



Génération des ondes longues océaniques contrôlée par des processus non-adiabatiques

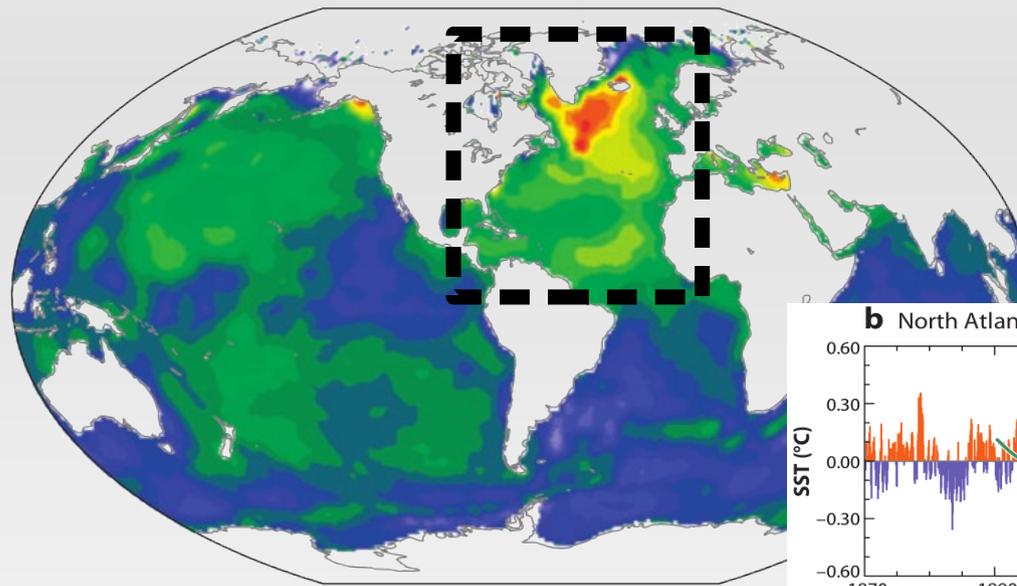
Quentin Jamet^a, Thierry Huck^a, Olivier Arzel^a, Alain Colin de Verdière^a,
Antoine Hochet^b, Clément Vic^c, JPO, *In Prep.*

(a) Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale, Brest, France

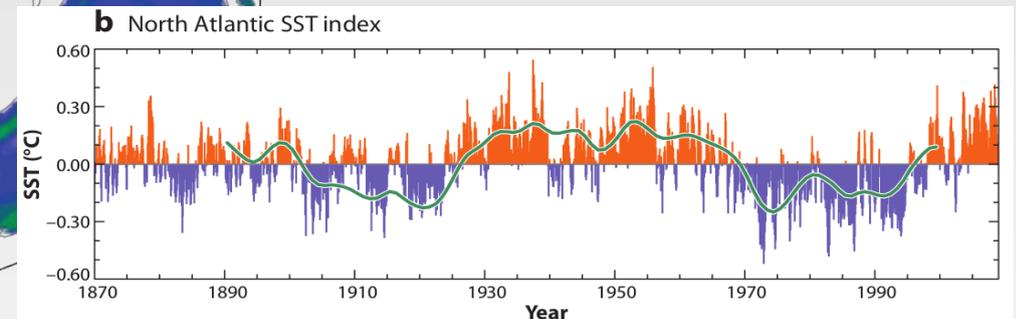
(b) Department of Meteorology, University of Reading, United Kingdom

(c) National Oceanography Centre Southampton, University of Southampton, United Kingdom

- **Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO)** [Gordon, EOS 1992 ; Schlesinger & Ramankutty, Nat. 1994 ; Kerr, Sci. 2000]



Indice AMO (bas) et regression des SST sur cet indice (gauche). Données HadISST sur la période 1870-2008 [Deser et al., ARMS 2010]



- Corrélée à la circulation méridienne de retournement (**MOC**) via le transport de chaleur océanique (**OHT**) [Knight et al., GRL 2005; Zhang et al., Sciences 2016]

→ Étudier l'AMO = Comprendre les variations BF de la MOC

Atlantique Nord : Variabilité multidécennale

Mécanisme d'intérêt : mode **intrinsèque** à l'océan reliant **MOC'**_{BF} et **ondes de Rossby de grande échelle**

[Colin de Verdière & Huck, JPO 1999 ; teRaa & Dijkstra, JPO 2002]

