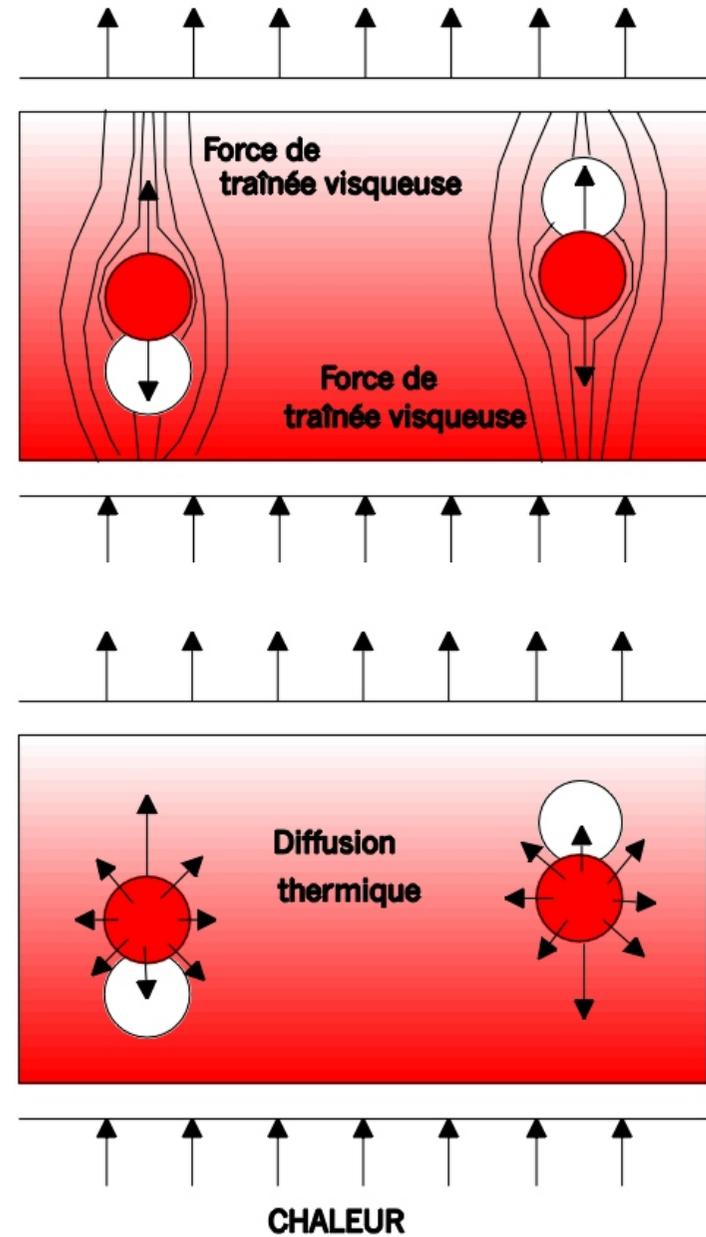
Qu'est-ce que la convection?

transport de chaleur
par mouvement de matière

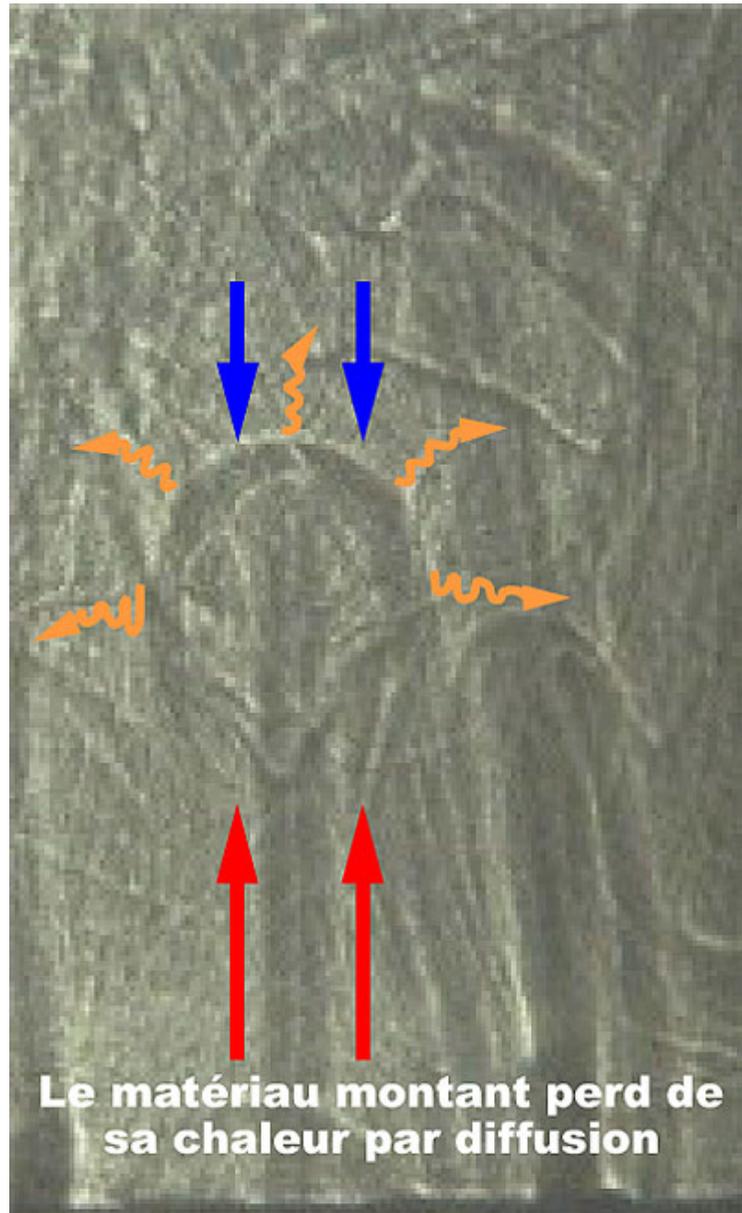
pour



contre



La physique de la convection



rapport entre ces forces
= le nombre de Rayleigh

$$Ra = \frac{\text{poussée}_{\text{Archimède}}}{\text{diffusion} * \text{viscosité}}$$

$$Ra = \frac{\alpha \rho g \Delta T h^3}{\kappa \eta}$$

Régimes convectifs si $Ra \uparrow$

- Démarrage de la convection: $Ra=Rac$
- $Ra > Rac$ mais Faible nombre de Rayleigh: **convection stationnaire 2D en rouleaux**
- **$Ra > 22600$: convection stationnaire 3D bimodale**
2 types de rouleaux perpendiculaires
- **$Ra \sim 10^4$ à 10^5 et boîte à rapport d'aspect $r > 1$: cellules de section carrée.**
Si $r \sim 10$: cellules de section hexagonale.
- **$Ra > 10^5$: régime – turbulent**

Ra terrestre ?

=> conséquence 1: champ T ?

=> conséquence 2:

