



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

**Didier Swingedouw**

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

# Les calottes polaires

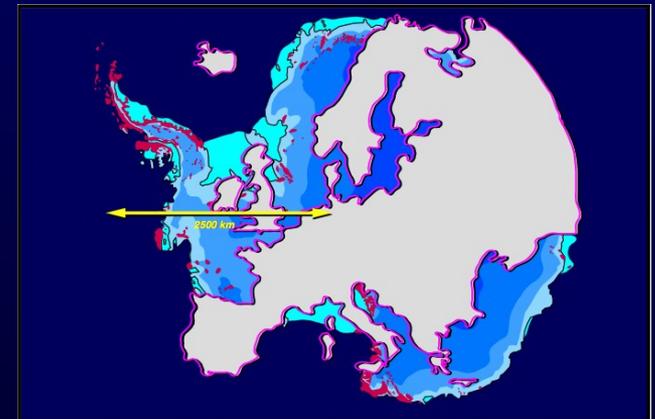
## Groënland

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

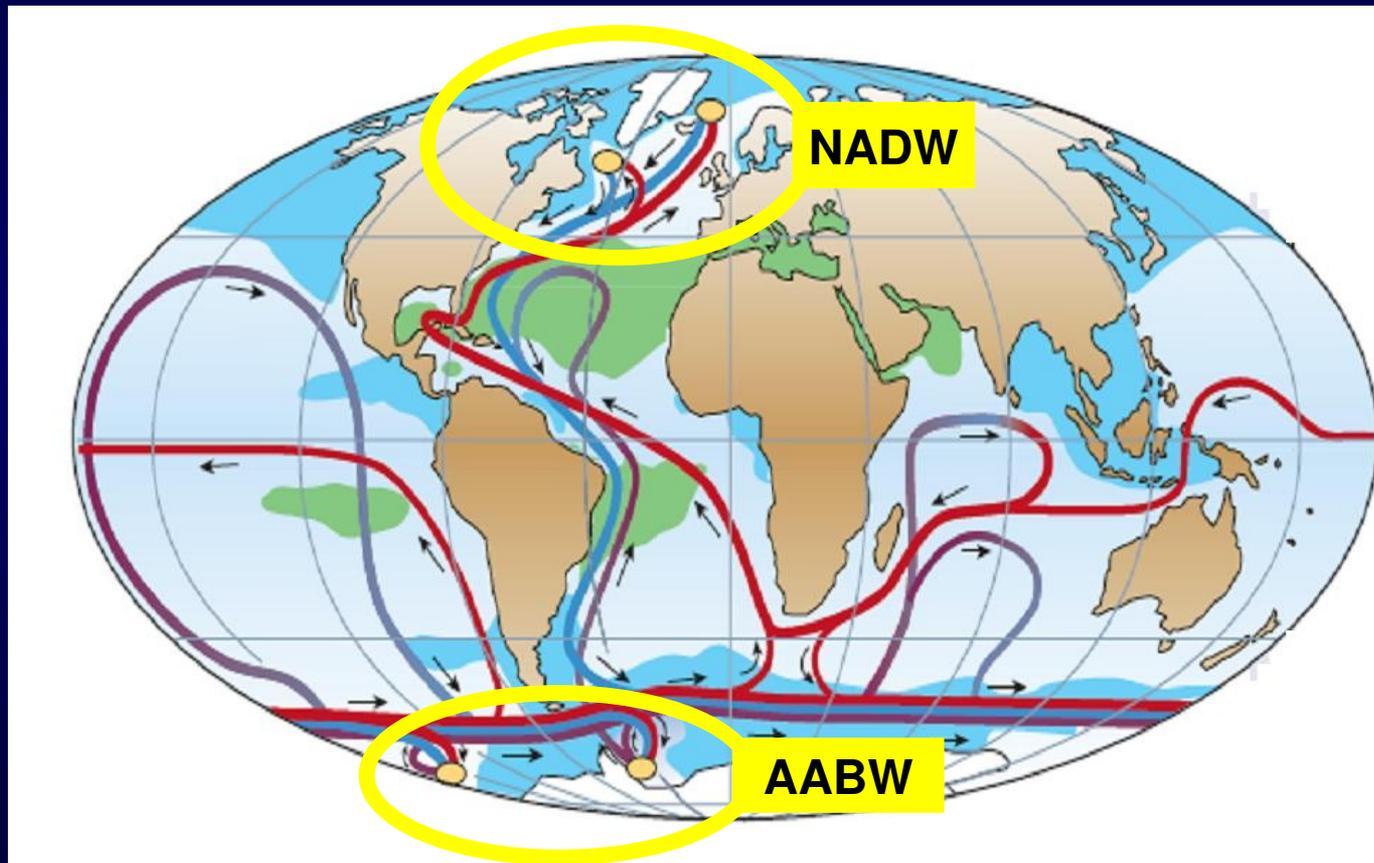


## Antarctique

- ❖ 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)



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 brutales (Younger Dryas, McManus et al. 2004) et semblent liées à des fontes brutales d'icebergs en Atlantique Nord...



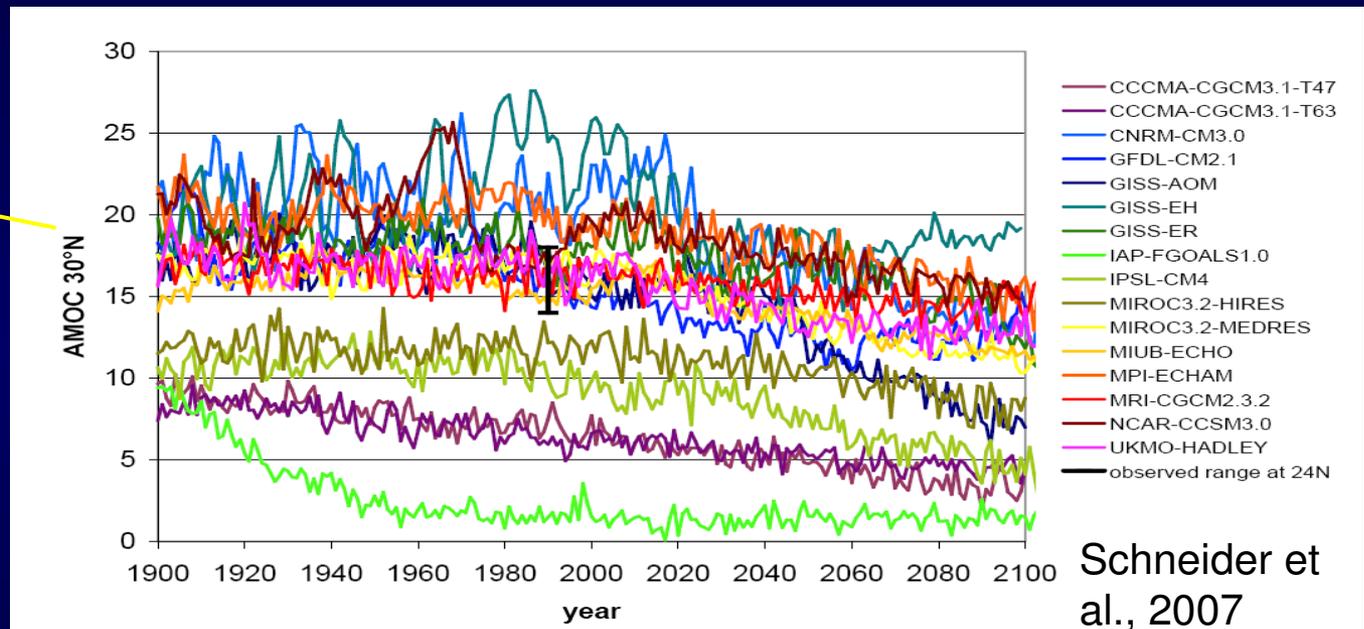
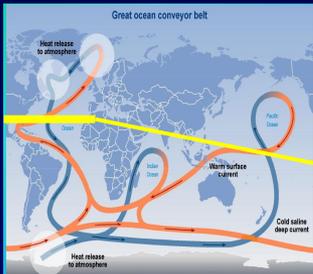
➤ Mais aussi dans l'océan Austral, où il semble exister des traces de fontes massives d'icebergs lors de la dernière déglaciation (Kanfoush et al. 2000) ...



➤ 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 ?