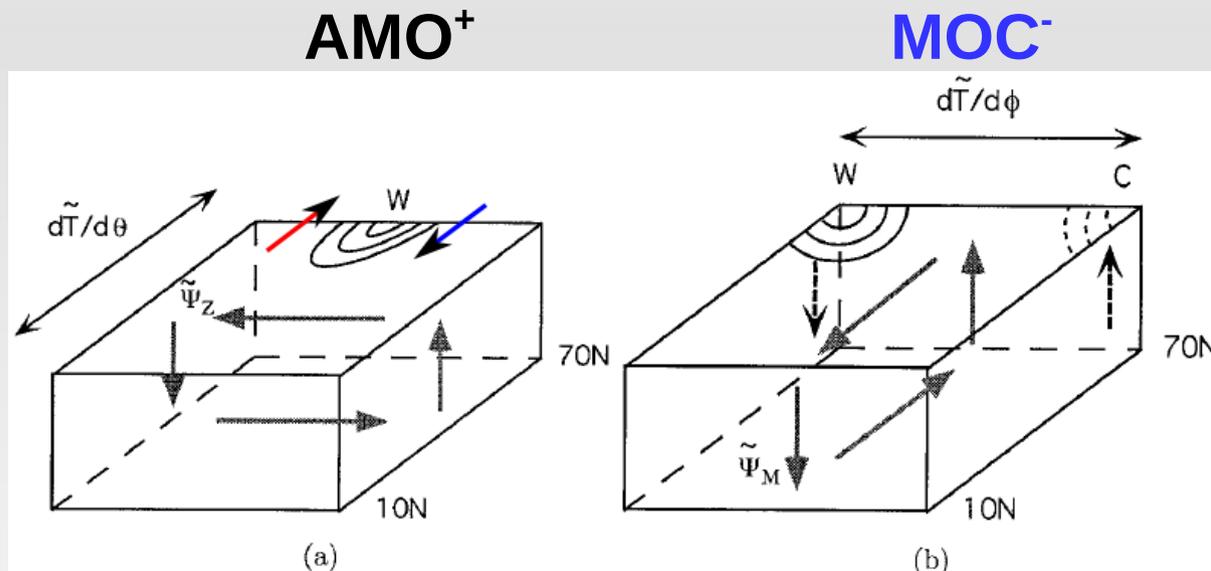


Illustration de l'interaction entre une onde de Rossby et la **MOC** [teRaa & Dijkstra, JPO 2002]

- Réalisme? : observé [Franckombe et al., GRL 2008] et simulé [Ortega et al., PO 2015]
- Robustes aux interactions océan-atmosphère réalistes [Jamet et al., CD 2016]
- Amortie par la bathymétrie [Winton, JPO 1997, Buckley et al., JC 2012]
- Mode de bassin linéaire [Sevellec & Fedorov, JC 2013]
- **Hypothèse : instabilité barocline de l'état moyen de l'océan ?**

Deux approches

1. Approche diagnostique :

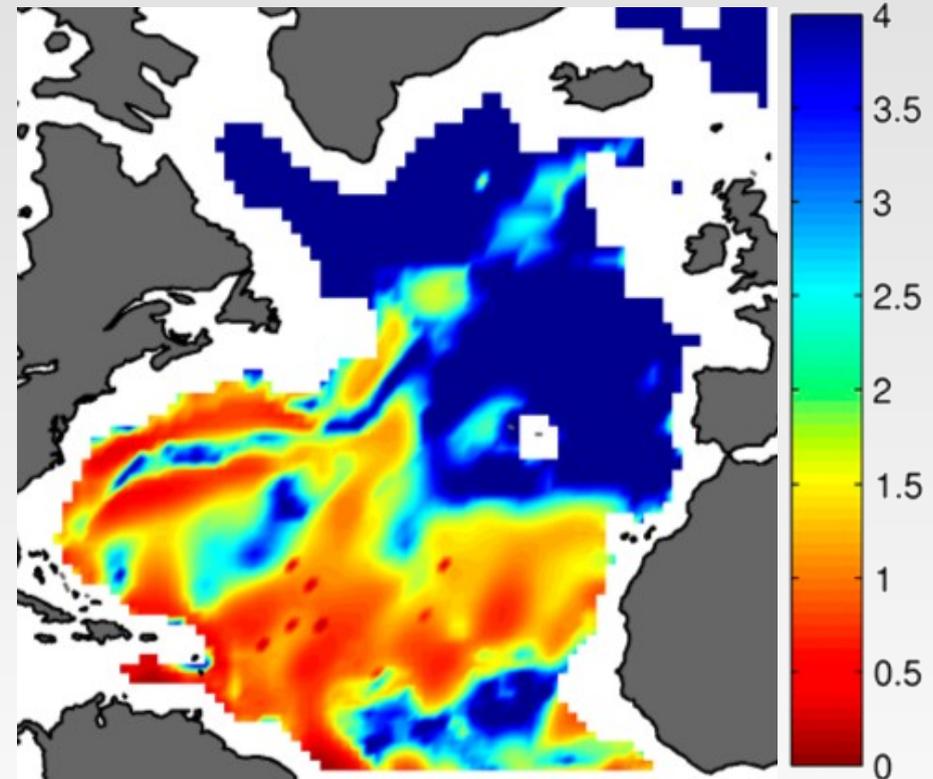
- Diagnostiquer les régions instables barocliniquement des modèles numériques [Marchesiello et al., JPO 2003 ; Wilson & Williams, JPO 2006]
- Nécessite $\mathbf{u}(x,y,z,t)$ et $T(x,y,z,t)$ sur un temps long (~ 500 ans)
→ pas applicable aux observations

