



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

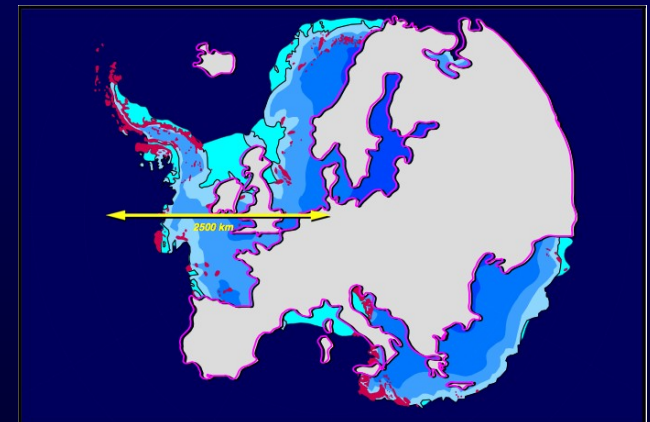
➤ Groënland

- ❖ Volume de glace posée équivalent à 7 m de niveau marin
- ❖ Aire de 2 millions km² (81% couvert de glace)

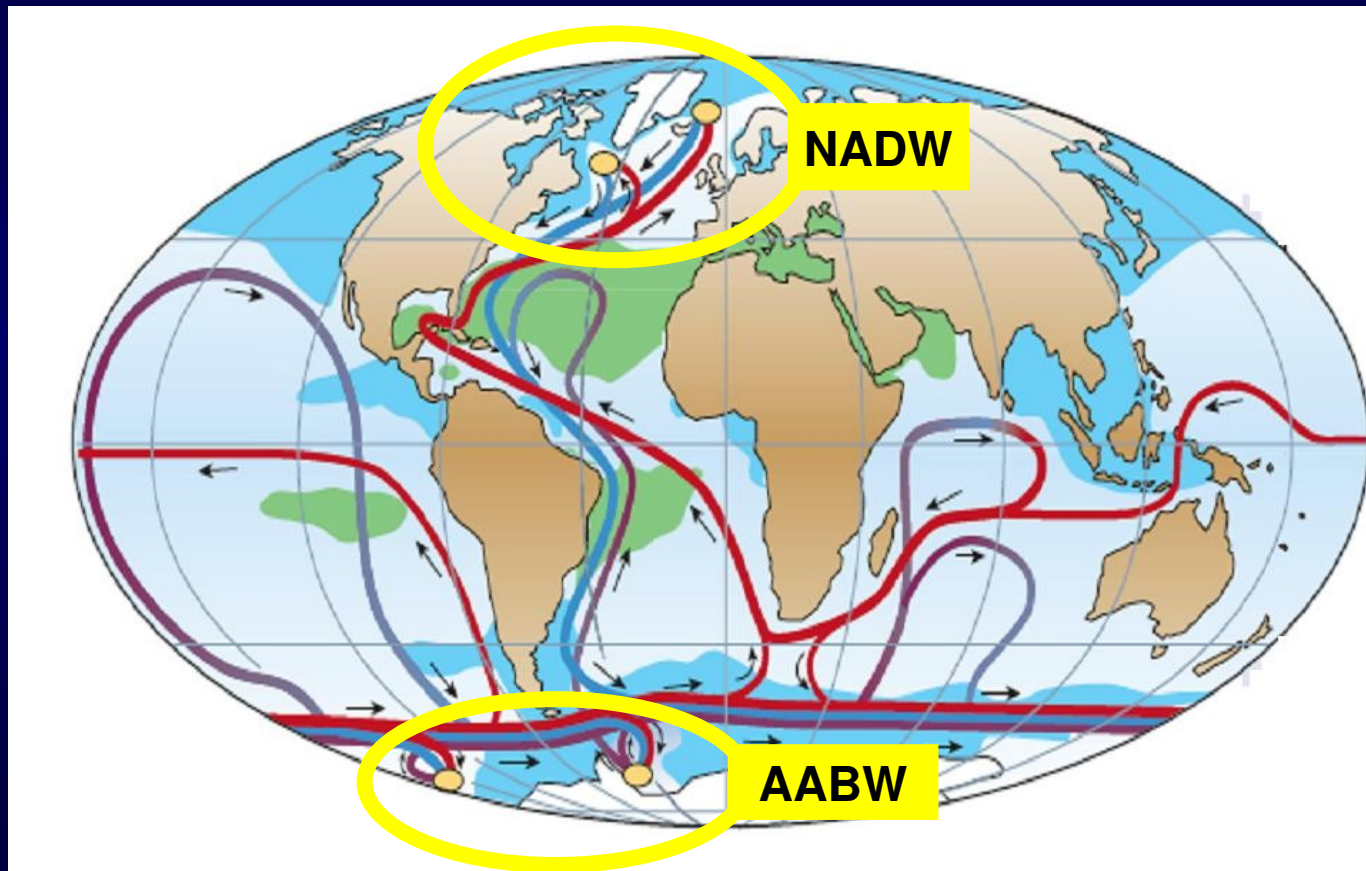


➤ Antarctique

- ❖ Volume de glace posée équivalent à 61 m de niveau marin
- ❖ Aire de 14 millions km² (98% couvert de glace)
- ❖ Présence de gros plateaux glaciaires



La circulation thermohaline (THC)

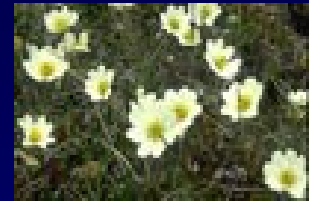


Rahsmtorf
2002

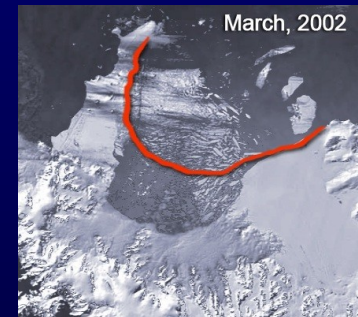
Circulation océanique liée aux gradients de température et de salinité

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...



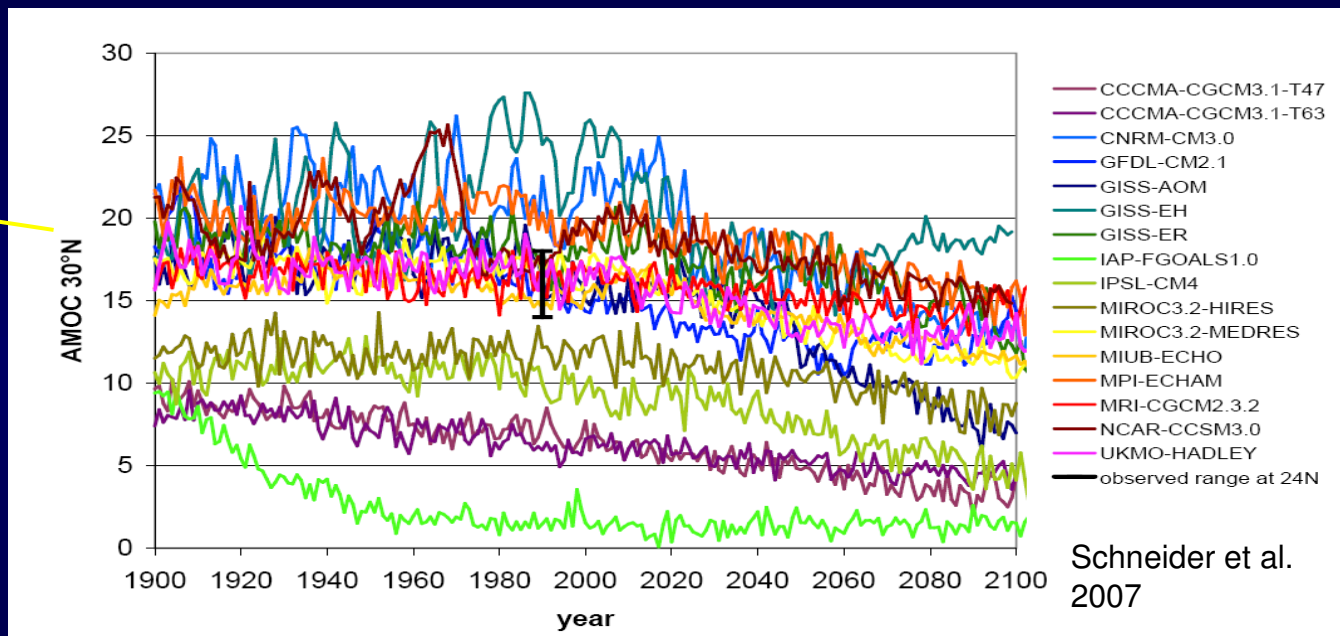
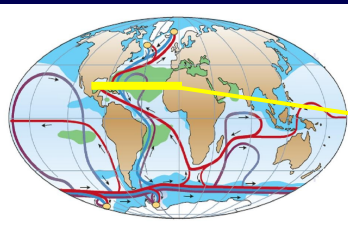
➤ Mais aussi dans l'océan Austral, où il semble exister des traces de fontes massives d'icebergs lors de la dernière déglaciation (Kanfoush et al. 2000) ...



