



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

**Didier Swingedouw**

Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître

Projet européen RTN NICE

# Les calottes polaires

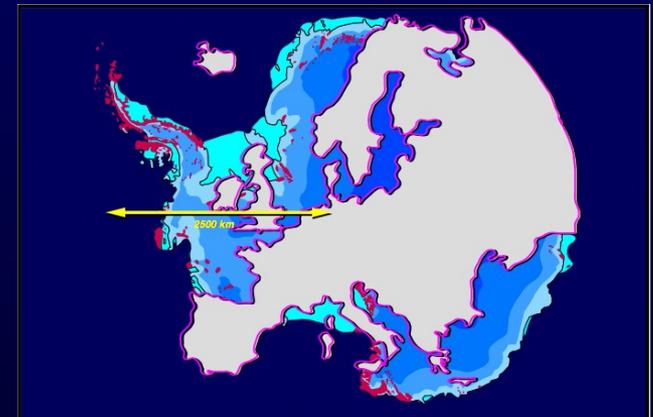
## ➤ Groënland

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

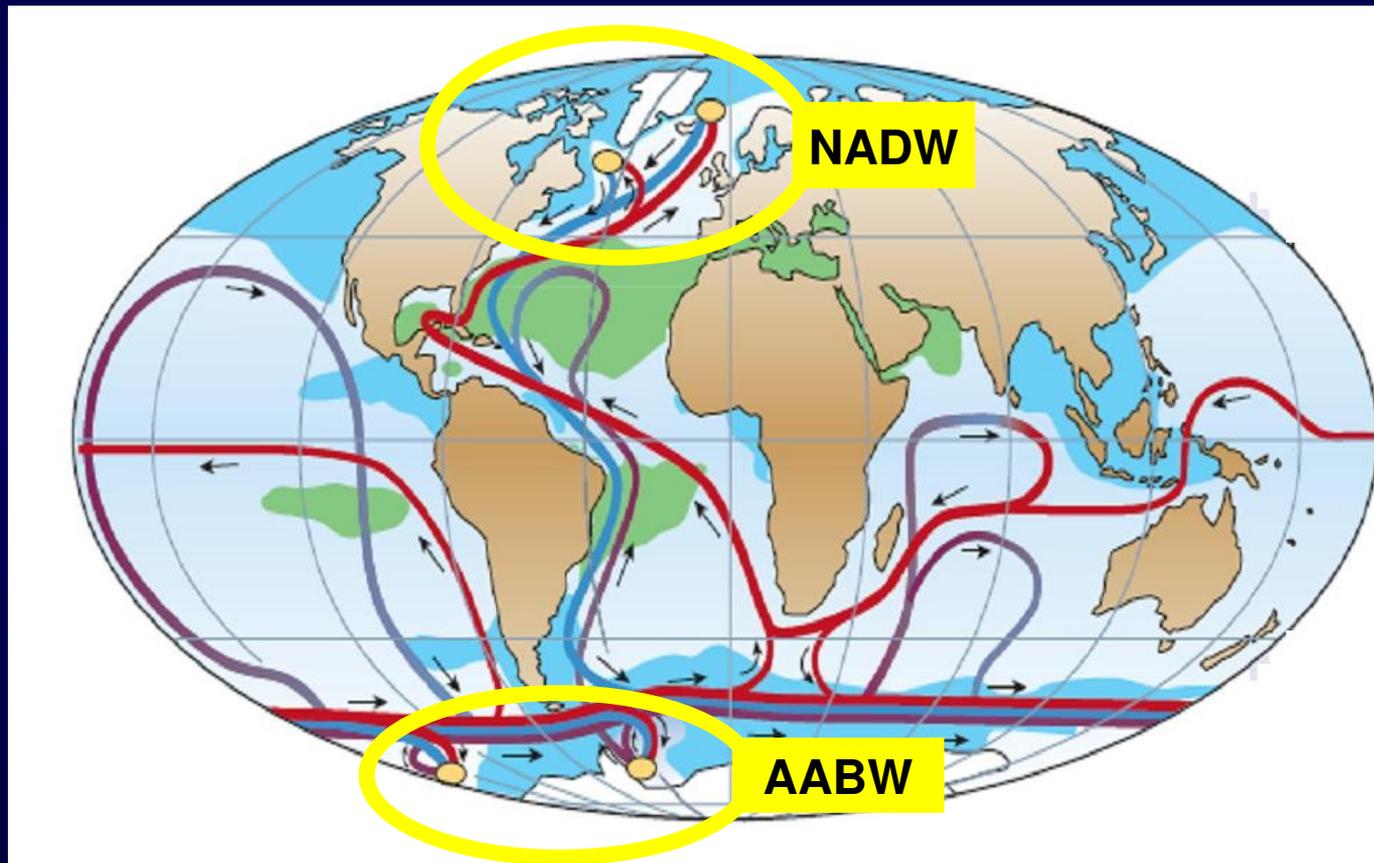


## ➤ Antarctique

- ❖ 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)



Rahsmtorf  
2002

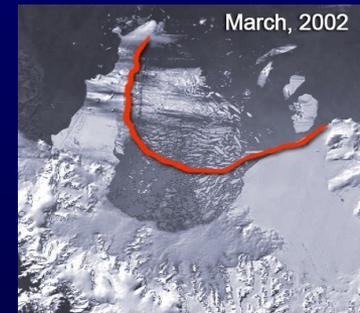
Circulation océanique liée aux gradients de température et de salinité

# THC et variabilité climatique

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



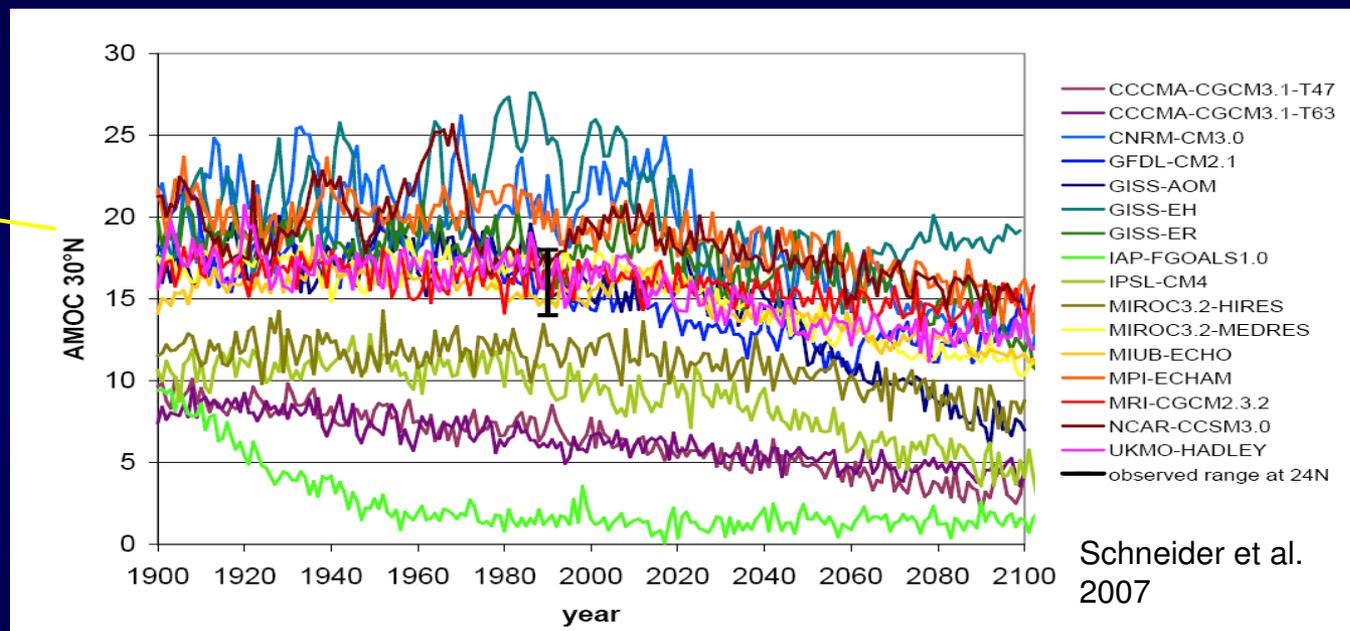
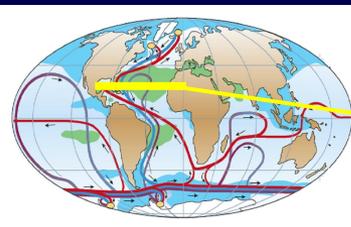
➤ Mais aussi dans l'océan Austral, où il semble exister des traces de fontes massives d'icebergs lors de la dernière déglaciation (Kanfoush et al. 2000) ...



➤ 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
- Peut-elle affecter la réponse de la THC ?
- Les deux calottes auront-elles des effets opposés sur la THC ?