2. Approche prognostique :

- Théorie linéaire de l'instabilité barocline :
Analyse locale de stabilité linéaire Quasi-Géostrophique (QG)
- Circulation océanique moyenne localement instable à **méso-échelle**
[Charney, JM 1947] et à **grande échelle** [Green, QJRMS 1960]

Instabilité barocline

- Approximation des ondes longues [Hochet et al., JPO 2015] :
 - L'Atlantique Nord est peu instable aux hautes latitudes

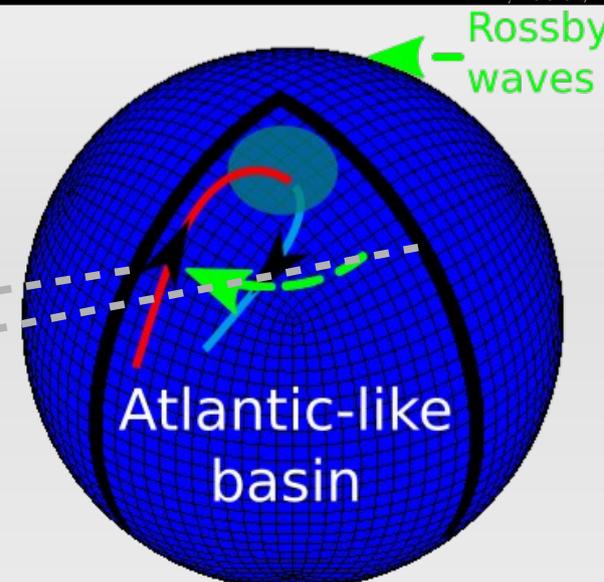


Temps de croissance [an] du mode le plus instable, calculé via une analyse de stabilité linéaire pour l'océan réel [Hochet et al., JPO 2015]

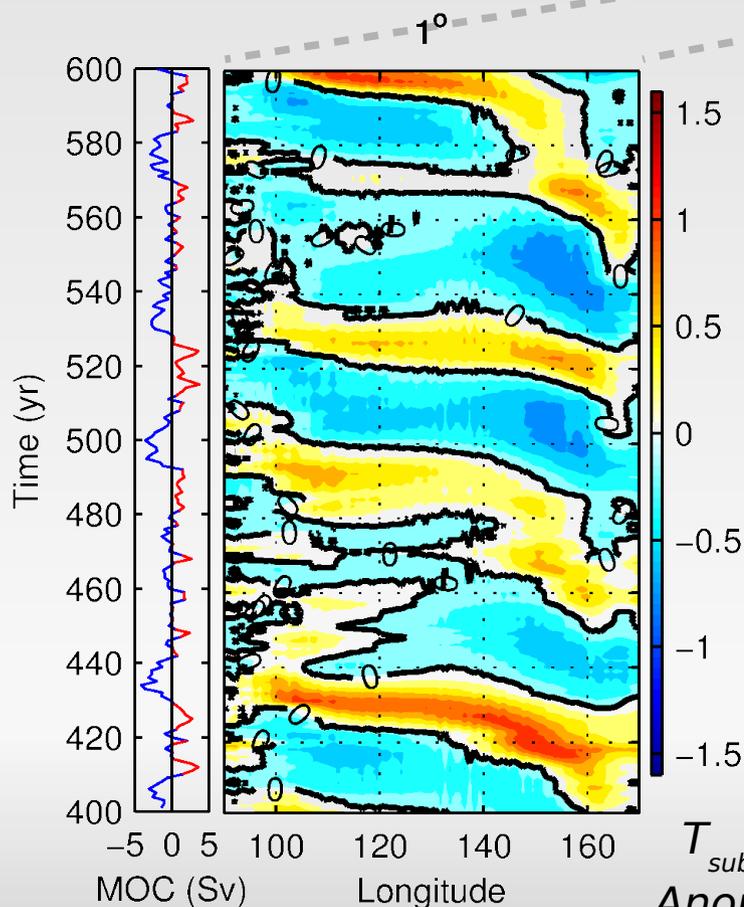
→ Importance des termes non-adiabatiques ?