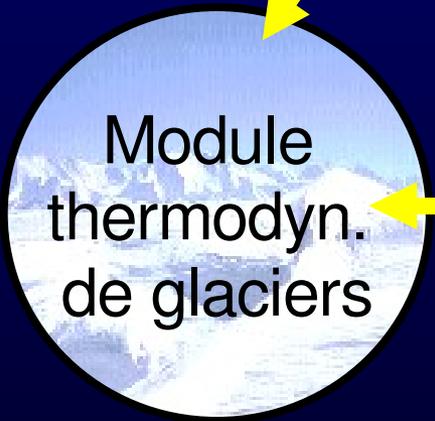
# Plan

- 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



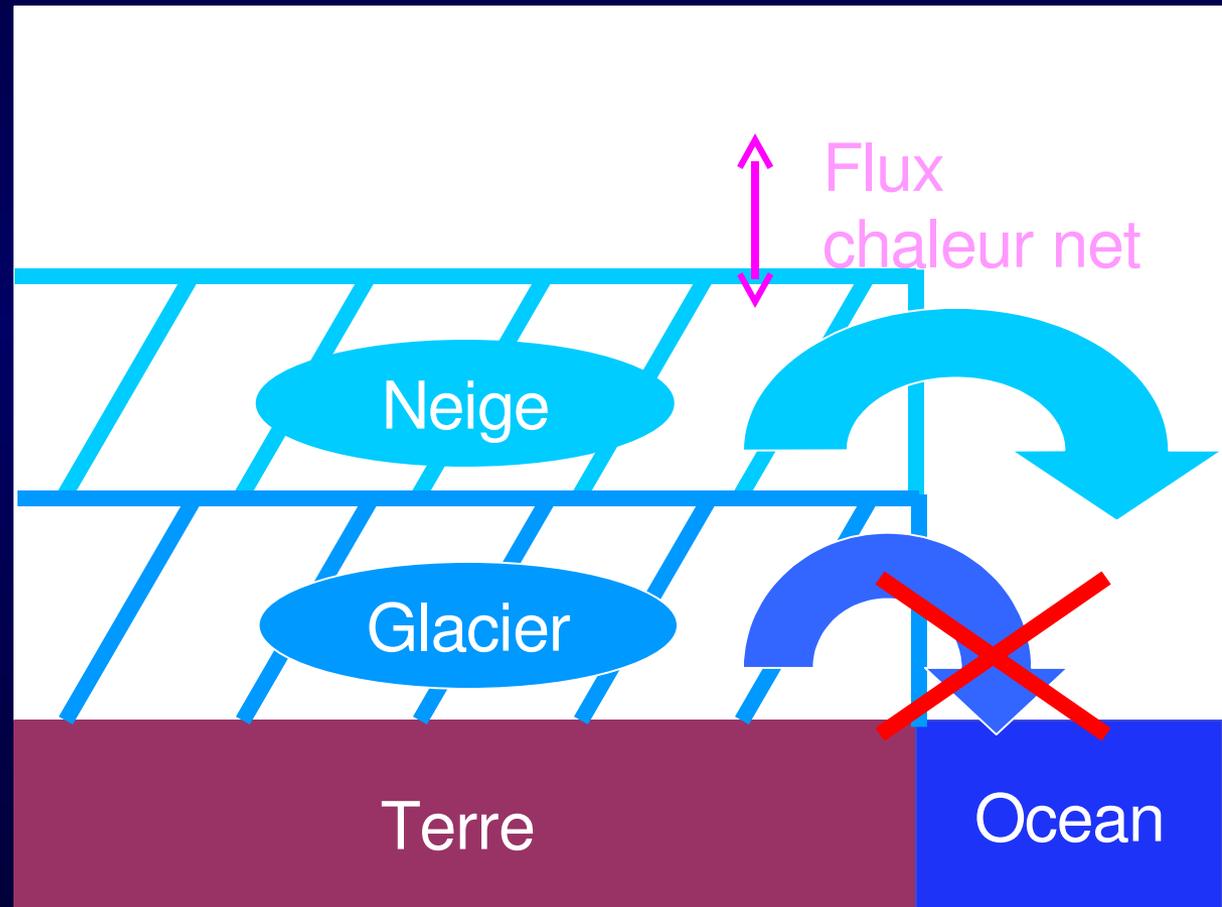


# Protocole expérimental 1

Deux versions du  
modèle IPSL-CM4 :

1) Avec fonte des  
glaciers

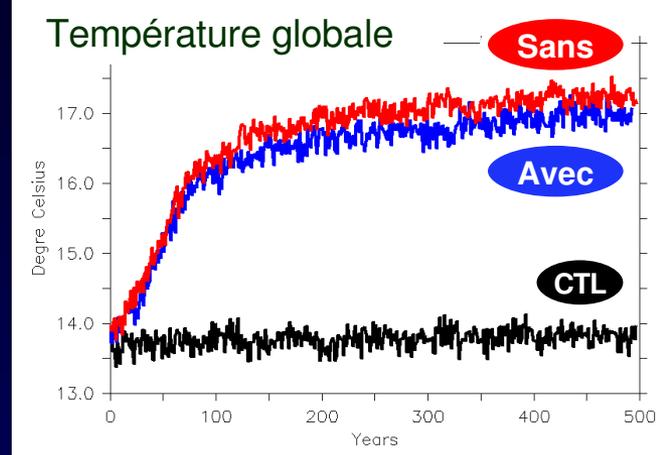
2) Sans fonte des  
glaciers



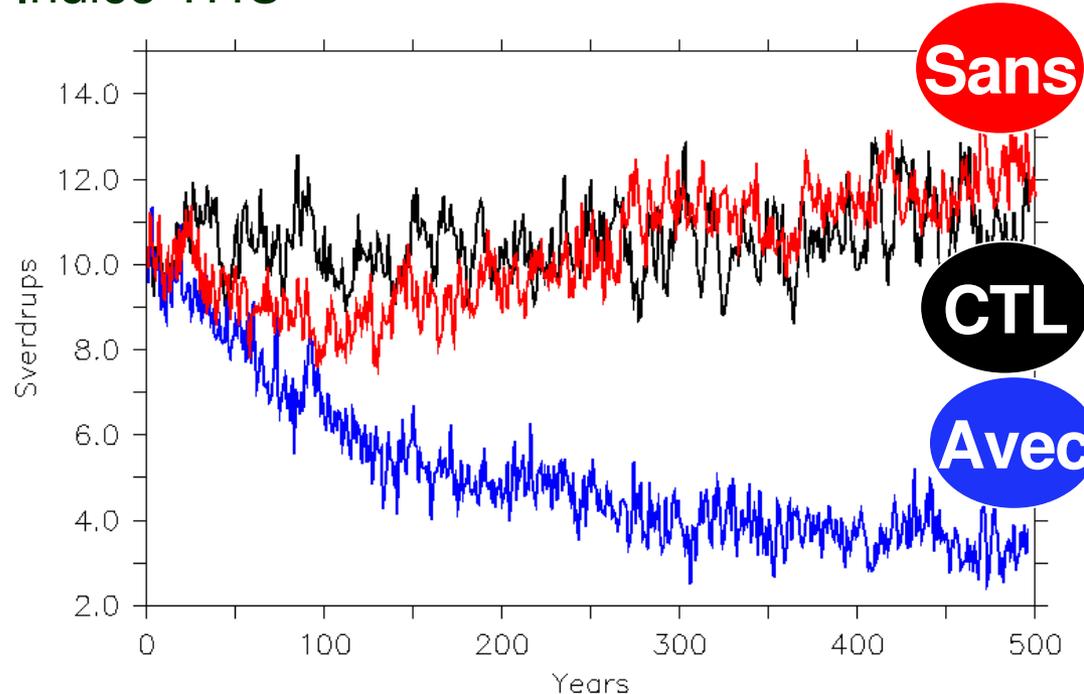
# Réponse de la THC sur 500 ans à 2xCO2

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

➤ Fonte calotte antarctique < 0.02 Sv = négligeable



## Indice THC



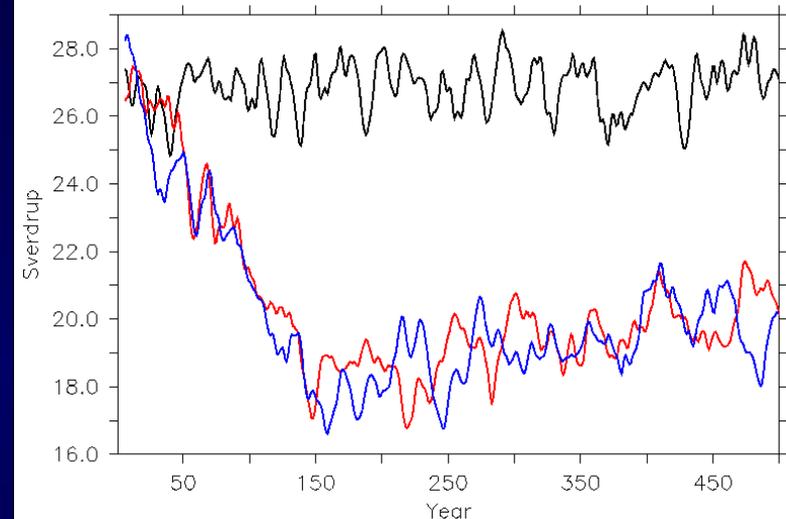
# Un résultat dépendant du modèle

➤ 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)