# Problématique

- La fonte de la **calotte antarctique** peut-elle atténuer la diminution de la THC en Atlantique Nord ?
- Comment fonctionne la **bascule océanique bipolaire** ?
- Quelles **rétroactions des calottes** pour le climat et la montée du niveau marin ?

# Plan

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

# Plan

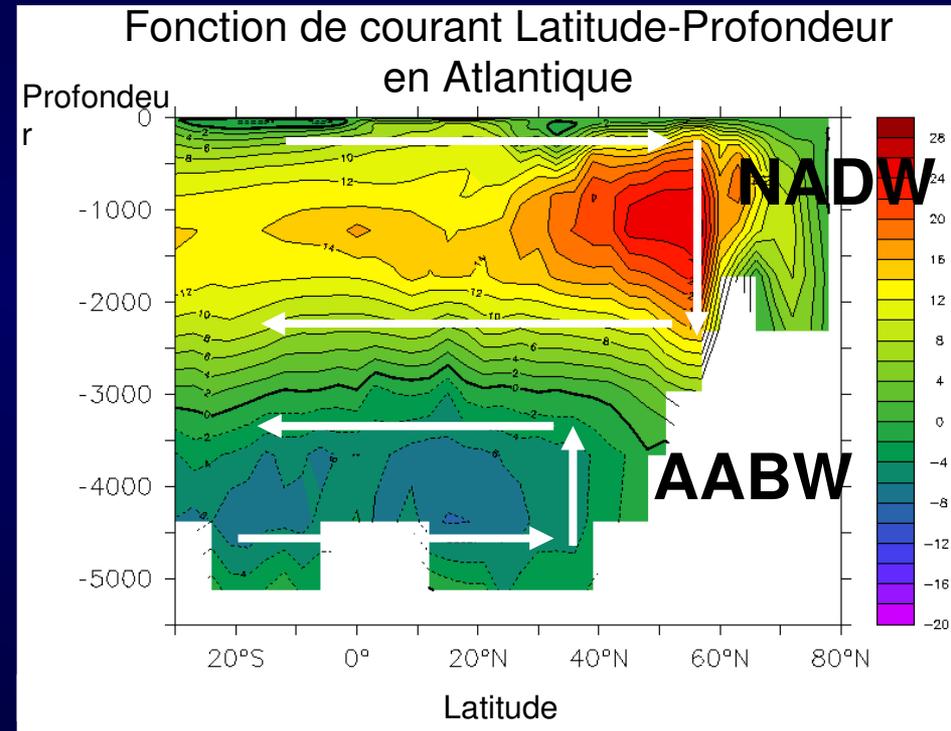
1. Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
3. La bascule océanique bipolaire
5. Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin

# Outil : LOVECLIM, un modèle de climat de complexité intermédiaire



# La THC dans LOVECLIM

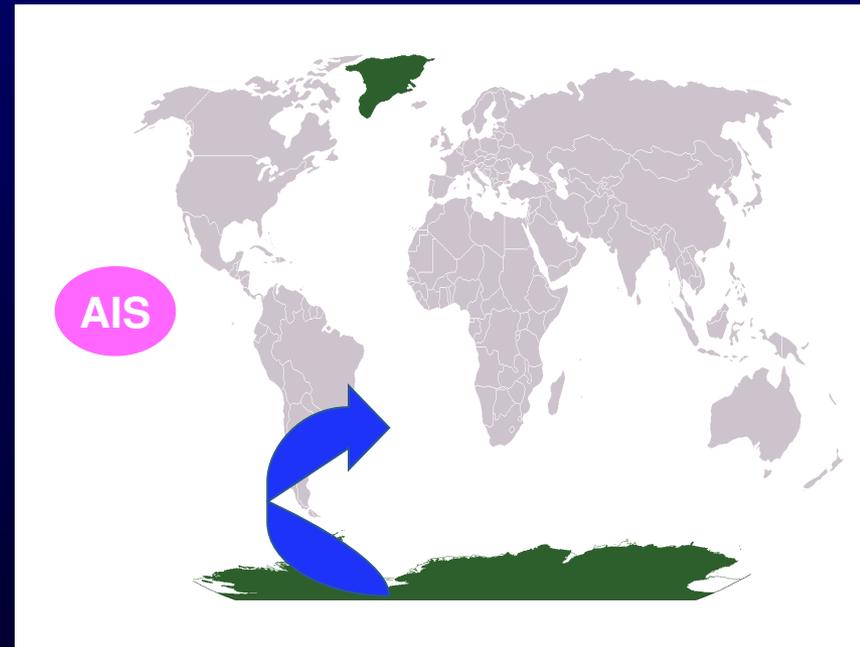
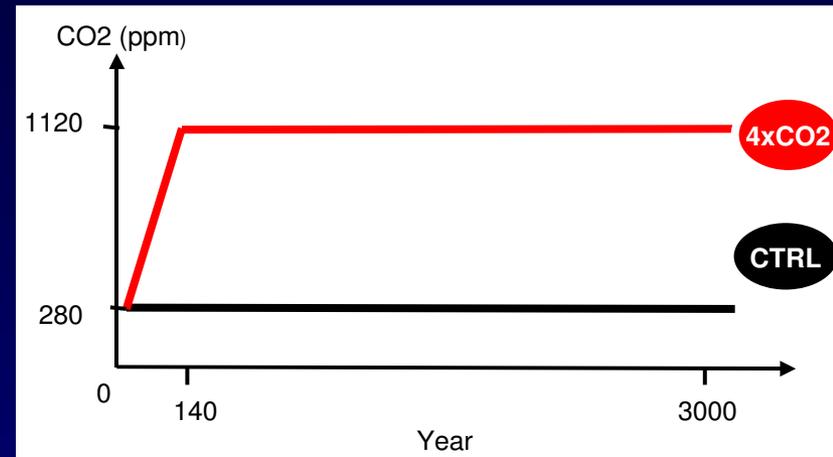
- Maximum pour la cellule NADW d'environ 28 Sv (Indice THC)
- Export à 30°S de 14 Sv
- Dans la fourchette des observations (14-18 Sv)
- Zone de convection océanique en accord avec observations



# Protocole expérimental

On analyse divers scénarios tous à **4XCO2**

- **Sans** la fonte des calottes polaires (**fixé**)
- **Avec** la fonte des calottes groenlandaise et antarctique (**AGIS**)
- **Avec** la fonte de la calotte groenlandaise uniquement (**GIS**), l'autre est fixé
- **Avec** la fonte de la calotte antarctique uniquement (**AIS**), l'autre est fixé

