

PROGRAMME NATIONAL LEFE Les Enveloppes Fluides et l'Environnement : EVE IDAO

TITRE DU PROJET : REConstitution de la circulation océanique grande échelle dans l'Atlantique depuis 1950 à partir des données in situ : variations, incertitudes et mécanismes

Participants : **Thierry Huck**, Alain Colin de Verdière, Fabienne Gaillard, Herlé Mercier, Richard Schopp, Cécile Cabanes, Thierry Reynaud, Patrice Bellec

Collaborateurs : Philippe Estrade, Bruno Ferron, Jean-Marc Molines, Michel Ollitrault, Thierry Penduff, Anne Marie Treguier

Laboratoire de Physique des Océans (UMR 6523 CNRS IFREMER IRD UBO), Brest

Projet financé en septembre 2006 - Durée du projet : 2 ans

Rapport final – février 2009

L'objectif principal de ce projet était de développer et comparer des méthodes de reconstruction de la circulation océanique à partir de données in situ de température et salinité. Le contexte de l'étude reste d'actualité avec la publication de résultats récents sur le sujet par des approches et des résultats variées : réanalyses ECCO et ECMWF (Balmaseda et al. 2007), inversions (Sidorenko et al. 2008). Les efforts ont été menés dans 3 directions principales : la construction de champs de température et salinité représentatifs des années récentes ; l'utilisation de la dérive des flotteurs Argo comme vitesse de référence pour reconstruire des champs de vitesses par le vent thermique ; l'utilisation de modèles dynamiques diagnostiques. Des comparaisons avec les simulations forcées réalistes de Drakkar ont été menées et montrent des résultats assez cohérents sur la variabilité basse fréquence.

A. Climatologies annuelles moyennes de température et salinité

Plusieurs produits sont utilisés dont certains développés par nos soins.

► **WOD2004** anomalies pentadales de température et salinité de 1955-59 à 1994-98 (Levitus et al. 2005, Boyer et al. 2005) : couverture globale 1°, 28 niveaux verticaux 0-3000 m, complétées jusqu'au fond par les données de la climatologie moyenne. Inconvénients : pas de mise à jour, faible résolution verticale (500m à partir de 2000m), lissage spatial très important O(1000km).

► **ARIVO** champs de T et S mensuels ou annuels sur une grille Mercator au 1/2° avec 59/152 niveaux verticaux 0-2000m, construits par analyse objective des anomalies par rapport aux moyennes mensuelles à partir des données Coriolis et LPO (Autret et Gaillard 2005 pour Coriolis, Gaillard et al. 2009 pour le filtrage des données Argo) :

- ARRAATYn analyses annuelles (ou sur n années) historiques dans l'Atlantique S20°-N70° 1980-2005 (Melet 2006 pour une première version 1990-2005) ;

- ARRAGL05 analyses mensuelles globales 2002-2008 (Gaillard et Charraudeau 2008).

► **HB** Analyses pentadales de T et S de 1955-59 à 2000-2004 réalisées au LPO par P. Bellec et T. Huck à partir des données et programmes Hydrobase (R. Curry, WHOI) : Atlantique 80S-80N 1°, 85 niveaux de la surface au fond, gridding et interpolation isopycnale (Lozier et al. 1994, 1995). Inconvénient : pas de mise à jour des données récentes.

B1. Méthodes dynamiques diagnostiques

Dans le cadre du postdoc de C. Cabanes (financement CNES 11/2006-12/2008), on a cherché à reconstruire des champs de vitesse horizontale tridimensionnels associés aux champs de T et S. La piste poursuivie est d'utiliser la dérive des flotteurs Argo à leur profondeur de parking comme vitesses de références, et le vent thermique à partir des champs de T et S. La première phase du travail s'est appliquée à évaluer les dérives flotteurs (YoMaHa'07) et à les comparer aux vitesses géostrophiques issues des mesures altimétriques (AVISO), afin de réduire si possible la contribution méso-échelle aux déplacements des flotteurs et améliorer la détermination des vitesses de référence sur des périodes réduites. La corrélation des déplacements à 1000m et les courants de surface met en évidence une relation interprétable en fonction de la structure locale du premier mode barocline

