

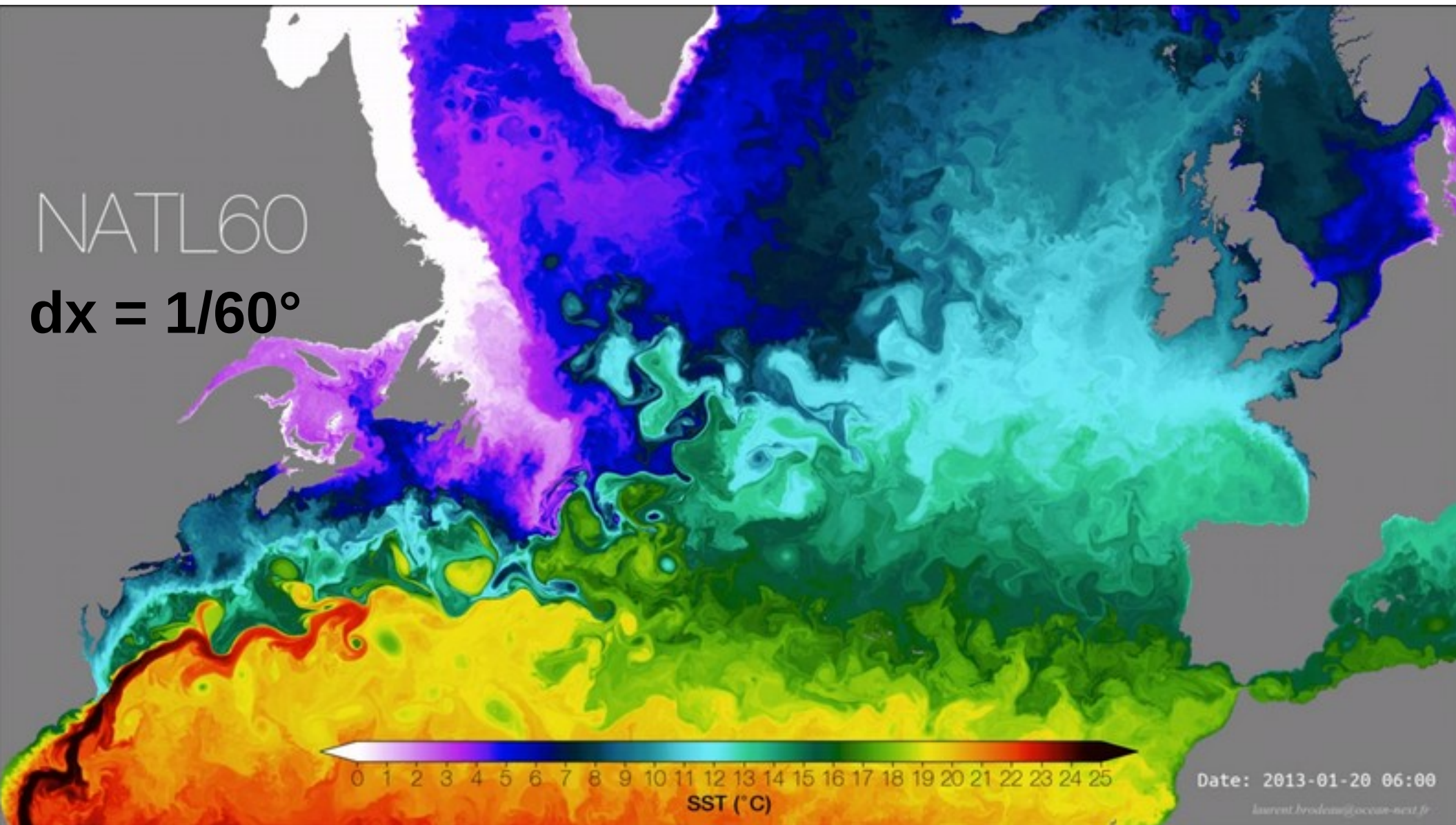
Modélisation océanique

La question des tourbillons

Guillaume Roullet

Formation doctorale Modélisation Numérique, 6^e édition, Paris, 2019

Eddy resolving ocean simulation

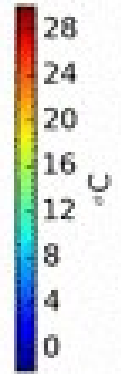
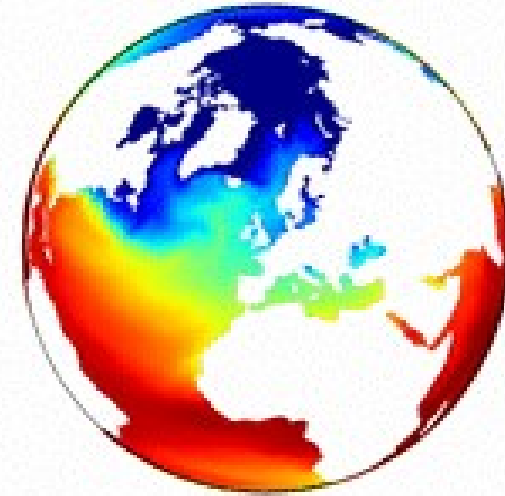


vs global circulation

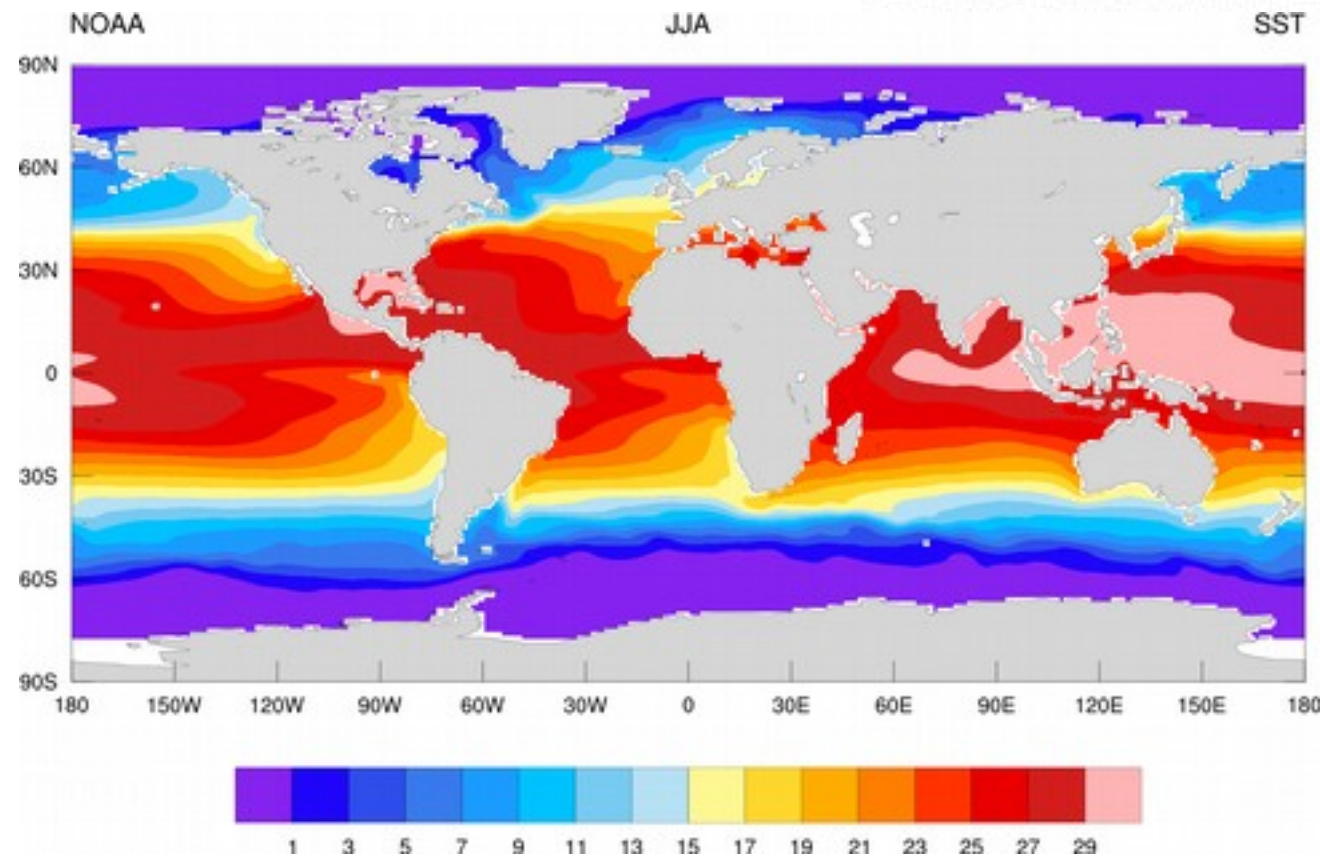
iMarNet NEMO-ERSEM

1890

Temperature



$$dx = 1/2^\circ$$

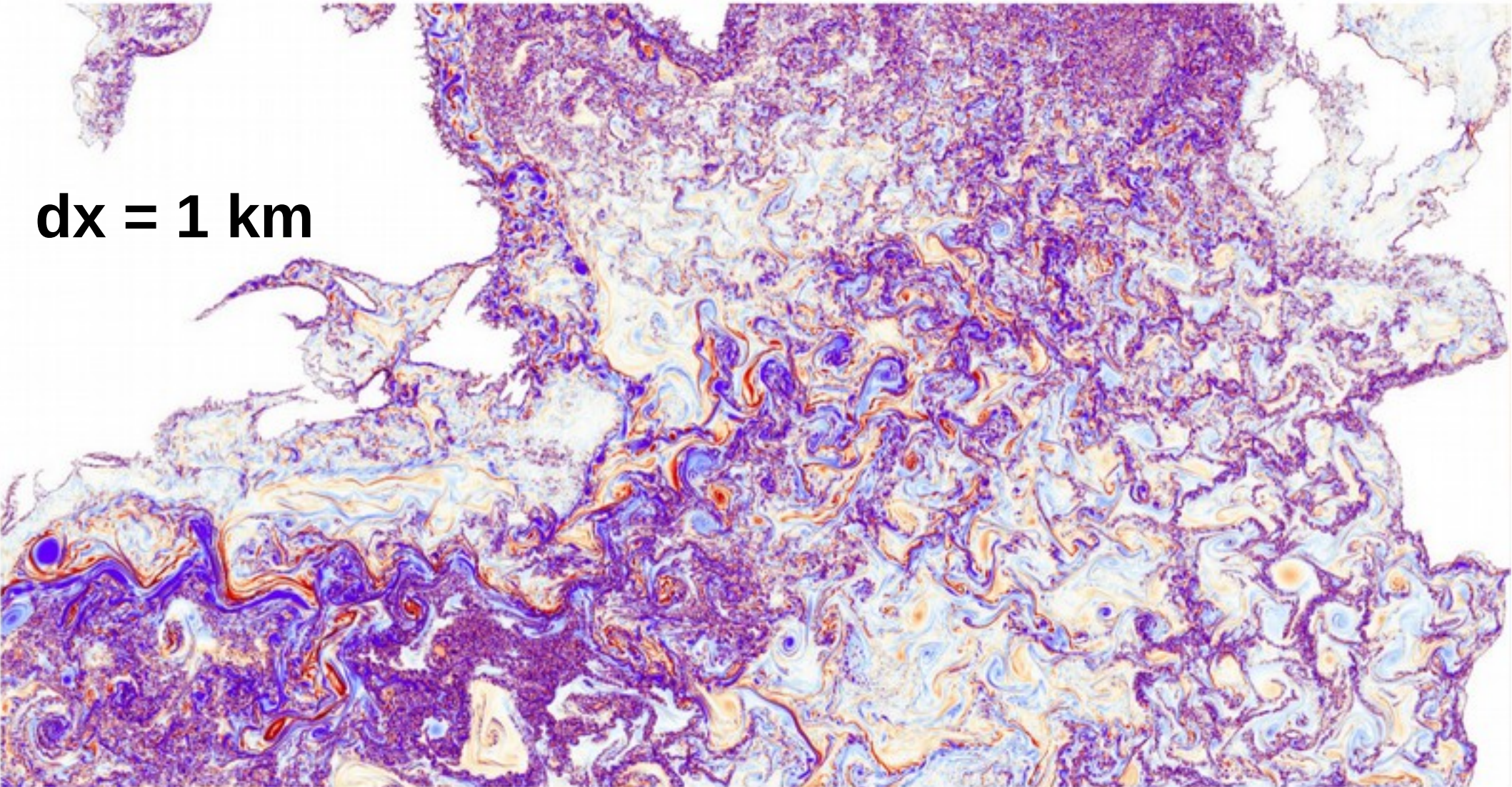


Climatologie SST

vs submesoscale resolving

Vorticité de surface
(possède plus de variance à petite
échelle que la température)

$\Delta x = 1 \text{ km}$



Projet MEGATL [Gula et al]

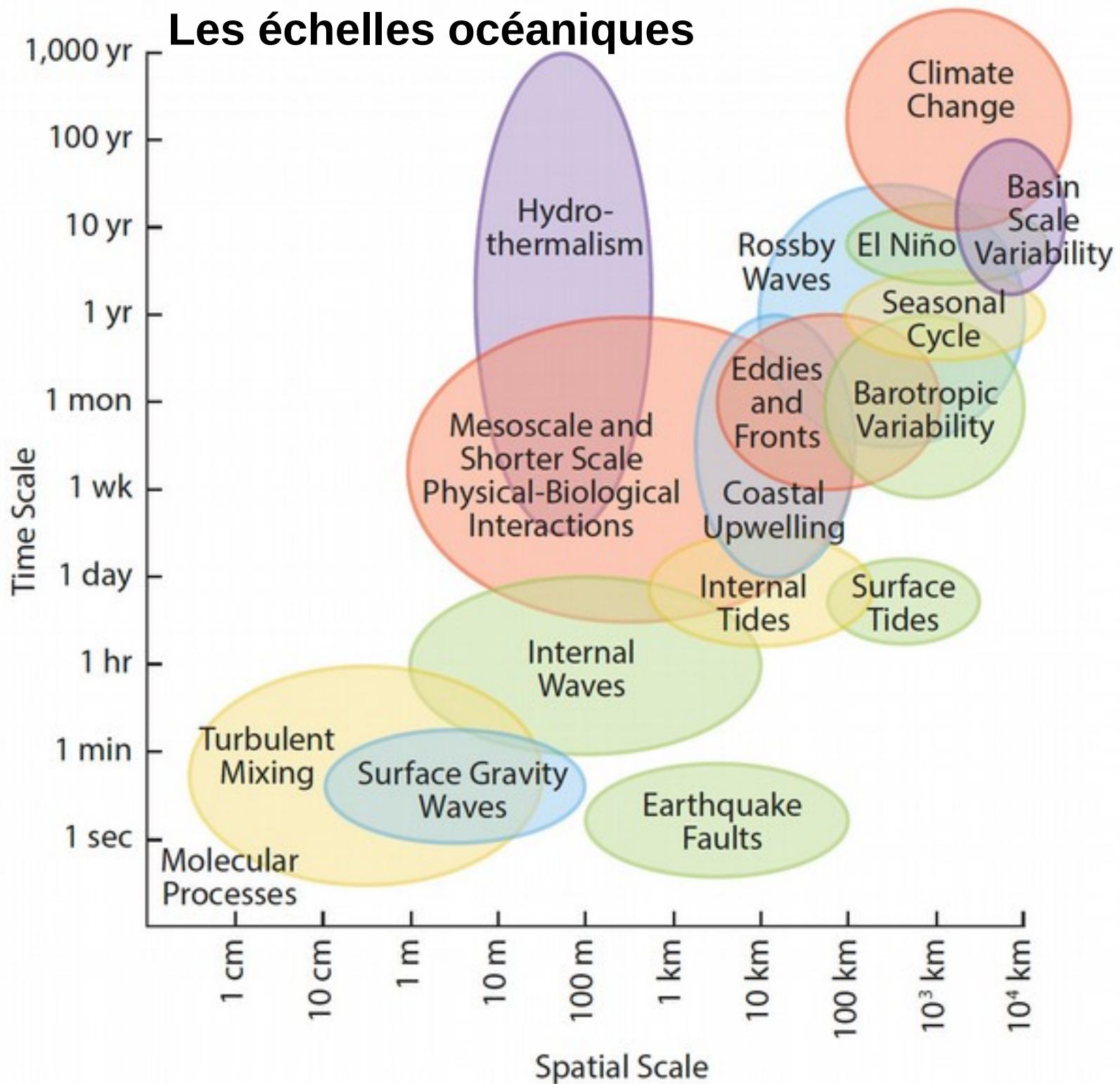
$\Delta x = 1 \text{ km}$, 8800x7000 points sur l'horizontale, 200 niveaux

Différence entre ces régimes ?

dx !