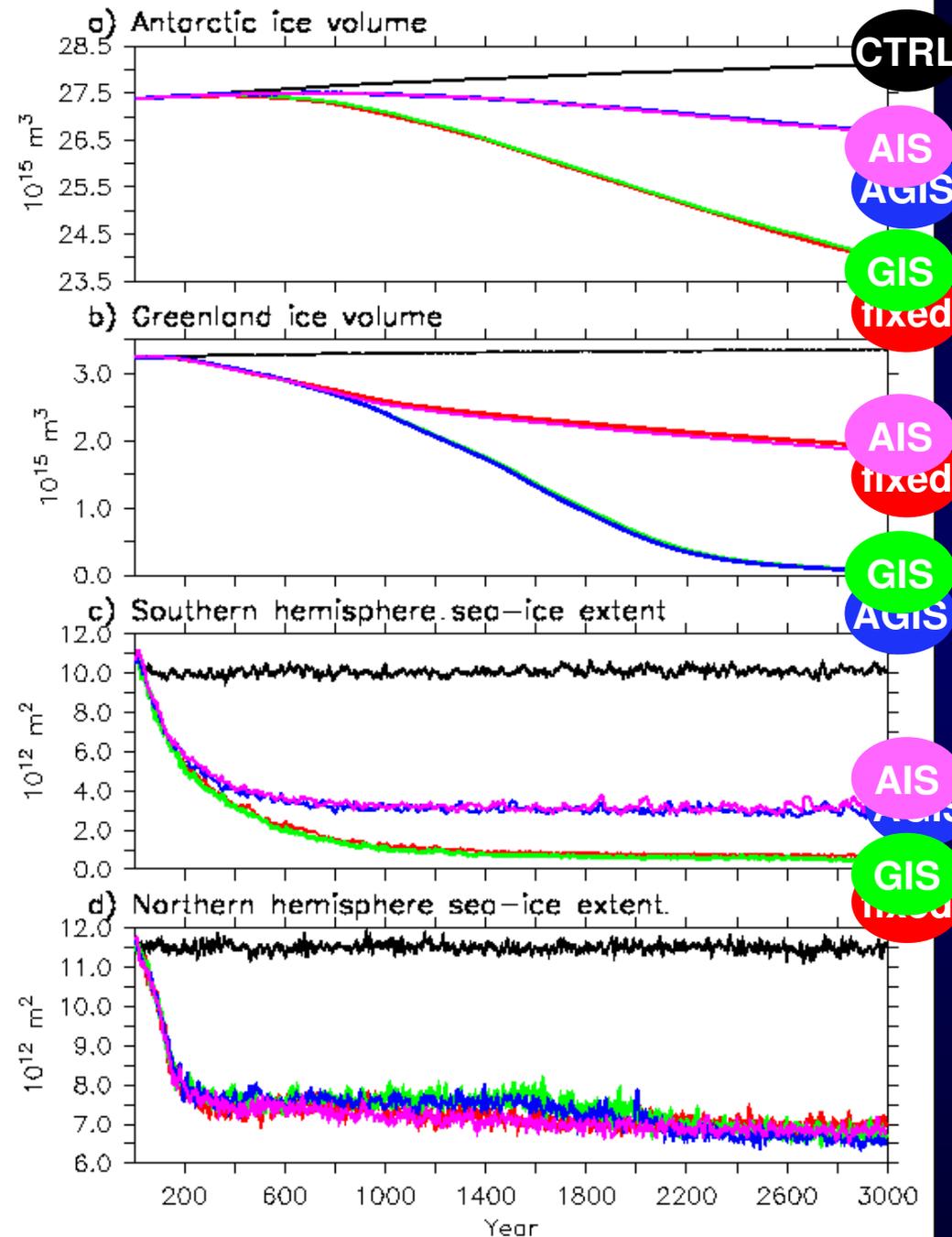


# Réponse de la cryosphère en scénarios

Après 500 ans la calotte antarctique perd de la masse (**0.14 Sv** dans l'océan Austral dans **AIS** après 3000 ans)

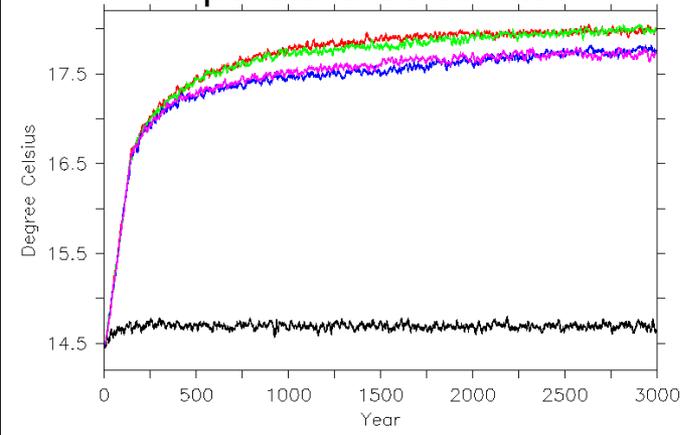
Il y a un retard pour la fonte de cette calotte et de la glace de mer au sud, due à **l'inertie thermique de l'Océan Austral**

La calotte groenlandaise perd rapidement de la masse et a complètement fondue en 3000 ans dans **GIS**



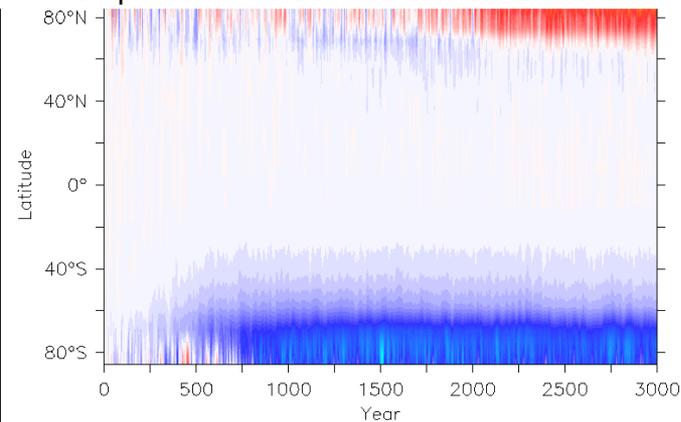
# Réponse de la température dans les scénarios

Température de surface



La fonte de la calotte antarctique réduit la sensibilité climatique de 10%

Température de surface : **AGIS-fixé**

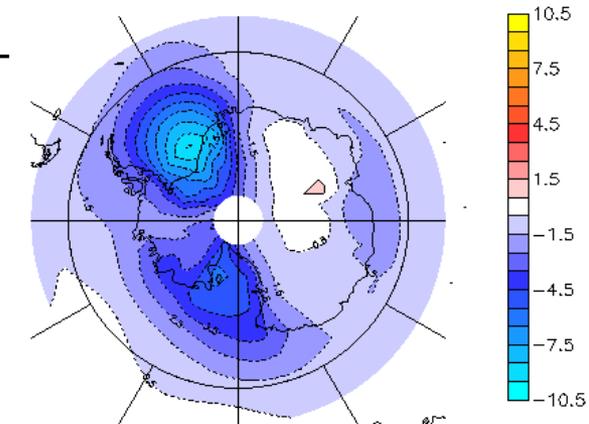


Le nord se réchauffe, le sud se refroidit

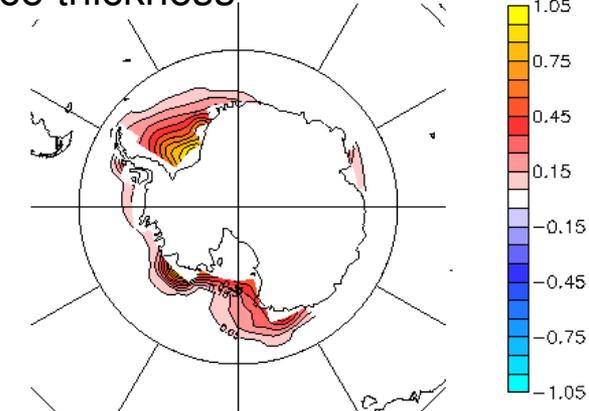
À cause de différences de glace de mer

**AGIS-fixé** : années 2900-3000

a) SAT

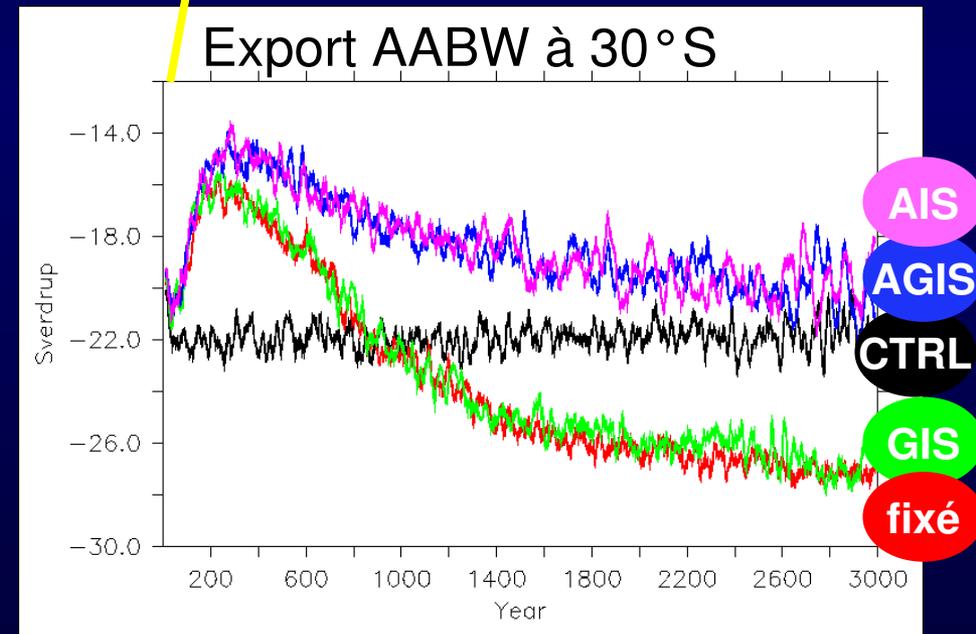
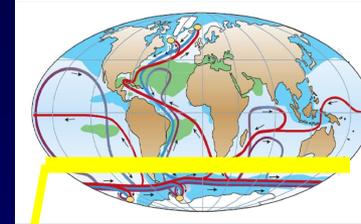


b) Sea-ice thickness



# Réponse de la cellule AABW dans les scénarios

- La cellule AABW diminue les 300 premières années
- Puis elle réaugmente
- Elle se stabilise autour de la valeur initiale, avec la fonte de la calotte antarctique (AGIS, AIS)
- Et 25% au-delà sans (GIS, fixé)
- Pourquoi une telle augmentation ?



