Caractérisation des effets du réchauffement climatique sur l'océan superficiel au cours des 50 dernières années.

Mathieu Hamon

Thèse en Océanographie Physique dirigée par P.Y Le Traon et G. Reverdin soutenue le 01 Mars à l'IUEM,

Thèse financée par Ifremer et Météo France dans le cadre du projet Coriolis.

fremer





• Un réchauffement global

- Le GIEC estime que la température du globe est susceptible d'augmenter de 1.8°C à 3.4°C au cours du XXI^esiècle (effet de serre).
- De nombreuses conséquences :

fonte des glaciers et des calottes polaires élévation du niveau de la mer extinction d'espèces migration de peuples, etc

- L'océan joue un rôle primordial
- Du fait de sa capacité thermique élevée, on estime que depuis les années 50, 84% de l'énergie développée par le réchauffement climatique est stockée dans les premières couches de l'océan (Levitus et al., 2001, 2005).
- La circulation thermohaline redistribue chaleur et eau douce à l'échelle planétaire.

 Nécessité d'étudier les variations basse fréquence de l'océan global (T et S) à partir des données in situ.

Exemples :



• Également des conséquences régionales :

Exemples avec la salinité:





Contraste entre le contenu d'eau douce des régions **subpolaires** et **subtropicales** de L'Atlantique (Boyer et al, 2005)

Structure spatiale de la tendance de la **salinité de surface** 1950-2000 (Durack et Wijffels, 2010)

• Il existe de nombreux travaux mais l'utilisation des donnés *in situ* implique également, de nombreuses incertitudes.

Incertitudes liées à :

Erreurs instrumentales Technique d'interpolation Échantillonnage des données Climatologie



Illustrations :



Objectifs

1. Réduire l'effet des erreurs instrumentales (XBT).

2. Proposer une méthode alternative d'interpolation dans le cadre de la reconstruction de champs globaux.

Création d'un nouveau produit de T et S.

3. Calcul des tendances de T et S et description des principaux modes de variabilité.

Plan

1) Correction des biais XBT

- 1.1 Origine du problème
- 1.2 Données et méthode
- 1.3 La correction W08 (Wijffels et al., 2008)
- 1.4 Nouvelle correction empirique

2) Reconstruction de champs grande échelle

- 2.1 Empirical Orthogonal Functions (EOFs)
- 2.2 Nouveau processus de reconstruction
- 2.3 Validation

3) Description de la variabilité grande échelle

- 3.1 Analyse comparative du contenu thermique
- 3.2 Analyse comparative du contenu d'eau douce

Conclusion et Perspectives

- 1.1 Origine du problème
- 1.2 Données et méthode
- 1.3 La correction W08
- 1.4 Nouvelle correction empirique







Correction des biais XBT L'origine du problème

eXpandable BathyThermograph

- Sonde développée par l'armée américaine à la fin des années 60.
- La plupart ne mesurent que la partie superficielle de l'océan (500m/900m).
- L'immersion de la sonde est estimée par une équation de chute :





Vitesse nominale

Changement de masse

L'origine du problème

- Approximation de l'équation de chute (Hanawa et al, 1995) :
 Mauvaise estimation de l'immersion de la sonde ----> Biais de température
- Gouretski et Koltermann (2007) identifient un biais chaud par comparaison de carte réalisées avec des XBTs et des CTDs (méthode GK07).

Variations du biais de l'ordre de 0.2°C/0.4°C selon les années

• De nombreuses corrections ont été proposées :

Wijffels et al., 2008 (équation de chute)

Ishii et Kimoto, 2009 (équation de chute)

Levitus et al., 2009 (T(z))

Gouretski et Reseghetti, 2010 (équation de chute + température)

Données et méthode

- Profils de la base de données WOD05, interpolés aux niveaux standards.
- Les CTDs et OSDs sont nos profils de référence.
- Plutôt que d'utiliser la méthode GK07, nous avons réalisé une colocalisation 1°*2°*15 jours.
- Pour chaque profil XBT, on calcule la médiane des CTD/OSD repérés dans l'aire de colocalisation pour obtenir un profil unique de référence.
- On s'assure que la différence de bathymétrie est inférieure à 500m pour éviter les biais non-réalistes dans les régions de talus.
- La méthode nous permet de considérer environ 10⁴ profils par année.

