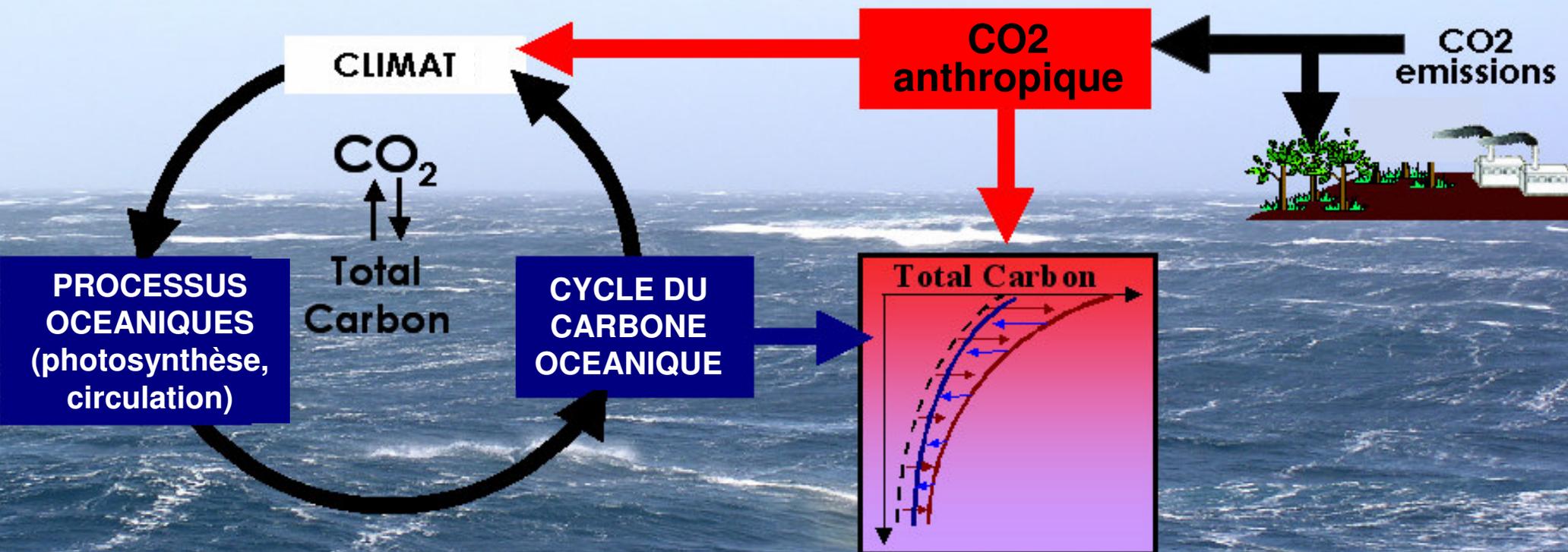


# Impact des émissions de CO<sub>2</sub> et du changement climatique sur le DIC des eaux de mode de l'Océan Indien Sud

Claire Lo Monaco, Andrew Lenton et Nicolas Metzl



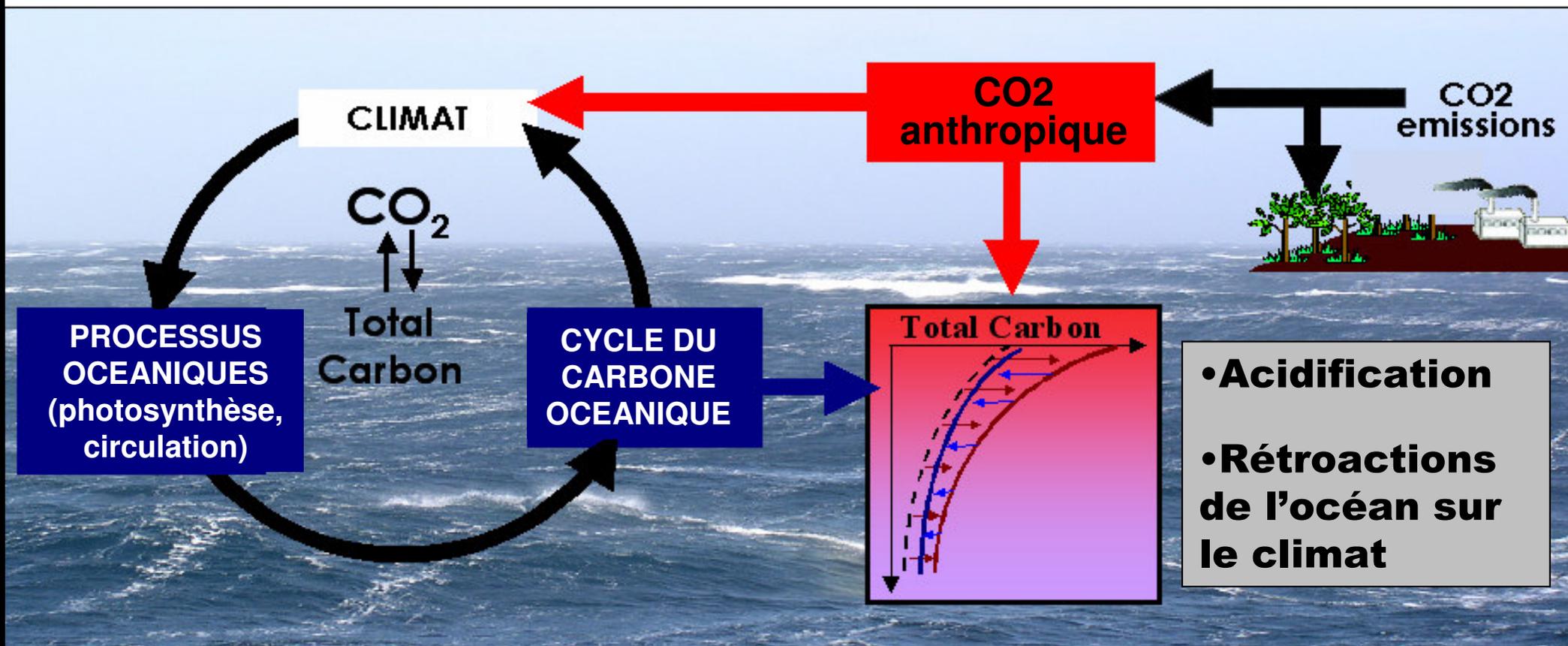
Laboratoire d'Océanographie et du Climat:  
Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN-IPSL, Paris)



## Budget de Carbone pour l'année 2007

### Conclusions du Global Carbon Project (2008):

- Les émissions de CO<sub>2</sub> anthropique ont augmenté ~4 fois plus rapidement depuis 2000 que sur la décennie précédente, [...]
- Les puits naturels de CO<sub>2</sub> augmentent, mais plus lentement que le CO<sub>2</sub> atmosphérique, [...]
- Tous ces changements caractérisent un forçage du cycle du carbone sur le climat plus important et plus tôt que prévu.



## Évolution du Carbone Inorganique dissous (DIC) dans les eaux de mode de l'Océan Indien

### I. Observations

Quelle information peut-on obtenir des mesures *in situ* ?

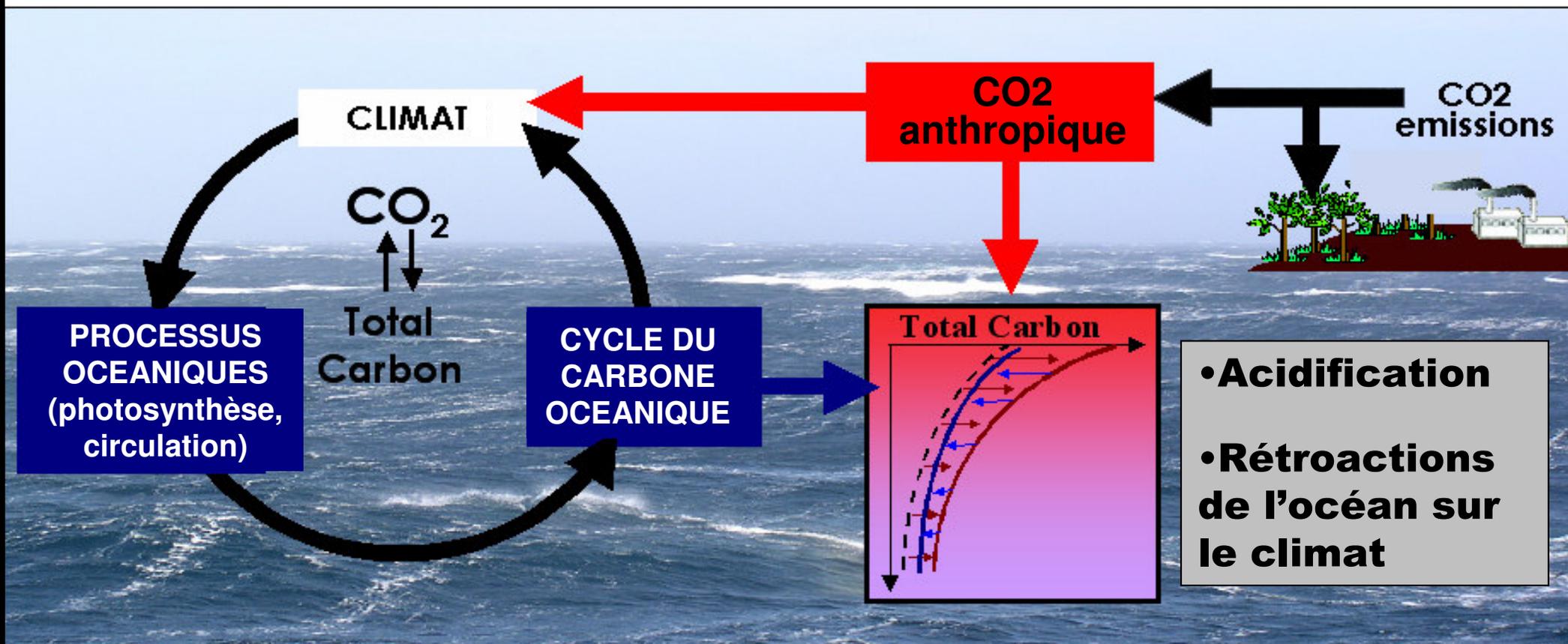
### II. Comparaison Modèle/Observations

Un modèle océan-C global ( $\sim 2^\circ \times 2^\circ$ ) peut-il reproduire les observations régionales ?

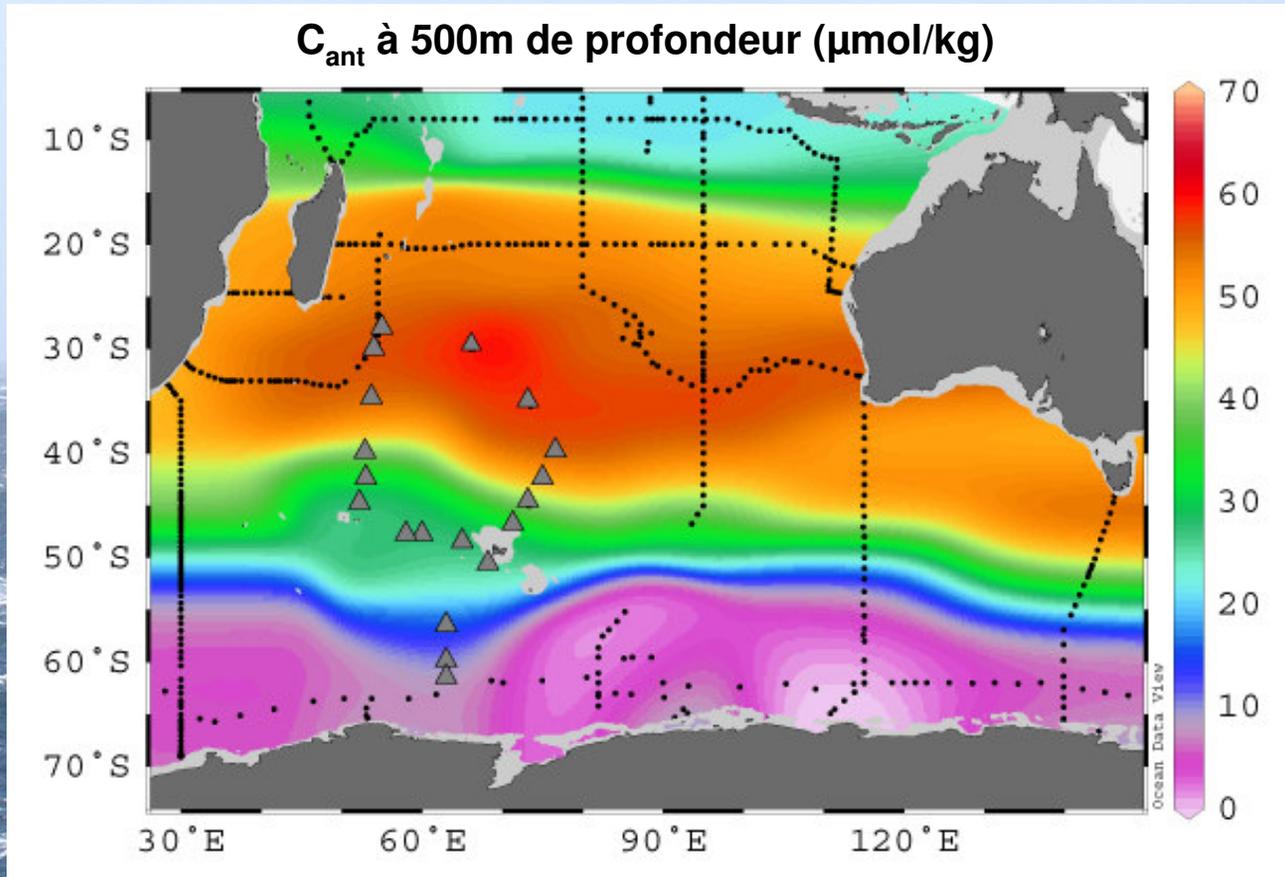
### III. Travail en cours, perspectives

Quels mécanismes contrôlent les variations de DIC dans le modèle ?

Cohérent avec les observations ? Extrapolation à l'échelle du bassin Indien Sud ?



## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90



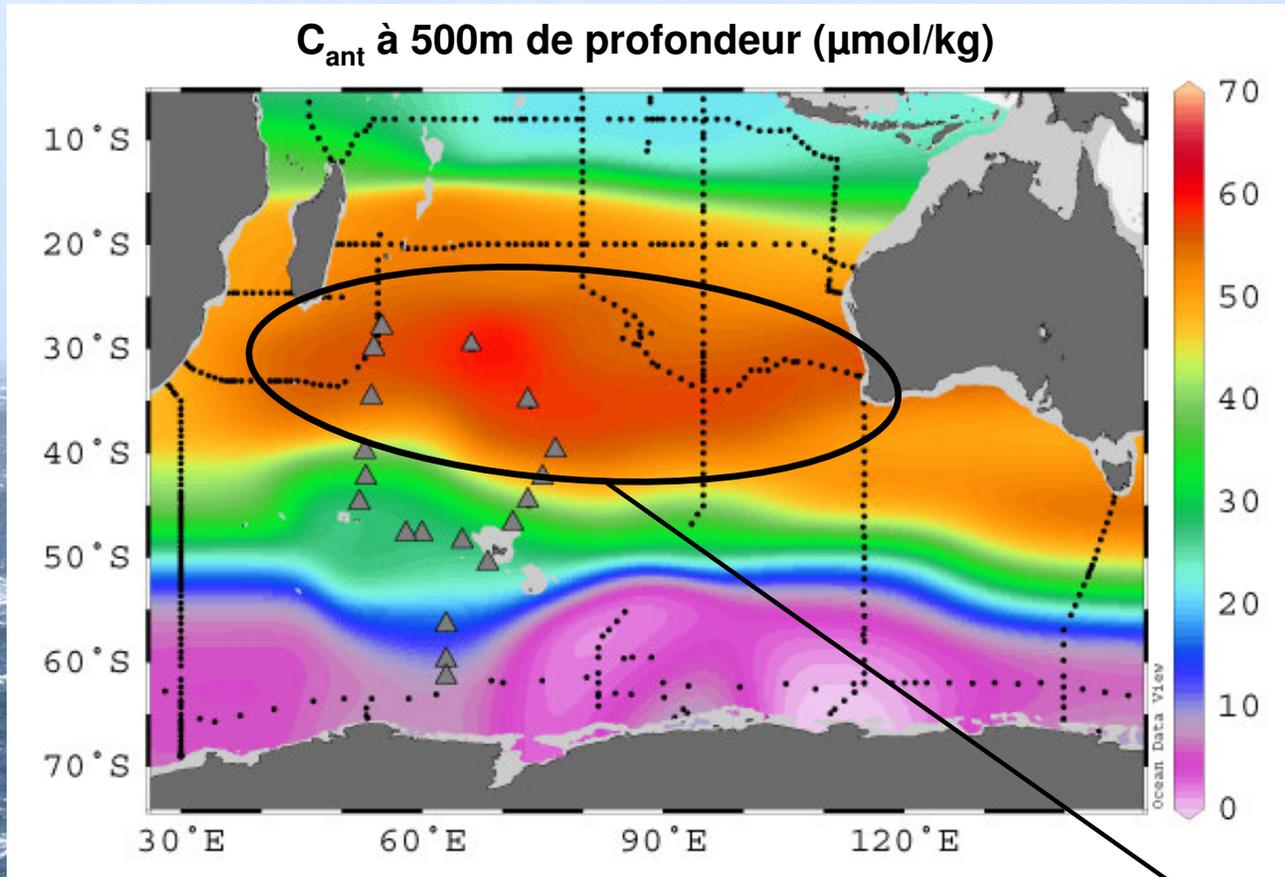
$C_{ant}$  estimé à partir de  
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA,  $O_2$ ,  $NO_3$

• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)

## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90



$C_{ant}$  estimé à partir de  
mesures *in situ* :

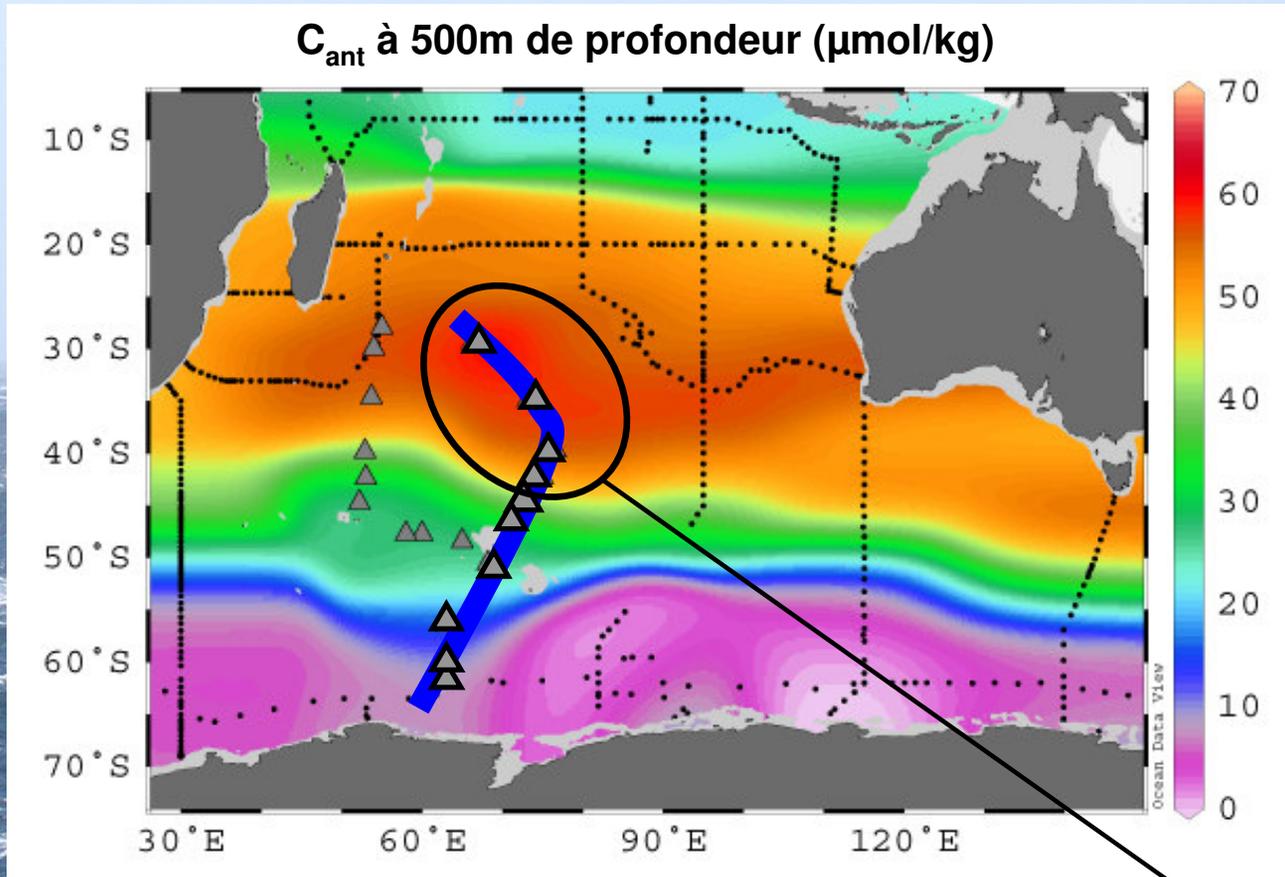
S, T, DIC, TA,  $O_2$ ,  $NO_3$

• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)

Accumulation de  $C_{ant}$   
max aux moyennes  
latitudes...

## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90

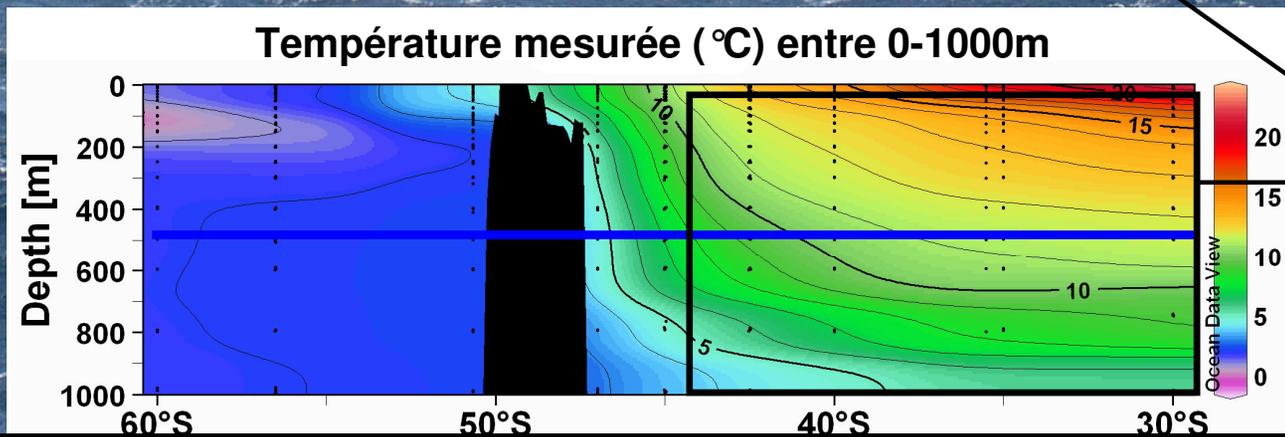


$C_{ant}$  estimé à partir de  
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA,  $O_2$ ,  $NO_3$

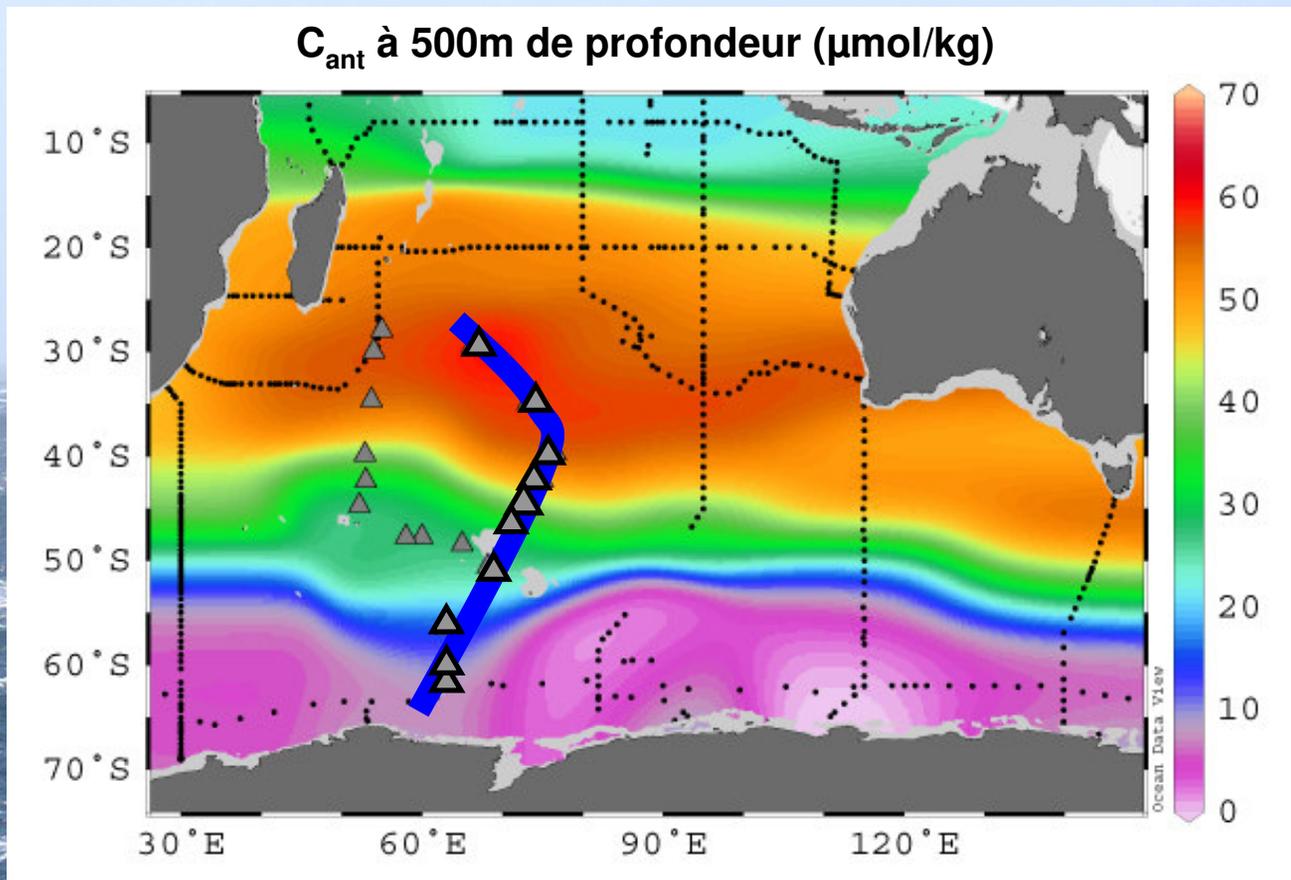
• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)



... dans les eaux de  
mode

## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90

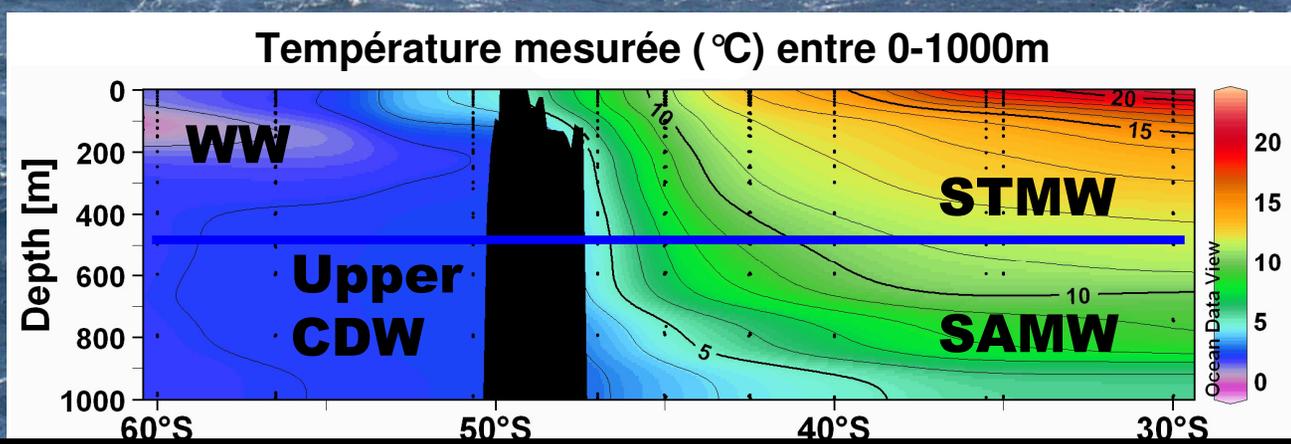


$C_{ant}$  estimé à partir de  
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA,  $O_2$ ,  $NO_3$