Donc les échelles spatiales résolues

Les échelles océaniques



Plan

- Régime « eddying »
- Turbulence de mésoéchelle
- Instabilité barocline
- Métriques de fluctuations EKE, EAPE
- Paramétrisation des tourbillons

Régime « eddyding »

Rayon de déformation de Rossby

$$R_d = \frac{1}{\pi} \int_{-H}^0 \frac{N(z)}{f} dz$$

Submesoscale
permitting

Eddy
resolving

Eddy
permitting

Grande
échelle

1/5

1

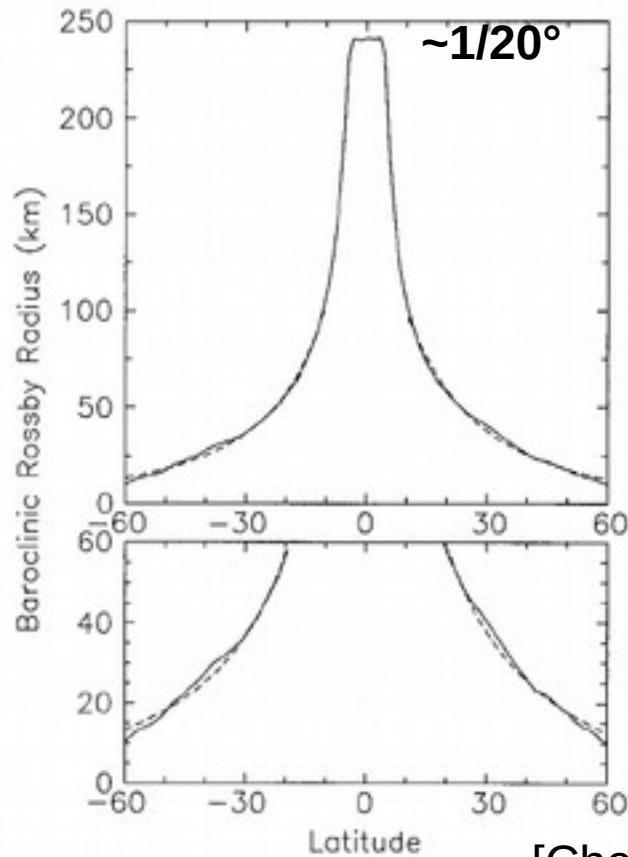
5

$$\Delta x / R_d$$

~1/20°

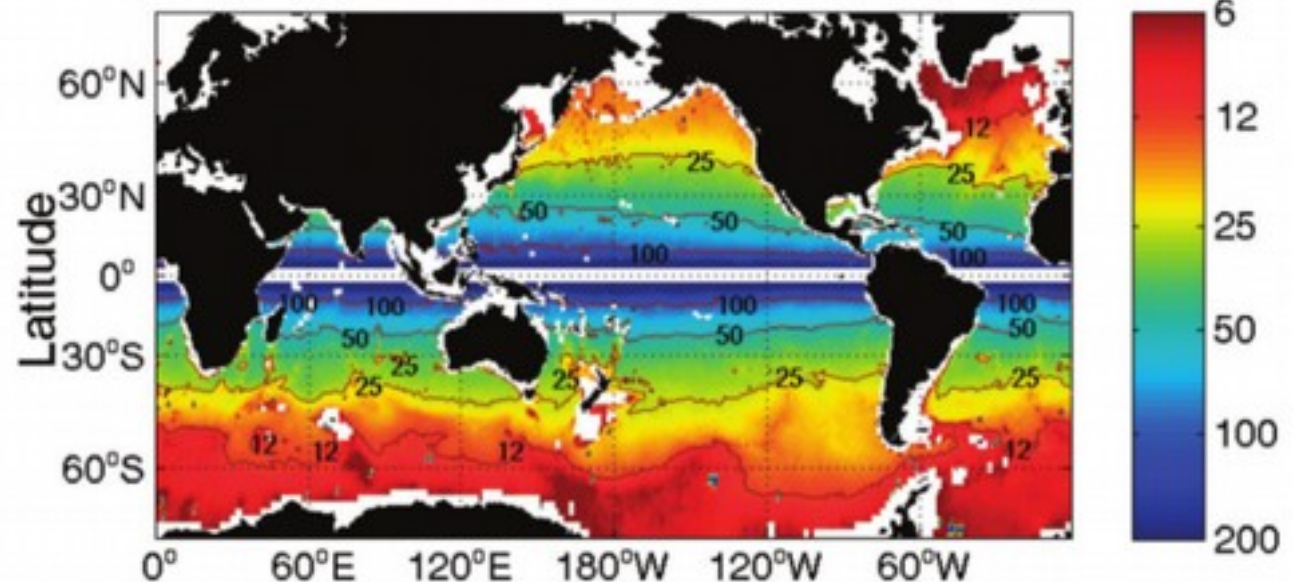
~1/4°

~1°



[Chelton et al. 1998]

First Rossby Radius of Deformation (Km)



[Smith 2007]

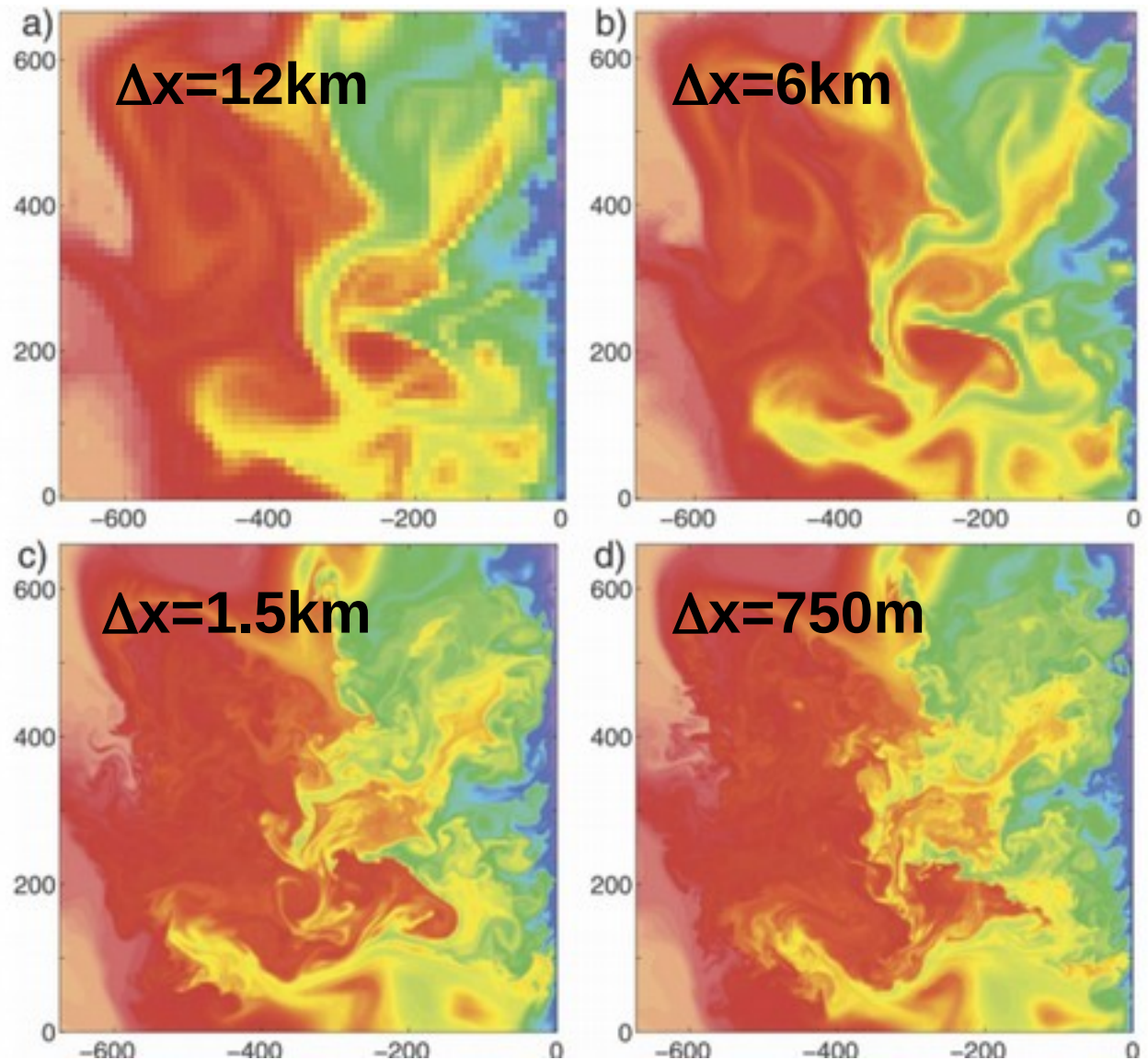
Conséquence : l'écoulement est **turbulent**

Turbulence vs.
Variabilité intrinsèque

SST

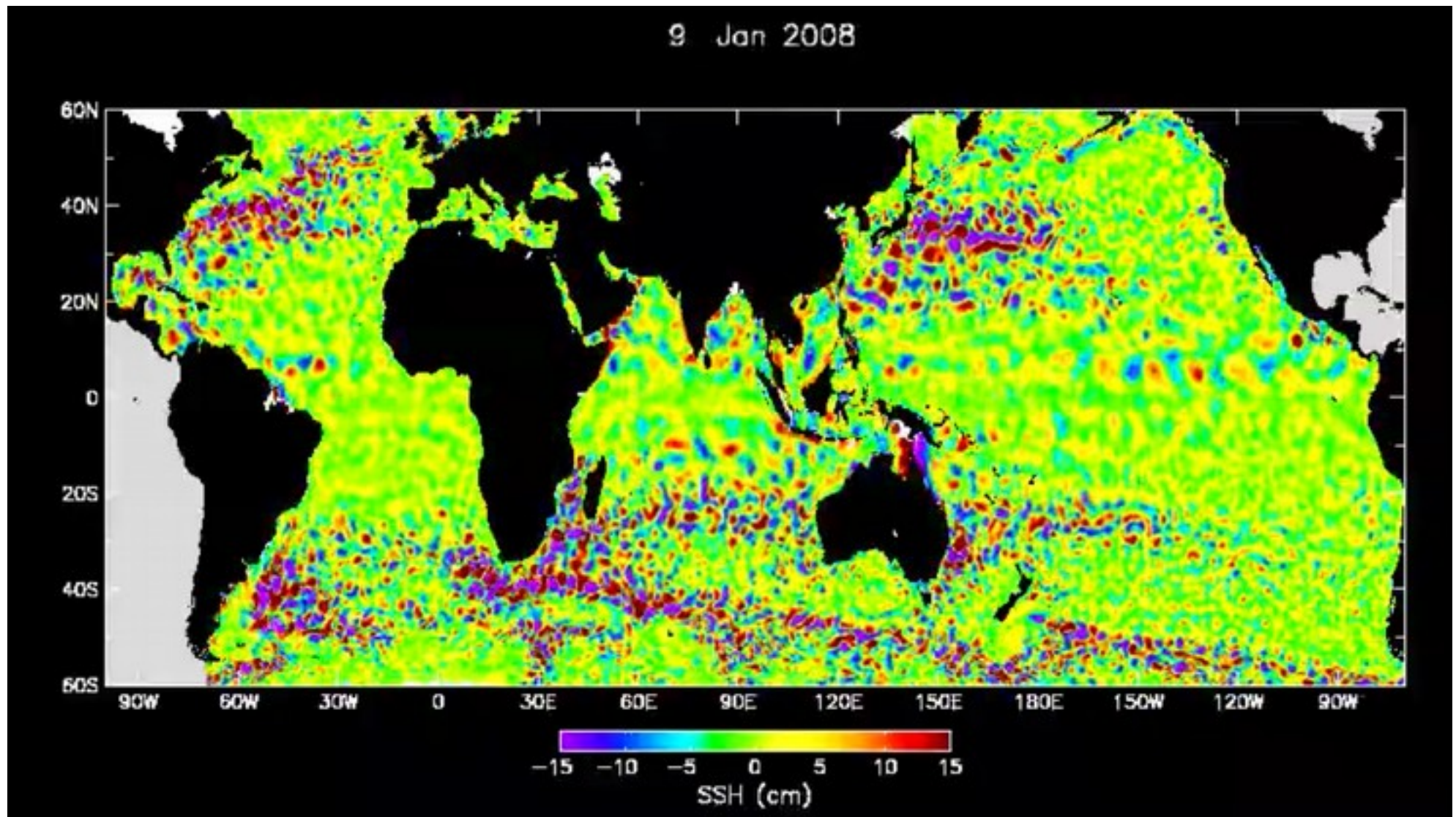
upwelling Californie
config semi-idéalisée

Rd ~ 25 km



[Capet et al 2008]

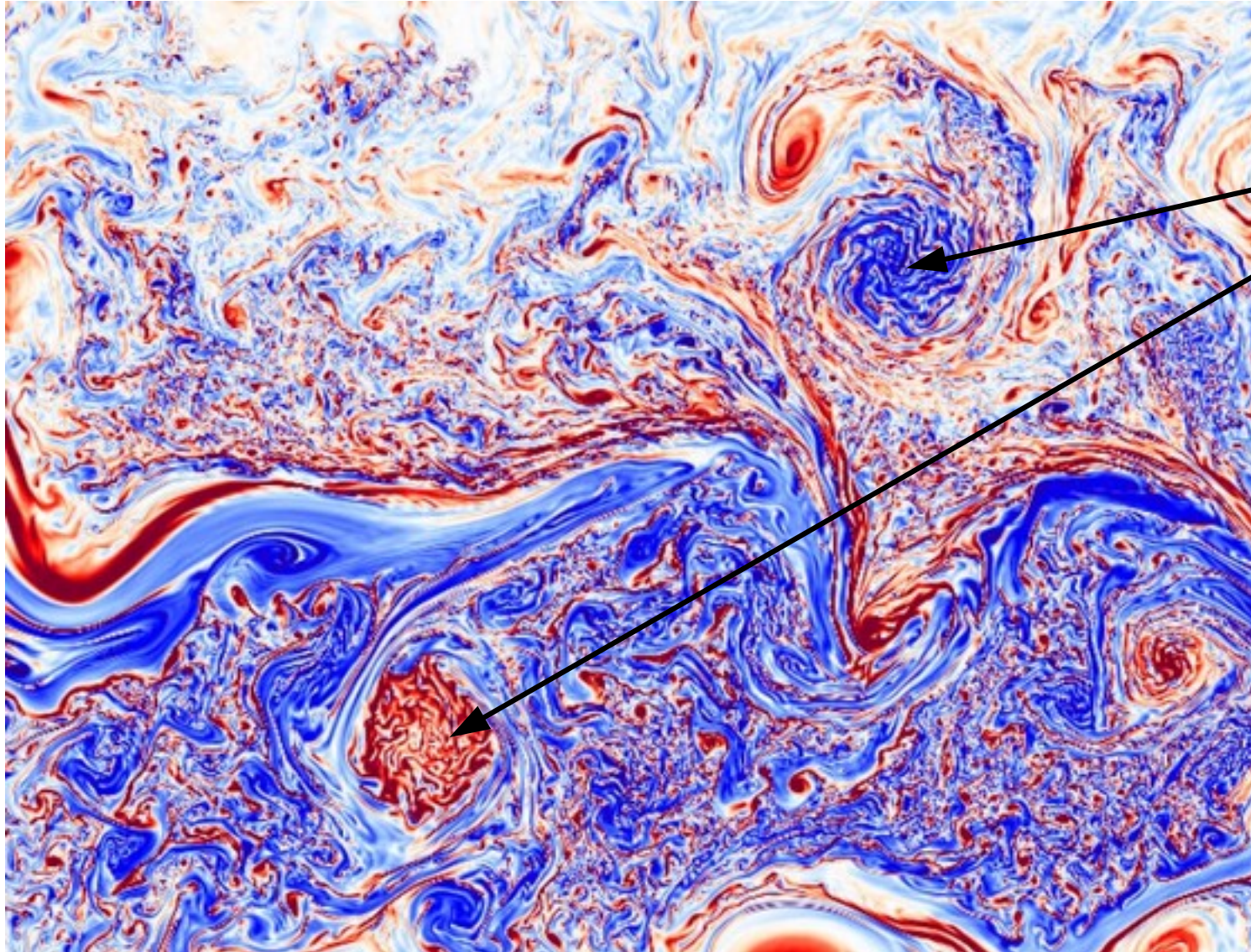
Turbulence de mésoéchelle : tourbillons et ondes de Rossby



Signal altimétrique filtré passe-haut

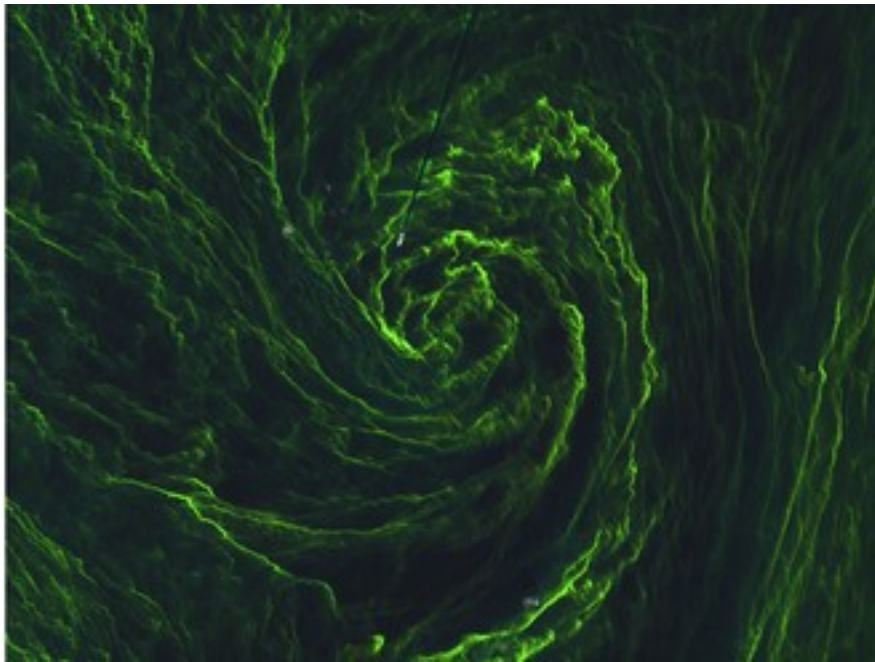
[Chelton 2008]

Et de sous-mésoéchelle : fronts, filaments, agéostrophie



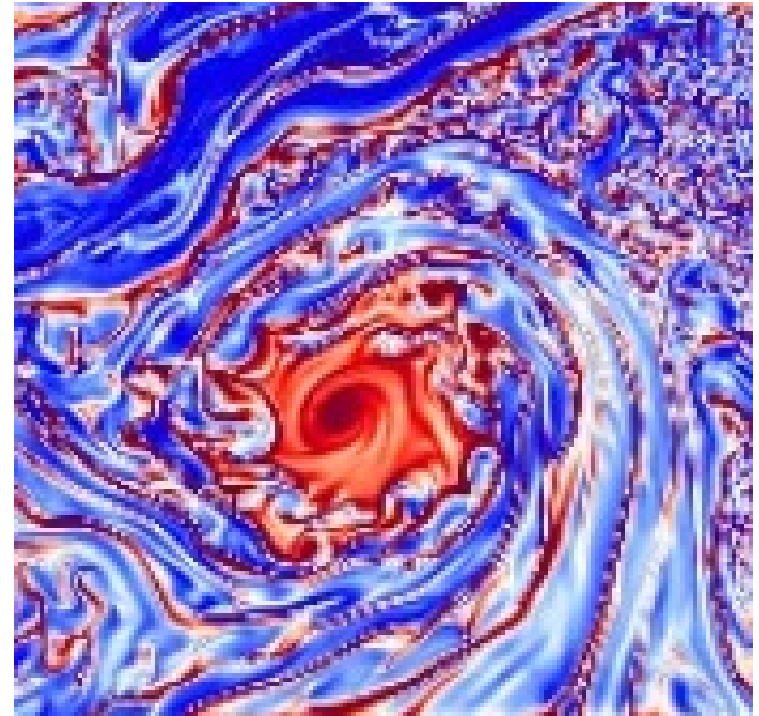
Tourbillons du
Gulf Stream

La modélisation océanique à petite échelle a une longueur d'avance sur les observations



**floraison planctonique
mer Baltique**

**Sentinel 2A, lancé le 23 juin
2015, résolution 10m**

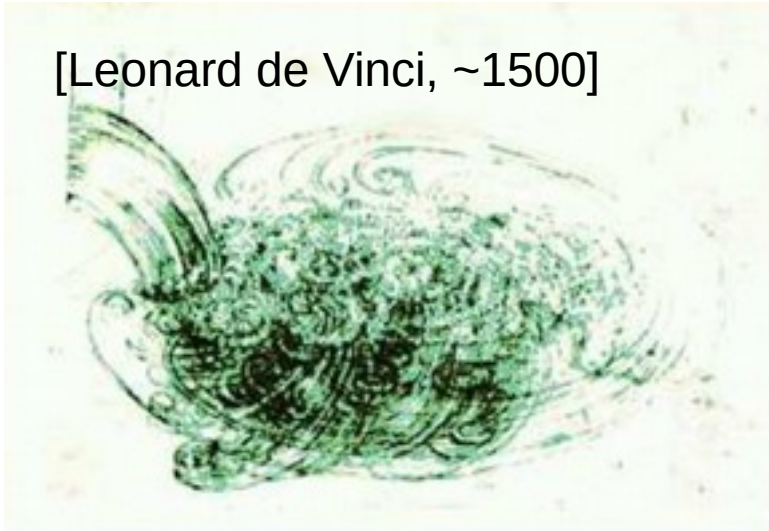


**Turbulence sous-mésoéchelle
dans tourbillon mésoéchelle**

**Modèle ROMS, automne 2012,
dx=150m**

Caractéristiques de la turbulence

[Leonard de Vinci, ~1500]