➤ 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 ?

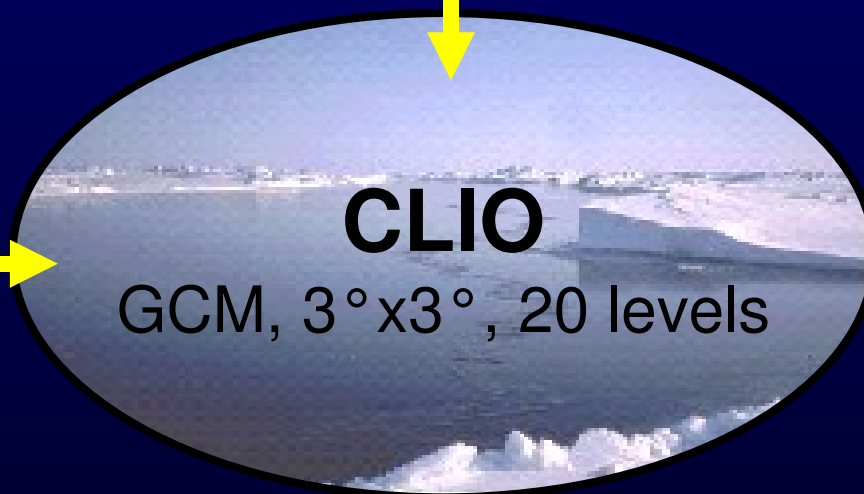
Plan

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

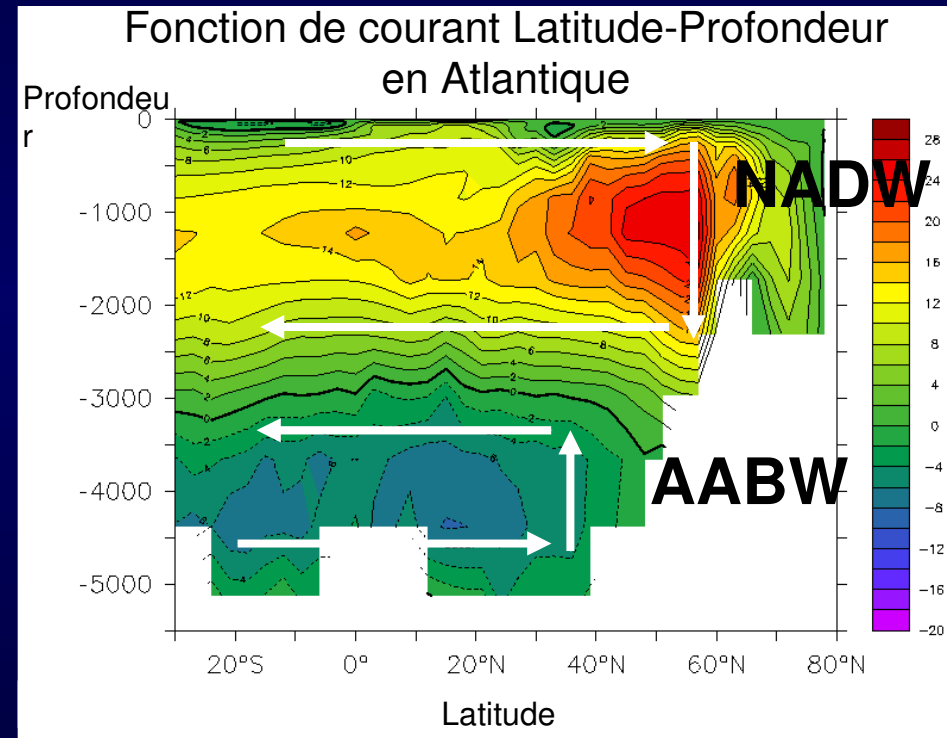
1. Effet de la fonte de la calotte antarctique sur la THC
3. La bascule océanique bipolaire
5. Climat et calottes : rôle des rétroactions sur le niveau marin

Outil : LOVECLIM, un modèle de climat de complexité intermédiaire



La THC dans LOVECLIM

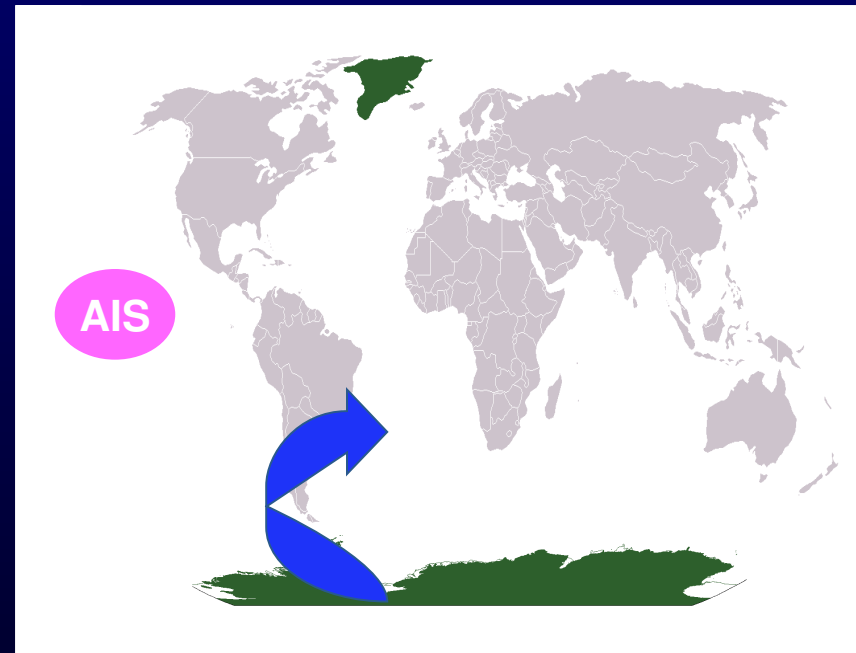
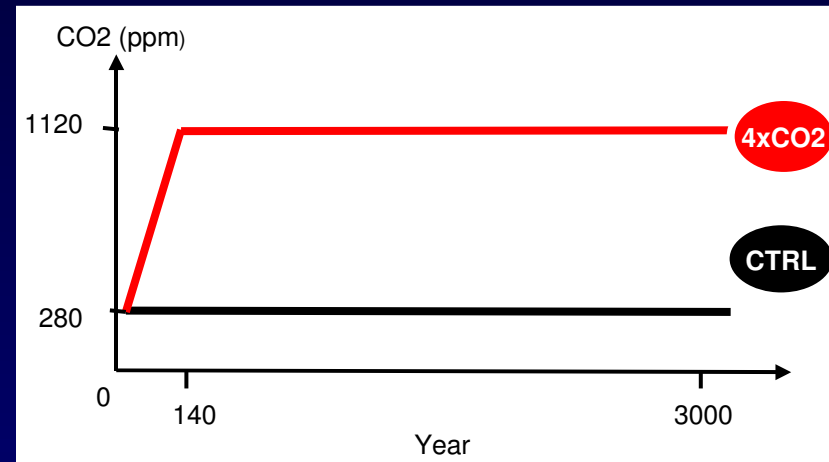
- Maximum pour la cellule NADW d'environ 28 Sv (Indice THC)
- Export à 30°S de 14 Sv
- Dans la fourchette des observations (14-18 Sv)
- Zone de convection océanique en accord avec observations



