



# Origine et impact d'un changement de circulation thermohaline au cours des prochains siècles dans le modèle IPSL-CM4

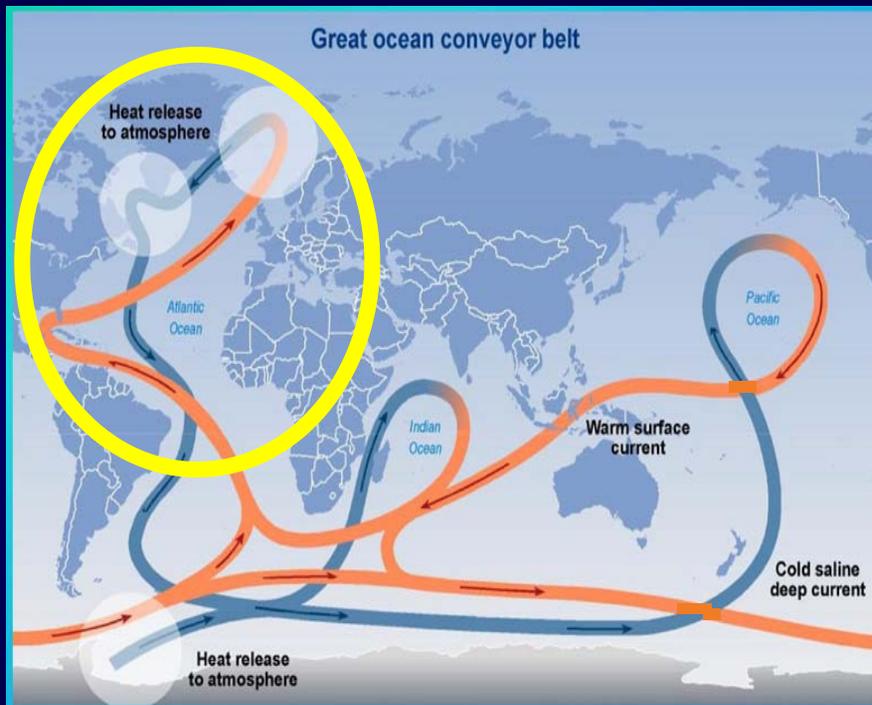
Didier Swingedouw

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement / IPSL

**Directrices de thèse** : Pascale Braconnot et Pascale Delecluse

**Merci à** : Laurent Bopp, Eric Guilyardi, Aude Matras, Olivier Marti  
et aux membres du Jury

# La circulation thermohaline (THC)



➤ Variations de la THC dans le passé (Younger Dryas, Heinrich) associées à des variations climatiques (Gherardi et al., 2006)

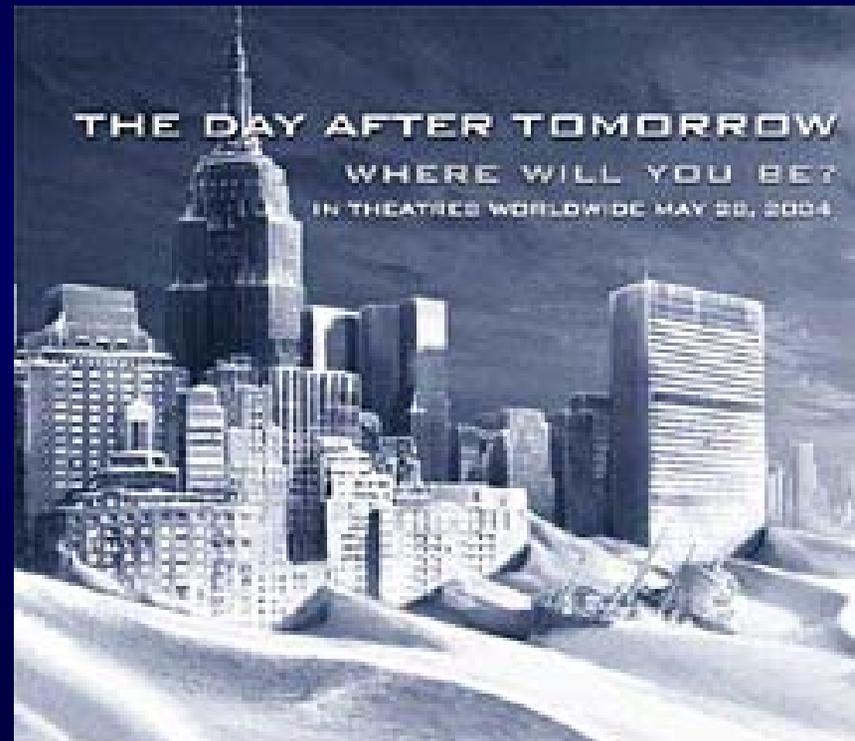
➤ Fonte massive des glaciers est souvent associée à ces variations de THC dans le passé

➤ Réponse de la THC au réchauffement climatique futur ?

Circulation océanique liée au gradient de température et de salinité

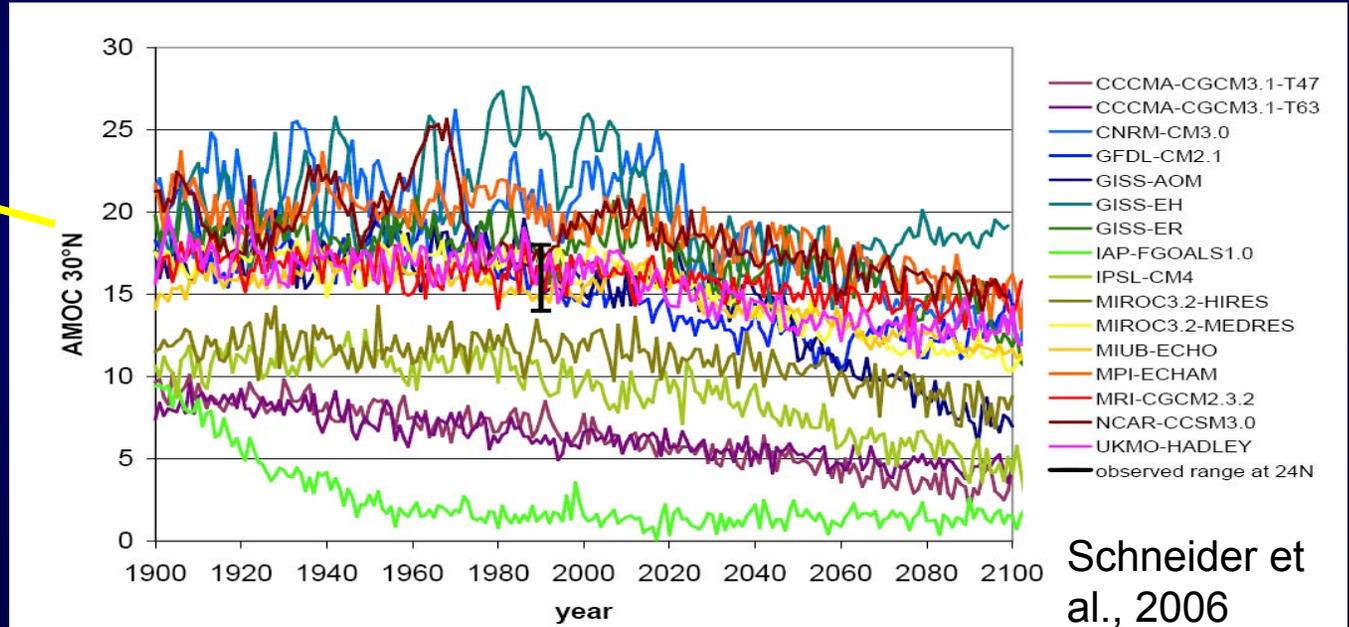
# Futur de la THC ?

- Augmentation rapide anthropique gaz à effet de serre => réchauffement rapide
- Changement THC dans le futur : causes ?
- Effet sur le climat : un mythe ?

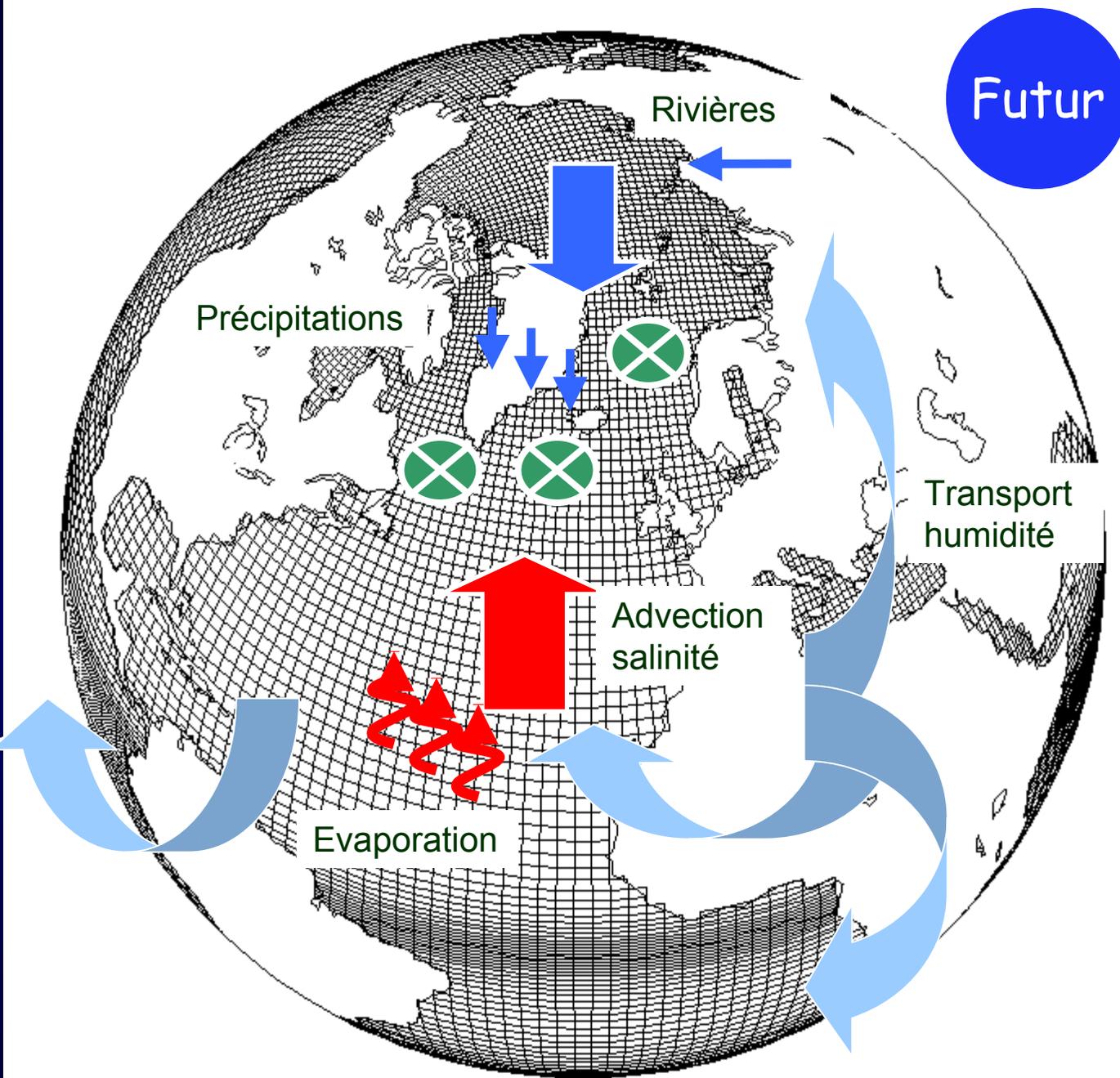


# Comprendre les scénarios IPCC

➤ Dispersion entre les modèles couplés Océan-Atmosphère (Schneider et al., 2006)



➤ Gregory et al. (2005) : température diminue la THC, salinité explique les différences entre les modèles

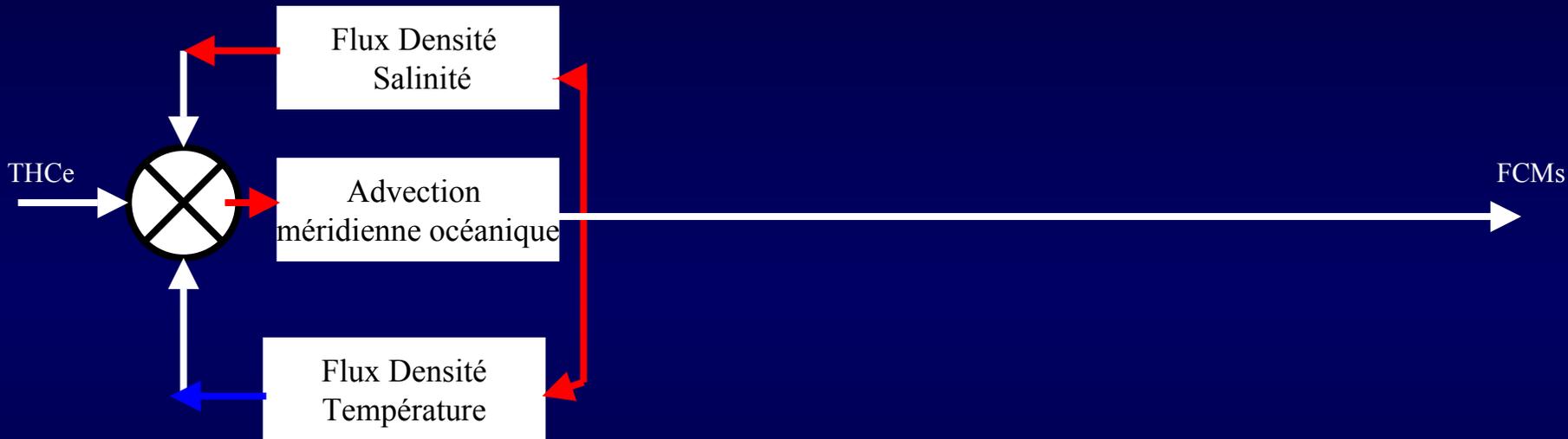


# THC et forçages halins

Mécanismes de forçages de salinité : Advection de salinité des tropiques et de l'Arctique ont des effets opposés