Correction des biais XBT La correction W08

 W08 est une correction linéaire dépendante du temps. Elle distingue les XBTs « profondes » (Deep, XBTD) et « peu profondes » (Shallow, XBTS).



$$Z_{true} = Z(1-r)$$

La correction linéaire W08 ne corrige pas efficacement les profils XBT colocalisés, en particulier entre 1975 et 1985.

La correction est trop forte en ¹² profondeur et pas assez dans ¹³ Jes couches de surface.

Nouvelle correction empirique

- Une analyse fine du biais en fonction de la profondeur et de l'année de déploiement montre qu'il est nécessaire d'appliquer une correction thermique puis une correction sur l'immersion de la sonde.
- L' erreur sur la profondeur évolue comme une fonction d'ordre 2 et un offset.

Étape 1 :
$$T = T_{XBT} - T_{off}$$

Étape 2 :
$$Z = Z_{obs}(1 - A - B.Z_{obs}) - Z_{off}$$

Nouvelle correction empirique – Offset Thermique

- La correction thermique est primordiale. Elle est calculée en utilisant des profils présentant un faible gradient thermique sur les 30 premiers mètres (<0.0025°C/m).
- Influence importante du critère sur la bathymétrie et du type d'XBT.
- Similarités avec l'évolution du terme de GR10, mais les valeurs restent différentes.





Nouvelle correction empirique – Correction du biais d'immersion

• On calcule le biais médian annuel en utilisant :

$$dZ = (T_{CTD} - T_{XBT}) \frac{\delta Z}{\delta T_{XBT}}$$

• Relation entre le biais de profondeur et la température de l'eau dans laquelle la sonde a été déployée (Thadathil, 2002).



Le biais moyen semble augmenter vers les basses températures.

Césure vers 11°C.

Eaux chaudes/Eaux froides

À 100m, l'erreur d'immersion des XBTS et XBTD est similaire

Nouvelle correction empirique – Correction du biais d'immersion

• Une analyse plus fine du biais en fonction de la profondeur montre une différence de comportement de la chute des XBTS et XBTD.

Pour résumer :

$$T = T_{XBT} - T_{off}$$

Dépend de l'année et du type d'XBT

$$Z = Z_{obs}(1 - A - B.Z_{obs}) - Z_{off}$$

Dépend de l'année, du type d'XBT et de la température de l'eau

Séparation des profils en 4 classes : XBTS/XBTD et eaux froides/chaudes

Correction des biais XBT Nouvelle correction empirique – Cas particulier

Biais de température moyen sur la période 1968-1985.





Biais négatif dans le Pacifique Ouest après une correction globale entre 1968 et 1985.

Nécessité de corriger ces profils Indépendamment.

Correction des biais XBT Nouvelle correction empirique – Synthèse



1.10

Correction des biais XBT Nouvelle correction empirique – Synthèse



• Le calcul de contenu thermique montre qu'en moyenne, les températures XBT sont plus proches des températures CTD.

• En utilisant la même méthode, nous avons corrigé les MBTs.

• Le maximum de contenu thermique des années 70 peut être expliqué par les biais XBT (Domingues et al, 2008 ; Ishii and Kimoto, 2009 ; Levitus et al, 2009 ; Wijffels et al, 2008 ; Gouretski et Reseghetti 2010).

 Intégration de la correction dans la base de données CORA (MyOcean).

2. Reconstruction de champs grande échelle

- 2.1 Empirical Orthogonal Functions (EOFs)
- 2.2 Nouveau processus de reconstruction
- 2.3 Validation







Reconstruction de champs grande échelle Empirical Orthogonal Functions (EOFs)

Considérons un champ physique d'anomalies donné aux coordonnées $r = r_1, r_2 ... r_M$ au temps $t = t_1, t_2, ... t_N$.

$$(\mathbf{X})_{ij} = \boldsymbol{\varphi}(r_i, t_j)$$

Il est possible de le décomposer en modes orthogonaux . Si M>N, on peut écrire :

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T = \sum_{k=1}^N \mathbf{u}_k \boldsymbol{\rho}_k \mathbf{v}_k$$