dynamique des couches limites thermiques: serait fortement instable

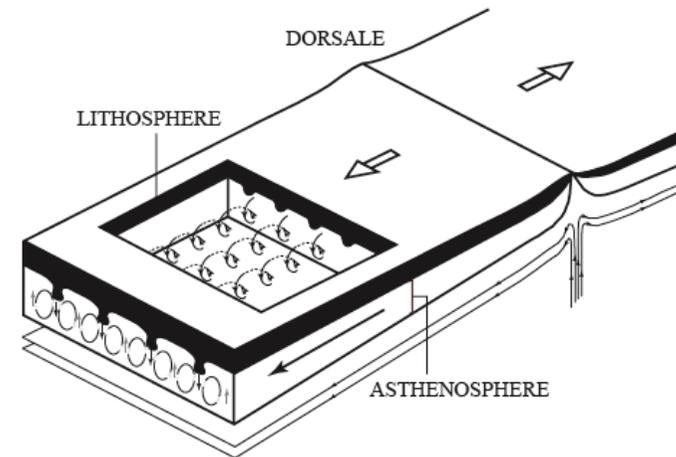
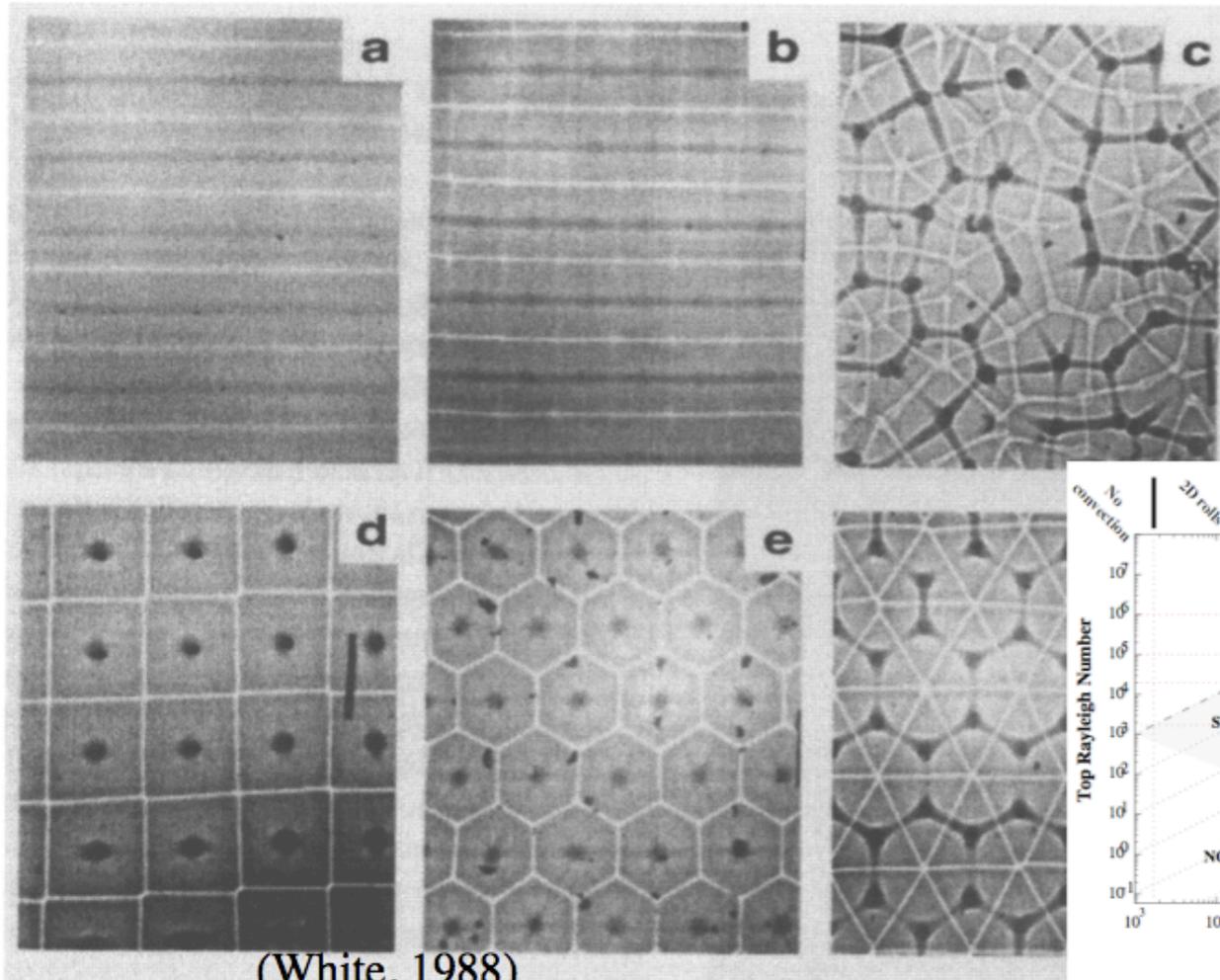


FIG. 8.5 – Représentation schématique de l'écoulement en base de lithosphère océanique. Les flèches blanches indiquent la direction du mouvement relatif de la plaque lithosphérique. Les vitesses de la lithosphère et de l'asthénosphère doivent être différentes pour créer le cisaillement responsable de l'organisation de la convection à petite échelle (voir texte).

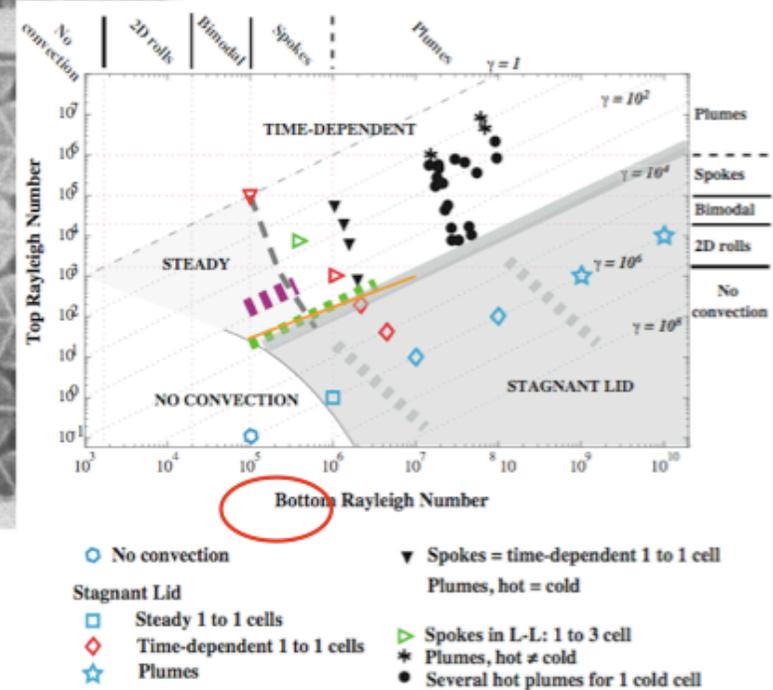
*Convection in a fluid with T-dependent viscosity:
Planforms and regime diagram*



(White, 1988)