(Cabanes et al. 2009 soumis à GRL). Ces résultats montrent une partition d'énergie entre mode barotrope et premier mode barocline qui varie fortement avec la latitude, en accord avec des résultats théoriques, mais qui rend difficile la correction des trajectoires profondes par l'altimétrie. L'étape suivante prévue était d'utiliser ces vitesses de référence avec les champs de T et S associés pour reconstruire des champs de vitesse à toutes les profondeurs par le vent thermique, pour des ensembles d'années données : vu l'impossibilité de réduire le bruit méso-échelle de ces trajectoires, plus de 3 ans sont nécessaires (et encore sur les dernières années où la densité des flotteurs est presque nominale), ce qui paraît incompatible avec la description de la variabilité interannuelle sur la période des données Argo. On s'est donc attaché, dans un premier temps, à reconstruire uniquement la partie barocline de la circulation dans l'Atlantique Nord. Les premiers résultats montrent une reconstruction satisfaisante de la cellule de circulation méridienne dans l'Atlantique, tant du point de vue de la circulation moyenne que de sa variabilité interannuelle, en comparaison aux simulations numériques Drakkar ORCA025-G70 par exemple (Fig. 1). Il apparaît dans les simulations numériques (Drakkar, modèles diagnostiques décrits en B2) que la partie barocline de la circulation méridienne est anticorrélée à la partie barotrope, certainement par la contrainte d'une vitesse totale faible au fond. La reconstitution de la seule partie barocline de la MOC à partir des données de T et S ne semble donc pas présenter un intérêt océanographique ou climatique majeur.