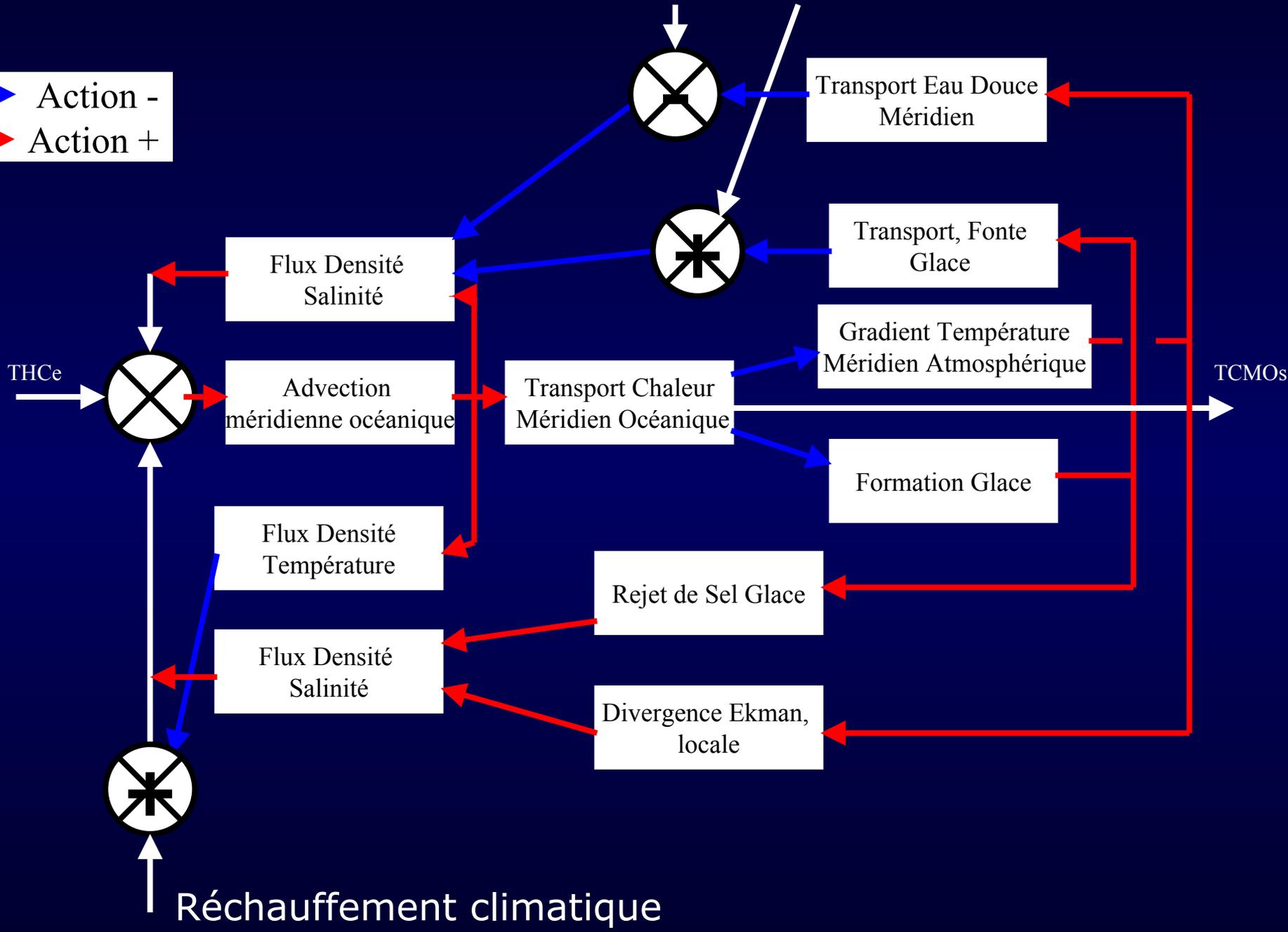
# THC et rétroactions internes

→ Action -  
→ Action +





# Réchauffement climatique

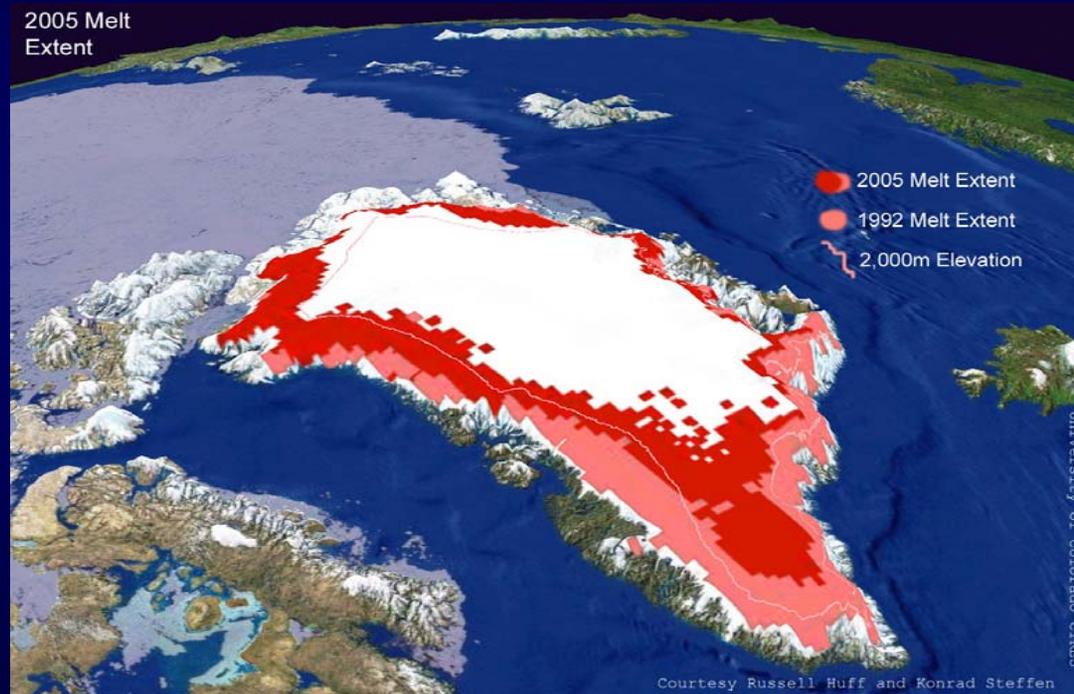


# Fonte du Groenland

➤ Aucun des modèles participant à IPCC ne prend en compte la fonte des glaciers dans le futur

➤ Cette fonte peut fortement diminuer la THC à long terme (paléo, modèle simplifié)

➤ Le Groenland a déjà commencé à fondre (Luthcke et al., 2006)



# Objectifs de cette thèse

- La fonte des glaciers peut-elle arrêter la THC dans le futur dans un modèle couplé ?
- Quel est le rôle joué par la salinité, la température et les processus de forçage associés ?
- Quelle est l'intensité des différentes rétroactions du système THC ?
- Impact climatique de la THC / réchauffement gaz à effet de serre ?

# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
4. Impact climatique de la THC

# Plan

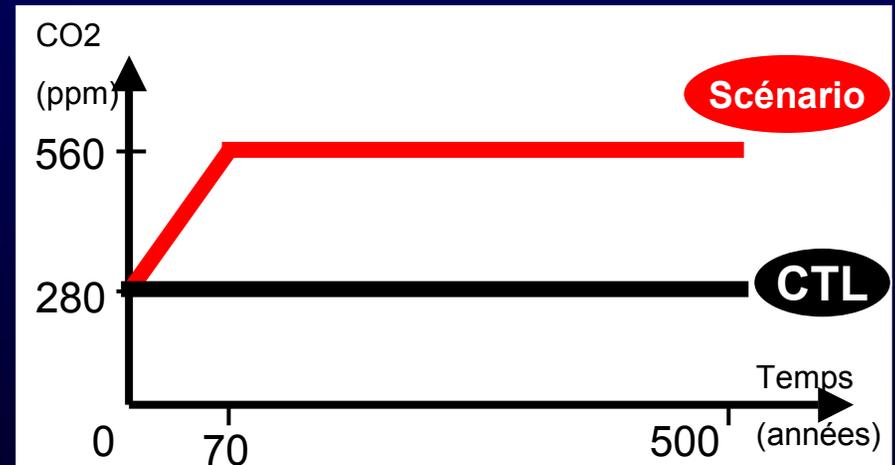
1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
4. Impact climatique de la THC

# Outil : le modèle couplé IPSL-CM4

- IPSL-CM4:
- Ocean : ORCA2, résolution  $2^\circ \times (0.5-2^\circ)$
  - Glace de mer : LIM, dynamique-thermodynamique
  - Atmosphère : LMDz, résolution  $3.75^\circ$
  - Terre : ORCHIDEE avec schéma de routage des rivières
  - Couplage : OASIS

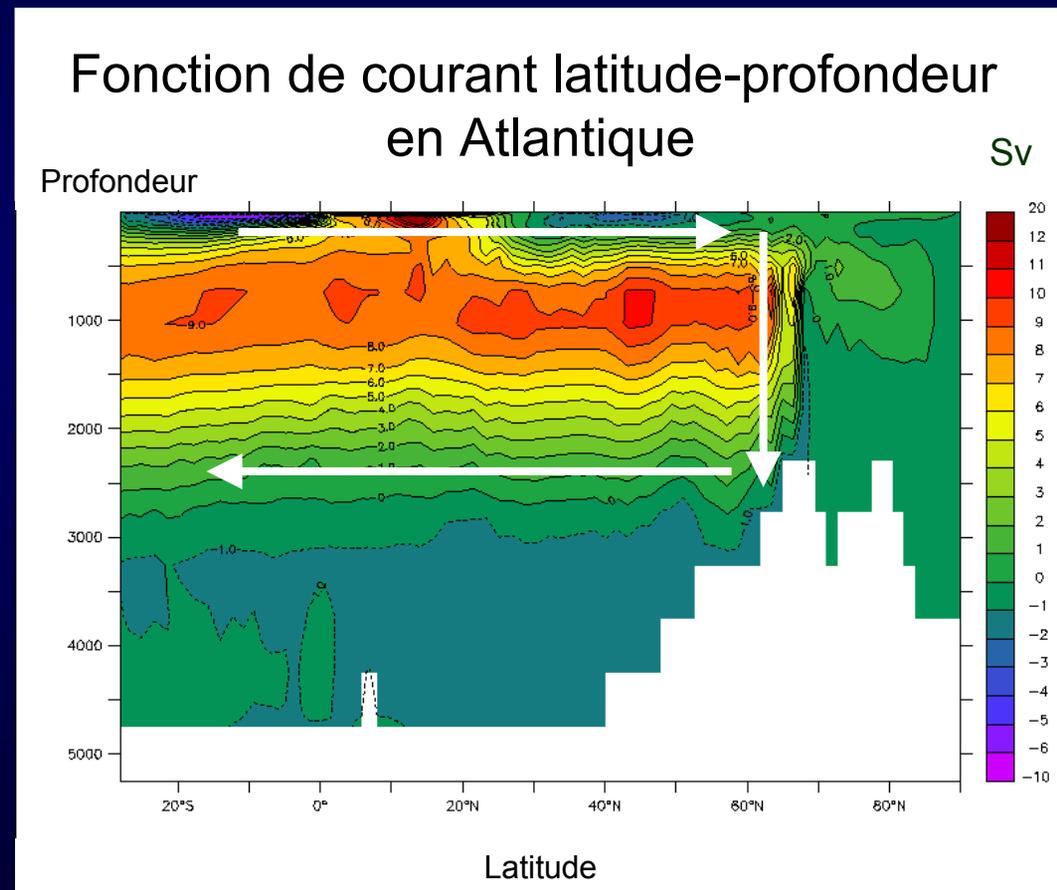
Ce modèle a été utilisé pour réaliser les scénarios IPCC

On considère un seul scénario dans cet exposé : doublement de CO<sub>2</sub> stabilisé



# Représentation de la THC dans le modèle

- 2 cellules avec NADW et AABW et AABW
- Maximum pour la NADW d'environ 11 Sv (Indice THC)
- Plus faible que les estimations issues d'observations (14-18 Sv)

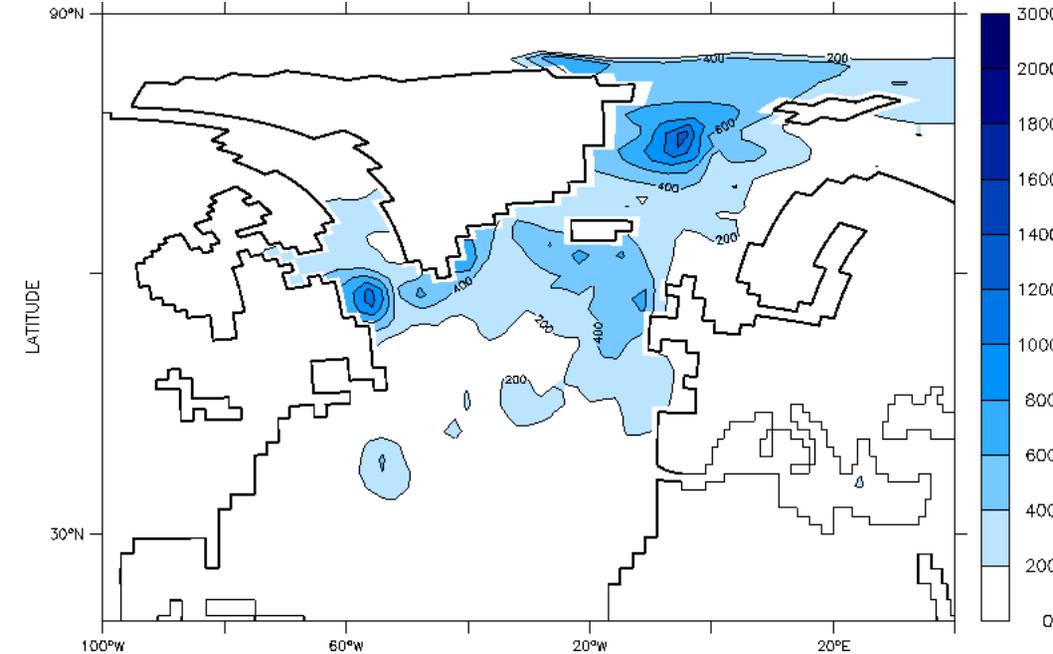


# THC et sites de convection

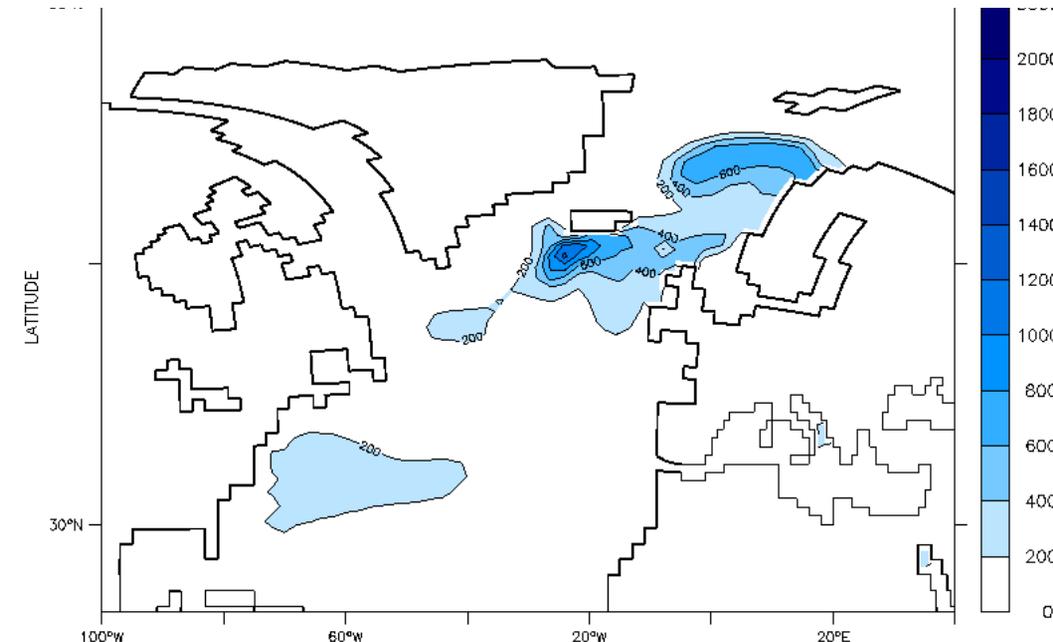
➤ Pas de convection dans le modèle en mer du Labrador

