



# Influence des interactions océan-calottes polaires sur le réchauffement climatique

**Didier Swingedouw**

Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître; Louvain-la-Neuve;  
Belgique

# Les calottes polaires

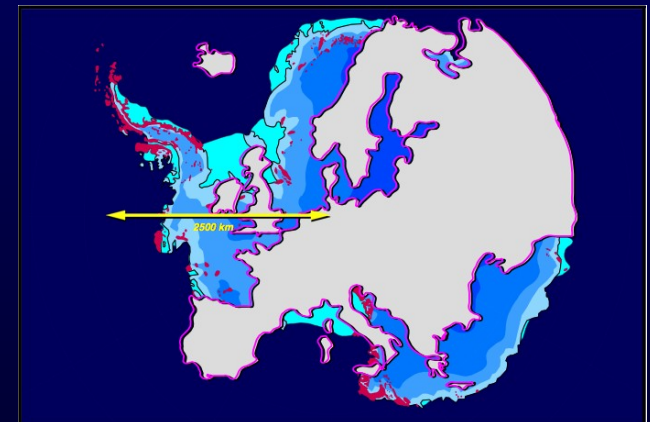
## ➤ Groënland

- ❖ Volume de glace posée équivalent à 7 m de niveau marin
- ❖ Aire de 2 millions km<sup>2</sup> (81% couvert de glace)

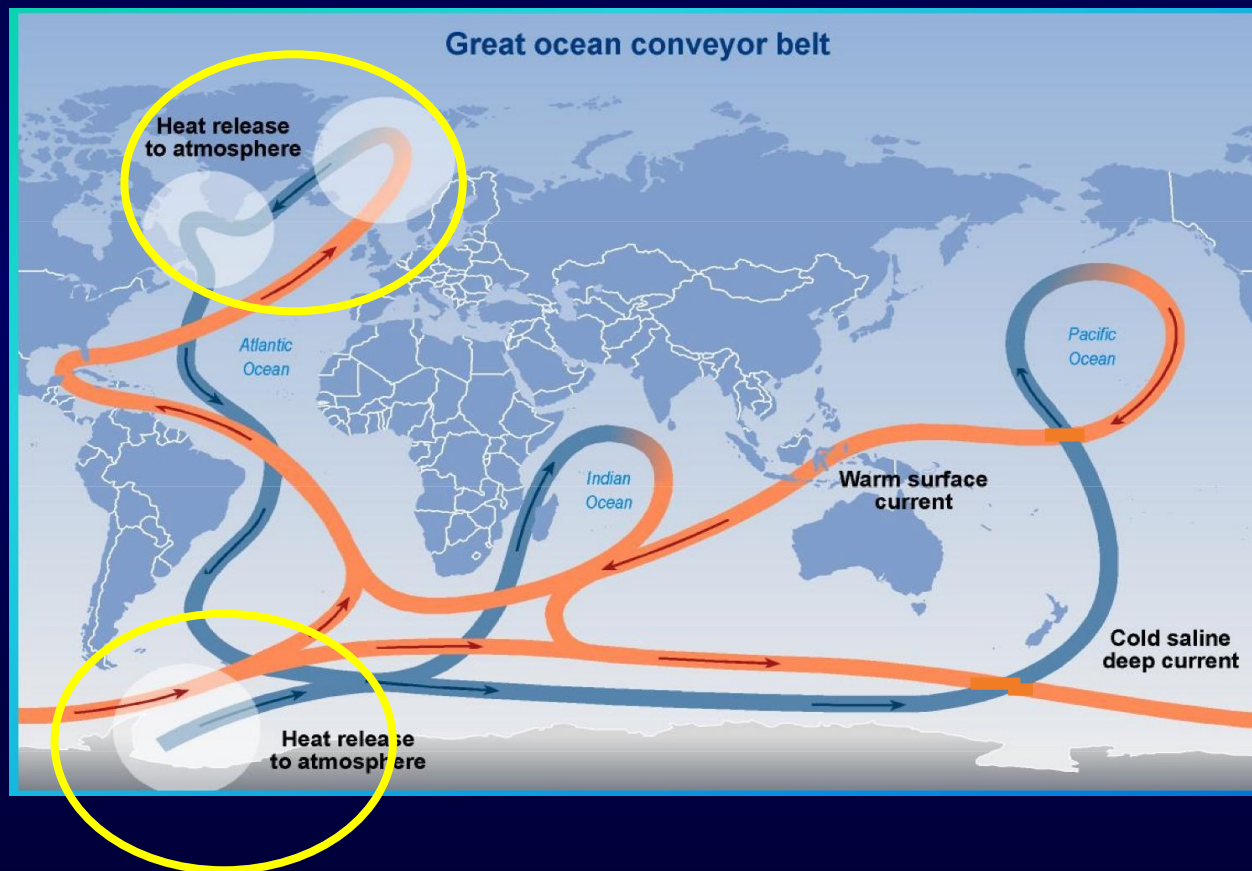


## ➤ Antarctique

- ❖ Volume de glace posée équivalent à 61 m de niveau marin
- ❖ Aire de 14 millions km<sup>2</sup> (98% couvert de glace)
- ❖ Présence de gros plateaux glaciaires



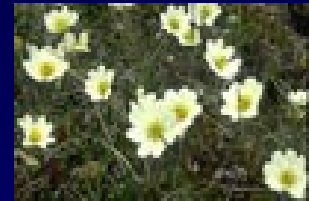
# La circulation thermohaline (THC)



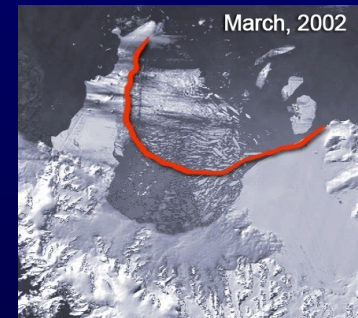
Circulation océanique liée aux gradients de température et de salinité

# THC et variabilité climatique

➤ Variations de la THC dans le passé sont associées à des variations climatiques brutales (Younger Dryas, McManus et al. 2004) et semblent liées à des fontes brutales d'icebergs en Atlantique Nord...



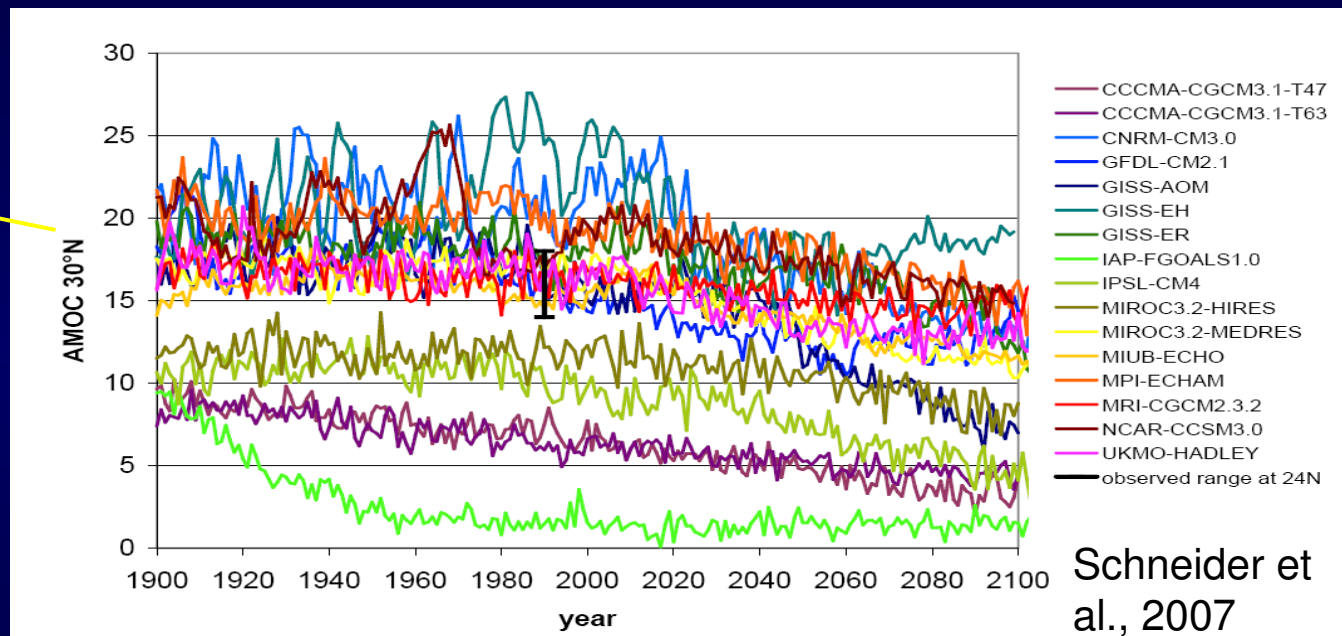
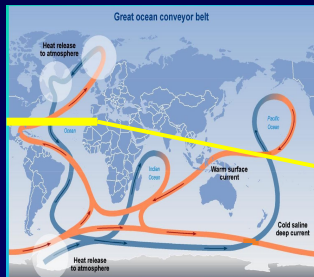
➤ Mais aussi dans l'océan Austral, où il semble exister des traces de fontes massives d'icebergs lors de la dernière déglaciation (Kanfoush et al. 2000) ...



➤ Qui pourrait avoir permis la résurgence de la THC durant le Bølling-Allerød (Weaver et al. 2003)



# Futur de la THC : rôle joué par la fonte des deux calottes ?



- Fonte des calottes négligée dans la plupart des modèles
- La fonte de la calotte groenlandaise peut-elle accélérer significativement la diminution de la THC ?
- La fonte de la calotte antarctique peut-elle la stabiliser ?

# Problématique

- La fonte de la calotte groënlandaise peut-elle entraîner un arrêt la THC dans le futur ?
- La fonte de la calotte antarctique aura-t-elle son « mot à dire » ?
- Comment fonctionne la bascule océanique bipolaire ?
- Quelles rétroactions des calottes pour le climat et la montée du niveau marin ?