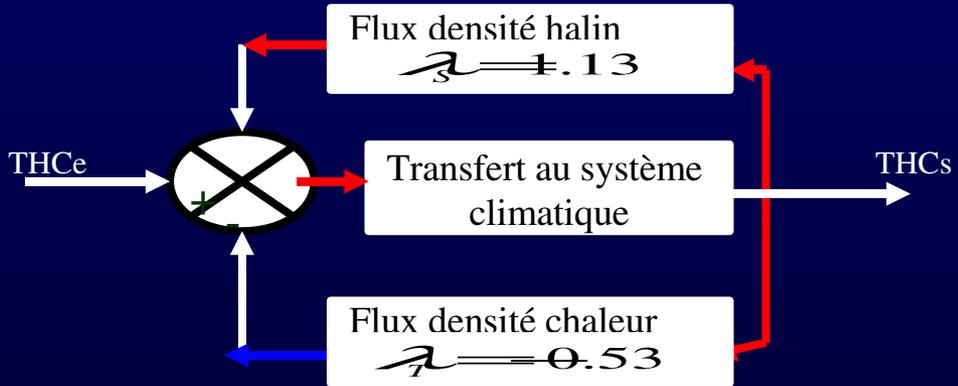
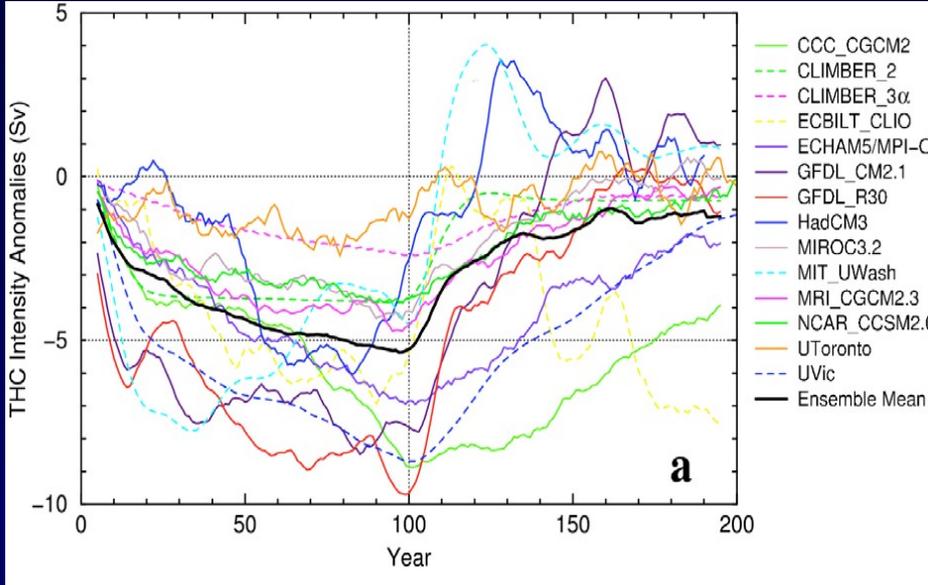
1

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)



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

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

# 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

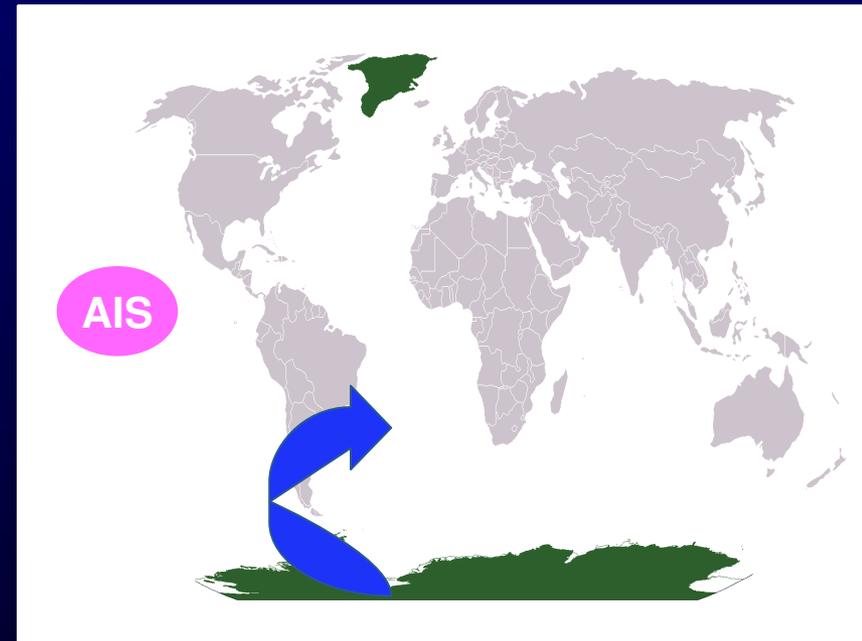
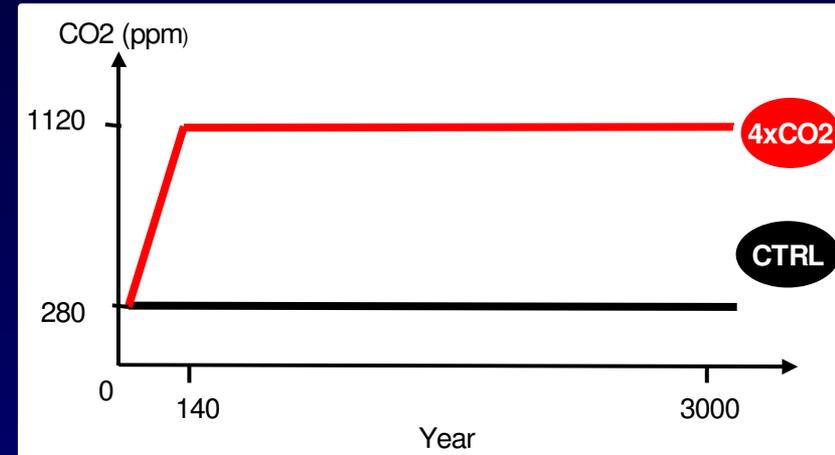
# Outil No2 : LOVECLIM



# Protocole expérimental

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

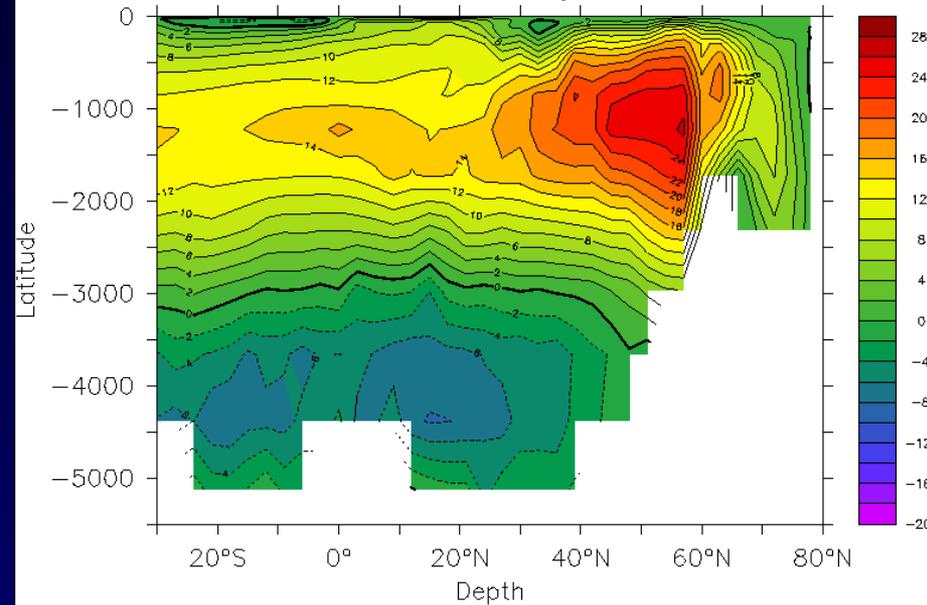
- **Sans** la fonte des calottes polaires (**fixé**)
- **Avec** la fonte des calottes groenlandaise et antarctique (**AGIS**)
- **Avec** la fonte de la calotte groenlandaise uniquement (**GIS**), l'autre est fixée
- **Avec** la fonte de la calotte antarctique uniquement (**AIS**), l'autre est fixée