Experience numérique idéalisée

- *Double Drake* = configuration couplée du MITgcm [Ferreira et al., JC 2010] à 1° de résolution horizontale
- Variabilité basse fréquence de la MOC associée à la propagation d'ondes de Rossby de grande échelle [Buckley et al., JC 2012, Jamet et al., CD 2015]



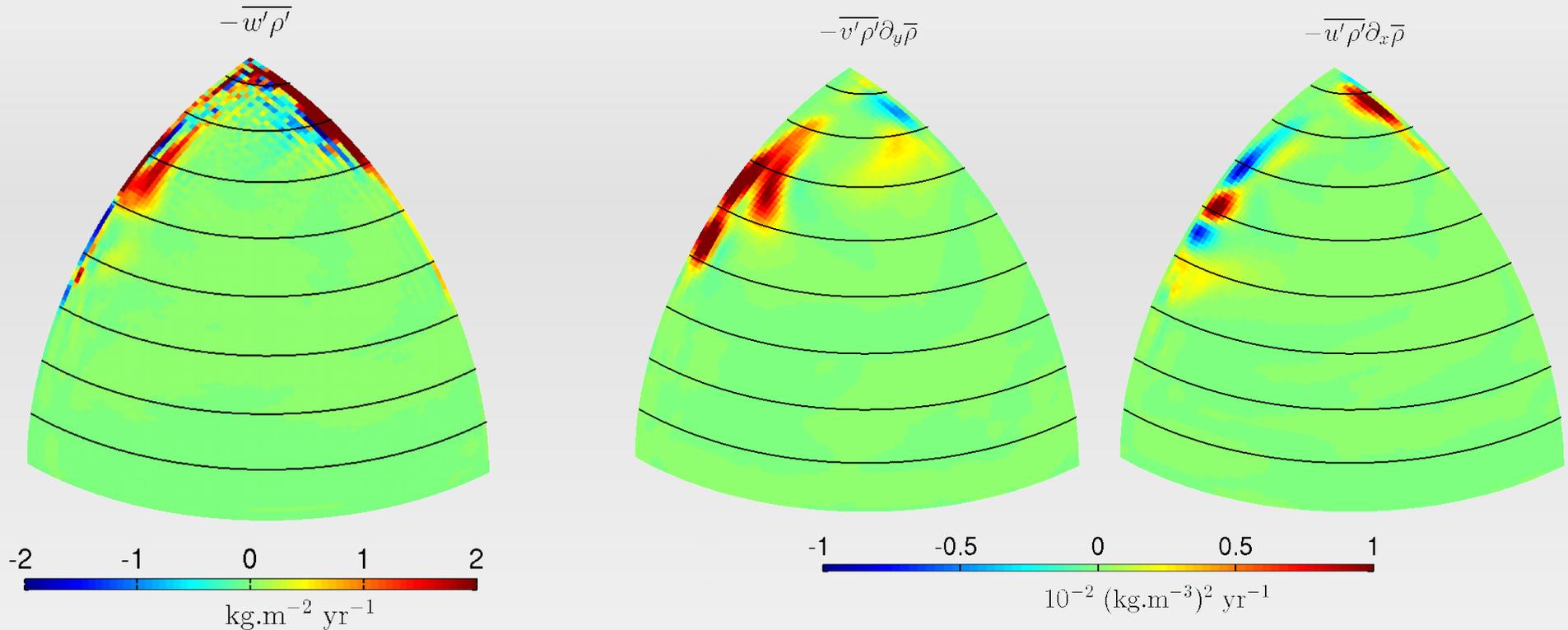
Géométrie idéalisée de la configuration Double Drake (DDR)



- Méthode : comparer les analyses de stabilités avec différentes approximations à ce qui est diagnostiquable dans la solution non-linéaire du modèle

T_{sub} se propageant d'est en ouest à 70°N;
Anomalies de MOC associées sur la gauche.

Diagnostiquer les régions instables barocliniquement



*Flux turbulents verticaux de densité (gauche)
et contribution zonale (centre) et meridienne (droite) du flux de densité downgradient*

- 2 regions sources aux hautes latitudes pour l'instabilité barocline :
 - Bord ouest : instabilité du **courant zonal** ($\partial_y \bar{\rho} \propto \bar{u}_g$)
 - Bord est : instabilité du **courant méridien** ($\partial_x \bar{\rho} \propto \bar{v}_g$)
- Instabilité **locale** de l'état moyen?