➤ Flux d'eau plus dense que  $27.8 \text{ kg/m}^3$  via seuil entre Groenland et Ecosse est de  $5.6 \text{ Sv}$  (observations :  $6 \text{ Sv}$ )

Profondeur couche mélange: de Boyer Montegut et al. (2005)



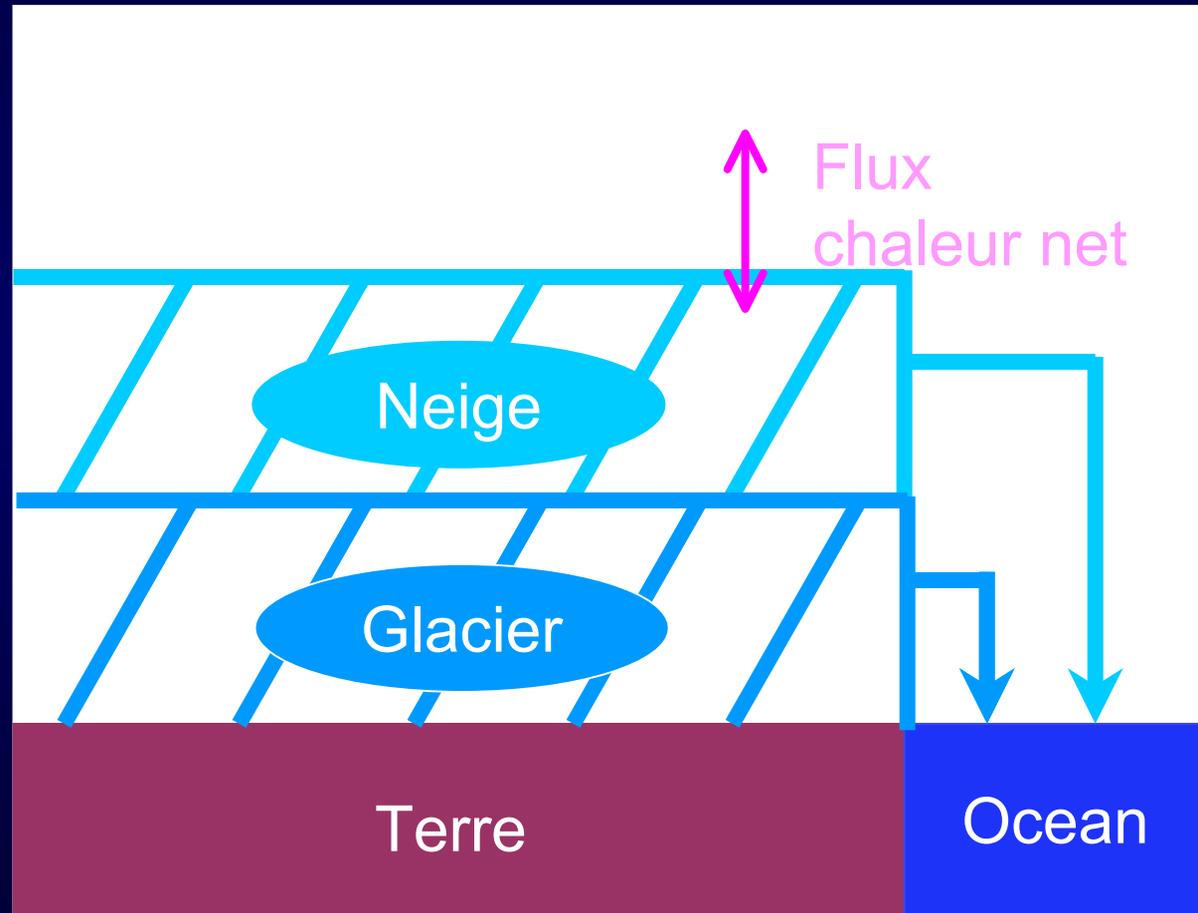
Profondeur couche mélange: IPSL-CM4



# Protocole expérimental

Deux versions du modèle IPSL-CM4 :

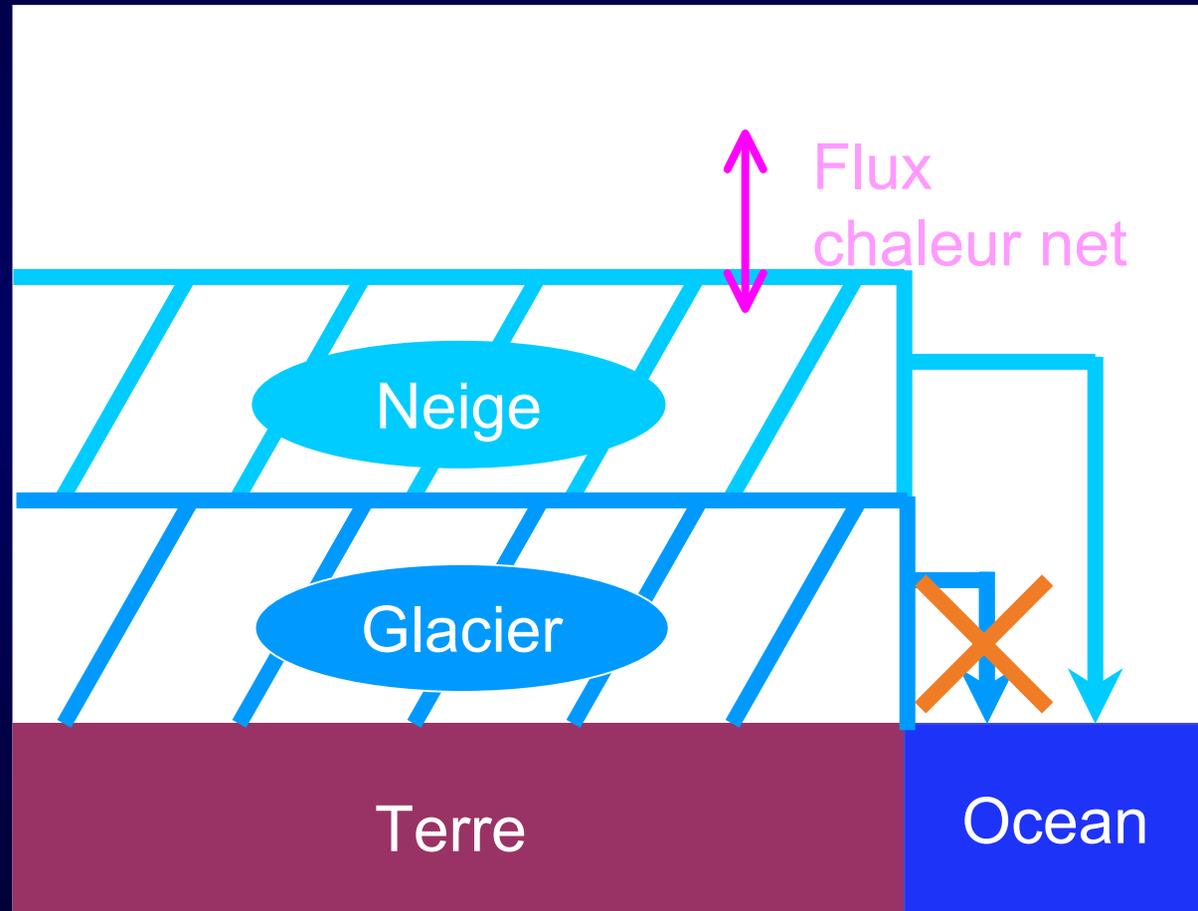
1) Avec fonte des glaciers



# Protocole expérimental

Deux versions du modèle IPSL-CM4 :

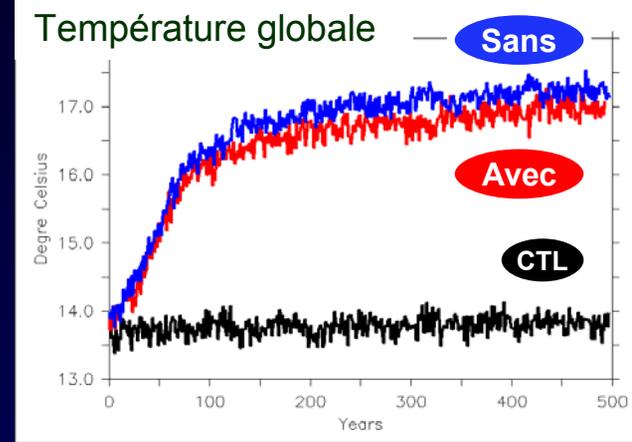
- 1) Avec fonte des glaciers
- 2) Sans fonte des glaciers



# Plan

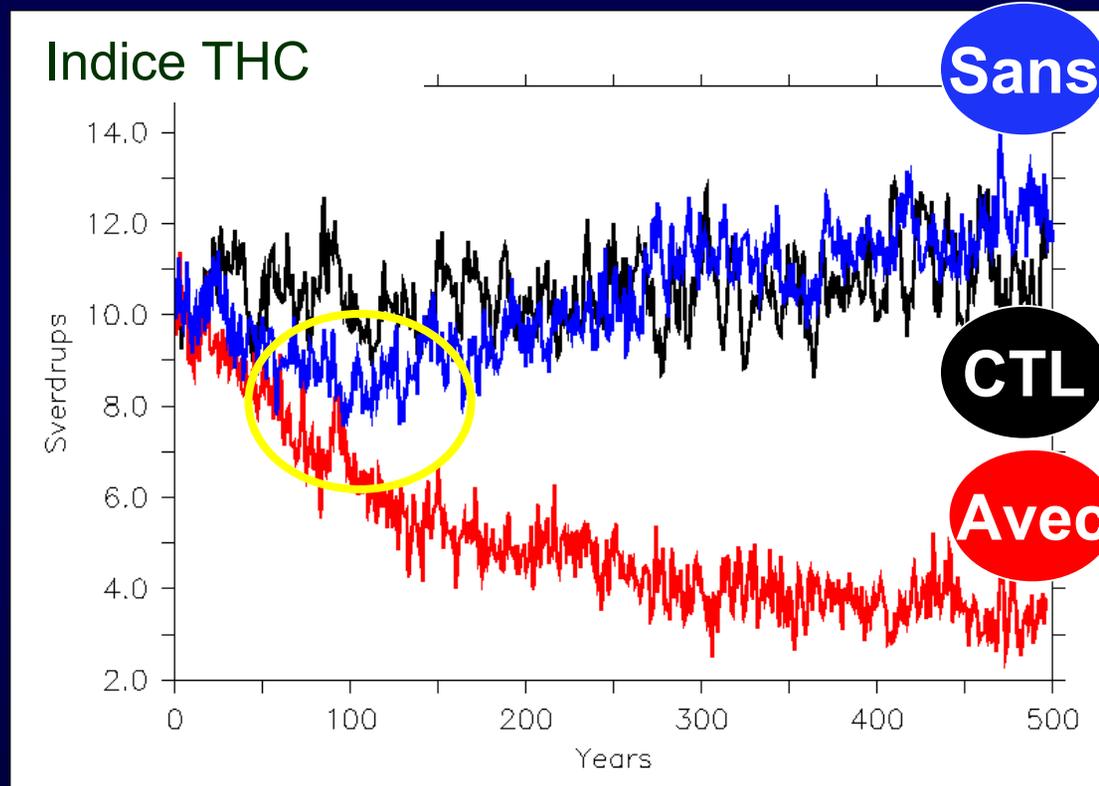
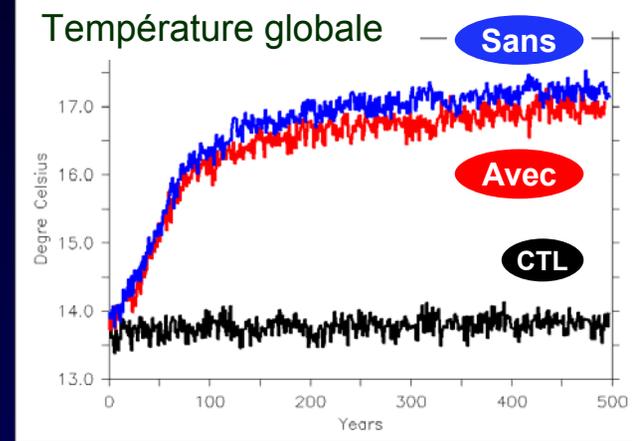
1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
4. Impact climatique de la THC

# Réponse de la THC sur 500 ans à 2xCO2



# Réponse de la THC sur 500 ans à 2xCO2

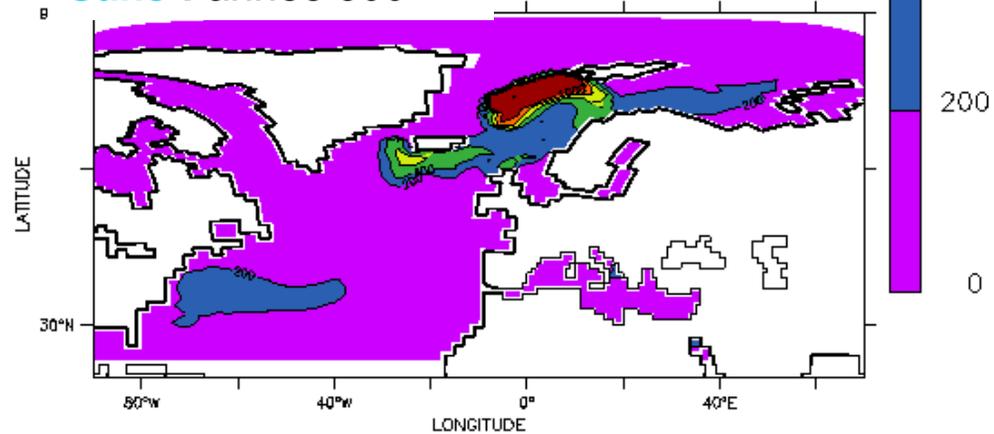
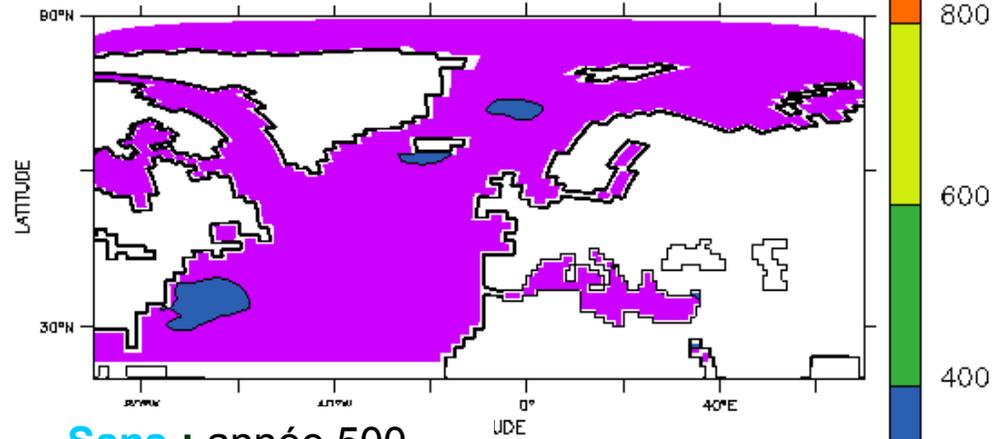
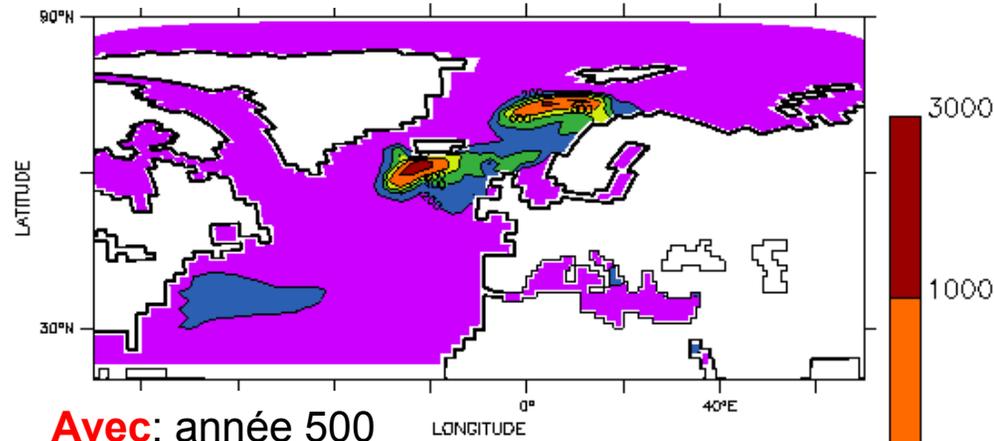
- Fonte du Groenland est de **0.13 Sv** après 200 ans, plus de la moitié du Groenland fondu en 500 ans
- Réponses THC très différentes. pourquoi ?