# Plan

- Effet de la fonte de la calotte groënlandaise sur la THC
- Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
- La bascule océanique bipolaire
- Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin

# Plan

- Effet de la fonte de la calotte groënlandaise sur la THC
- Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
- La bascule océanique bipolaire
- Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin



# Outil No1 : le modèle couplé IPSL-CM4



**OASIS**

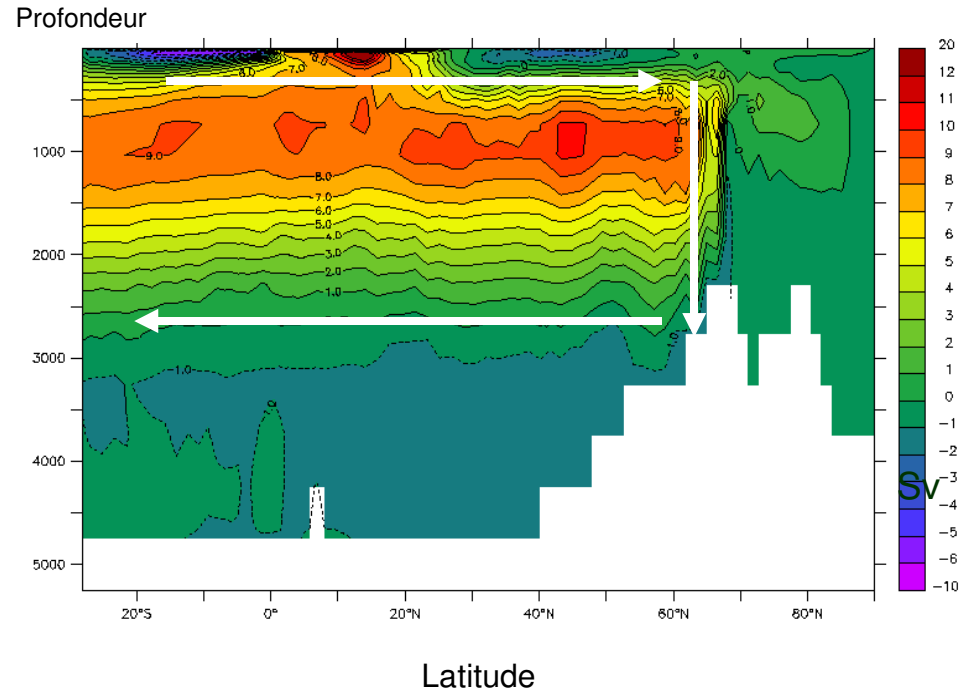
Module  
thermodyn.  
de glaciers



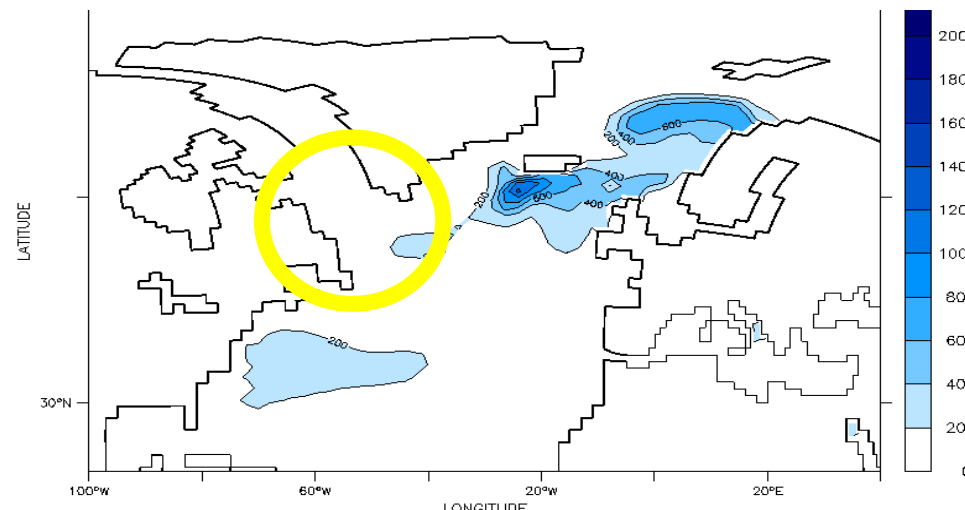
# Représentation de la THC dans IPSL-CM4

- 2 cellules avec NADW et AABW
- Maximum pour la cellule NADW d'environ 11 Sv (Indice THC)
- Plus faible que les estimations issues d'observations (14-18 Sv)
- Car pas de convection en mer du Labrador

Fonction de courant latitude-profondeur en Atlantique



Profondeur couche mélange: IPSL-CM4

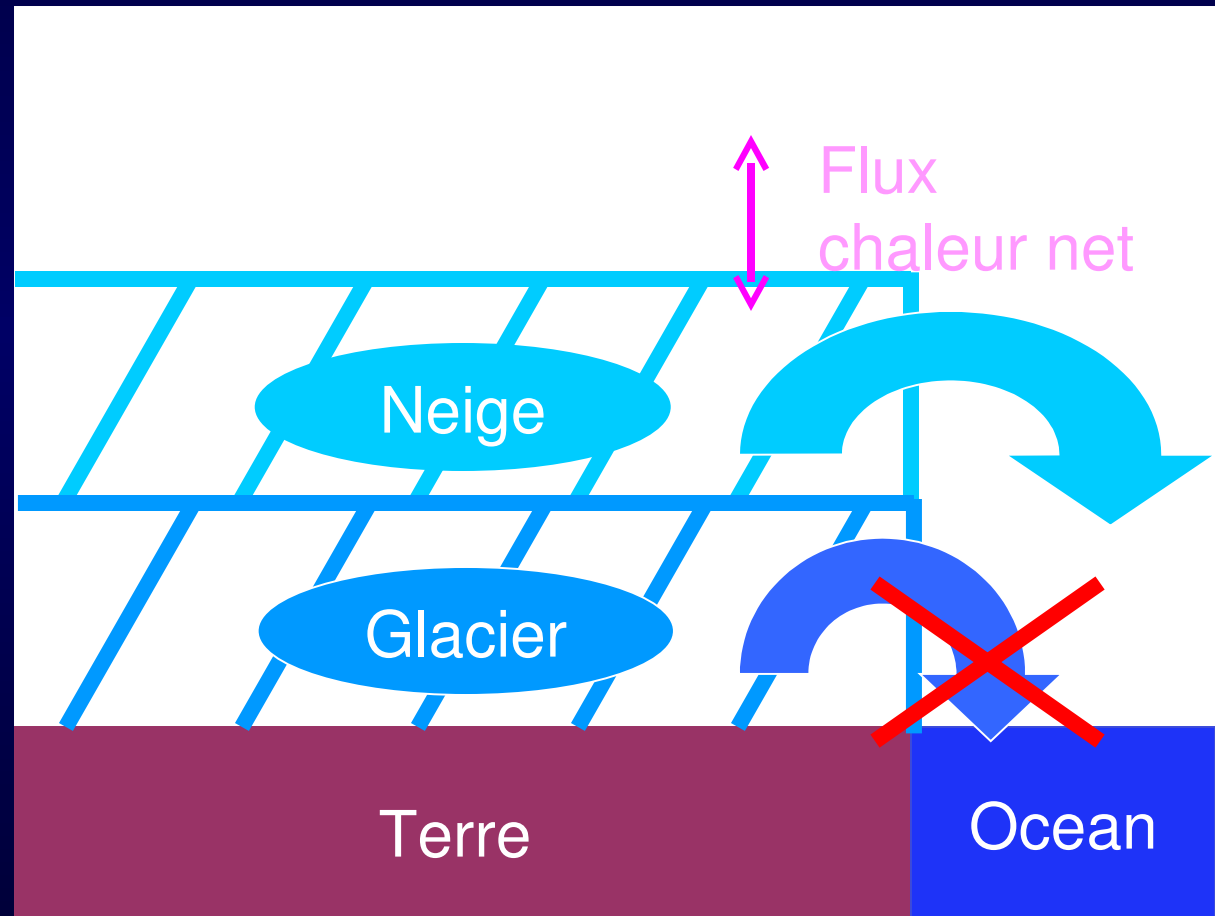


# Protocole expérimental 1

Deux versions du  
modèle IPSL-CM4 :