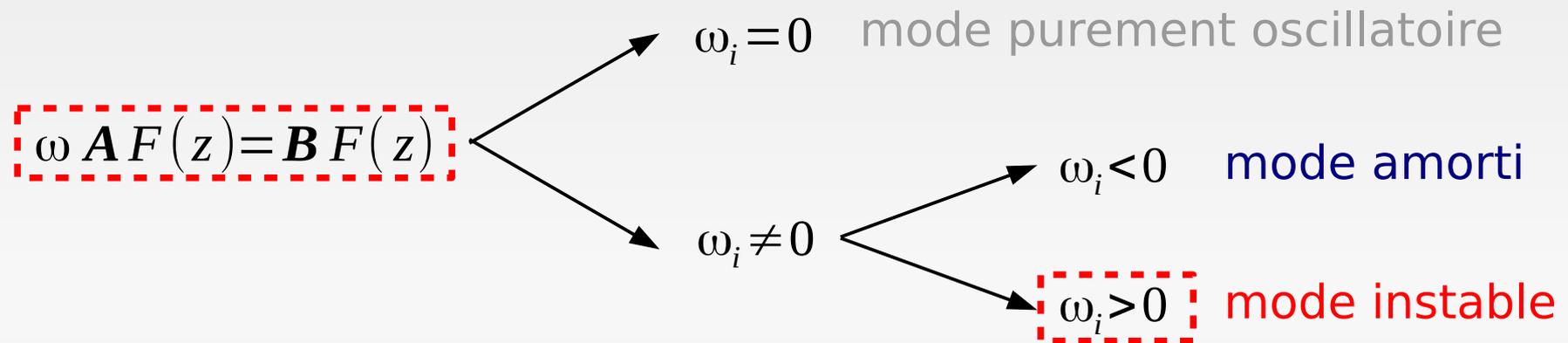
Analyse locale de stabilité linéaire QG

→ Formalisme majeur de l'instabilité barocline [Charney, JM 1947 ; Green, QJRMS 1960] pour un problème **local**, i.e. $N^2 = N^2(z)$; $\mathbf{u}_g = \mathbf{u}_g(z)$

■ Équation de vorticité portentielle QG :

$$(\partial_t + \mathbf{u}_g \cdot \nabla_h) q = 0 \quad \text{avec} \quad q = \tilde{q} + f + \partial_z \left(\frac{f_0^2}{N^2} \partial_z \psi \right) \quad ; \quad \tilde{q} = \nabla^2 \psi$$

■ Linéariser le problème pour les perturbations $\psi' = F(z) e^{i(kx + ly - \omega t)}$:



NB : $\mathbf{u}_g = 0 \rightarrow$ mode barocline de la stratification

Analyse de stabilité du DDr

- Différents niveaux d'approximation :

Adiab.

$$(\partial_t + \mathbf{u}_g \cdot \nabla_h) q = 0 \quad \text{avec} \quad q = \tilde{q} + f + \partial_z \left(\frac{f_0^2}{N^2} \partial_z \psi \right)$$

Utilisé par Tulloch et al. (JPO 2011) pour une analyse **méso-échelle** de l'océan mondial

LW appx

approximation ondes longues

$$q = \tilde{q} + f + \partial_z \left(\frac{f_0^2}{N^2} \partial_z \psi \right)$$

$$\tilde{q} = \nabla^2 \psi$$

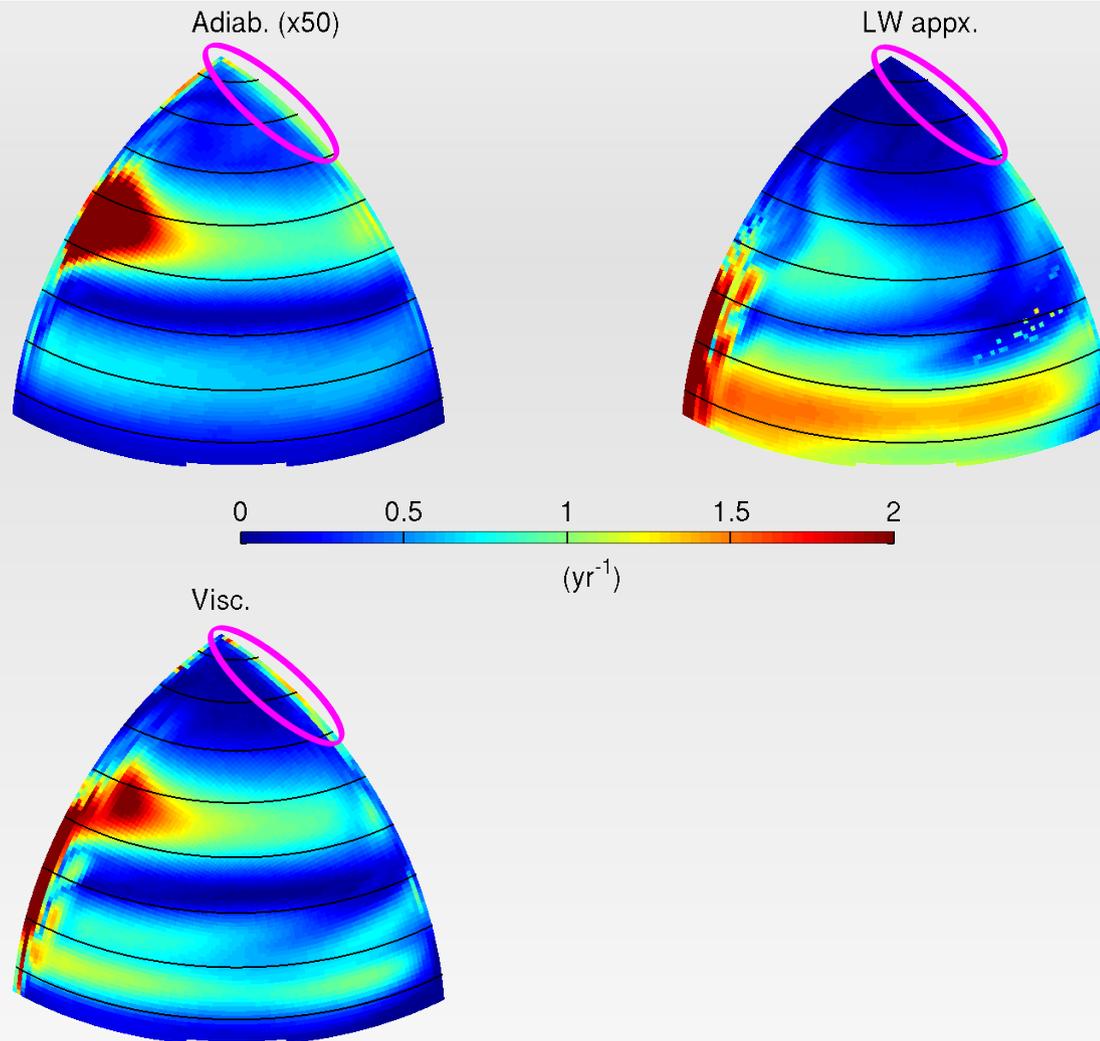
Utilisé par **Hochet et al. (JPO 2015)** pour une analyse **grande échelle** de l'océan mondial