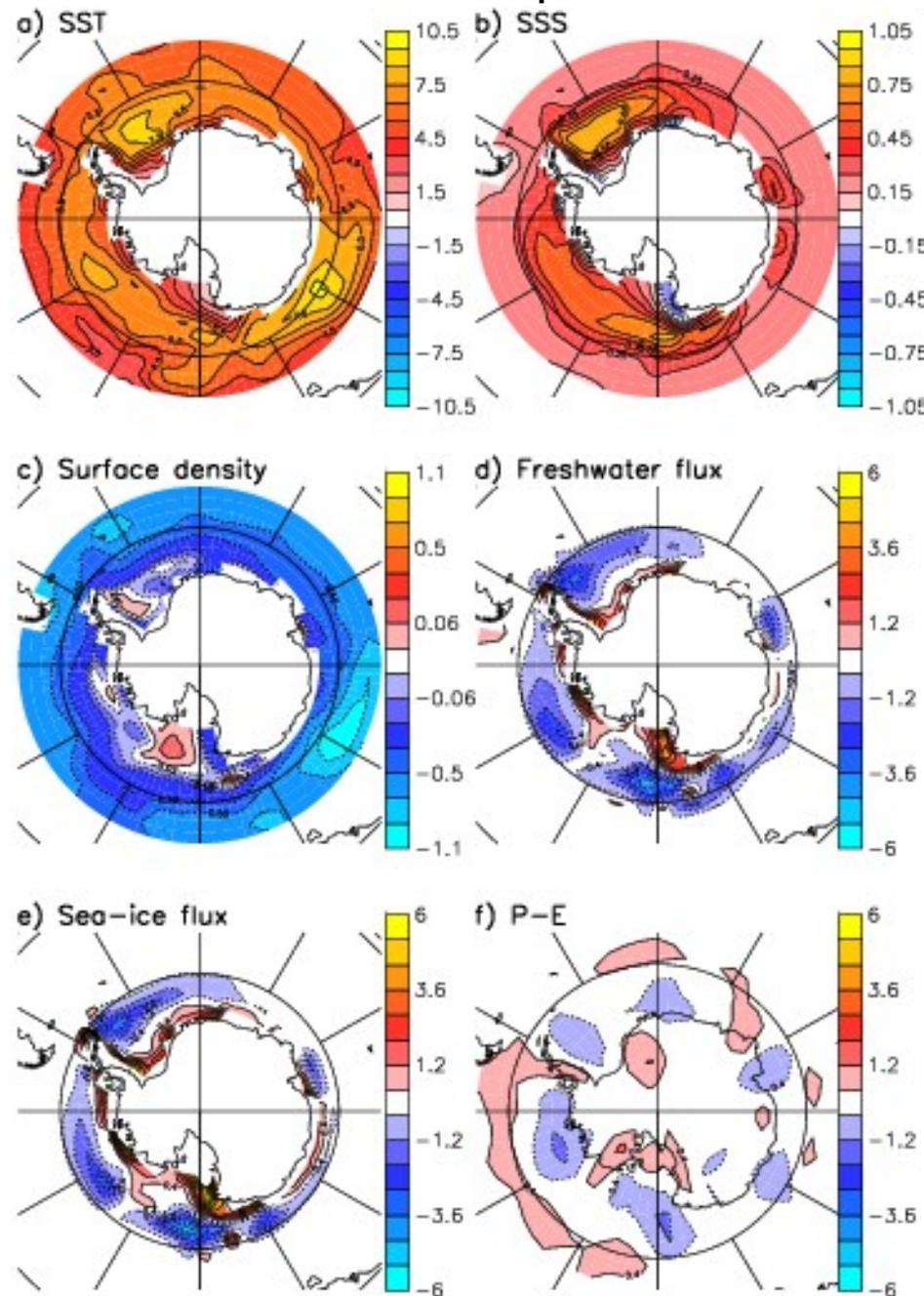
# Explication de l'augmentation de l'AABW

➤ La SST augmente dans l'océan Austral

➤ Tout comme la SSS, qui permet une augmentation de la densité à certains endroits et donc de la production de AABW

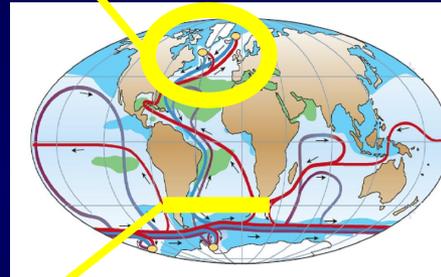
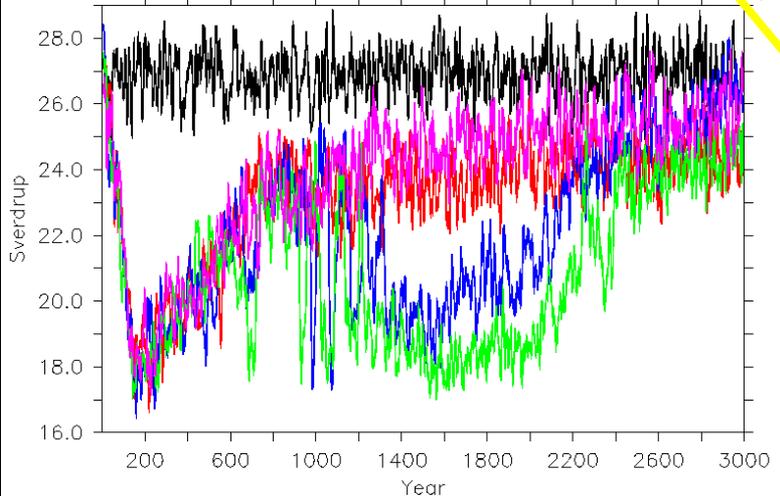
➤ L'augmentation de SSS est principalement dû à un changement du forçage halin de la glace de mer

4XCO<sub>2</sub> fixé - CTRL après 3000 ans



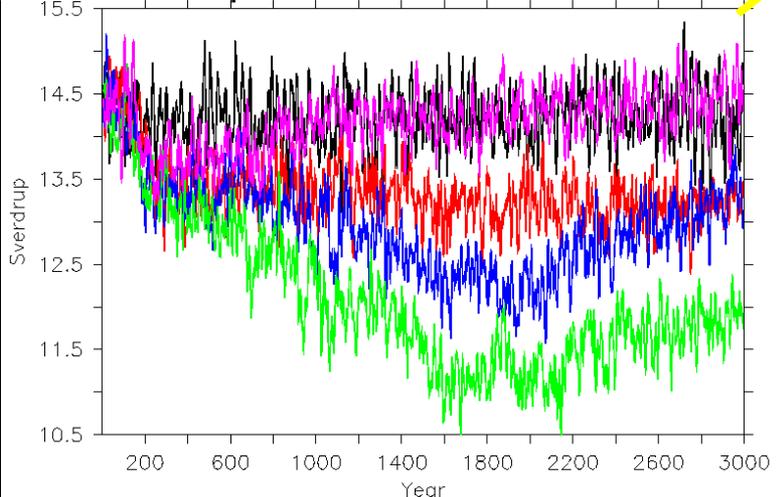
# Réponse de la THC dans les scénarios

Indice thermohalin (*maximum fonction courant*)



- CTRL
- Sans calotte
- Avec calottes
- Groenland
- Antarctique

Export NADW à 30°S



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

# Résumé 1

- La calotte antarctique fond dans un scénario de 3000 ans stabilisé à 4XCO<sub>2</sub> avec LOVECLIM
- Cette fonte induit une atténuation du réchauffement climatique de plus de 10°C localement dans l'océan Austral
- La fonte de la calotte antarctique ralentit la cellule AABW ce qui stabilise la cellule NADW
- Les mécanismes de cette stabilisation nécessitent d'être mieux compris

# Plan

1. Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
3. La bascule océanique bipolaire
5. 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)

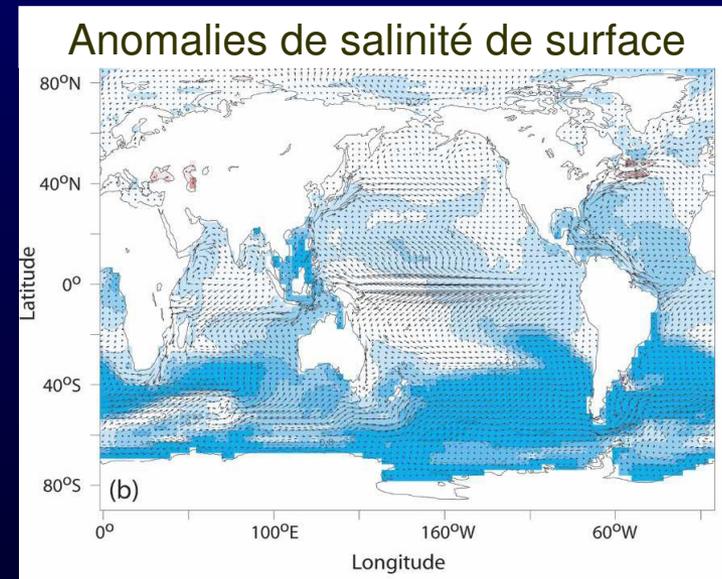
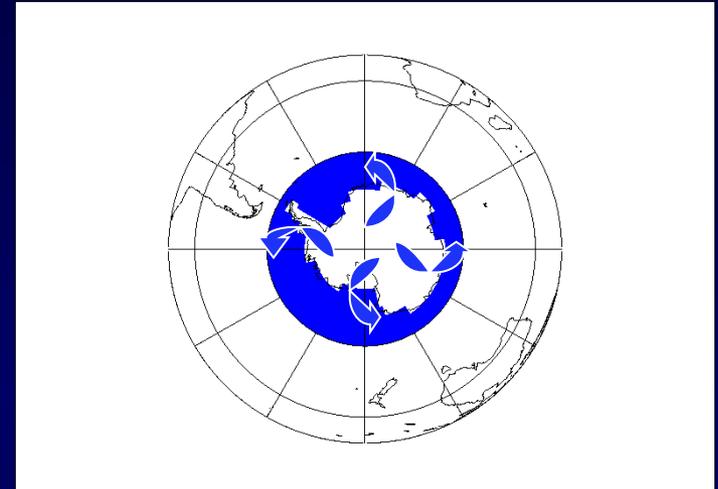
➤ Seidov et al. (2001) confirme et popularise le concept de balance océanique entre NADW et AABW avec des modèles d'océan forcés

➤ 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 de Stouffer et al.