# Réponses des sites de convection

- Avec fonte : convection disparaît
- Sans fonte : renforcement de la convection en mer de GIN, diminution en mer d'Irminger

CTL



# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
4. Impact climatique de la THC

# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
  - Réponse aux changements de forçages
  - Rôle des rétroactions
4. Impact climatique de la THC

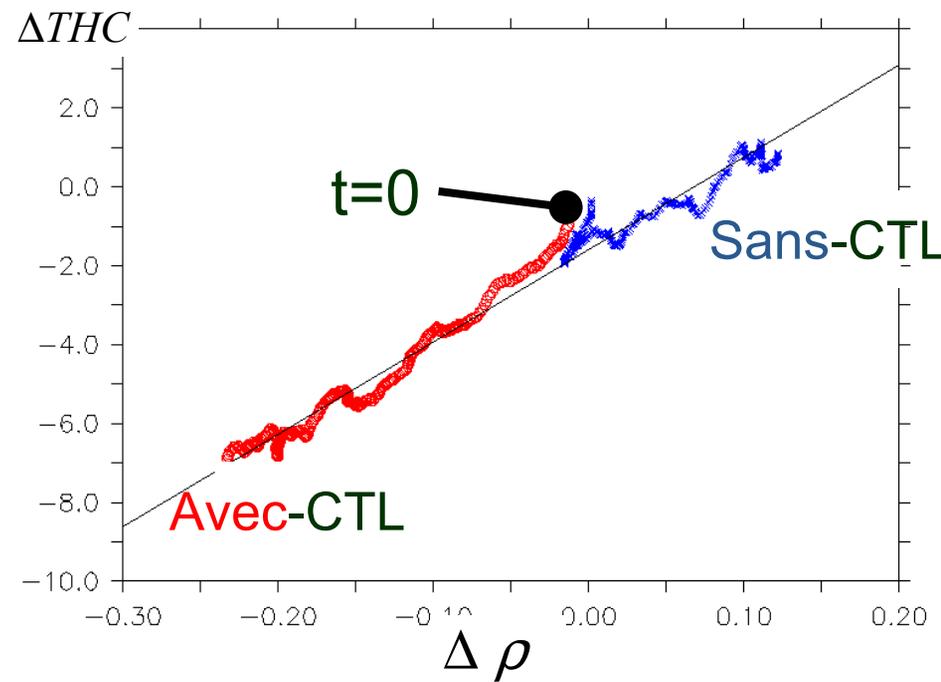
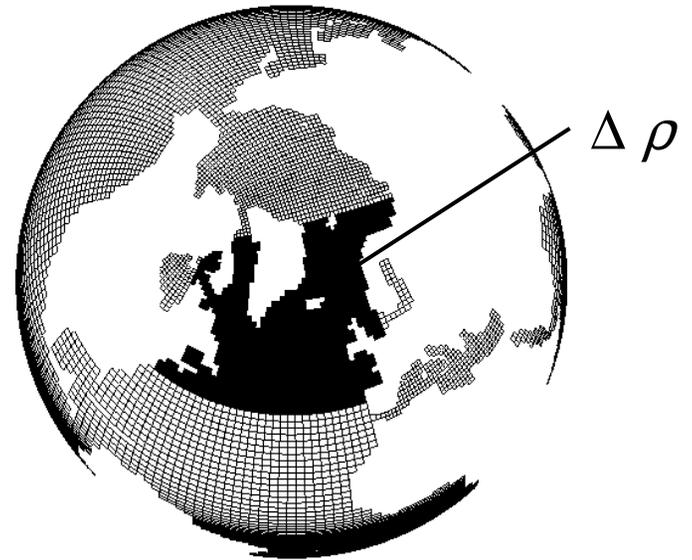
# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
  - Réponse aux changements de forçages
  - Rôle des rétroactions
4. Impact climatique de la THC

# THC et densité dans les sites de convection

Corrélation de **0.98** entre anomalies (/CTL) de densité dans les sites de convection et anomalies de THC :

$$\Delta THC = \gamma \Delta \rho$$



# Influence haline et thermique sur les réponses de la THC en scénarios

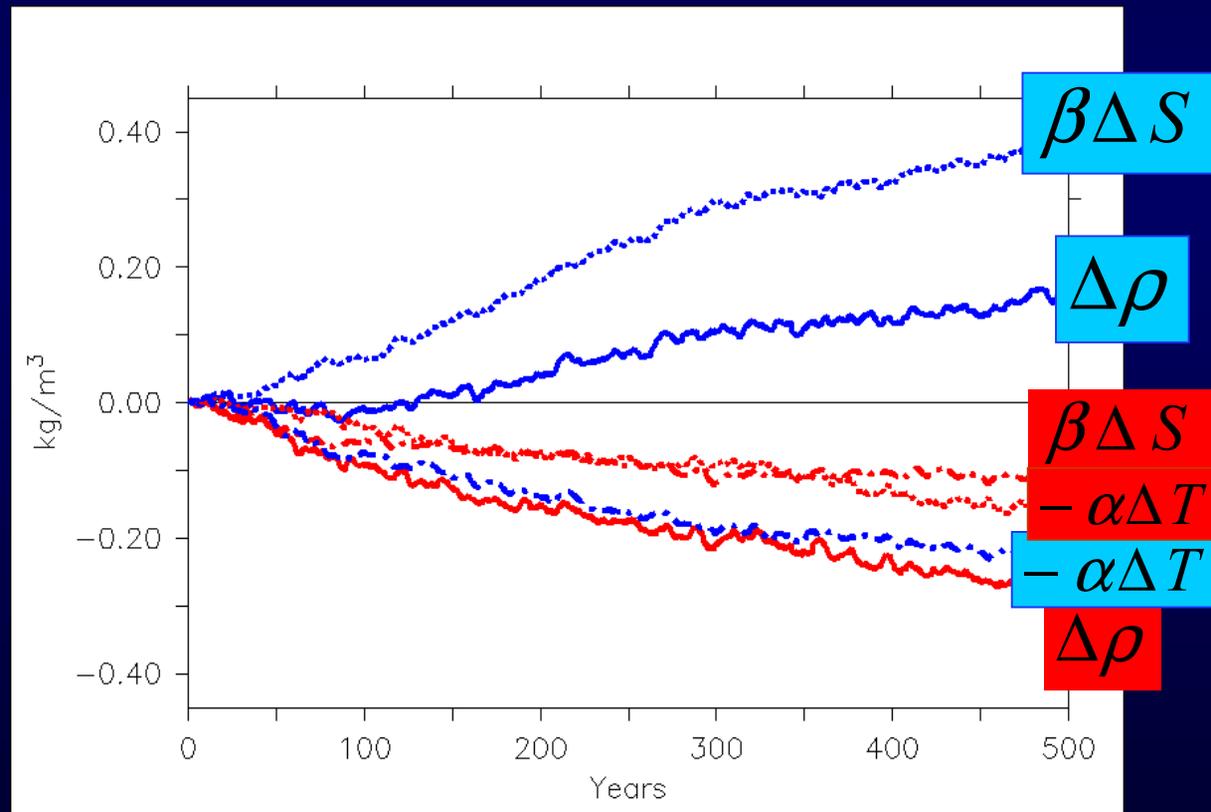
$$\Delta\rho \approx \beta\Delta S - \alpha\Delta T$$

# Influence haline et thermique sur les réponses de la THC en scénarios

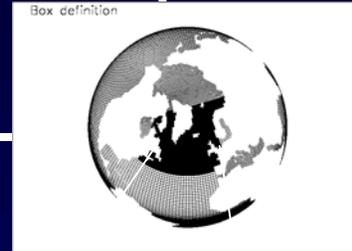
$$\Delta\rho \approx \beta\Delta S - \alpha\Delta T$$

➤ **Sans fonte** : la température (T) diminue la THC, la salinité (S) l'augmente

➤ **Avec fonte** : T et S diminuent la THC

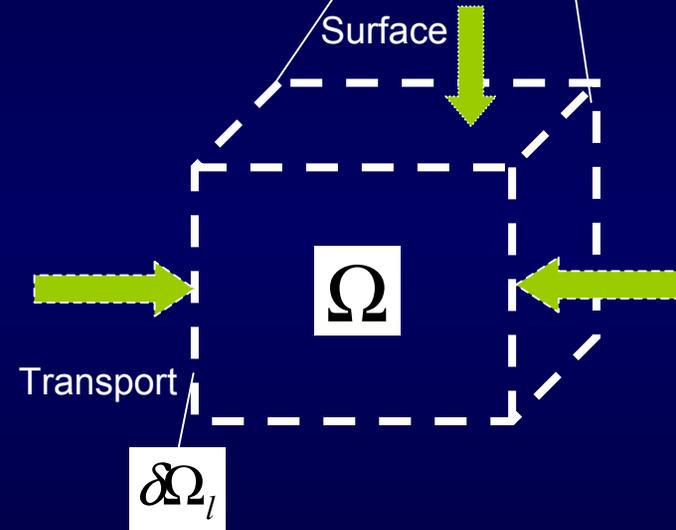


# Bilan de la densité dans les zones de convection



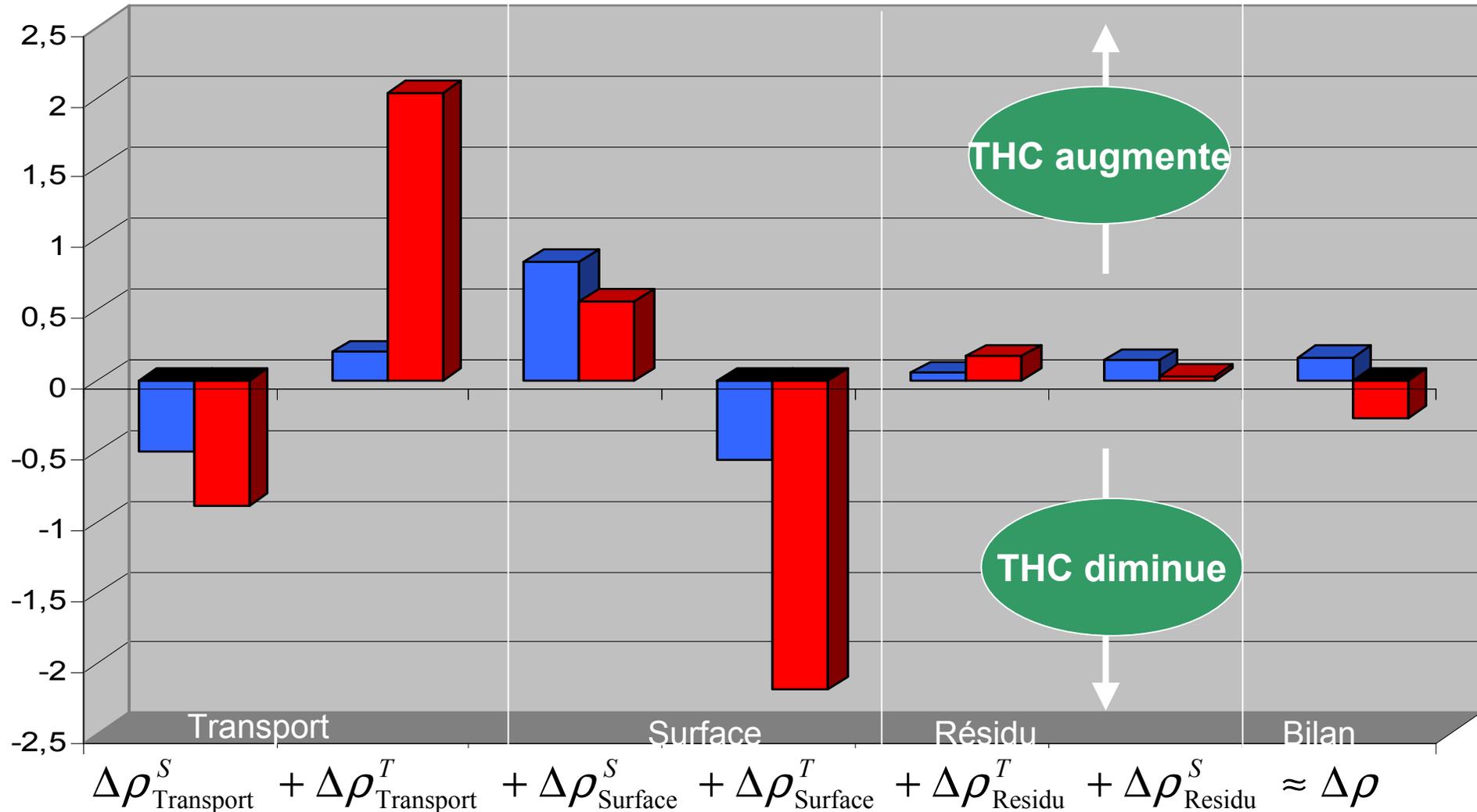
Méthodologie : Bilan de salinité et température sur les zones de convection

$$\underbrace{\iiint_{\Omega} S dv}_{\text{Evolution}} = \int \left( \underbrace{- \iint_{\delta\Omega_l} S \vec{V} \cdot d\vec{\sigma}}_{\text{Transport}} + \underbrace{\iint_{\delta\Omega_l} (\vec{\kappa} \cdot \vec{\nabla}) S d\sigma}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\iint_{z=\eta} S(\varepsilon - w) d\sigma}_{\text{Dilution-expansion}} \right) dt$$