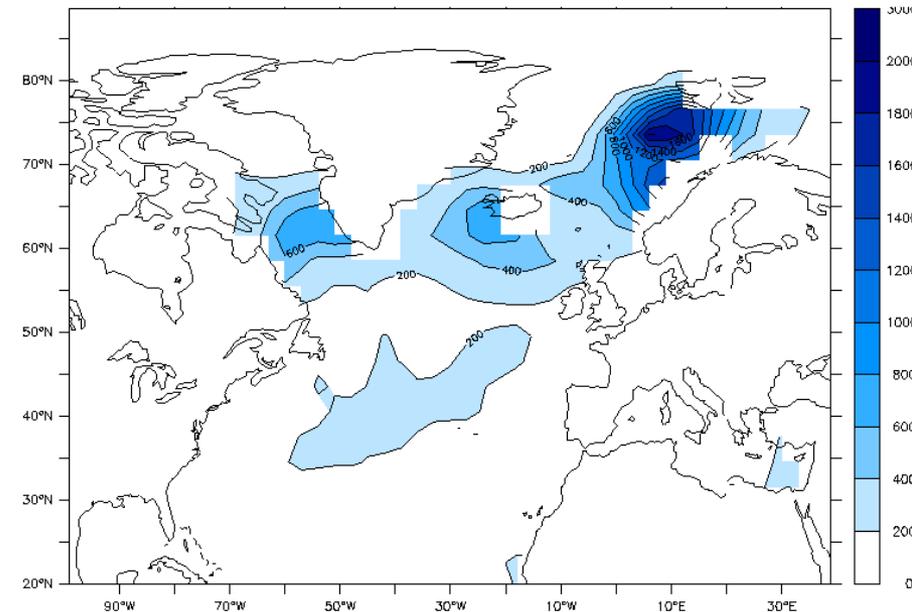
# Climatologie de LOVECLIM

- 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

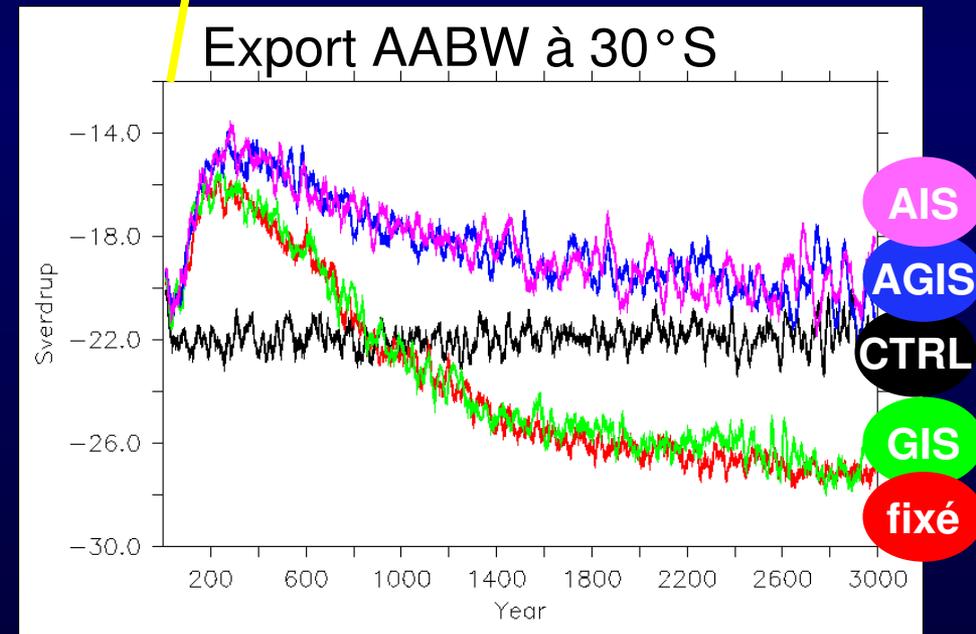
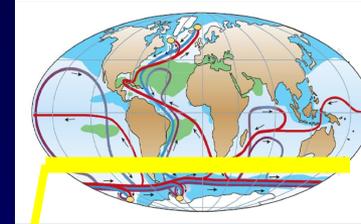


Profondeur de la couche de mélange



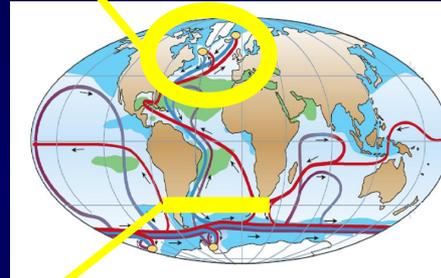
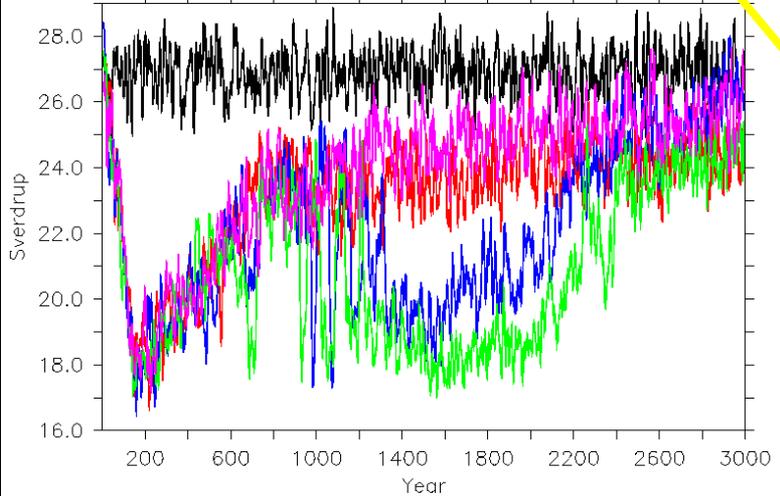
# Réponse de la cellule AABW dans les scénarios

- 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 ?



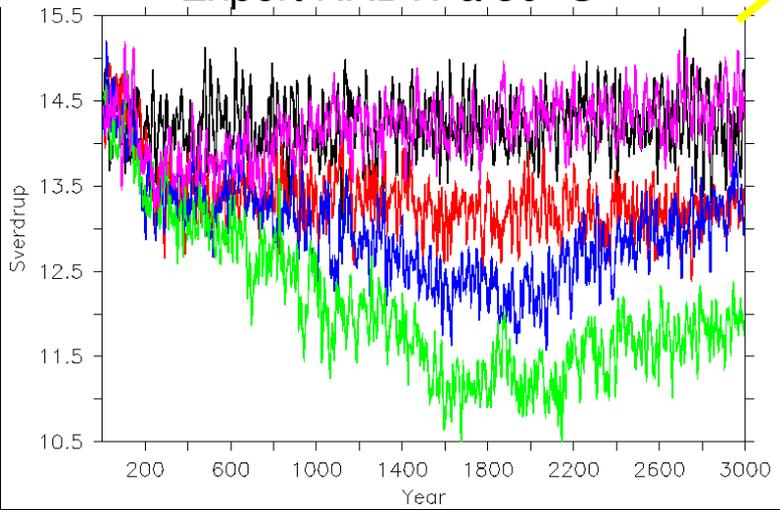
# Réponse de la THC dans les scénarios

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...



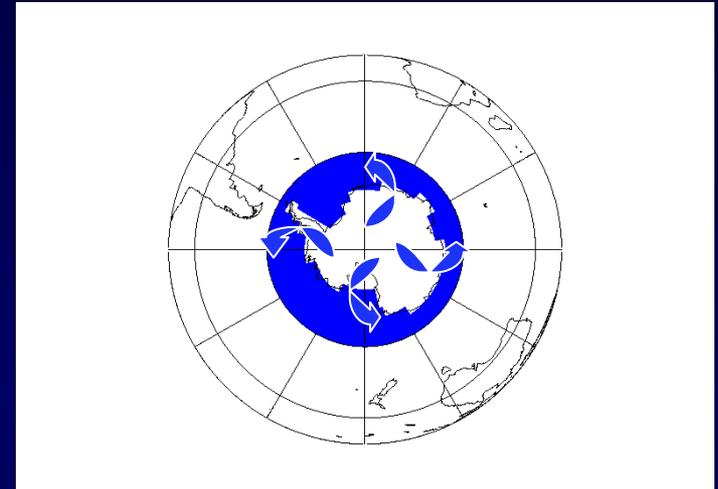
# Protocole expérimental de Stouffer et al.

➤ On ajoute 1 Sv d'eau douce dans l'océan Austral au sud de  $60^{\circ}\text{S}$  pendant 100 ans (Hosing sud, Hos1)

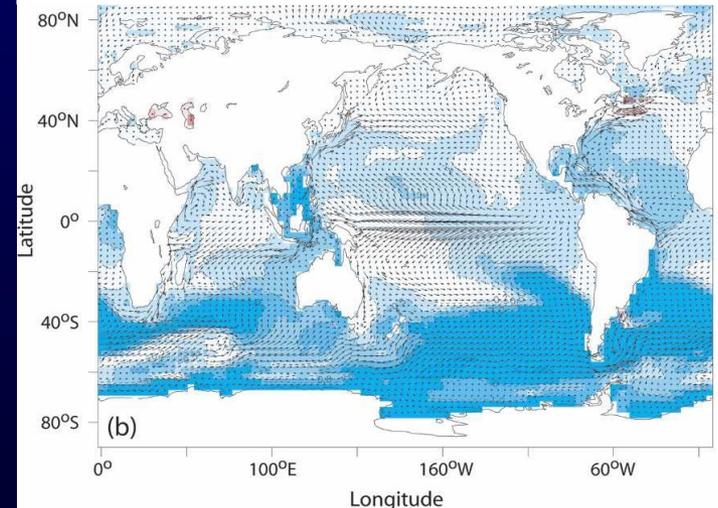
➤ Cela représente une quantité d'eau douce équivalente à la calotte groenlandaise