- On ajoute 1 Sv d'eau douce dans l'océan Austral au sud de  $60^{\circ}\text{S}$  pendant 100 ans (Hosing sud, Hos1)
- Cela représente une quantité d'eau douce équivalente à la calotte groenlandaise
- Stouffer et al. observe une diminution du maximum de la cellule NADW
- Ils attribuent cet effet au transport d'anomalies de salinité de l'océan Austral vers l'Atlantique Nord

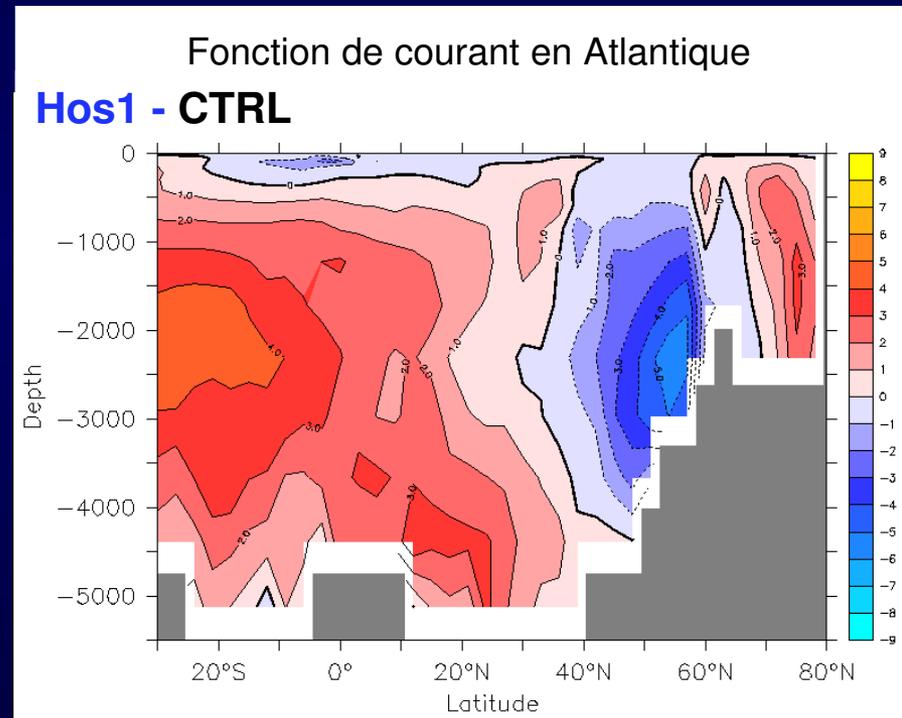


# Réponse de la cellule NADW dans LOVECLIM

➤ On fait la même expérience (Hos1) en utilisant le modèle LOVECLIM (sans calotte polaire)

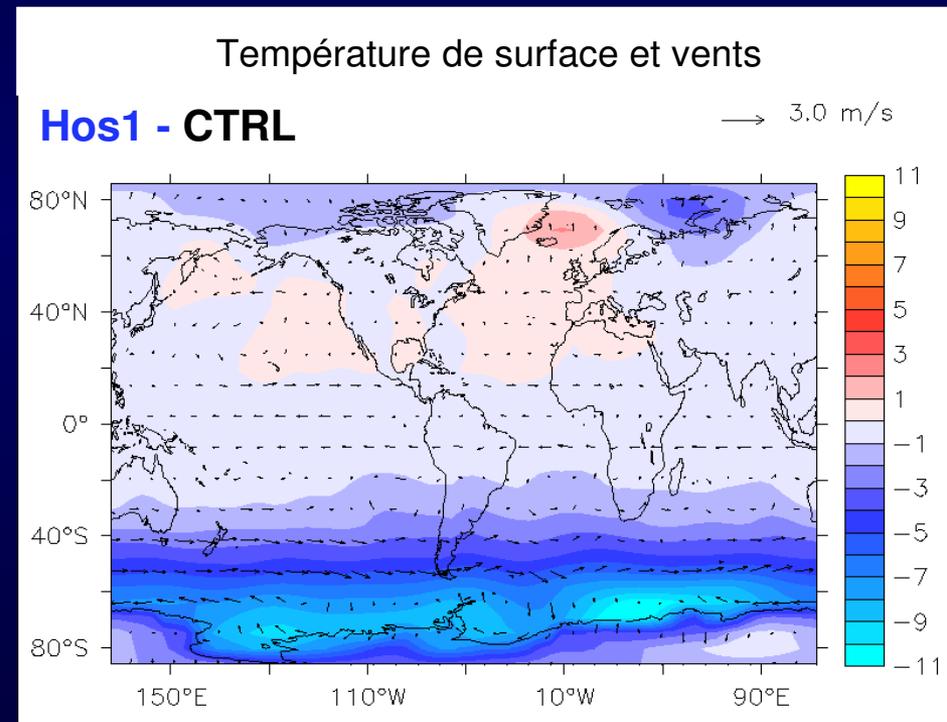
➤ On remarque l'apparition d'un dipole en terme d'anomalies de la fonction de courant :

- ❖ On diminue la cellule au nord de  $30^{\circ}\text{N}$  comme chez Stouffer et al.
- ❖ On augmente la cellule au sud de  $30^{\circ}\text{N}$



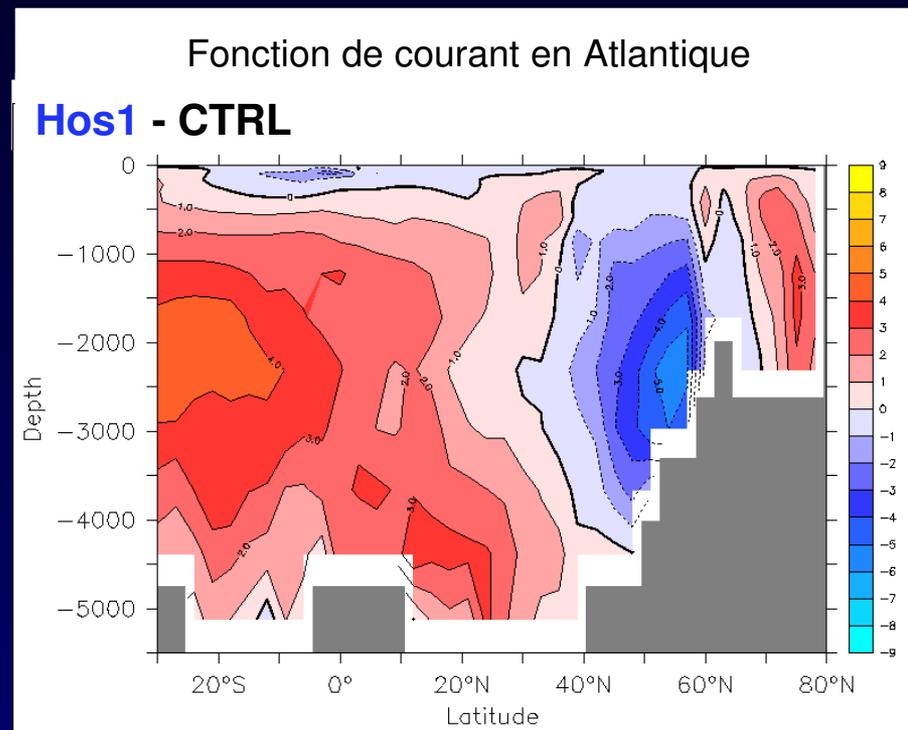
# Réponse climatique

- On refroidit fortement le sud
- Cela augmente le gradient méridien de température
- Ce qui induit une augmentation des vents au sud
- Qui peuvent affecter la cellule au nord (Toggweiler and Samuels 1995)
- Pour tester cet effet, on fait une expérience de sensibilité où on fixe le vent à la valeur de CTRL, nommé **HosWind**