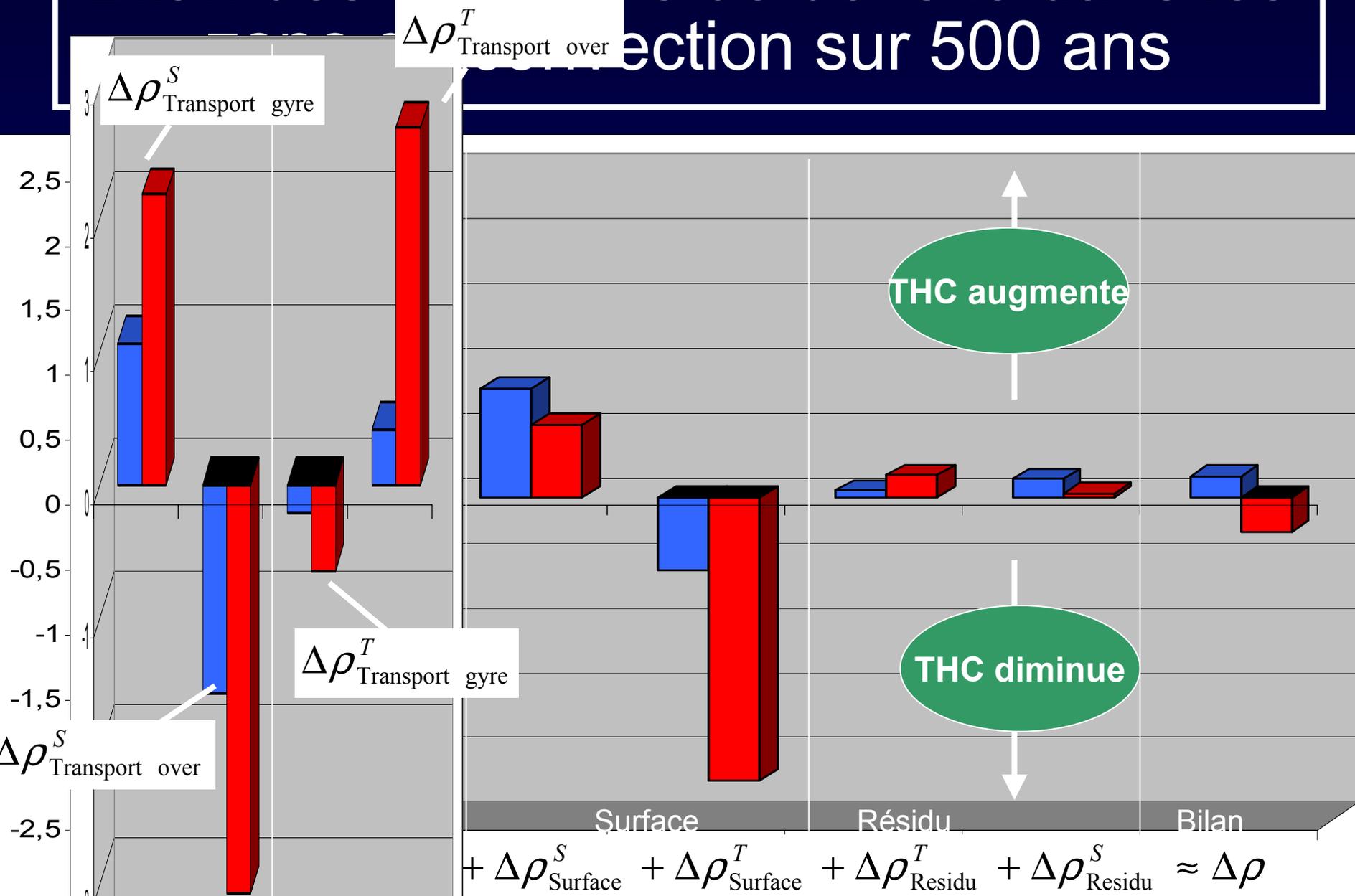
$$\Delta\rho_{\text{Transport}}^S + \Delta\rho_{\text{Transport}}^T + \Delta\rho_{\text{Surface}}^S + \Delta\rho_{\text{Surface}}^T + \Delta\rho_{\text{Residu}}^T + \Delta\rho_{\text{Residu}}^S \approx \Delta\rho$$

# Bilan des variations de densité dans les zone de convection sur 500 ans

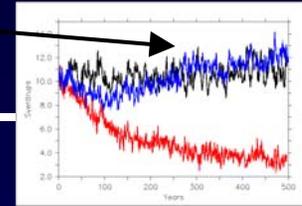


# Bilan des variations de densité dans les océans

## Evolution de la circulation sur 500 ans



# Synthèse des processus importants dans la simulation **sans fonte**



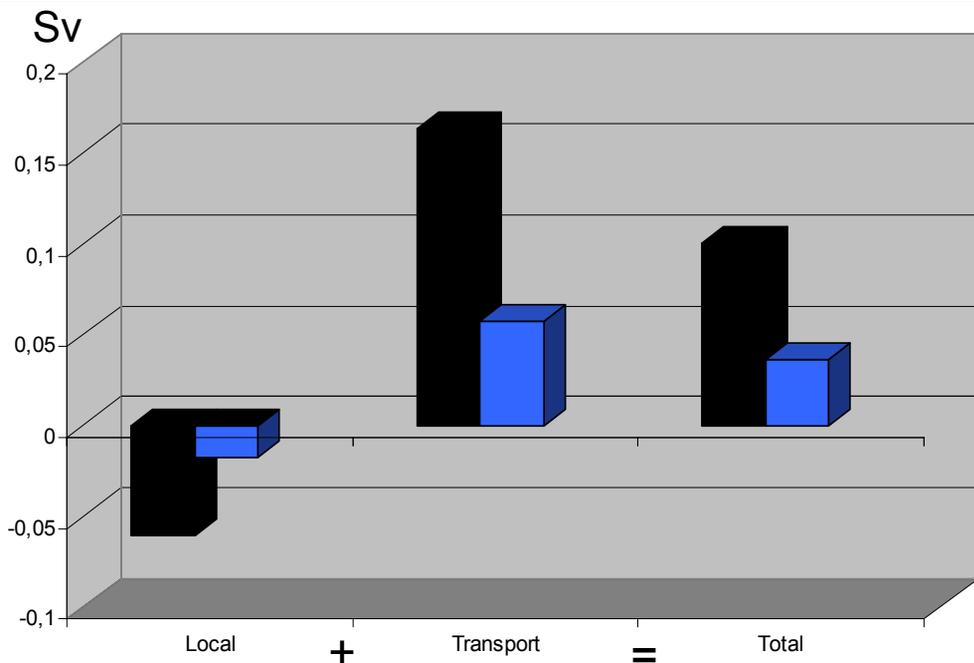
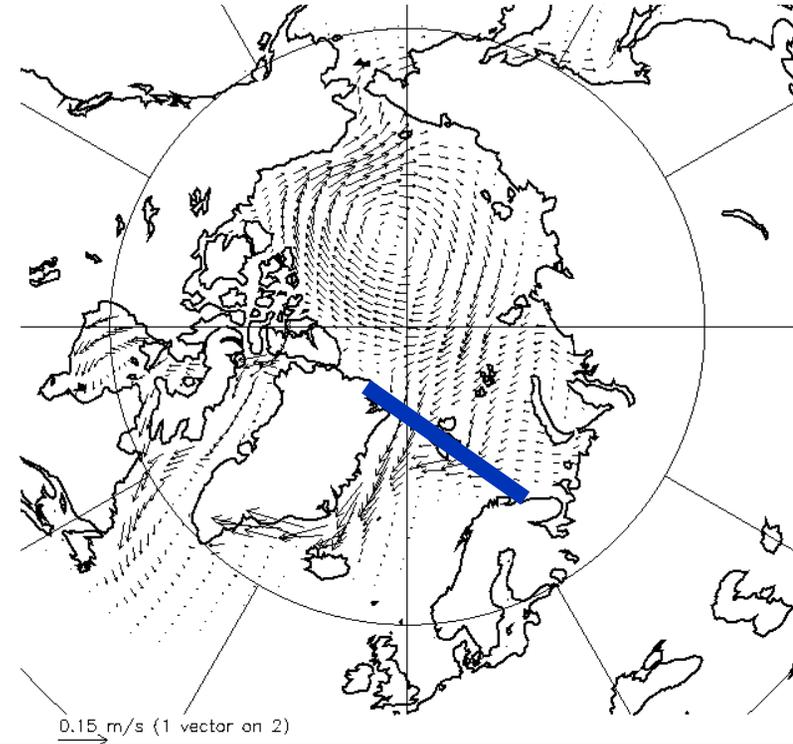
- Sur 500 ans, la diminution de la THC est surtout liée :
  - ❖ à la **rétroaction positive** lié au transport de salinité par overturning (65 %)
  - ❖ au **réchauffement** de température dans les zones de convection (26 %)
- Les facteurs qui permettent un retour de la THC :
  - ❖ Le transport **d'anomalies de salinité lié au gyre** (40 %)
  - ❖ La diminution de la **fonte de glace de mer** dans les sites de convection (35 %)

# Anomalies de fonte de glace de mer

CTL :

- Transport de glace via détroit de Fram comme dans les observations
- Rejet de sel local par formation de glace de mer en hiver

Transport de glace de mer : CTL

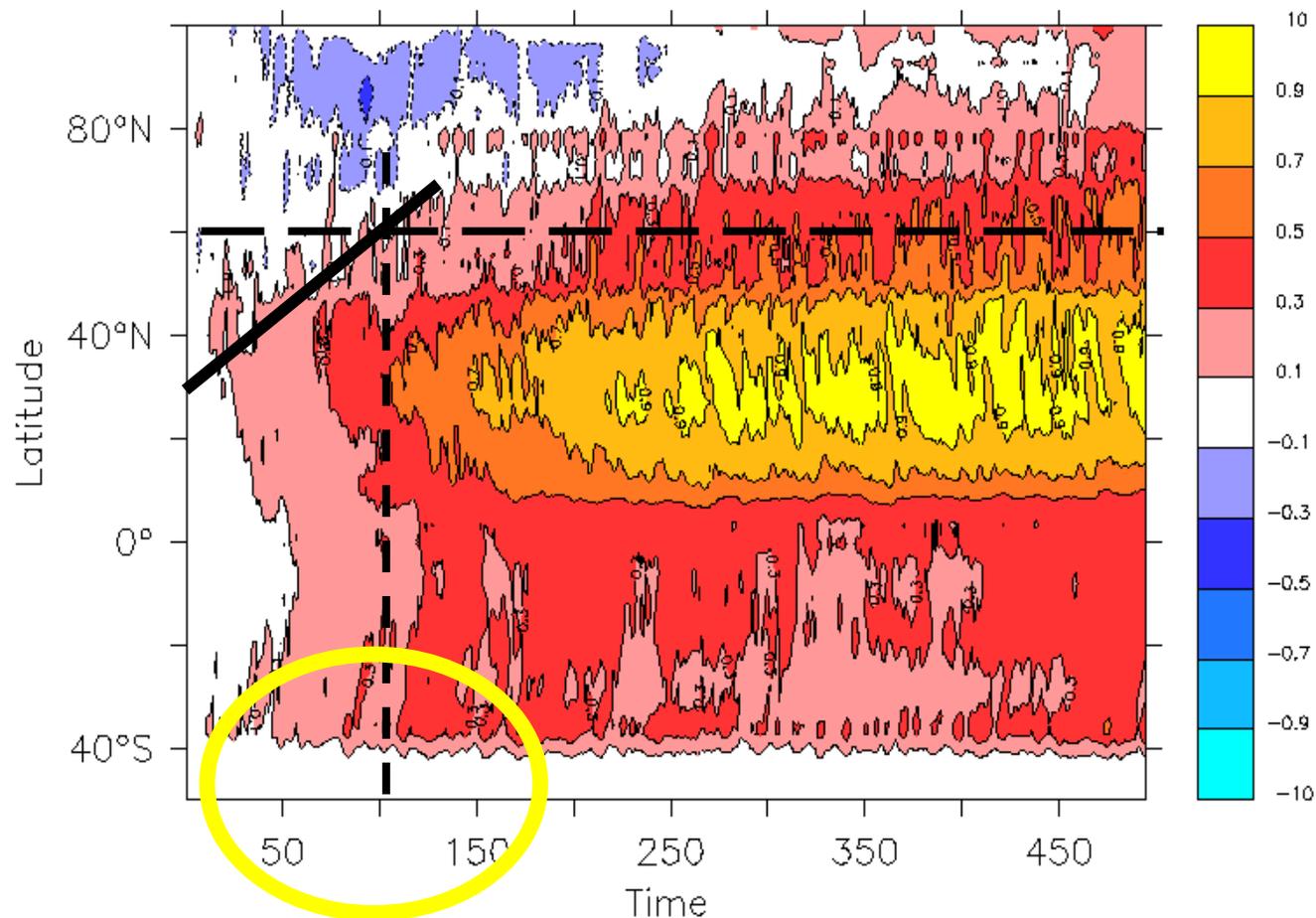


Scénario **sans fonte** (après 500 ans) :

- Transport glace de mer diminue
- Rejet de sel local diminue
- Bilan fonte glace de mer diminue : effet de la diminution du transport domine

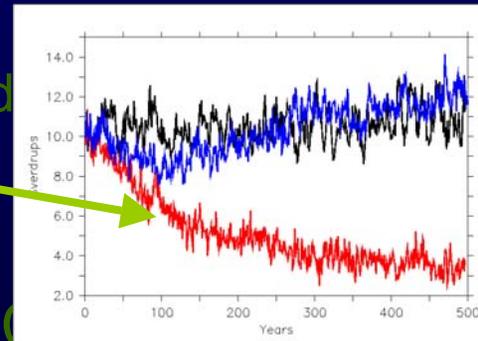
# Origine des anomalies de transport de salinité

Anomalies de salinité de surface: **Sans fonte** - CTL



# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse de la THC à la fonte des glaciers
3. Mécanismes de réponse
  - Réponse aux changements de
  - Rôle des rétroactions
4. Impact climatique de la THC



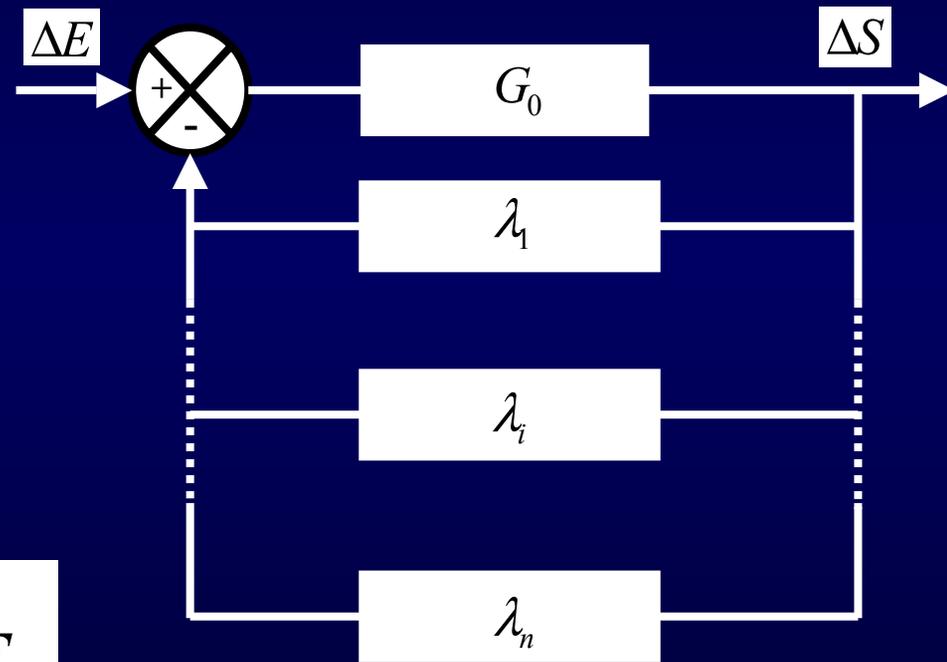
# Amplification par les rétroactions

➤ Modèle de rétroaction linéaire (Hansen et al., 1984, pour le climat)

