

RÉSUMÉ

Les modèles de circulation océanique à grande échelle en géométrie idéalisée produisent spontanément une variabilité de période interdécennale lorsqu'ils sont soumis à différents types de forçages en surface : tension de vent, flux de chaleur ou d'eau douce constants, conditions mixtes. On a cherché à comprendre l'origine de ces modes de variabilité dans des dynamiques simplifiées quasigéostrophique (QG) et shallow water (SW), avec des méthodes analytiques et semi-analytiques d'analyse de stabilité. Une méthode de développement faiblement nonlinéaire a ainsi été mise au point sur les modes de bassin QG à gravité réduite (Ben Jelloul&Huck 2003). Cette méthode a permis d'étudier l'influence de la circulation moyenne barotrope sur le premier mode barocline et l'apparition de modes piégés dans la région de recirculation (Ben Jelloul&Huck 2005). Ces résultats sont étendus à 2 couches SW actives afin de retrouver les modes instables de la circulation thermohaline (Huck& Vallis 2001). En parallèle, le rôle de la salinité dans cette variabilité a été étudié en essayant de caractériser de manière objective différents types d'oscillations, principalement par un bilan de variance de densité (Arzel *et al.* 2005, Sévellec *et al.* 2005, en révision). La robustesse de ces modes au couplage avec l'atmosphère a pu être évaluée avec un modèle atmosphérique axisymétrique, puis dans une configuration plus réaliste incluant le courant antarctique circumpolaire. Finalement ces méthodes d'analyse de stabilité de la circulation océanique sont mises en oeuvre dans un modèle global afin de déterminer la structure de ces modes dans une configuration réaliste et pouvoir la comparer aux observations.

1. INTRODUCTION

De nombreuses analyses de données climatiques historiques et de proxy mettent en évidence des variations climatiques sur des échelles de temps interdécennales et centenaires, principalement dans l'Atlantique Nord. Par exemple Delworth&Mann (2000) comparent l'Oscillation Multidécennale Atlantique dans les observations et les modèles couplés. Sur ces échelles de temps, le rôle de la circulation océanique est certainement prépondérant, vu son énorme capacité calorifique et ses échelles de temps d'ajustement : le temps de propagation des ondes planétaires baroclines aux moyennes latitudes à travers un bassin océanique est justement de quelques décennies. Ainsi la variabilité interdécennale pourrait être associée à des modes propres de la circulation : l'excitation de ces modes de bassin peut résulter de phénomène de résonance ou d'instabilité de l'écoulement moyen. Nous avons donc analysé la structure de ces modes dans différentes configurations, à travers une hiérarchie de modèles dynamiques de complexité croissante, ainsi que les mécanismes de sélection potentiels.

En parallèle, nous avons étudié les oscillations thermohalines qui se développent spontanément dans des modèles de circulation océanique en géométrie idéalisée en fonction du type de forçage en surface. Nous avons ainsi pu distinguer sur des critères objectifs deux types d'oscillations de période interdécennales, et des oscillations de périodes centenaire et millénaire. Un mécanisme de renforcement des anomalies de densité est proposé, qui repose sur la différence entre les conditions de rappel des températures de surface et de flux d'eau douce constant.

2. MODES DE BASSIN OCÉANIQUES

L'existence de modes de bassin océaniques repose sur les processus physiques suivants (Pedlosky 1987, Cessi&Primeau 2001) : des ondes de Rossby baroclines, qui se propagent d'est en ouest à travers un bassin en quelques années à quelques décennies, et leur résonance par des ondes de bord rapide (Kelvin et équatoriales), qui assurent la conservation de la masse. Ces modes sont faiblement amortis, et peuvent devenir instables par excitation stochastique, couplage avec l'atmosphère, ou instabilité barocline si la circulation moyenne est suffisamment énergétique et la dissipation suffisamment faible.