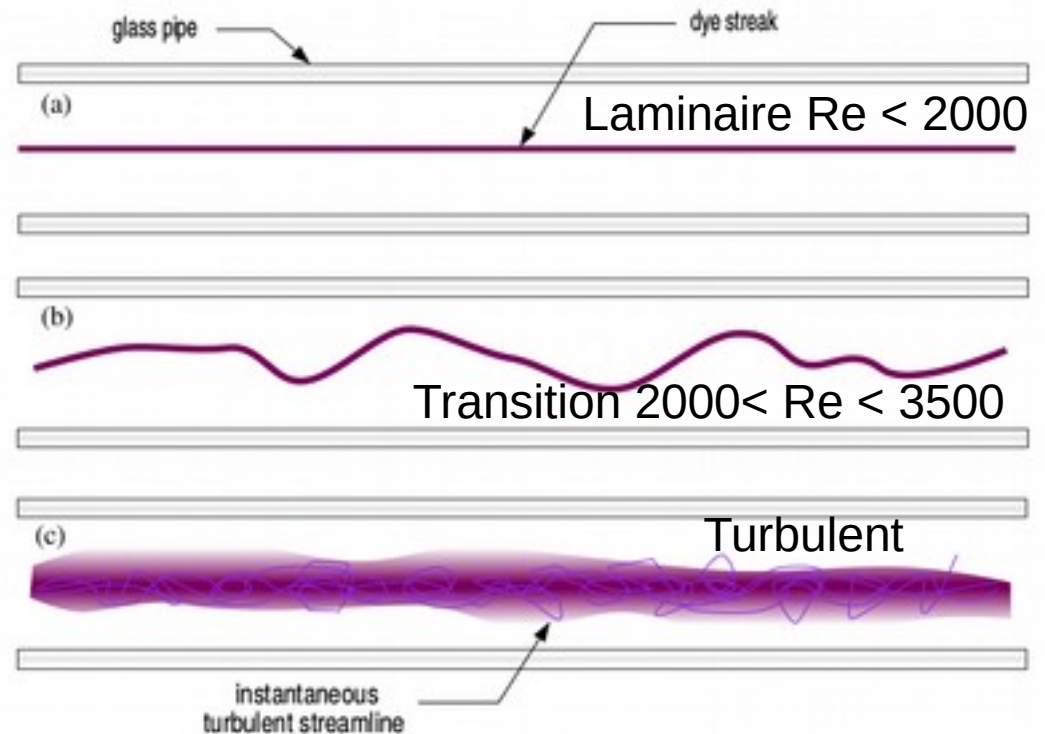


Ingrédients de la turbulence

- 1) Hiérarchie de tourbillons = petits, moyens, grands etc. (fractales, lois de puissance, invariance d'échelle)
- 2) Vaste intervalle d'échelles temporelles
- 3) Dynamique de la vorticité
- 4) Aspect aléatoire du mouvement**
- 5) Dissipation et mélange
- 6) Intermittence spatiale et temporelle

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{U L}{\nu}$$



Trajectoire individuelle chaotique, imprévisible

Turbulence de mésoéchelle

- Dominée par rotation + stratification
- De grosses particularités comparée à turbulence 3D
- Anisotropie horiz / vert
- **Dissipation de l'énergie aux grandes échelles**
cascade inverse d'énergie cinétique
- **Entretenu par l'instabilité barocline**
- Pendant longtemps réservée aux modèles simplifiés (QG et autres), maintenant modèles PE

$$\frac{L_h}{L_v} \sim \frac{N}{f}$$

Turbulence méso vs. grande échelle

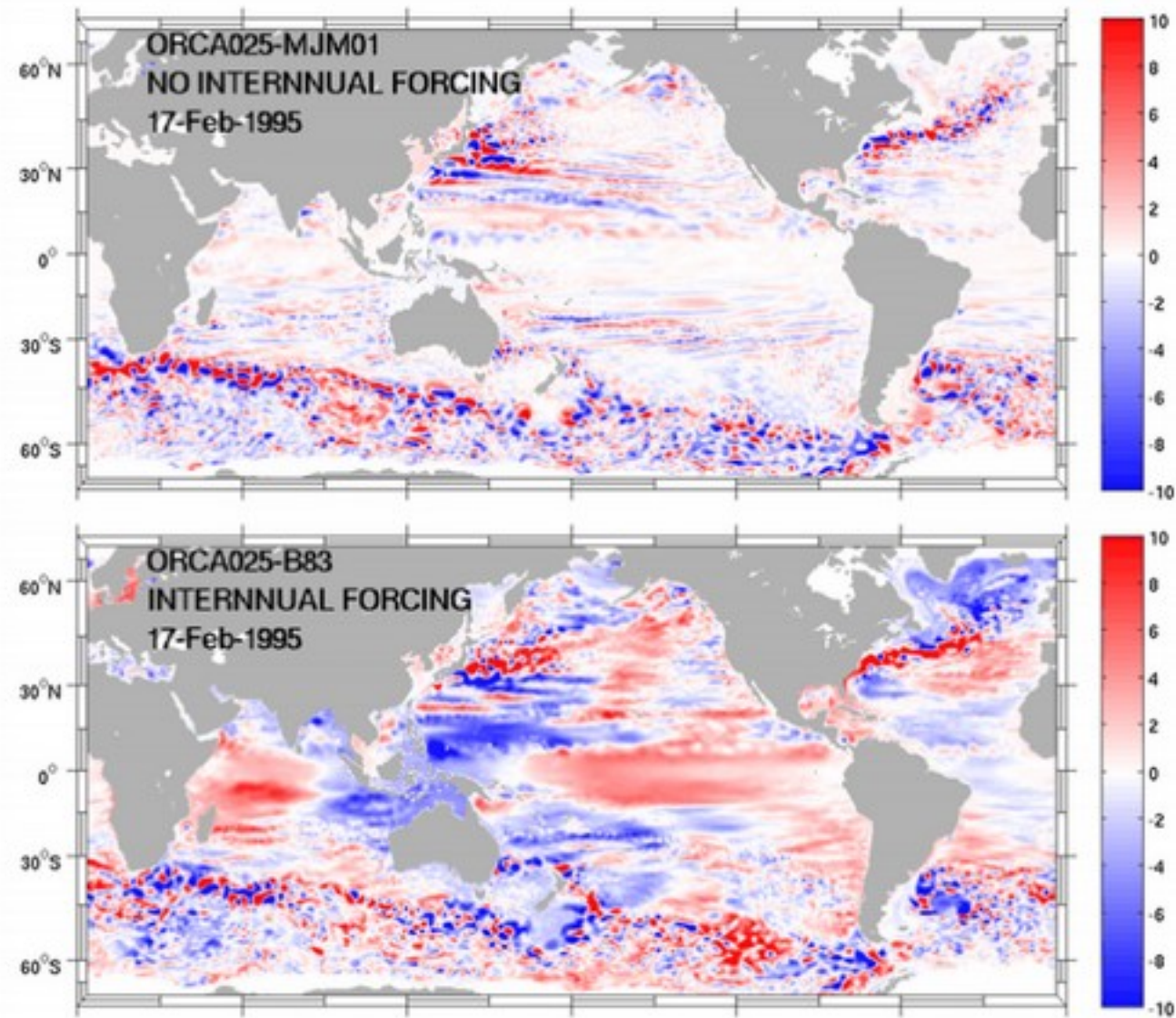
- **Grande échelle** : modélisation de la circulation générale. Plutôt laminaire, faiblement oscillante ou changements abrupts (arrêt de l'AMOC). **Réservoir d'énergie potentielle** (stockée dans la pente des isopycnes)

Interaction dans les deux sens



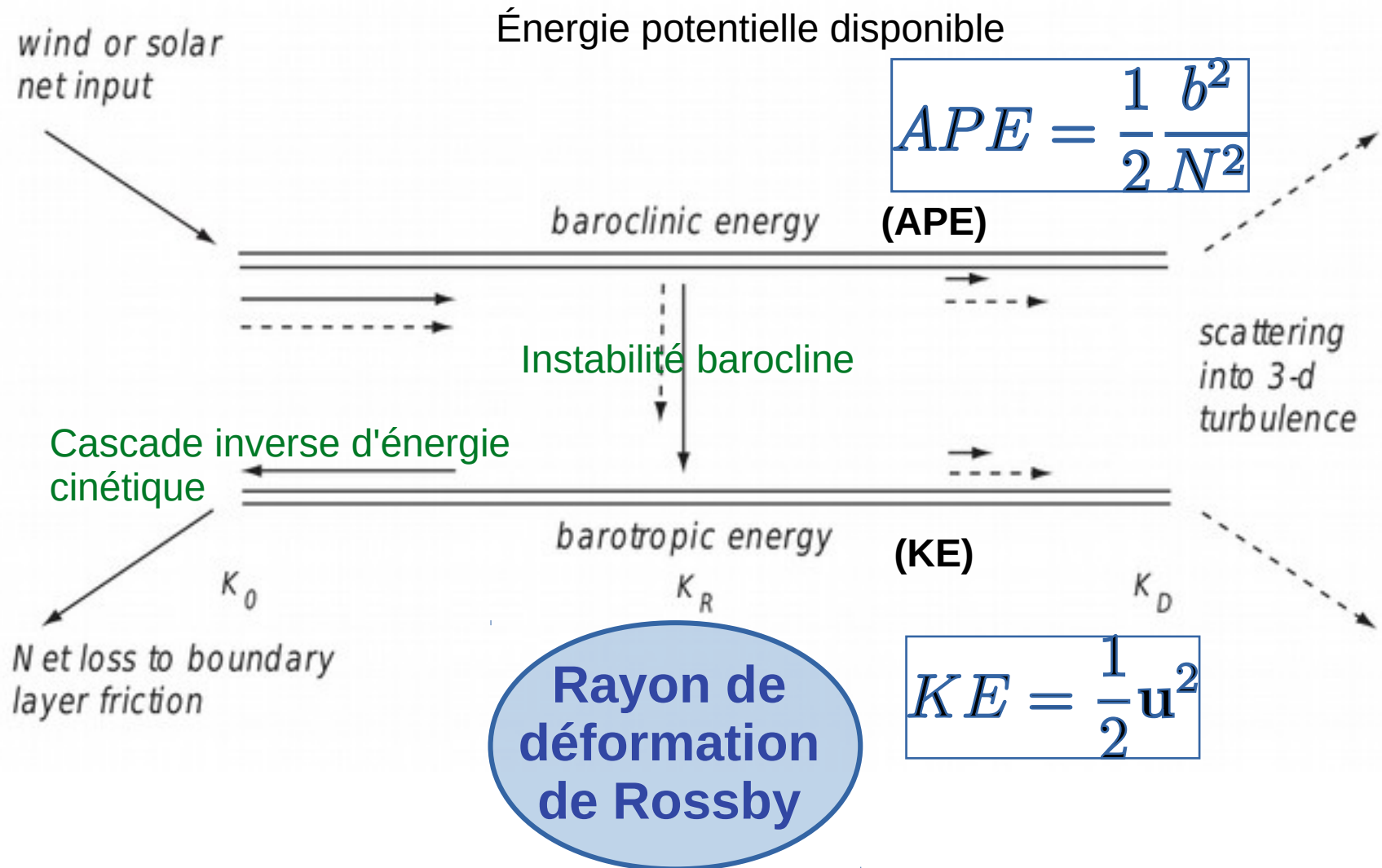
- **Méso et subméso** : écoulement turbulent, grande variabilité intrinsèque, couplage avec l'atmosphère à petite échelle. **Réservoir d'énergie cinétique (80%)**.

La turbulence génère de la variabilité à toutes échelles de temps, y compris interannuelle



[Sérazin et al. 2015]

Transferts à travers les échelles : cascades



Cartoon à 2 couches = barotrope + 1^{er} barocline

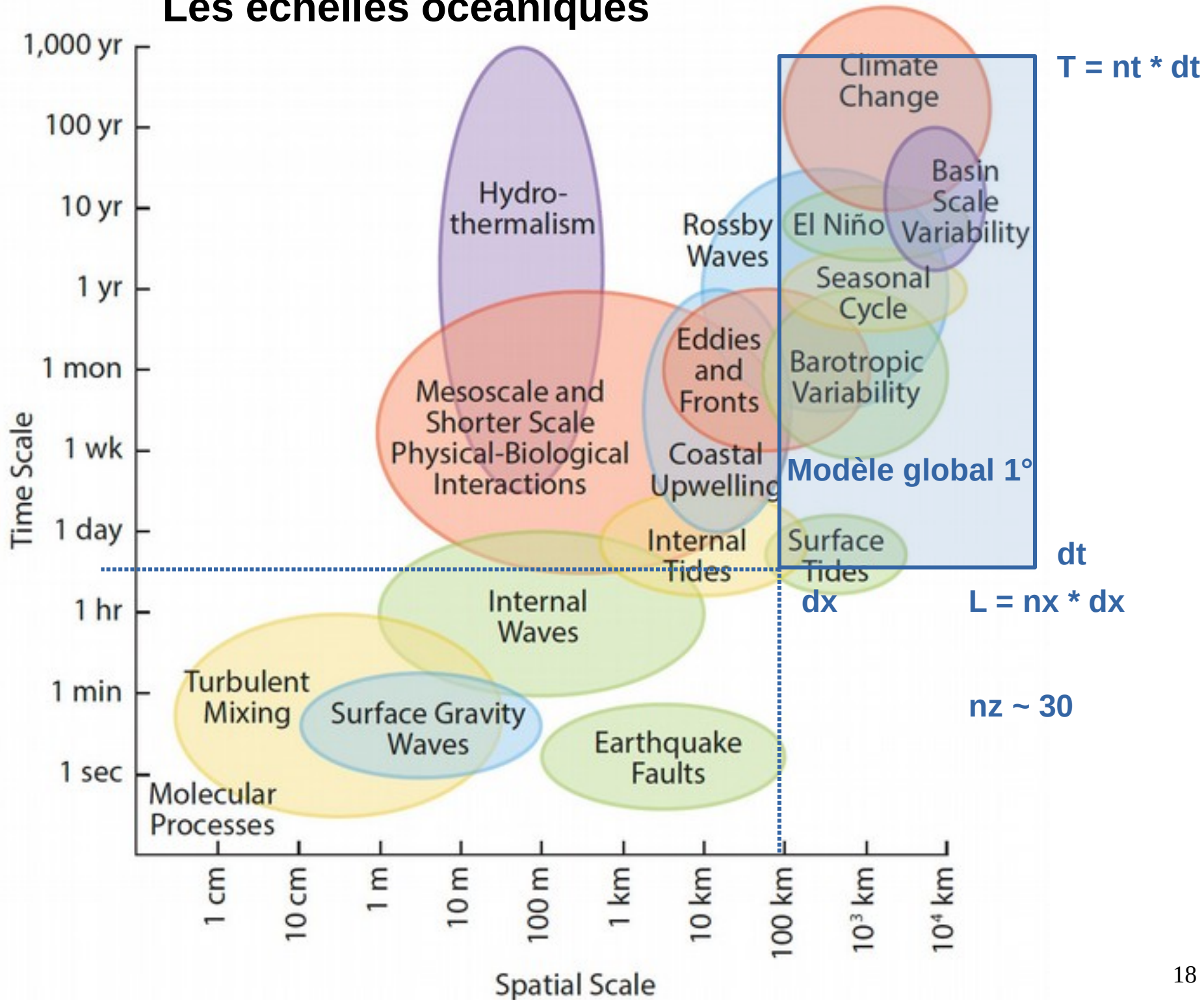
[Salmon 1980]

Recette : pour avoir des tourbillons il faut que la grille résolve Rd

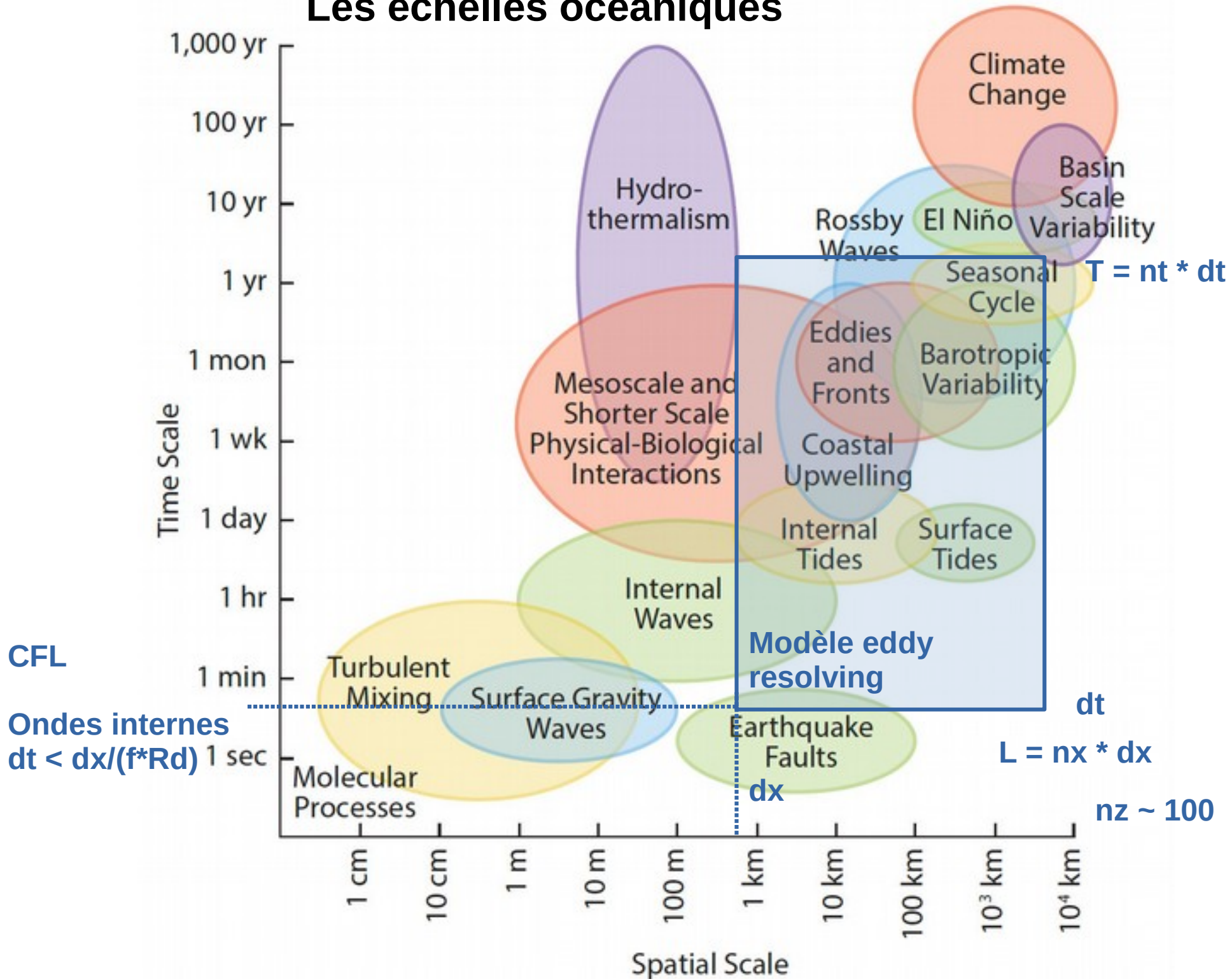
Les échelles océaniques

CFL

Coriolis
 $dt < 1/f$



Les échelles océaniques



Coût d'une simulation eddy resolving

- Points de grille * itérations $n_x^2 n_z n_t$
- Echelles résolues $\sim n_x$
- Itérations $n_t = T/dt = cT/dx = (cT/L)n_x$
- Temps par point de grille par itération $\sim 10^{-6} s$

- **Coût temps cpu :**

$$\tau \sim 10^{-6} n_x^3 n_z (cT/L)$$

(Si tout va bien ;-)