**Planforms
for small Ra**

Regime diagram



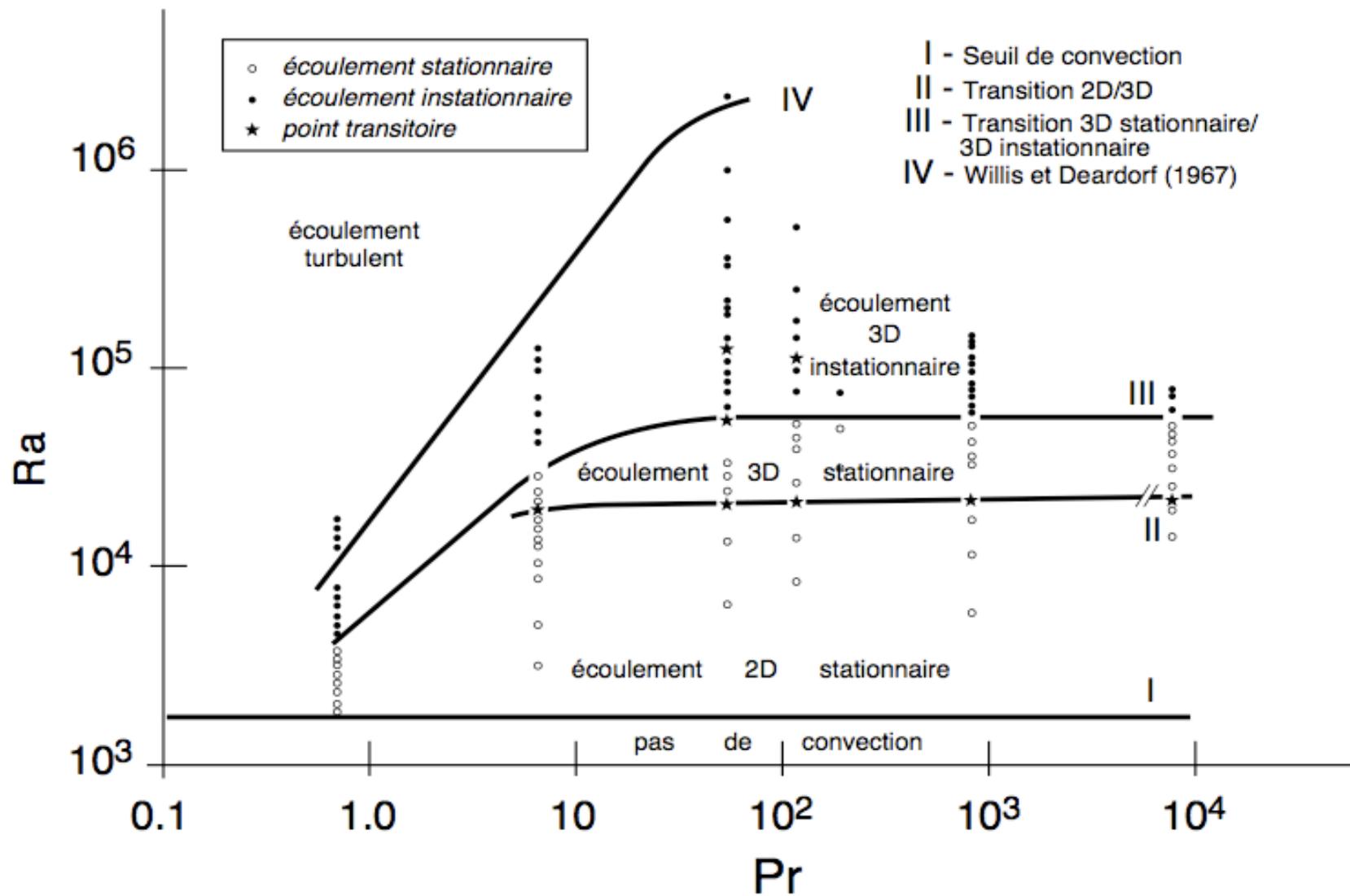
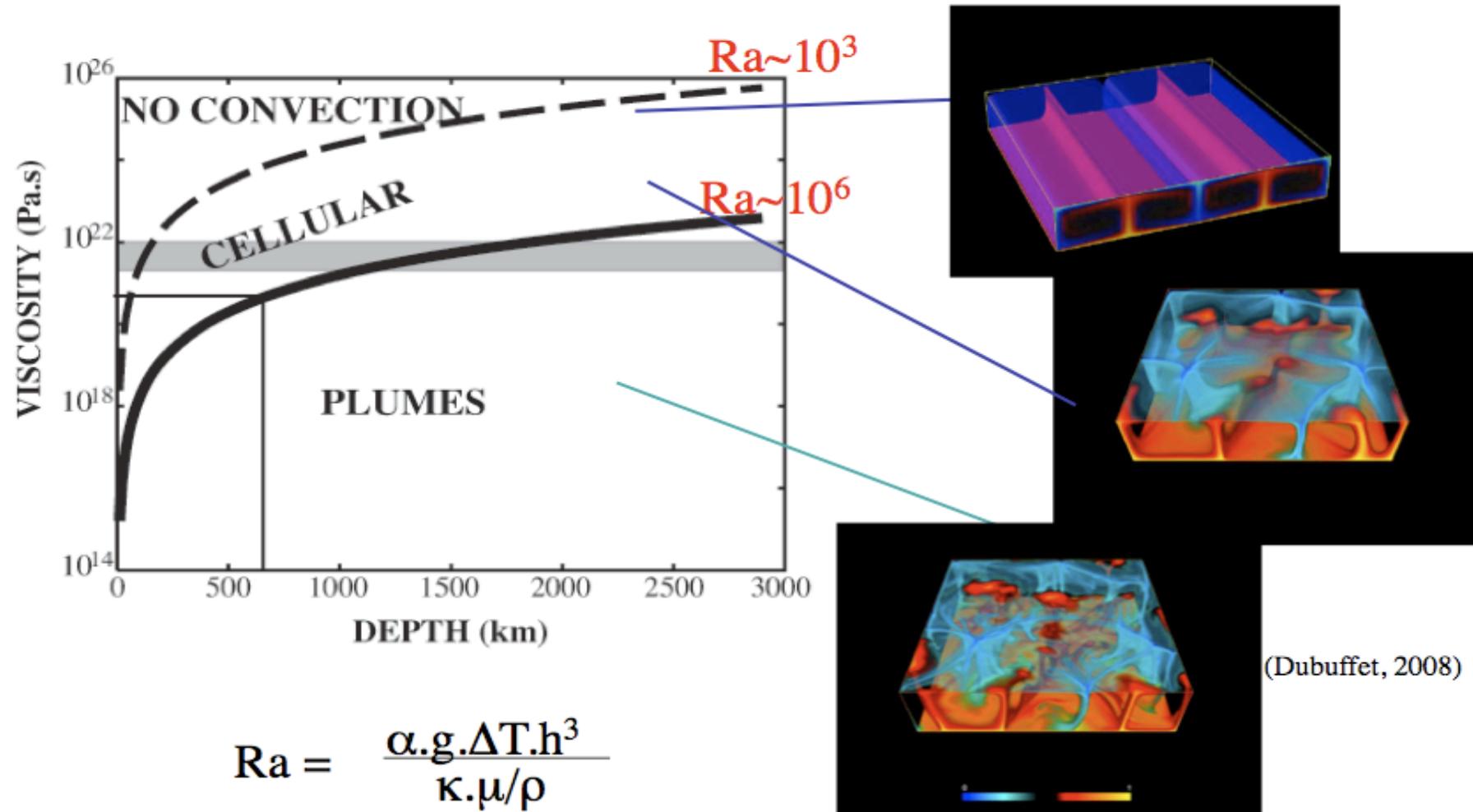


Figure 1-5. Mode de convection dans le plan (Pr,Ra), d'après *Krishnamurti* (1970b).