# Trois processus en jeu

L'augmentation des vents augmente bien la cellule NADW, mais n'explique pas la totalité de l'augmentation au sud

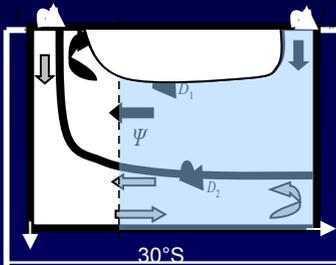


Trois processus doivent affecter la cellule NADW dans Hos1 :

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 où il limite la formation de NADW
5. **Processus d'augmentation des vents** au sud qui transportent (Ekman) plus d'eaux vers le nord



# Evaluation quantitative du nouvel équilibre

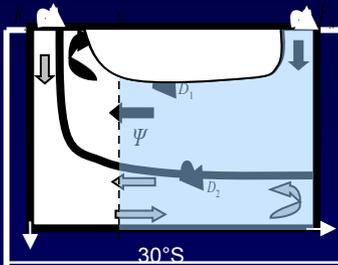


$$\psi_{AH} = \frac{1}{\rho_0 \beta} \int_{z_1}^{z_2} \rho_1 - \rho_2$$

CTRL	14.6	0.6	22.3	-8.6
------	------	-----	------	------

En Sv, moyenne sur 100 ans

# Evaluation quantitative du nouvel équilibre



$$\psi_{AH} = \frac{1}{\rho_0 \beta} (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)$$

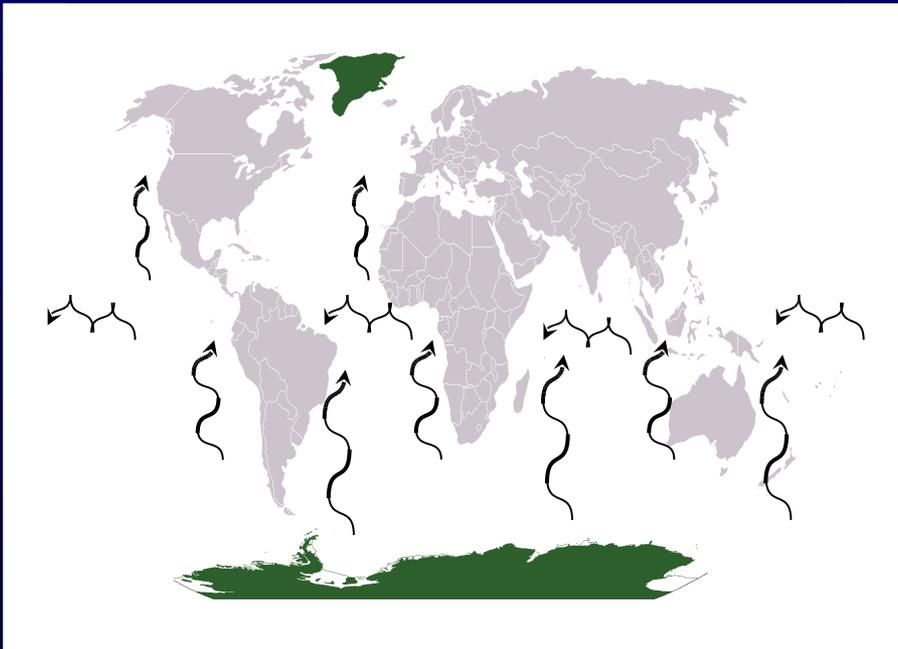
CTRL	14.6	0.6	22.3	-8.6
HosWind-CTRL	2.4	4.1	-2.6	0.9
Hos1-HosWind	1.3	-0.1	1.3	0.1

En Sv, moyenne sur 100 ans

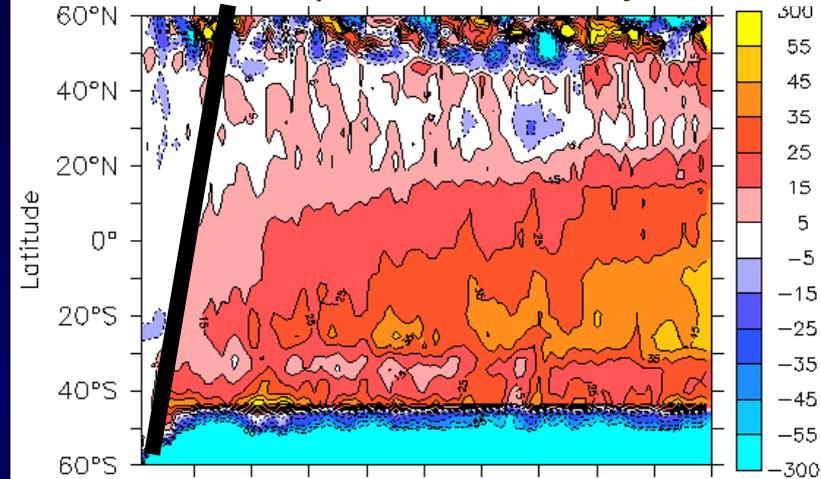
# Propagation des anomalies

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

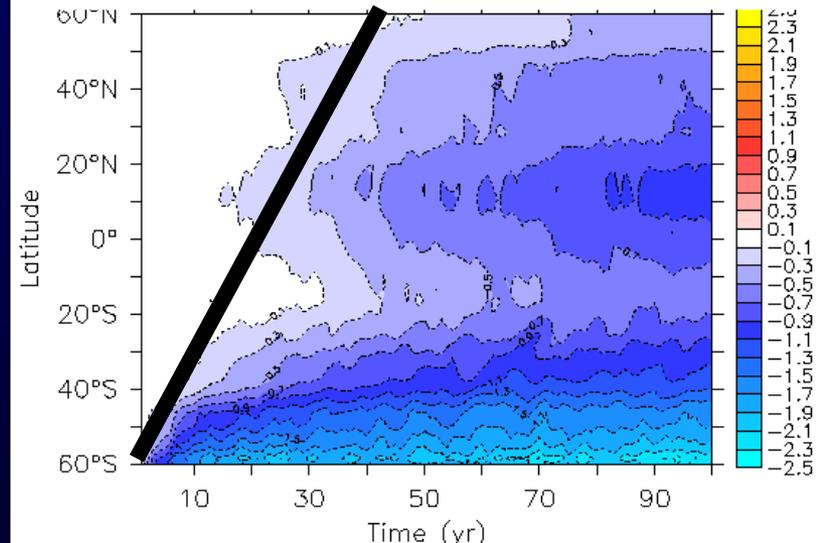
Kawase 1987 ; Johnson and Marshall 2002



Anomalies de profondeur de Pycnocline



Anomalies de salinité de surface



# Rôle de la vitesse de fonte

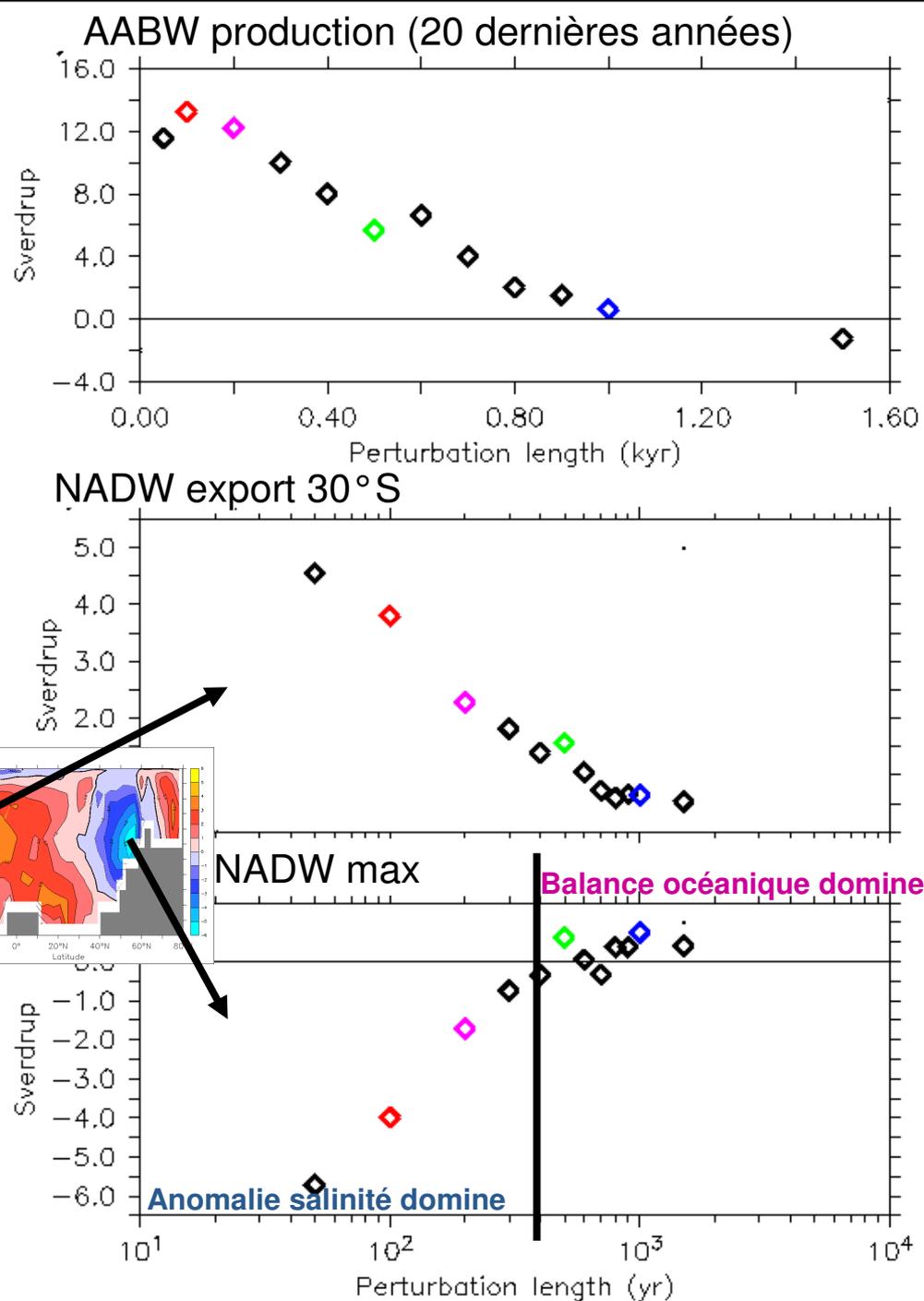
- Les différents processus ont des échelles de temps proches (décennales) mais différentes
- Leur mode d'action peut s'atténuer dans le temps de façon différente
- La quantité et la vitesse de fonte est-elle importante ?
- On analyse à présent le rôle de la « **vitesse de libération** » de l'eau douce, pour une **quantité donnée** d'eau douce (100 Sv.an)