- dx détermine la plus petite échelle résolue
- nx détermine l'étendue des échelles résolues

Vitesse des ondes internes (1^{er} mode barocline)

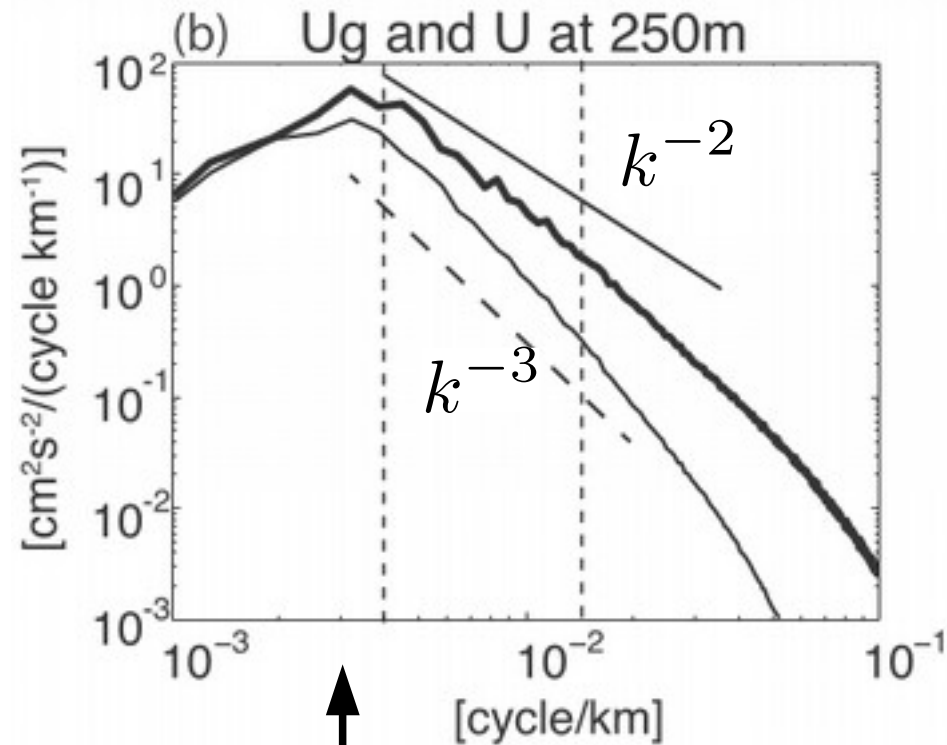
$$c = R_d f \sim 3 m s^{-1}$$

L'énergie s'accumule à l'échelle de Rhines

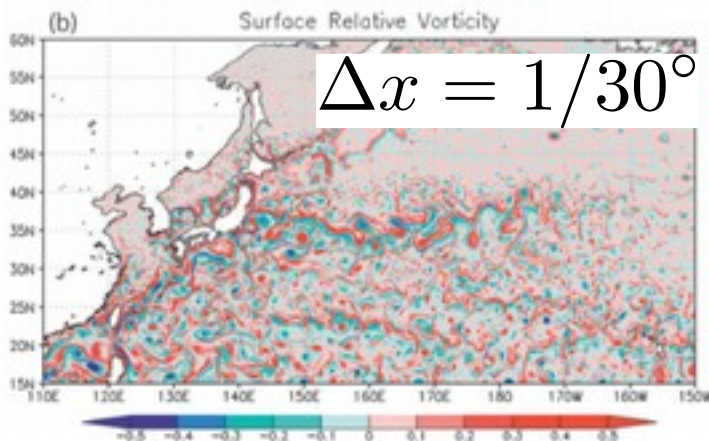
Spectre d'énergie = distribution d'énergie en échelles horizontale

Échelle de Rhines =
arrêt de la cascade
= pic de KE

=> 80 % de KE océanique se trouve dans les fluctuations



[Sasaki & Klein 2012]



Echelle de Rhines

$$L_R = \sqrt{\frac{2U_{rms}}{\beta}} \quad \text{donné par} \quad u \nabla u \sim \beta v$$

Instabilité barocline vs barotrope

- Jet cisailé en y et en z , structure en pv $\bar{q}(y, z)$
- Critère nécessaire d'instabilité :

change de signe

$$\bar{q}_y$$

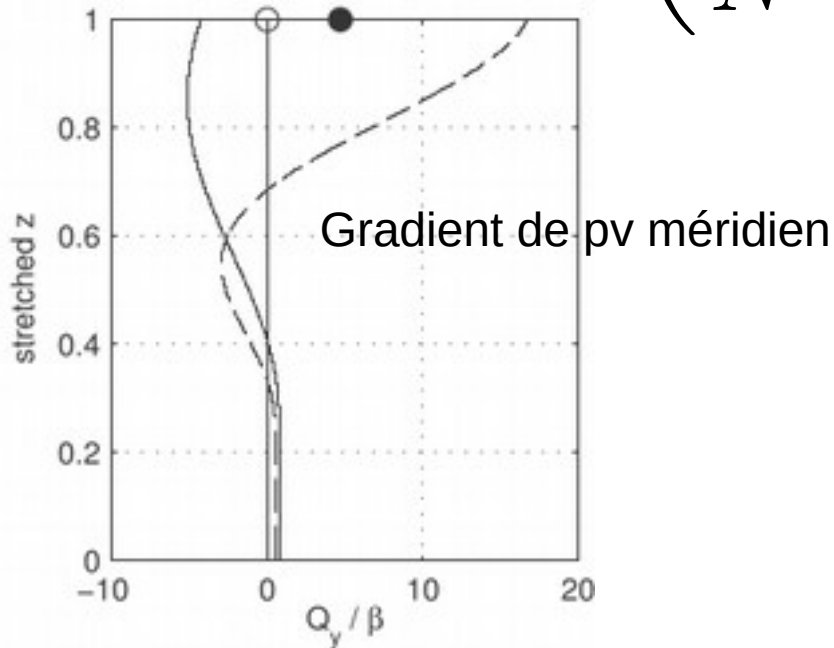
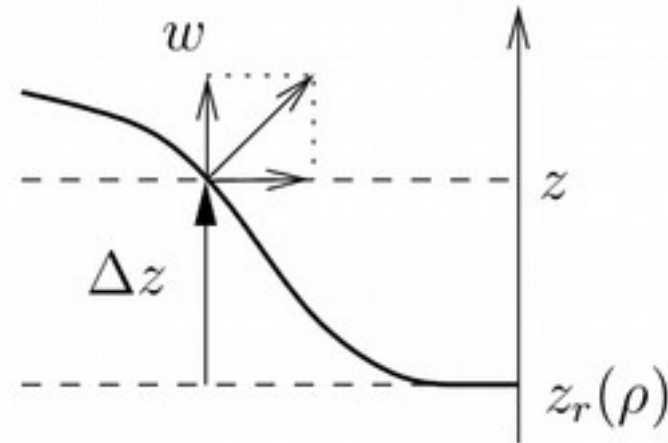
- **Sur l'horizontale : instabilité barotrope** (pv dominée par vorticité)
- **Sur la verticale : instabilité barocline** (pv dominée par stretching). **critère de Charney-Stern-Pedlosky**

=> Condition extremum local sur la PV (en y ou en z)

Déplacement isopycnal / anomalie de flottabilité (buoyancy)

$$-\Delta z \approx \frac{b}{N^2}$$

$$q = \zeta + f \partial_z \left(\frac{b}{N^2} \right)$$



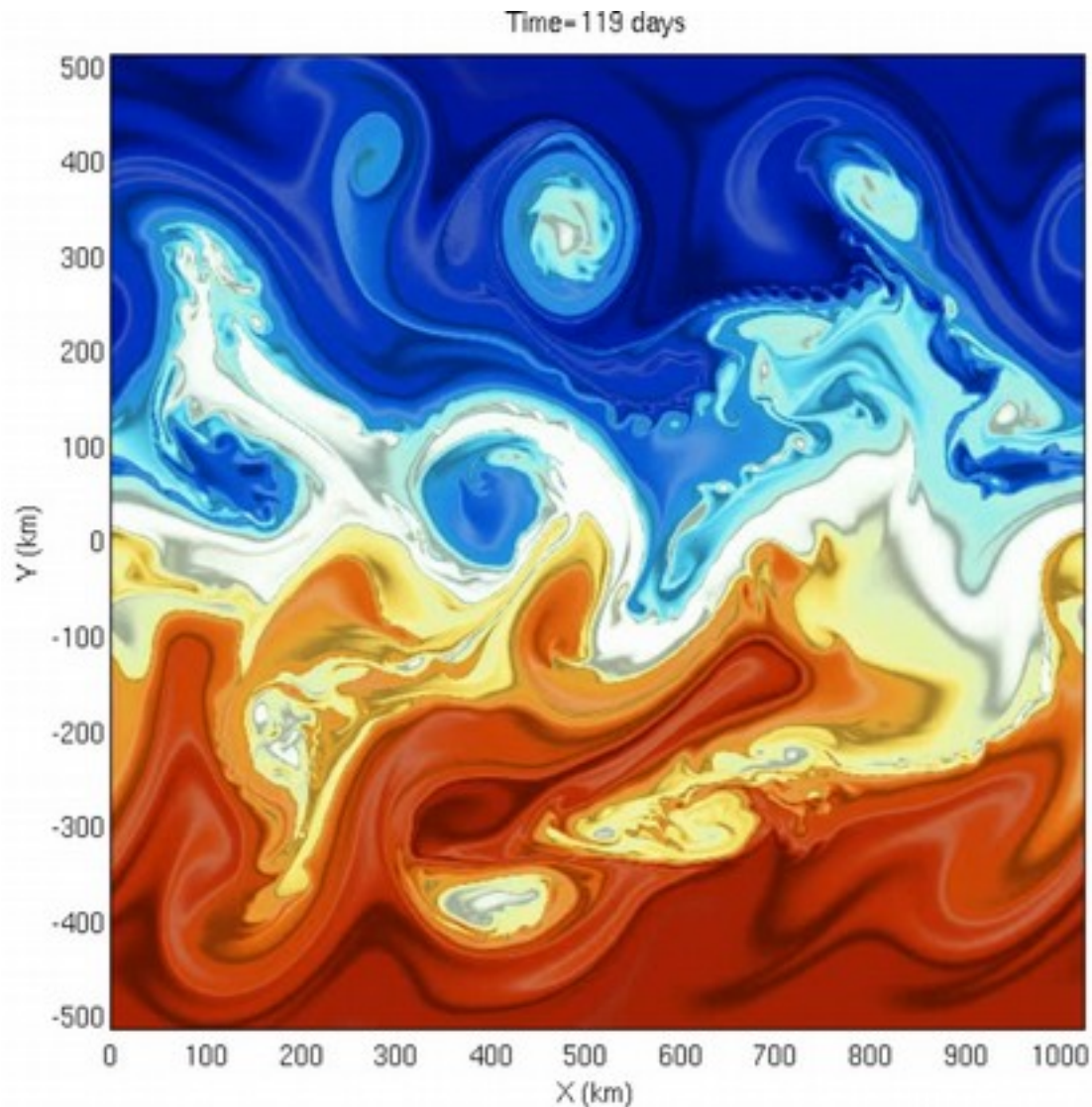
3 types d'instab barocline

- **surface – intérieur** : **Charney** (promeut la sous-mésoéchelle)
- **intérieur** : **Phillips** (cas océanique)
- **surface – fond** : **Eady** (atmos)

L'instabilité barocline relaxe le gradient de température méridien = aplatit les isopycnes
 => il en résulte un transport de chaleur à travers le jet

Instabilité barocline de type Charney

Modèle QG 3D
Canal reentrant
Température de surface (SST)

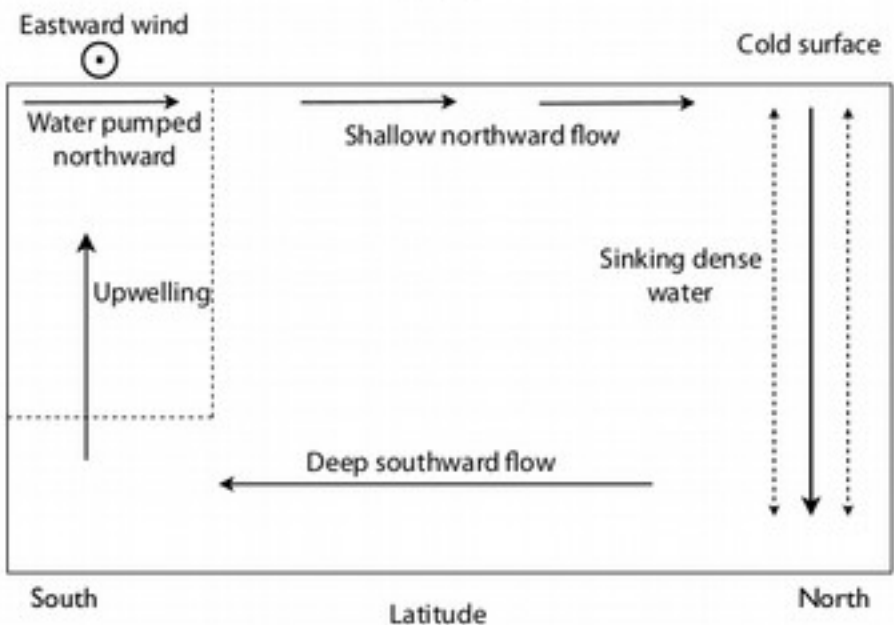
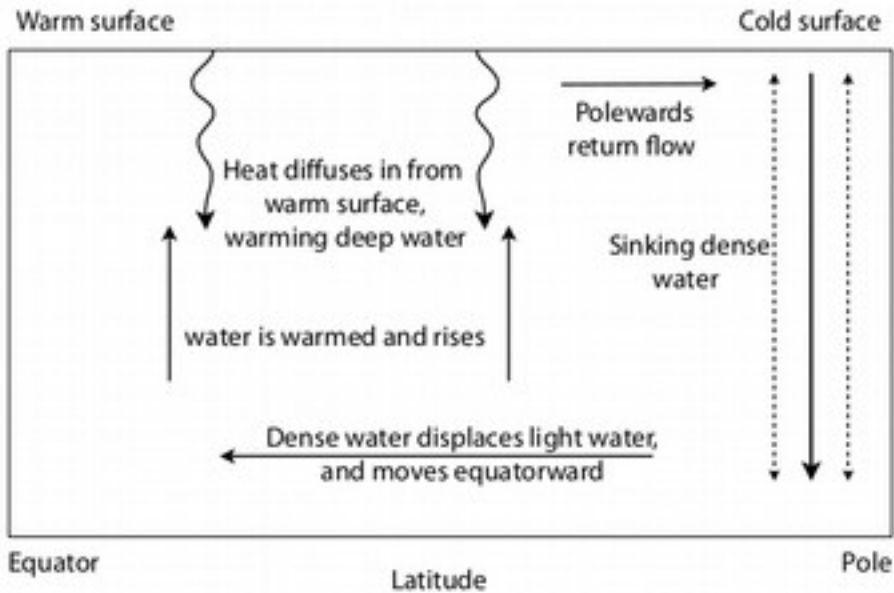


Jet zonal (idéalisée ACC)

Destabilisation en tourbillons
de méso et sous-
mésoéchelle

[Roullet et al 2012]

L'ACC : un océan particulier



Il participe pleinement à l'équilibre de l'AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation

Il connecte tous les océans

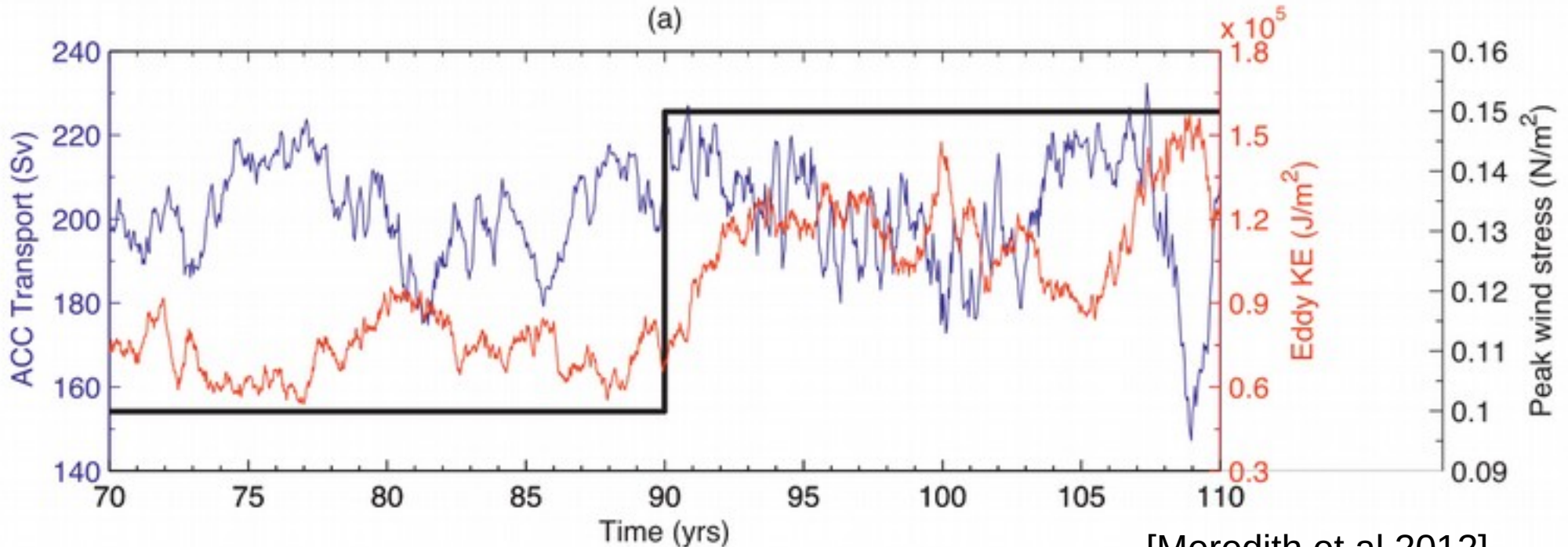
Les deux mécanismes de l'AMOC :

a) mélange diapycnal

b) pompage d'Ekman

Pour lequel les tourbillons sont clefs

- Mécanisme de « Eddy saturation » :
 - Le transport de l'ACC est relativement indépendant de la tension de vent



[Meredith et al 2012]

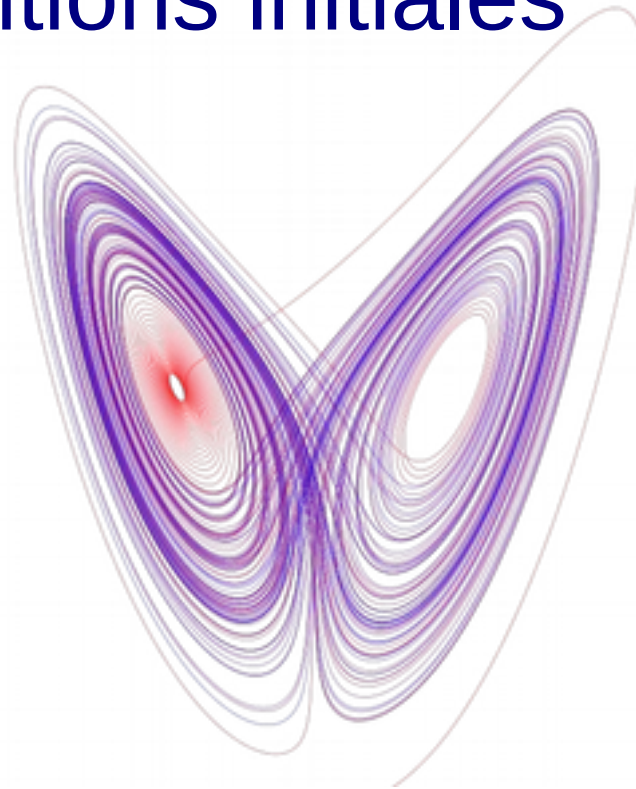
L'ajout d'énergie par le vent (gras) part dans les tourbillons (rouge), pas le courant moyen (bleu)

Interprétations possibles : stabilité marginale (seuil de l'instab barocline)

Sensibilité aux conditions initiales

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} &= x(\rho - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \beta z.\end{aligned}$$

$$\sigma = 10 \quad \rho = 28 \quad \beta = 8/3$$



[Lorenz 1963]

https://en.wikipedia.org/wiki/Lorenz_system

Système Hamiltonien forcé-dissipé.