Dynamique QG 1 couche à gravité réduite

Une méthode de développement multi-échelle faiblement nonlinéaire en fonction du nombre de Burger (Bu , rapport au carré de la largeur du bassin sur le rayon de déformation) est mise en oeuvre de manière analytique ($Bu = \infty$) et numérique ($Bu \ll 1$) dans un modèle QG 1 couche à gravité réduite, afin d'étudier le mécanisme de sélection des modes de bassin de Rossby :

$$\partial_t (\nabla^2 \psi - Bu^{-1} \psi) + \beta \partial_x \psi + \epsilon J(\psi, \nabla^2 \psi) = \text{Dissipation.}$$

Des conditions aux limites d'imperméabilité sont appliquées, mais surtout la conservation de la masse impose une variation temporelle de la valeur uniforme de la fonction courant au bord (fondamentale pour la résonance) :

$$\forall \mathbf{x} \in \delta D, \psi(\mathbf{x}) = \psi_b(t), \quad \iint_D dx dy \psi = 0.$$

La stabilité des modes de bassin dépend alors de la configuration de la circulation moyenne : neutres pour un gyre cyclonique ou anticyclonique, amortis (instables) pour une configuration double-gyre classique (inverse).

Dynamique QG 2 couches

La méthode est étendue à un modèle à 2 couches, permettant un mode barotrope et un mode barocline. Les modes baroclines sont alors advectés par la circulation barotrope moyenne (Sverdrup). Contrairement aux travaux précédents (Spydel&Cessi 2003), les termes de dispersion sont conservés afin de satisfaire les conditions aux limites : on montre alors qu'en l'absence de friction, *tous les modes sont neutres*.

Le problème aux valeurs propres est ensuite résolu numériquement avec une dissipation non-nulle, qui permet de sélectionner les modes (de grande-échelle)

les moins amortis. Trois types de modes apparaissent pour un forçage par le vent assez fort pour produire une gyre de recirculation (contours géostrophiques fermés, où les ondes de Rossby sont arrêtées par la circulation moyenne) :

- les modes de Rossby classiques déformés par l'écoulement moyen,
- des modes stationnaires et oscillants dans la gyre de recirculation, piégés dans la région où les isocontours de vorticité potentielle sont fermés sur eux-mêmes et permettent une propagation continue des ondes de Rossby. Ces derniers sont les moins amortis et ont les périodes d'oscillation les plus longues (très différentes des modes de Rossby).