# Diagramme de phase

➤ Selon la vitesse à laquelle l'eau douce la cellule NADW réagit différemment

➤ Vitesse  $> 0.25$  Sv environ processus 1 et 3 domine sur 2 = l'ensemble de la cellule NADW est 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, dans les modèles couplés, **trois processus** dont les effets s'opposent pour l'intensité de la cellule NADW :
  1. **La bascule océanique** tend à augmenter l'export de NADW
  2. **L'advection d'anomalies de salinité** diminue sa production
  3. L'augmentation du **vent à Drake** augmente son export
  
- Ces trois processus sont très rapides :
  1. Quelques **années** pour la bascule, lié à un ajustement rapide de la pycnocline par ondes océaniques
  2. Quelques **décennies** pour l'advection des anomalies de salinité en surface et subsurface
  3. Quelques **décennies** pour l'augmentation de vent à Drake

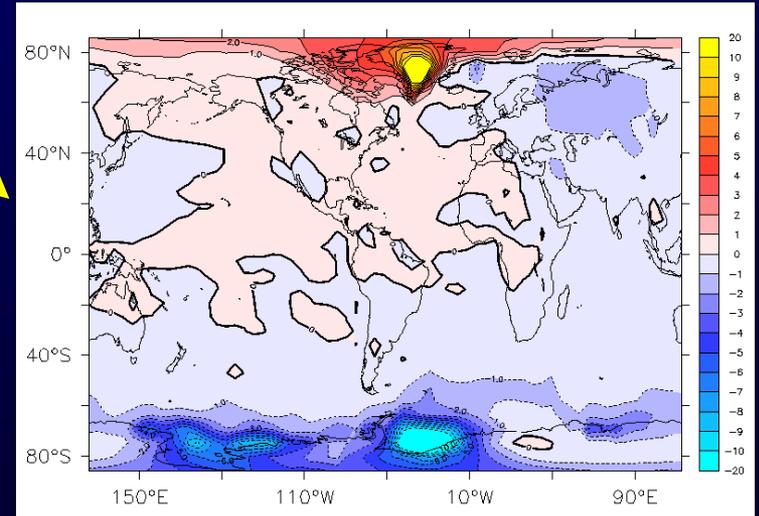
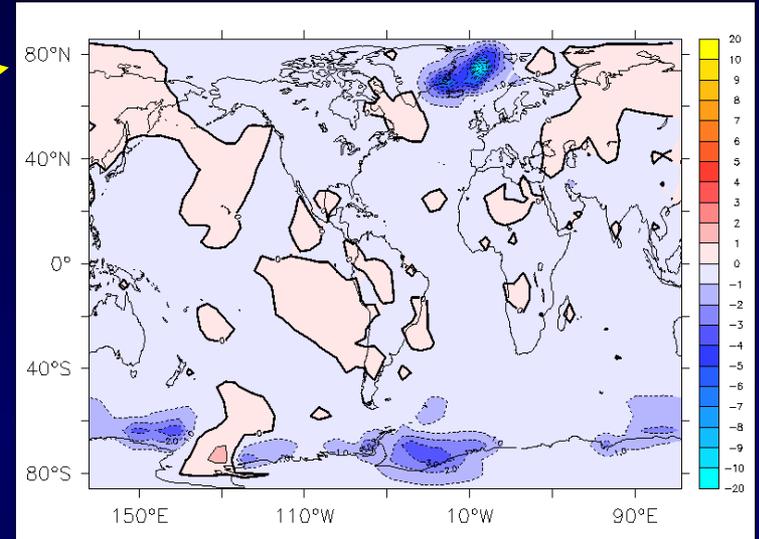
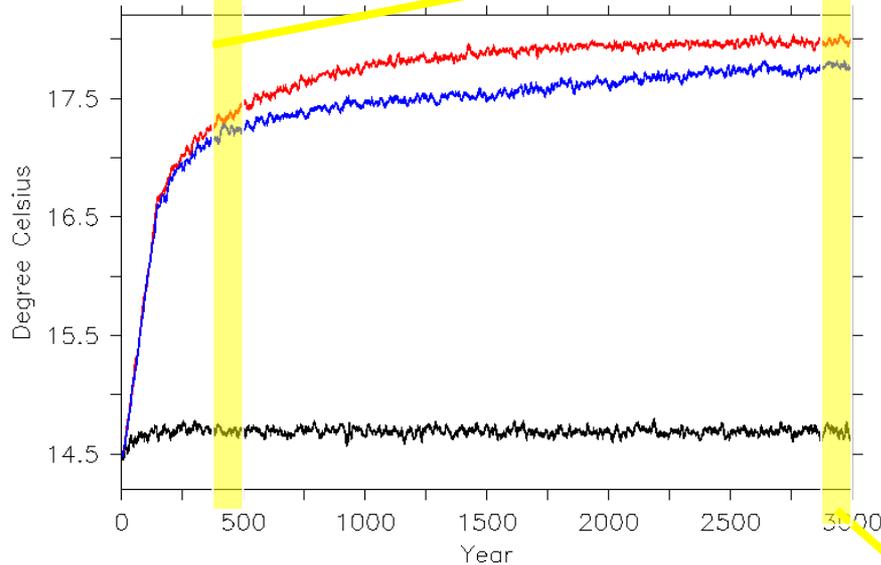
# Plan

1. Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
3. La bascule océanique bipolaire
5. 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