U : EOF spatiale
D : Valeurs propres
V : Composante principale

Cela revient a résoudre un problème aux valeurs propres :

$$\begin{cases} \mathbf{X}\mathbf{v} = \rho \mathbf{u} \\ \mathbf{X}^T \mathbf{u} = \rho \mathbf{v} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} \mathbf{X}\mathbf{X}^T \mathbf{u} = \rho^2 \mathbf{u} \\ \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{v} = \rho^2 \mathbf{v} \end{cases}$$

Reconstruction de champs grande échelle

Nouveau processus de reconstruction

- Les EOFs sont un outil statistique classique qui en principe ne s'applique que sur des champs complets.
- Dans le cadre de la reconstruction de champs à partir des observations in situ, nous avons utilisé un processus itératif basé sur l'outil DINEOF (Beckers et al., 2003), développé pour la reconstruction de variables de la surface océanique estimées à partir d'imagerie satellitale.

DINEOF appliqué aux champs satellites:

- Hypothèse d'erreur nulle sur la valeur des données initiales.
- Tendances faibles (petite fenêtre temporelle de reconstruction).
- Échantillonnage aléatoire

Processus de reconstruction à partir des données In situ :

- Erreur non négligeable des données initiales (bruits instrumentaux).
- Fortes tendances (évolution des paramètres sur 50 ans).
- échantillonnage in-homogène (disparités hémisphère Nord/Sud).

Reconstruction de champs grande échelle

Nouveau processus de reconstruction – Champs initiaux

- Il existe des moyens simples de griller les anomalies sur une grille 2°*4° (moyenne, médiane)
- Les observations ne sont pas forcément décorrélées entre elles,
 - → Méthode de Bretherton (base de l'interpolation optimale, 1976)

$$\bar{\boldsymbol{\varphi}}(r_k) = \frac{\sum_{i,j} \mathbf{A}_{i,j}^{-1} \mathbf{d}_k}{\sum_{i,j} \mathbf{A}_{i,j}^{-1}} \qquad \boldsymbol{\sigma}_{Breth}(r_k) = \sqrt{\frac{\langle (\mathbf{d}_k - \bar{\mathbf{d}}_k)^2 \rangle}{\sum_{i,j} \mathbf{A}_{i,j}^{-1}}}$$

Échelle de corrélation : 150km / 15 jours

Meilleure estimation - de la valeur moyenne - de l'erreur d'estimation



Reconstruction de champs grande échelle Nouveau processus de reconstruction – Processus itératif



Reconstruction de champs grande échelle

Nouveau processus de reconstruction – Nombre d'EOFs retenues

<u>Combien d'EOFs à retenir ?</u>

On enlève 5% des données des champs grillés initiaux et on les compare avec les valeurs interpolées (Validation croisée, VC).

- Dans DINEOF, le nombre optimal d'EOFs est celui qui minimise l'erreur RMS σ^2 entre ces valeurs.
- Dans le cas de données in situ, ce critère n'est pas robuste dû au bruit présent dans les champs initiaux. Si on appliquait ce critère, le nombre d'EOFs serait trop faible et les champs résultants sous-estimeraient la variance réelle.
- On préfère maximiser :

$$\mathbf{Val}(N) = \frac{\mathbf{R}_{Var}(N)}{\boldsymbol{\sigma}^2(N)} \quad \text{avec} \quad \mathbf{R}_{Var}(N) = \frac{\mathbf{Var}_t(N)}{\mathbf{Var}_t(N)}$$

Variance des « vrais » points VC

Variance des points reconstruits VC

Équilibre entre une variance reconstruite élevée et une faible erreur. En moyenne, on retient 14 EOFs.

Utilisation d'un jeu de données simulé (Collaboration avec le LEGI, B. Barnier, M. Juza)

Sous-échantillonnage de la simulation ORCA G70-025 colocalisé avec les données de la base ENACT3

<u>Avantages</u>

Possibilité de comparer les reconstructions aux champs originaux

<u>Défauts</u>

La variabilité petite échelle du modèle est sous-estimée.

- Validation sur 2 niveaux (10m et 500m) pour la période 1958-2004.
- Niveaux de surface : Assez bon échantillonnage mais forte variabilité.
 Niveaux profonds : Faible échantillonnage mais plus faible variabilité.