➤  $G_0$  Gain statique

➤ Quantification des rétroactions  $\lambda_i$

$$\Delta S = \frac{G_0}{1 - G_0 \sum_i \lambda_i} \Delta E$$



# Méthode de quantification des rétroactions internes au système THC

$\Delta$  représente la **différence entre les scénarios**

$$\Delta\rho_{\text{Transport}}^S + \Delta\rho_{\text{Transport}}^T + \Delta\rho_{\text{Surface}}^S + \Delta\rho_{\text{Surface}}^T + \Delta\rho_{\text{Residu}}^T + \Delta\rho_{\text{Residu}}^S \approx \Delta\rho$$

On isole la fonte des glaciers:

$$\Delta\rho_{\text{Surface}}^S = \Delta\rho_{\text{Glaciers}} + \Delta\rho_{\text{E-P-R}} + \Delta\rho_{\text{glace mer}}$$

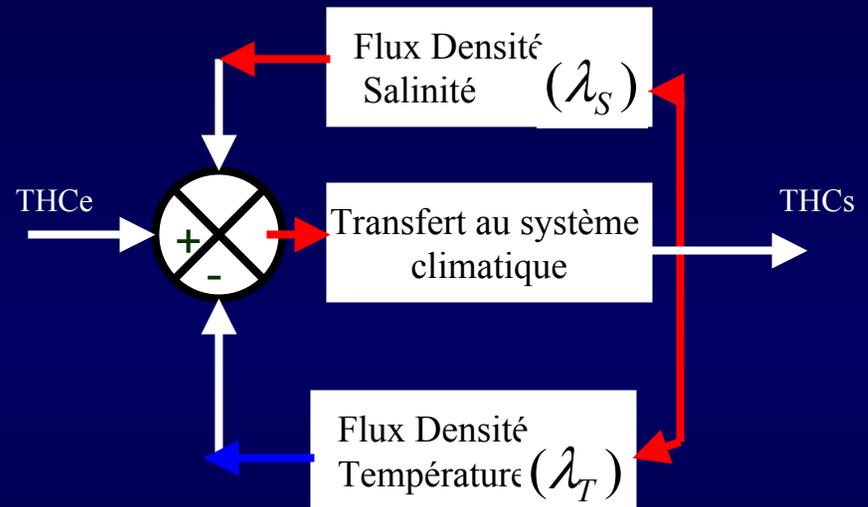
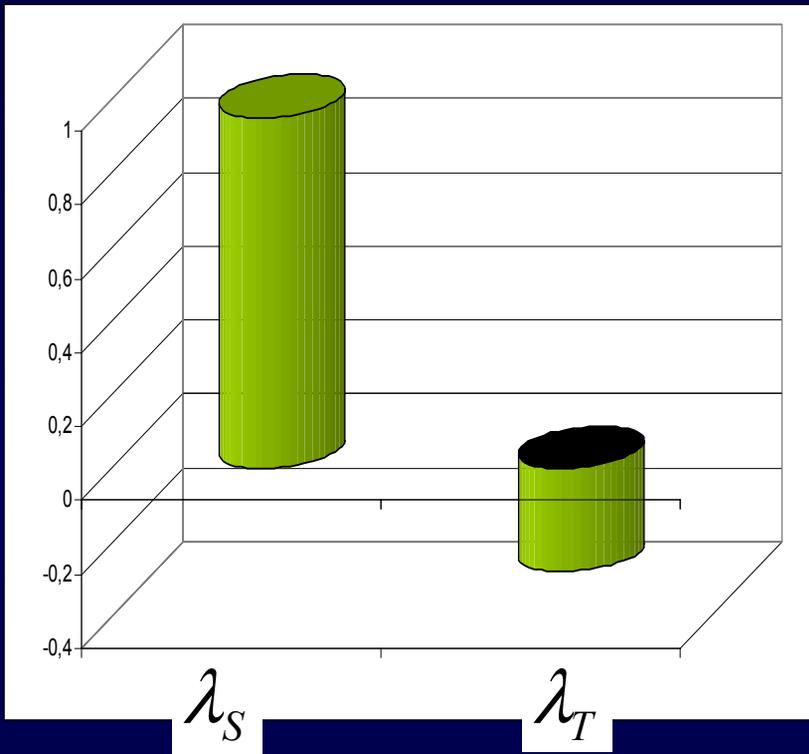
$$\Delta\rho \approx \Delta\rho_{\text{Glaciers}} + \sum_i \Delta\rho_i$$

$$\Rightarrow \Delta\rho \approx \frac{1}{1 - \sum_i \lambda_i} \Delta\rho_{\text{Glaciers}}$$

avec

$$\forall i \quad \lambda_i = \frac{\Delta\rho_i}{\Delta\rho}$$

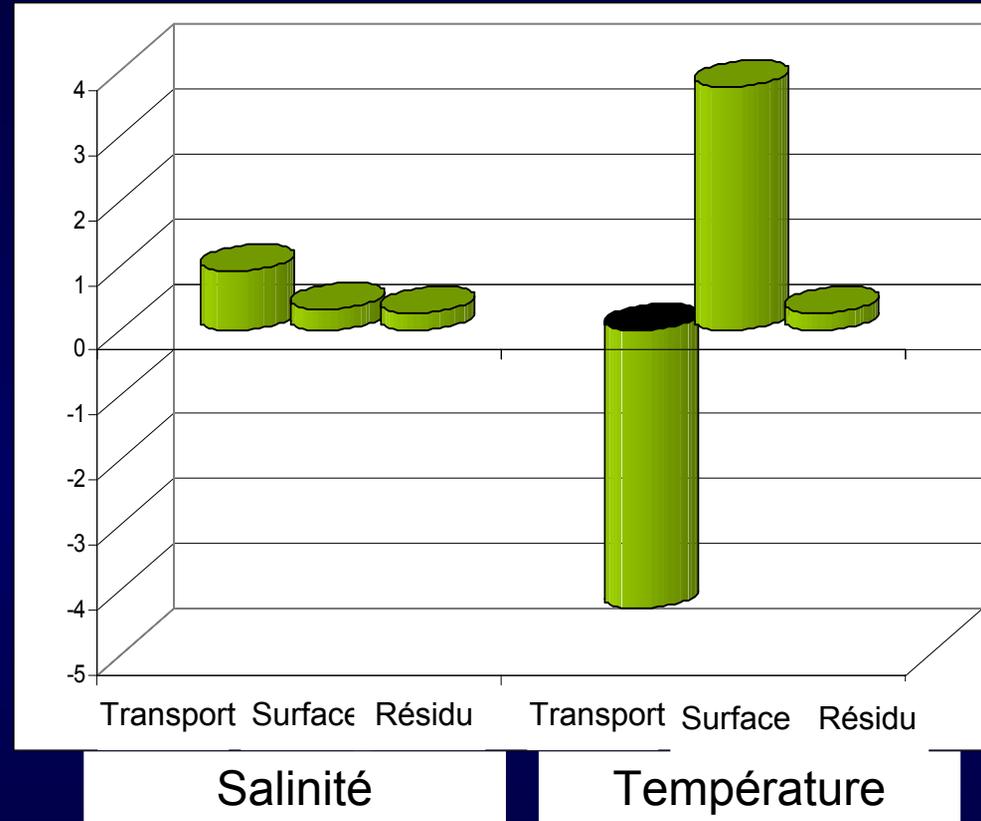
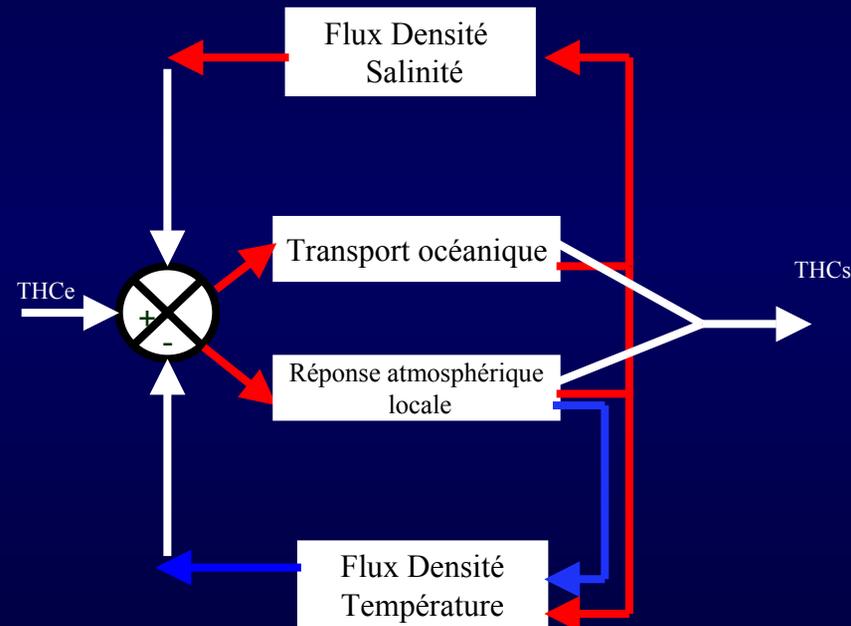
# Amplitude des rétroactions de la THC



Gain dynamique

$$G = \left( \frac{1}{1 - (\lambda_S + \lambda_T)} \right) = 3.0$$

# Amplitude des rétroactions de la THC



Le flux de chaleur en surface est une forte rétroaction positive qui limite la forte rétroaction négative due au transport de chaleur

# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse transitoire de la THC
3. Mécanismes de réponse à long terme
4. Impact climatique de la THC

# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse transitoire de la THC
3. Mécanismes de réponse à long terme
4. Impact climatique de la THC
  - ❖ Impact de la THC sur les rétroactions climatiques globales
  - ❖ Compensation atmosphérique et ajustement local

# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse transitoire de la THC
3. Mécanismes de réponse à long terme
4. Impact climatique de la THC
  - ❖ Impact de la THC sur les rétroactions climatiques globales
  - ❖ Compensation atmosphérique et ajustement local

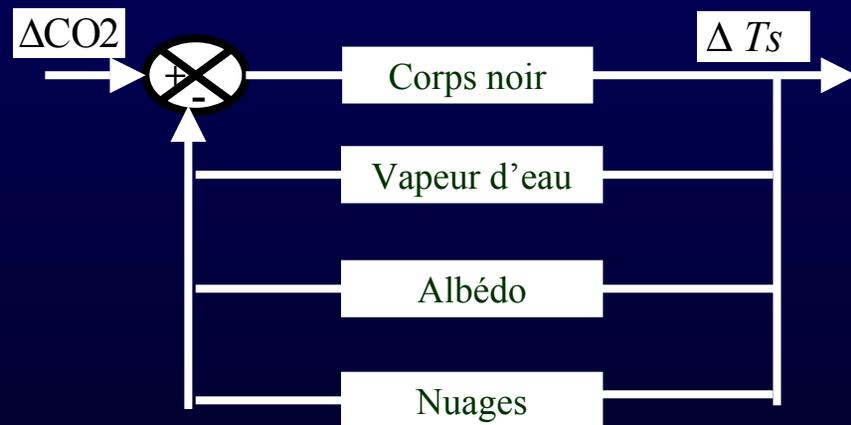
# Rétroactions climatiques

Augmentation CO<sub>2</sub> = anomalies de forçage radiatif

Réponse radiative type « corps noir » pour un doublement de CO<sub>2</sub> = **environ 1 K**

Existence de rétroactions climatiques qui amplifient la réponse :

- **vapeur d'eau**
- **albédo**
- **nuages**



# Rétroactions climatiques

Augmentation CO<sub>2</sub> = anomalies de forçage radiatif

Réponse radiative type « corps noir » pour un doublement de CO<sub>2</sub> = **environ 1 K**

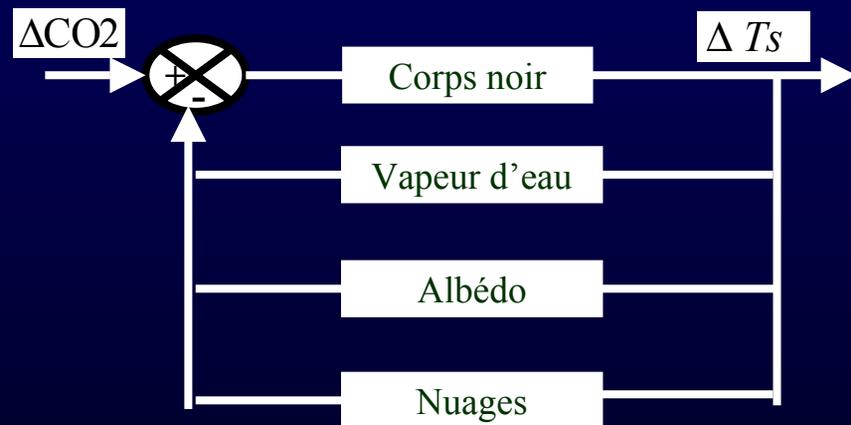
Existence de rétroactions climatiques qui amplifient la réponse :

- **vapeur d'eau = 1,6 K**

- **albédo = 0,7 K**

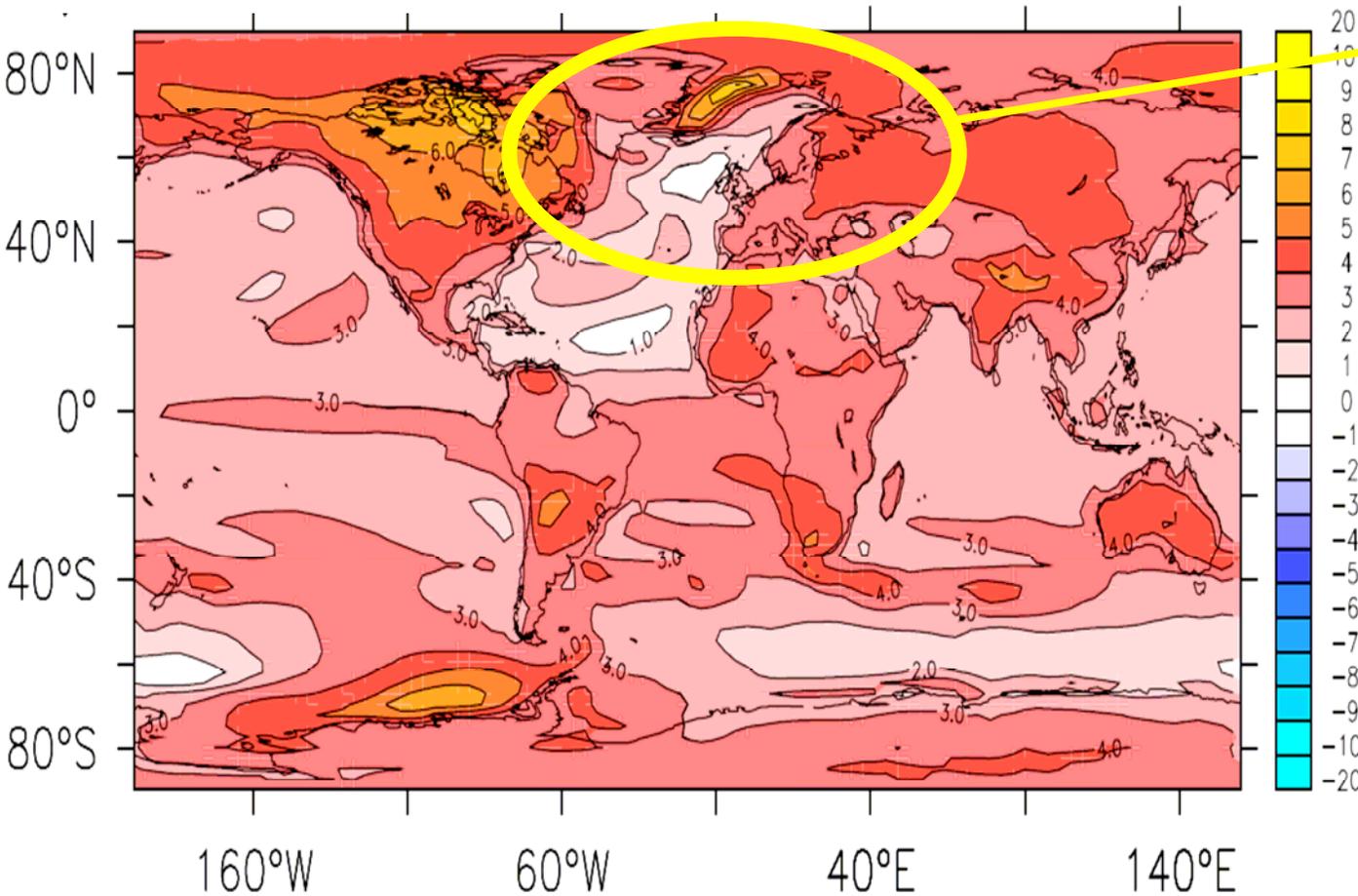
- **nuages = 0,5 K**

(Estimation avec le scénario **avec fonte**)