Regimes of isoviscous convection



→ Films: régimes stationnaire et turbulent

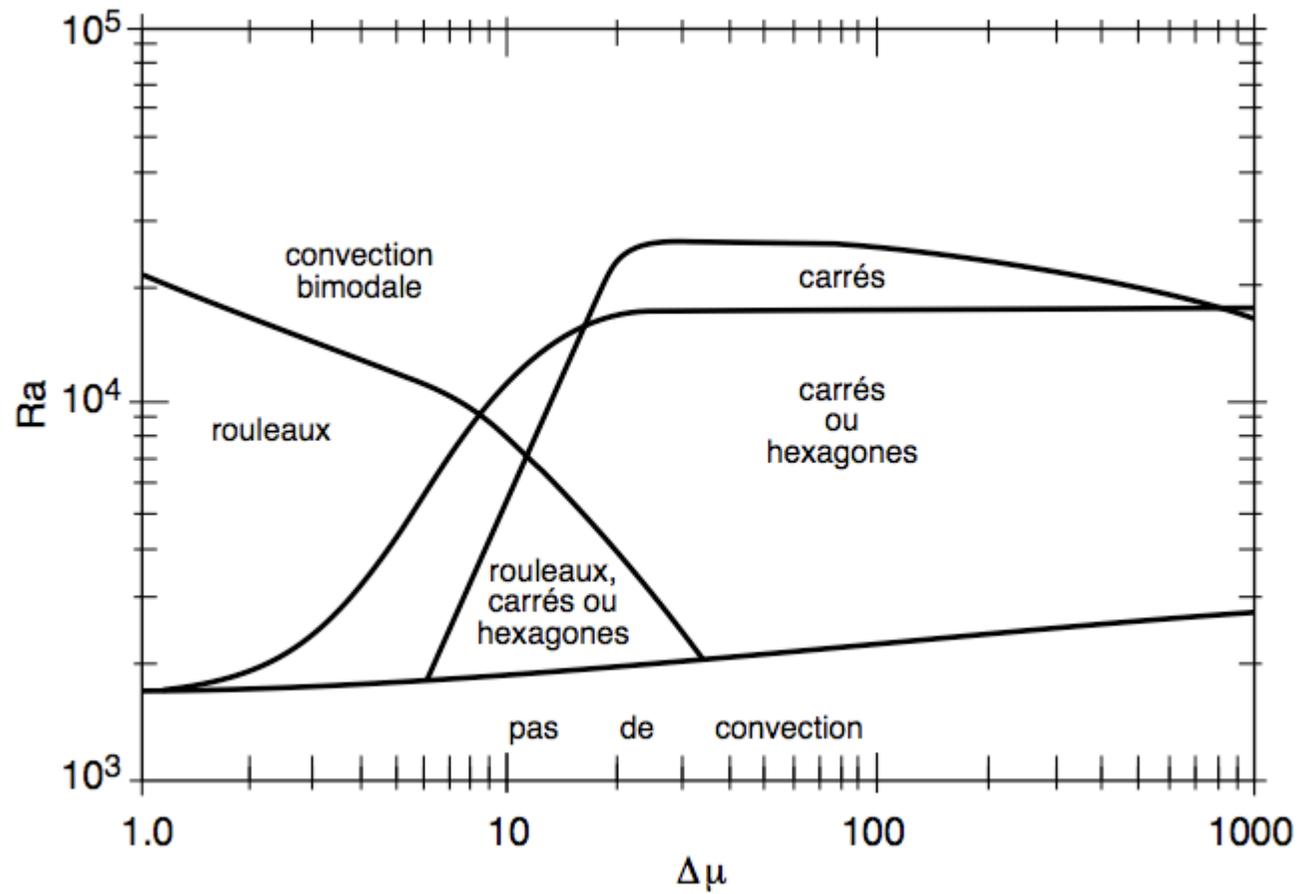
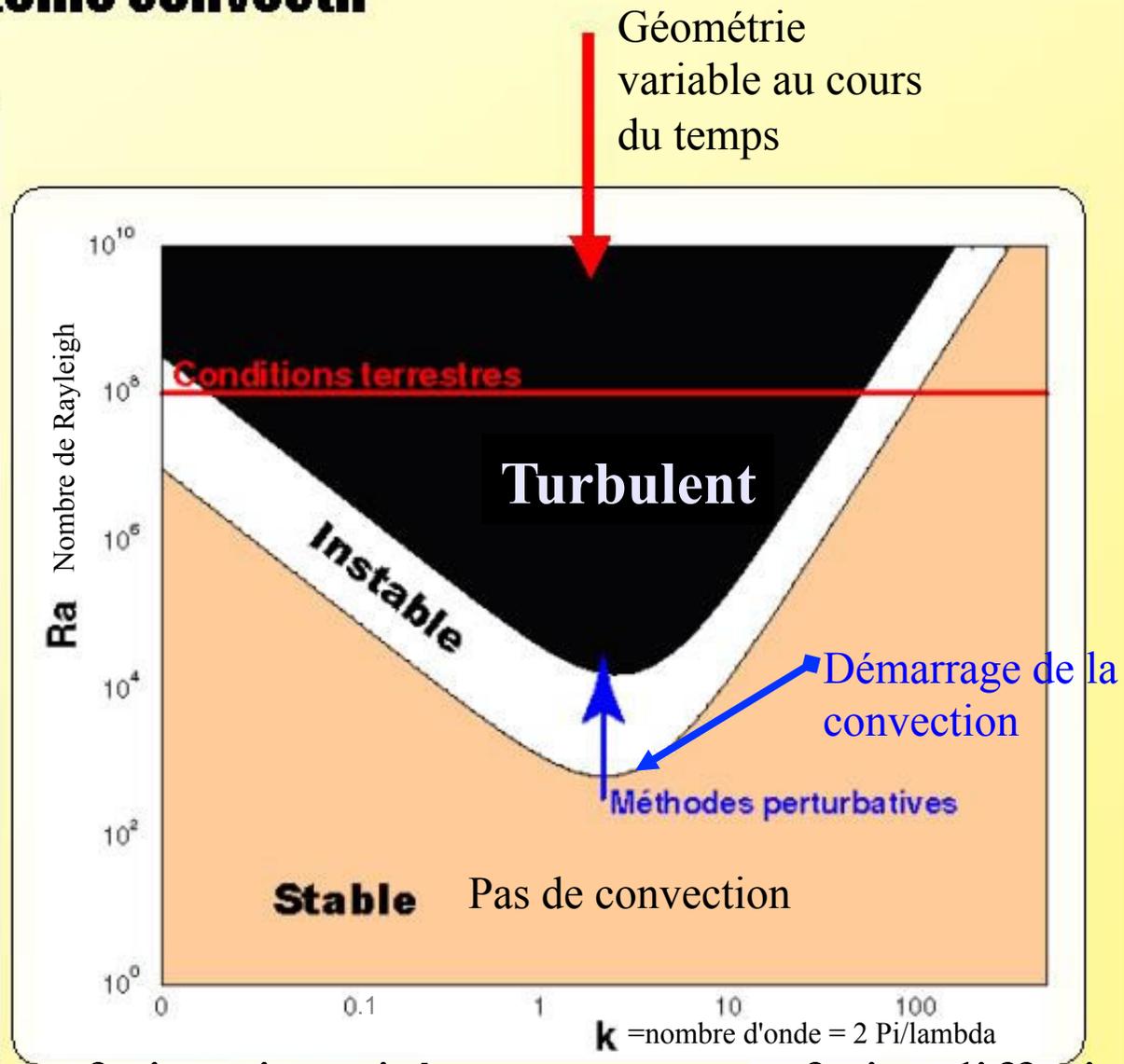
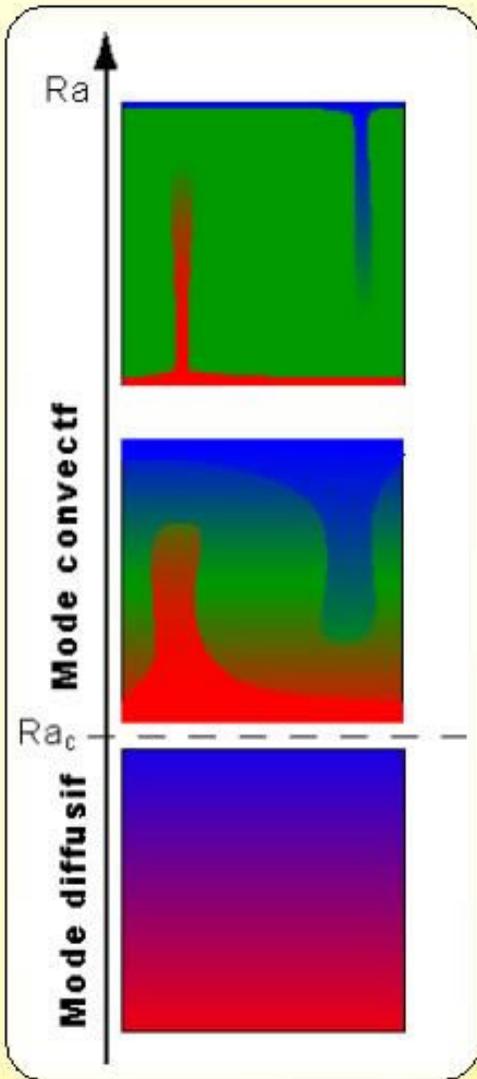


Figure 1-7. Répartitions des modes de convection dans le plan ($\Delta\mu, Ra$), d'après *White* (1988)

Evolution d'un système convectif



frein=viscosité

frein=diffusion

Régimes convectifs

Démarrage de la convection:

- *Analyse de stabilité linéaire:*

A partir d'une structure thermique conductive,
la convection s'initie si le taux de croissance des instabilités > 0 , ie
 $Ra > Ra_{cr}$

$$Ra_{cr} = \frac{\left(\pi^2 + \left(\frac{2\pi H}{\lambda} \right)^2 \right)^3}{\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \right)^2}$$

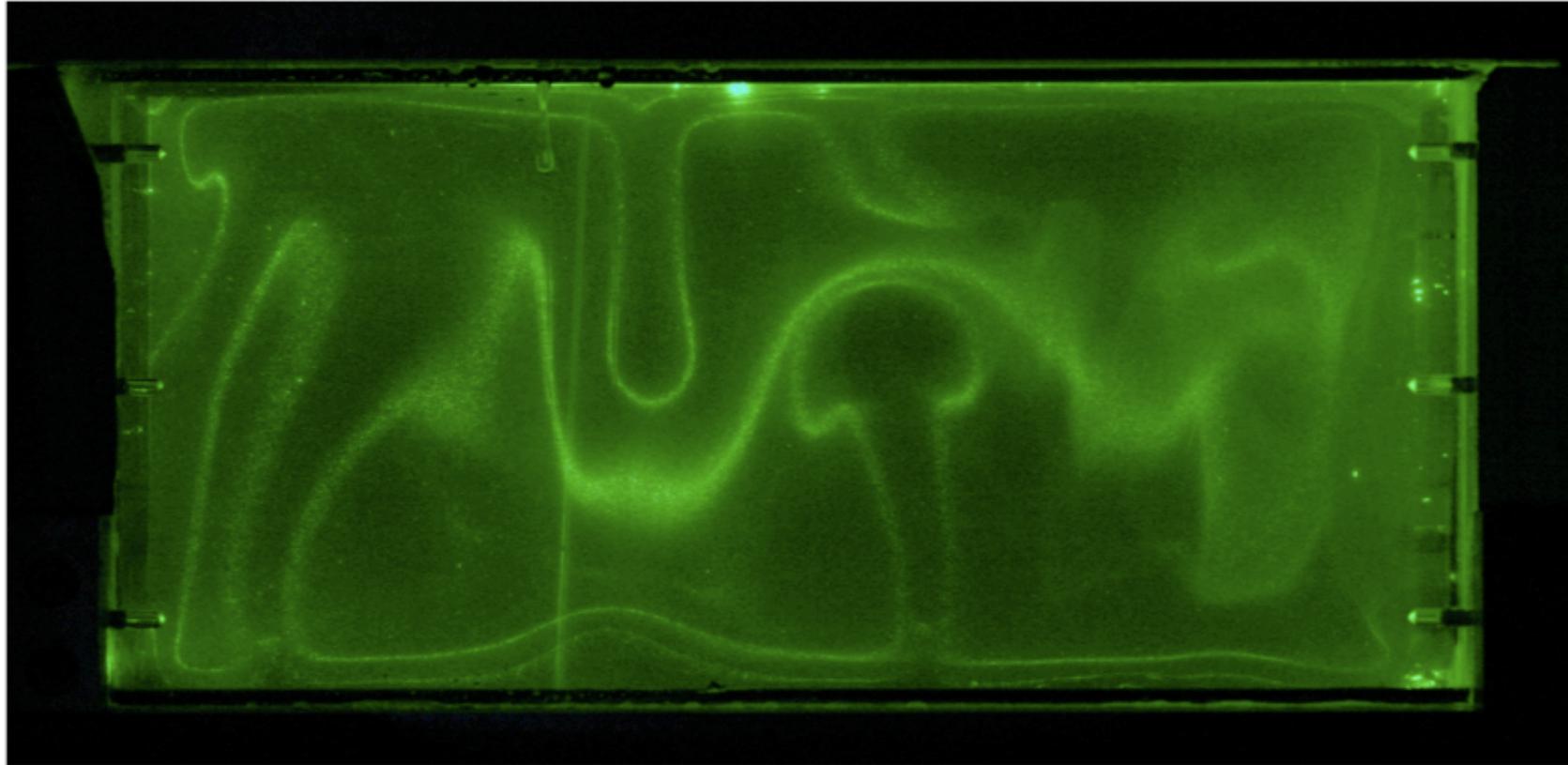
H hauteur de la boîte, λ longueur d'onde (espacement) des instabilités