Visc.

$$(\partial_t + \mathbf{u}_g \cdot \nabla_h) q = A_h \nabla_h^2 \tilde{q} \quad \text{avec} \quad q = \tilde{q} + f + \partial_z \left(\frac{f_0^2}{N^2} \partial_z \psi \right)$$

Similitude avec Colin de Verdière (JPO 1986) pour les équation Planétaires Géostrophiques

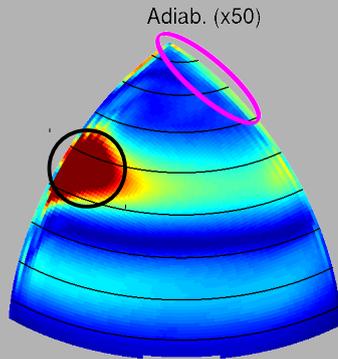
Analyse de stabilité du DDr



Taux de croissance [an^{-1}] des modes les plus instables pour les 3 niveaux d'approximation.
Les taux de croissances LW appx. sont calculés pour $|k| = 2\pi/1000 \text{ rad km}^{-1}$,
la viscosité cinématique pour Visc. est $A_h = 4 \cdot 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (modèle non-linéaire).

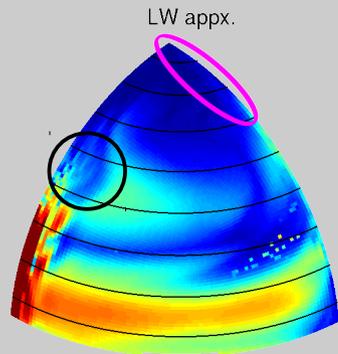
Analyse de stabilité du DDr

Adiab.



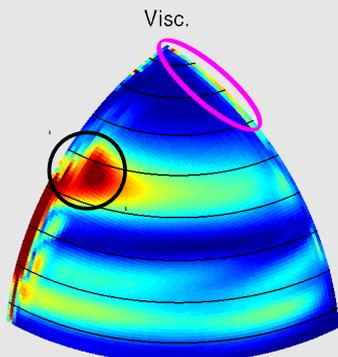
- Bord est et ouest instables à **méso-échelle**
- $\lambda_{\text{modes}} \sim O(10-100 \text{ km}) \rightarrow$ **non-résolus à 1°**

LW appx



- Modes les plus instables aux **basses latitudes**
→ similaire à Hochet et al. (JPO 2015)
- Bord est et ouest **peu instables** aux hautes latitudes
- Faible cohérence avec l'approche diagnostique

Visc.