➤ 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



Anomalies de salinité de surface

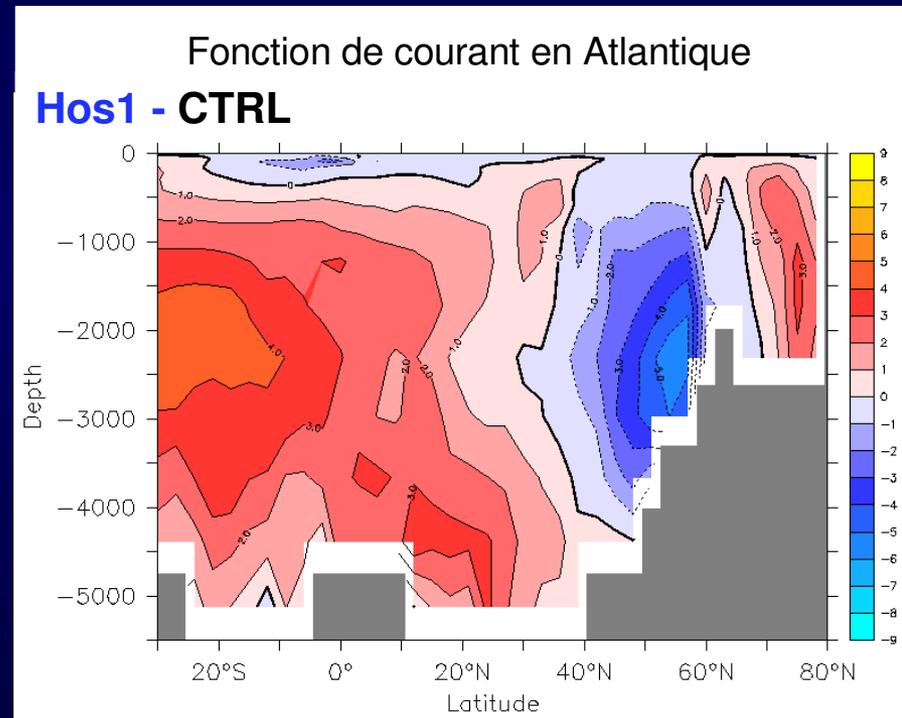


# Réponse de la cellule NADW dans LOVECLIM

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

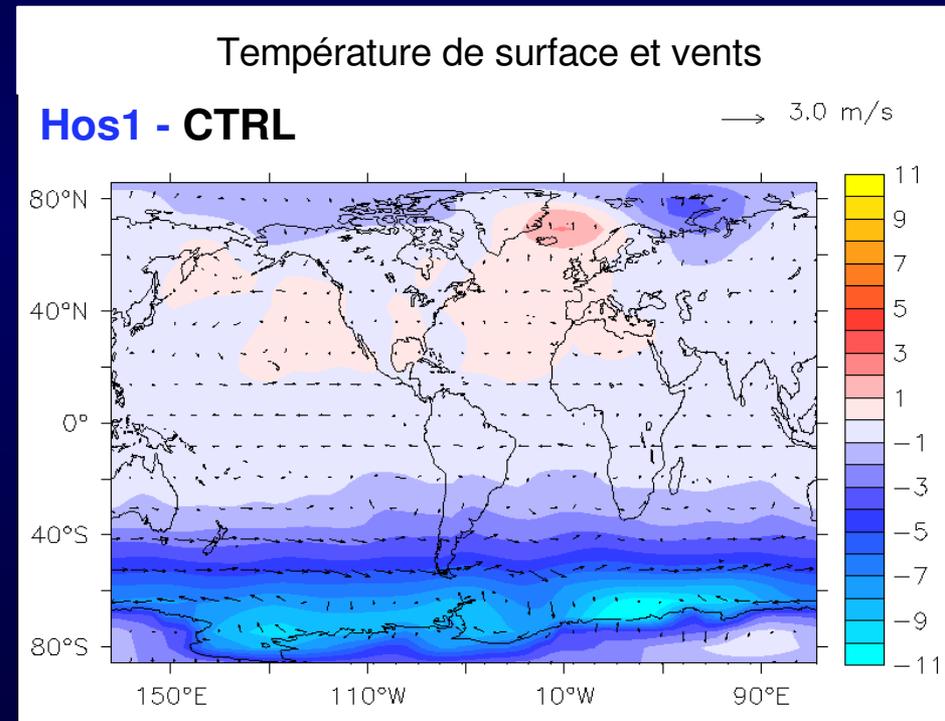
➤ On remarque l'apparition d'un dipole en terme d'anomalies de la fonction de courant :

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



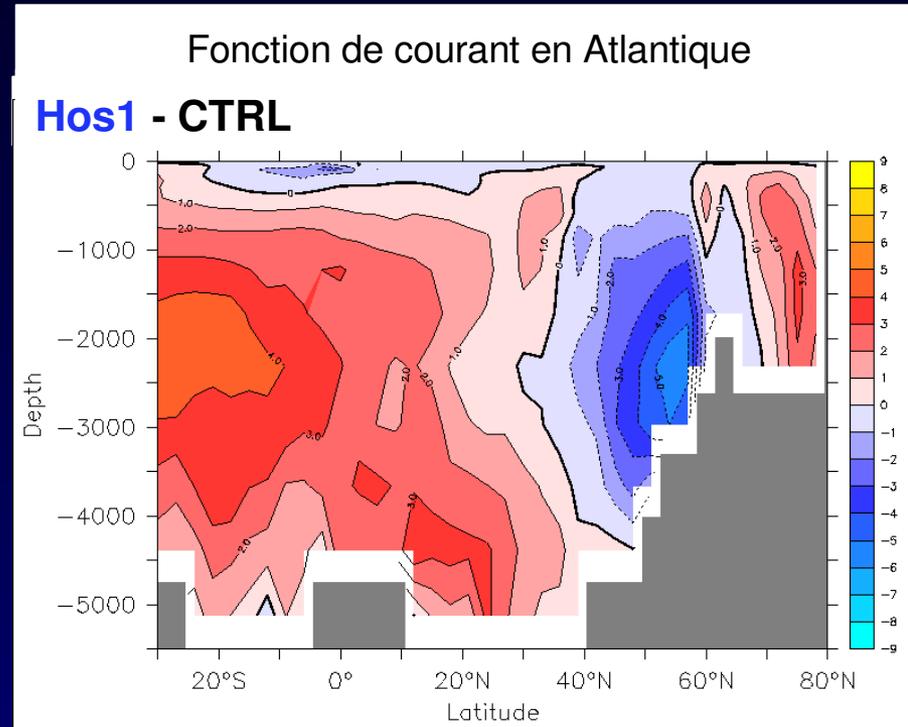
# Réponse climatique

- 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 NADW (Toggweiler and Samuels 1995)
- Pour tester cet effet, on fait une expérience de sensibilité similaire 0 **Hos1** mais 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

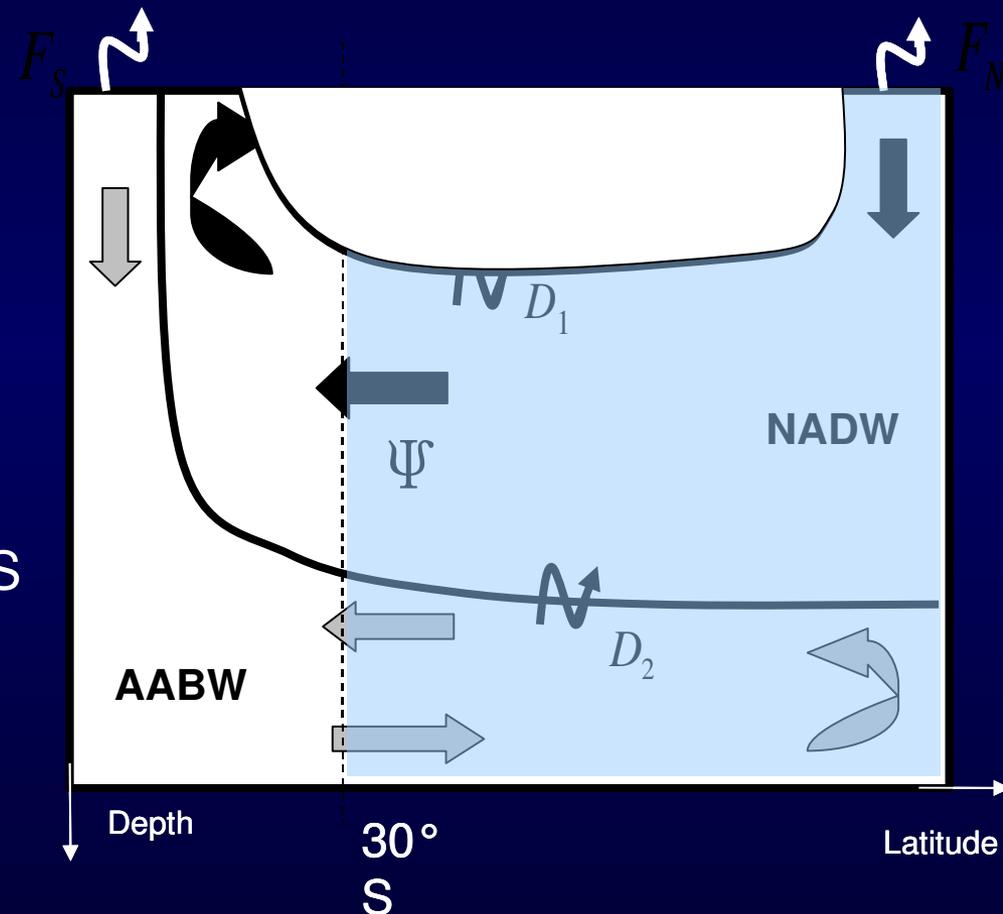
La technique du binning en densité donne **l'équilibre formation-consommation** des masses d'eaux