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

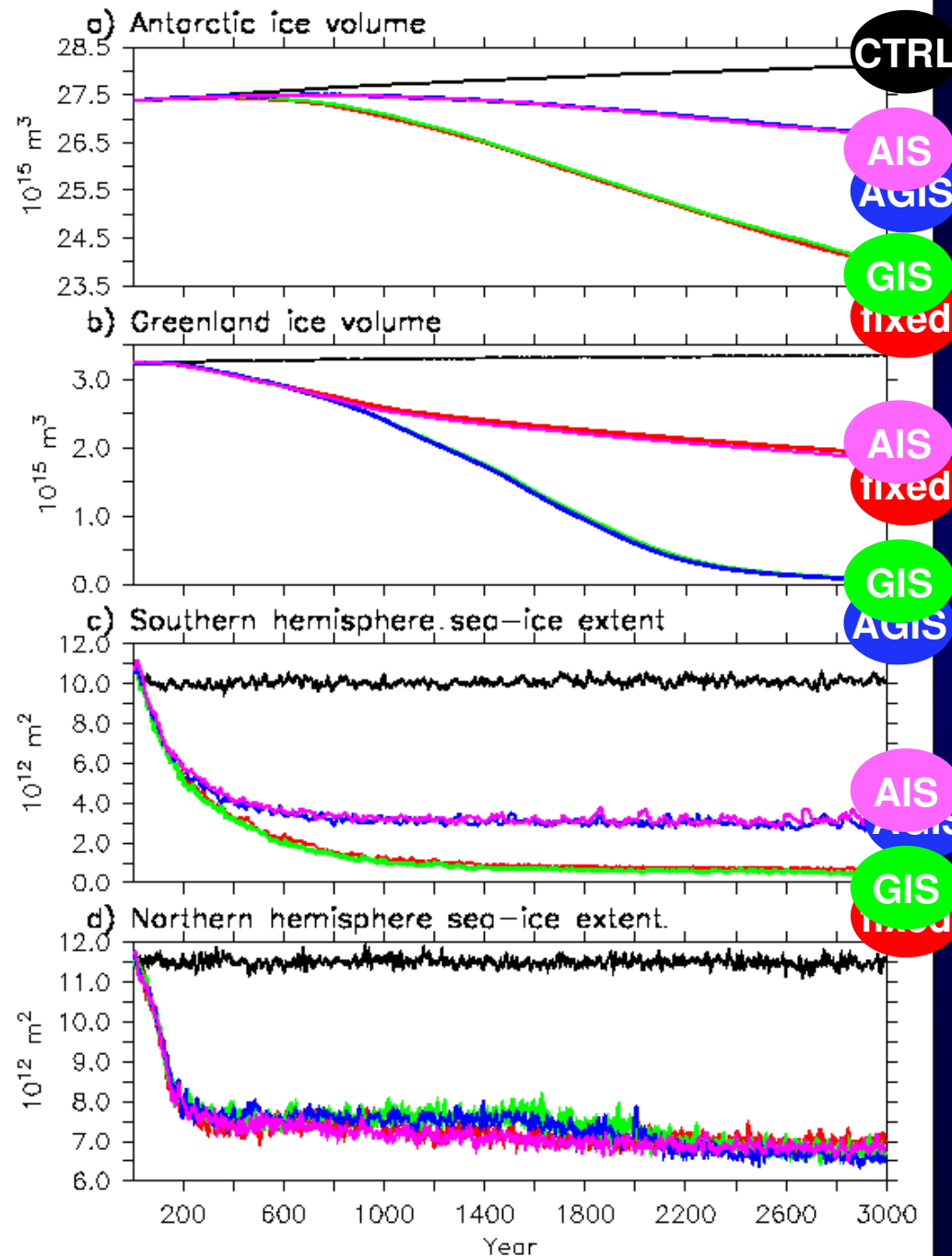


Réponse de la cryosphère en scénarios

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

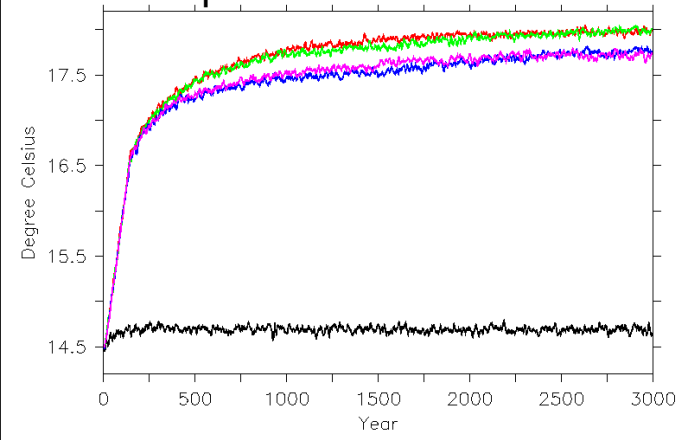
Il y a un retard pour la fonte de cette calotte et de la glace de mer au sud, due à **l'inertie thermique de l'Océan Austral**

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



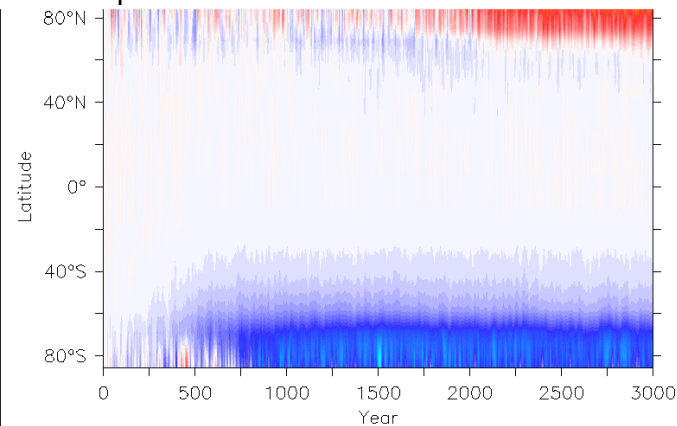
Réponse de la température dans les scénarios

Température de surface



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

Température de surface : **AGIS-fixé**

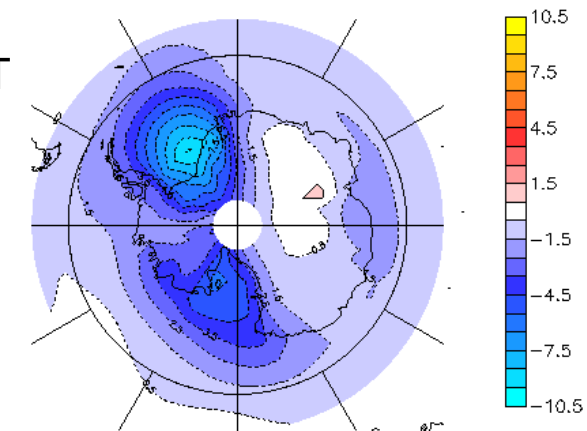


Le nord se réchauffe, le sud se refroidit

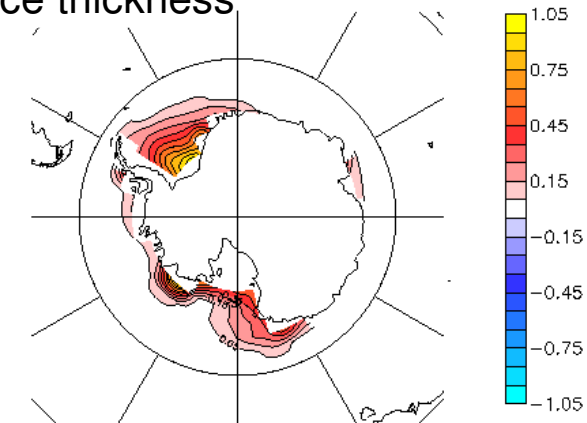
À cause de différences de glace de mer

AGIS-fixé : années 2900-3000

a) SAT

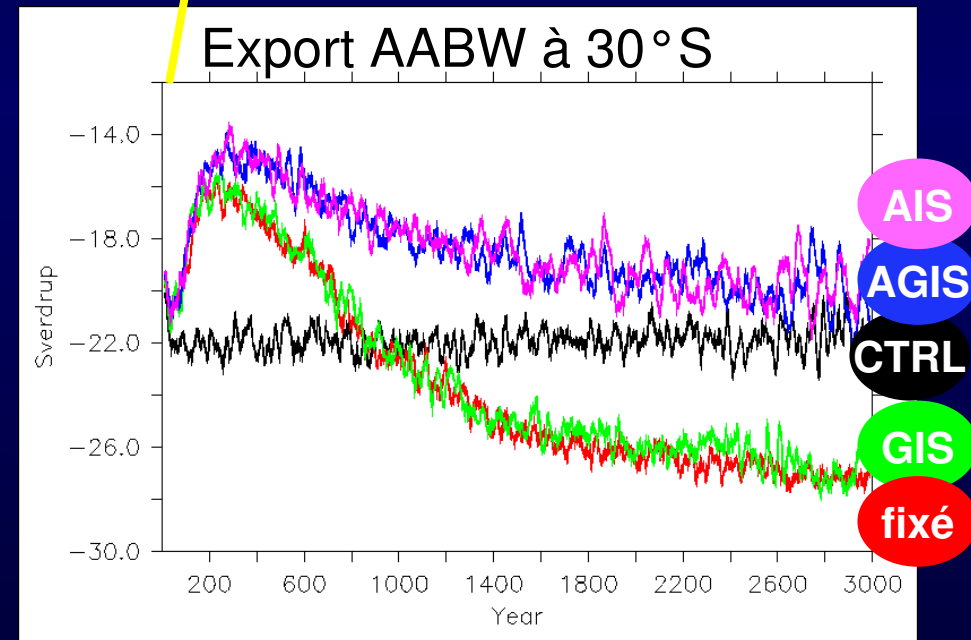
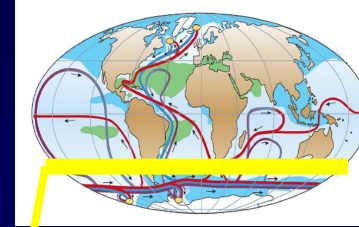


b) Sea-ice thickness



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 ?