1) Avec fonte des  
glaciers

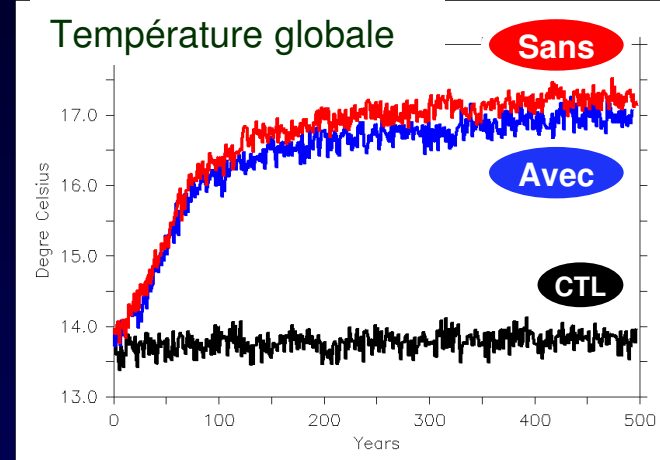
2) Sans fonte des  
glaciers



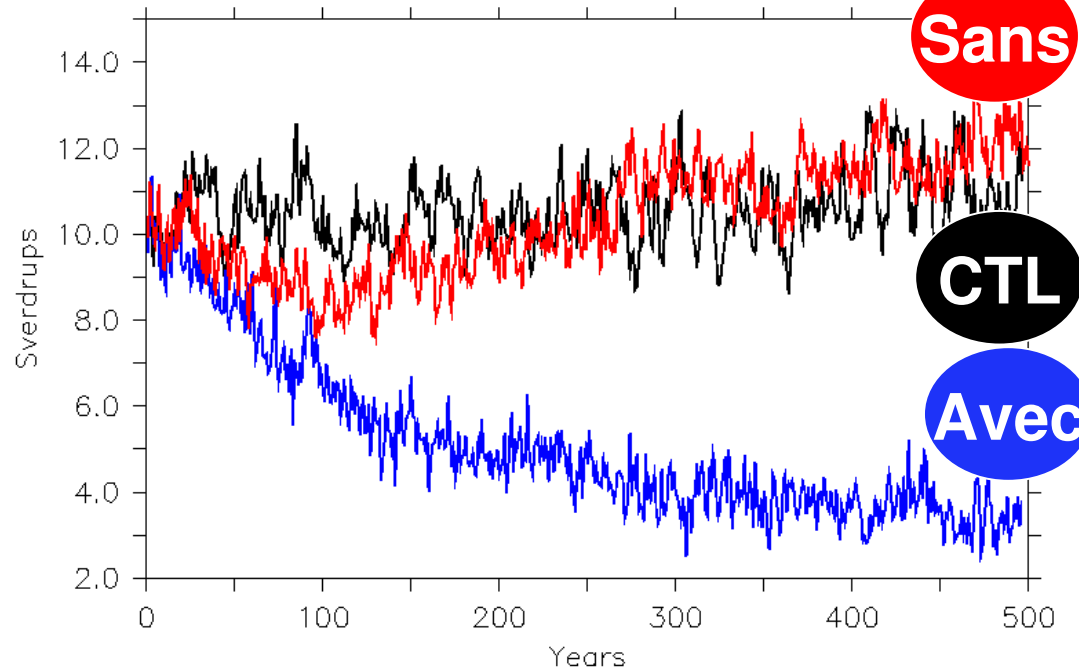
# Réponse de la THC sur 500 ans à 2xCO2

➤ Fonte de la calotte groënlandaise = **0.13 Sv** après 200 ans, **plus de la moitié de la calotte groënlandaise** fondue en 500 ans

➤ Fonte calotte antarctique < 0.02 Sv = négligeable



## Indice THC



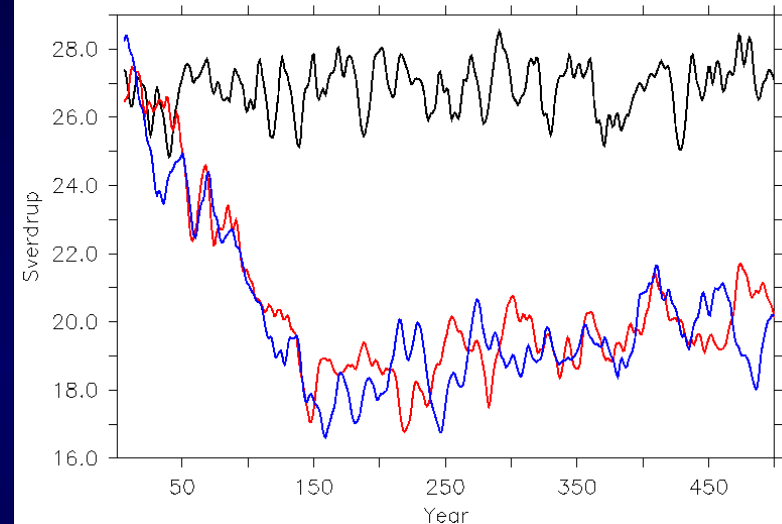
# Un résultat dépendant du modèle

➤ En utilisant le modèle **LOVECLIM**, Driesschaert et al. (2007) trouve un effet modéré de la fonte des calottes sur 500 ans (en 4XCO<sub>2</sub>)

➤ Causes ?

1. Quantité de fonte différente ?
3. Dynamique THC différente ?
5. Localisation de la fonte différente ?
7. Fonte de l'Antarctique ?

Indice THC (Driesschaert et al. 2007)



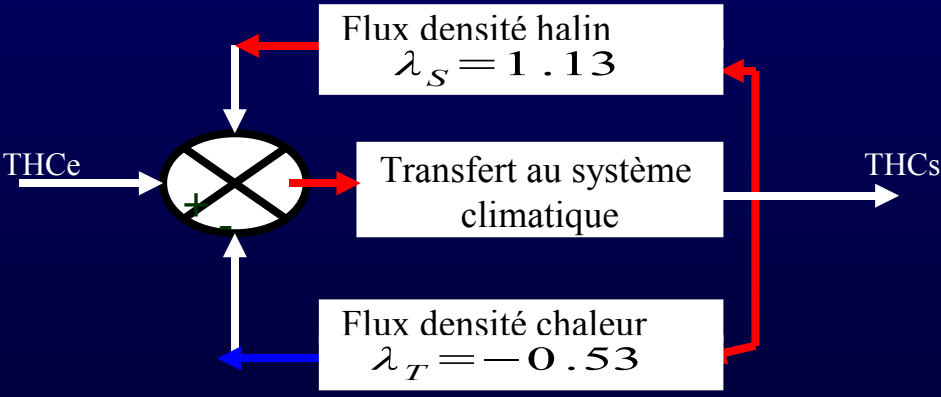
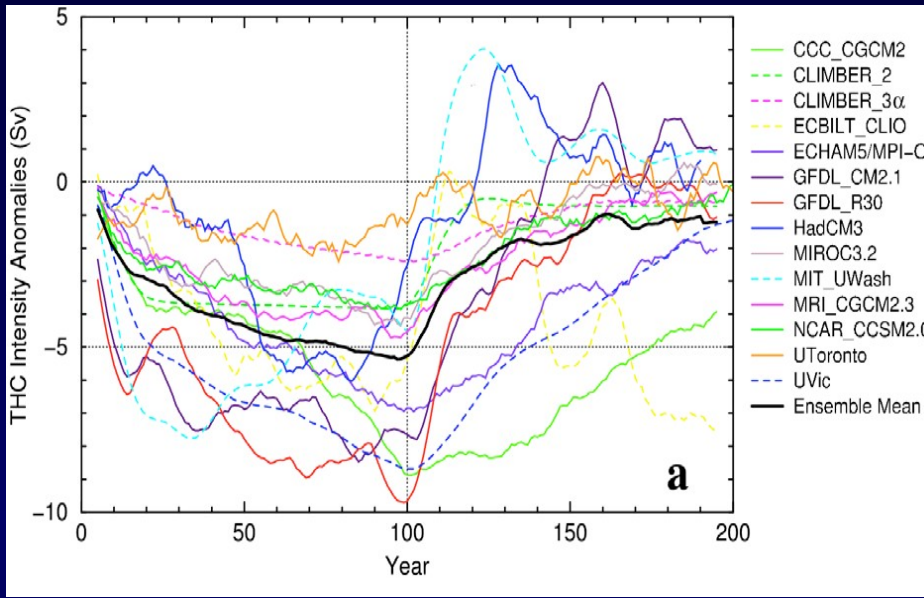
1

Après 500 ans, la fonte de la calotte groënlandaise est de **8%** dans LOVECLIM, **50%** dans IPSL-CM4

# 2

## Dynamique de la THC

- Dynamique de la THC différente pour une même quantité d'eau douce (Stouffer et al. 2006)
- Méthode de quantification des rétroactions serait utile (Swingedouw et al. 2007)
- Une analyse multi-modèle en « scénario+hosing » est prévue dans le projet Thor (FP7)



Swingedouw D et al. Quantifying the AMOC feedbacks during a 2xCO2 stabilization experiment with land-ice melting, *Climate Dynamics* 29: 521-534, 2007

Gain dynamique :  $G = \left( \frac{1}{1 - (\lambda_S + \lambda_T)} \right) = 2.5$

# Protocole expérimental différent

3

Localisation de la fonte :

- ❖ Mise homogènement sur l'Atlantique Nord (Swingedouw et al. 2007)
- ❖ Mise le long de la calotte groenlandaise (Driesschaert et al. 2007)
- ⇒ important à cause de la résolution océanique (Spence et al. 2007)

➤ Chez Driesschaert et al., les deux calottes sont incluses et la calotte antarctique fond massivement dans ces scénarios

➤ Est-ce que l'effet stabilisateur de l'Antarctique joue ?

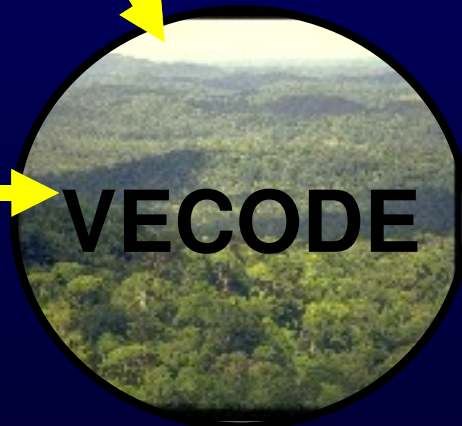
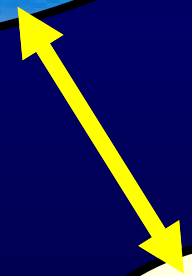
4

# Plan

1. Effet de la fonte de la calotte groenlandaise sur la THC
3. Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
5. La bascule océanique bipolaire
7. Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin