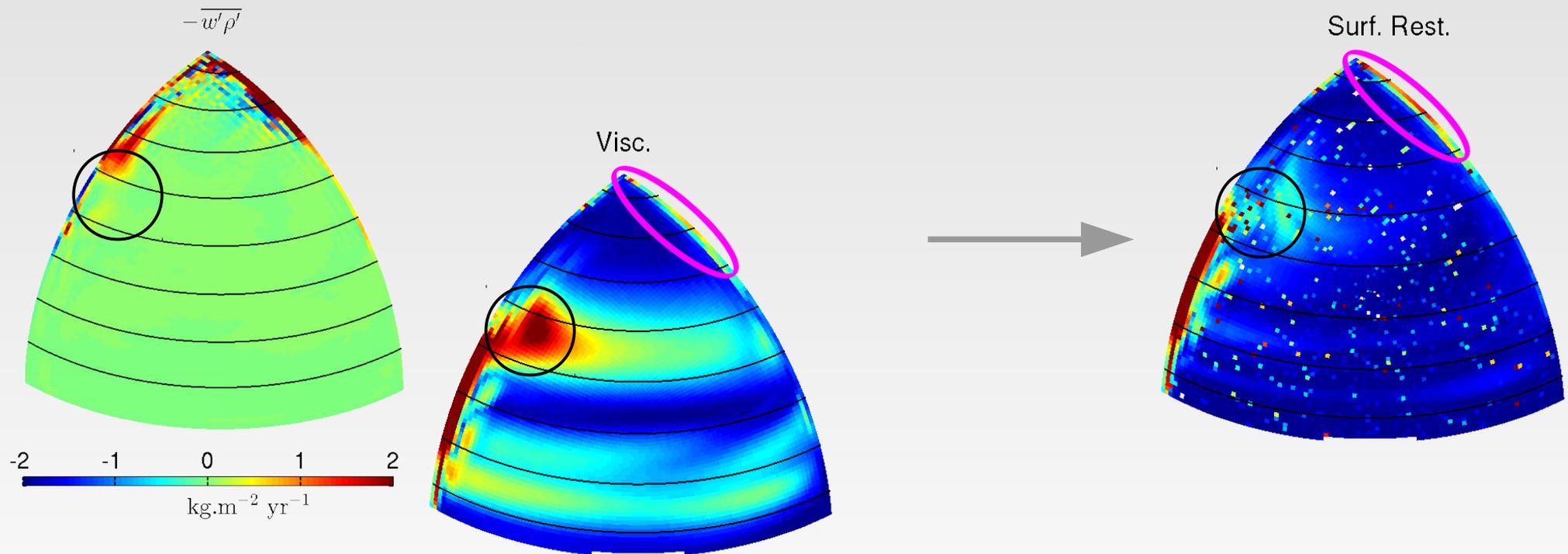


- Structure horizontale très similaire à *Adiab.*
- Bord est et ouest instables à **grande échelle**
- $\lambda_{\text{modes}} \sim O(100-1000 \text{ km}) \rightarrow$ **résolus à 1°**