Composante barocline de la cellule de circulation méridienne

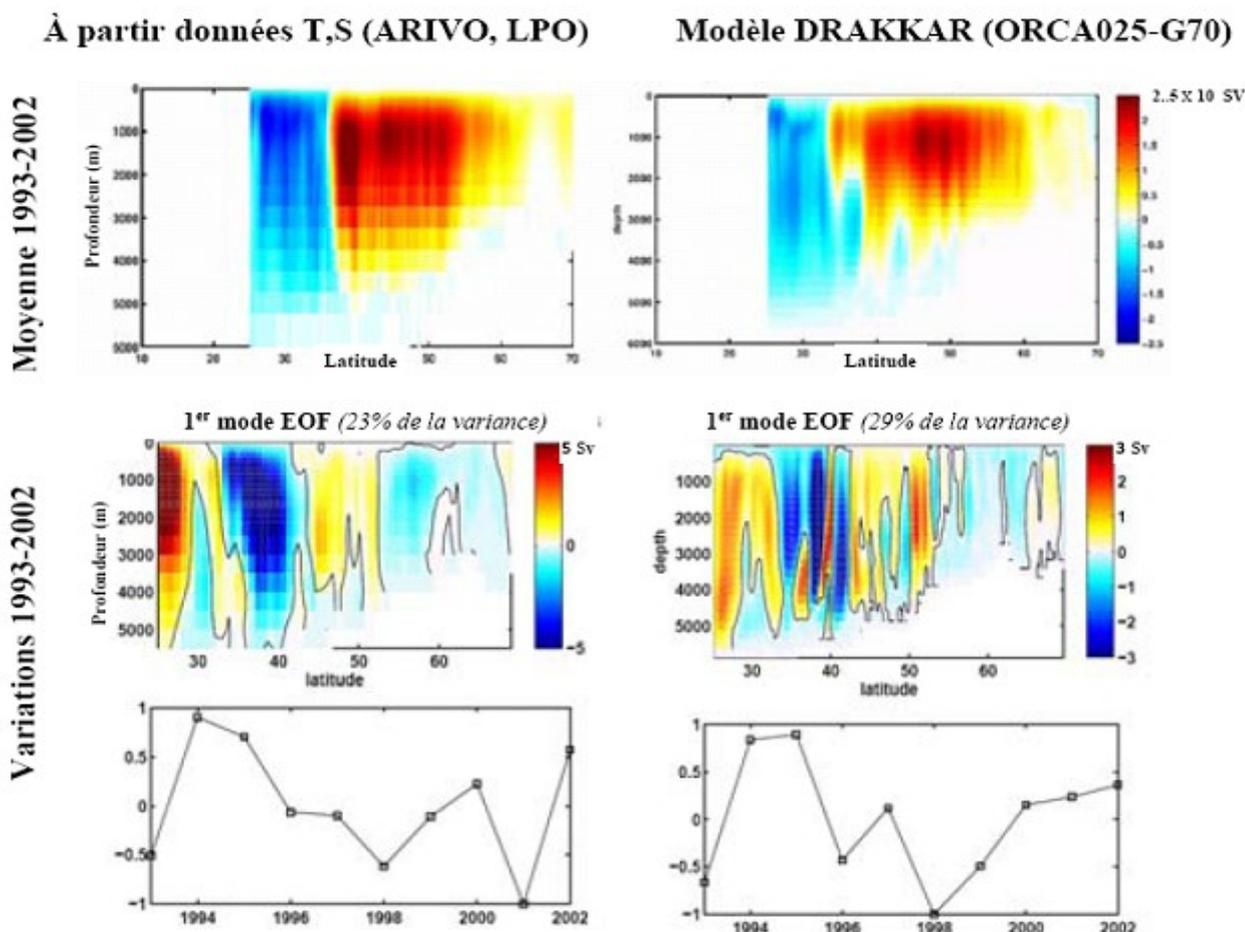


Figure 1 : Composante barocline de la cellule de circulation méridienne (MOC) à partir des données T S (à gauche) et dans le modèle Drakkar ORCA025-G70 (à droite) : (haut) moyenne 1992-2003 ; (centre) EOF1 et (bas) son évolution temporelle.

B2. Modèles dynamiques (semi)diagnostiques

a. Configuration Atlantique avec ROMS $1/2^\circ$

3 méthodes ont été mises en oeuvre dans une configuration Atlantique Nord du modèle ROMS au $1/2^\circ$ (Shchepetkin et McWilliams 2005, version UCLA/IRD) : une méthode purement diagnostique où la dynamique du modèle est intégrée sur un champ de traceurs T et S constants (CT pour "constant tracer"), une méthode dite "robust diagnostic" (RD) où les champs de T et S sont rappelés à la climatologie avec un temps de rappel de 30 jours (uniforme spatialement), et une méthode dite "short prognostic" (PR) où le modèle est intégré sur un temps court à partir des conditions initiales (Ezer et Mellor 1994). Ces méthodes sont successivement utilisées sur les champs interannuels de T et S issus des 3 produits décrits en A. En outre le forçage du vent spécifié correspond aux moyennes sur les mêmes périodes issues des réanalyses NCEP et ERA40. Des tests de sensibilité montrent que pour la variabilité basse fréquence, les variations du forçage du vent sont négligeables devant les changements thermohalins (qui les incluent implicitement). L'analyse des transports méridiens de chaleur montre que leur valeur moyenne en fonction de la latitude dépend sensiblement des détails de la configuration (résolution, lissage de la topographie et des champs de T S), alors que les variations temporelles semblent beaucoup plus robustes. Il est néanmoins indispensable pour documenter les évolutions temporelles d'utiliser des séries de champs TS construits de manière homogène (même si la densité de données ne l'est pas). Nous avons pu mettre en évidence dans ces reconstructions une variation basse fréquence coordonnée du transport méridien de chaleur, de l'intensité de la cellule thermohaline et de la fonction courant barotrope dans le gyre subpolaire, avec un maximum au début des années 60 et au milieu des années 90, et un minimum au milieu des années 70 (Huck et al. 2008, Fig. 2). Ces variations sont très cohérentes avec la simulation Drakkar ORCA025-G70 forcée uniquement en surface. Néanmoins, les résultats à 24N sont beaucoup moins cohérents et afin de s'affranchir des contraintes de bord associées à des simulations régionales, nous avons voulu confirmer ces résultats dans une configuration globale.