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

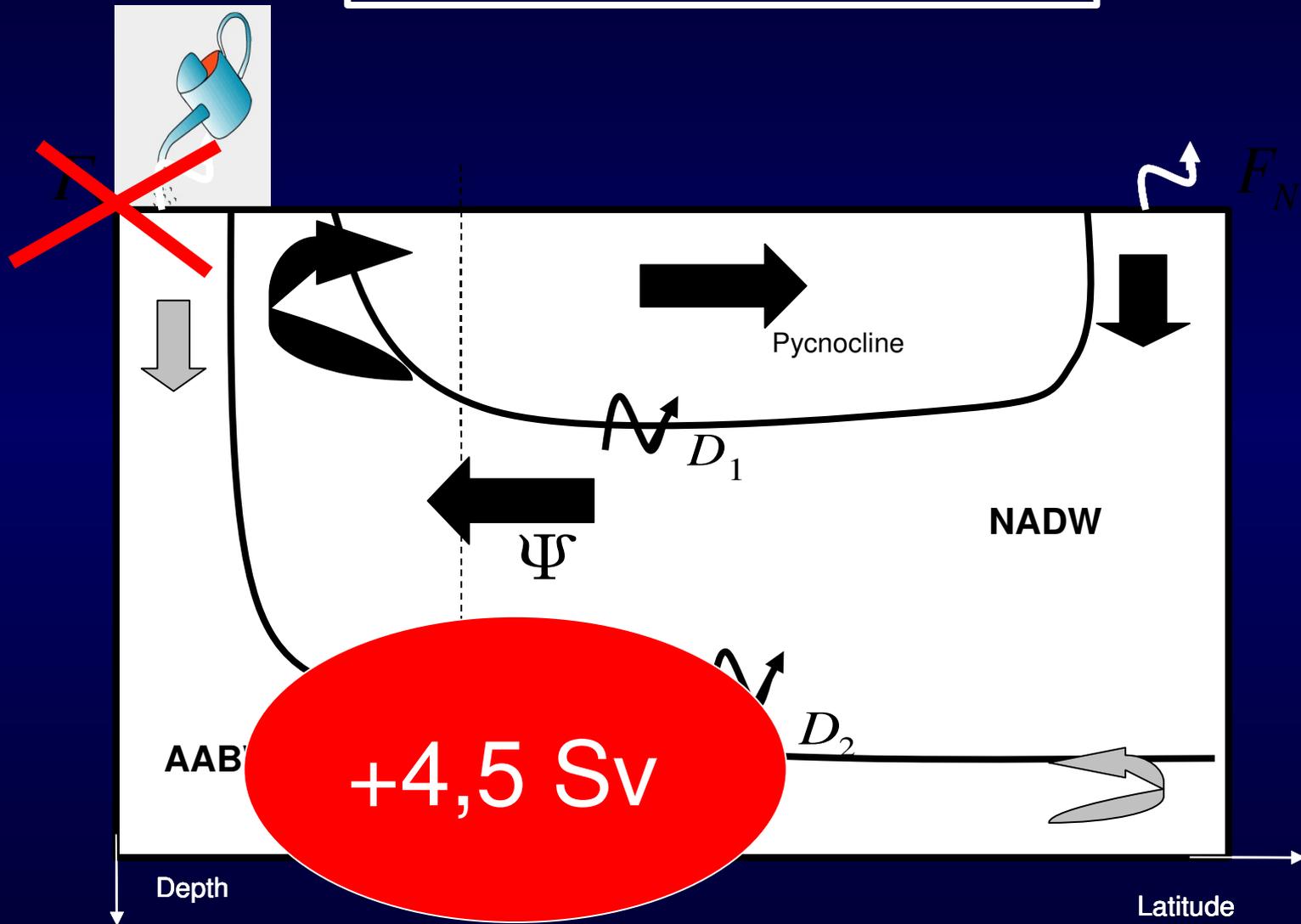
Et réconcilie dynamique et thermodynamique de l'océan

- Bilan dans l'Atlantique, nord de 32°S  
eaux plus denses que 27.6 kg/m<sup>3</sup>

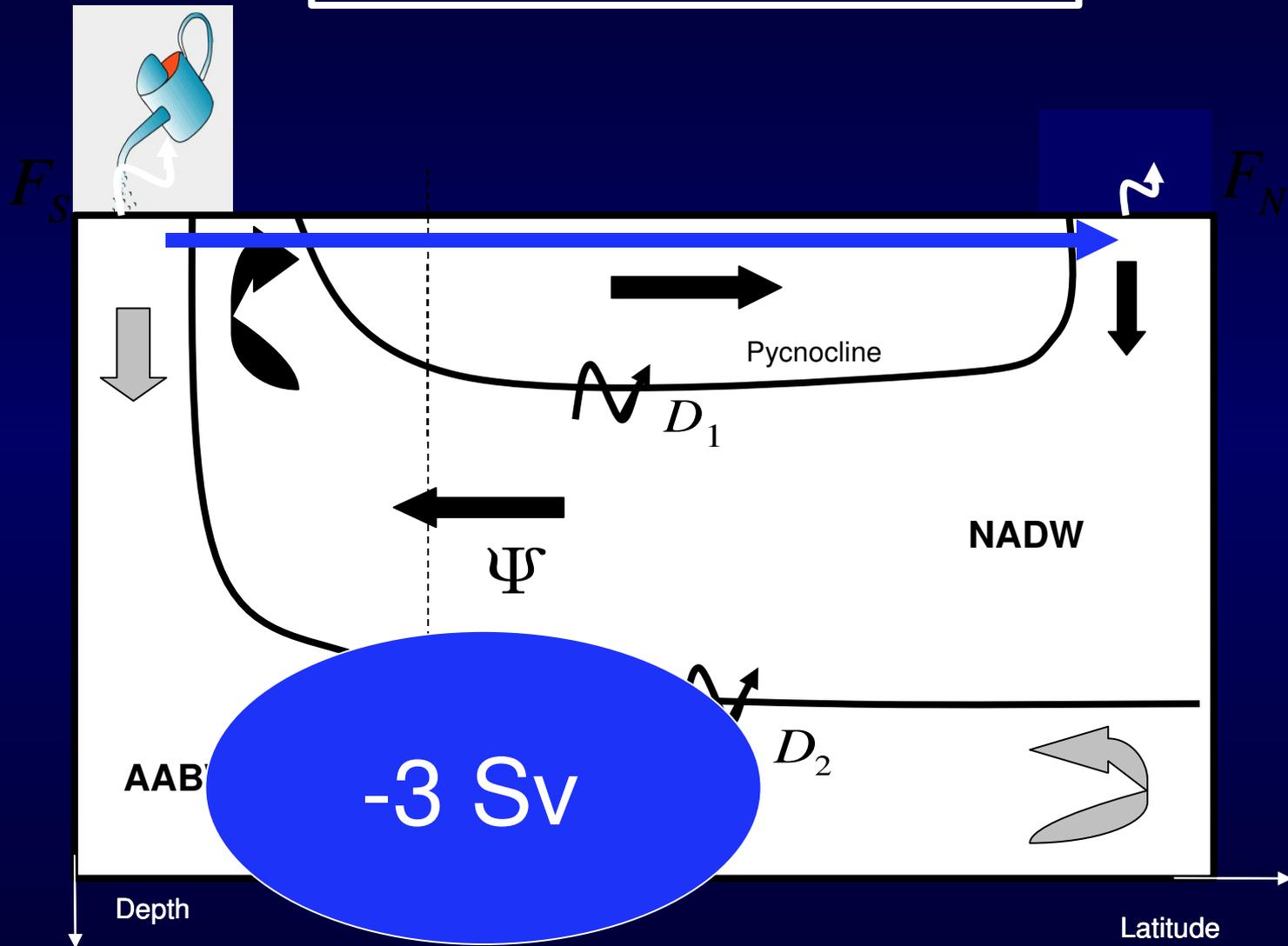
$$\psi_{Atl} = -\partial_t V_N + F_N - D_{IN}$$