- Ra_{cr} fonction uniquement des conditions limites:

Bords libres: Ra_{cr} minimal: $\lambda = 2\sqrt{2} H \approx 2.83 H$: $r = \sqrt{2}$ et $Ra_{cr} = 657$

Dynamique des couches limites thermiques (CLT)

*Convection in a fluid with temperature-dependent viscosity:
Morphology of upwellings/downwellings*

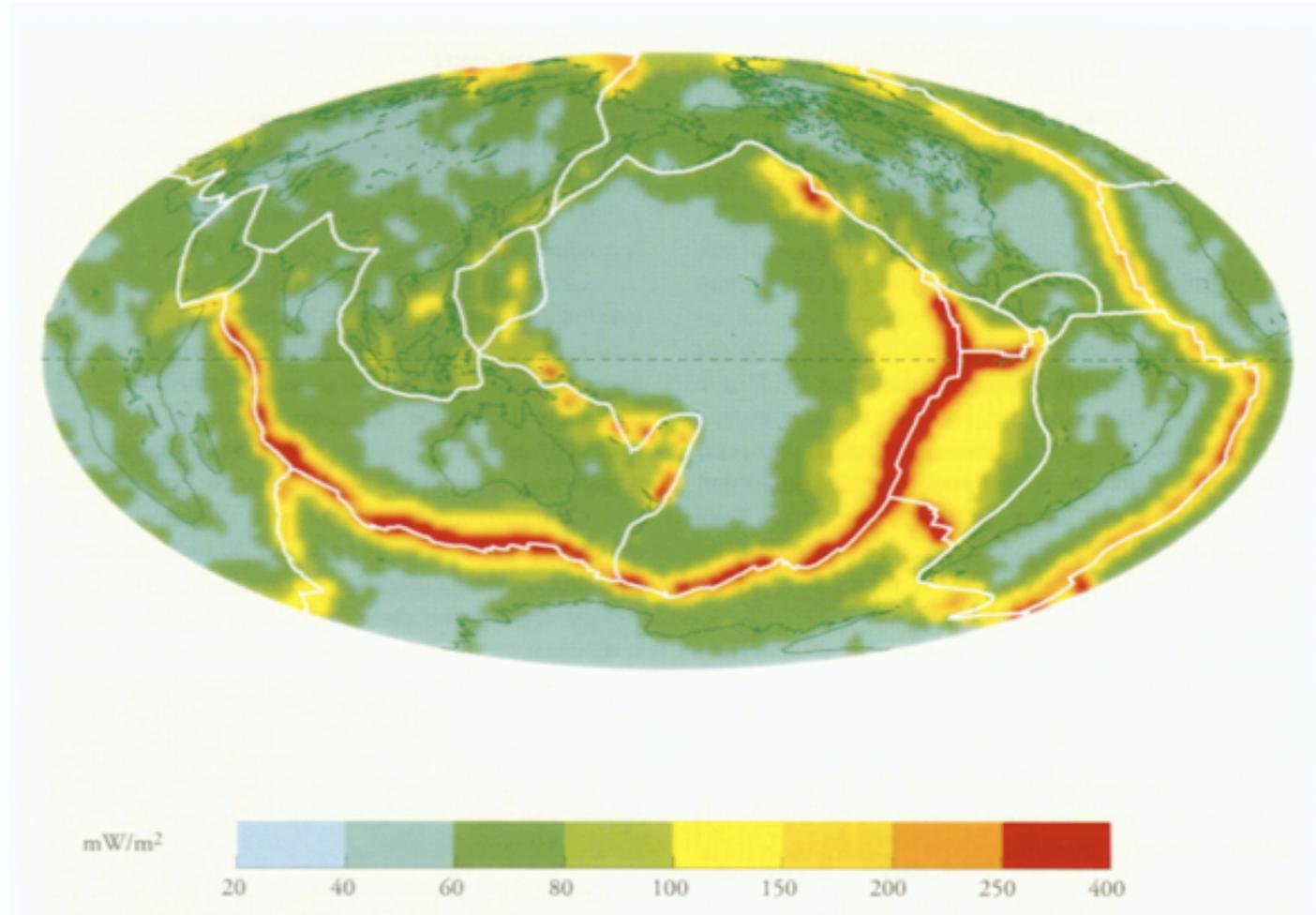


Hot and cold TBL instabilities for sugar syrup cooled from above and heated from below ($Ra=4.7 \times 10^6$). The viscosity contrast between the coldest (5.0°C) and the hottest fluid (51.9°C) is 116.

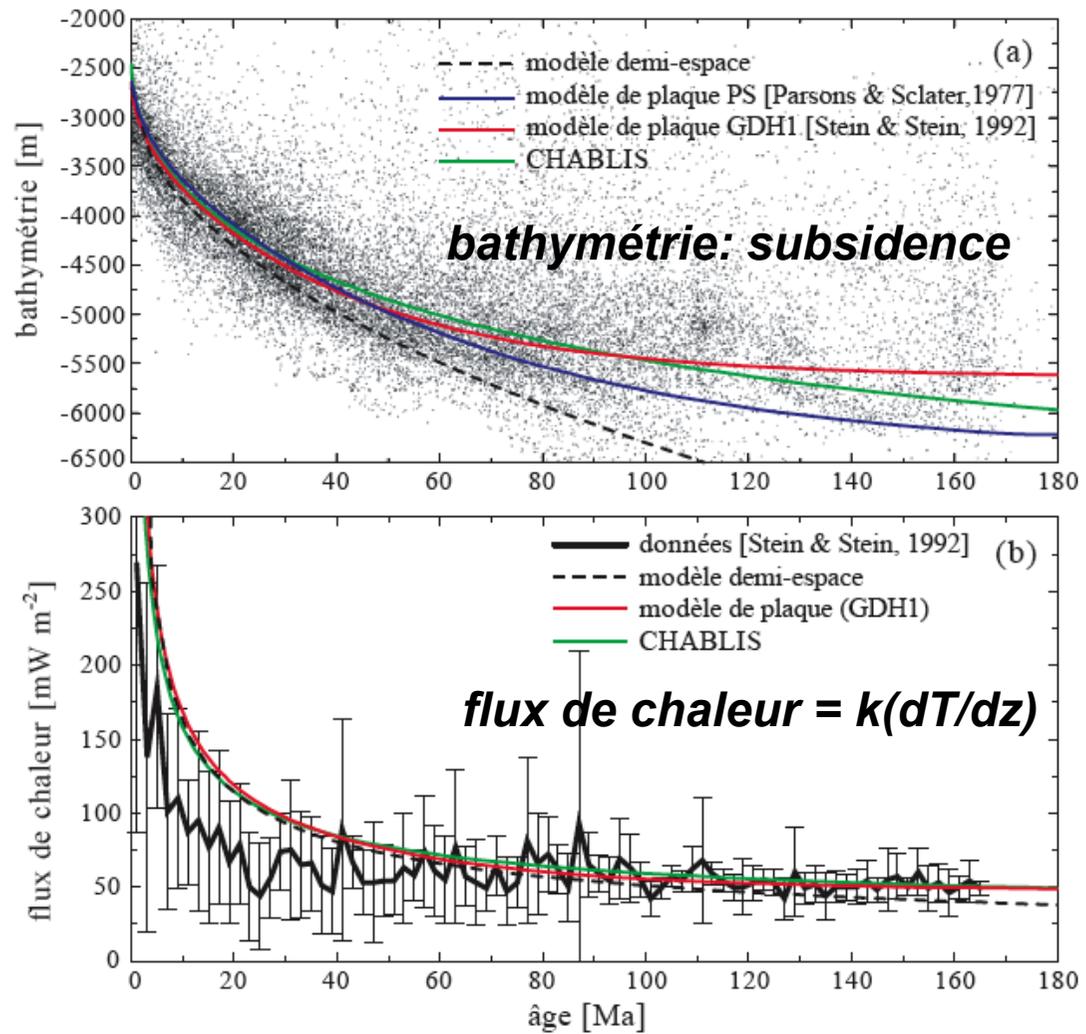
Comportement des CLT chaudes et froides très différents !