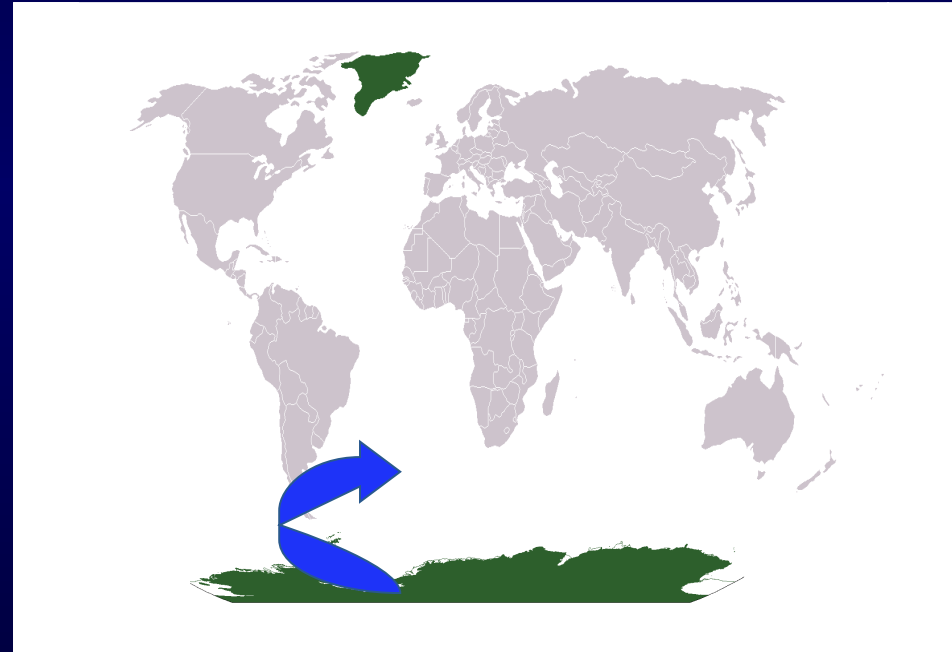
# Outil No2 : LOVECLIM



# Protocole expérimental 2

On analyse plusieurs scénarios à 4XCO<sub>2</sub>

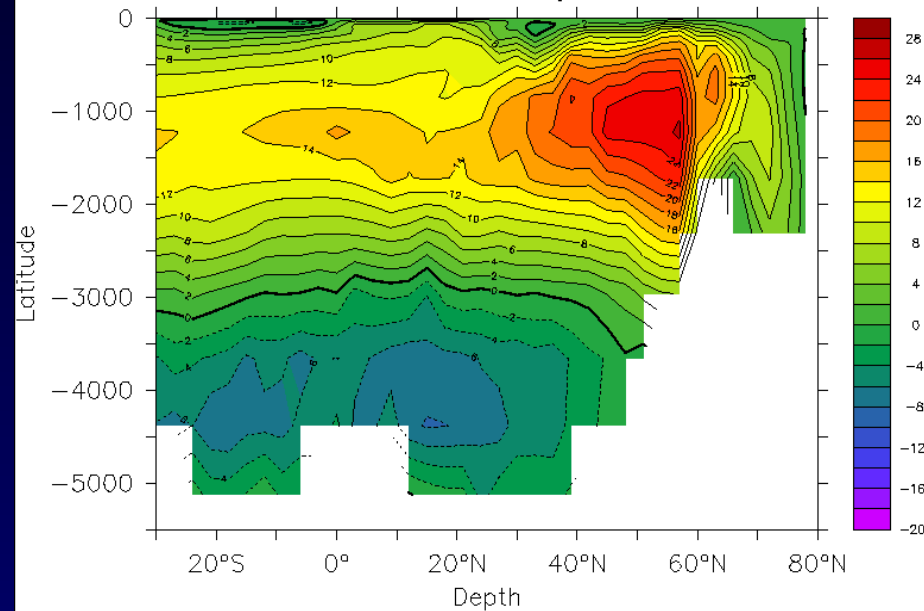
- **Sans** fonte des deux calottes
- **Avec** fonte des deux calottes
- Avec fonte de la calotte **groenlandaise** seulement
- Avec fonte de la calotte **antarctique** seulement



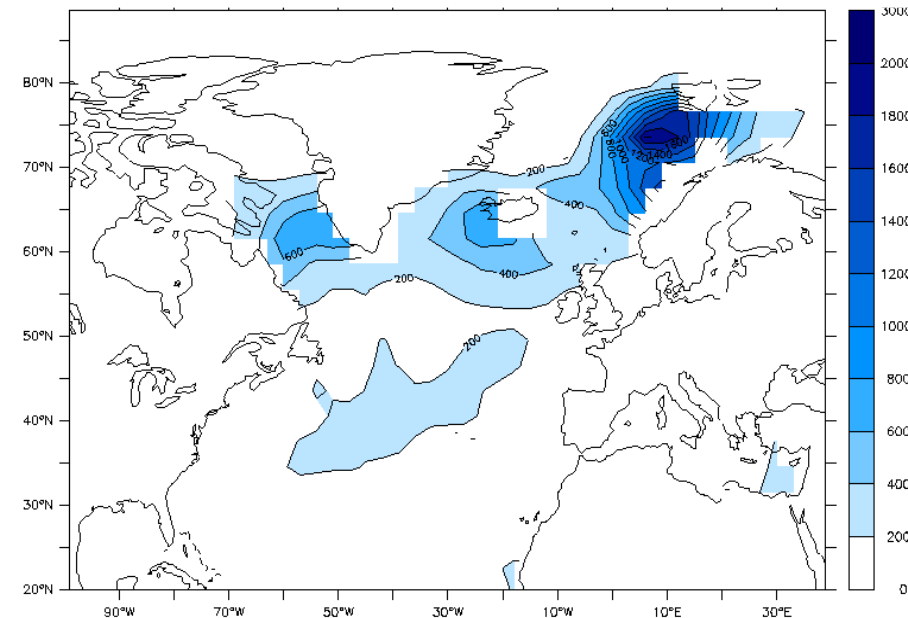
# Climatologie de LOVECLIM

- Cellules similaires à IPSL-CM4, mais plus intenses
- Convection en mer du Labrador
- Climatologie de la THC plus en accord avec les observations

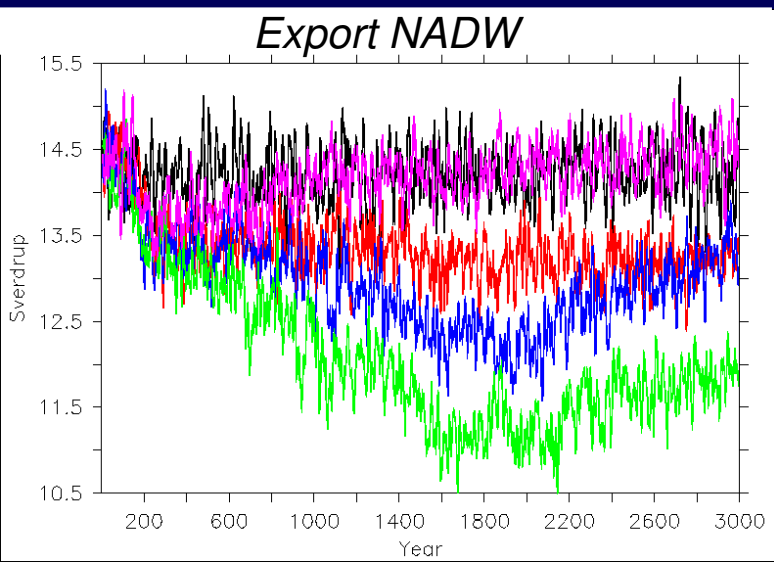
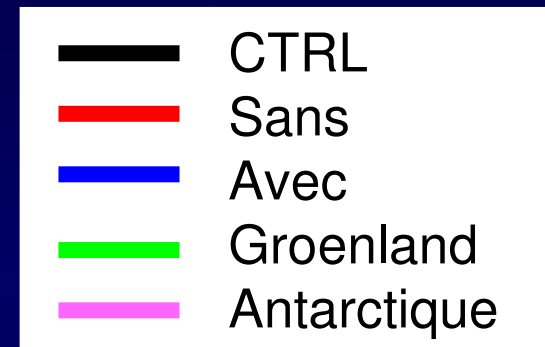
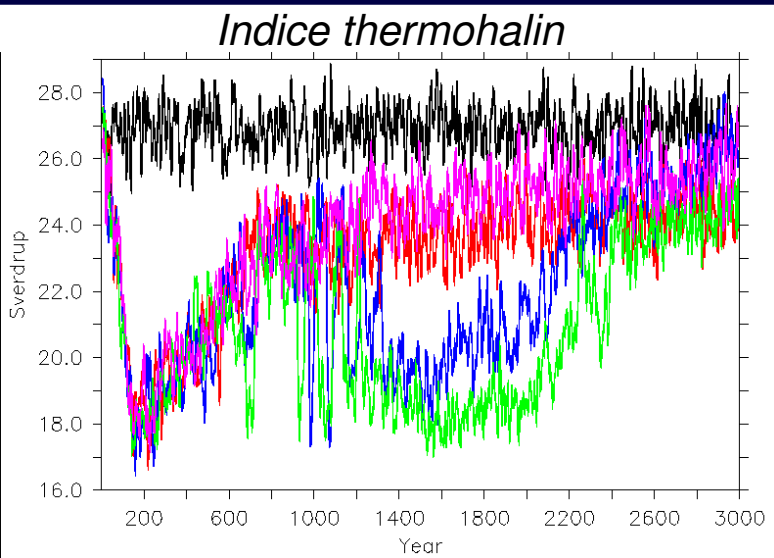
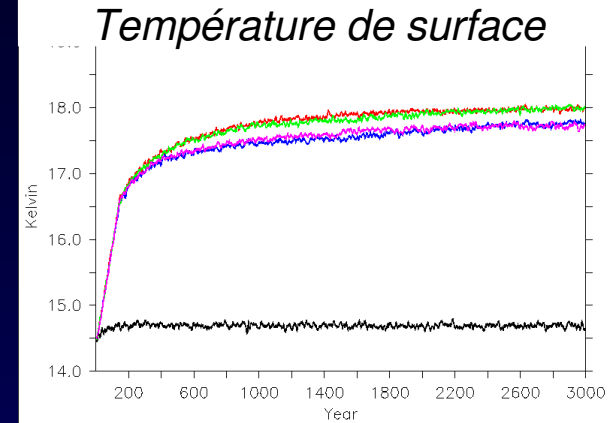
Fonction de courant Latitude-Profondeur en Atlantique



Profondeur de la couche de mélange



# Réponse de la THC



Sans la fonte de la calotte antarctique la diminution de la THC est plus marquée, surtout au sud