Exemple pour 1961 (faible échantillonnage)



Reconstruction



Champs initiaux

<u>Estimation de l'erreur :</u>

- DINEOF calcule l'erreur de reconstruction en projetant σ^2 (validation croisée) sur les modes complets.
- Prise en compte supplémentaire de l'erreur d'estimation des valeurs dans les champs initiaux (Bretherton) et de l'erreur liée au manque d'information contenu dans les boîtes (échantillonnage temporel)





Pacifique équatorial 30°S-30°N



Comparaison en terme de contenu thermique :

• 10m

- Variabilité interannuelle assez fidèlement reconstruite (plus de 90% de corrélation dans tous les bassins sauf au Sud où elle peut baisser à 60%)
- Tendances très réalistes.

• 500M

- Les EOFs ne permettent pas de reconstruire la variabilité interannuelle (manque de données).
- En revanche, bonne estimation des tendances globales dans tous les bassins.

3. Description de la variabilité grande échelle

3.1 Analyse comparative du contenu thermique

3.2 Analyse comparative du contenu d'eau douce















Différence de la moyenne du contenu thermique 0-700m sur la période 2004-2009 entre les champs reconstruits par EOFs à partir des Argo Coriolis et des Argo WOD09.

Par rapport à la base de données Coriolis, la moyenne des anomalies Argo WOD09 est trop froide dans le Sud et au contraire trop chaude dans le Nord.

Description de la variabilité grande échelle

Analyse comparative du contenu thermique

Tendances de contenu thermique intégré

• Structures de tendances assez similaires : refroidissement

Warm Pool

Pacifique Nord

Bande zonale 15°S Indien

<u>Réchauffement</u>

Pacifique équatorial Est

Atlantique équatorial

Atlantique Nord subtropical

Maximum de différences au sud de 30°S (minimum d'échantillonnage + biais Argo). **Migration de L'ACC plus marqué dans les reconstructions par EOFs.**



Analyse de l'évolution de HC par bassin

- Hausse globale du contenu thermique (maximum pour l'Atlantique équatoriale avec 0.70 10²¹ J/an) sauf le Pacifique Nord qui tend légèrement au refroidissement (-0.09 10²¹ J/an).
- Variabilité interannuelle présente mais lissée par rapport à WOA09 (nombre réduit d'EOF)
- Forte accélération de la tendance dans les régions Australes à partir de la fin des années 90 (ACC, Böning et al, 2008 ; Gille, 2008).



Comparaison des principales EOFs de contenu thermique intégré zonalement

-200







Description de la structure verticale des principaux modes.

Détection des grands signaux de variabilité (ENSO, AMO [Atlantic Multidecadal Oscillation ; Schlesinger et Ramankutty, 1994])

Trace de AMO dans les données in situ. Réalité physique en profondeur ?

Description de la variabilité grande échelle

Analyse comparative du contenu d'eau douce

• Nouvelle estimation de la tendance globale :

0-700m FWC (Fresh Water Content) 0.2 10³ km³/an

• Sur la période commune aux deux produits 1957-1996 :

WOA05 :0,29 10³ km³/anReconstructions :0,57 10³ km³/an

• Forte variabilité décennale dans les champs WOA05 à partir des années 70, non présente dans les reconstructions.



Description de la variabilité grande échelle

Analyse comparative du contenu d'eau douce

Calcul de tendance de contenu d'eau douce : 60°N

Tendances similaires en Atlantique (baisse de FWC en régions équatoriales et augmentation vers les hautes latitudes).

Tendances plus nettes dans les reconstructions par EOF dans le Pacifique et l' Indien.

Tendances inversées à celles du HC, sauf dans l'océan austral (**changement hydrologique au sud de l'ACC**)



Analyse de l'évolution de FWC par bassin :

- Les tendances de FWC sont assez similaires entre WOA et les champs reconstruits mais le peu de données ajouté à la différence de méthode d'interpolation induit de nombreuses différence en terme de variabilité interannuelle.
- Évolutions marquantes : Augmentation de FWC dans le bassin Pacifique.
 - Chute de FWC en Atlantique Nord dans les années 2000 (Boyer et al, 2007)



Comparaison des principales EOFs de contenu d'eau douce zonal :







Description de la structure verticale des principaux modes.

Détection des grands signaux de variabilité (ENSO en Pacifique)

Meilleure restitution de la variabilité interannuelle de la salinité







1. Correction des biais XBT :

 L'analyse du biais issu de la comparaison des profils colocalisés suggère une correction d'ordre 2 sur l'équation de chute et un offset thermique.