Qq soient les CI, les trajectoires divergent et deviennent totalement différentes. **Effet papillon**

Conséquences

Lorenz a réussi à dégager l'essence du chaos (à partir des équations de la météo!).

L'océan est chaotique

Il ne faut pas attacher trop d'importance à la trajectoire particulière d'une simulation turbulente !!! [*cependant la reproductibilité des résultats est très utile en pratique*]

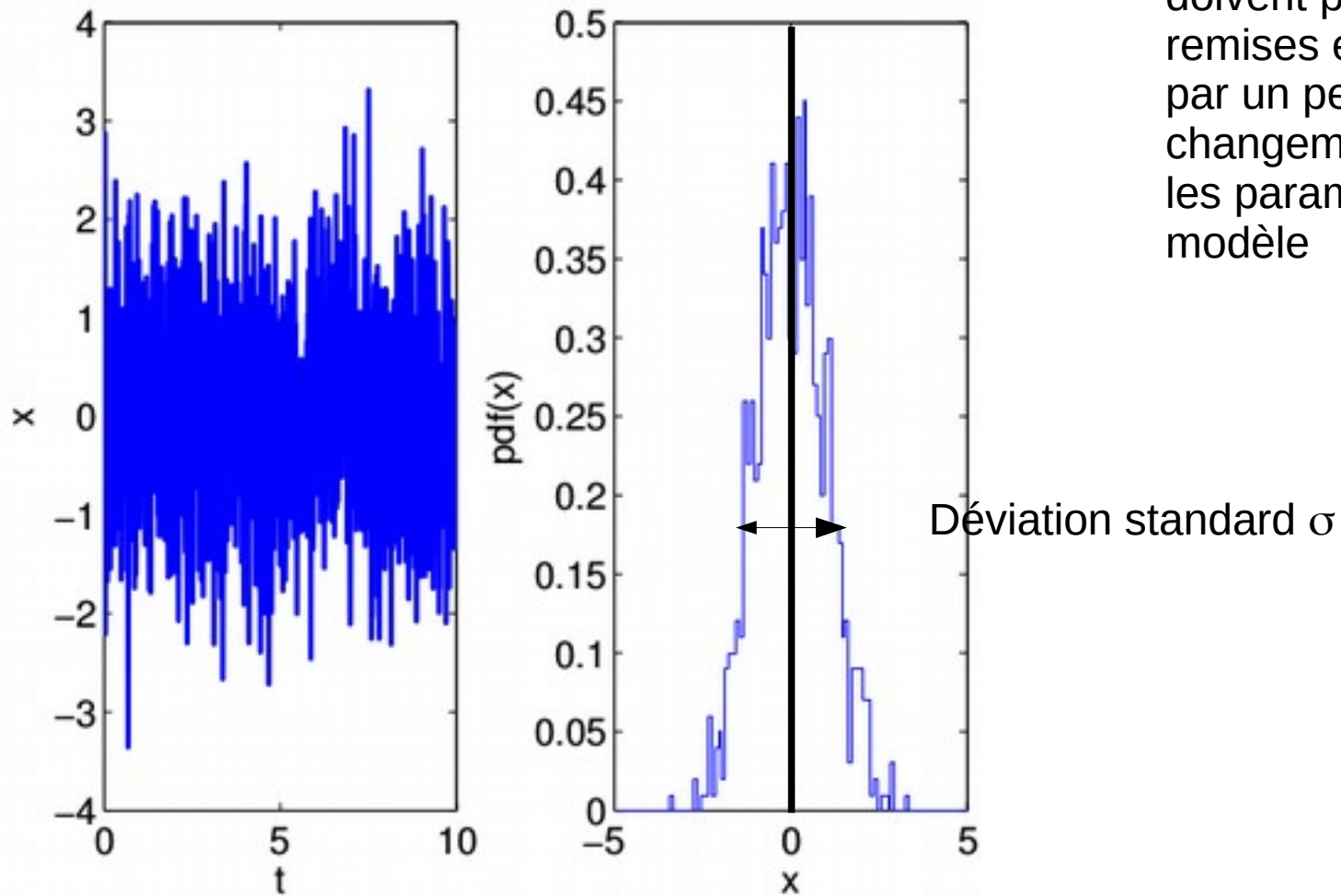
Du fait de la SCI n'importe quelle erreur de troncature conduira à une trajectoire différente au bout d'un certain temps, e.g.

- Changement de compilateur, de partition de domaine, restart dégradé
- CI légèrement différentes, forçage légèrement différent (léger = $1e-6$)
- etc

Propriétés robustes : statistiques !

Moyennes, variances, PDFs

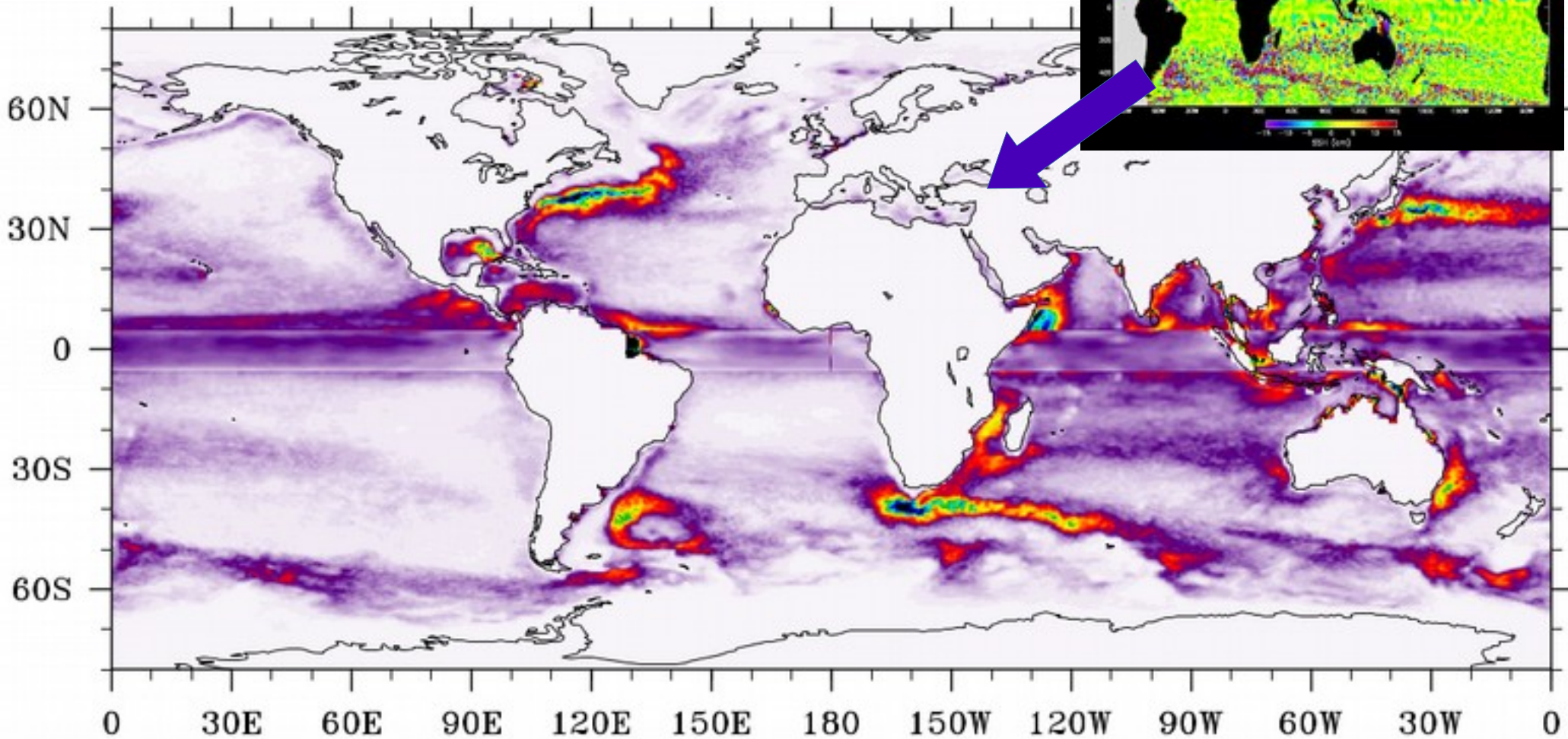
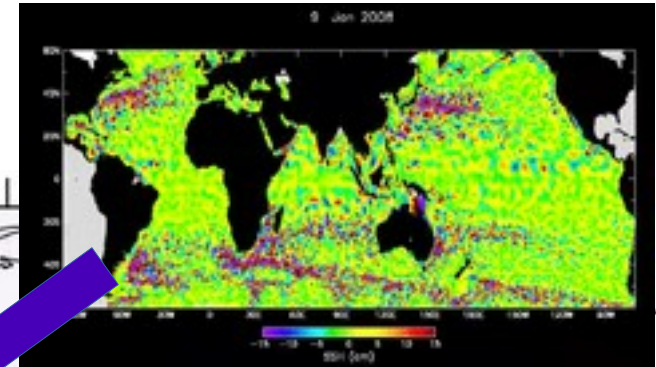
Robustesse :
Les conclusions ne doivent pas être remises en question par un petit changement dans les paramètres du modèle



Distributions gaussiennes mais aussi exponentielles, en loi de puissances

Une mesure des fluctuations : EKE, std(SSH)

Exemple : **EKE** $\frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}'^2} = \frac{1}{2} \text{var}(\mathbf{u}')$



Clim. AVISO

surface EKE [cm²/s²]



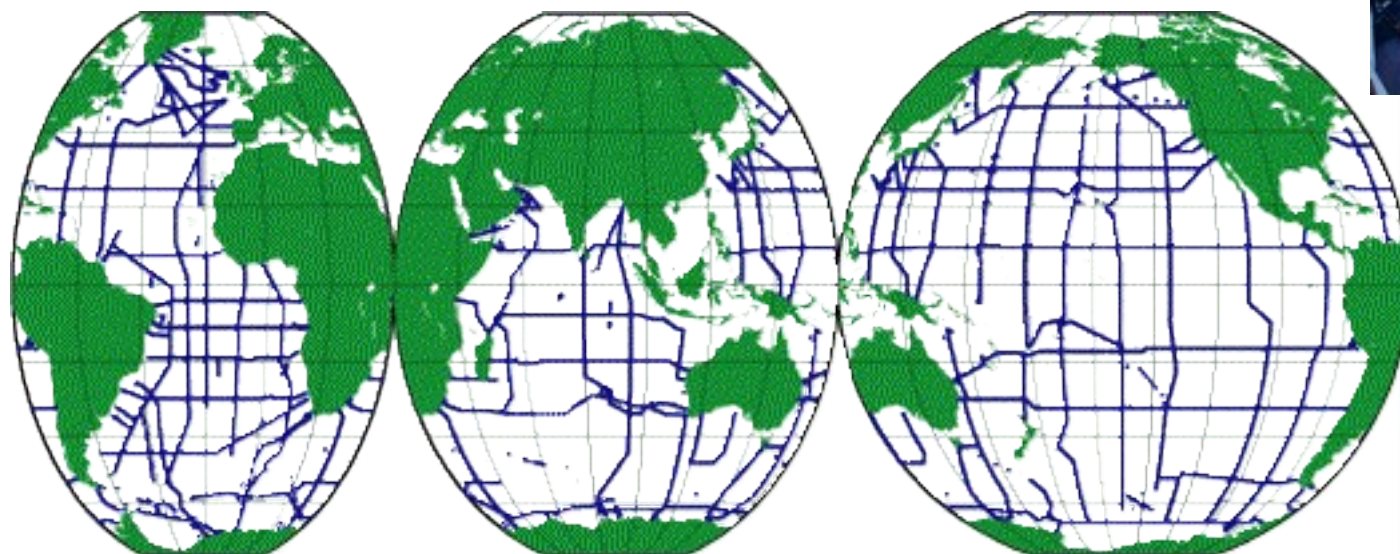
EKE est LA métrique d'évaluation des modèles eddying

- MAIS : métrique de surface uniquement
- Quid des autres mesures satellitaires (sst, couleur de l'eau, radar) ? 400Gb/day de données fraîches ! Et jusqu'à la sous-mésoéchelle
- Quid de l'intérieur ?
 - Jusqu'à récemment : données éparses, insuffisantes pour échantillonner la variabilité mésoéchelle.
 - À présent : **Argo**

[http://
www.coriolis.eu.org/](http://www.coriolis.eu.org/)



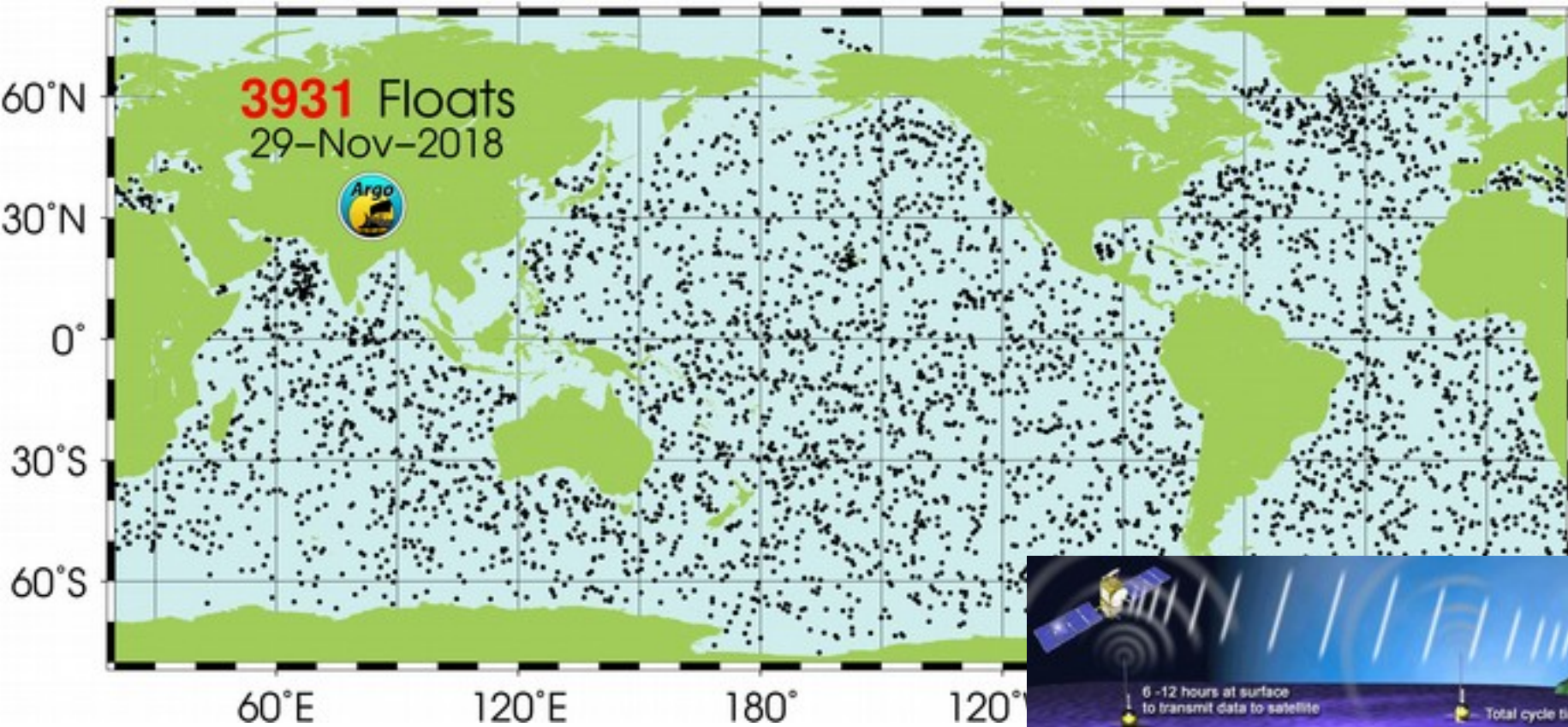
Programme international WOCE (années 90)
En 8 ans : 30 000 profils



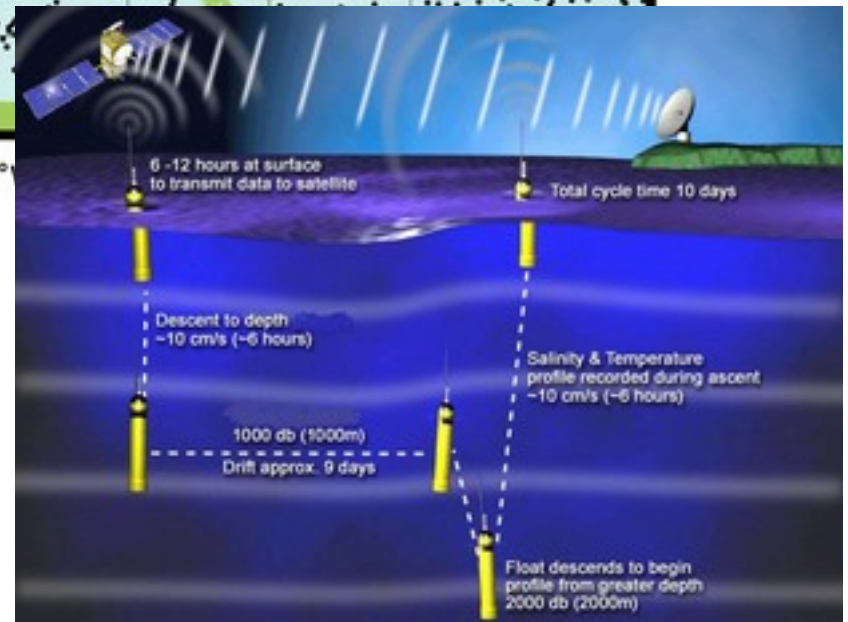
Collecte par les navires
Marchands (ici le total en 2002)