convection à petite échelle: Application

Le Flux de chaleur Terrestre



interactions thermo-mécaniques & le refroidissement des plaques océaniques



**modèle 1/2 espace =
purement thermique
ne reproduit pas les
observations pour les
âges > 70 Ma**

plaque = T_m constant à $z_{L\infty}$
PS: $T_m = 1350^\circ\text{C}$ à $z_{L\infty} = 125\text{km}$
GDH1: $T_m = 1450^\circ\text{C}$ à $z_{L\infty} = 95\text{km}$

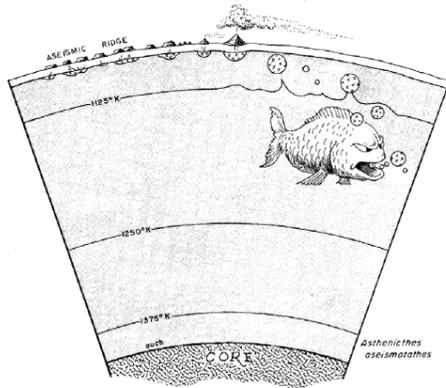
**CHABLIS = flux constant à la
base de la lithosphère**

**✓ apport de chaleur
supplémentaire à la
base de la lithosphère:**

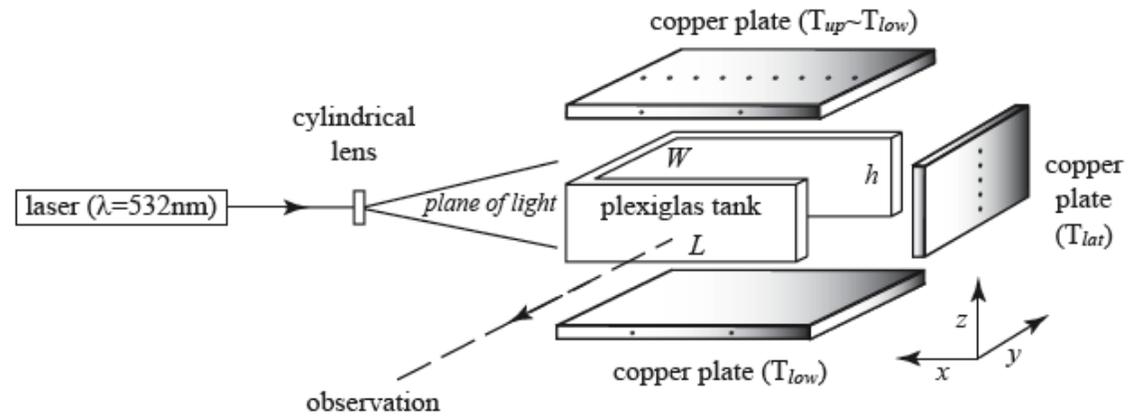
processus?

FIG. 4.1 – (a) Bathymétrie et (b) flux de chaleur en fonction de l'âge. Les points et la courbe pleine noire représentent les données. Les courbes noire en pointillés, bleue, rouge et verte montrent les prédictions respectives des modèles demi-espace, plaque (Parsons & Sclater, 1977), plaque (GDH1, Stein & Stein, 1992), et du modèle à flux constant CHABLIS (d'après Doin & Fleitout, 1996).

Interaction des différentes échelles de convection dans le manteau terrestre



modélisation analogique de la convection à petite-échelle



Thèse soutenue publiquement le mardi 29 juin 2004 devant un jury composé de :

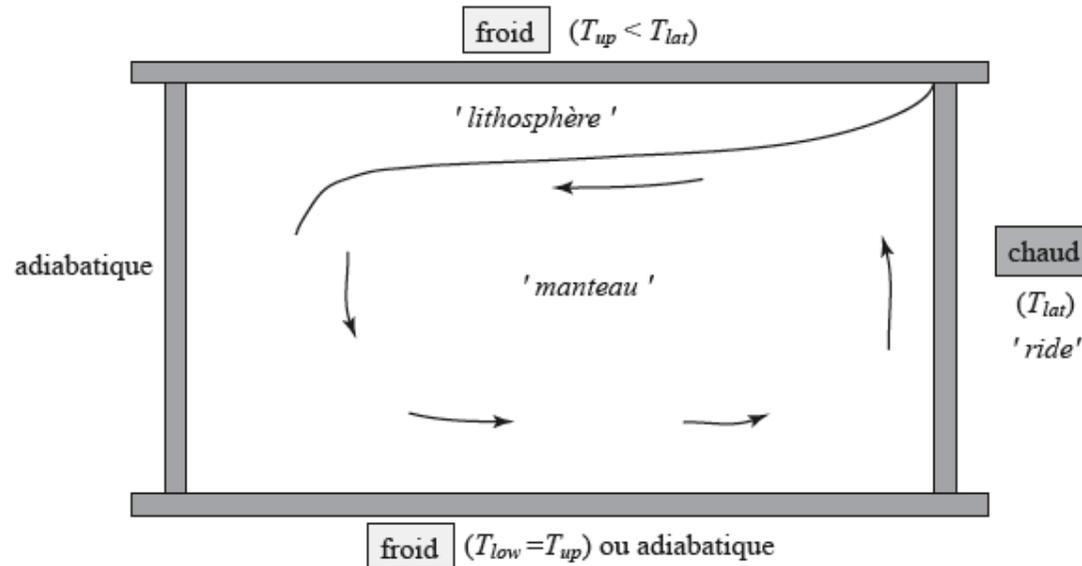
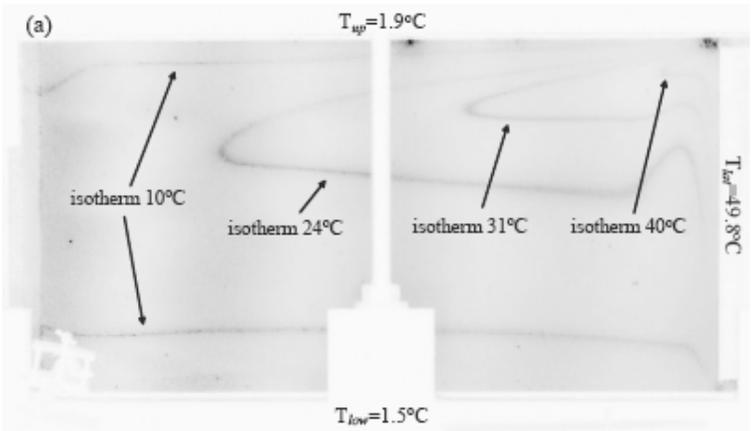


FIG. 5.1 – Principe de l'expérience : la circulation à grande échelle est imposée par un chauffage latéral (analogue d'une ride médio-océanique). On impose une condition supérieure froide. La couche limite thermique froide qui en résulte est l'analogie de la lithosphère océanique.

modélisation analogique de la convection: différentes échelles coexistent...



l'écoulement à grande échelle : imposé par la T fixe aux limites droite, supérieure et inférieure