# Différence de température surface entre le scénario **Avec** à 2xCO<sub>2</sub> et le CTL

## Scenario Avec Fonte - CTL

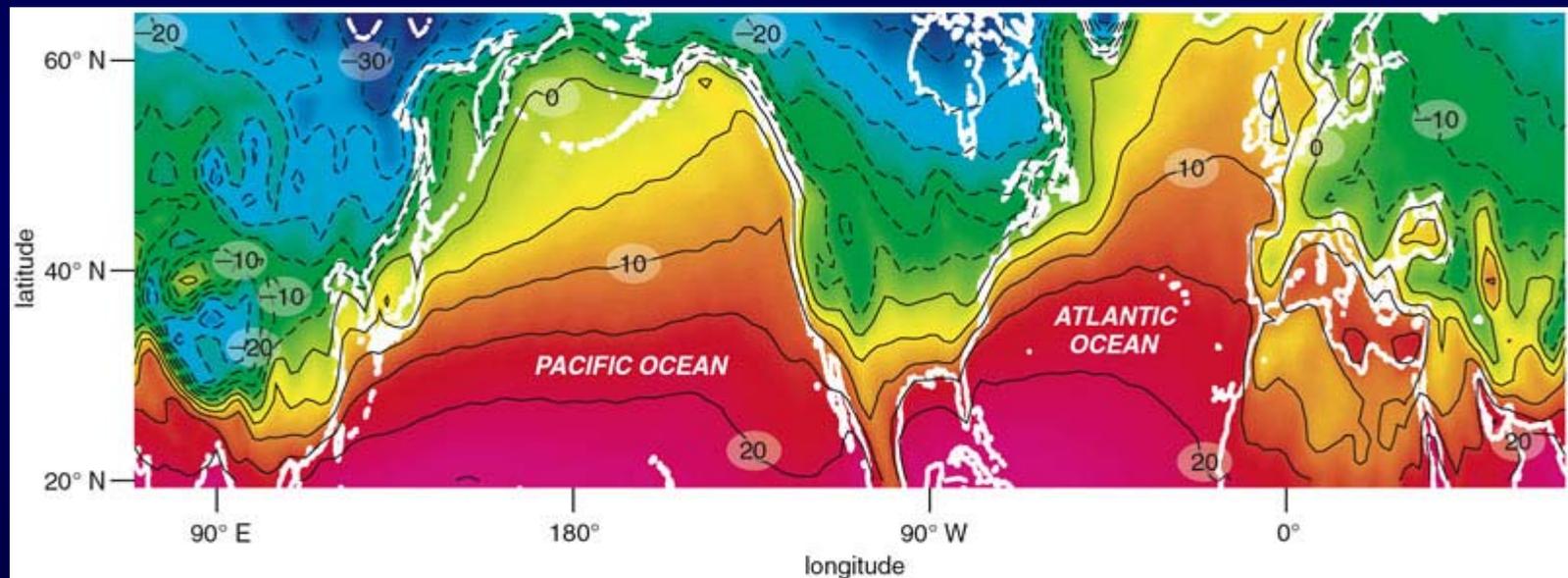


**On ne refroidit pas l'Europe !**

- Réchauffement total de 3.2 K à 2xCO<sub>2</sub> après 400 ans de stabilisation

# THC et climat : un débat

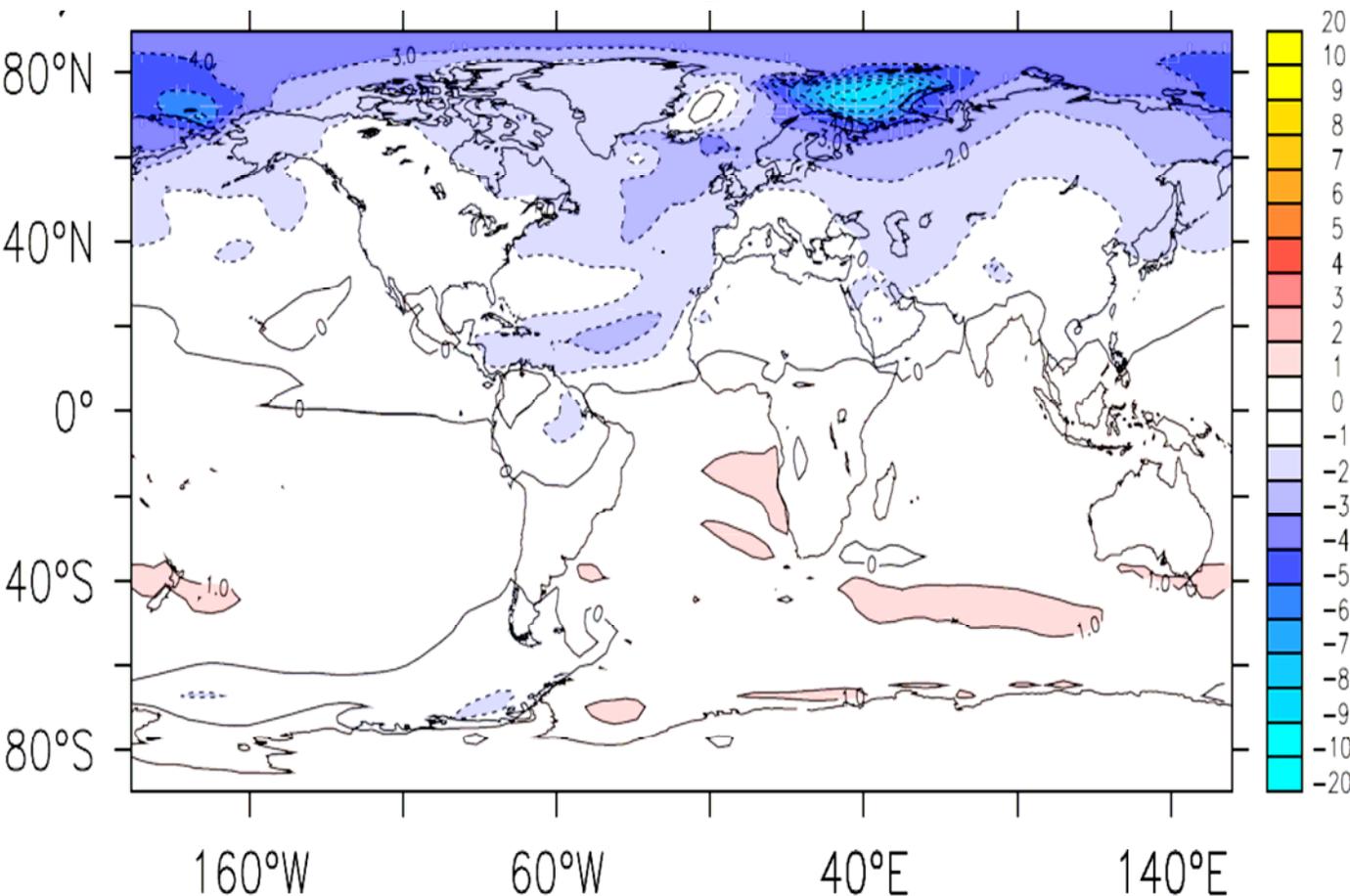
- Seager et al., 2002 : l'effet de la THC sur le climat de l'Europe est négligeable



- Le mécanisme d'impact de la THC sur climat doit être clarifié

# Différence de température de surface entre les 2 scénarios à 2xCO<sub>2</sub>: Effet d'une diminution de THC

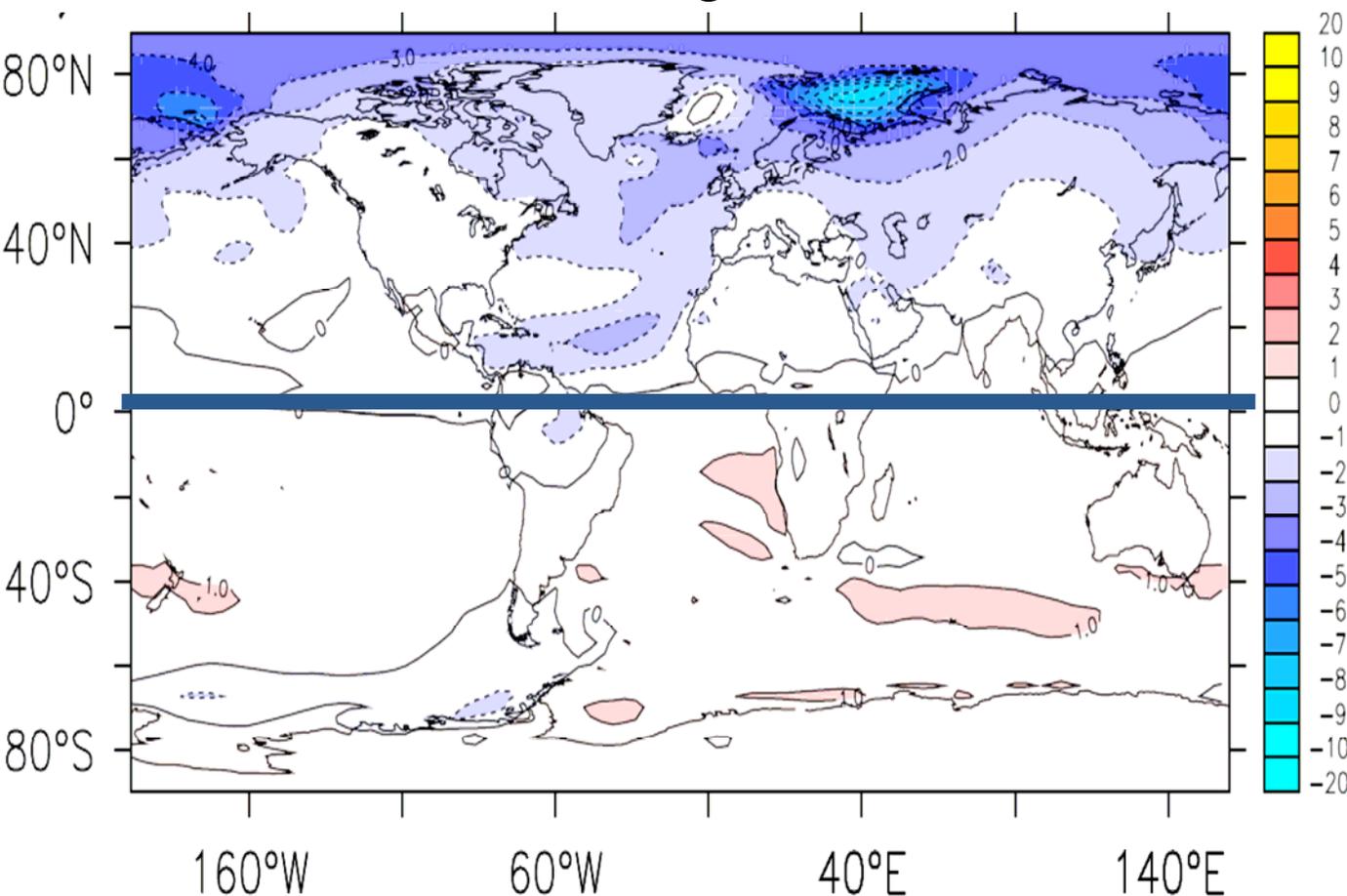
**Avec** – **Sans** Fonte des glaciers



- Différence totale de -0.34 K

# Différence de température de surface entre les 2 scénarios à 2xCO<sub>2</sub>: Effet d'une diminution de THC

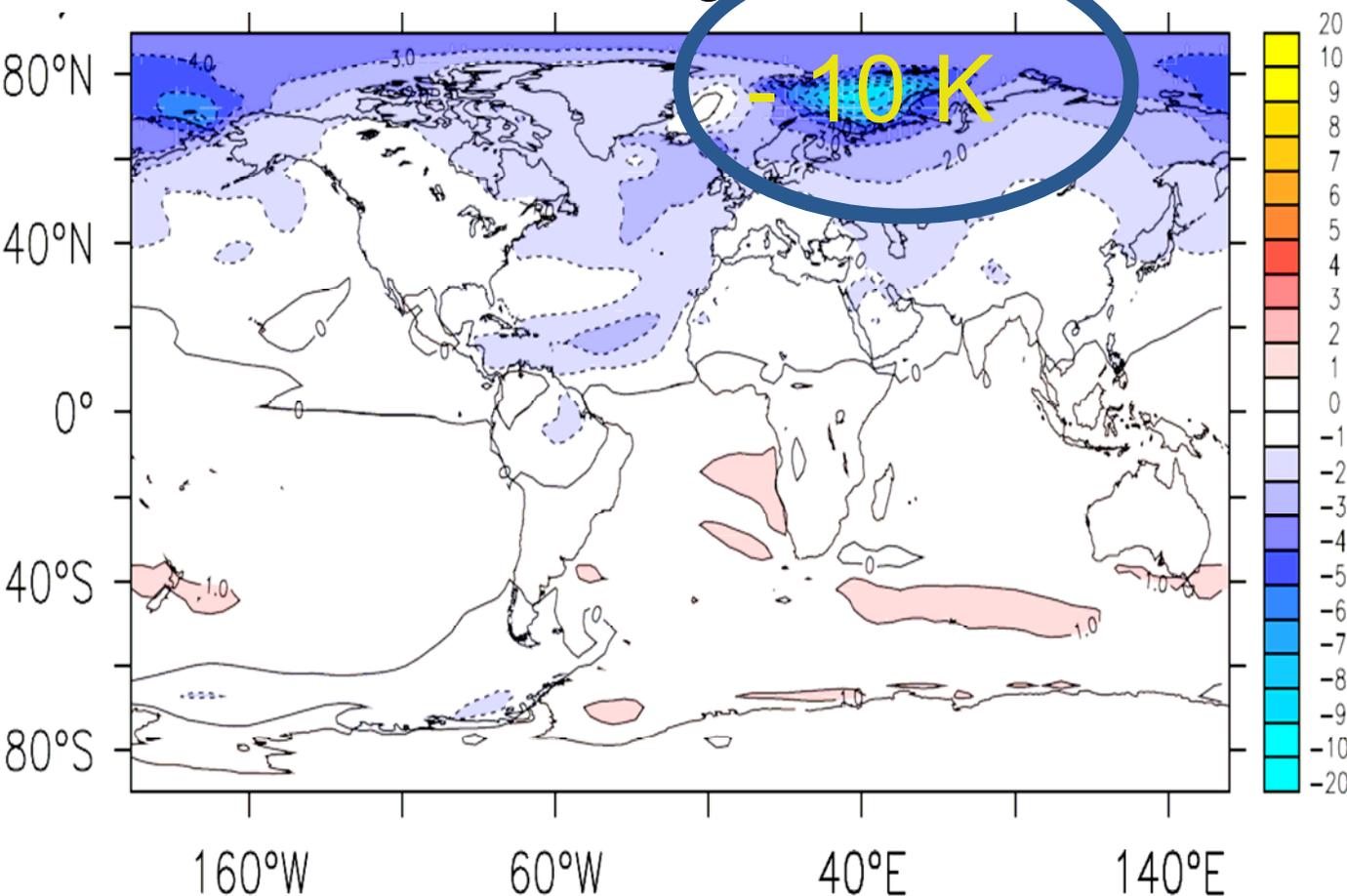
**Avec** – **Sans** Fonte des glaciers



- Différence total de -0.34 K
- Différence de -0.98 K dans l'hémisphère Nord, de +0.44 K dans le Sud