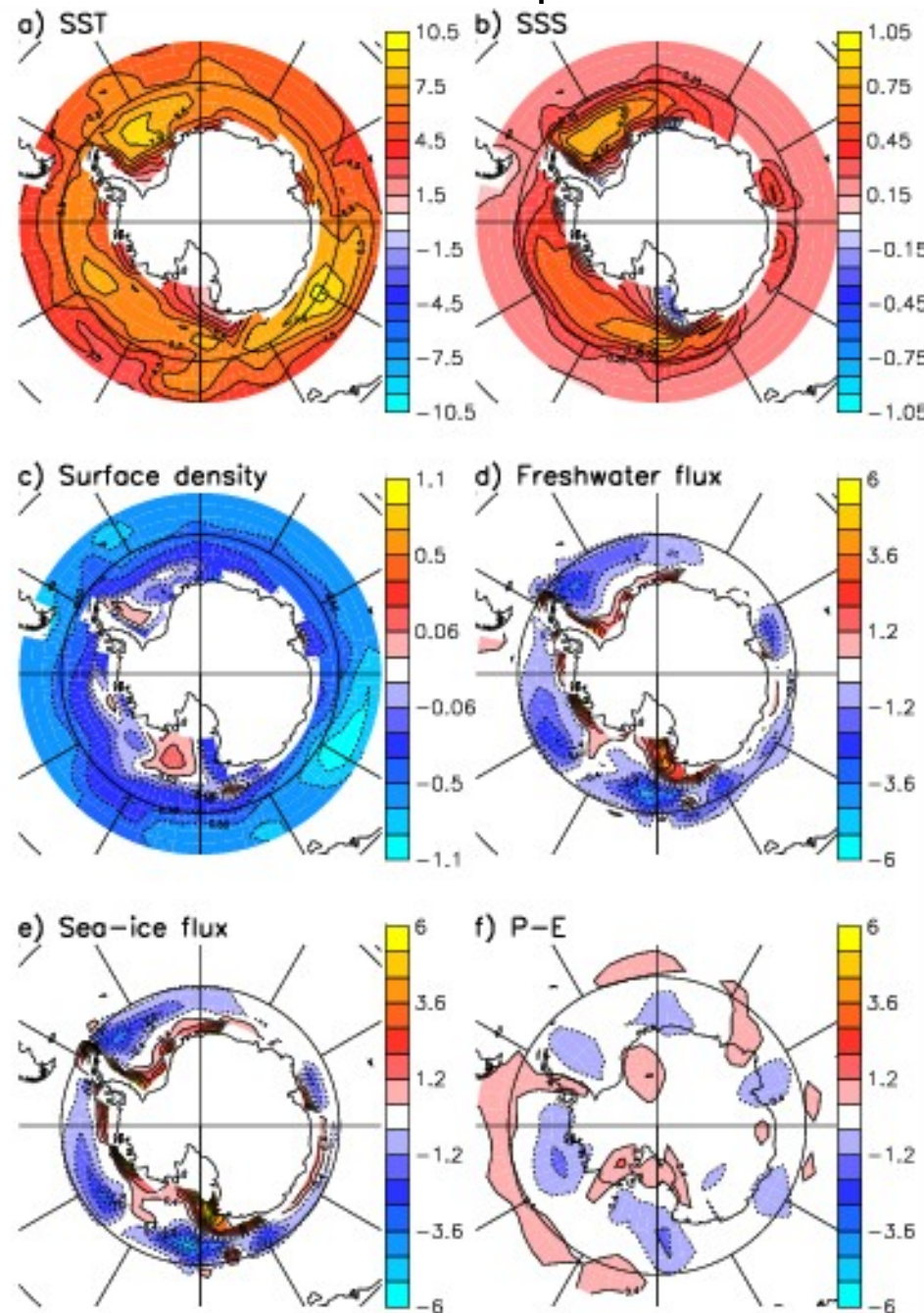
Explication de l'augmentation de l'AABW

➤ 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

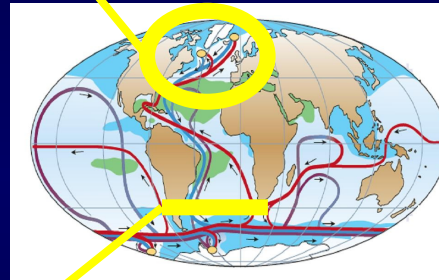
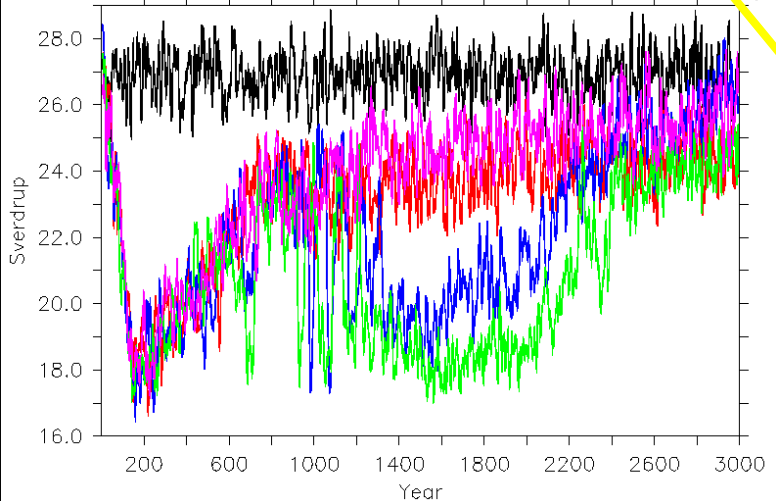
➤ L'augmentation de SSS est principalement dû à un changement du forçage halin de la glace de mer

4XCO₂ fixé - CTRL après 3000 ans



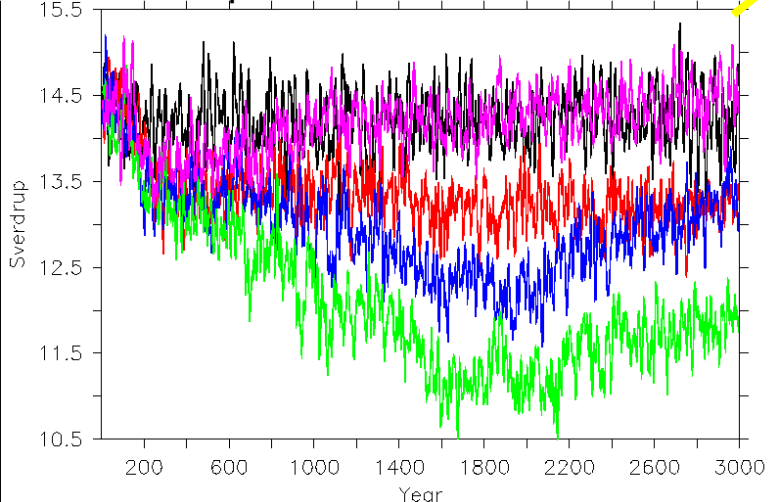
Réponse de la THC dans les scénarios

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 4XCO₂ 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)

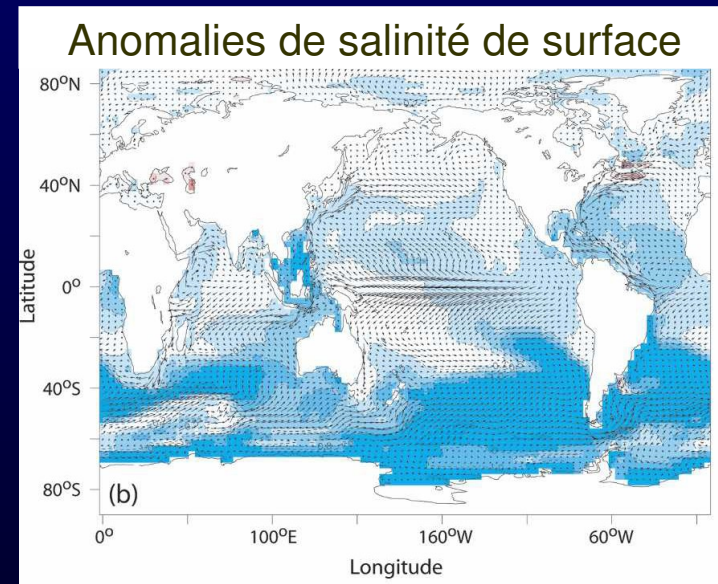
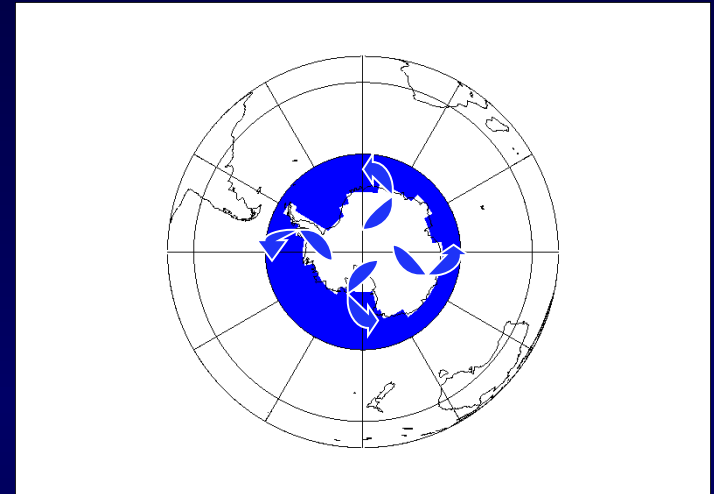
➤ Seidov et al. (2001) confirme et popularise le concept de balance océanique entre NADW et AABW avec des modèles d'océan forcés