La position des flotteurs au 29 novembre 2018

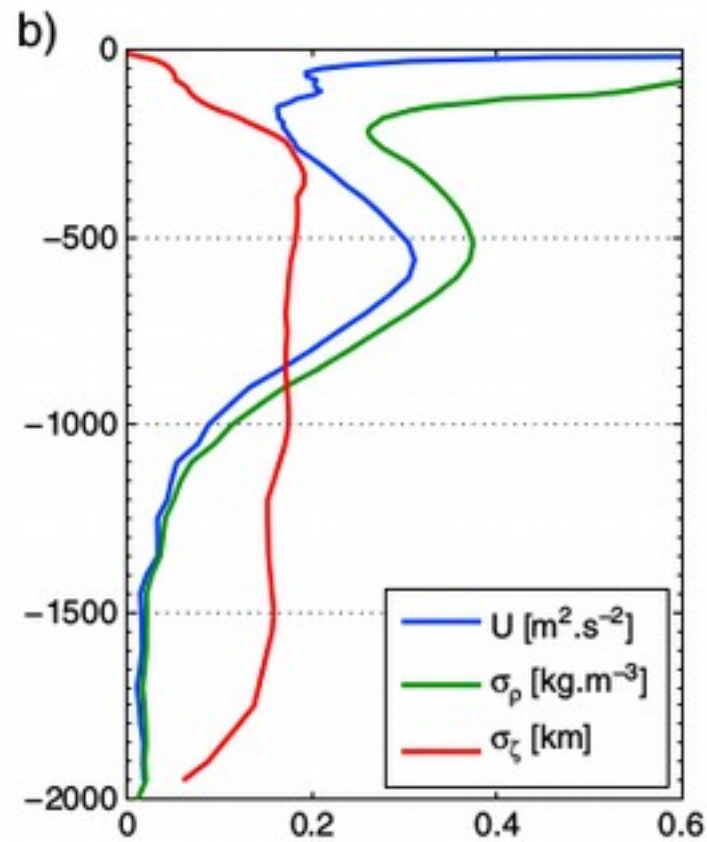
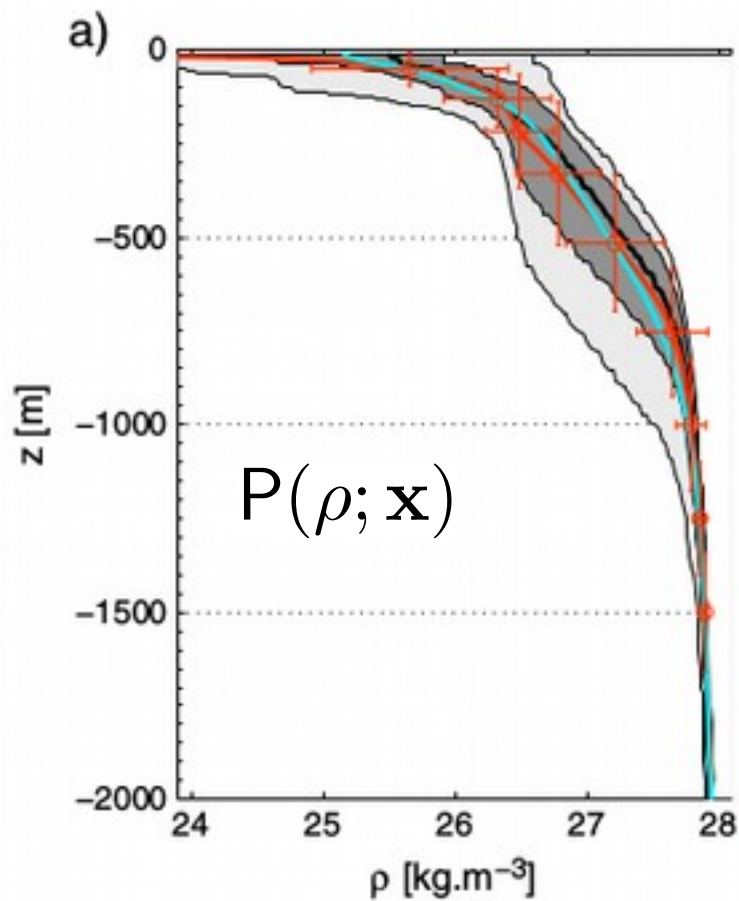
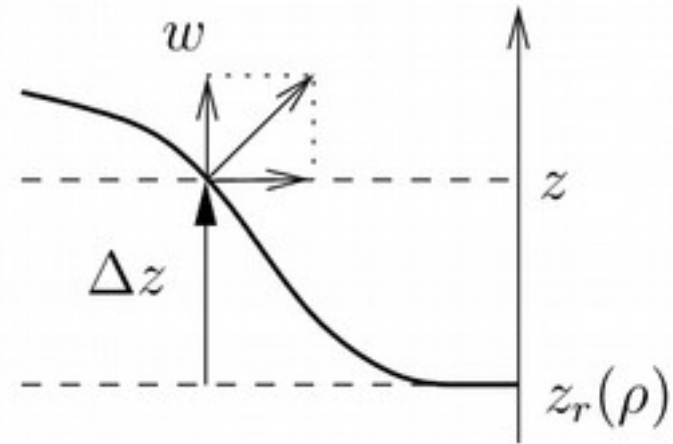


Début du programme : 2000
1 profile vertical / flotteur / 10 jours
Environ 1.8 million de profils obtenus



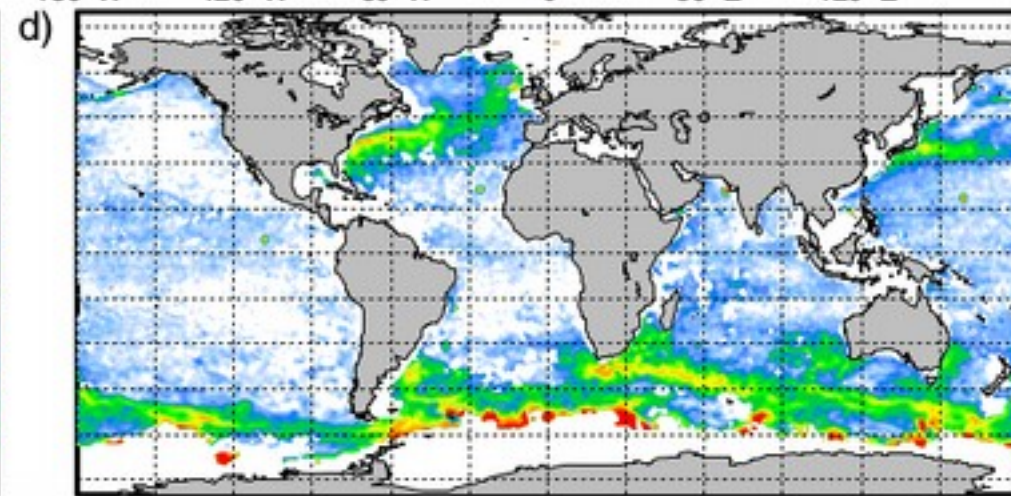
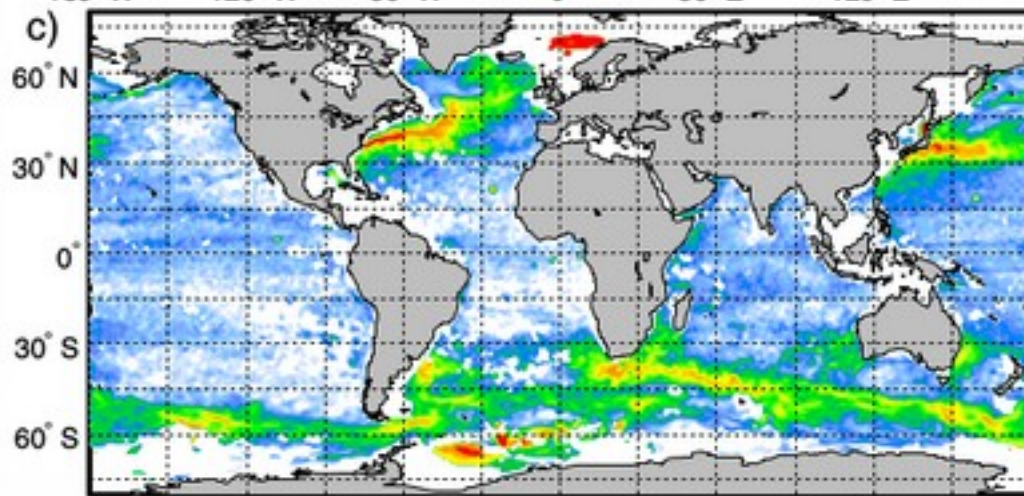
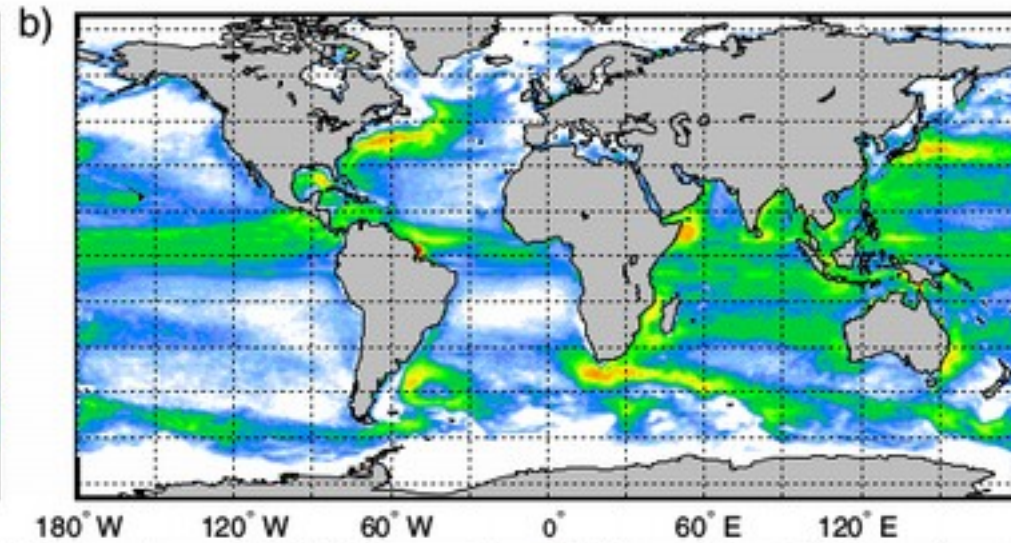
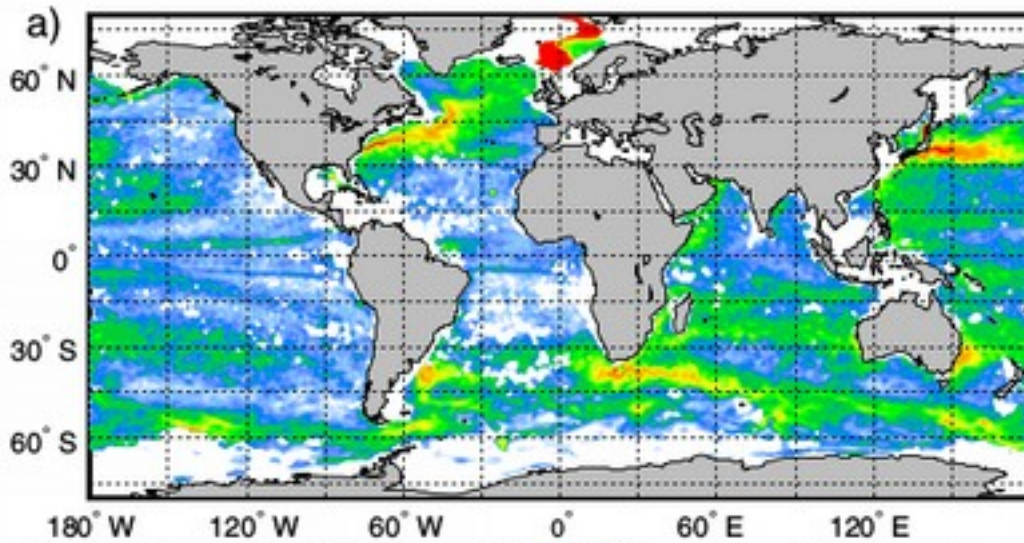
Nouvelle métrique 3D

EAPE $\frac{1}{2} \overline{b' \Delta z'}$



EAPE (250m)

EKE (Aviso)



EAPE (500m)

EAPE (1000m)

Rôle de la topographie

Contrainte numérique :

Ondes de Rossby topographiques (iso-f/H)

$$c_R \sim c_g \frac{R_d}{l} > c_g$$

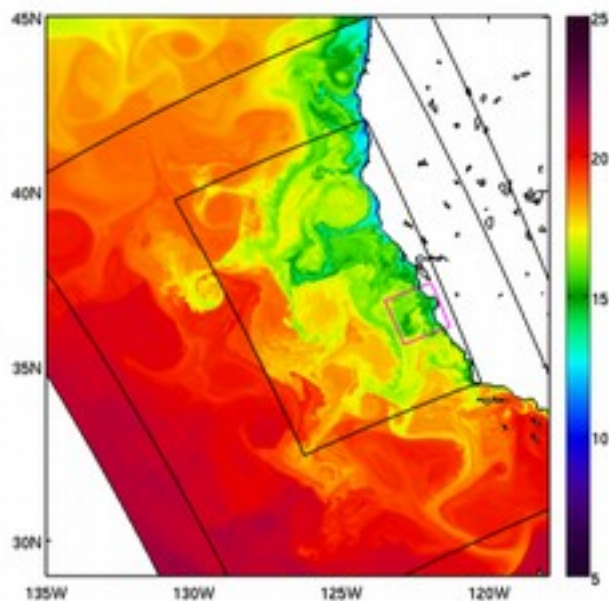
La CFL de ces ondes est totalement caché (**gradient de pv via la condition aux limites de fond !**)

Structure cross-shore compliquée + piégées au fond

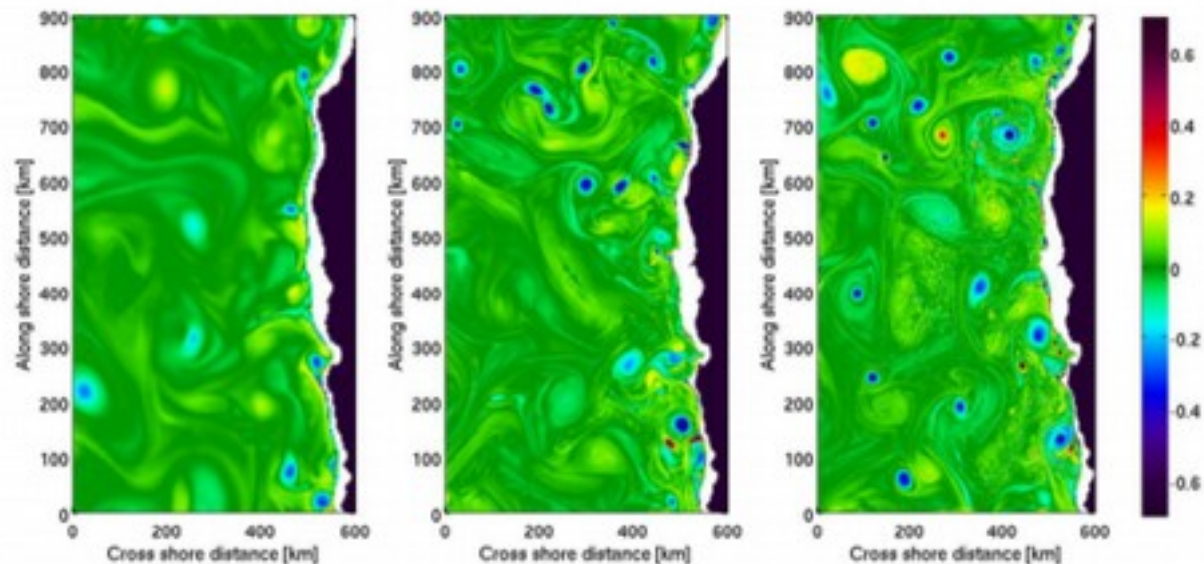
Mais bien présentes dans les modèles, excitées par la turbulence mésoéchelle ...