b. Configuration globale avec OPA ORCA2 et ORCA05

En collaboration avec l'équipe Drakkar (AM Treguier, JM Molines), nous avons pris en main les configurations ORCA2 et ORCA05 d'OPA dans l'environnement Drakkar. Après avoir refait des simulations forcées (CORE CIAF), nous avons testé la mise en oeuvre du "robust diagnostic" avec un coefficient de rappel variable spatialement (Madec et Imbard 1996). À l'aide de Sosie (Brodeau 2007), nous avons construit des climatologies mensuelles incorporant les anomalies de T et S des différents champs interannuels décrits en A. 2 types de simulations avec rappel ont été menées : des simulations "à l'équilibre" intégrées pendant 12 ans avec un forçage annuel répété, et des simulations plus comparables aux simulations forcées, où le modèle est intégré de manière continue de 1958 à 2004 avec le champ de rappel (et le forçage) variant tous les ans. Ces différentes simulations ont été testées dans la configuration ORCA2, moins coûteuse en temps calcul, et seront reproduites avec ORCA05 : les résultats d'ORCA2 sont très comparables entre les différentes séries, et avec les simulations Atlantique précédentes, au moins dans le tourbillon subpolaire (Fig. 3). Les améliorations résident dans la configuration globale, les forçages et les climatologies comprenant le cycle saisonnier, et le faible coefficient de rappel diminuant avec la profondeur, la proximité des côtes et de la topographie (ce qui implique des temps d'intégration à l'équilibre plus long >10 ans).

B3. Modèle inverse

Le modèle inverse de Mercier et al. (1993) est mis en oeuvre dans l'Atlantique Nord afin de reconstruire une circulation géostrophique moyenne sur la climatologie WOA05. Ce travail a effectivement commencé il y a quelques mois mais bénéficie de nombreuses améliorations apportées au modèle inverse par M. Ollitrault et T. Reynaud. Une circulation moyenne raisonnable devrait être obtenue en ajustant les niveaux de référence finement suivant les régions. On envisage

également d'ajouter au besoin les vitesses moyennes de dérive des flotteurs Argo à leur profondeur de parking (1000m en général). Ces diagnostics seront ensuite reproduits pour les différentes périodes en modifiant la climatologie de référence et les flux de surface (vent, chaleur, eau douce), afin de déterminer les variations de la circulation moyenne, et surtout si elles sont significatives par rapport à l'erreur de reconstruction.