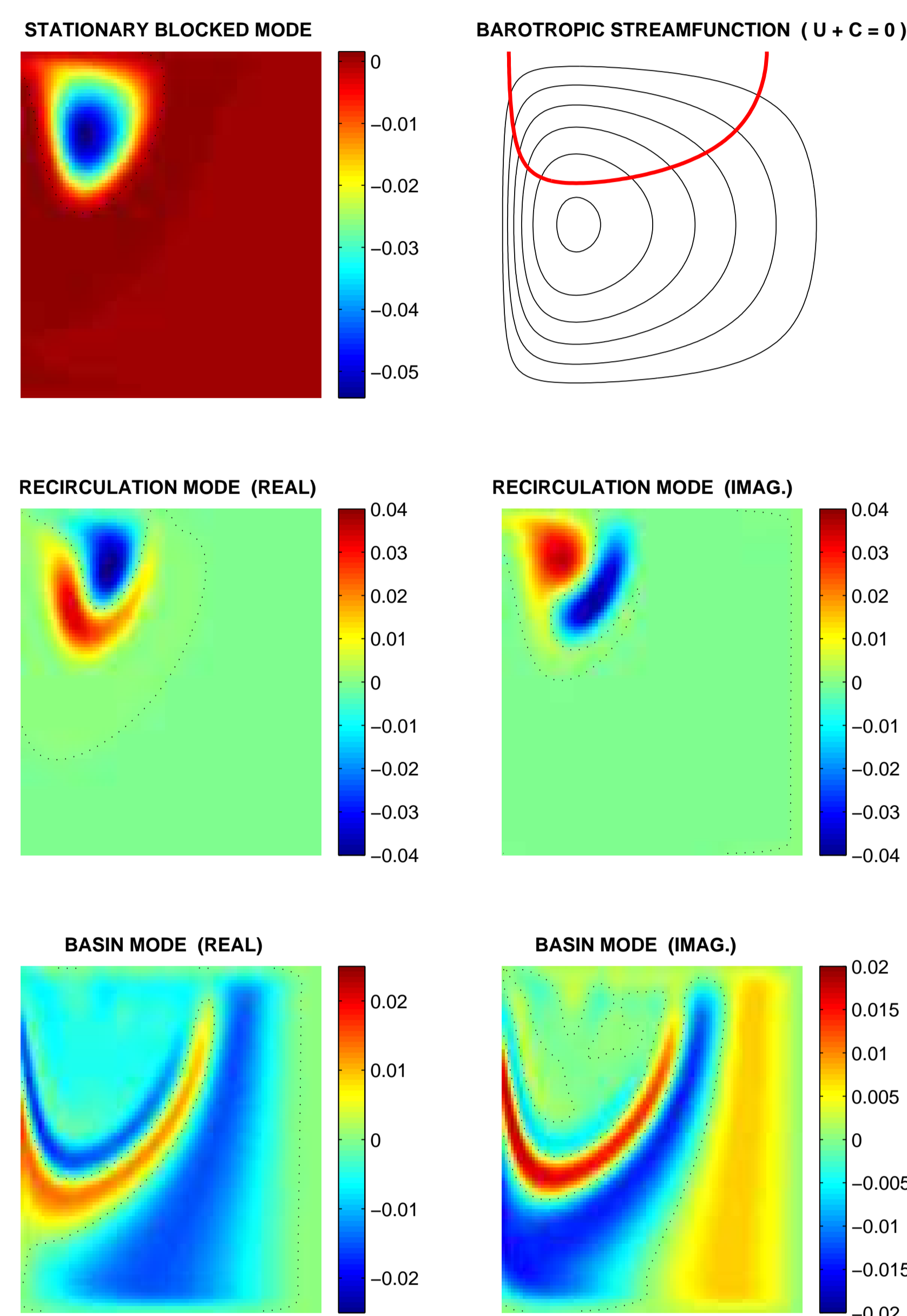


FIGURE 1: Mode stationnaire (en haut à gauche), mode de recirculation (milieu), et mode de bassin (en bas), pour la circulation barotrope moyenne d'un tourbillon subtropical (en haut à droite). La partie réelle et imaginaire des modes oscillants correspond respectivement aux phases 0 et $\pi/2$. Longitude en abscisse et latitude en ordonnée.

Ces travaux sont poursuivis en dynamique QG et SW à 2 couches actives, permettant l'émergence d'instabilité barocline. On trouve alors des modes piégés pour des circulations moyennes réalistes, leur structure verticale est celle du second mode barocline. On cherche des régimes permettant la croissance de ces modes, ainsi que leur signature dans une configuration réaliste de l'Atlantique Nord.

3. MODES DE VARIABILITÉ THERMOHALINE

En parallèle à ces études purement dynamiques, nous avons analysé des simulations numériques avec des modèles aux équations primitives et planétaires géostrophiques en géométrie idéalisée (fond plat). Plusieurs types de variabilité se développent suivant les conditions aux limites en surface pour le sel et la température : sous flux de chaleur et eau douce constants, des oscillations de période interdécennale ; sous conditions mixtes (rappel de température mais flux d'eau douce constants), des oscillations de période interdécennale, centenaire ou millénaire, suivant l'amplitude des flux d'eau douce.