Interaction avec la couche limite de fond

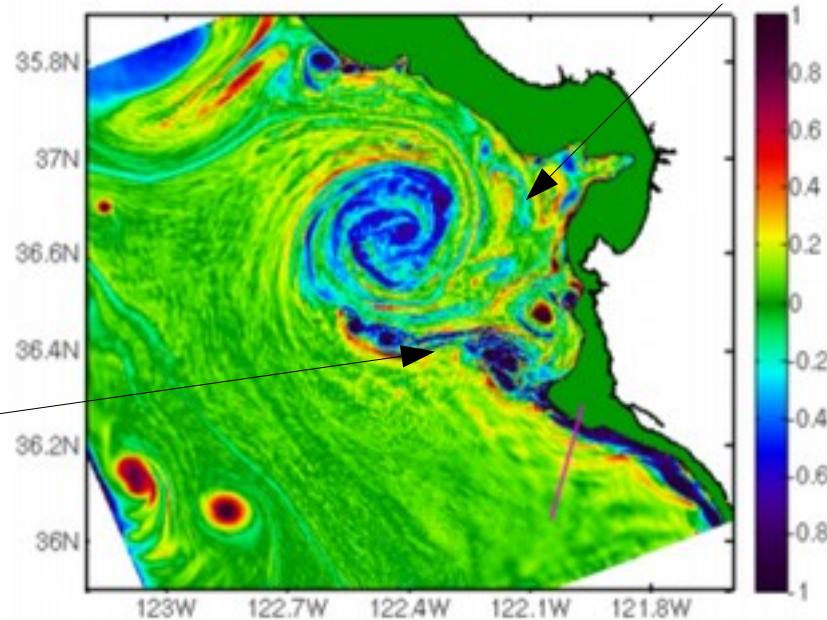
Zooms, US West Coast



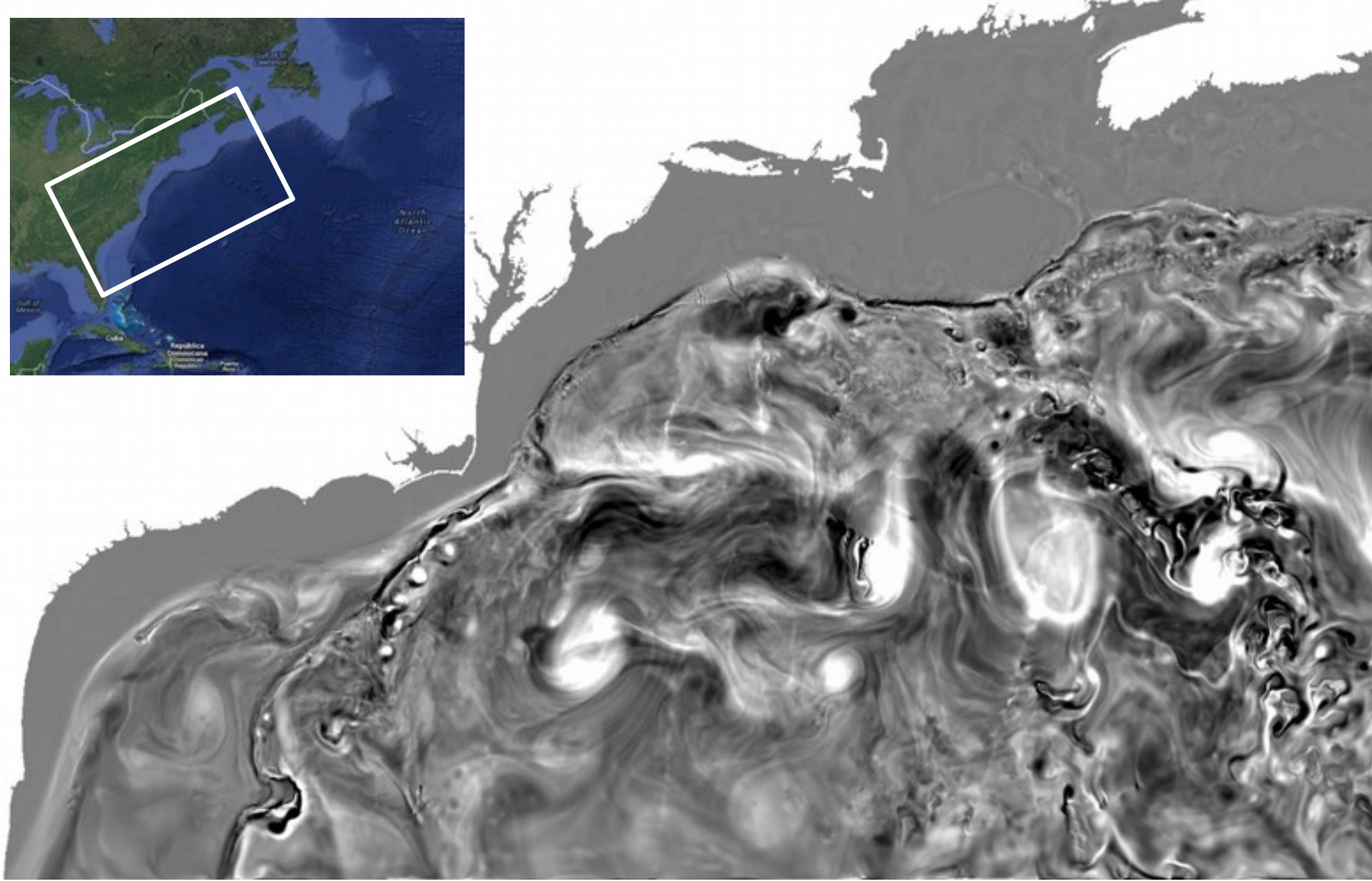
Filament de couche limite



Baie de Monterey

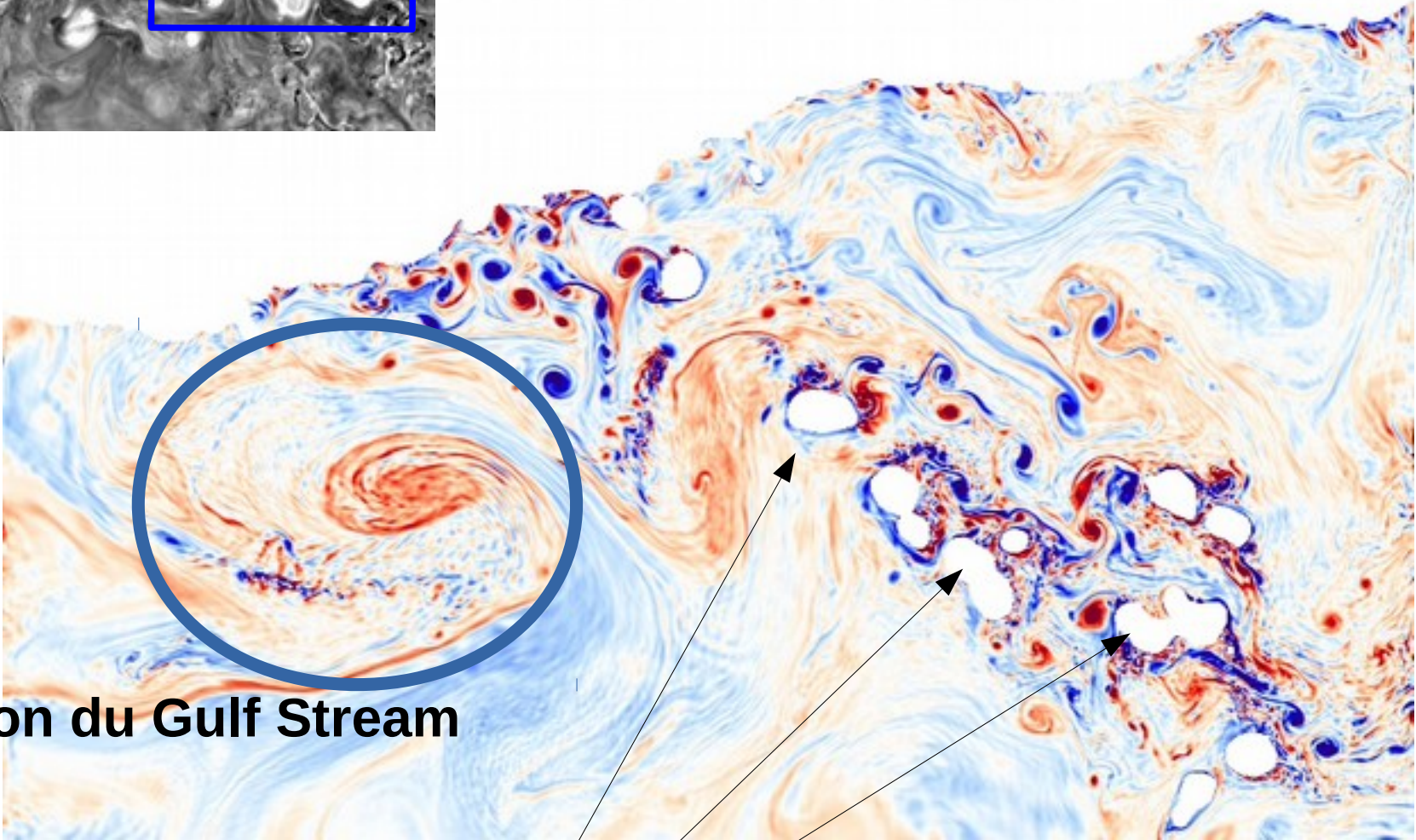
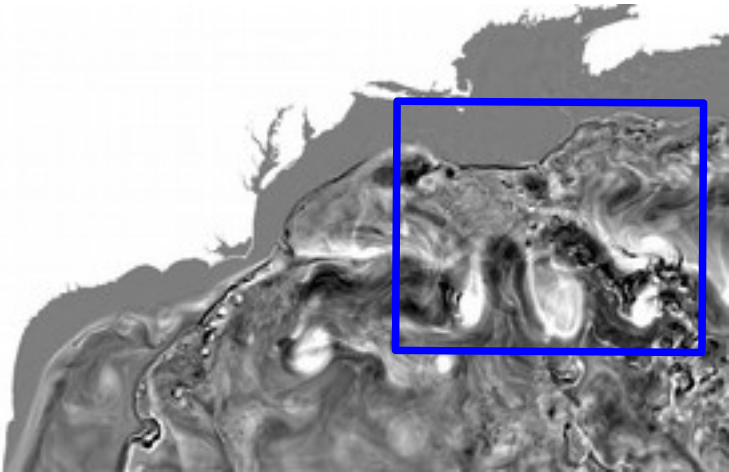


[Molemaker & McWilliams 2014]



*Simulations haute résolution
du Gulf Stream*

Le Gulf Stream par 4000m de fond : une vision renouvelée des abysses

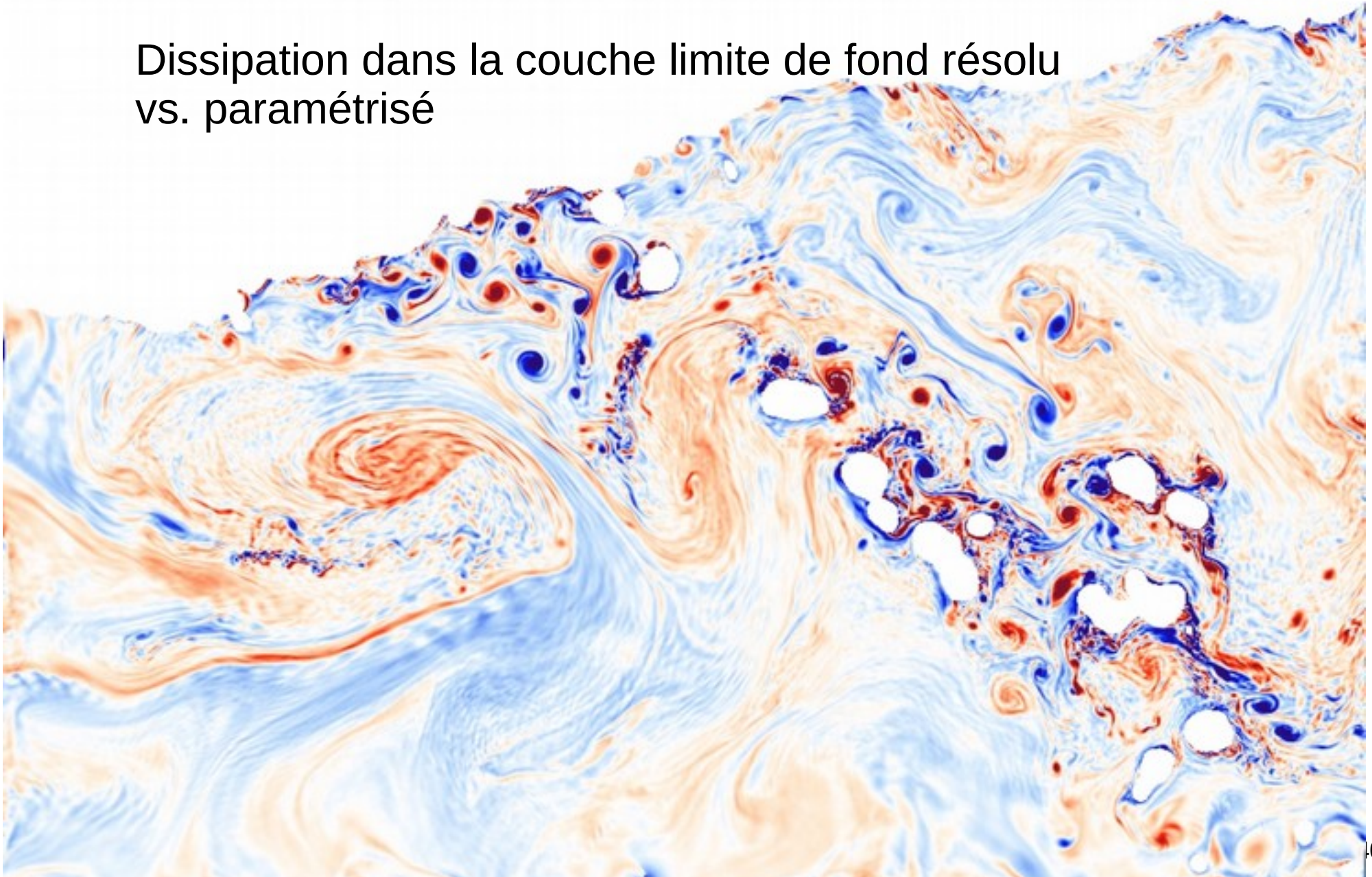


Tourbillon du Gulf Stream

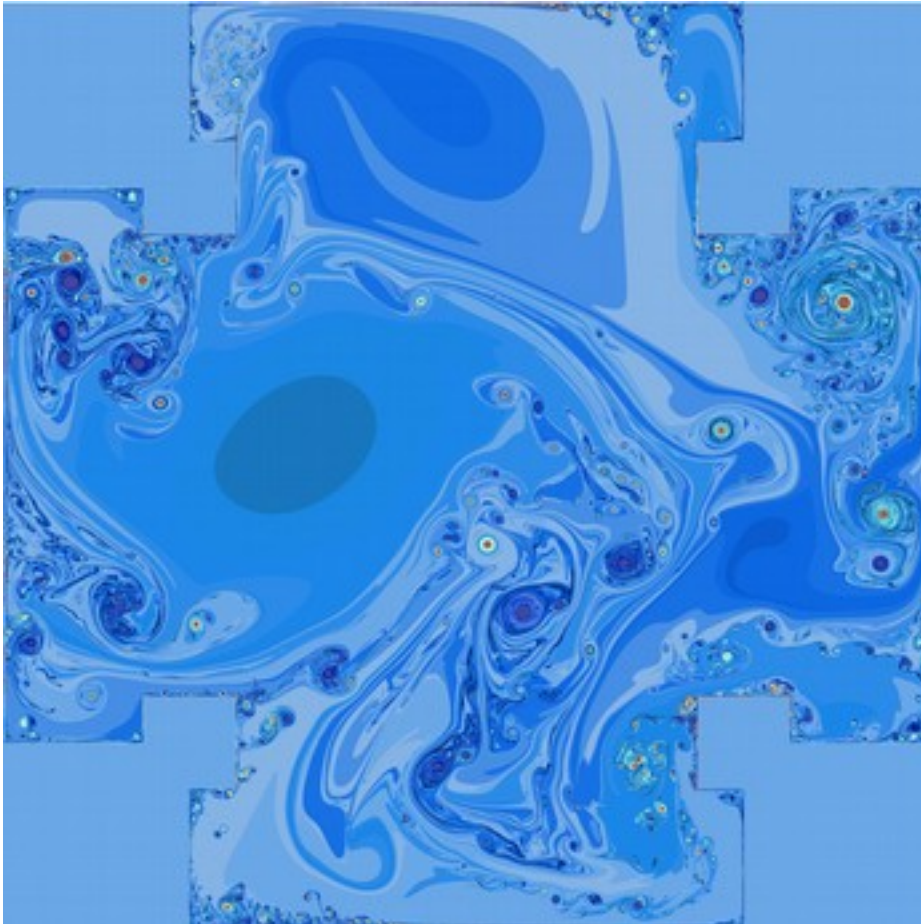
Monts sous-marins (de Nouvelle-Angleterre)

Sillages, **génération de sous-méso échelle** via
le stirring mésoéchelle et la topographie

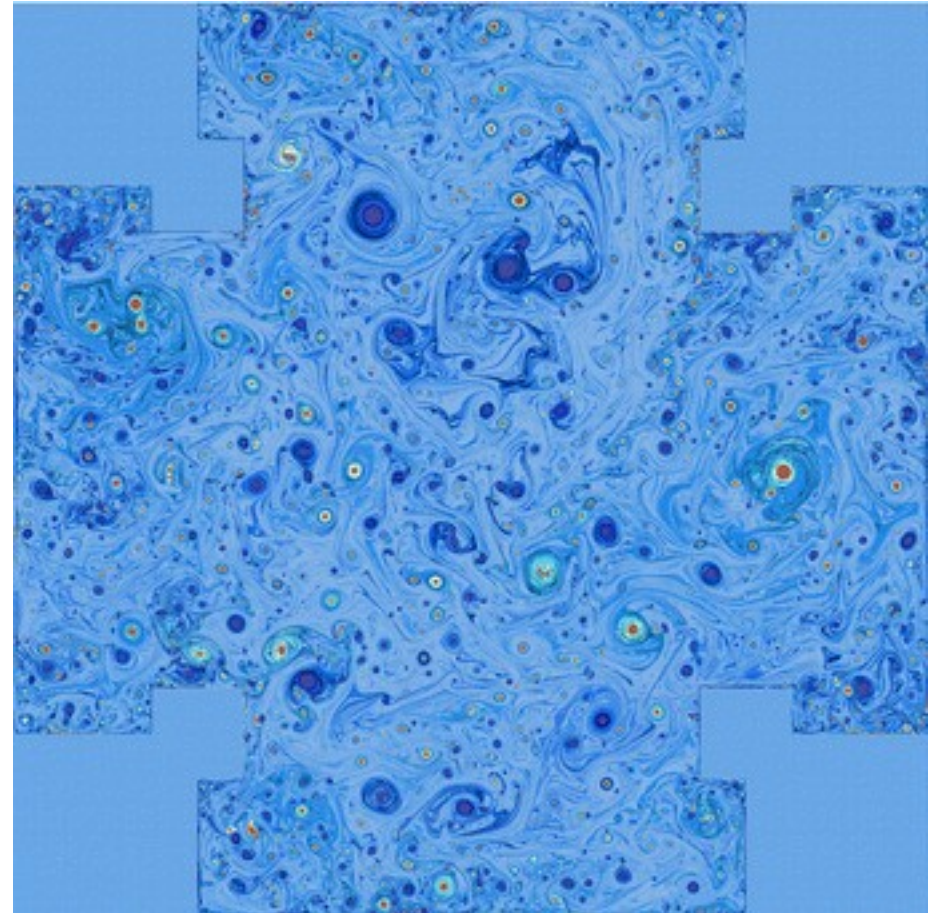
Dissipation dans la couche limite de fond résolu
vs. paramétrisé



Idéalisation possible : turbulence 2D + frottement latéral avec fluid2D !



Turbulence en déclin, interaction tourbillons-bords = formation de couches limites, détachement, instabilités, tourbillons