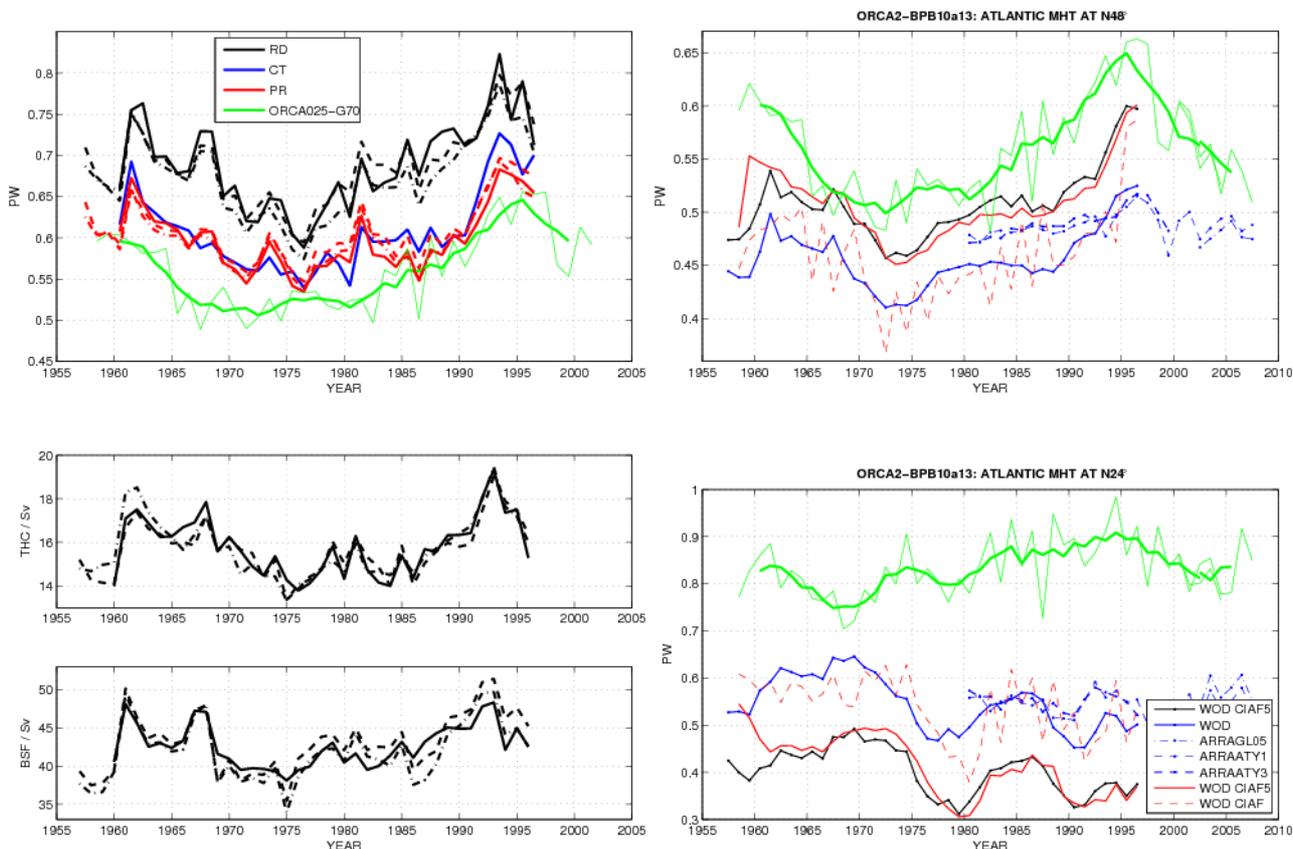


Figure 2 : (haut) Maximum du transport méridien de chaleur dans le gyre subpolaire (45-60N) calculé à partir des anomalies pentadales de température et salinité selon différentes méthodes diagnostiques (Robust Diagnostic, Constant Tracers, short PRognostic) et dans le modèle ORCA025-G70 (moyenne annuelle et pentadale). (centre) Circulation thermohaline et (bas) intensité du gyre barotrope subpolaire à 48N pour la méthode RD.

Figure 3 : Transport de chaleur méridien à 48N (haut) et 24N (bas) dans l'Atlantique dans les simulations ORCA2 avec rappel sur les champs de T S interannuels WOD2004 (pentades) et ARIVO ARRAATYn (Atlantique, moyennes sur n années) et ARRAGL05 (globaux), et forçage interannuel CORE (CIAF) ou perpétuel (CNYF). 2 types de simulation sont menées : à l'équilibre (points) ou interannuelles continues (traits). ORCA025-G70 et G70fo en vert.

C1. Synthèse des résultats et incertitude

Les premières comparaisons de ces résultats ont été menées avec les simulations forcées dans le cadre du projet Drakkar, notamment les simulations globales au 1/4°. Même si les valeurs absolues du transport de chaleur diffèrent, leur évolution temporelle depuis les années 1960 est très similaire : ainsi dans le gyre subpolaire on observe un minimum dans les années 1970 et des maxima en début (1959-1963) et fin de période (1992-1997). Il n'y a aucune indication de tendance nette sur les transports de masse ou de chaleur sur les 5 décennies étudiées. Les comparaisons avec les différentes réanalyses Mercator et Cerfacs restent à faire.