➤ 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°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

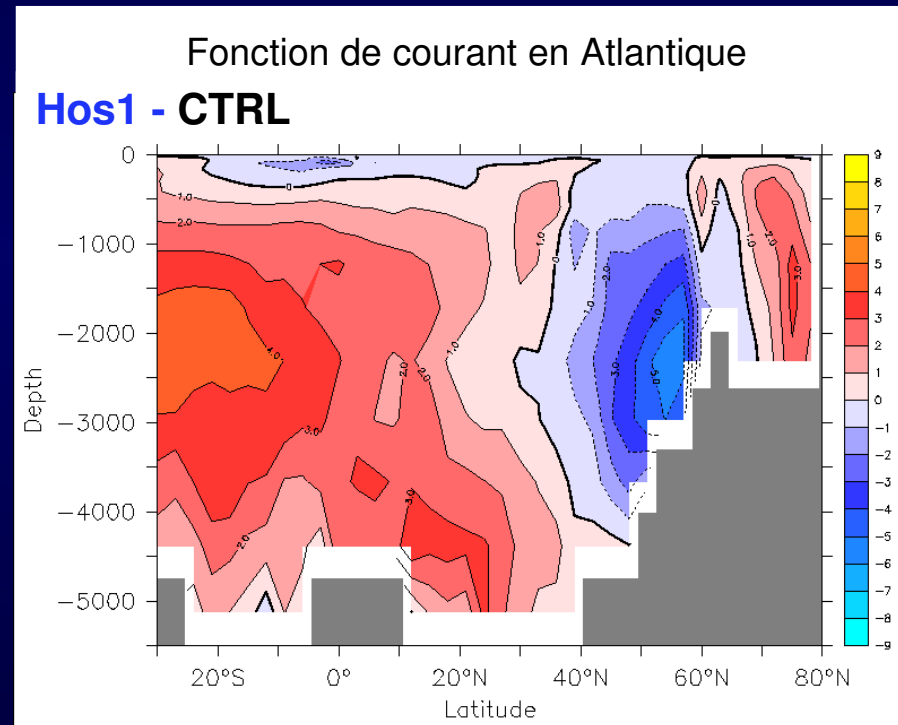


Réponse de la cellule NADW dans LOVECLIM

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

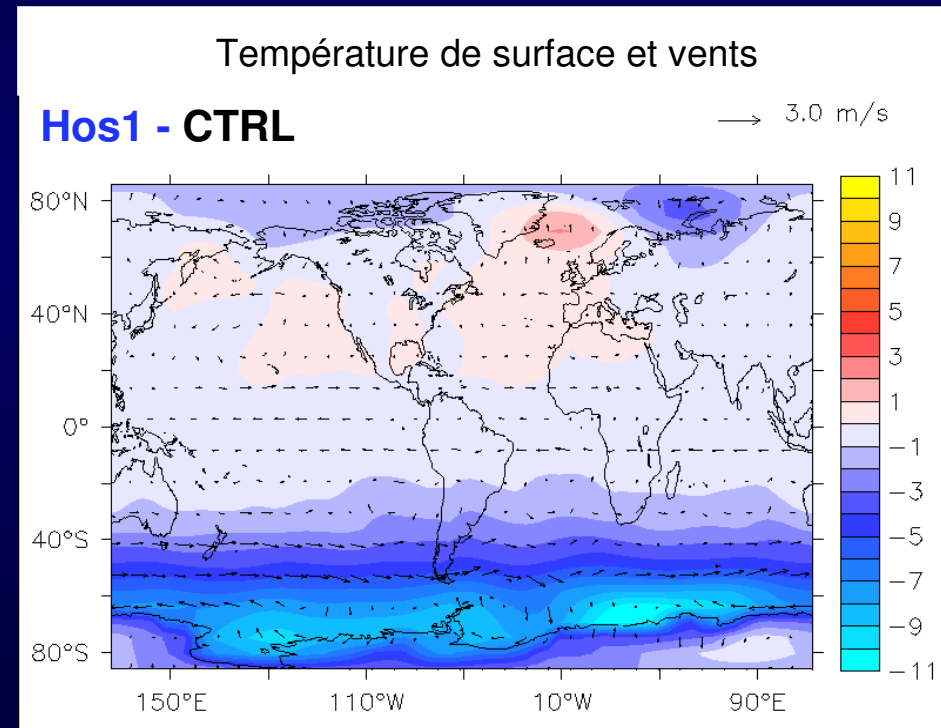
➤ On remarque l'apparition d'un dipole en terme d'anomalies de la fonction de courant :

- ❖ On diminue la cellule au nord de 30°N comme chez Stouffer et al.
- ❖ On augmente la cellule au sud de 30°N



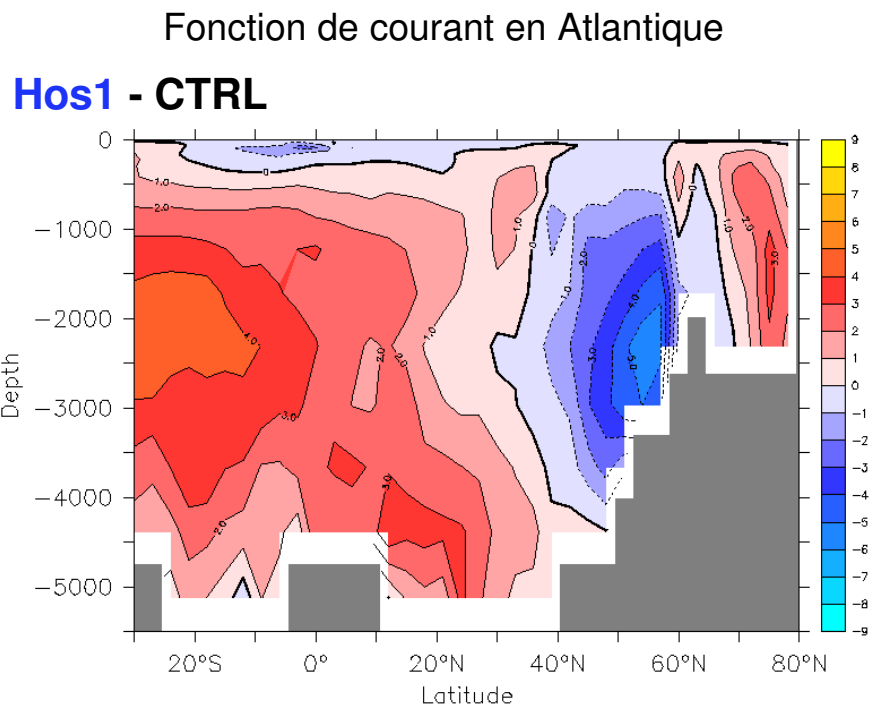
Réponse climatique

- 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

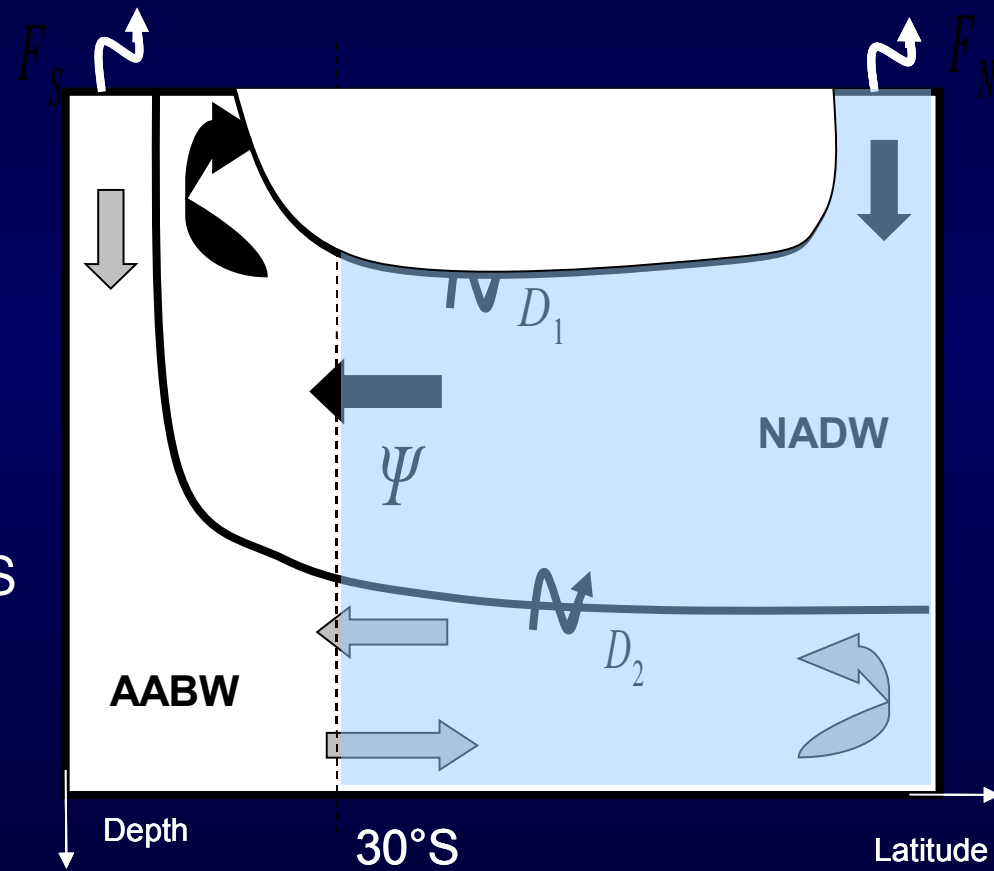
Quantification de l'effet des trois processus