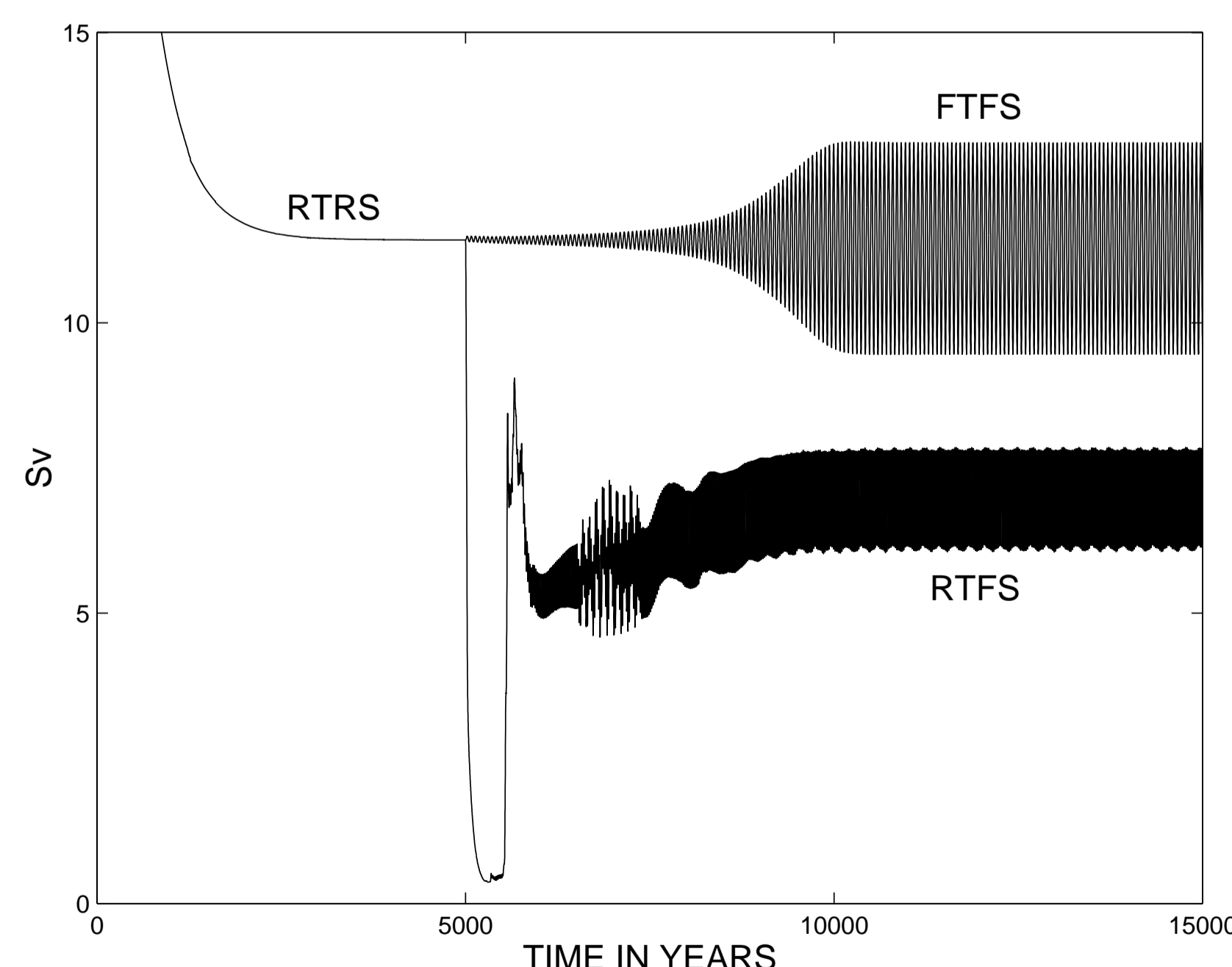


FIGURE 2: Intensité de la cellule méridienne en fonction du temps après modification des conditions limites à la surface à 5000 ans : relaxation de température et salinité (RTRS), puis flux de chaleur et d'eau douce constants (FTFS) ou conditions mixtes (RTFS).

Deux types d'oscillations interdécennales

Nous avons comparé les oscillations interdécennales selon les conditions aux limites, et nous avons pu en distinguer deux types sur des critères objectifs tels que le bilan de variance de densité (Arzel *et al.* 2004) :

- le type "flux" sous flux de chaleur et/ou eau douce constant (FTFS), assez générique, et apparaissant comme un mode linéaire suite à une bifurcation de Hopf (Colin de Verdière&Huck 1999, Huck&Vallis 2001, te Raa&Dijkstra 2002) ;

- le type "mixte" sous conditions mixtes (RTFS), beaucoup moins facile à trouver, lié aux interactions entre relaxation de température en surface et convection. Une estimation simple de la variabilité thermohaline est la variance de température et salinité en terme de densité, une mesure proche de l'énergie potentielle disponible dans l'approximation QG (Lorenz 1955). Le budget de variance de densité permet ainsi de déterminer les processus qui contribuent à entretenir ou amortir la variabilité :

$$\rho' = \alpha T' + \beta S' : \frac{1}{2} \partial_t \langle \rho'^2 \rangle = - \langle \mathbf{u}' \cdot \nabla \rho' \rangle + \langle \rho' B' \rangle + \langle \rho' D' \rangle$$

exp. FTFS :	4.9	0	-4.9
exp. RTFS :	5.8	68.7	-74.5

sources : instabilité hydrodynamique interne (FTFS), flux air-mer B via une rétroaction positive entre convection et relaxation de température (RTFS)
puits : mélange horizontal et vertical, convection D