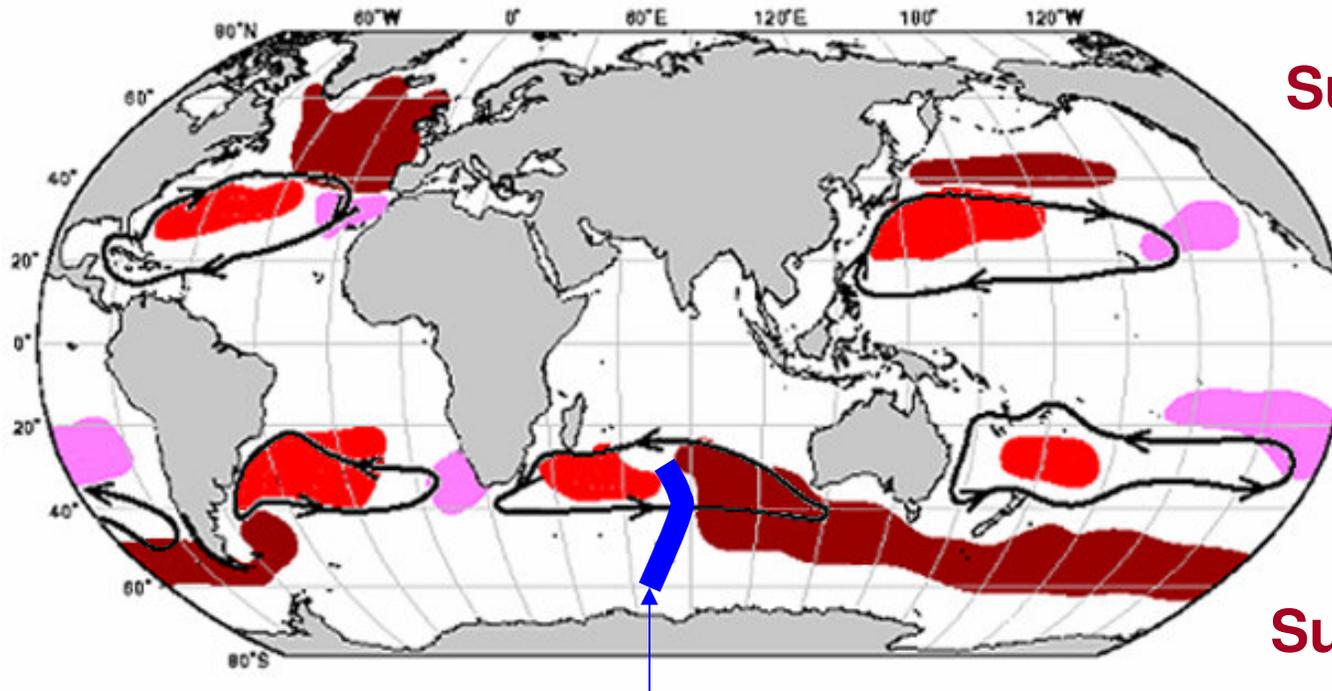
• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)



Accumulation de  $C_{ant}$   
max dans les eaux  
de mode

## Mode Waters distribution after Hanawa and Talley, 2000)



**Subpolar MW**

**Subtropical MW**

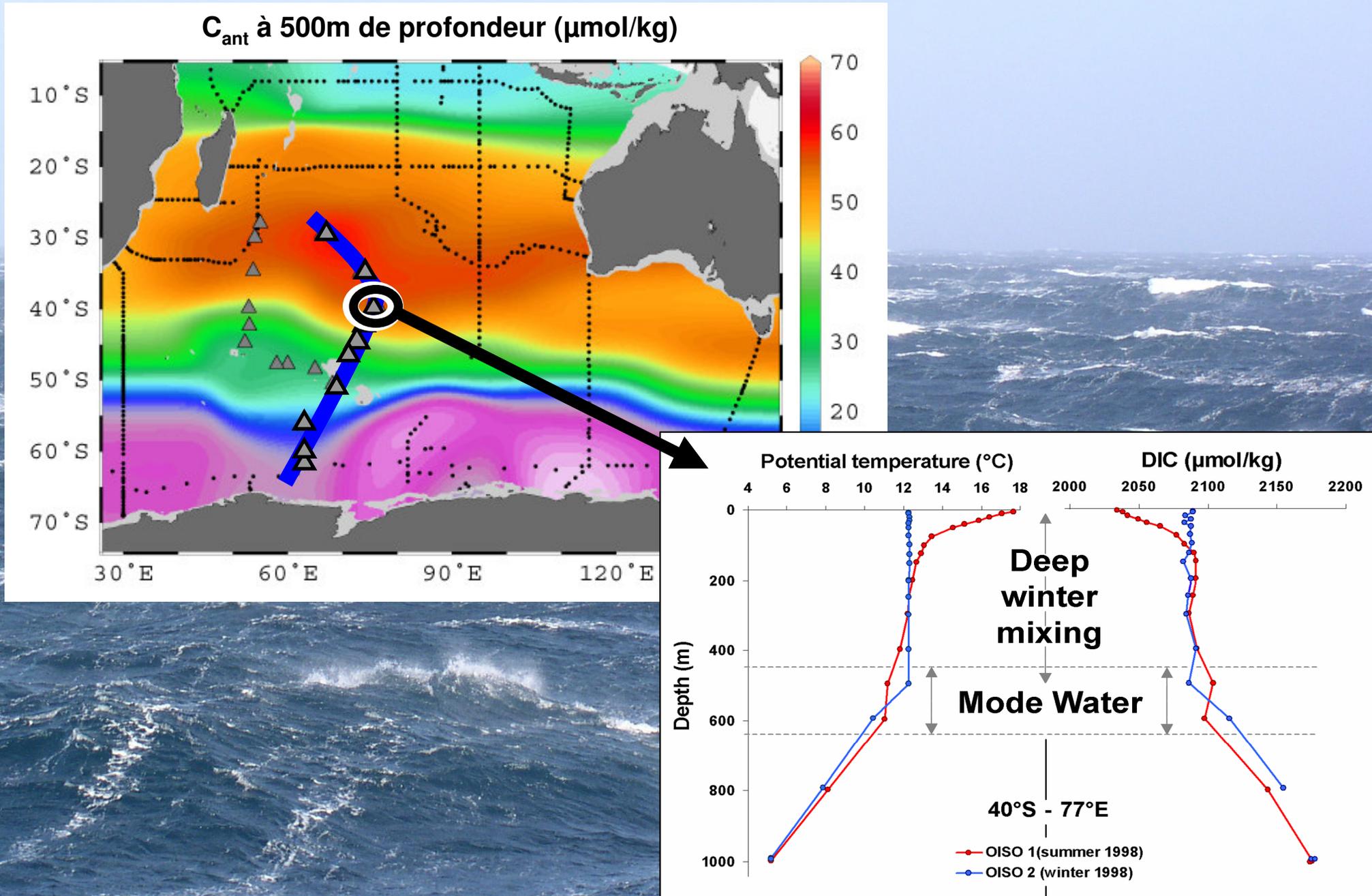
**Eastern  
Subtropical MW**

**Subtropical MW**

**Subantarctic MW**

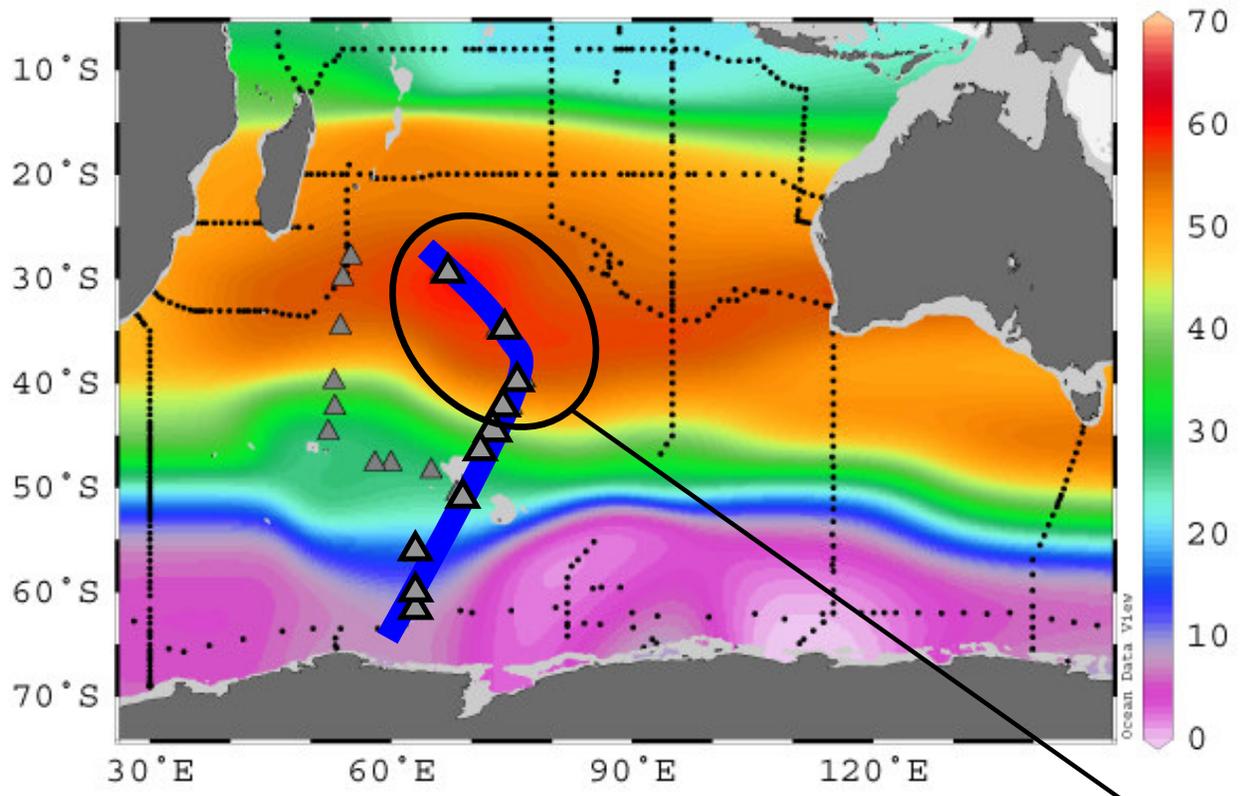
**Section OISO**

## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90



## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90

$C_{ant}$  à 500m de profondeur ( $\mu\text{mol/kg}$ )



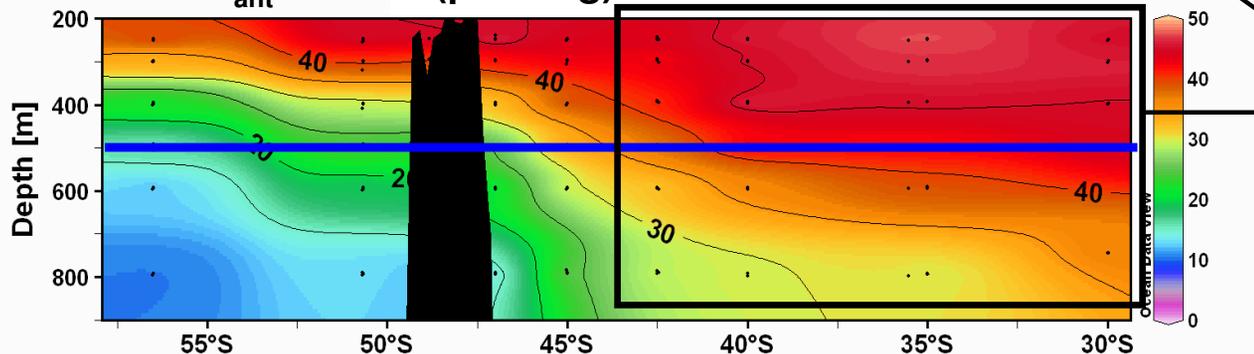
$C_{ant}$  estimé à partir de mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA,  $O_2$ ,  $NO_3$

• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)

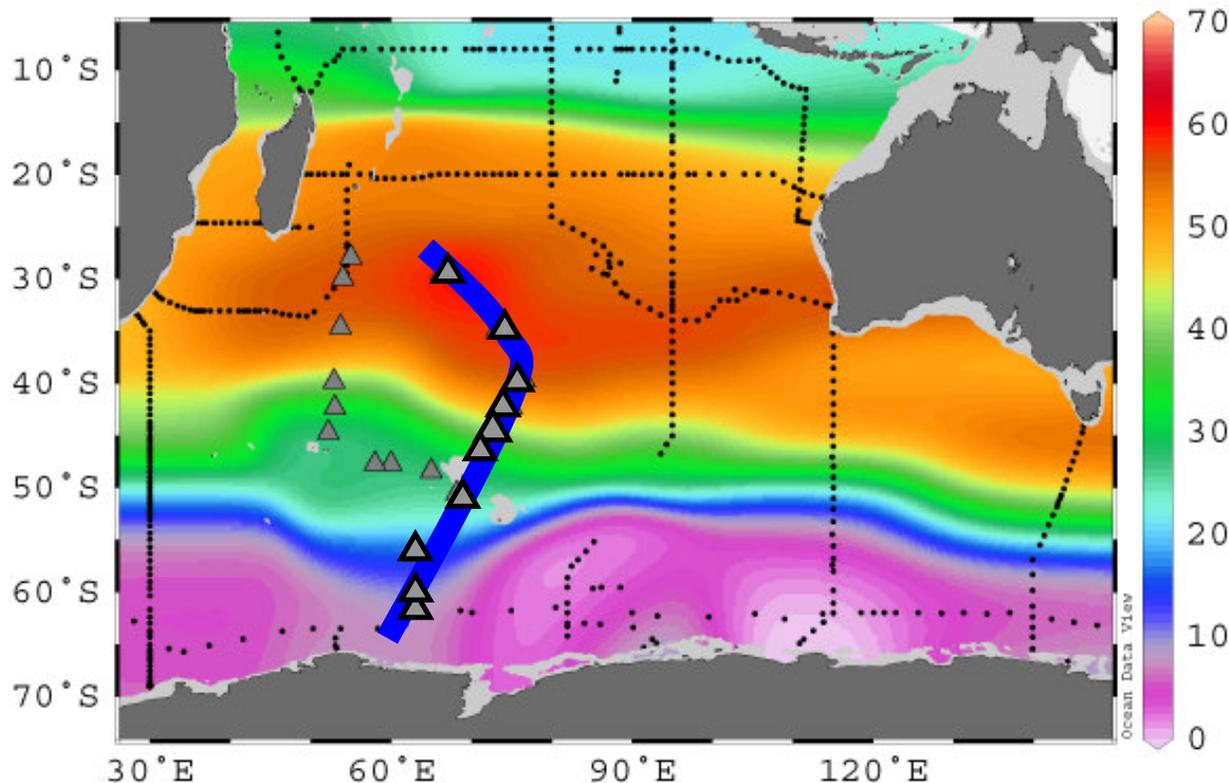
$C_{ant}$  calculé ( $\mu\text{mol/kg}$ ) entre 200m et 1000m