Analyse de stabilité du DDr

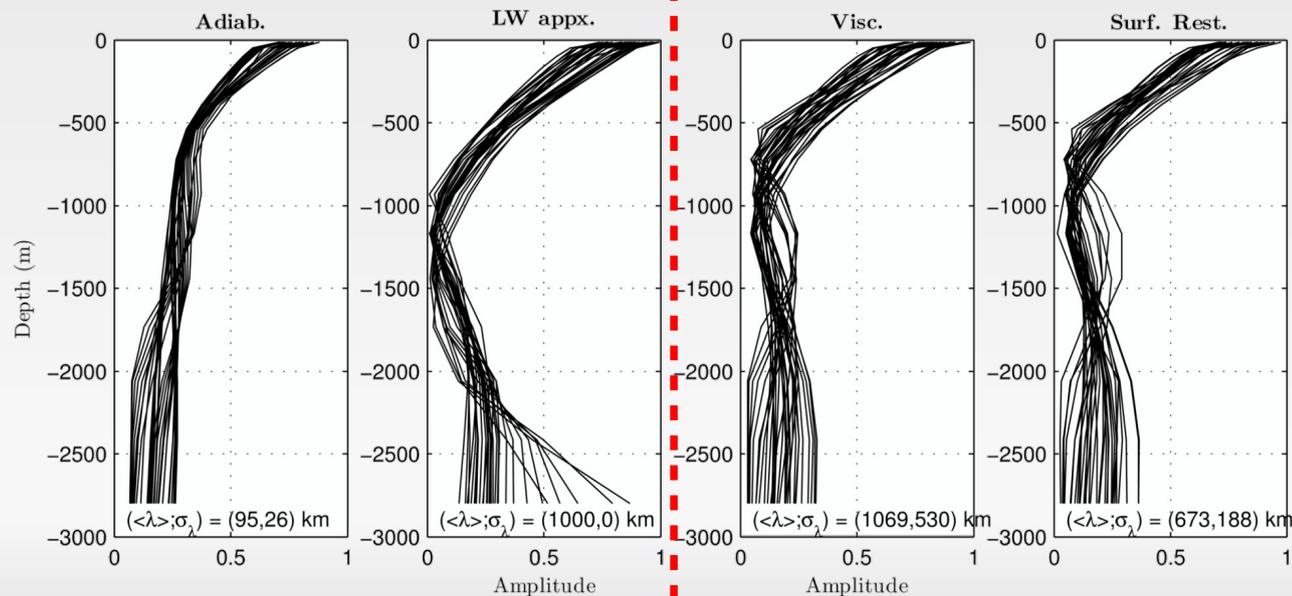
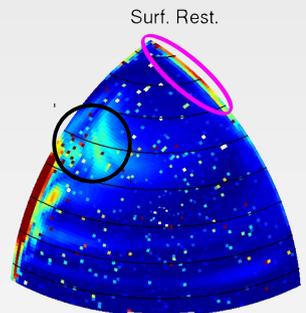
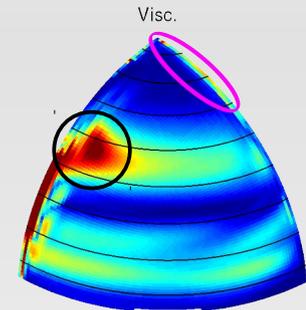
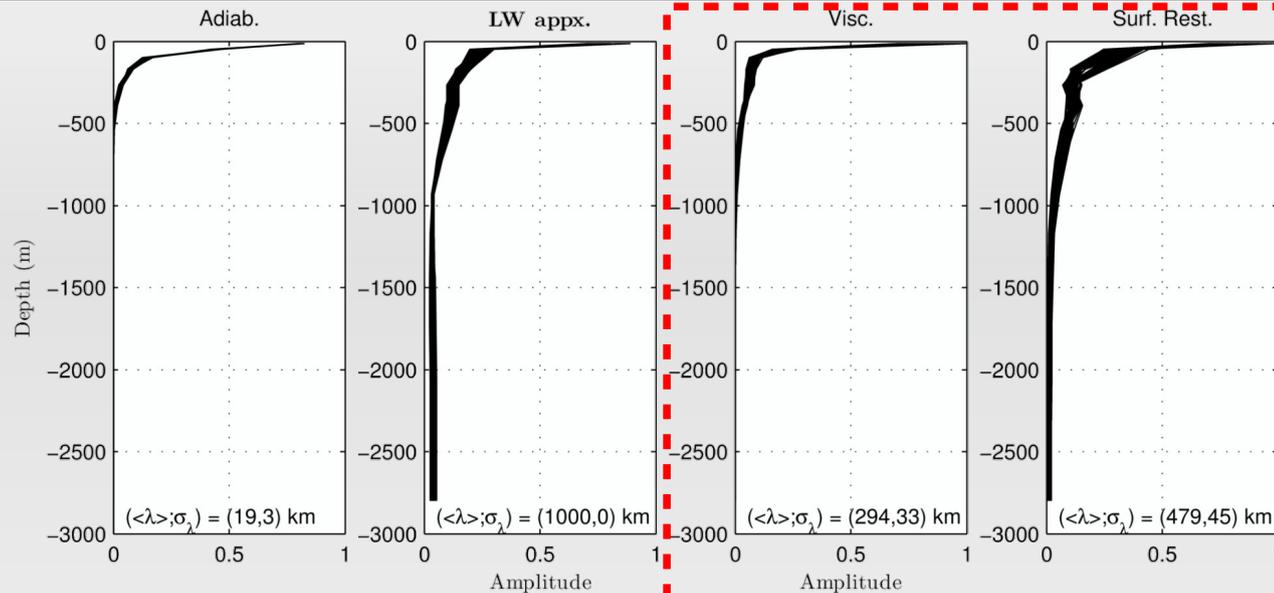
■ Rappel de surface :

$$(\partial_t + \mathbf{u}_g \cdot \nabla_h) q = A_h \nabla_h^2 \tilde{q} + \text{Surf Rest} \quad \text{avec} \quad q = \tilde{q} + f + \partial_z \left(\frac{f_0^2}{N^2} \partial_z \psi \right)$$



- Fort amortissement aux **basses** et **moyennes latitudes**
- Bord est instable à **grande échelle**

Analyse de stabilité du DDr



Conclusion



- Variabilité basse fréquence de la configuration Double Drake :
 - Instabilité barocline radiative du courant méridien de bord est [Hristova et al., JPO 2008]
- Analyse de stabilité linéaire QG :
 - Termes non-adiabatiques = bonne alternative à l'approximation des ondes longues pour une analyse de stabilité à **grande échelle**
- Perspective :
 - Comment prendre en compte ces termes non-adiabatiques pour une analyse de l'océan mondial?

Merci de votre attention !