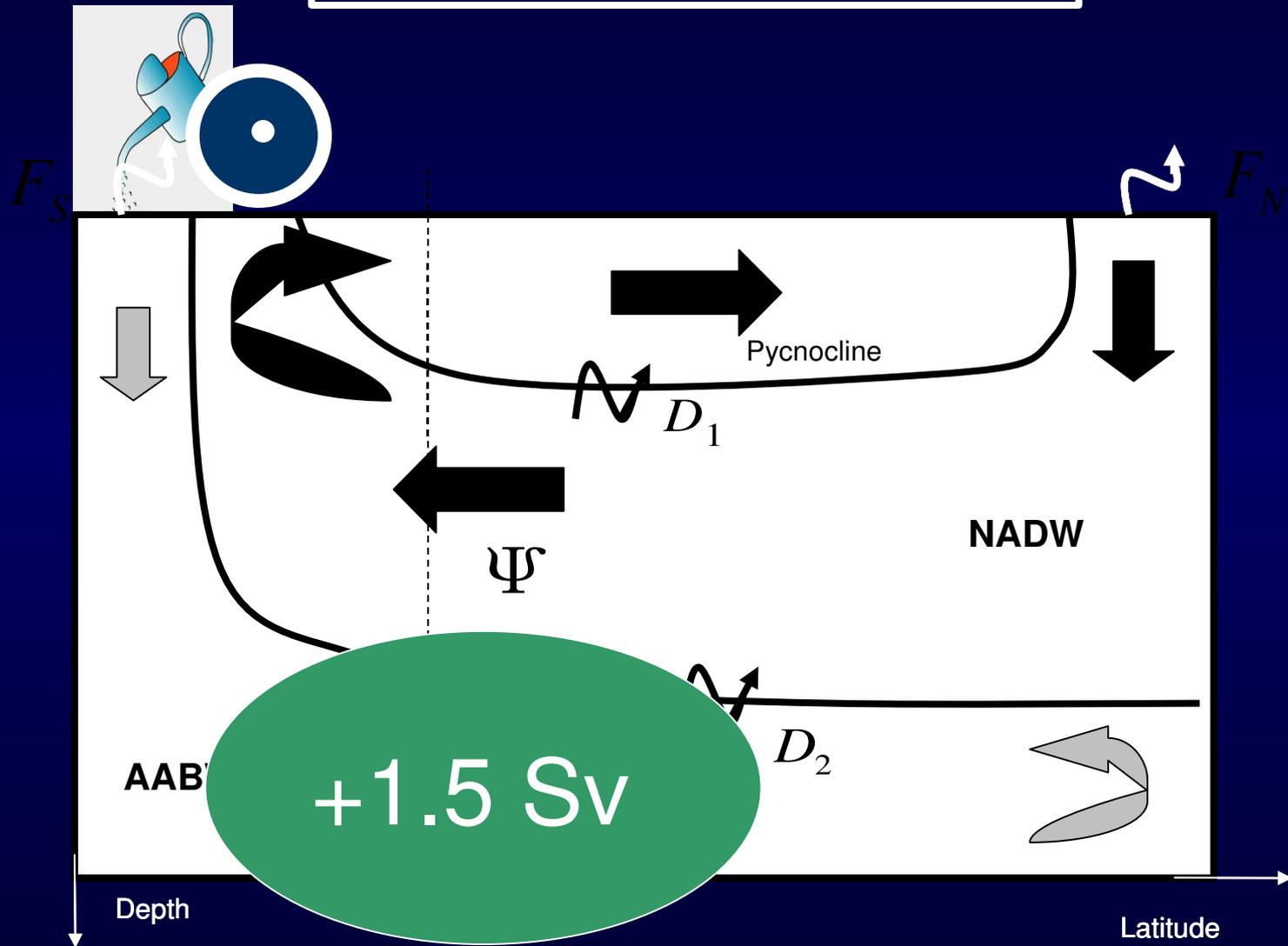
# Mécanismes 1



# Mécanismes 2



# Mécanismes 3

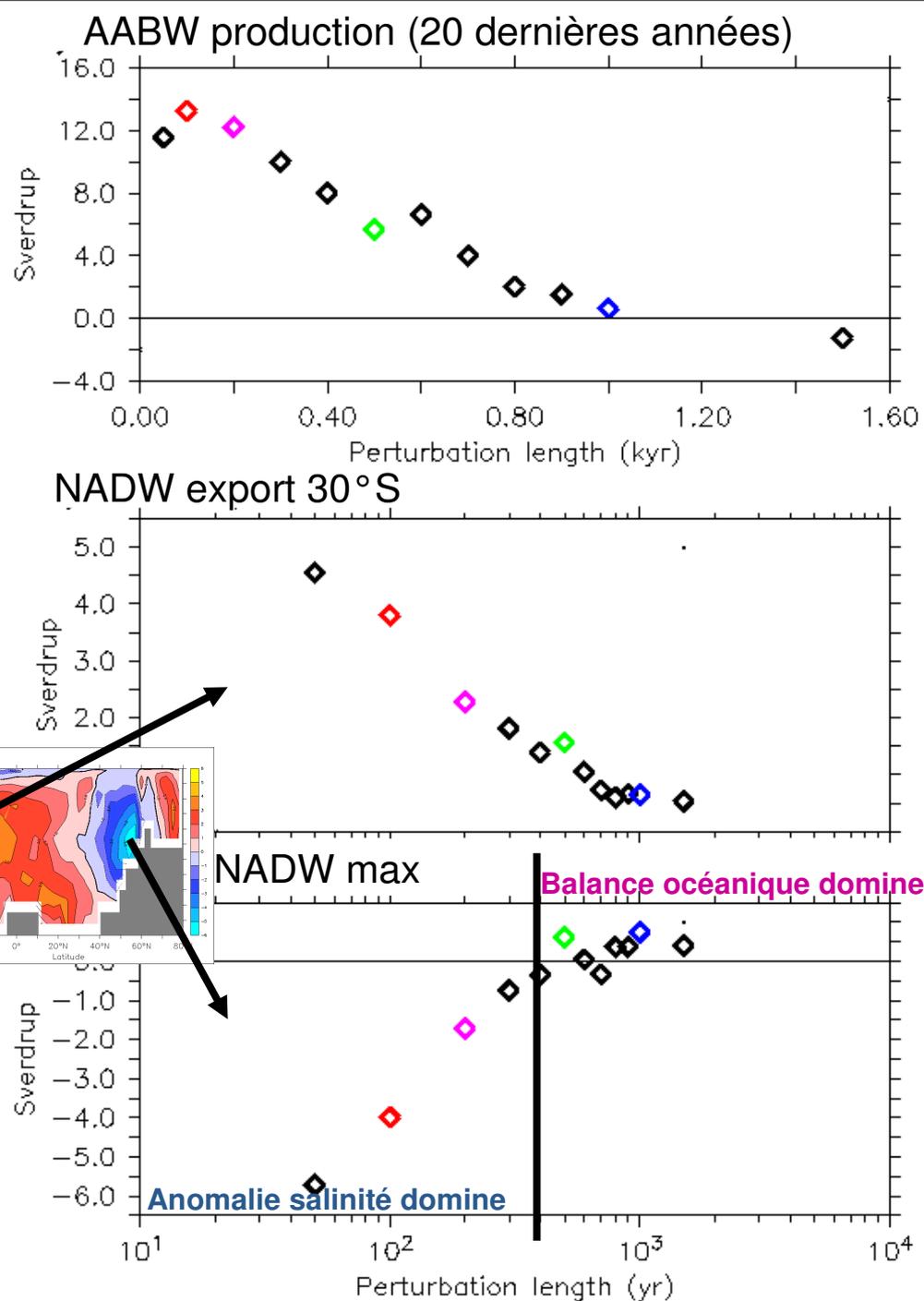


# Diagramme de phase

➤ Selon la vitesse à laquelle on arrose le sud, la cellule NADW réagit différemment

➤ Vitesse  $> 0.2$  Sv = 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

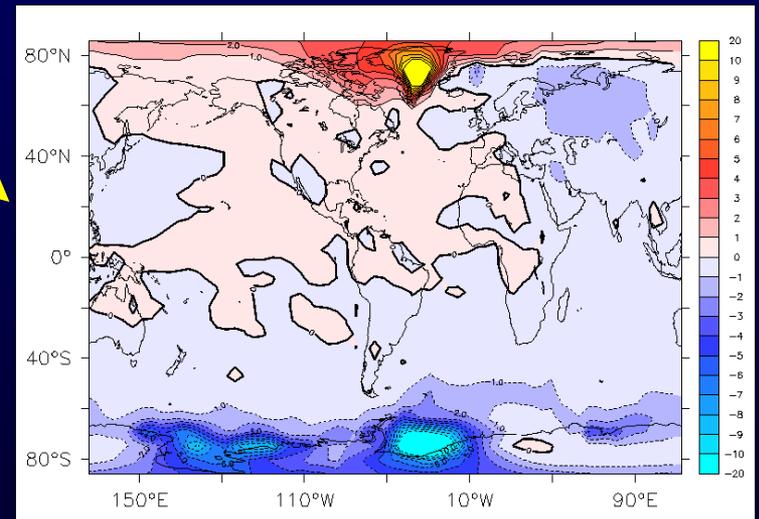
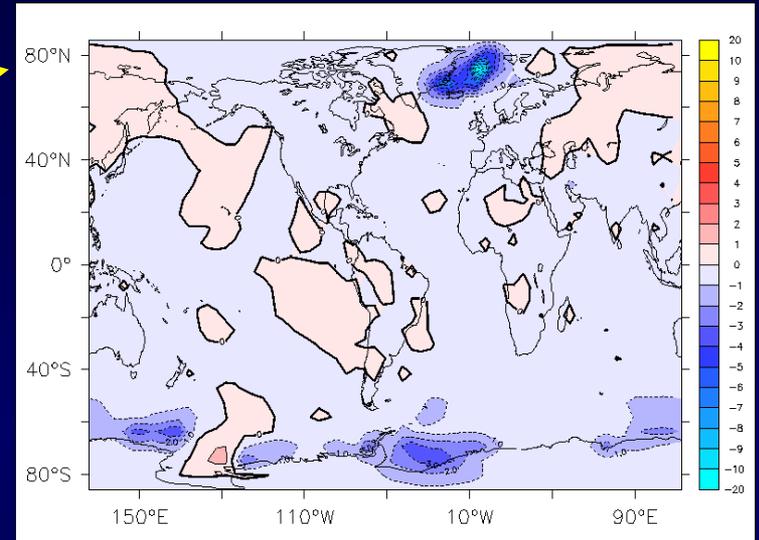
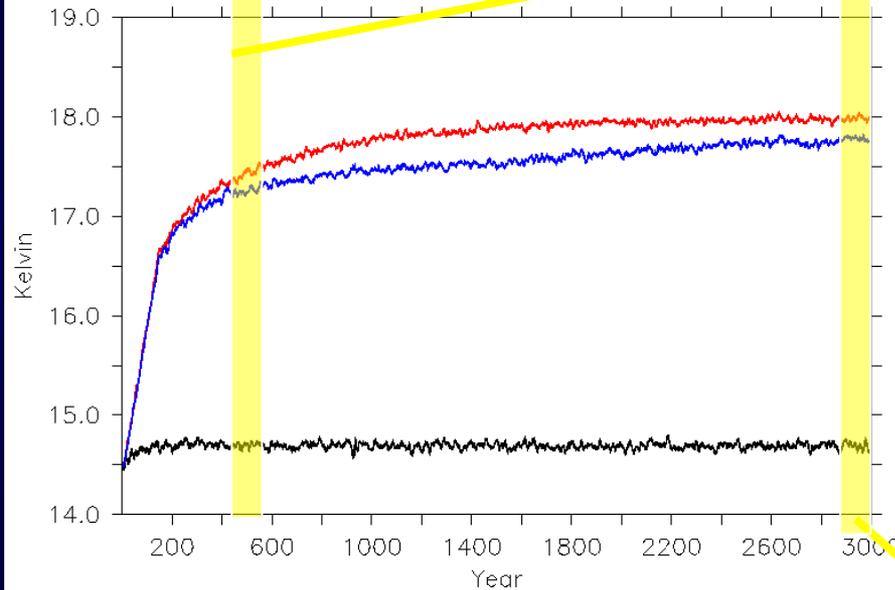
# Plan

- 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



Retroactions de telles réponses climatiques ?