**Accumulation de  $C_{ant}$  max dans les eaux de mode**

## Accumulation de carbone anthropique ( $C_{ant}$ ) dans les années 90

$C_{ant}$  à 500m de profondeur ( $\mu\text{mol/kg}$ )



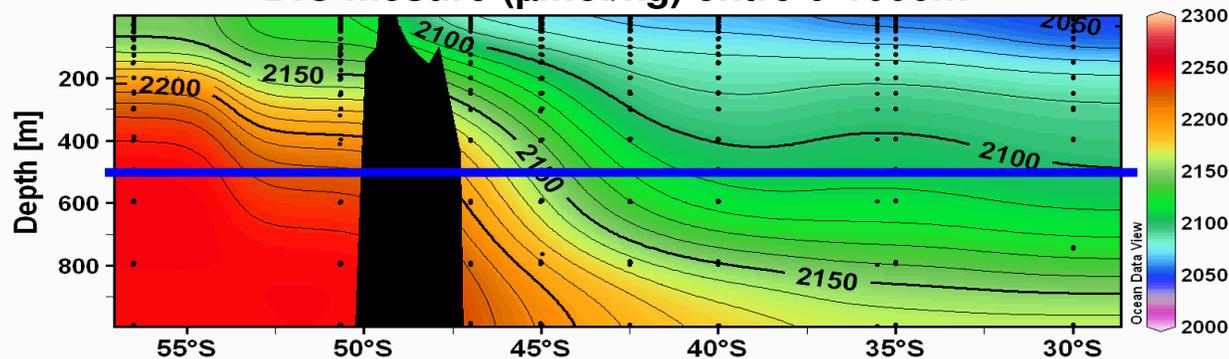
$C_{ant}$  estimé à partir de  
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA,  $O_2$ ,  $NO_3$

• WOCE (1993-1996)

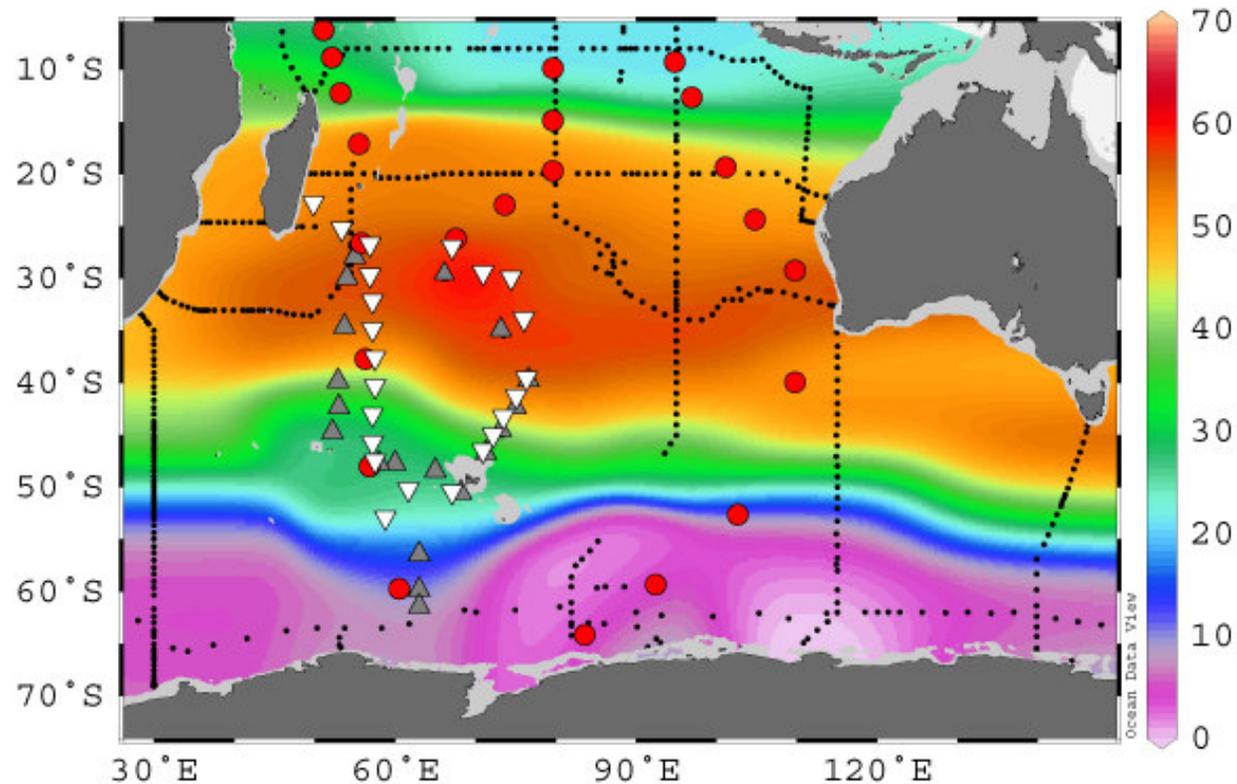
▲ OISO 1-6 (1998-2001)

DIC mesuré ( $\mu\text{mol/kg}$ ) entre 0-1000m



Accumulation de  $C_{ant}$   
max dans les eaux  
de mode

## Carbone anthropique à 500m (années 90)



• WOCE (1993-1996)

● GEOSECS (1978)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)

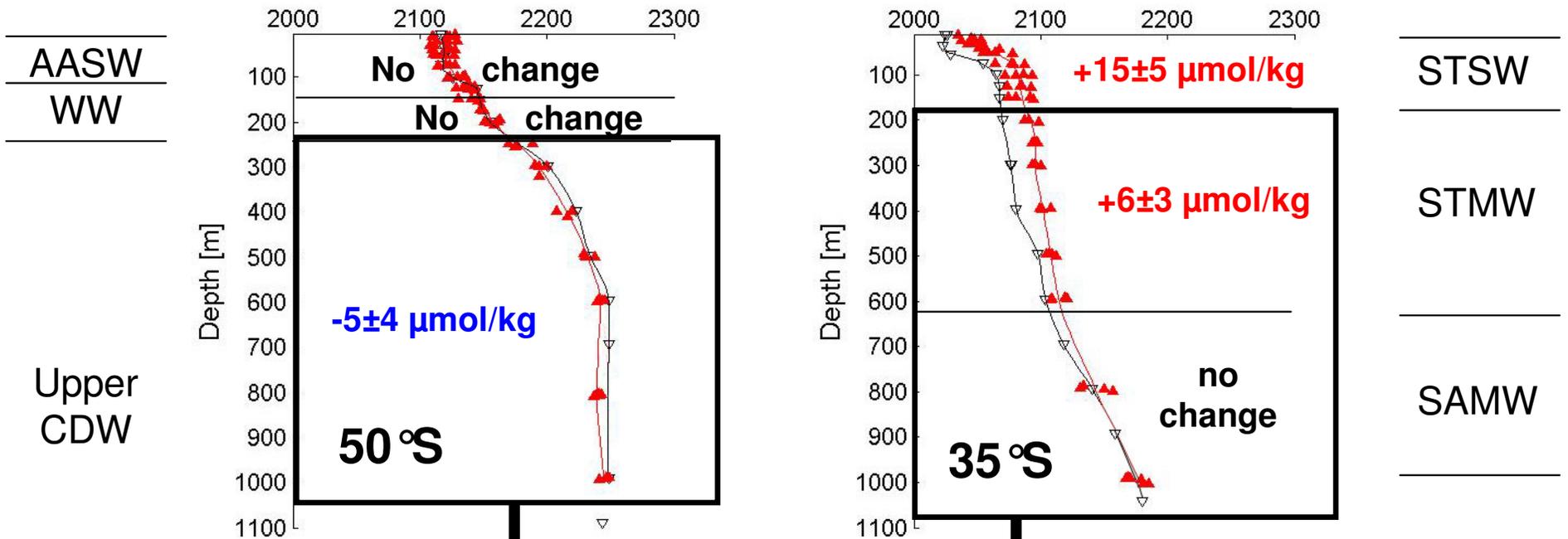
▽ INDIGO 1 (1985)

Comparaison avec les mesures historiques

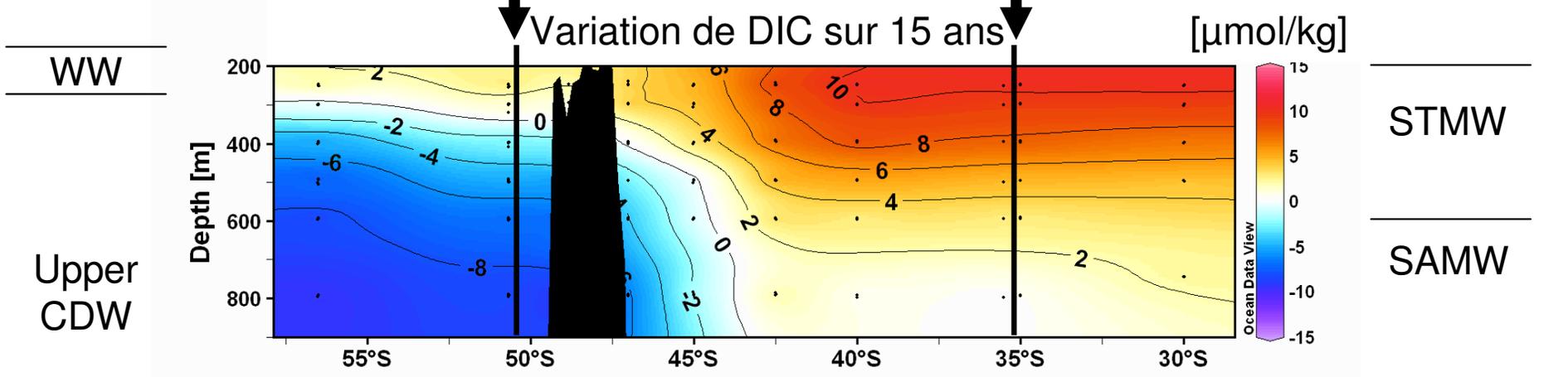
→ étude des variations décennales des propriétés océaniques

## Évolution du DIC mesuré entre 200-1000m en 1985 et 1998-2001

△ INDIGO1 (1985)    ▲ OISO (1998-2001)



Variation de DIC sur 15 ans



## Extended Multi-Linear Regression (eMLR) technique

Friis et al. (2005, *DSR.I*)

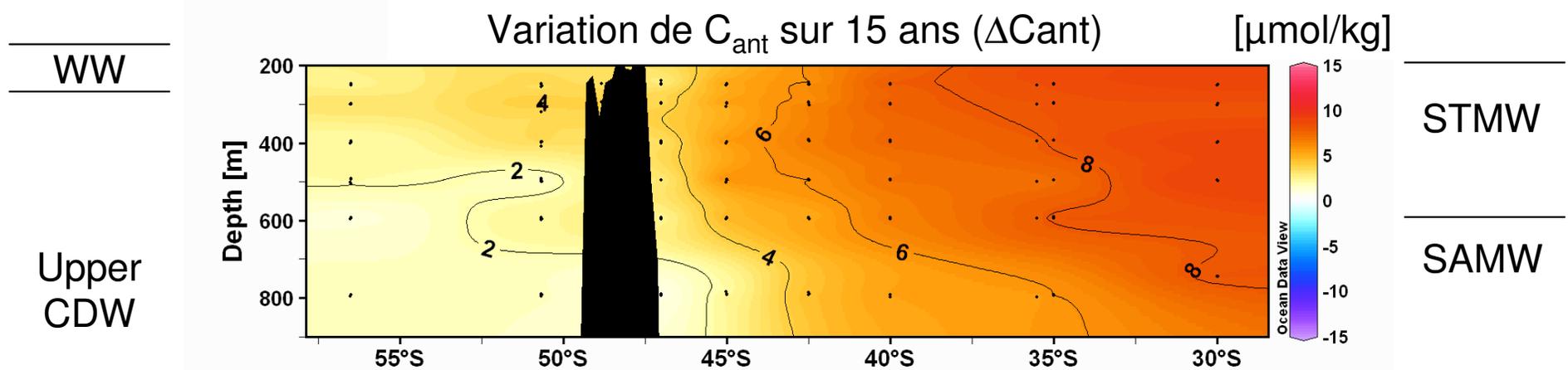
Multi-Linear regressions of Total Carbon against selected tracers (A, B, C...) determined using observations collected at time  $t_1$  and  $t_2$ .