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

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

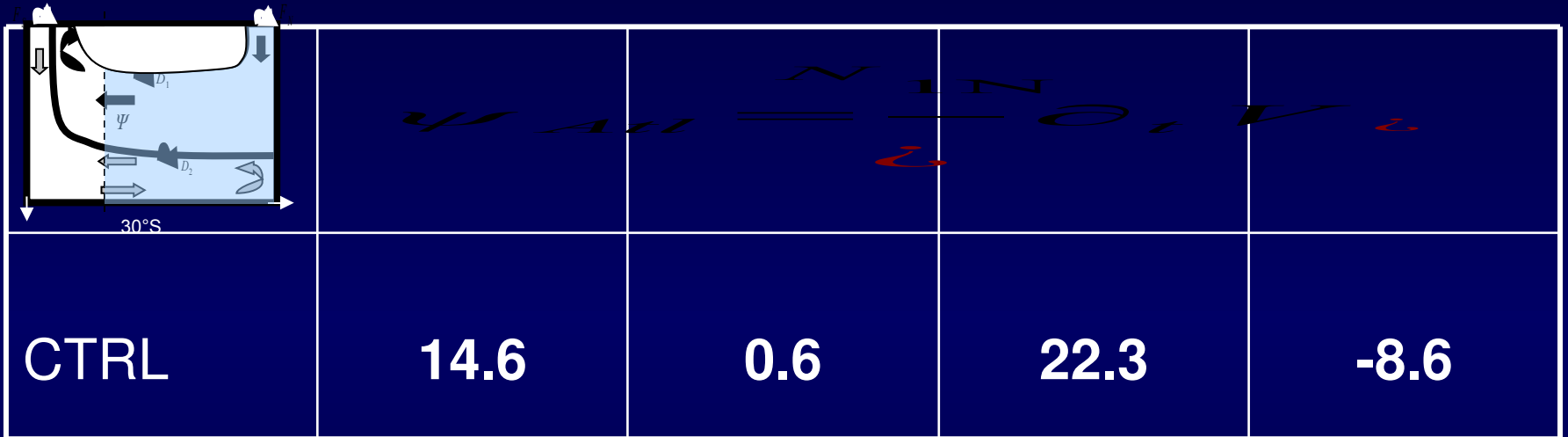
Et réconcilie dynamique et thermodynamique de l'océan

- Bilan dans l'Atlantique, nord de 32°S eaux plus denses que 27.6 kg/m³



$$\psi_{min} = -\partial_x V_2$$

Evaluation quantitative du nouvel équilibre

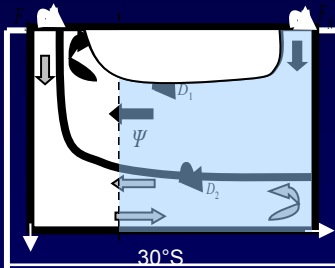


The diagram on the left shows a cross-section of the ocean with a circulation loop. A thick black line represents the circulation path, with arrows indicating flow direction. Labels include D_1 (downward flow), D_2 (upward flow), and ψ (stream function). A latitude of 30°S is marked. The table to the right contains numerical values for different parameters.

	ψ	$\Delta \theta_1$	V_1	V_2
CTRL	14.6	0.6	22.3	-8.6

En Sv, moyenne sur 100 ans

Evaluation quantitative du nouvel équilibre



$$\psi_{AH} = \frac{1}{\rho_0} \int_0^h \rho \, dz$$

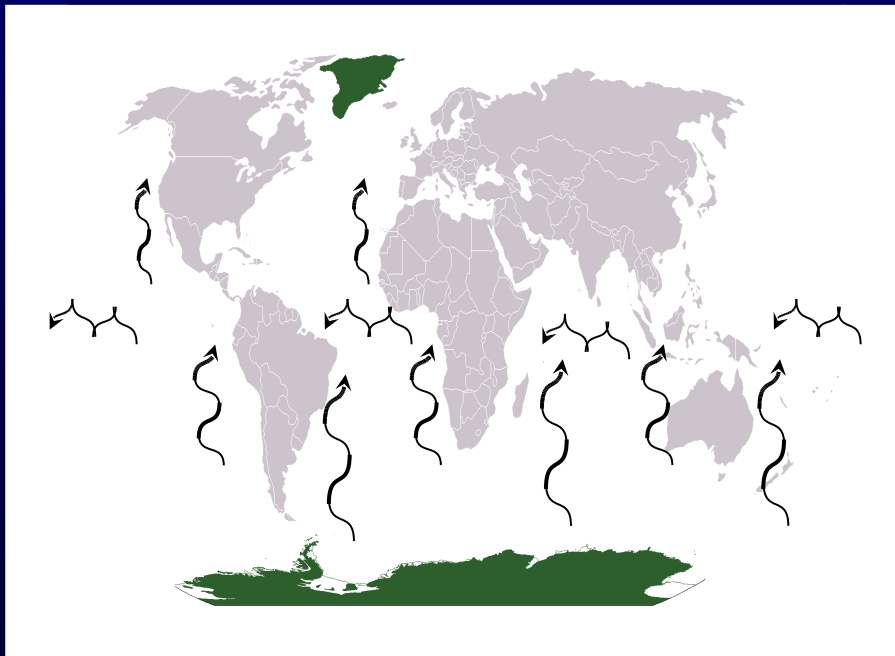
CTRL	14.6	0.6	22.3	-8.6
HosWind-CTRL	2.4	4.1	-2.6	0.9
Hos1-HosWind	1.3	-0.1	1.3	0.1