# Résumé 1

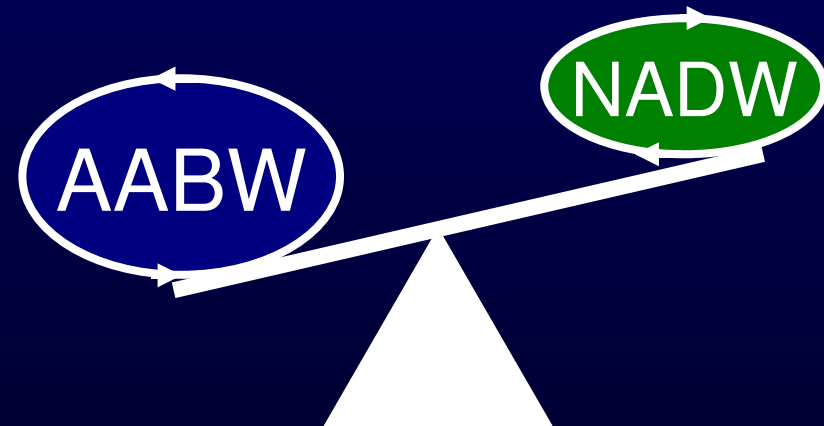
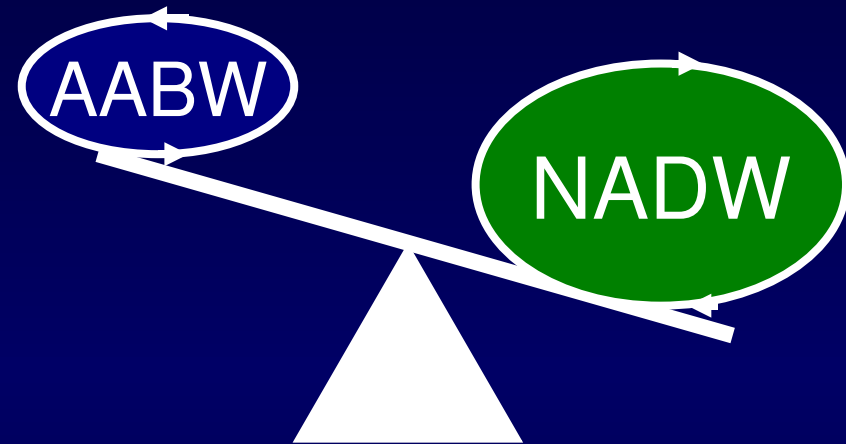
- Effet de la fonte de la calotte groenlandaise sur la THC est incertain :
  - ❖ Arrêt total dans IPSL-CM4, forte diminution chez Fichefet et al. (2003)
  - ❖ D'autres modèles n'ont pas la même réponse, ceci pour diverses raisons (au moins 4)
- Comparaison multi-modèles prévue pour éviter 3 d'entre elles
  - ⇒ ne restera plus que la différence de dynamique entre les modèles, où la méthodologie de quantification des rétroactions (Swingedouw et al. 2007) pourra être très utile
- Besoin de clarification du rôle de l'océan austral sur la THC

# Plan

- Effet de la fonte de la calotte groënlandaise sur la THC
- Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
- La bascule océanique bipolaire
- Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin

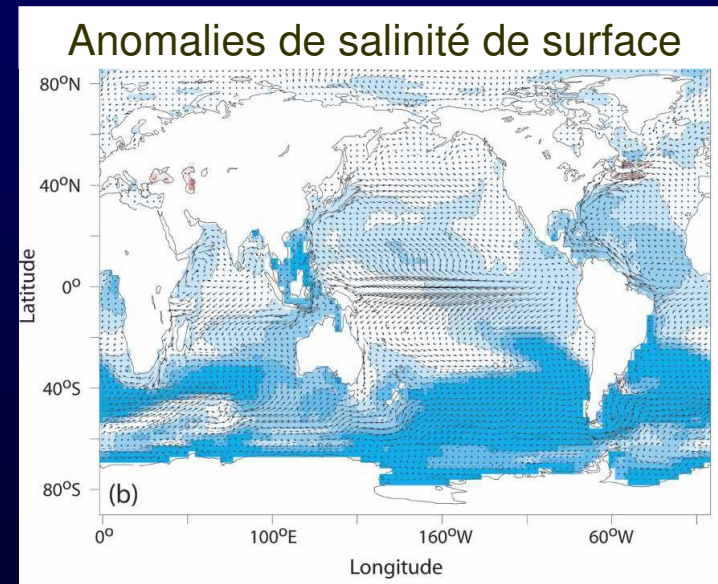
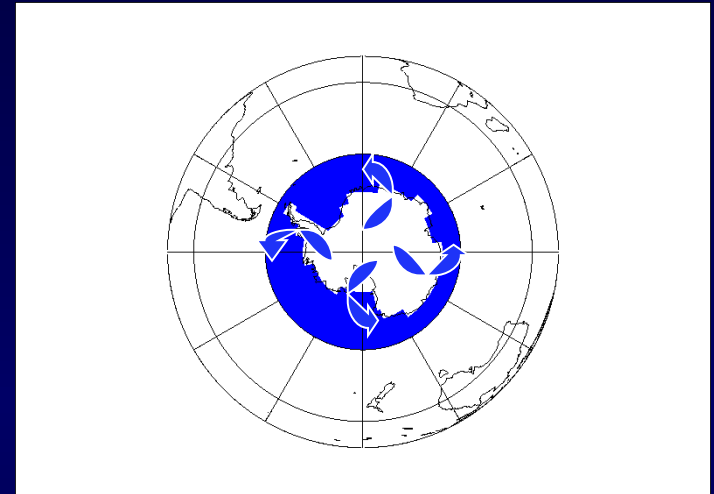
# La bascule océanique bipolaire

- Imaginée par Stocker et al. (1992)
- Confirmée dans les observations par Broecker (1998)
- Seidov et al. (2001) confirme et popularise le concept de balance océanique entre NADW et AABW avec des modèles d'océan forcés
- Stouffer et al. (2007) trouve qu'un ajout d'eau douce au sud, dans un modèle couplé, peut diminuer la production de NADW !  
Problème...



# Protocole expérimental 3

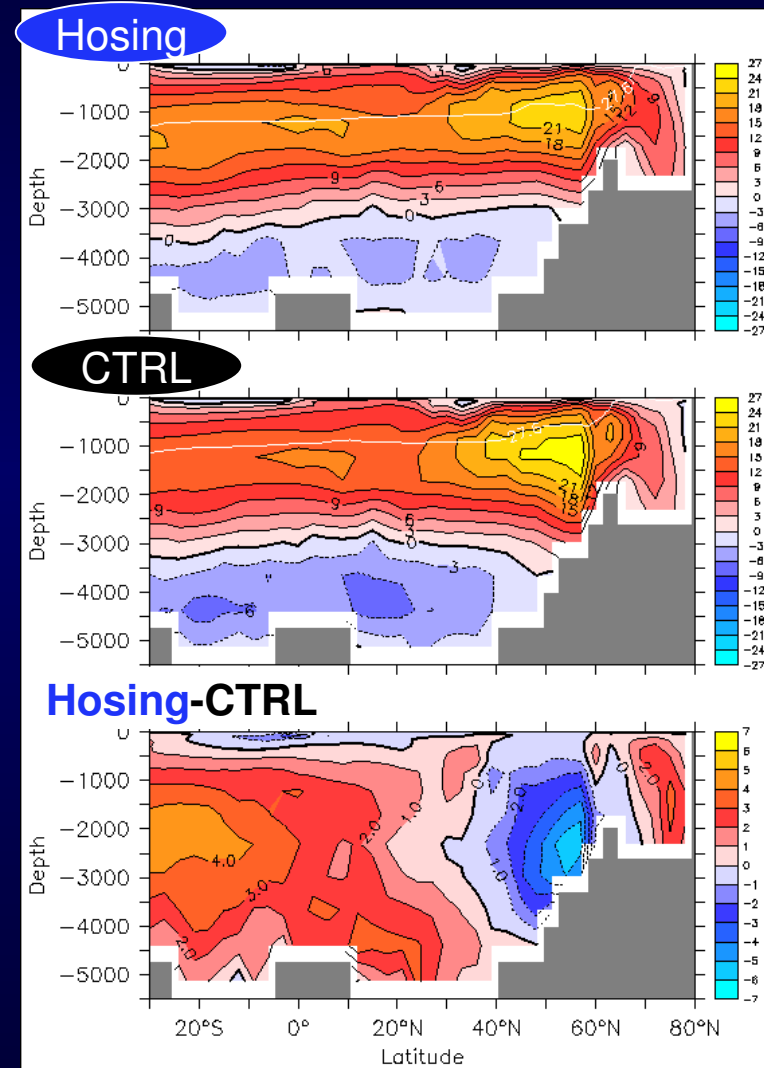
- On ajoute 1 Sv d'eau douce dans l'océan austral au sud de  $60^{\circ}\text{S}$  pendant 100 ans comme dans Stouffer et al. (2007)
- Cela représente une quantité d'eau douce équivalente à la calotte groënlandais
- Diminution de la cellule AABW
- On analyse ici le rôle du « **vitesse de libération** » de l'eau douce, pour un **quantité donnée** d'eau douce





# Deux processus opposés

- Mettre de l'eau douce au sud, augmente la cellule NADW au sud de 30°N et la ralentit au nord
- L'ajout d'eau douce excite deux processus distincts :
  1. **Processus de balance océanique** : lorsque la cellule AABW diminue, la cellule NADW augmente
  3. **Processus de désalinisation** : l'ajout d'eau douce est advecté jusqu'aux sites de convection ou elle limite la formation de NADW



# Quantification de l'effet des deux processus opposés sur la NADW

La technique du binning en densité donne **l'équilibre formation-consommation** des masses d'eaux