$t_1$  : INDIGO (1985)  $\rightarrow$  Total Carbon ( $t_1$ ) =  $a_1.A_1 + b_1.B_1 + c_1.C_1 + d_1$

$t_2$  : OISO (1998-2001)  $\rightarrow$  Total Carbon ( $t_2$ ) =  $a_2.A_2 + b_2.B_2 + c_2.C_2 + d_2$

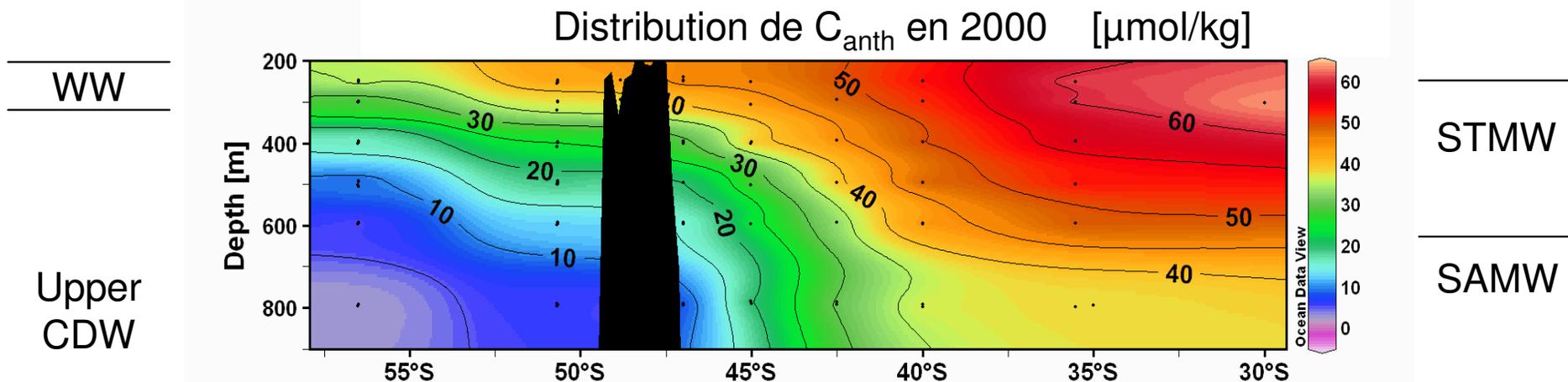
Coefficients determined for time  $t_1$  and  $t_2$  are then applied to the same set of tracers to evaluate the change in Total Carbon between  $t_1$  and  $t_2$ :

$$\text{Total Carbon change } (t_2 - t_1) = (a_2 - a_1).A_2 + (b_2 - b_1).B_2 + (c_2 - c_1).C_2 + (d_2 - d_1)$$

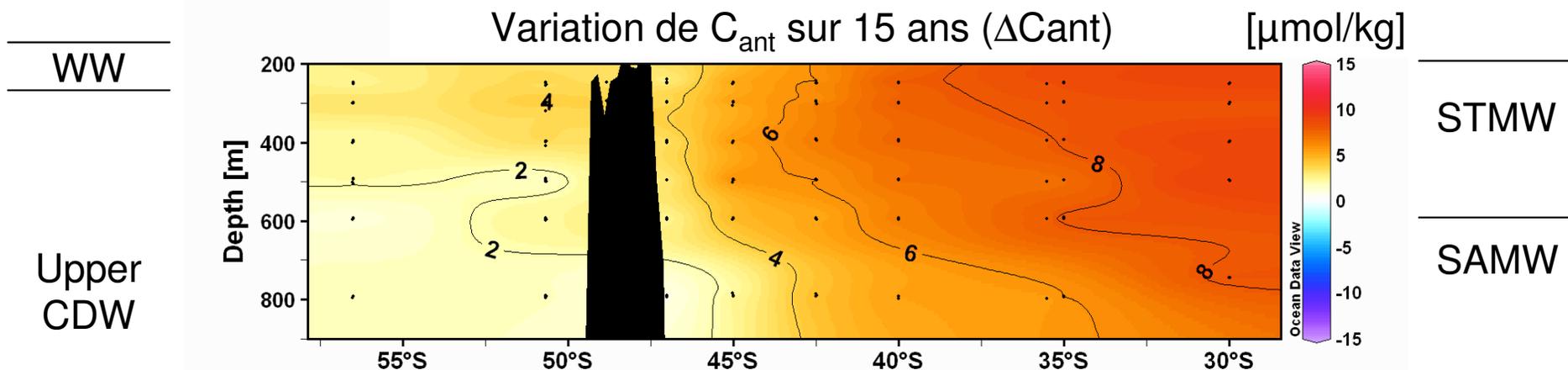


## Accumulation de $C_{ant}$ dans les eaux de mode:

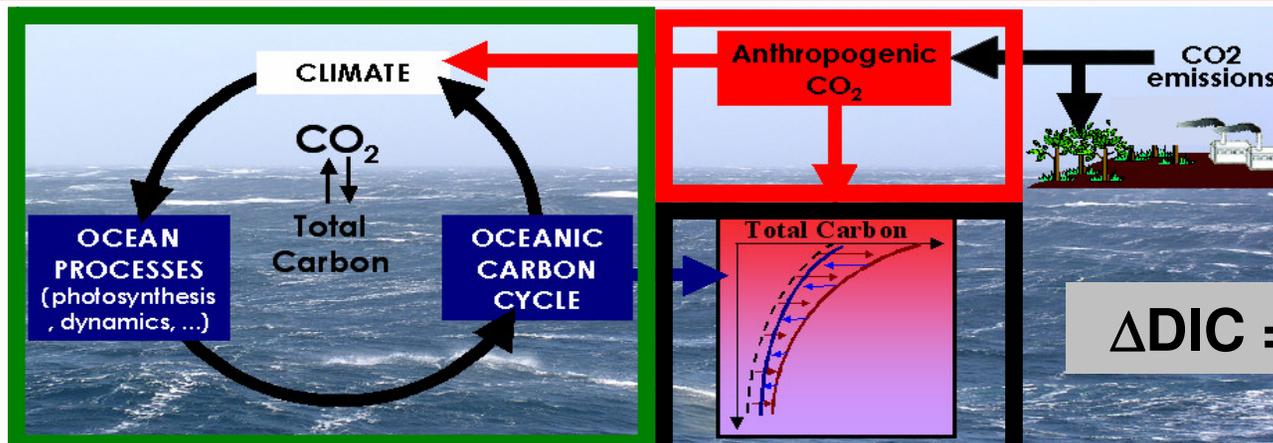
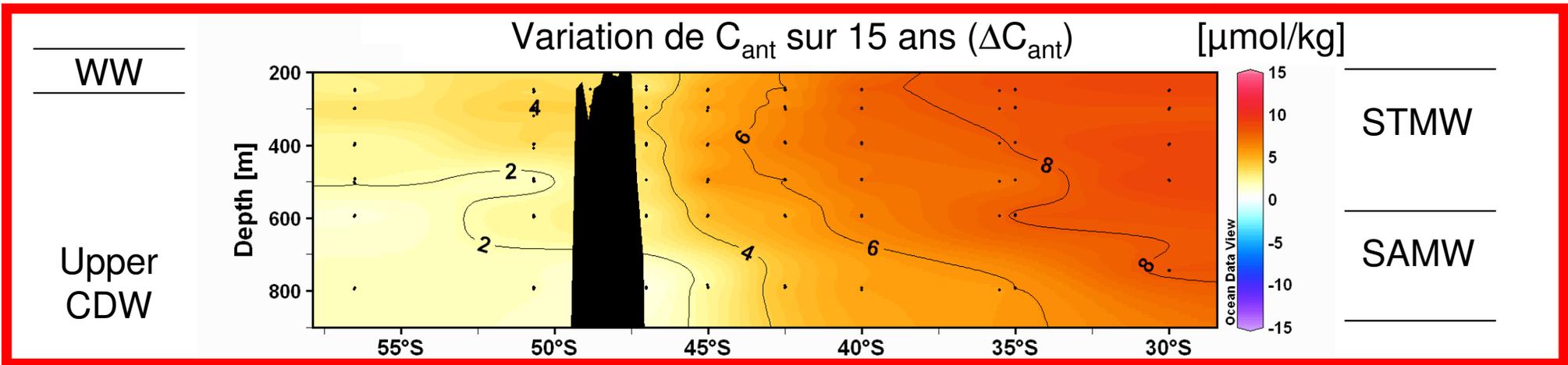
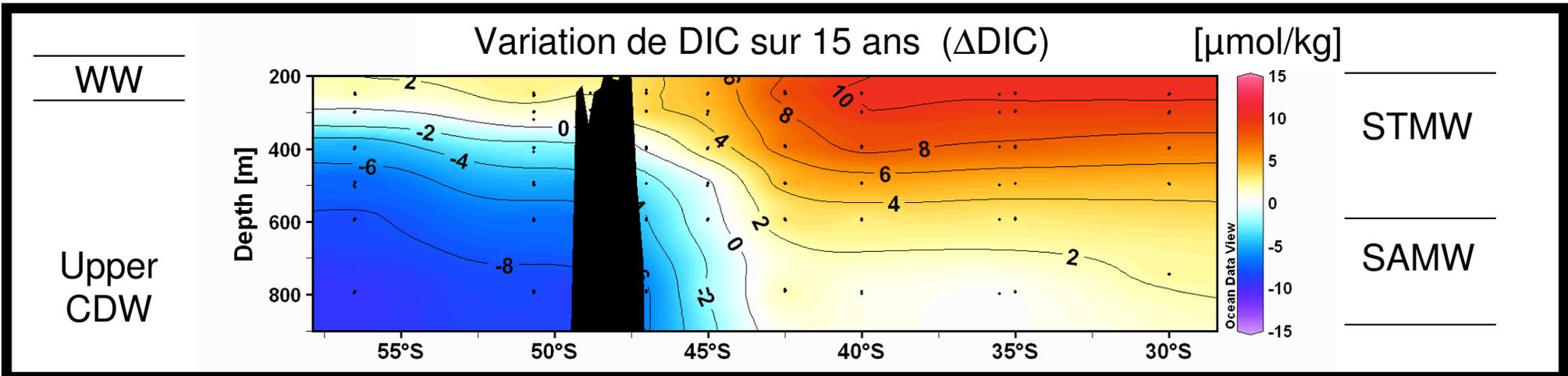
Augmentation de 5-10  $\mu\text{mol/kg}$  en 15 ans  $\rightarrow$   $\sim 1/6$  de l'accumulation totale ( $\sim 200$  ans)



Méthode de back-calculation ( $C_{IPSL}^0$ ), Lo Monaco et al. (2005, *JGR*)

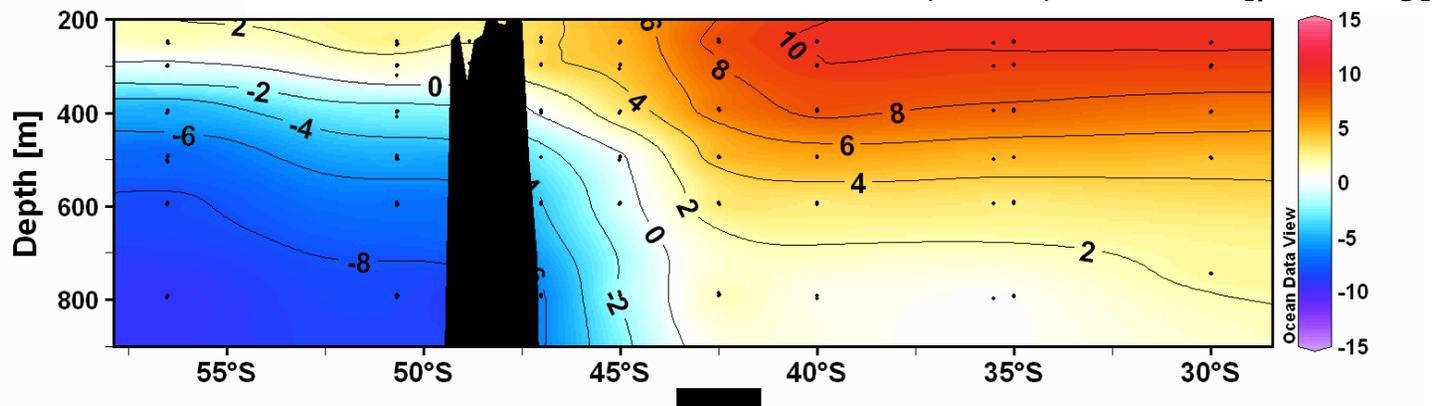


Méthode eMLR (Extended Multi-Linear Regression), Friis et al. (2005, *DSR.I*)

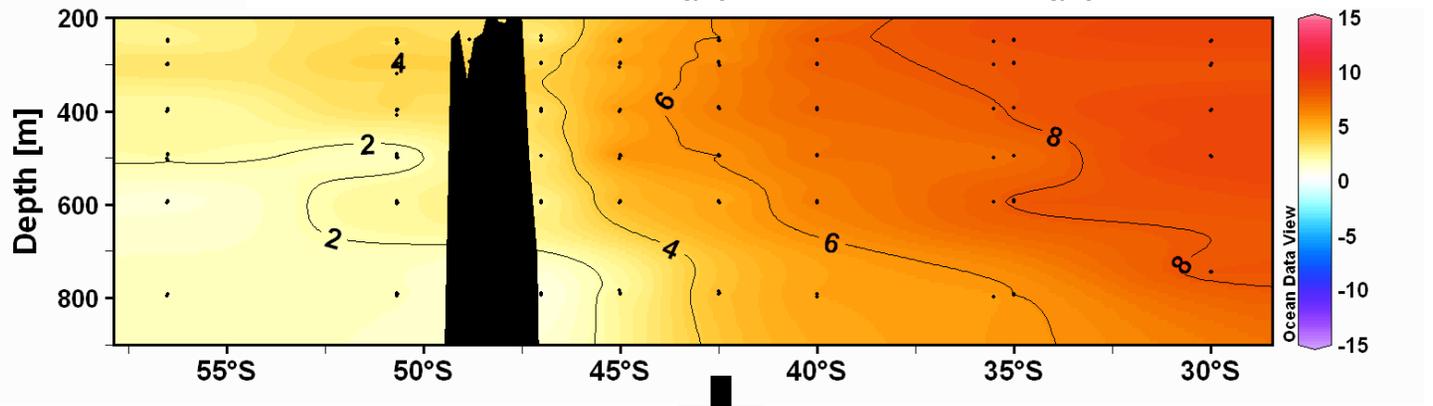


$$\Delta DIC = \Delta C_{\text{oc}} + \Delta C_{\text{ant}}$$

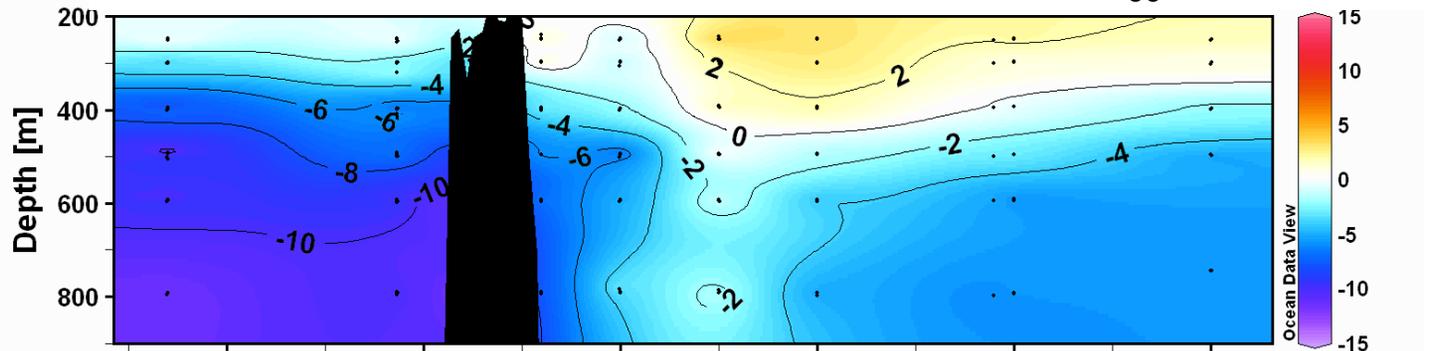
Variation de DIC sur 15 ans ( $\Delta$ DIC) [ $\mu$ mol/kg]



Variation de  $C_{ant}$  sur 15 ans ( $\Delta C_{ant}$ ) [ $\mu$ mol/kg]



Impact de la variabilité océanique sur le DIC ( $\Delta C_{oc}$ ) [ $\mu$ mol/kg]



## OBSERVATIONS

**Au Nord du front polaire:** les eaux de mode transportent le CO<sub>2</sub> anthropique de la surface vers l'océan intérieur (~0-1000m)