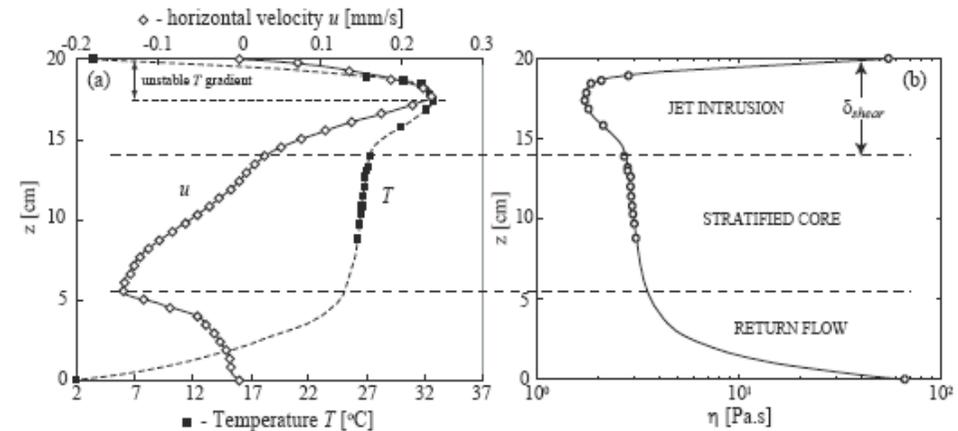
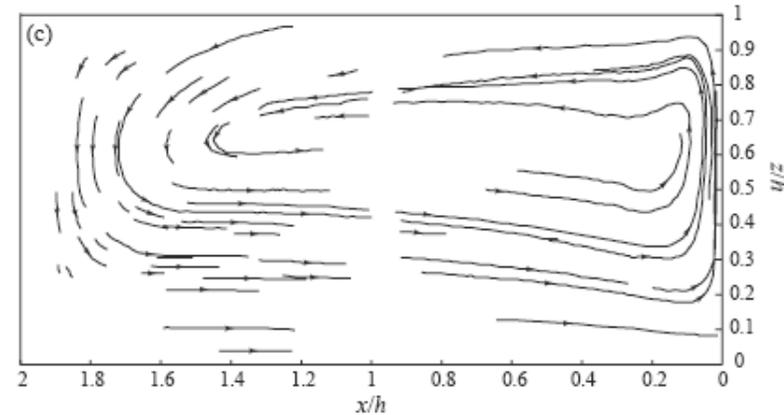
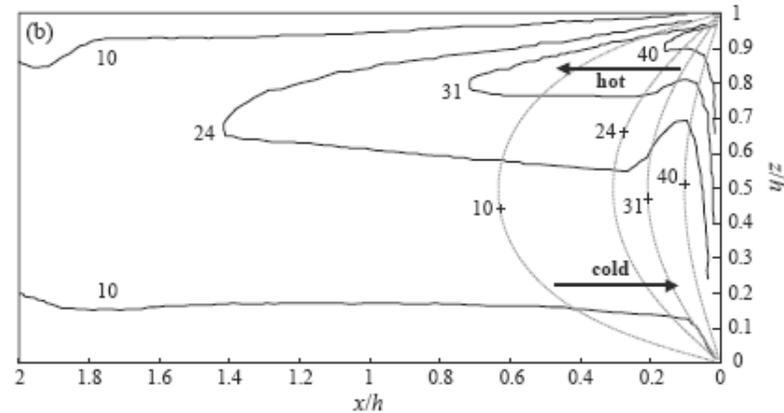


FIG. 6.3 – (a) Vertical temperature and horizontal component of the velocity profile for SG2.5 (see table 6.3), at $x/h = 0.78$ and $y/h = 0.85$. (b) Vertical viscosity profile corresponding to (a). δ_{shear} indicates the shear zone thickness (see section 6.4).

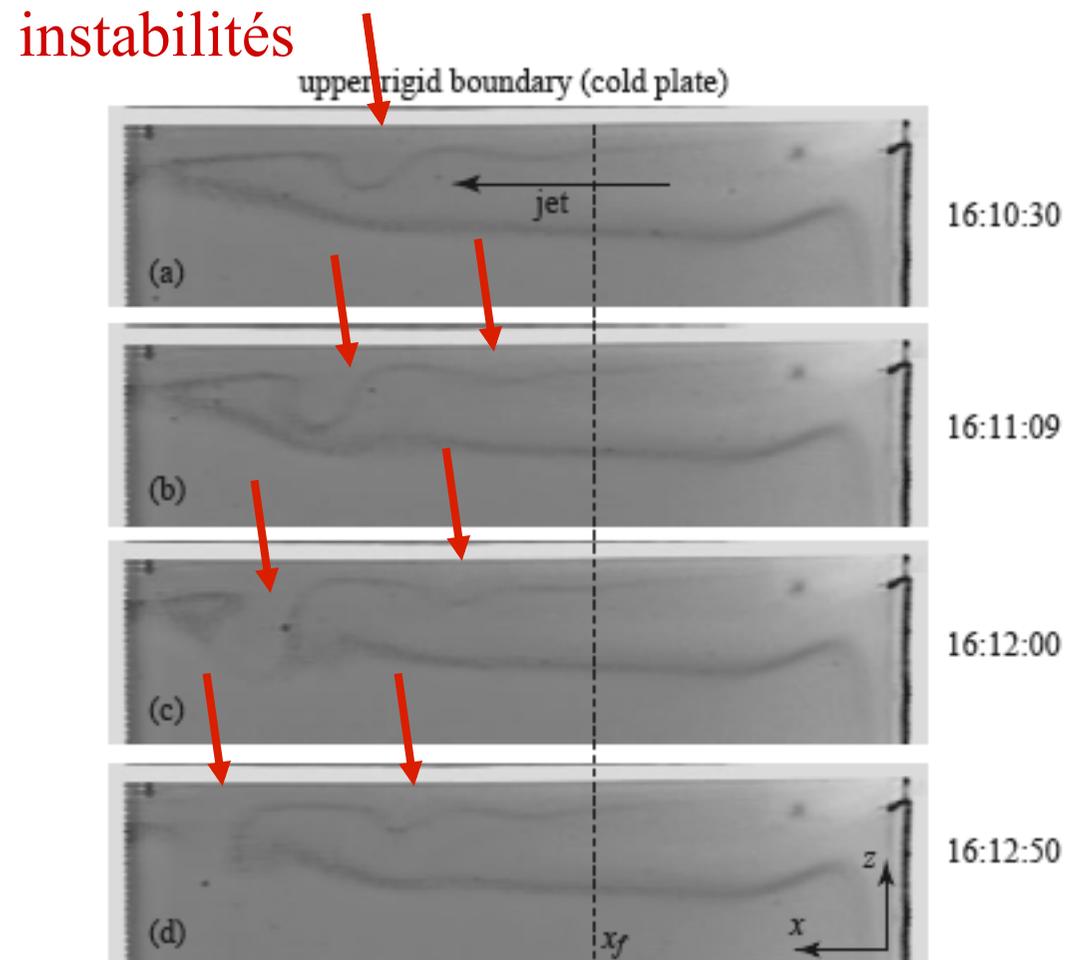


FIG. 6.11 – Plumes sheared by the large-scale flow under the cold upper boundary, for experiment N1.1 (pictures are zoomed on the shear layer). The heated vertical plate is on the right of the image. Jet direction is given by the black arrow. x_f is the distance from the heated plate at which the instabilities form (see text). The observed isotherm (black line) corresponds here to 24.5°C .

instabilités

vue normale
à l'écoulement
grande échelle

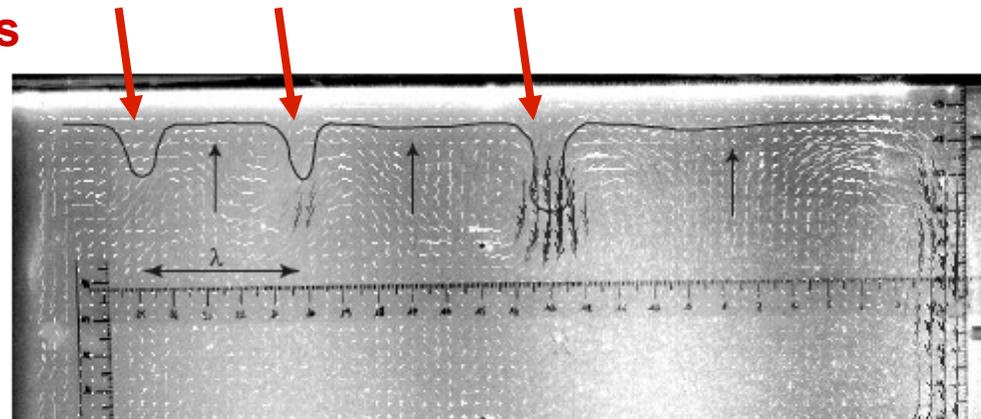


FIG. 6.15 – Particule Image Velocimetry (PIV) computation for experiment SG2.5, in a plane parallel to the vertical heated plate (here in the background). Position of the 24.5°C isotherm has been enhanced by a solid black line. Rising currents, less visible, are positioned by black arrows. Observe the important edge effect near the right sidewall.