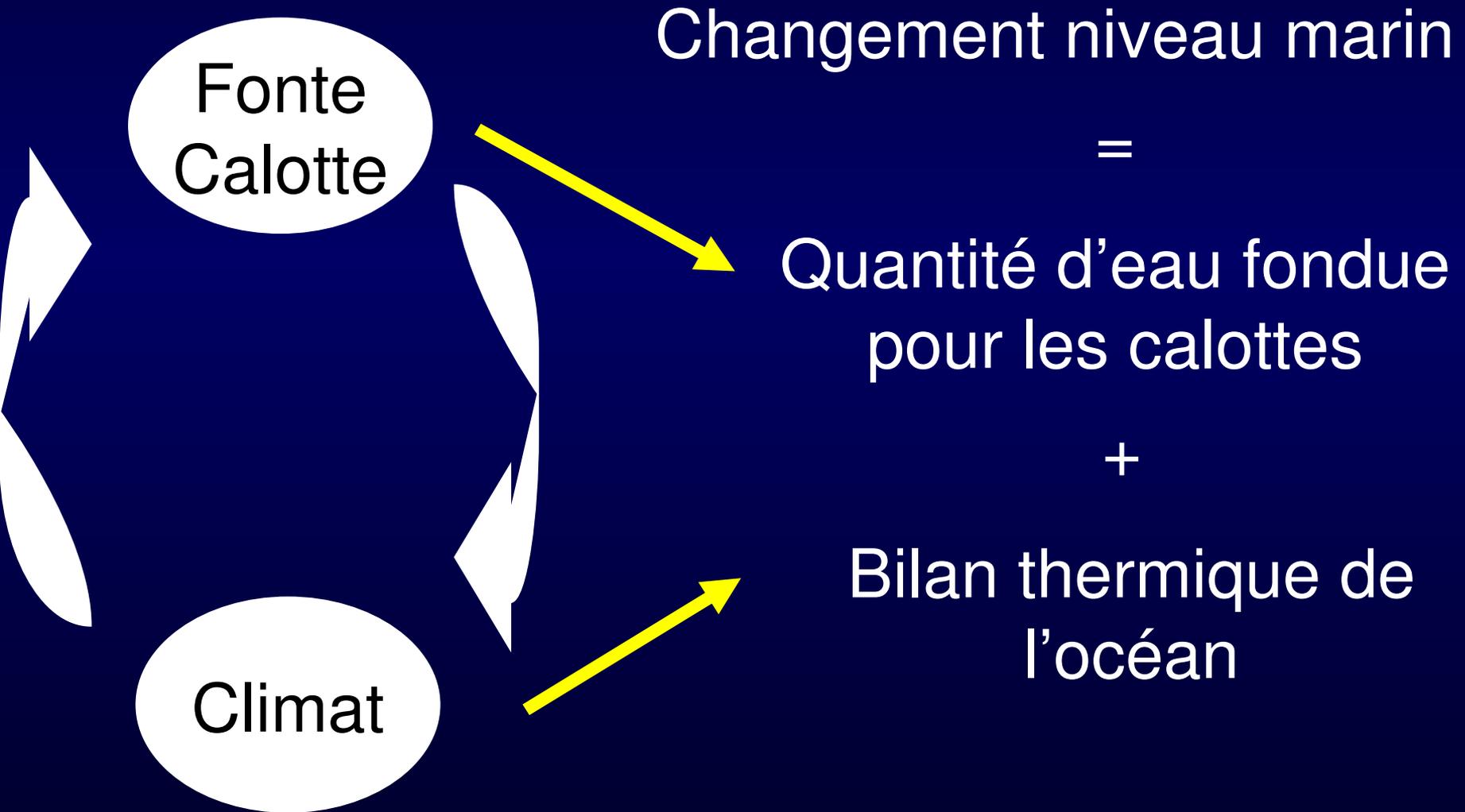
Signe ?

Climat

- Température
- Précipitation

- Élévation (+)
- Albédo (+)
- Eau douce dans l'océan (-)

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



# Calotte groenlandaise

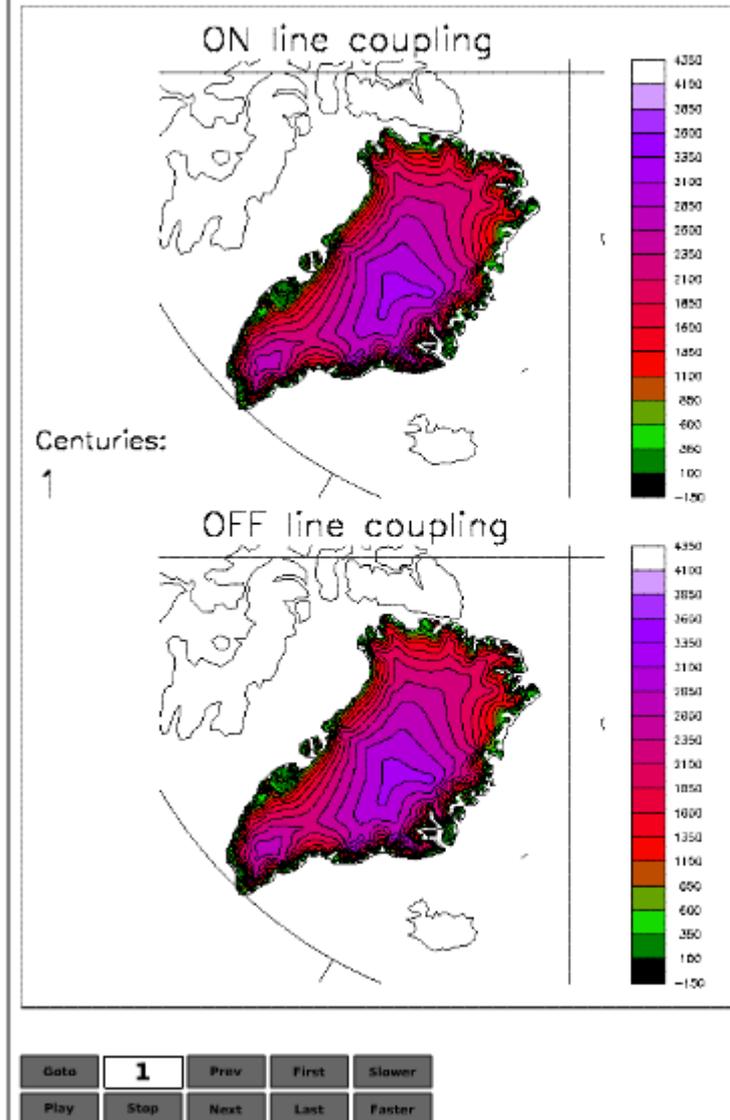
« on line » : la calotte groenlandaise fond d'un équivalent de **7.9 m en 3000 ans**

« 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

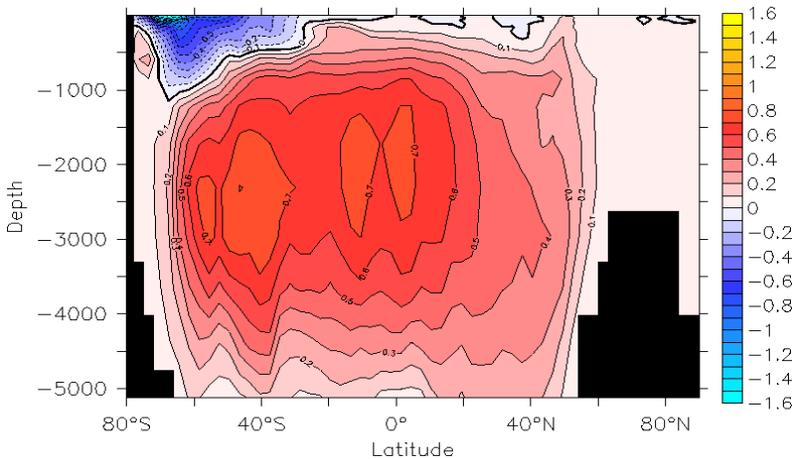
Rétroaction **positive** globale de **4.6 m**



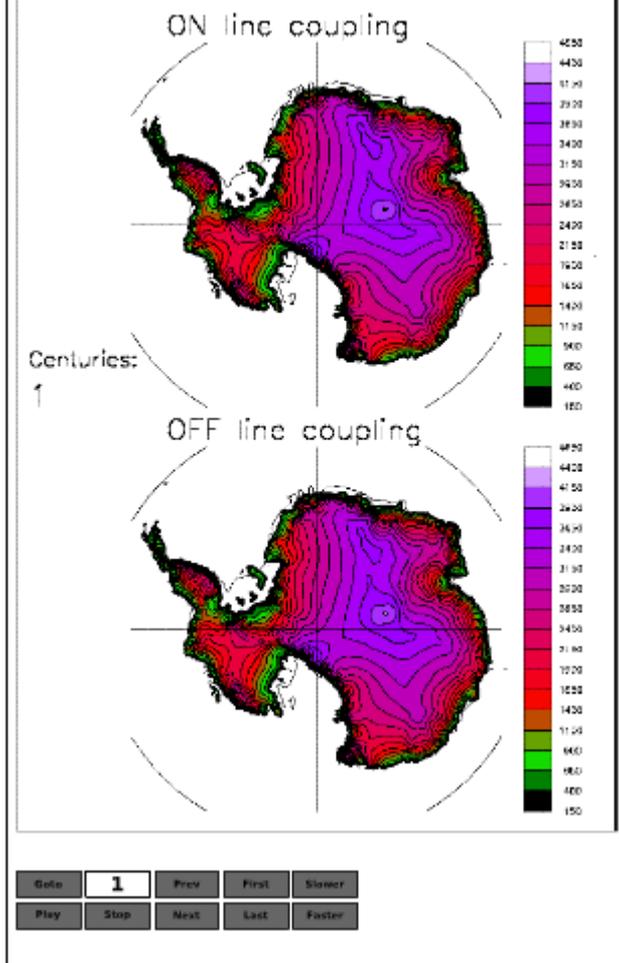
# Calotte antarctique

- « 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

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

- 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 de la calotte groenlandaise dans **différents CGCMs** : mise en place d'intercomparaison (projet Thor) 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
- Continuer à mesurer la fonte des calotte polaires et évaluer la représentation des changement du bilan hydologique océanique aux hautes latitudes



**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)**