Validation en terme de contenu intégré sur l'ensemble du jeu de données Tables de correction mise à disposition de la communauté Intégration de la méthode de correction dans la base de données Coriolis/CORA (réanalyses Mercator Océan)

2. Un processus original de reconstruction de champs globaux :

- Méthode itérative des modes de variabilité basée sur DINEOF (Beckers 2003).
- Modifications nécessaires pour appliquer la méthode dans le cadre d'une reconstruction de champs globaux à partir des données in situ (champs initiaux, first guess, climatologie intermédiaire, calcul d'erreur)

Meilleure estimation des tendances et de la variabilité océanique

3. Création d'un nouveau produit T et S :

- Estimation robuste des tendances et des principaux modes de variabilité du contenu thermique et du contenu d'eau douce (EOFs de contenu intégré sur la profondeur, zonalement et par niveau).
- Tendances d'augmentation plus fortes que les autres études (L09 et IK09) sur la période 1955-2009 (équivalente à GR10 pour 1993-2009)

0-700m 1955-2009 : **0.29 10**² J/an

- La correction XBT réduit considérablement la composante décennale de la variabilité du contenu thermique.
- Détection d'un biais Argo dans la base de données WOD09
- Hausse du contenu d'eau douce global : 0-700m 1955-2009 : 0.2 10³ km³/an
- Structures de tendances similaires à celles du contenu thermique sauf dans l'océan Austral (changements hydrologiques).
- Meilleure description de la variabilité interannuelle de la salinité.

4. Perspectives :

- Nécessité de poursuivre les analyses de ces champs :
 - Analyse sur les isopycnes (meilleur diagnostic des changements hydrologiques)
 - Analyse approfondie des modes de variabilité et des mécanismes dynamiques (Ex : mode Atlantique corrélé au signal AMO).
- Interaction avec les groupes impliqués dans l'étude de l'océan et du climat :
 - Réanalyses océaniques (MyOcean, Mercator Océan)
 - Analyses climatiques de type GIEC (CNRM, CERFACS)
- Utilisation de la méthode de reconstruction dans le cadre de Coriolis pour la fourniture de champs grillés pour l'étude des tendances climatiques (outil complémentaire à ISAS).
- Amélioration de la méthode de reconstruction :
 - EOFs multivariées et couplage T/S, reconstruction 3D.









Nouvelle correction empirique – Correction du biais d'immersion



Partie linéaire « A*Z» en fonction de la partie parabolique « B*Z² » et de l'année de déploiement à 400m pour les XBTS (étoiles) et XBTD (ronds).

Nouvelle correction empirique – Correction du biais d'immersion

Erreur DINEOF :

$$\mathbf{B}(t,k) = \mathbf{i}^T \mathbf{C}(t,k)\mathbf{i} \qquad \text{Avec} \quad \mathbf{C} = \mathbf{I} - \mathbf{L}_p^T (\mathbf{L}_p \mathbf{L}_p^T + \boldsymbol{\sigma}_{tot}^2)^{-1} \mathbf{L}_p$$

On construit une formule empirique comme :

$$\mathbf{Err}(t,k) = \sqrt{\alpha(k)\mathbf{B}(t,k) + \beta(k)\mathbf{Ev}(t,k)}$$

$$\alpha(k) = \left(\frac{N_t(k)}{T}\right)^t$$
$$\beta(k) = \left(\frac{T - N_t(k)}{T}\right)$$

Ou on définit l'erreur de représentativité des boîtes comme :

$$\mathbf{Ev}(t,k) = (\mathbf{VAR}(k) \frac{N_t(k)}{N_t(k)-1}) \cdot \mathbf{H}(t,k)$$

Nouvelle correction empirique – Correction du biais d'immersion



Échantillonnage temporel des boîtes

Description de la variabilité grande échelle

Salinité de surface et cycle hydrologique

• Fortes similitudes entre la tendance de la SSS et la moyenne des flux air/mer (Josey et al, 1998).

Augmentation du cycle hydrologique terrestre (Held et Soden, 2006 ; Durack et Wijffels, 2010).

- Hausse de la SSS dans les gyres subtropicaux (évaporation).
- Baisse de la SSS dans les régions subéquatoriales (ITCZ, précipitations)
- Hausse de la SSS en Atlantique équatoriale en contradiction avec la carte des flux (apport via l'Amazone, Reverdin et al, 2007)