**STMW:** l'invasion de CO<sub>2</sub> anthropique explique la quasi-totalité des variations de DIC.

$$\Delta \text{DIC} = \Delta C_{\text{ant}} = + 8 \text{ } \mu\text{mol/kg} \text{ (1985} \rightarrow \text{2000)}$$

**SAMW:** l'invasion de CO<sub>2</sub> anthropique est compensée par une diminution égale du DIC en réponse à la variabilité océanique.

$$\Delta \text{DIC} = \Delta C_{\text{ant}} + \Delta C_{\text{oc}} = 0 \text{ (1985} \rightarrow \text{2000)}$$

**Au sud du Front Polaire :** pas d'accumulation significative de CO<sub>2</sub> anthropique sur 15 ans

**U-CDW:** diminution du DIC en réponse à la variabilité océanique.

$$\Delta \text{DIC} = \Delta C_{\text{oc}} = - 9 (\pm 6) \text{ } \mu\text{mol/kg} \text{ (1985} \rightarrow \text{2000)}$$

## MODELE ?

# Modèle Océan-Carbone NEMO2

## Composantes:

**Modèle océanique = OPA9** (GM90 et TKE mixed layer scheme)

**Modèle biogéochimique = PISCES** (type NPZD)

**Modèle de glace = LIM2**

## Résolution:

**XY → 2°x 2°** (grille resserrée à l'équateur)

**Z → 31 niveaux verticaux, épaisseur variable** (19 niveaux entre 0-500m)

## Forçages

**flux de chaleur et vents ERA40**

**évaporation/précipitation CORE** (rappel vers SST Reynolds et SSS Levitus)

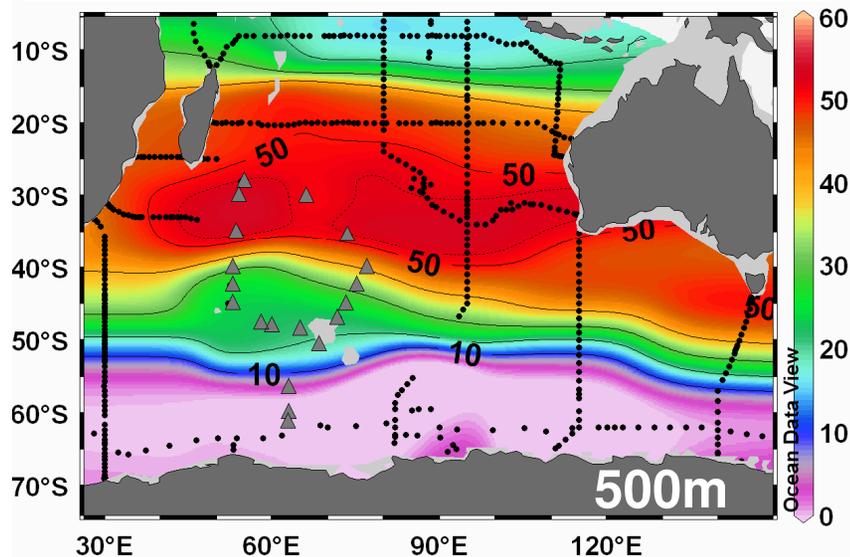
## Scénario CO<sub>2</sub> :

**Simulation Préindustrielle = CO<sub>2</sub> atmosphérique constant à 278 ppm**

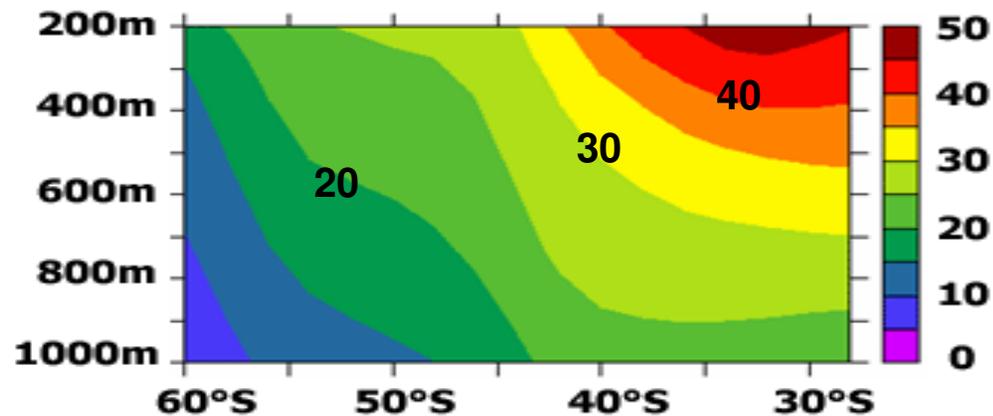
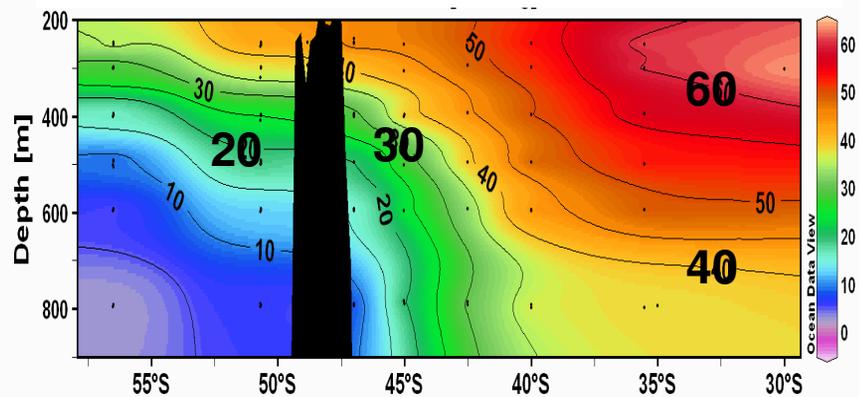
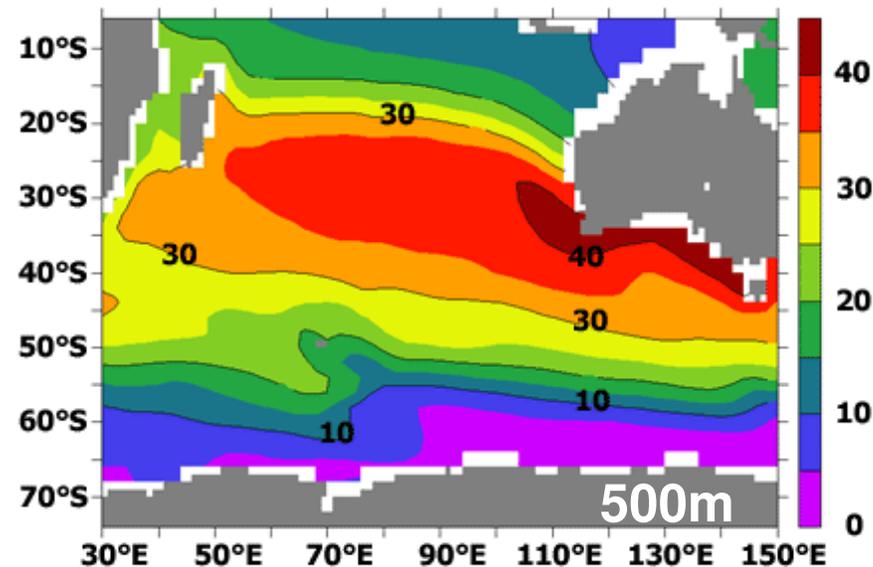
**Simulation Anthropique = accroissement de CO<sub>2</sub> atmosphérique observé**

## Distribution du carbone anthropique ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )

OBSERVATION (1995-2000)

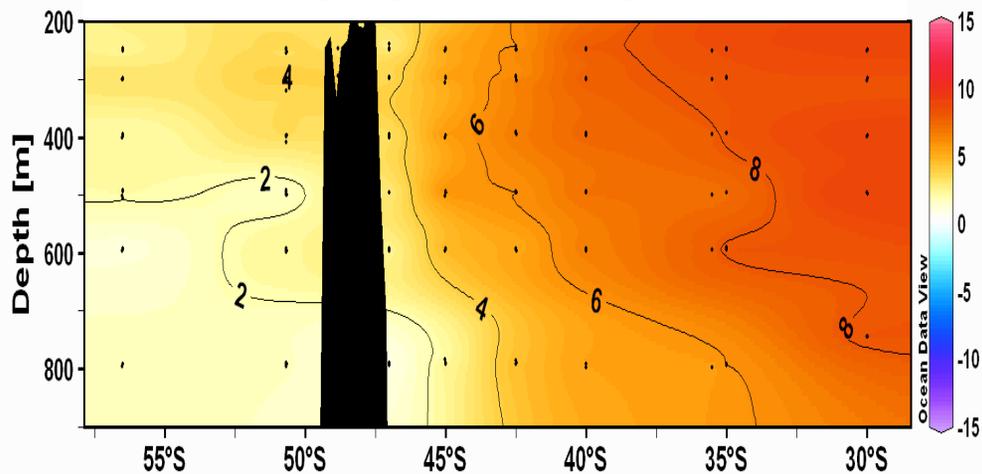


MODELE (année 2000)