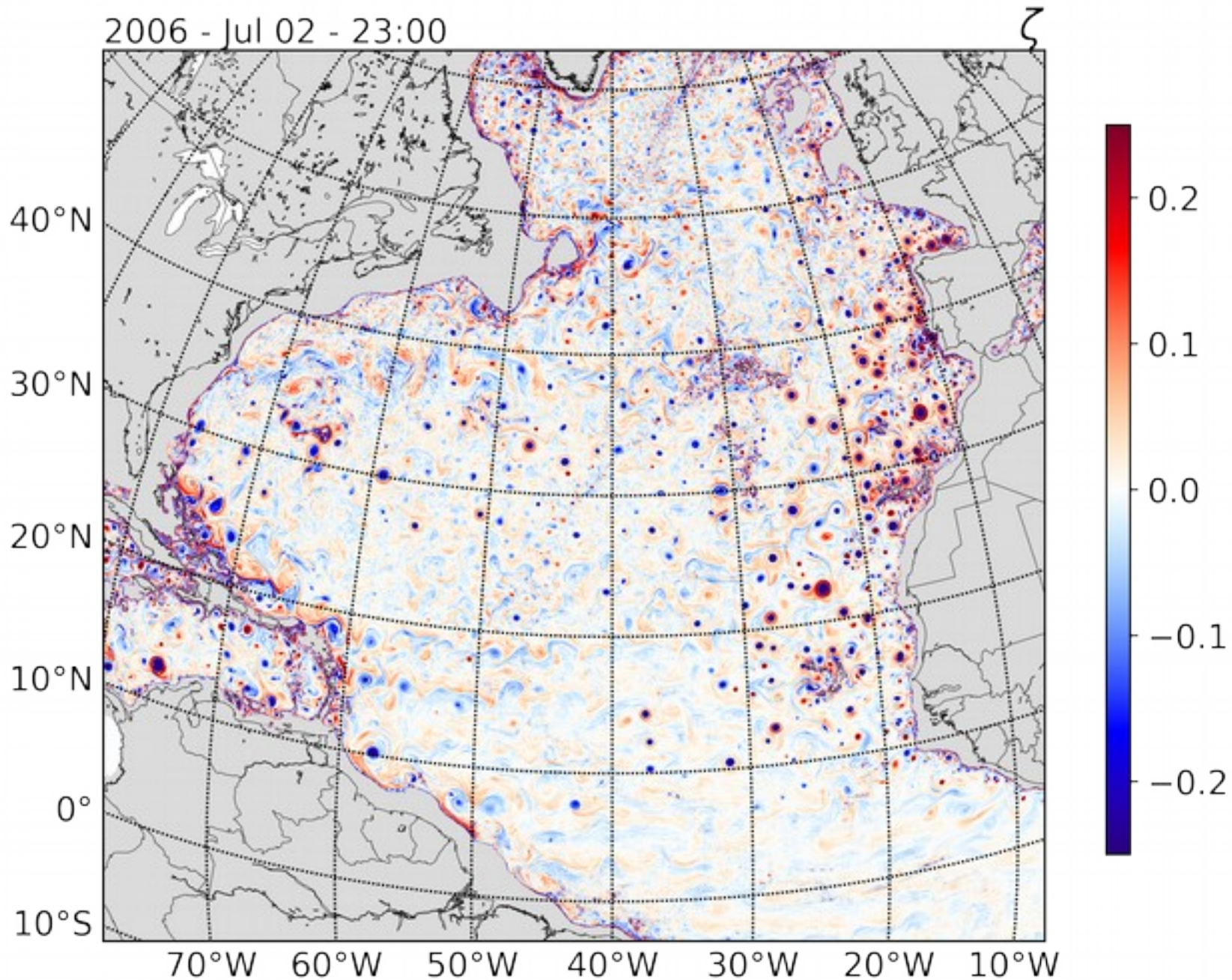


Un peu plus tard, écoulement turbulent, presque en équilibre statistique

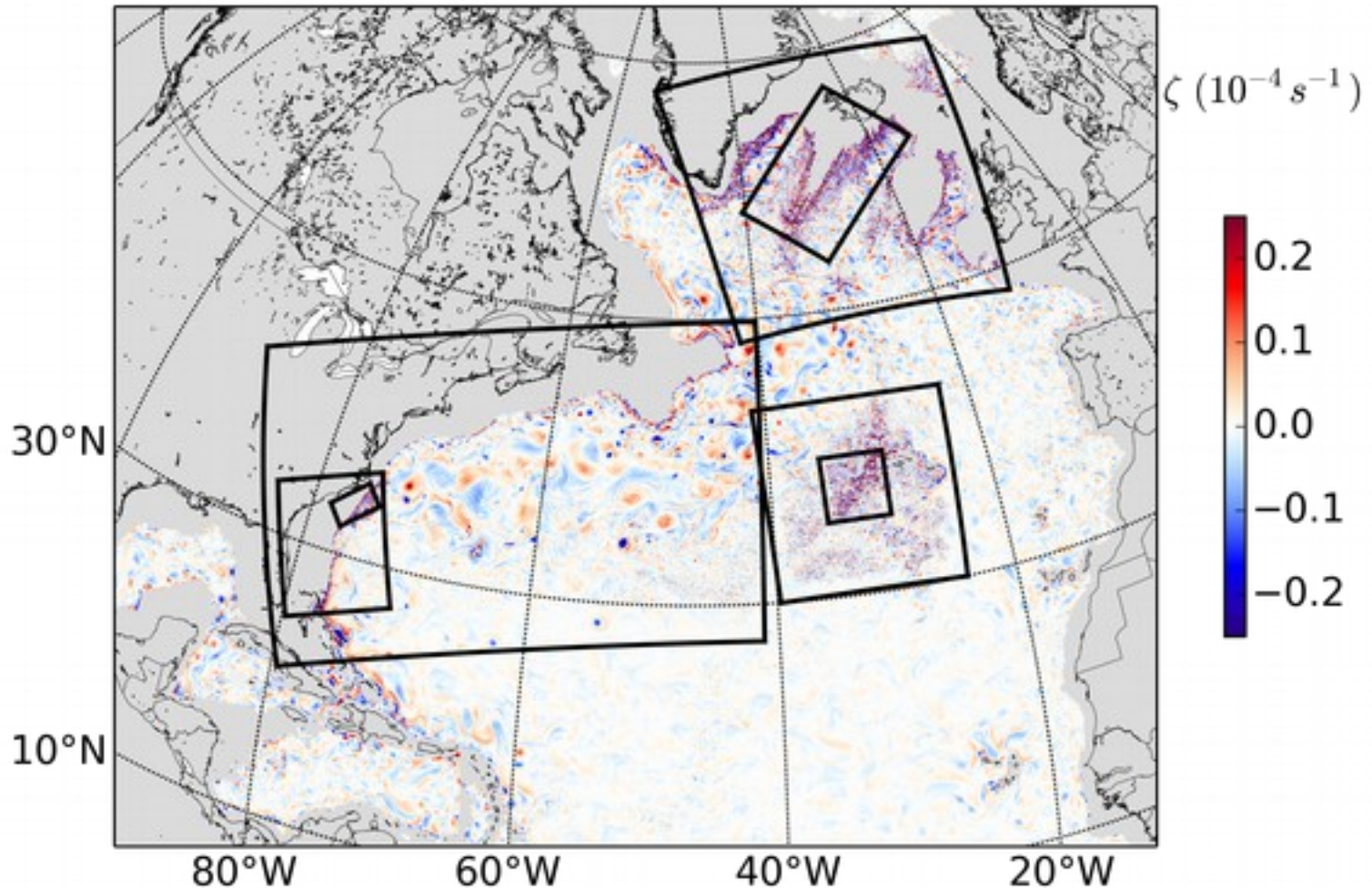
Couches limites de fond/latérales=modifient radicalement la turbulence !

Tourbillons qu'on découvre en nombre dans les dernières simulations. Réels ou artefacts ?

Vorticité à 1000 m
 $dx = 3$ km



Alternative à la « force brute » Simulations emboîtées



$\Delta x = 6\text{km}, 2\text{km}, 500\text{m}, 150\text{m}$ (outil AGRIF)
Descente en échelle, diversité des processus

Paramétrisation des tourbillons dans les modèles de circulation

- **Paramétrisation GM** (Gent-McWilliams, 1990, Gent et al 1995)
 - Prend en compte l'effet d'aplatissement des isopycnes (via l'instabilité barocline)
 - Diffusion le long des surfaces isopycnales
- **Paramétrisations stochastiques** (Porta Mana & Zanna 2014, Brankart et al 2015 ...)
 - Augmenter la variabilité interne des modèles
- **Super paramétrisations** (Grooms & Majda 2014)
 - Utiliser un modèle explicite de la physique non résolue pour calculer les termes nécessaires au modèle de basse résolution. Les atmosphères font ça depuis longtemps. Les océans s'y mettent.
 - Projet LEFE-MANU (Deremble et al)
- **Méthodes d'apprentissage** (réseaux de neurones) pour tenter d'apprendre la fermeture
 - Premier succès en CFD avec un modèle RANS pour un écoulement dans un tuyau rugueux (Lin et al JFM2016).
 - Bolton Zanna 2019
 - Nombreux projets en cours

Paramétrisation GM

- À la base des modèles océano de CMIP
- Les tourbillons induisent des mouvements isopycnaux (=> mélange isopycnal, pas horizontal)
- Et aussi ils empêchent les pentes isopycnales d'être trop forte
- Idée : introduire une **eddy induced velocity \mathbf{u}^*** dans l'équation de traceur

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u} + \mathbf{u}^*) \cdot \nabla + (w + w^*) \frac{\partial}{\partial z} \right] \theta$$

$$= R(\kappa_I, \theta) + (\kappa_V \theta_z)_z$$

Mélange diapycnal

avec

$$\mathbf{u}^* = -(\kappa \mathbf{L})_z, \quad w^* = \nabla \cdot (\kappa \mathbf{L}),$$

\mathbf{L} le vecteur de pente des isopycnes

$$\mathbf{L} = -\nabla \rho / \rho_z,$$

Et $\kappa_I = \kappa$ le coefficient de mélange isopycnal

Mélange isopycnal

Gains

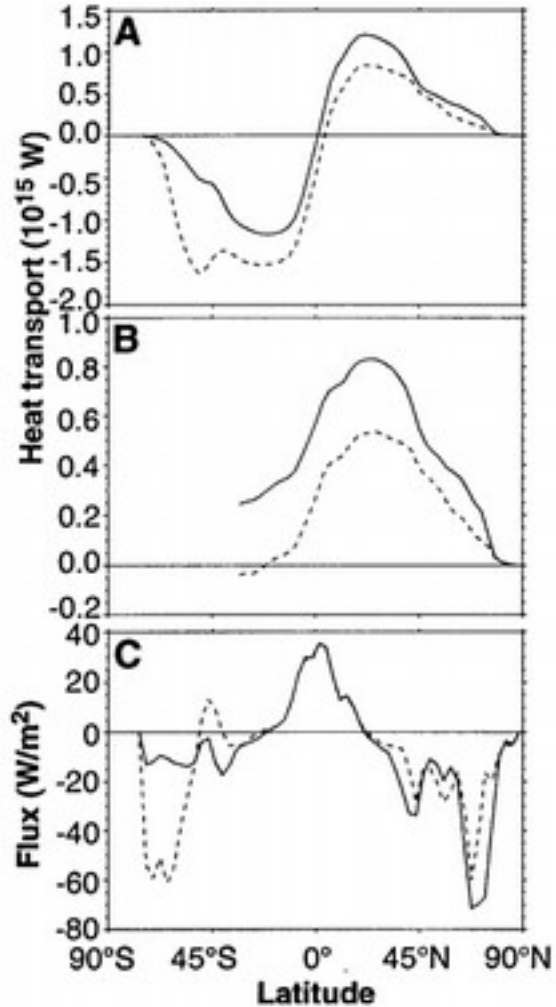


Fig. 3. (A and B) Mean northward heat transport (A) in all oceans and (B) in the Atlantic. (C) Surface heat flux in all oceans. For (A) to (C): ISO, solid trace; HOR, dotted trace.

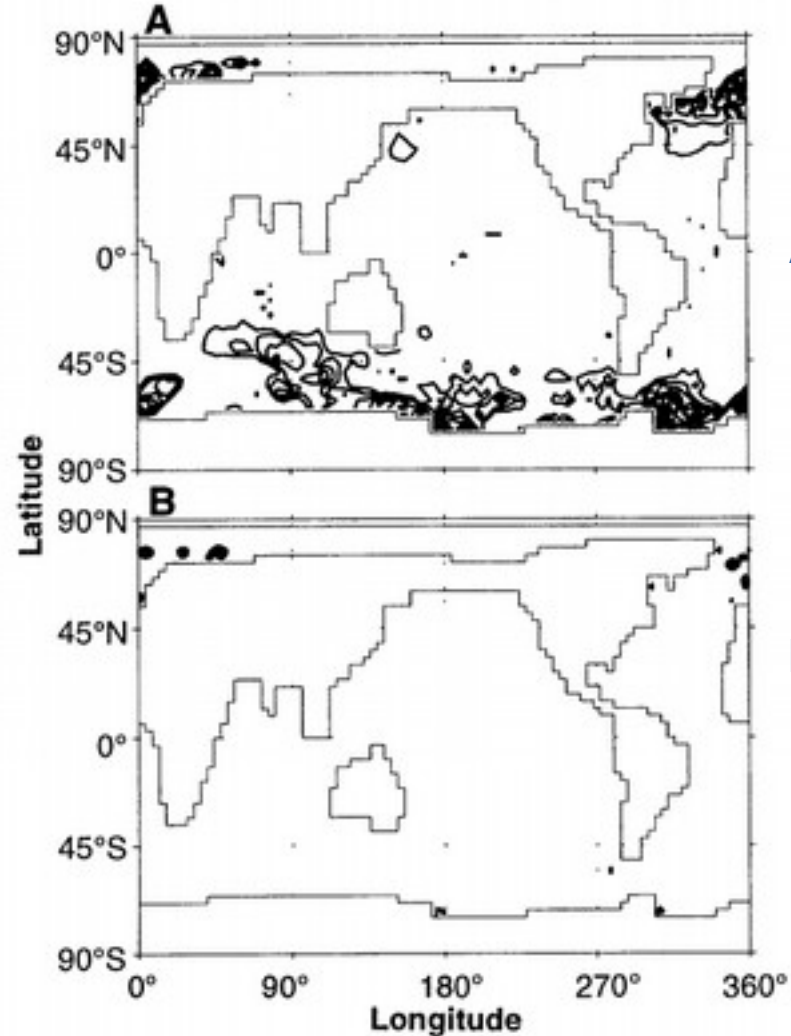


Fig. 4. The percentage of all times and levels when convection occurs (A) with HOR and (B) with ISO. Contour interval = 5%.

A = controle

B = GM

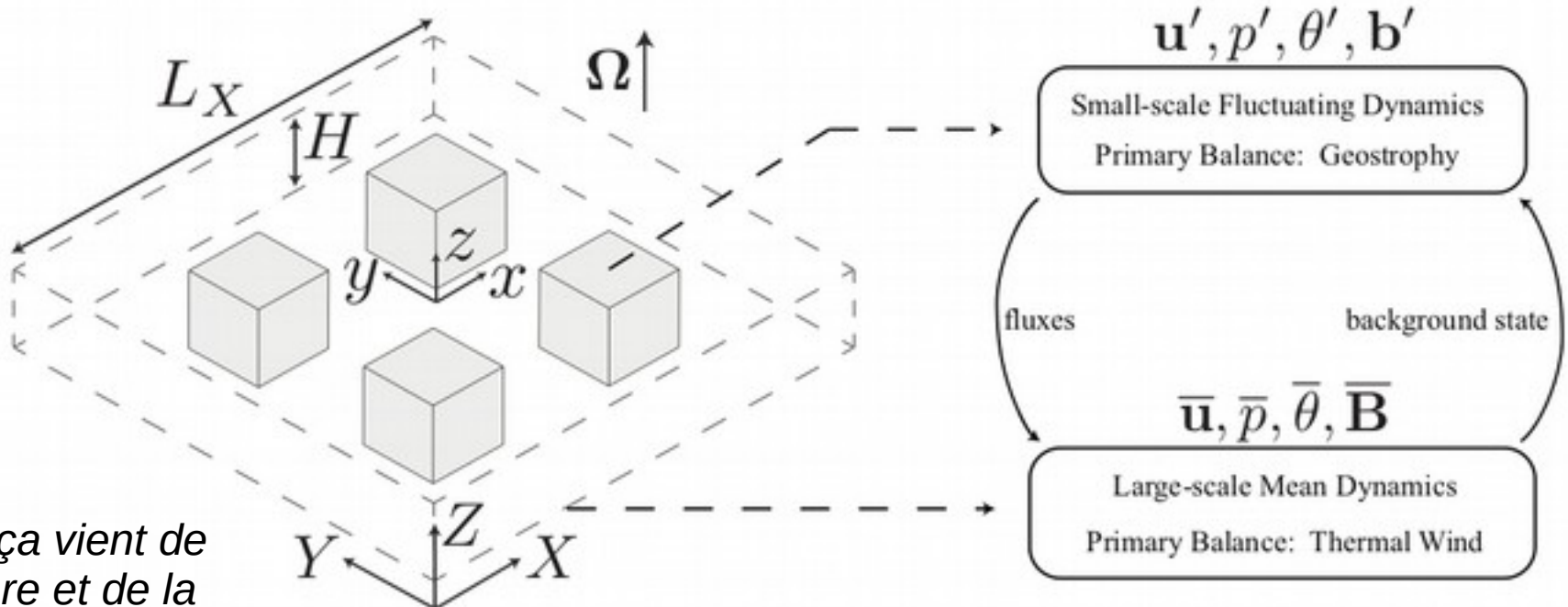
Limite ? Incompatible avec l'eddy saturation

[Danabasoglu et al 1994]

Superparamétrisation

Idée : dans chaque maille faire tourner un modèle explicite des processus sous-maille. Moyenner pour estimer les flux de Reynolds.

Hypothèse : la dynamique sous-maille a une séparation d'échelle claire avec la dynamique résolue



A la base, ça vient de l'atmosphère et de la param des nuages (encore et toujours!)

[Calkins et al 2015]

Méthode d'apprentissage

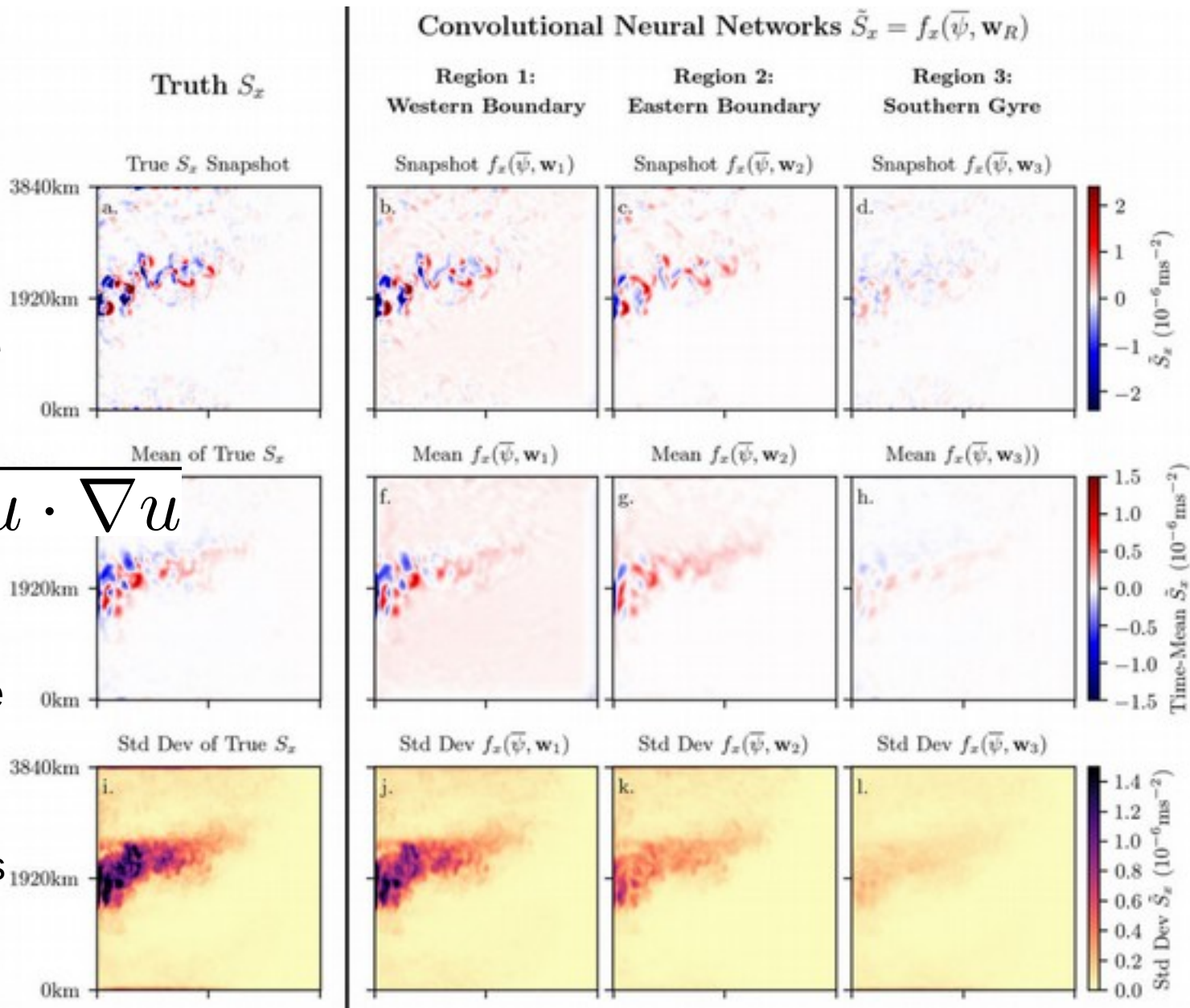
Modèle QG
Configuration « double gyre »

Idée : apprendre le terme de fermeture \mathbf{S} à partir de simulations à plus haute résolution

$$\mathbf{S} = \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} - \overline{u \cdot \nabla u}$$

Apprentissage avec $\bar{\psi}$ dans des sous régions (bord ouest/bord est, gyre sud)

Prometteur mais il faudrait imposer certaines contraintes (invariance galiléenne, conservation de la qté de mvt etc)



Conclusions

- 80 % de KE se trouve dans les tourbillons
- La turbulence est couplée à la circulation de grande échelle
- Paramétrisation GM reste le top mais gros efforts pour l'améliorer
- Equilibration de la turbulence : drag au fond, mais couches limites de fond, plus compliquées qu'un simple drag