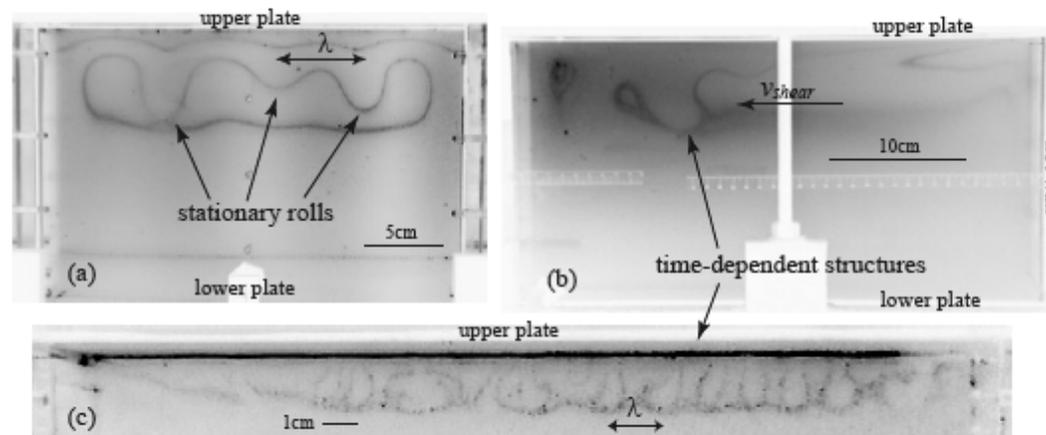


FIG. 6.16 – Different type of small-scale instabilities developing under the upper cold thermal boundary layer. (a) Stationary structures in experiment SG1.1; the laser plane of light parallel to the hot wall (on background), at a distance $x/h = 1.35$. (b) Time-dependent structures in experiment N6; the laser plane of light is perpendicular to the hot wall (on the right of the image), at a distance $y/h = 0.25$. (c) Time-dependent structures in experiment SI1.1; the laser plane of light is parallel to the hot wall (on background), at a distance $x/h = 1.15$.

modélisation analogique : géométrie de la convection à petite échelle

Topographie de la base de la lithosphère

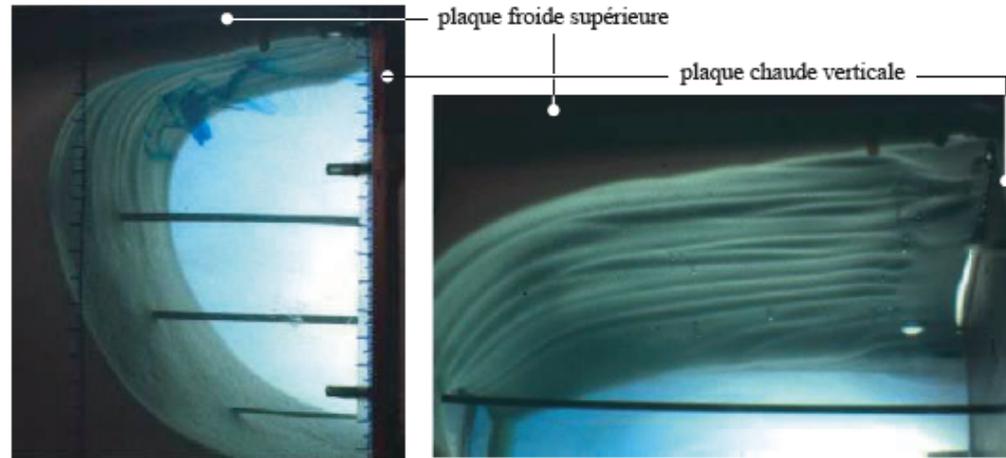


FIG. 8.4 – Topographie de la couche supérieure solide, dans le cas d’une transition de phase (expériences avec de la cire, Crambes 2000). Les parties claire et foncée correspondent à la cire liquide et solide, respectivement. *Gauche* : Visualisation de la convection à petite échelle par injection de colorant bleu. *Droite* : Zoom sous la base de la langue solide : observation des corrugations.

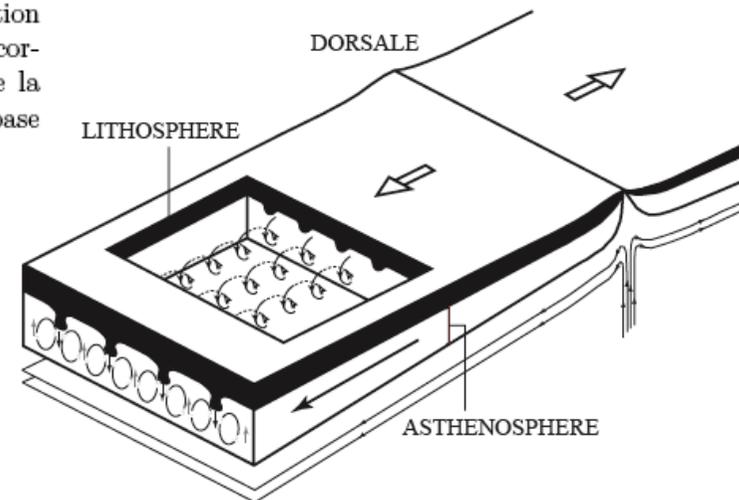


FIG. 8.5 – Représentation schématique de l’écoulement en base de lithosphère océanique. Les flèches blanches indiquent la direction du mouvement relatif de la plaque lithosphérique. Les vitesses de la lithosphère et de l’asthénosphère doivent être différentes pour créer le cisaillement responsable de l’organisation de la convection à petite échelle (voir texte).

modélisation analogique de la convection: différentes échelles coexistent...

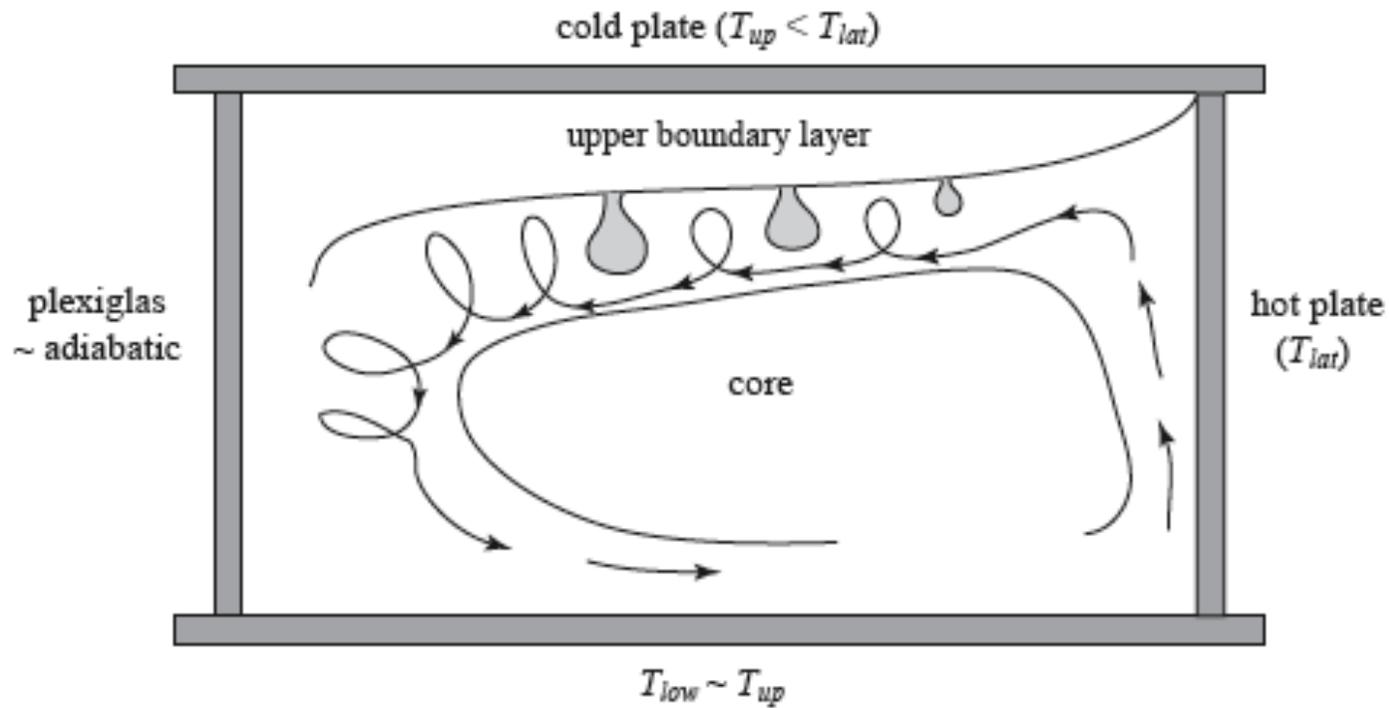


FIG. 6.20 – Sketch of the system, illustrating the two scales of motion present in the cavity.

convection à petite échelle: le mécanisme