# Rétroaction climat-calottes

Fonte  
Calotte

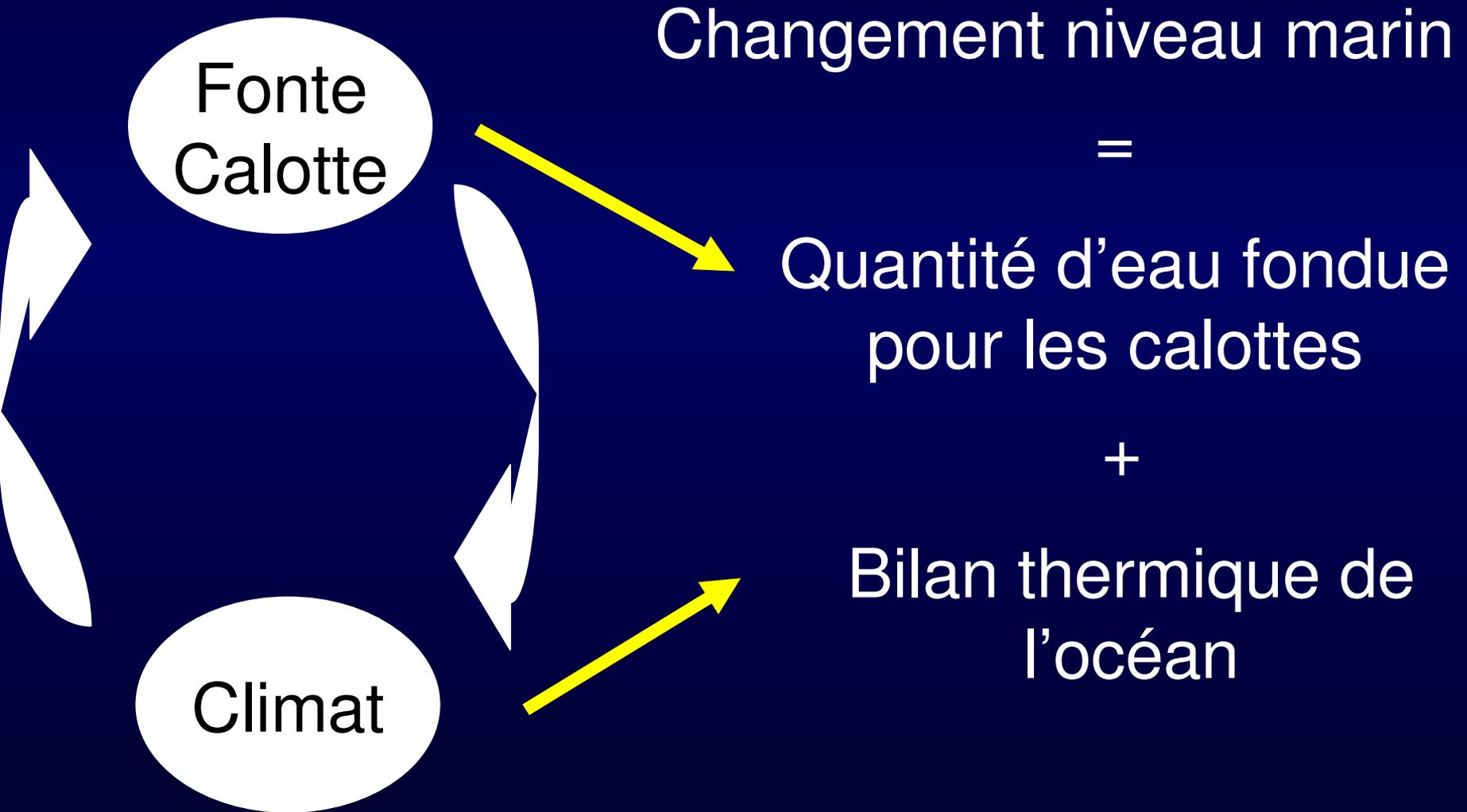
Signe ?

Climat

- Température
- Précipitation

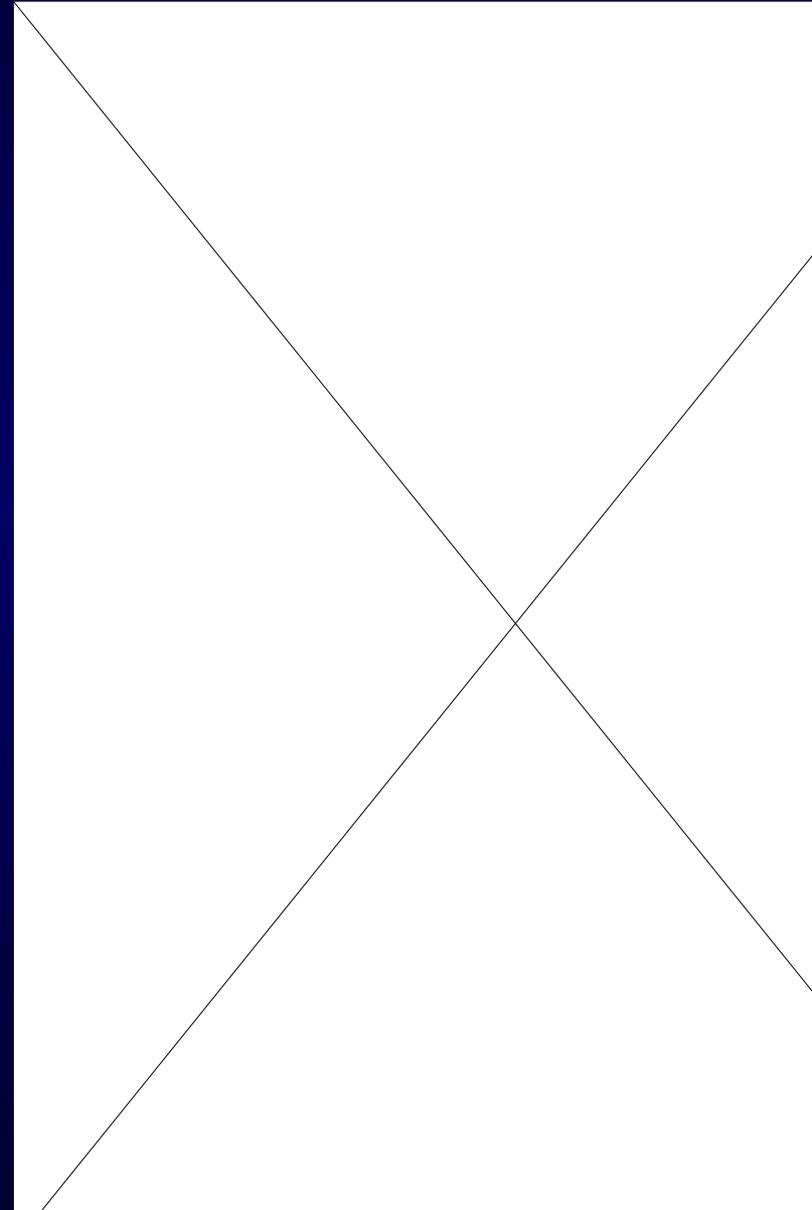
- Elevation (+)
- Albedo (+)
- Eau douce dans l'océan (-)

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



# Calotte groenlandaise

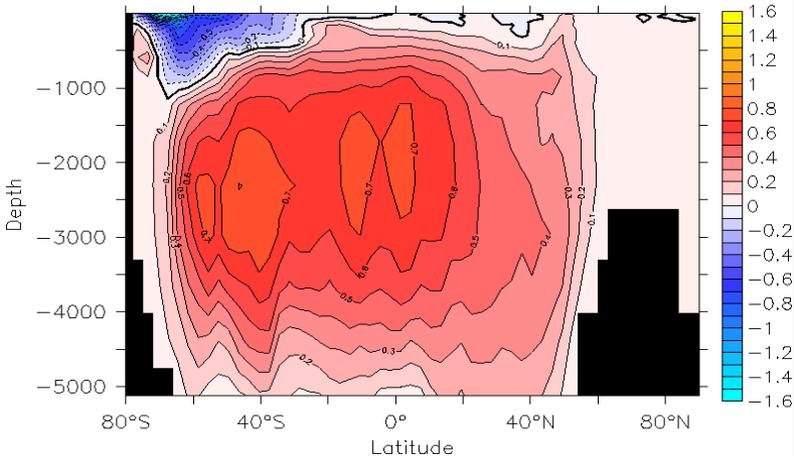
- « on line » : la calotte groenlandaise fond d'un équivalent de **7.9 m en 3000 ans**
- « off line » : la calotte groenlandaise fond d'un équivalent de **3.4 m en 3000 ans**
- Feedback positif fort : les rétroactions liées à l'élévation et l'albédo dominant celles liées à l'eau douce
- Contribution 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

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)**