Oscillations centenaires et millénaires

Sur ces échelles de temps, la circulation océanique est ajustée au forçage, même en moyenne zonale : les modèles bidimensionnels (latitude profondeur) sont donc parfaitement appropriés. Avec des conditions mixtes en surface, l'amplitude des flux d'eau douce contrôle l'occurrence et la période des oscillations. Dans un premier temps, des oscillations centenaires apparaissent suite à une bifurcation de Hopf : leur mécanisme est étudié en détails, par analogie avec un modèle unidimensionnel, la boucle de Howard- Malkus, que l'on peut résoudre analytiquement (Sévellec *et al.* 2005). Le mécanisme repose sur l'advection d'anomalies de salinité autour de la boucle, leur effet sur l'overturning, qui modifie le temps de résidence des anomalies dans les régions d'évaporation et précipitation, ce qui renforce régulièrement les anomalies :

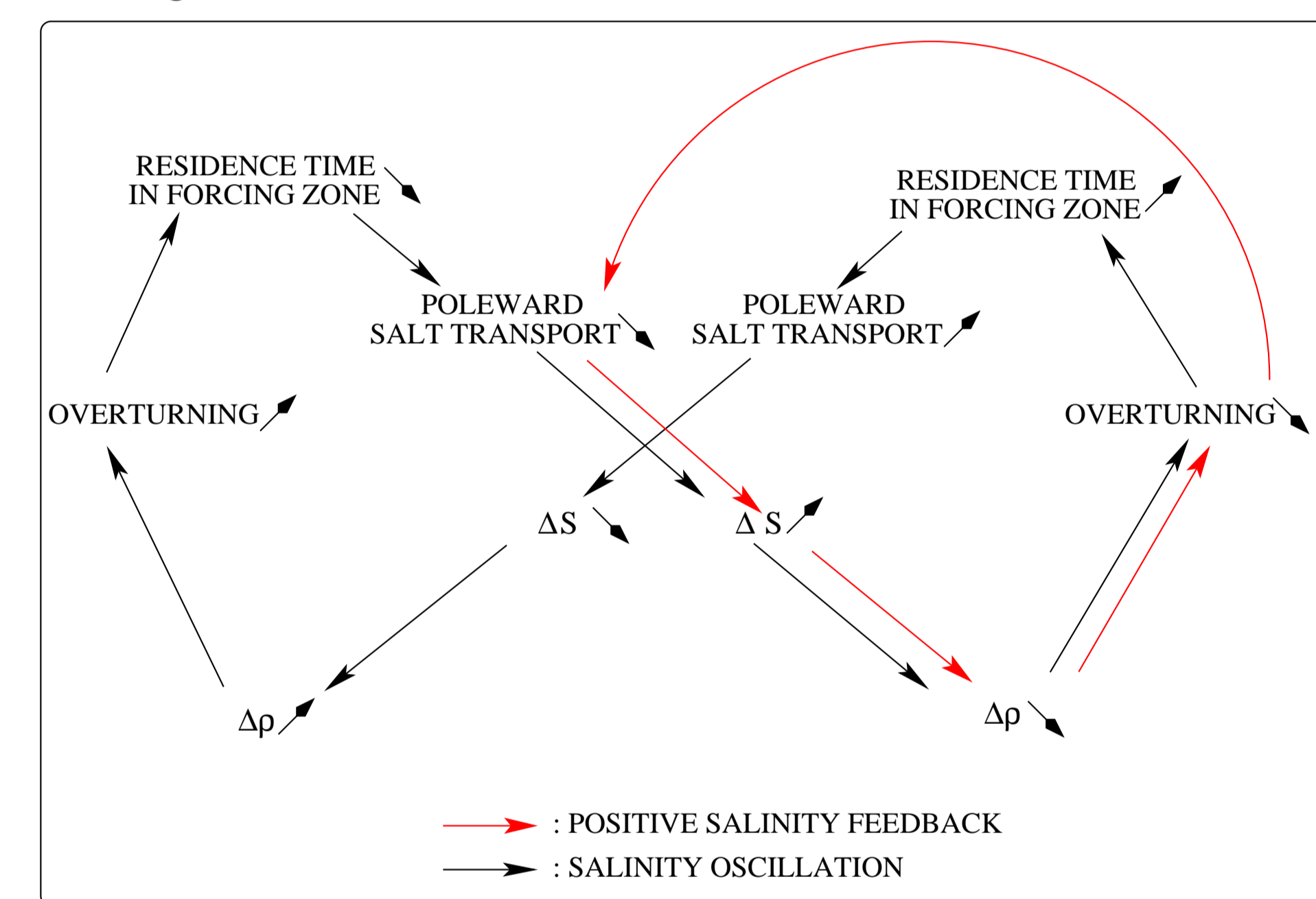


FIGURE 3: Mécanisme des oscillations centenaires.

La relaxation de température contribue au maintien des anomalies de densité, grâce aux corrélations positives entre anomalies de température et salinité.

Pour des amplitudes plus importantes du flux d'eau douce, des oscillations millénaires fortement nonlinéaires sont obtenues, avec alternance de circulation méridienne positive (thermique) et négative (haline).

4. CONCLUSION

Dans les modèles purement océaniques, la variabilité décennale à millénaire dépend du type de forçage à la surface pour la température et la salinité. La relaxation de température (supposant implicitement une capacité calorifique infinie pour l'atmosphère) joue un rôle moteur dans la plupart des oscillations. Il est donc primordial d'étudier la variabilité climatique dans des modèles couplés, afin que les interactions air-mer soient formulées dans un cadre énergétique cohérent. La composante de glace doit également être prise en compte vu son influence sur les échanges de chaleur et d'eau douce.

Seul le mode interdécennal de type "flux" est associé à une instabilité interne (barocline à grande échelle), mais peut être amorti dans une configuration réaliste avec topographie du fond. Son étude sera poursuivie par l'analyse de stabilité (linéaire et généralisée) de la circulation générale océanique dans le modèle global OPA ORCA 2°.