En Sv, moyenne sur 100 ans

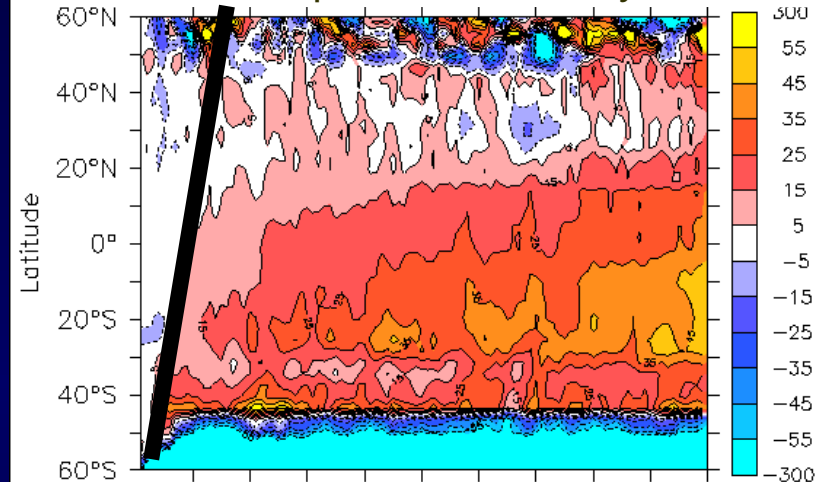
Propagation des anomalies

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

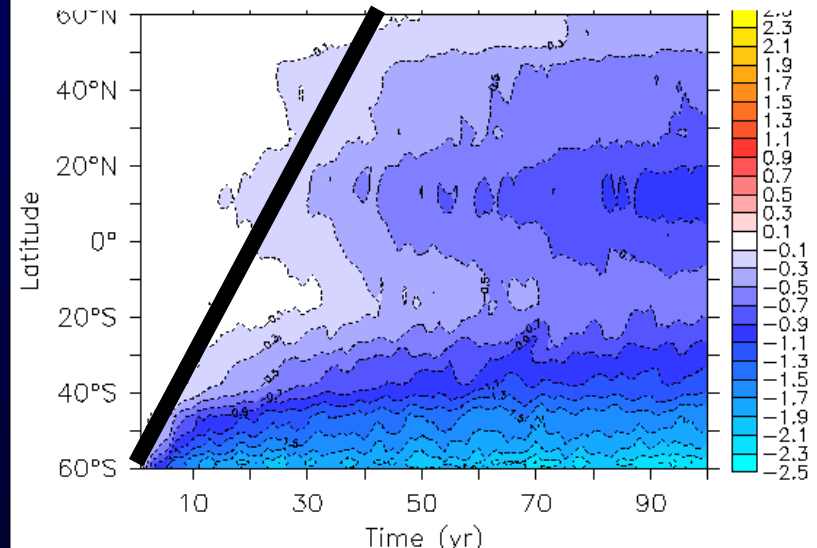
Kawase 1987 ; Johnson and Marshall 2002



Anomalies de profondeur de Pycnocline



Anomalies de salinité de surface



Rôle de la vitesse de fonte

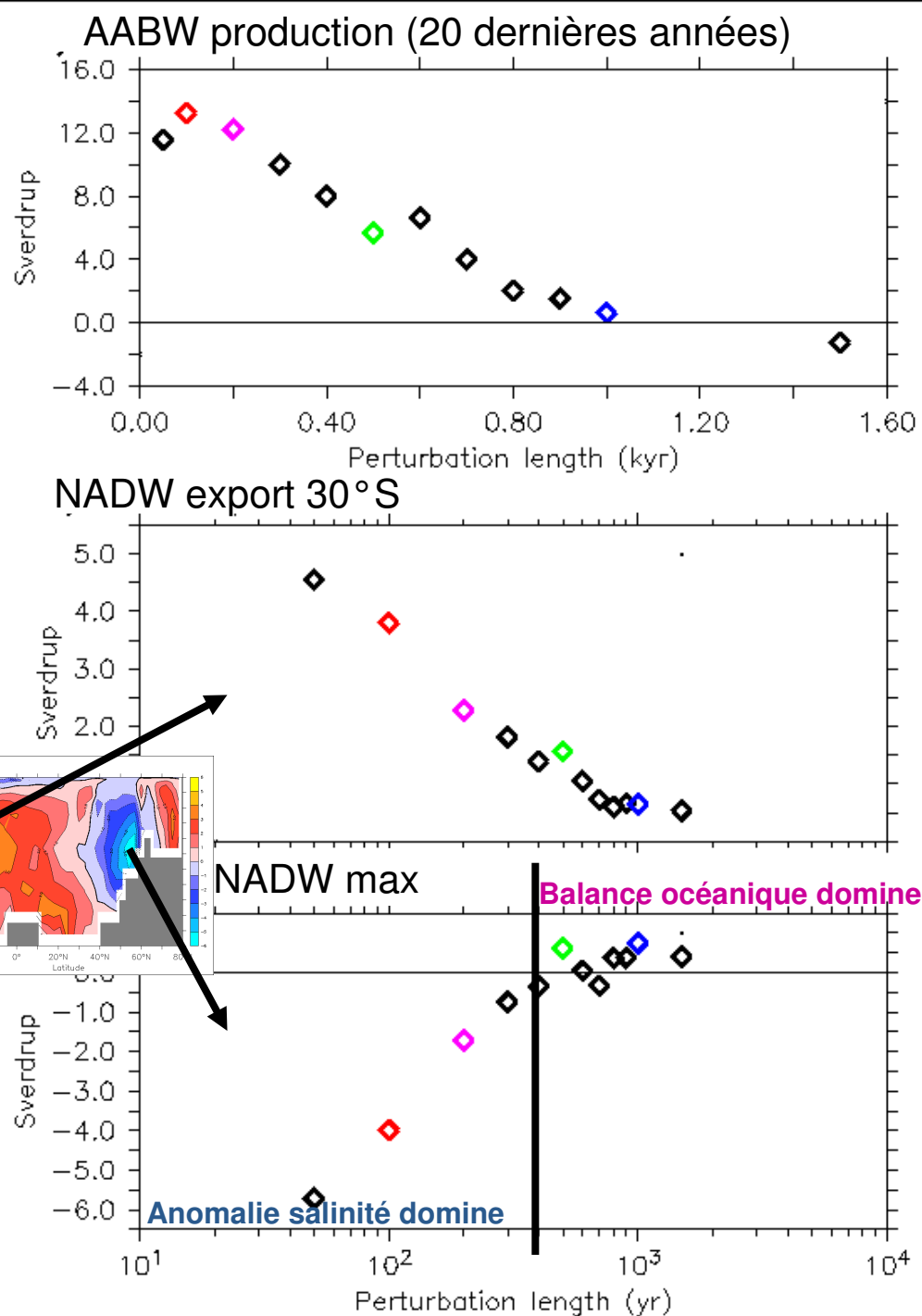
- Les différents processus ont des échelles de temps proches (décennales) mais différentes
- Leur mode d'action peut s'atténuer dans le temps de façon différente
- La quantité et la vitesse de fonte est-elle importante ?
- On analyse à présent le rôle de la « **vitesse de libération** » de l'eau douce,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

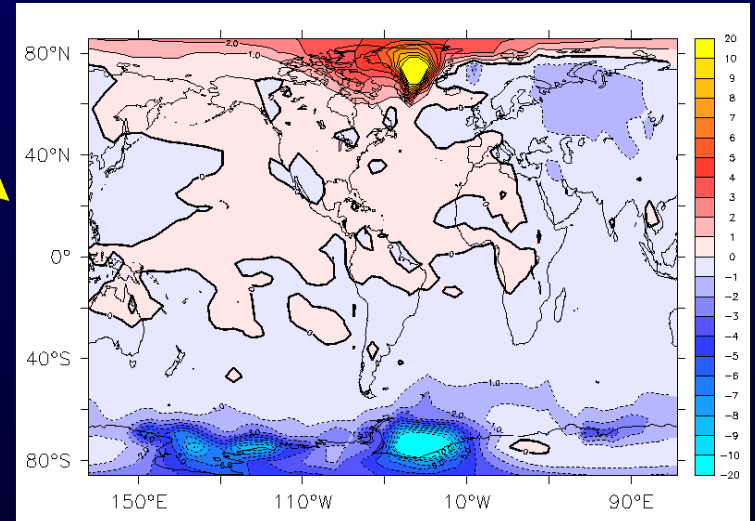
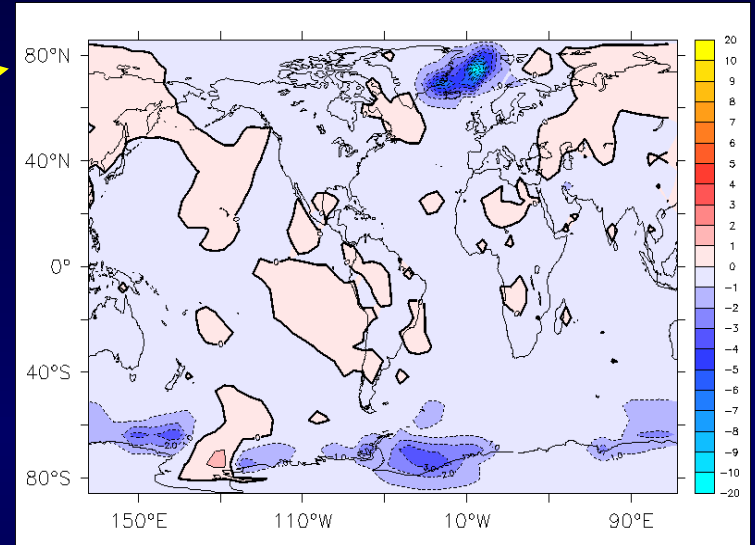
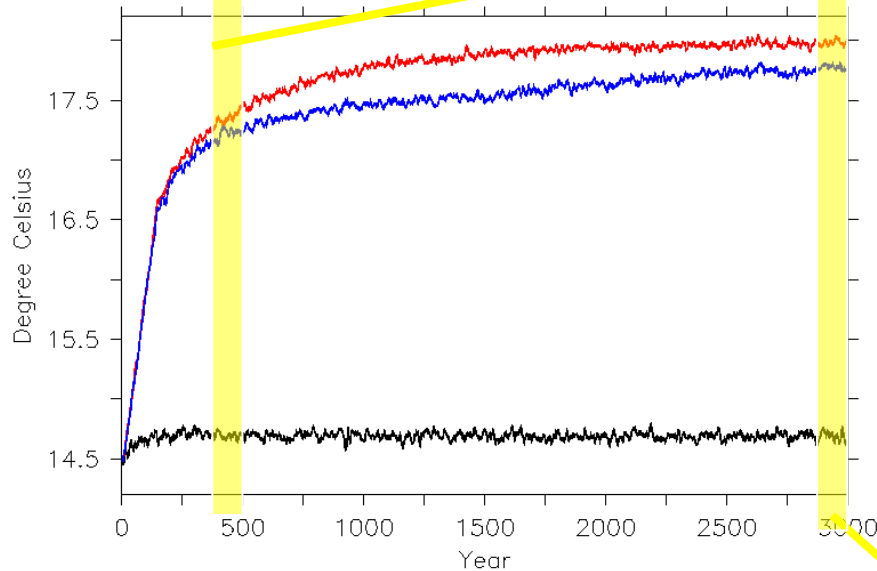
Plan