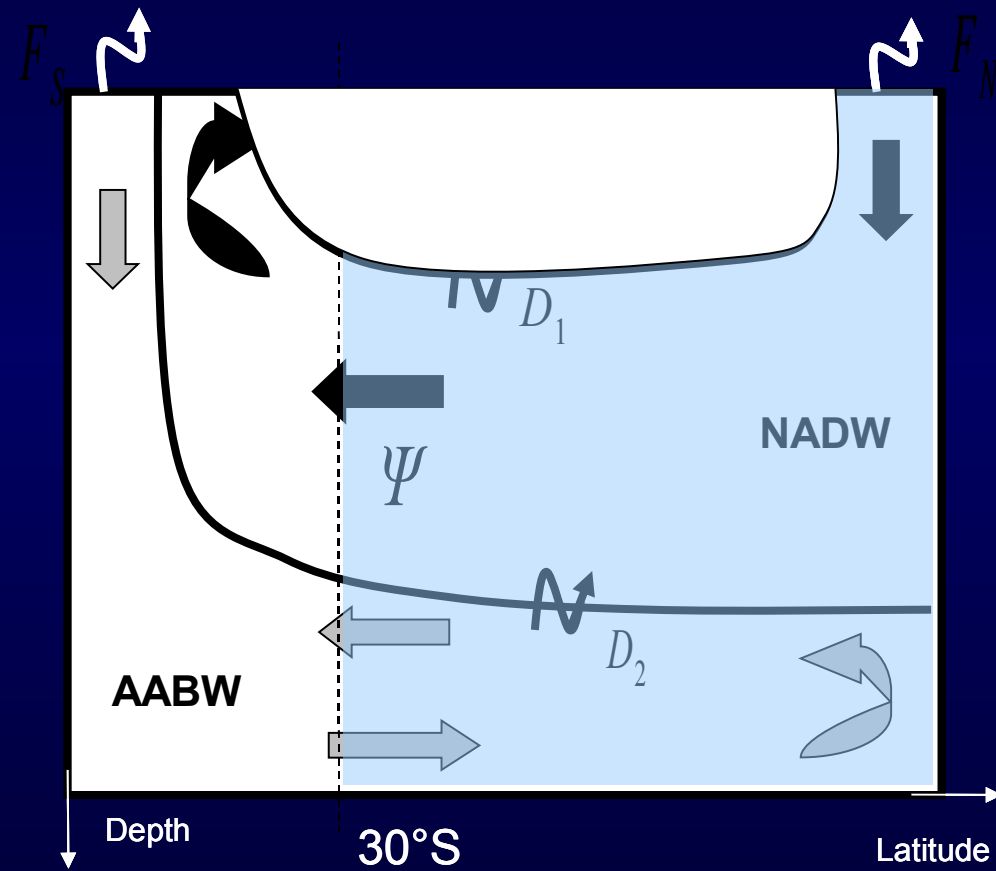
$$\frac{\partial V_b}{\partial t} = F - D -$$

Et réconcilie dynamique et thermodynamique de l'océan

Pycnocline :

$$\delta h_S = \iint_{Sud} (H(x, y) + \eta(x, y) - h(x, y)) dx dy$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta \psi = -\partial_t (\delta h_S) - \delta F_b \\ \delta \psi = \partial_t (\delta h_N)_{N_{IN}} \end{array} \right.$$



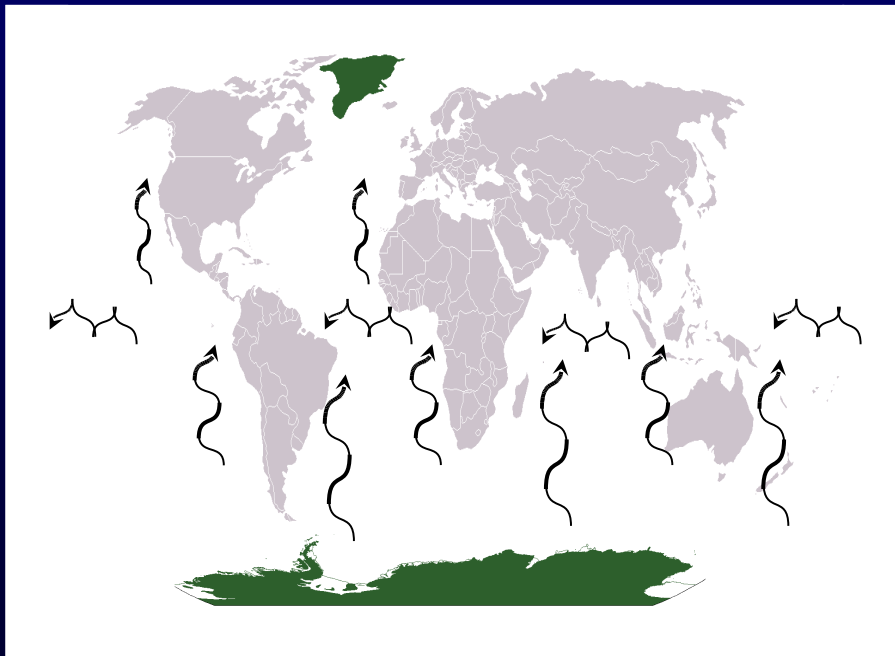
# Evaluation quantitative du nouvel équilibre

|              |              |   |      |     |
|--------------|--------------|---|------|-----|
|              |              | $\delta\psi_{010} = -\frac{\partial}{\partial \psi} \delta h_s - \delta F_{\psi}$ |      |     |
| Années 1-100 | 3.7 +<br>8.7 | -11.4   | 22.3 | 1.5 |
|              |              | $\delta\psi_{111} = -\frac{\partial}{\partial \psi} \delta h_s$                   |      |     |
| Années 1-100 | 3.7          | 4.0   | -1.3 | 1.0 |

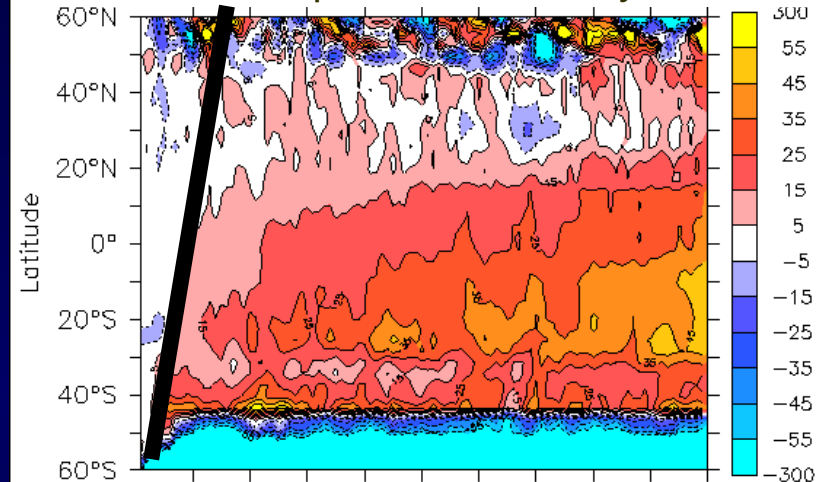
# Propagation des anomalies

La diminution de la formation d'AABW excite des ondes au niveau de la pycnocline qui ajustent l'océan en quelques décennies et augmentent l'export de NADW