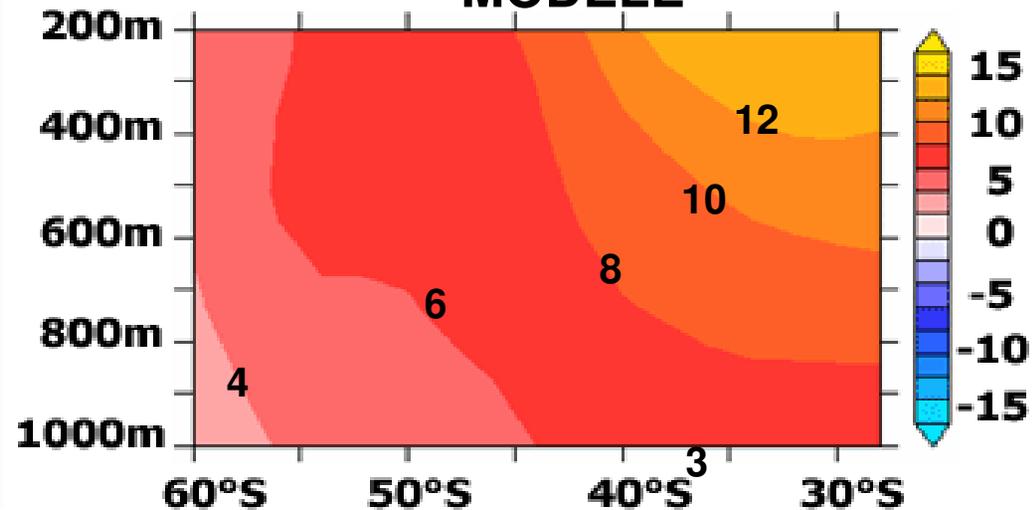


## Accumulation de carbone anthropique : $\Delta C_{ant}$ ( $\mu\text{mol/kg}$ )

### OBSERVATION

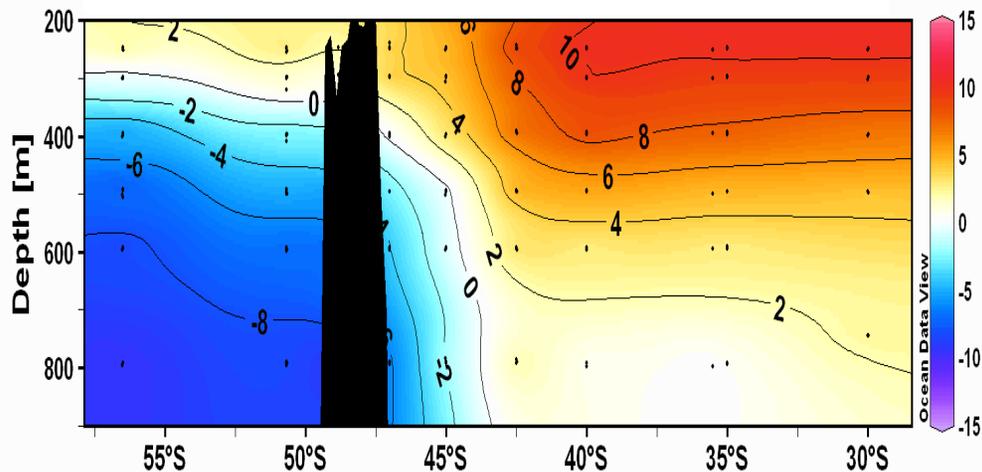


### MODELE

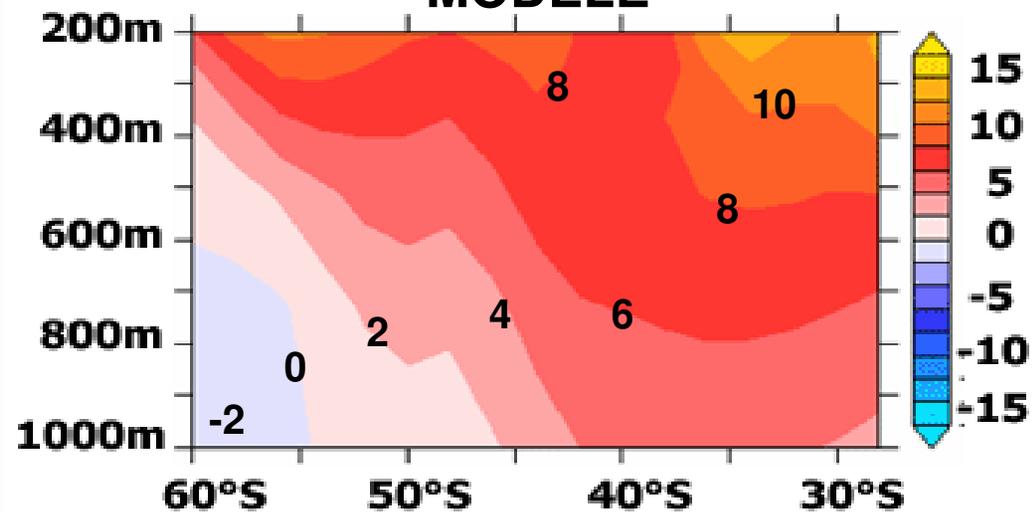


## Augmentation du carbone total : $\Delta\text{DIC}$ ( $\mu\text{mol/kg}$ )

### OBSERVATION

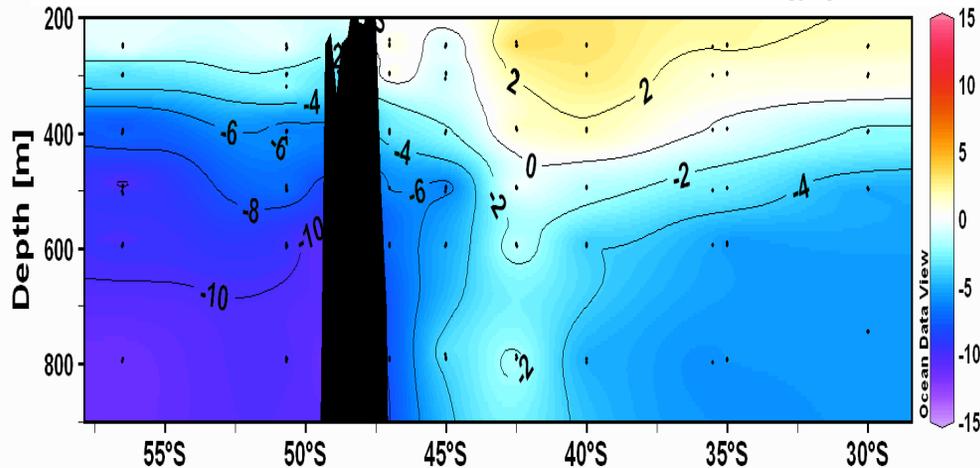


### MODELE

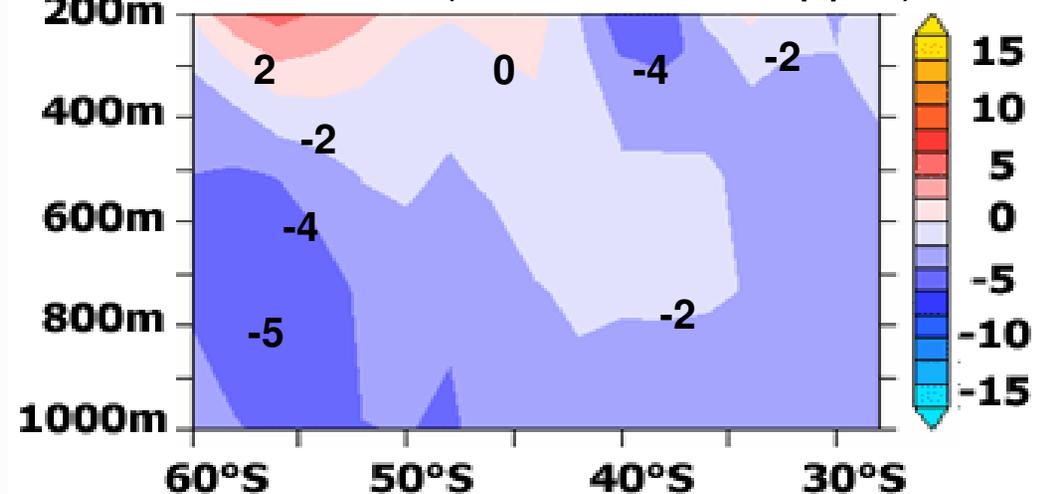


## Impact de la variabilité océanique sur le DIC ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )

### OBSERVATION ( $\Delta\text{DIC}-\Delta\text{C}_{\text{ant}}$ )



### MODELE ( $\text{CO}_2\text{atm} = 278\text{ppm}$ )

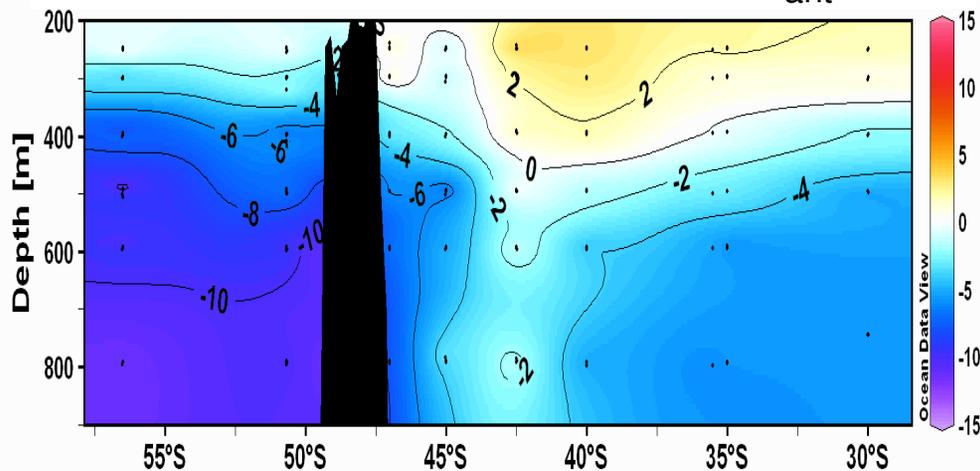


Quand on retire le signal anthropique → Impact de la variabilité océanique

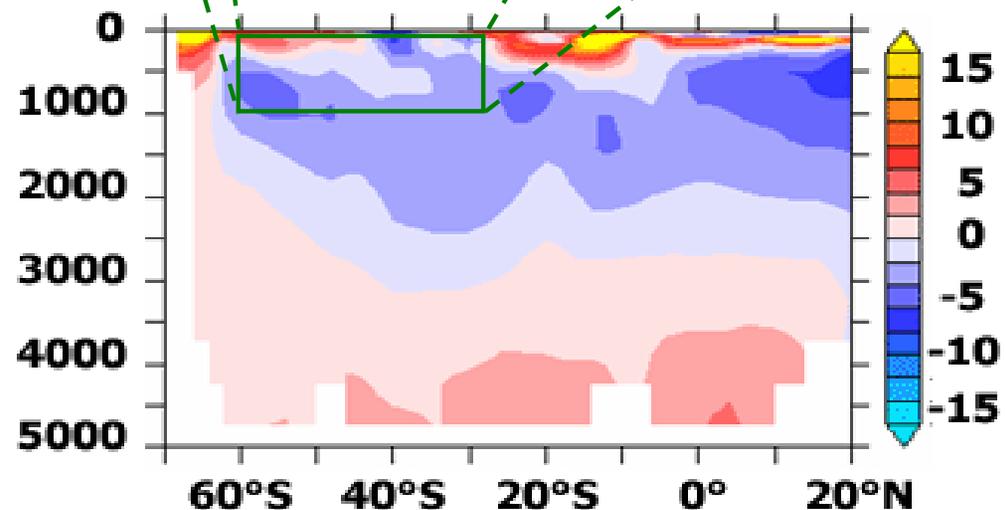
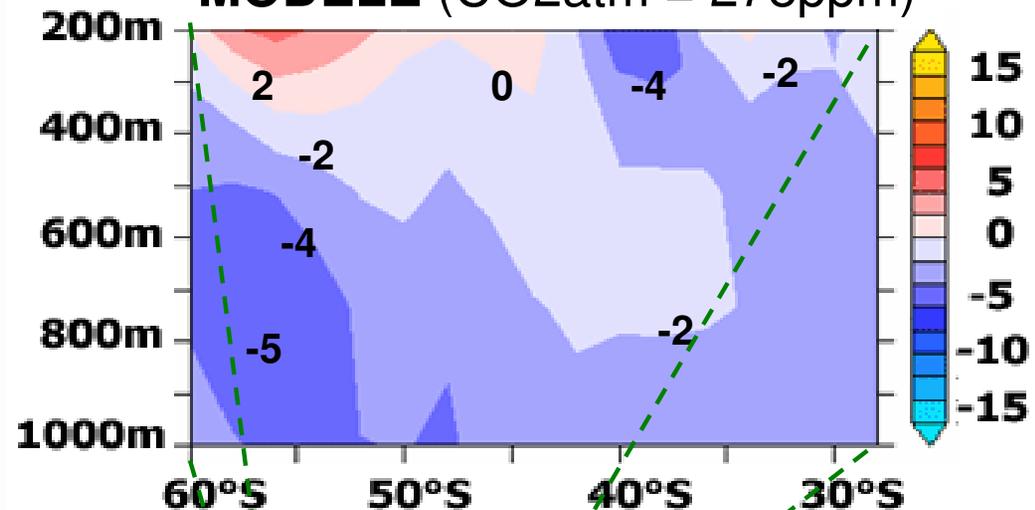
- pas de variation significative dans les STMW,  
ni en sub-surface dans la zone de formation des MWs
- diminution du DIC en profondeur (sous la couche de mélange),  
maximale dans les eaux antarctiques (upper CDW)  
plus faible, mais significative, dans les SAMW

## Impact de la variabilité océanique sur le DIC ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )

### OBSERVATION ( $\Delta\text{DIC}-\Delta C_{\text{ant}}$ )

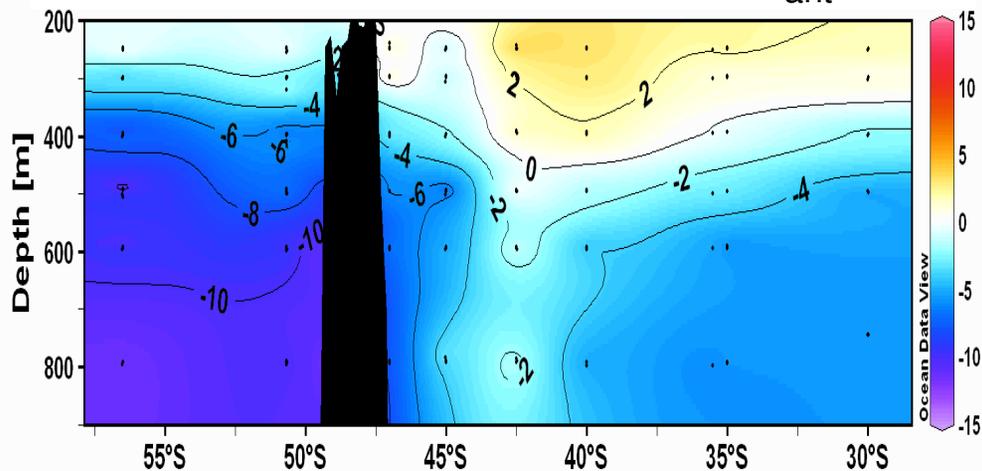


### MODELE ( $\text{CO}_2\text{atm} = 278\text{ppm}$ )

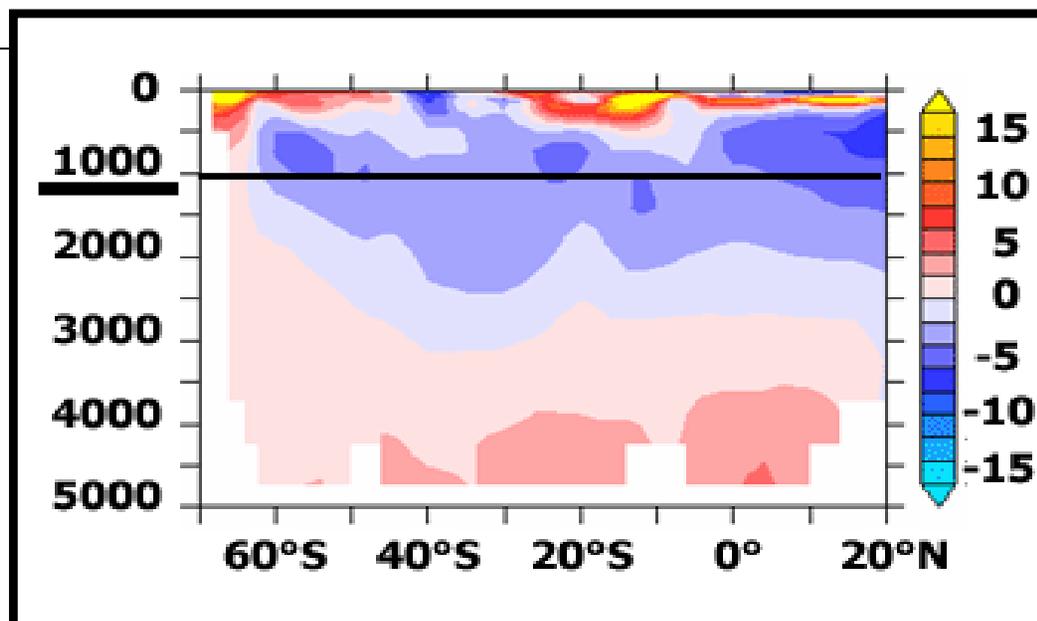
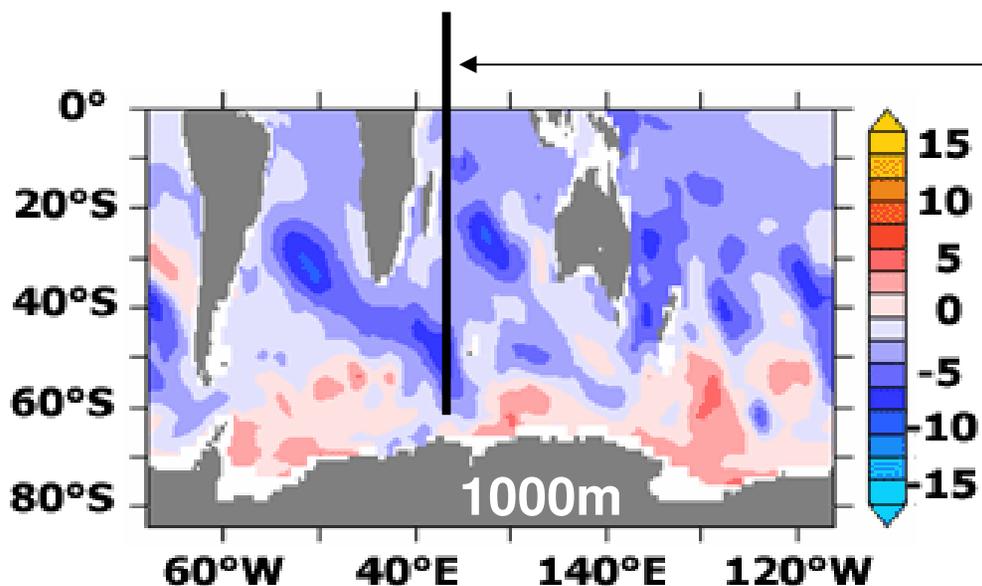
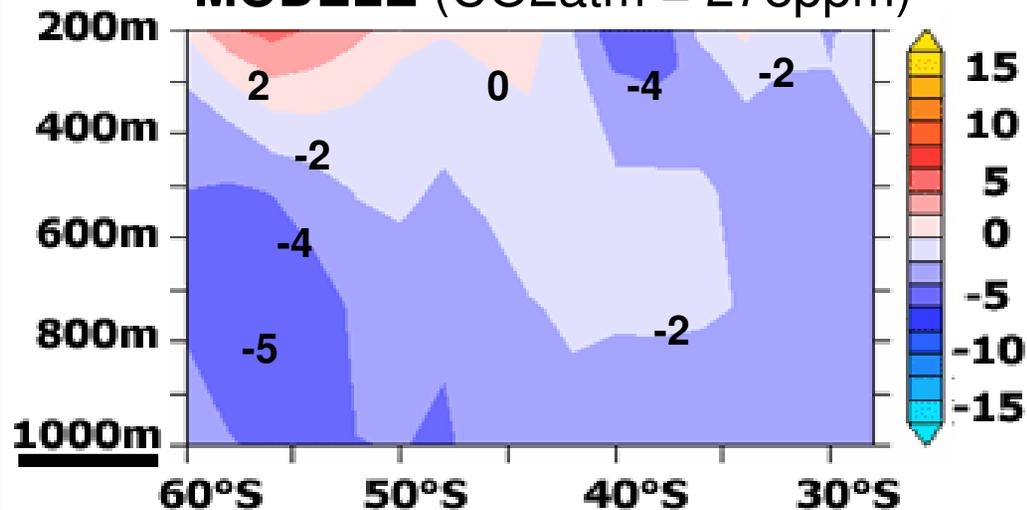