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

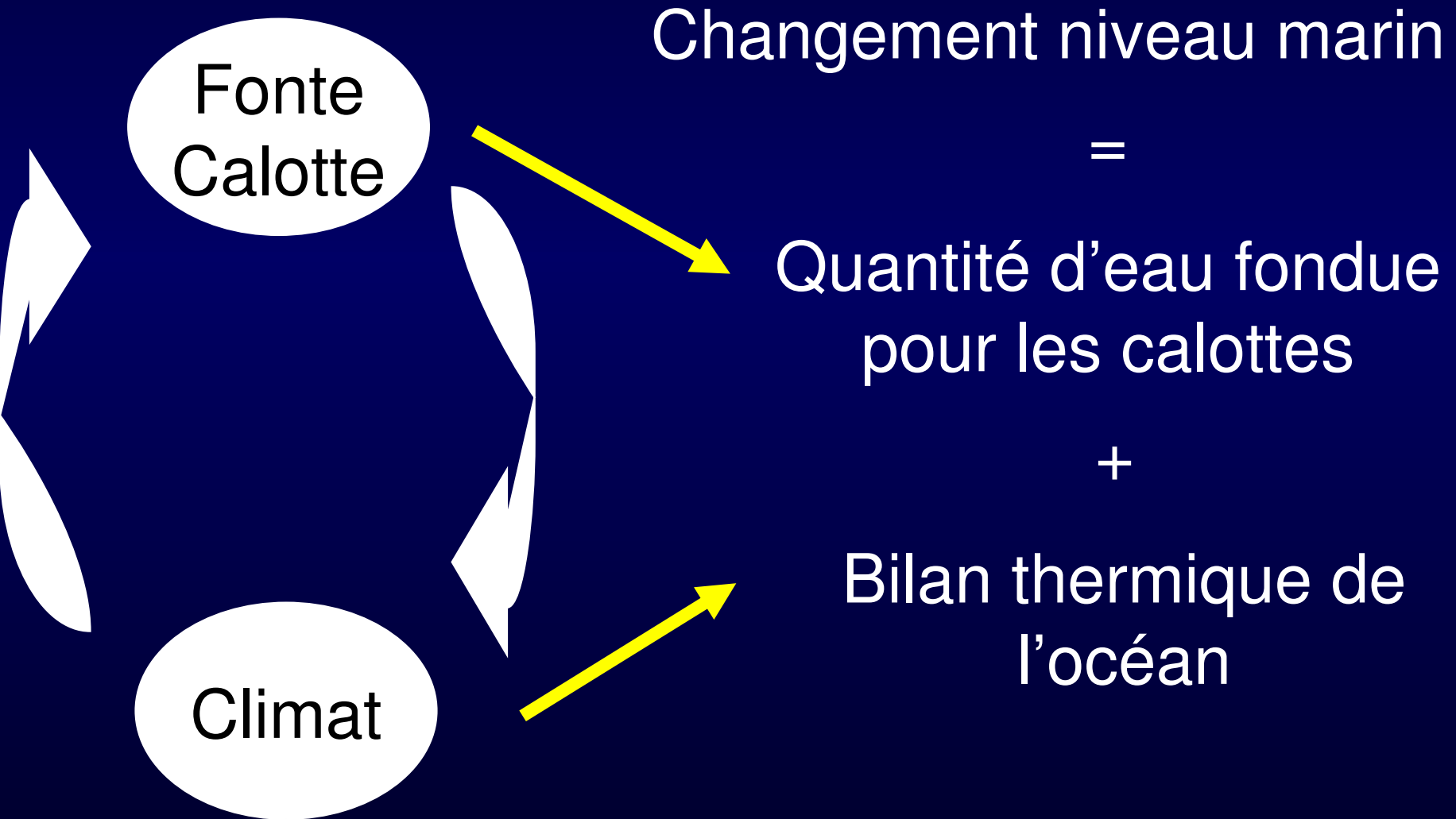
Signe ?

Climat

- Température
- Précipitation

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

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



Calotte groenlandaise

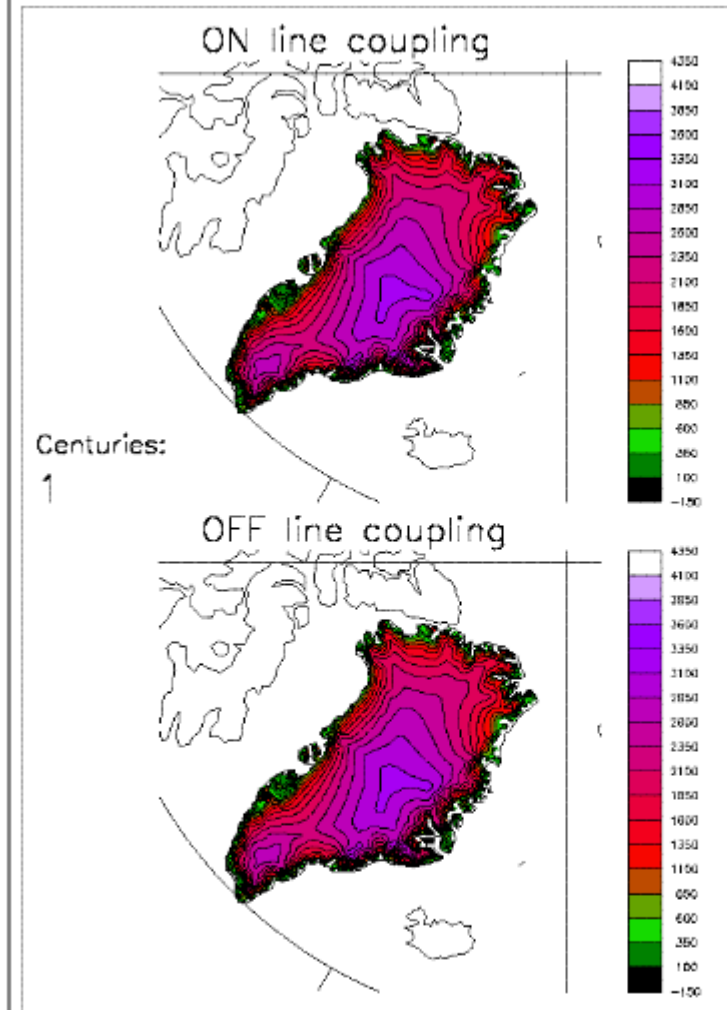
« on line » : la calotte groenlandaise fond d'un équivalent de **7.9 m en 3000 ans**

« 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

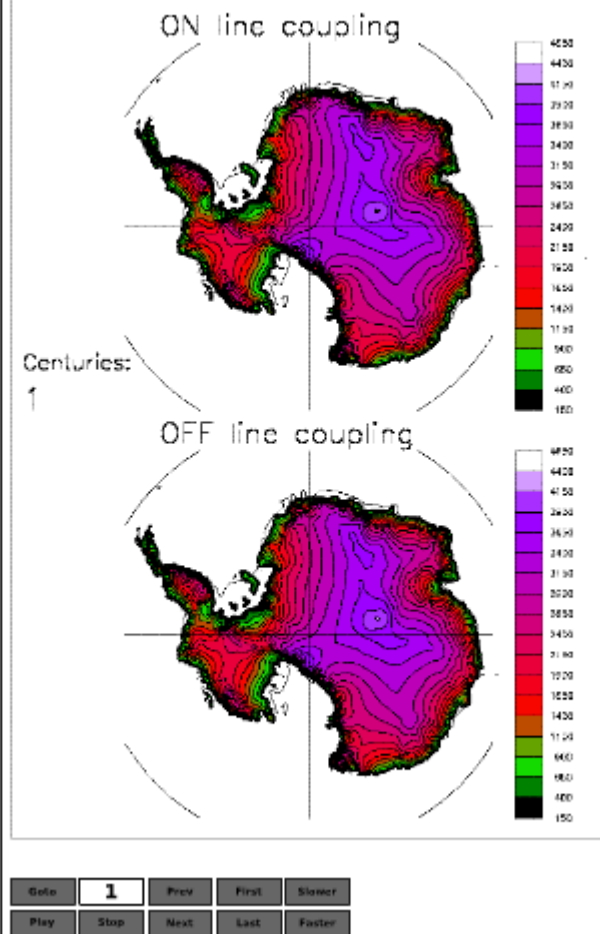
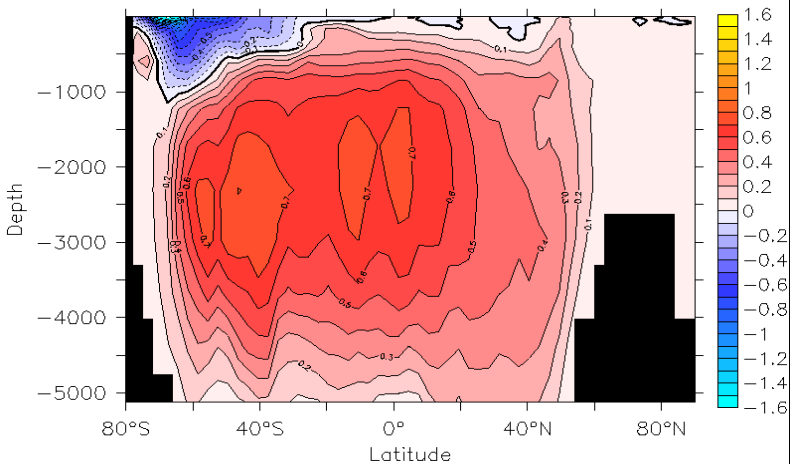
Rétroaction **positive** globale de **4.6 m**



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 4XCO₂

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

Web: http://dods.ipsl.jussieu.fr/dssce/public_html/index.html