C2. Interprétation des variations interannuelles et mécanismes

Le travail initialement proposé n'a pu être intégralement mené à bien, mais on a pu confirmer par différentes méthodes et techniques des variations basse fréquence cohérentes de la circulation océanique grande échelle dans l'Atlantique au cours des dernières décennies. Il reste à expliquer ces variations coordonnées dans le gyre subpolaire : est-ce dû à la structure du forçage atmosphérique lié principalement à la NAO ? Et pourquoi ces différences suivant le modèle et la méthode à 24N ?

Publications

- Cabanes, C., T. Huck, A. Colin de Verdière, M. Ollitrault, 2009 : Partition between barotropic and first baroclinic modes inferred from altimetric surface velocities and Argo float mid-depth displacements. *Geophysical Research Letter*, soumis.
- Gaillard, F., E. Autret, V. Thierry, P. Galaup, C. Coatanoan, and T. Loubrieu, 2009 : Quality control of large Argo datasets. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 26 (2), 337-351.
- Huck, T., A. Colin de Verdière, P. Estrade, R. Schopp, 2008 : Low-frequency variations of the large-scale ocean circulation and heat transport in the North Atlantic from 1955-1998 in-situ temperature and salinity data. *Geophysical Research Letter*, 35, L23613, doi:10.1029/2008GL035635.
- von Schuckmann, K., F. Gaillard, P.-Y. Le Traon, 2009 : Global hydrographic variability patterns during 2003-2007. *J. Geophys. Res.*, soumis.

Autres références citées dans le texte

- Autret, E., F. Gaillard, 2005 : Système opérationnel d'analyse des champs de température et de salinité mis en oeuvre au centre de données CORIOLIS : Version V3.03. configuration GLOBAL05 V1.0. Rapport interne Coriolis Ifremer, 73 p.
- Balmaseda, M. A., G. C. Smith, K. Haines, D. Anderson, T. N. Palmer, A. Vidard, 2007 : Historical reconstruction of the Atlantic meridional overturning circulation from ECMWF operational ocean reanalysis. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L23615, doi: 10.1029/2007GL031645.
- Brodeau, L., 2007 : Contribution à l'amélioration de la fonction de forçage des modèles de circulation générale océanique. Manuscrit de thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Ezer, T., G. L. Mellor, 1994 : Diagnostic and prognostic calculations of the North Atlantic circulation and sea level using a sigma coordinate ocean model. *J. Geophys. Res.*, 99, C7, 14,159-14,172 (94JC00859).
- Gaillard, F., R. Charraudeau, 2008 : ISAS-V4.1b: Description of the method and user manual. Rapport LPO 08-03, Ifremer Brest.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, 2005 : Warming of the world ocean , 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Lebedev, K., H. Yoshinari, N. A. Maximenko, P. W. Hacker, 2007 : YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface, IPRC Technical Note No. 4(2), June 12, 2007, 16p.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, 2005 : Warming of the world ocean , 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Lozier, M. S., M. S. McCartney, W. B. Owens, 1994 : Anomalous Anomalies in Averaged Hydrographic Data. *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 2624-2638.
- Lozier, M. S., W. B. Owens, R. G. Curry, 1995 : The climatology of the North Atlantic. *Prog. Oceanogr.*, 36, 1-44.
- Madec, G., M. Imbard, 1996 : A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity. *Clim. Dyn.*, 12, 381-388.
- Melet, A., 2006 : Etude de la variabilité interannuelle de l'Atlantique Nord. Stage Final Ingénieur, Ecole Centrale de Lyon, 104pp.
- Mercier, H., M. Ollitrault, P. Y. Le Traon, 1993 : An inverse model of the North Atlantic general circulation using lagrangian float data. *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 689-715.
- Shchepetkin, A., J. C. McWilliams, 2005 : The Regional Oceanic Modeling System: A split explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modelling*, 9, 347-404.
- Sidorenko, D., S. Danilov, J. Schröter, 2008 : Inverse solution for pentadal variability in the North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02603, doi:10.1029/2007GL032463.