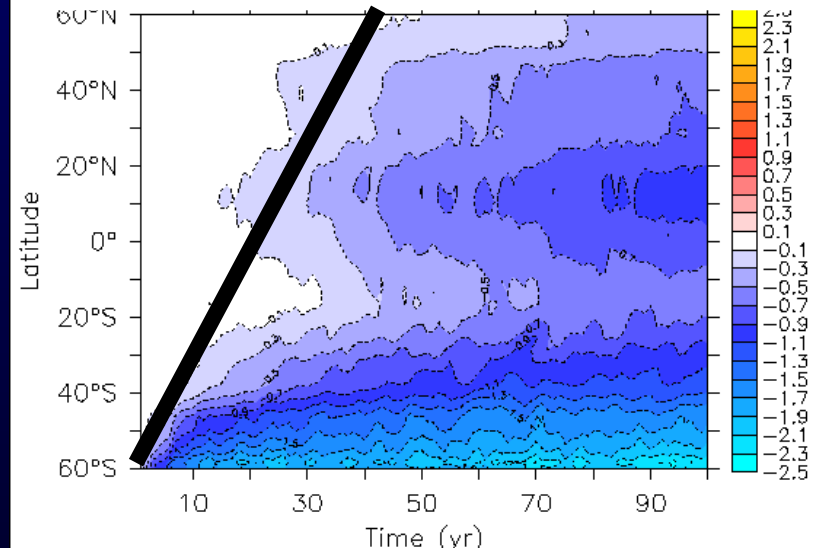
Kawase 1987 ; Johnson and Marshall 2002



Anomalies de profondeur de Pycnocline



Anomalies de salinité de surface

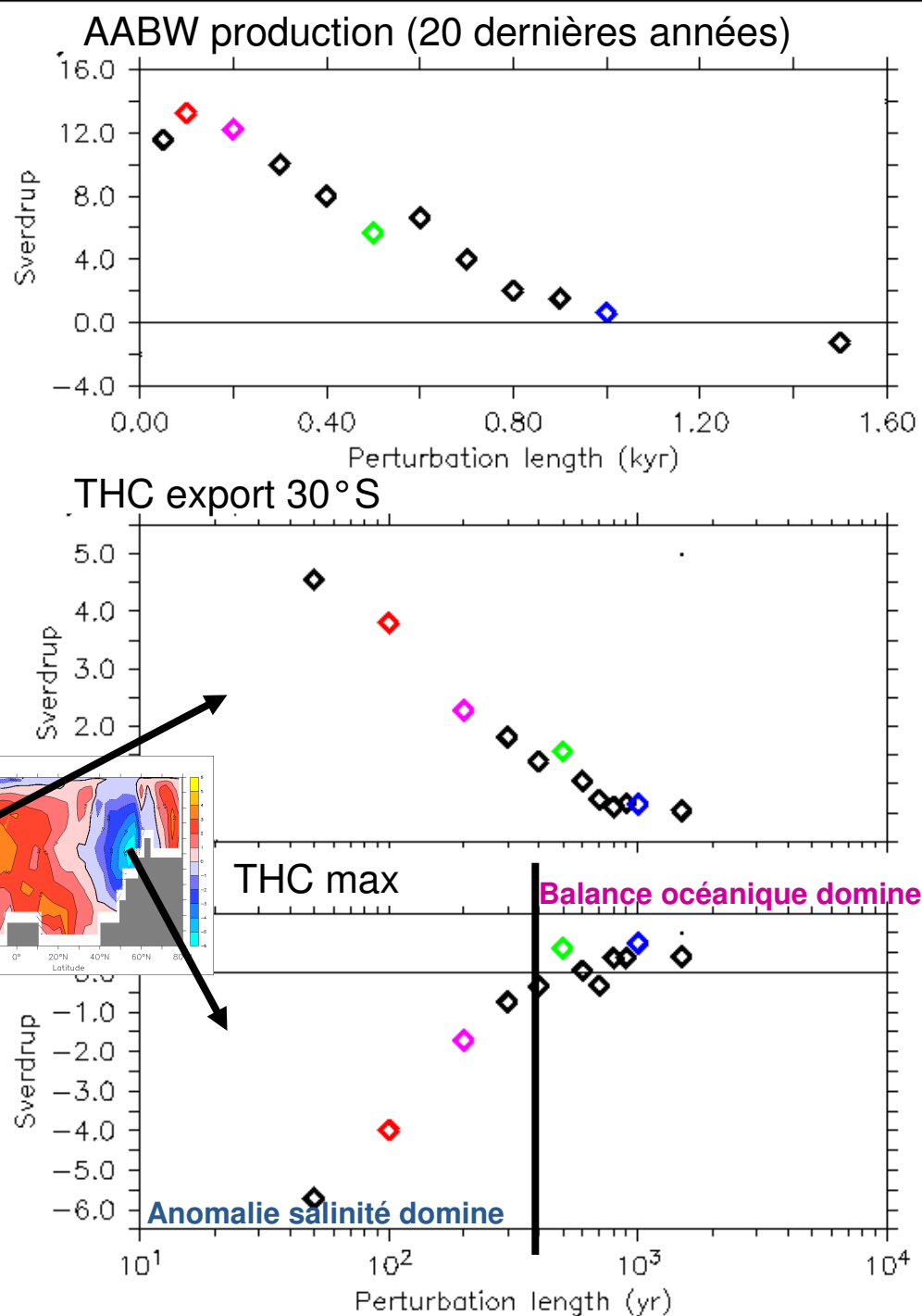


# Rôle de la vitesse de fonte

Selon la vitesse à laquelle l'eau douce est ajoutée, les deux processus ont plus ou moins d'influence sur la THC

Vitesse  $> 0.2$  Sv environ processus 2 domine sur 1 = l'ensemble de la cellule NADW et accéléré

Dans les scénarios de réchauffement analysés précédemment, on se trouvait plutôt de ce côté du diagramme de phase...



# Résumé 2

- L'ajout d'eau douce dans l'océan austral déclenche deux processus dont les effets s'opposent pour l'intensité de la cellule NADW :
  - ❖ La bascule océanique tend à augmenter l'export de NADW
  - ❖ L'advection d'eau douce diminue sa production
- Ces deux processus sont très rapides :
  - ❖ Quelques années pour la bascule, lié à un ajustement rapide de la pycnocline océanique par ondes de Kelvin
  - ❖ Quelques décennies pour l'advection des anomalies de salinité en surface et subsurface

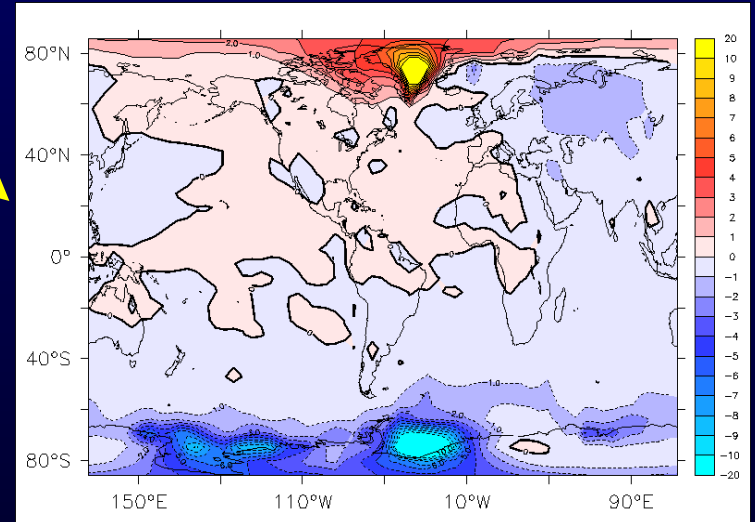
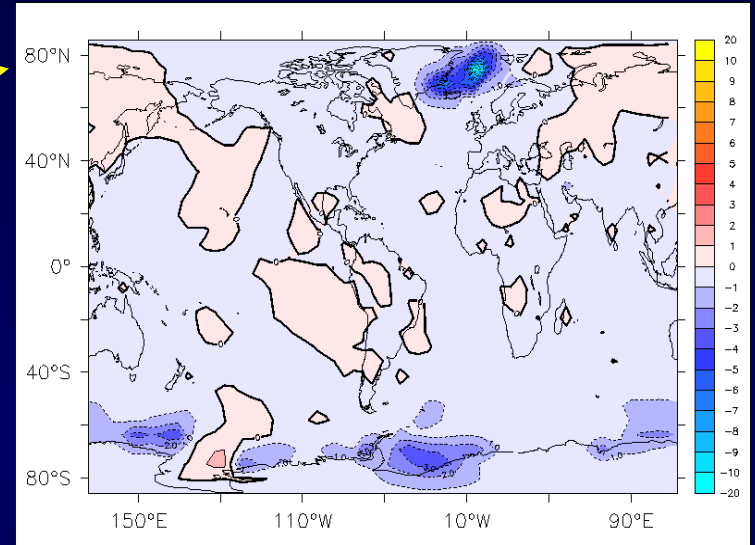
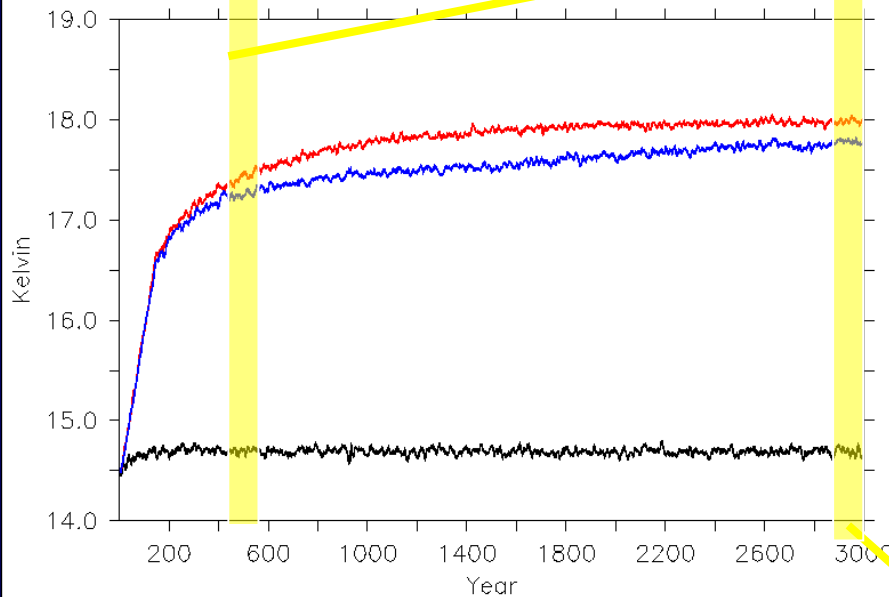
# Plan

- Effet de la fonte de la calotte groënlandaise sur la THC
- Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
- La bascule océanique bipolaire
- Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin

# Interaction climat-calottes

CTRL  
Sans  
Avec

## Température globale



Pourquoi de telles réponses climatiques ?