# Impact de la variabilité océanique sur le DIC ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )

## OBSERVATION ( $\Delta\text{DIC}-\Delta C_{\text{ant}}$ )

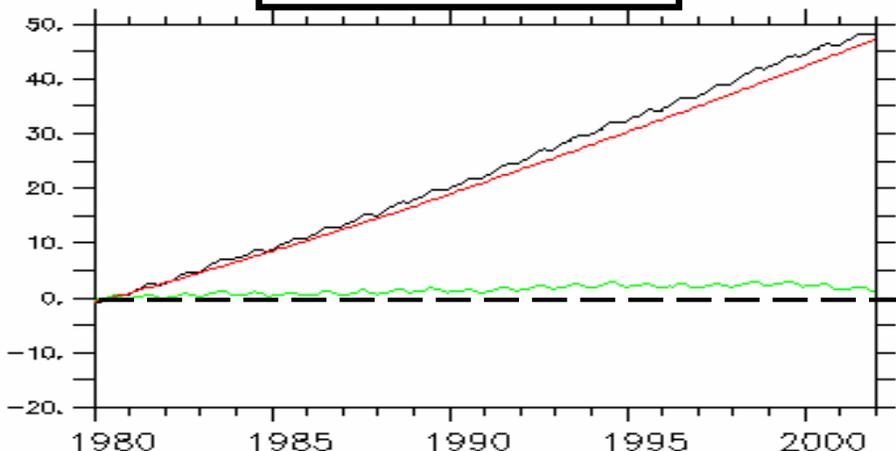


## MODELE ( $\text{CO}_2\text{atm} = 278\text{ppm}$ )



## Évolution du DIC dans l'Océan Austral depuis 1980 (Pg de Carbone)

Surface → Fond



Axe Y : évolution du DIC au sud de 20°S en Pg de C (concentrations intégrées sur l'espace:  $x=0-360^\circ, y < 20^\circ\text{S}$ ,  $z=\text{surf} \rightarrow \text{fond}$ )

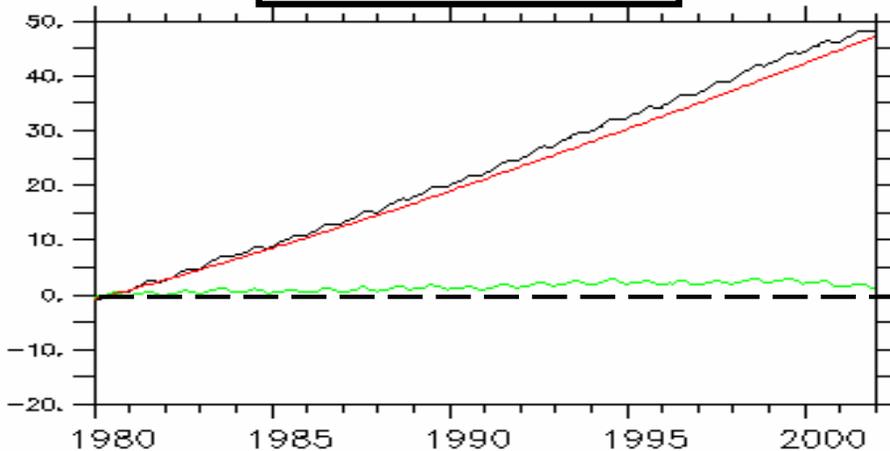
← année de référence 1980 ( $\Delta\text{DIC} = 0$ )

Résultat du modèle sur les 20 dernières années du XX<sup>e</sup> s. (1980-2000) au sud de 20°S

|   |                       |   |          |                             |
|---|-----------------------|---|----------|-----------------------------|
| — | Augmentation de DIC   | → | + 48 GtC | ( $\Delta C_{\text{TOT}}$ ) |
| — | Accumulation de Cant  | → | + 46 GtC | ( $\Delta C_{\text{ANT}}$ ) |
| — | Variabilité océanique | → | + 2 GtC  | ( $\Delta C_{\text{OC}}$ )  |

## Évolution du DIC dans l'Océan Austral depuis 1980 (Pg de Carbone)

Surface → Fond

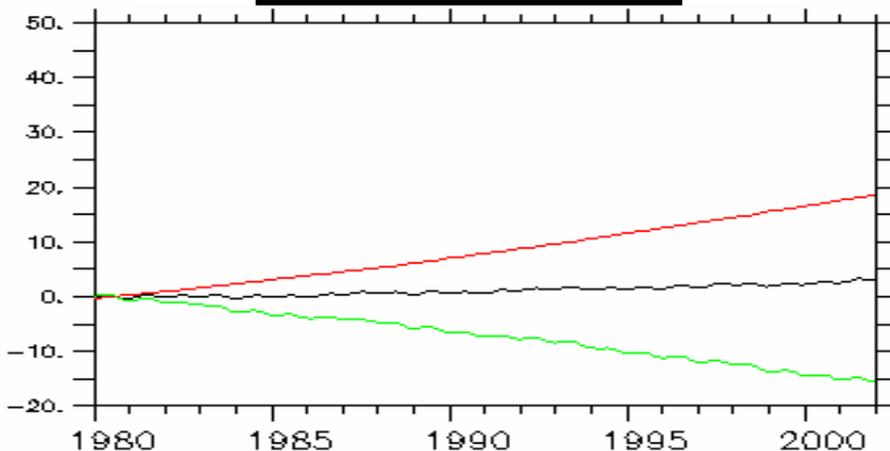


Axe Y : évolution du DIC au sud de 20°S en Pg de C (concentrations intégrées sur l'espace:  $x=0-360^\circ, y < 20^\circ\text{S}$ ,  $z=\text{surf} \rightarrow \text{fond}$ )

← année de référence 1980 ( $\Delta\text{DIC} = 0$ )

Résultat du modèle sur les 20 dernières années du XX<sup>e</sup> s. (1980-2000) au sud de 20°S

500m-2000m



Surface-Fond

+ 48 GtC

( $\Delta C_{\text{TOT}}$ )

+ 46 GtC

( $\Delta C_{\text{ANT}}$ )

+ 2 GtC

( $\Delta C_{\text{OC}}$ )

500-2000m

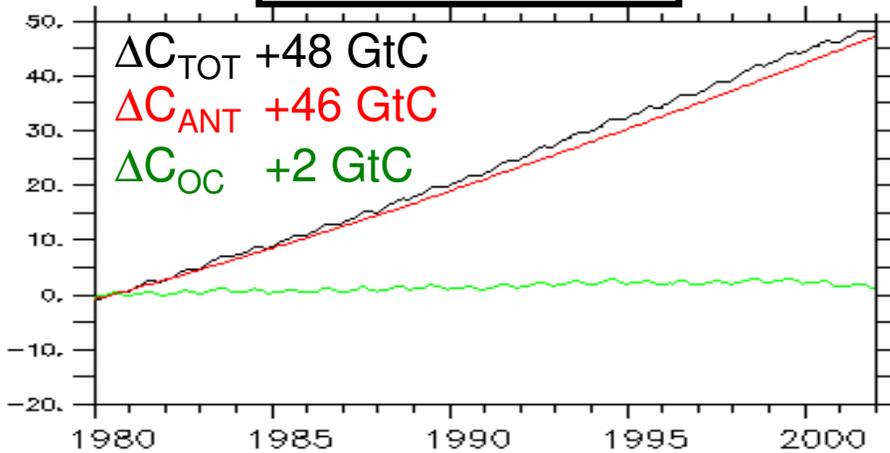
+ 3 GtC

+ 18 GtC

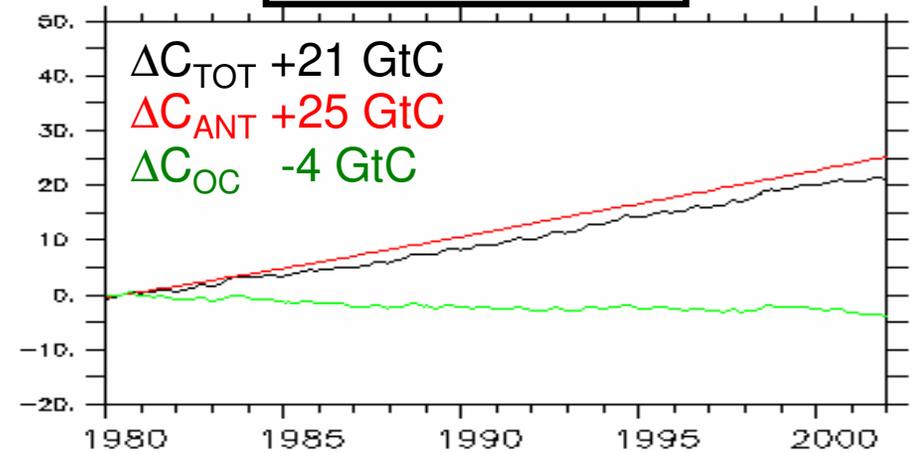
- 15 GtC

## Évolution du DIC dans l'Océan Austral depuis 1980 (Pg de Carbone)

Surface → Fond

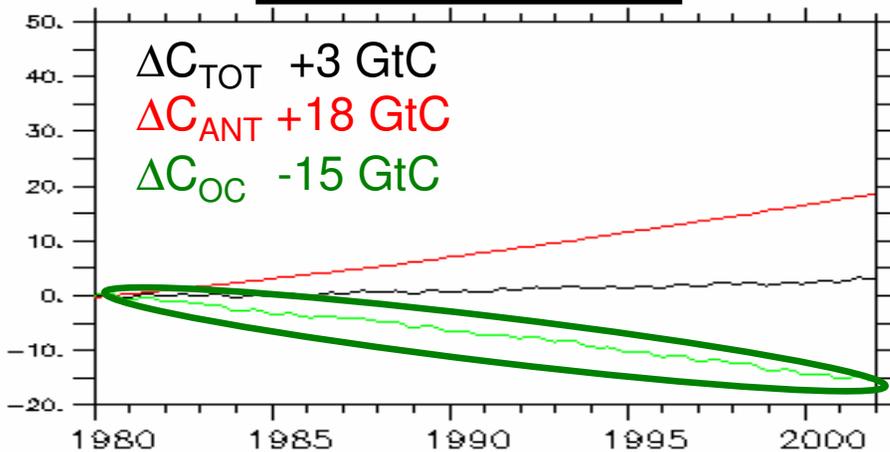


0-500m

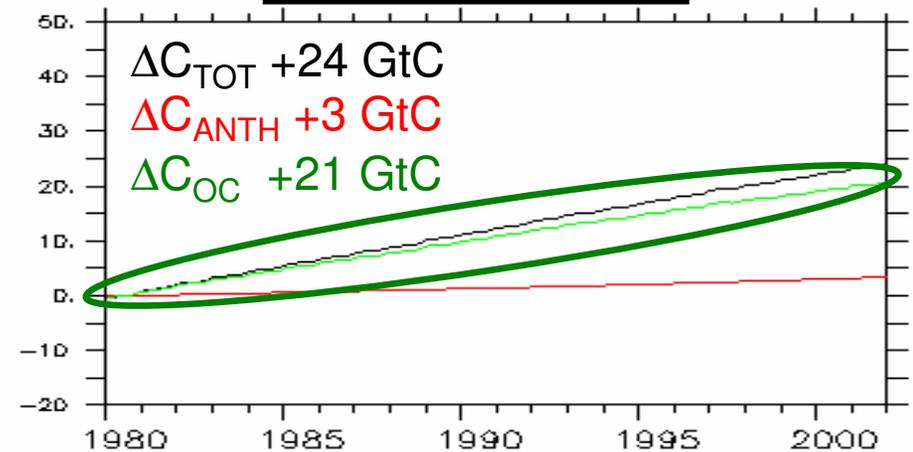


Résultat du modèle sur les 20 dernières années du XX<sup>e</sup> s. (1980-2000) au sud de 20°S

500m-2000m



> 2000m



## OBSERVATIONS

**Au Nord du front polaire:** les eaux de mode transportent le CO<sub>2</sub> anthropique de la surface vers l'océan intérieur (~0-1000m)

**STMW:** l'invasion de CO<sub>2</sub> anthropique explique la quasi-totalité des variations de DIC.

$$\Delta \text{DIC} = \Delta C_{\text{ant}} = + 8 \mu\text{mol/kg} \quad (1985 \rightarrow 2000)$$

**SAMW:** l'invasion de CO<sub>2</sub> anthropique est compensée par une diminution égale du DIC en réponse à la variabilité océanique.

$$\Delta \text{DIC} = \Delta C_{\text{ant}} + \Delta C_{\text{oc}} = 0 \quad (1985 \rightarrow 2000)$$

**Au sud du Front Polaire :** pas d'accumulation significative de CO<sub>2</sub> anthropique sur 15 ans

**U-CDW:** diminution du DIC en réponse à la variabilité océanique.

$$\Delta \text{DIC} = \Delta C_{\text{oc}} = - 9 (\pm 6) \mu\text{mol/kg} \quad (1985 \rightarrow 2000)$$

## MODELE

**Comparaison Modèle/Observations :** Les variations observées dans l'Océan Indien Sud-Ouest sont assez bien reproduites par le modèle global.

**Modèle :** la diminution du DIC observée sous 300-400m (jusqu'à 2000m dans le modèle) est un signal grande échelle représentatif d'autres régions australes (secteurs Atl. et Pac.)

Quels sont les mécanismes responsables de cette diminution : Dynamique ? Activité bio ?

# Perspectives

- Les réponses tirées du modèle sont-elles cohérentes avec les observations ?
  - étendre la zone d'étude pour couvrir tout l'Océan Austral (GLODAP+CARINA)
  - mettre en relation l'évolution de DIC avec les évolutions de  $^{13}\text{C}$ ,  $\text{O}_2$ , nutriments, ...
- Lien entre les variations de  $\text{pCO}_2$  en surface et du DIC dans l'océan intérieur