# Différence de température de surface entre les 2 scénarios à 2xCO<sub>2</sub>: Effet d'une diminution de THC

Avec – Sans Fonte des glaciers

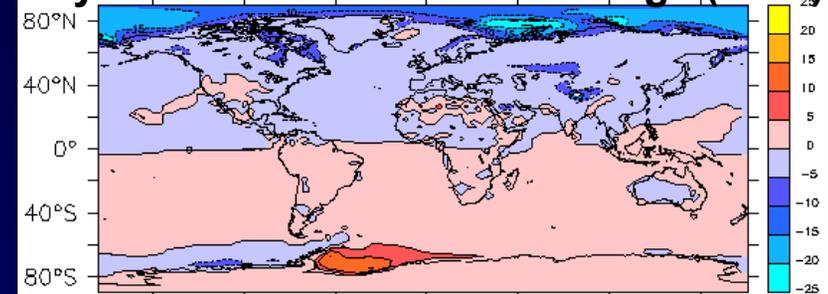


- Différence total de -0.34 K
- Différence de -0.98 K dans l'hémisphère Nord, de -0.44 K dans le Sud
- La plupart du refroidissement se situe au dessus de la mer de Barents

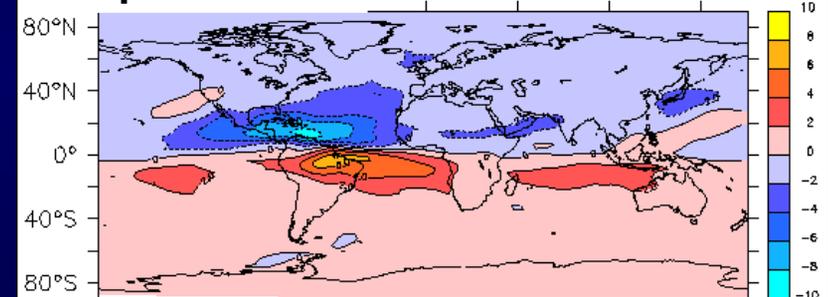
# Changement du bilan radiatif lié au changement de THC

- Réorganisation globale due au changement de THC
- Impact climatique de la THC dû à ?

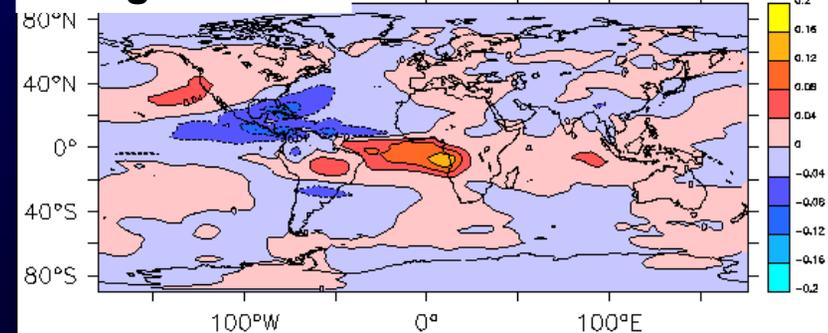
différence **Avec** - **Sans** fonte  
**Rayonnement solaire sans nuage (SW0)**



**Vapeur d'eau**

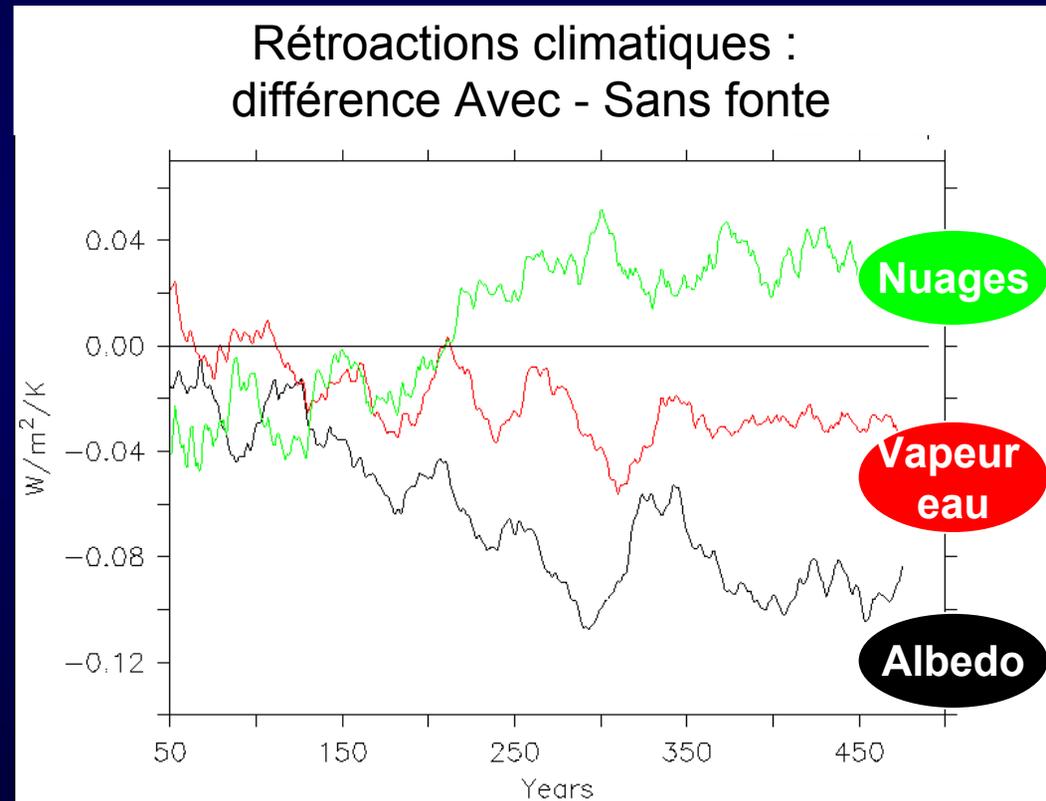


**Nuages hauts**



# Influence d'un changement de THC sur les rétroactions climatiques

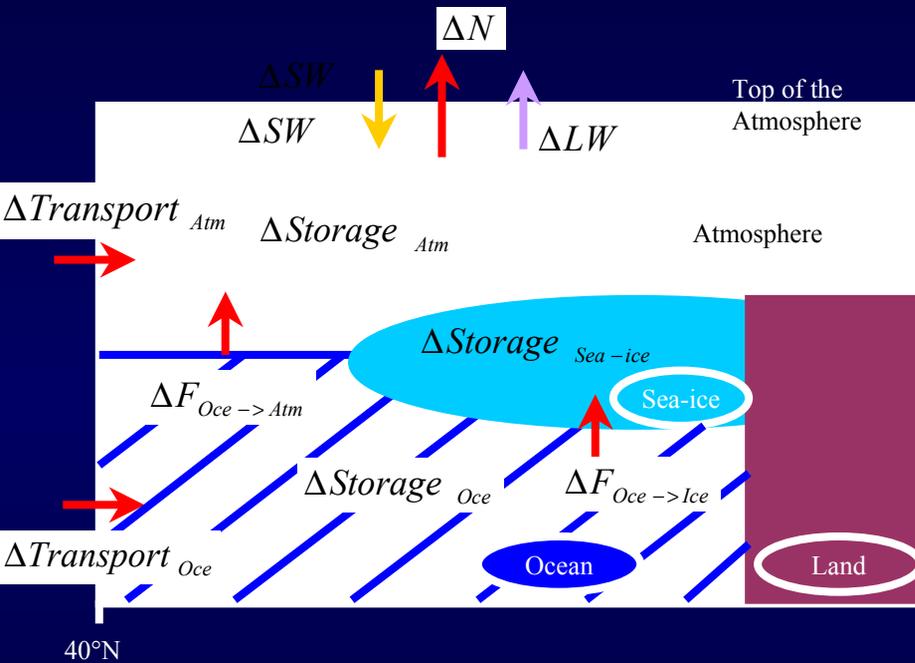
- Impact sur la rétroaction albedo principalement => rétroaction albedo et THC sont liés
- Impact sur les rétroactions nuages et vapeur d'eau sont plus faibles et se compensent



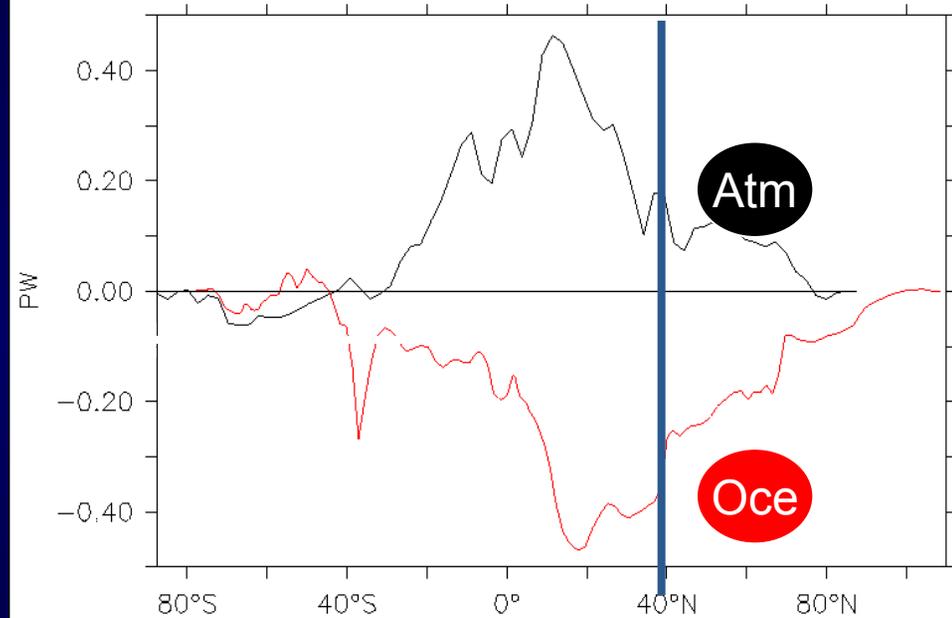
# Plan

1. Le modèle couplé IPSL-CM4 et les scénarios
2. Réponse transitoire de la THC
3. Mécanismes de réponse à long terme
4. Impact climatique de la THC
  - ❖ Généralités
  - ❖ Impact de la THC sur les rétroactions climatiques globale
  - ❖ Compensation atmosphérique et ajustement local

# Compensation par l'atmosphère ?



Transport chaleur : différence Avec - Sans fonte



À bilan radiatif constant et sans stockage : une anomalie de transport océanique est compensée par le transport atmosphérique

Pas de compensation atmosphérique partout : réajustement radiatif et stockage chaleur aux hautes latitudes

# Conclusions

- Fonte des glaciers entraîne un **arrêt de la THC** dans les scénarios avec IPSL-CM4
- La diminution de la THC est aussi liée au réchauffement de température, les facteurs qui aident à un retour de la THC sont :
  - ❖ le **transport d'anomalies de salinité issues des tropiques (40 %)**
  - ❖ la diminution du **transport de glace de mer (35 %)**
- Les rétroactions internes au système THC **amplifient la réponse à une perturbation par 3**
- L'impact climatique de la THC est **plus faible que le réchauffement**
- Cet impact est principalement lié à l'interaction de la THC avec **l'albédo**

# Perspectives

- Résultat dépendant de la sensibilité du modèle
- La **technique d'analyse** développée dans cette thèse peut aider à améliorer la THC dans le modèle
- Raffiner l'estimation de la fonte en incluant un **modèle de calottes**
- Appliquer la méthodologie de **quantification des rétroactions** aux expériences « water Hosing »
- Comparer l'impact de la fonte des glaciers dans **différents GCMs**: mise en place d'intercomparaison de scénarios avec ajout de 0.1 Sv dans les sites de convection



# Merci

[mailto: didier.swingedouw@cea.fr](mailto:didier.swingedouw@cea.fr)

## Referred publications

- The impact of global freshwater forcing on the Thermohaline Circulation: Adjustment of North Atlantic convection sites in CGCM , by Swingedouw D., Braconnot P., Delecluse P., Guilyardi E. and Marti O., *Climate Dynamics*, 2006
- Sensitivity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments , by Swingedouw D., Braconnot P., and Marti O., *Geophysical Research Letters*, 2006
- Influence of the Atlantic Meridional Overturning Circulation on the CO<sub>2</sub> uptake in century-scale scenarios , by Swingedouw D., Bopp L., Matras A. and Braconnot P., submitted to *Geophysical Research Letters*
- Mechanisms of AMOC response to changes in surface buoyancy forcing under global warming in the IPSL-CM4 , by Swingedouw D., Braconnot P., Delecluse P., Guilyardi E. and Marti O., submitted to *Climate Dynamics*
- Effect of Greenland ice-sheet melting on the response and stability of the AMOC in next centuries, by Swingedouw D. and Braconnot P., part of *AGU monograph "Past and future changes of the Ocean's Meridional Overturning Circulation: Mechanisms and Impact"* by Schmittner A., Chiang J. and Hemming S.

## Non-referred publications, in french

- Sensibilité de la circulation océanique méridienne à la fonte des glaciers du Groenland en simulation scénario , par Swingedouw D., Braconnot P. et Marti O., *Compte rendu des Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère* 2006
- Mécanismes et conséquences d'une perturbation du Gulf Stream dans un climat qui se réchauffe , par Swingedouw D., pour la revue brésilienne *Ciencia y ambiente*