# Rétroaction climat-calottes

Fonte  
Calotte

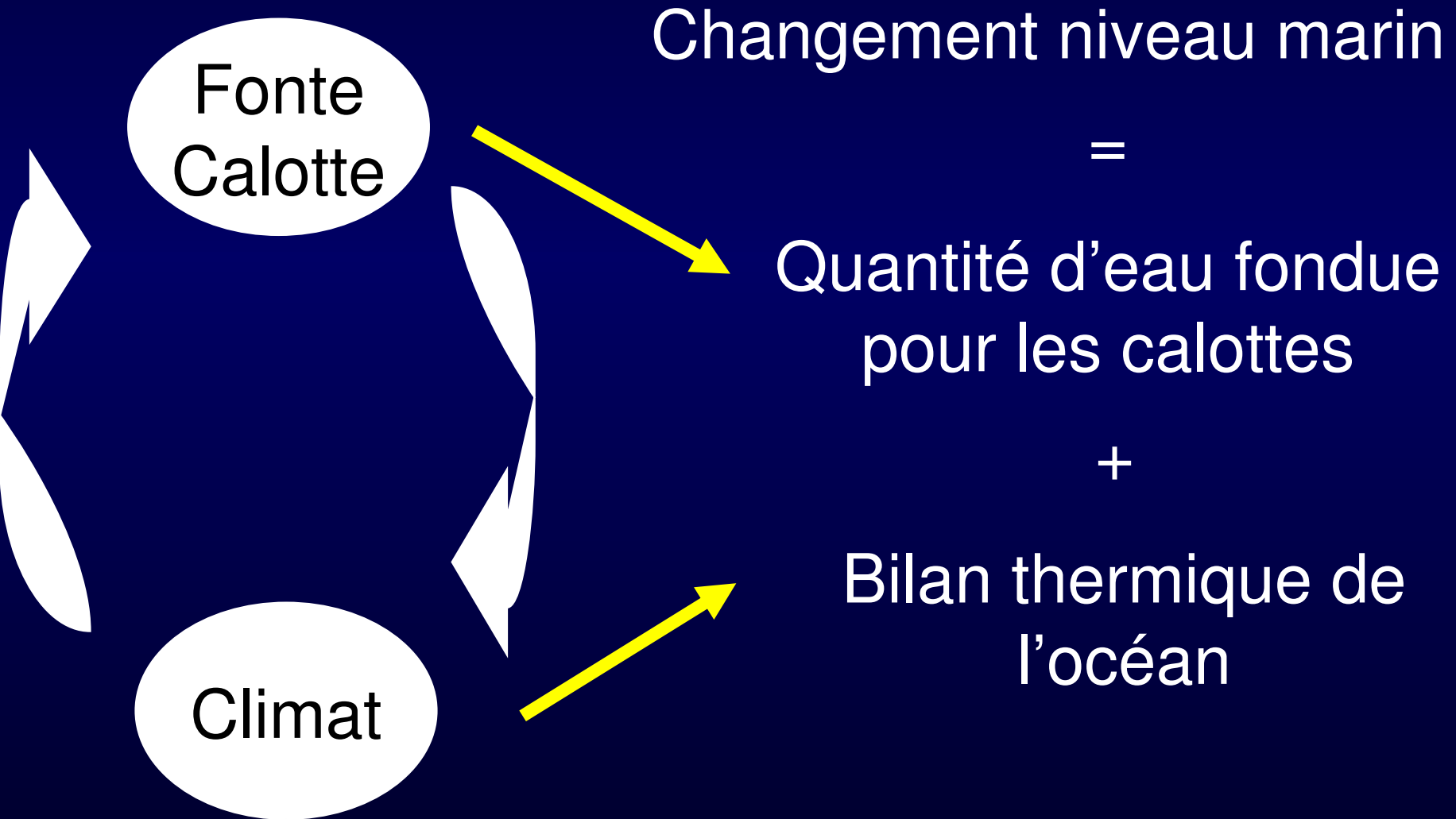
Signe ?

Climat

- Température
- Précipitation

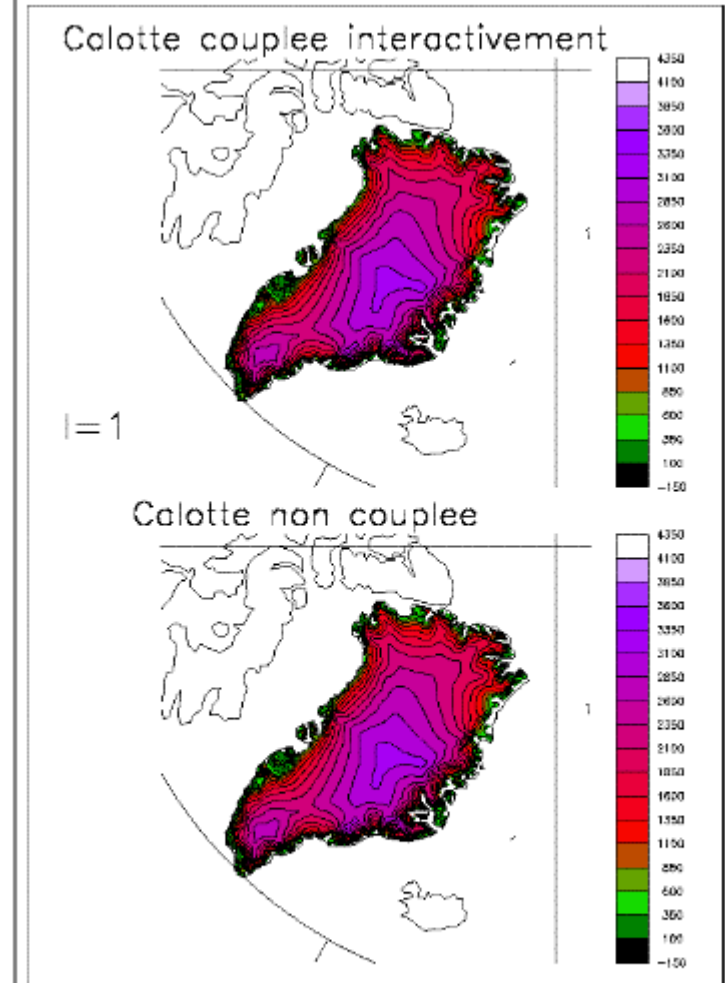
- Elevation (+)
- Albedo (+)
- Eau douce dans l'océan (-)

# Rétroaction climat-calottes: implication pour la montée du niveau marin



# Calotte groenlandaise

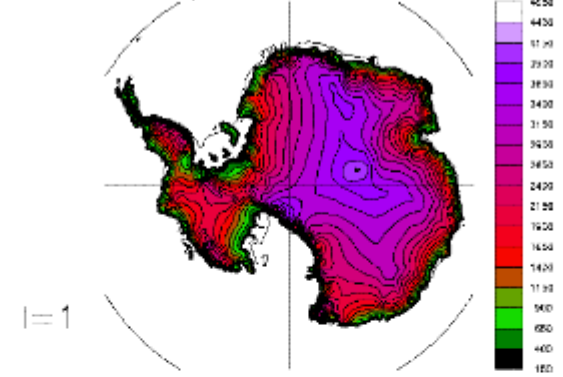
- « on line » : la calotte groenlandaise fond d'un équivalent de **7.9 m en 3000 ans**
- « off line » : la calotte groenlandaise fond d'un équivalent de **3.4 m en 3000 ans**
- Feedback positif fort : les rétroactions liées à l'élévation et l'albédo dominant celles liées à l'eau douce
- Contribution expansion thermique : **1.5 m** «on line», **1.2 m** «off line» = rétroaction positive indirecte faible
- Rétroaction **positive** globale de **4.6 m**



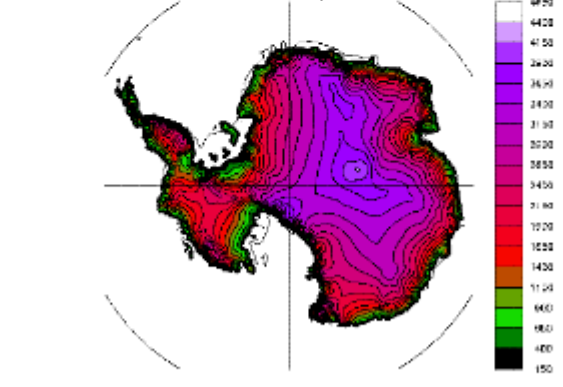
# Calotte antarctique

- « on line » : la calotte antarctique fond d'un équivalent de **3.2 m**
- « off line » : la calotte antarctique fond d'un équivalent de **10.0 m**
- Feedback négatif fort : la rétroaction liée à l'eau douce domine

Calotte couplée interactivement



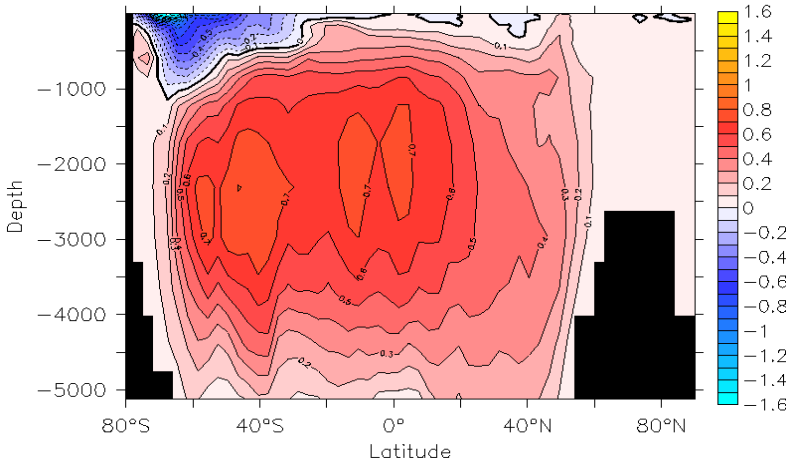
Calotte non couplée



Go to  Prev First Slower

Play Stop Next Last Faster

Température de l'océan : on line – off line



- Contribution expansion thermique : **2.3 m** « on line » ; **1.2 m** « off line »  
= rétroaction positive indirecte forte

# Résumé 3

Dans LOVECLIM :

- La fonte de la calotte groenlandaise réchauffe le climat ce qui à l'effet d'une rétroaction positive (de 4.6 m) sur 3000 ans
- La fonte de la calotte antarctique refroidit le climat ce qui a l'effet d'une rétroaction négative (de 5.5 m) sur 3000 ans
- La prise en compte « on line » des glaciers polaires diminue l'augmentation du niveau marin (14.6 m « off line ») de 0.9 m après 3000 ans à 4XCO<sub>2</sub>

# Conclusions

- Fonte de la calotte groenlandaise entraîne un **arrêt de la THC** dans les scénarios avec IPSL-CM4
- La fonte de **la calotte antarctique stabilise** la diminution de la THC dans LOVECLIM
- Le mécanisme de **bascule océanique** (et donc climatique) est plus complexe que prévu
- Les **rétroactions entre climat et calottes** sont très importantes et **modulent fortement les projections** d'augmentation du niveau marin

# Perspectives

- Comparer l'impact de la fonte des glaciers dans **différents GCMs** : mise en place d'intercomparaison de scénarios avec ajout d'eau douce en Atlantique Nord
- Coupler les calottes avec un modèle plus haute résolution (type AOGCM comme IPSL-CM4...)
  - ❖ Projections de fonte des glaciers et du niveau marin
  - ❖ Projections de changement de la THC



**Merci !**

**Mailto: [swingedouw@astr.ucl.ac.be](mailto:swingedouw@astr.ucl.ac.be)**

**Web: [http://dods.ipsl.jussieu.fr/dssce/public\\_html/index.html](http://dods.ipsl.jussieu.fr/dssce/public_html/index.html)**