RÉFÉRENCES

- Arzel, O., 2004 : Mécanismes de variabilité climatique interdécennale dans des modèles idéalisés. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 240pp.
- Arzel, O., et T. Huck, 2003 : Decadal oscillations in a simplified coupled model due to unstable interactions between zonal winds and ocean gyres. *Dyn. Atm. Oceans*, **37**, 245-270.
- Arzel, O., T. Huck et A. Colin de Verdière, 2004 : Identifying two types of thermohaline circulation interdecadal variability. *J. Phys. Oceanogr.*, en révision.
- Ben Jelloul, M., et T. Huck, 2003 : Basin modes interactions and selection by the mean flow in a reduced-gravity quasigeostrophic model. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2320-2332.
- Ben Jelloul, M., et T. Huck, 2005 : Low-frequency basin modes in a two-layer quasi-geostrophic model in the presence of a mean gyre flow. *J. Phys. Oceanogr.*, sous presse.
- Cessi, P., et F. Primeau, 2001 : Dissipative selection of low frequency modes in a reduced-gravity basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 127-137.
- Colin de Verdière, A., et T. Huck, 1999 : Baroclinic instability : an oceanic wavemaker for interdecadal variability. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 893-910.
- Delworth, T. L., et M. E. Mann, 2000 : Observed and simulated multidecadal variability in the North Atlantic. *Clim. Dyn.*, **16**, 661-676.
- Huck, T., et G. K. Vallis, 2001 : Linear stability analysis of the three-dimensional thermally-driven ocean circulation : application to interdecadal oscillations. *Tellus*, **53A**, 526-545.
- Sévellec, F., T. Huck, et M. Ben Jelloul, 2004 : On the mechanism of centennial thermohaline oscillations. *J. Mar. Res.*, en révision.
- Spydel, M., et P. Cessi, 2003 : Baroclinic modes in a two-layer basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 610-622.
- te Raa, L. A., et H. A. Dijkstra, 2002 : Instability of the thermohaline ocean circulation on interdecadal time scales. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 138-160.