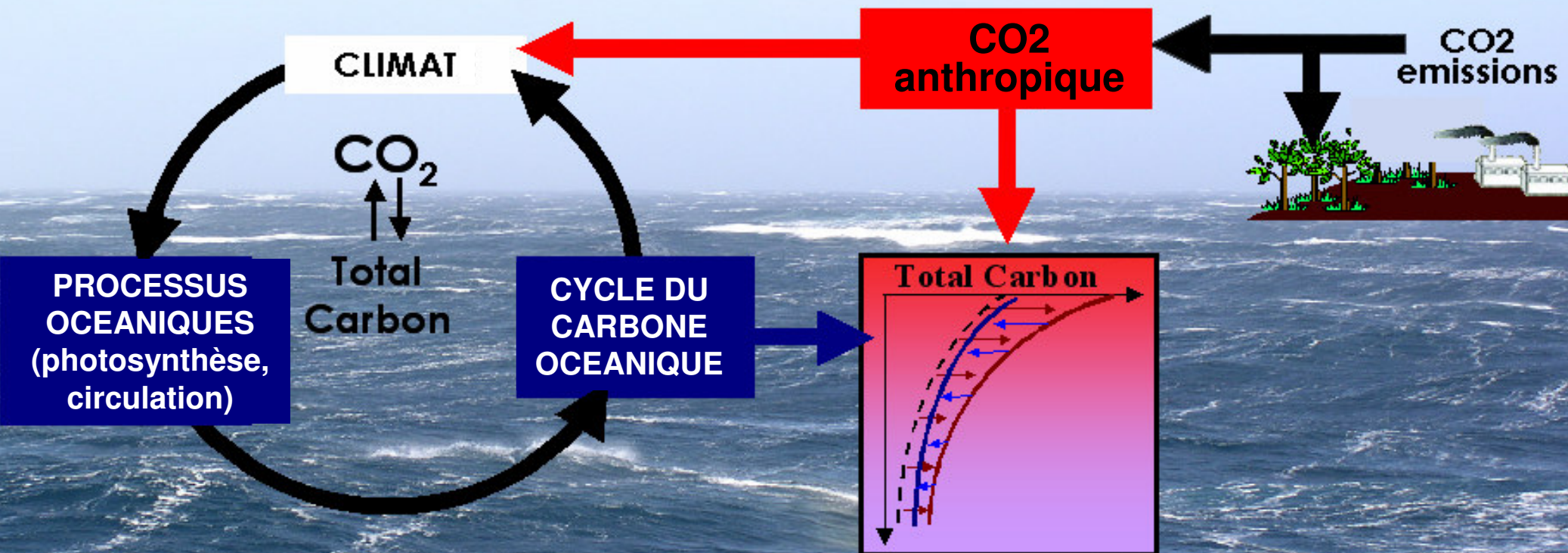


Impact des émissions de CO₂ et du changement climatique sur le DIC des eaux de mode de l'Océan Indien Sud

Claire Lo Monaco, Andrew Lenton et Nicolas Metz



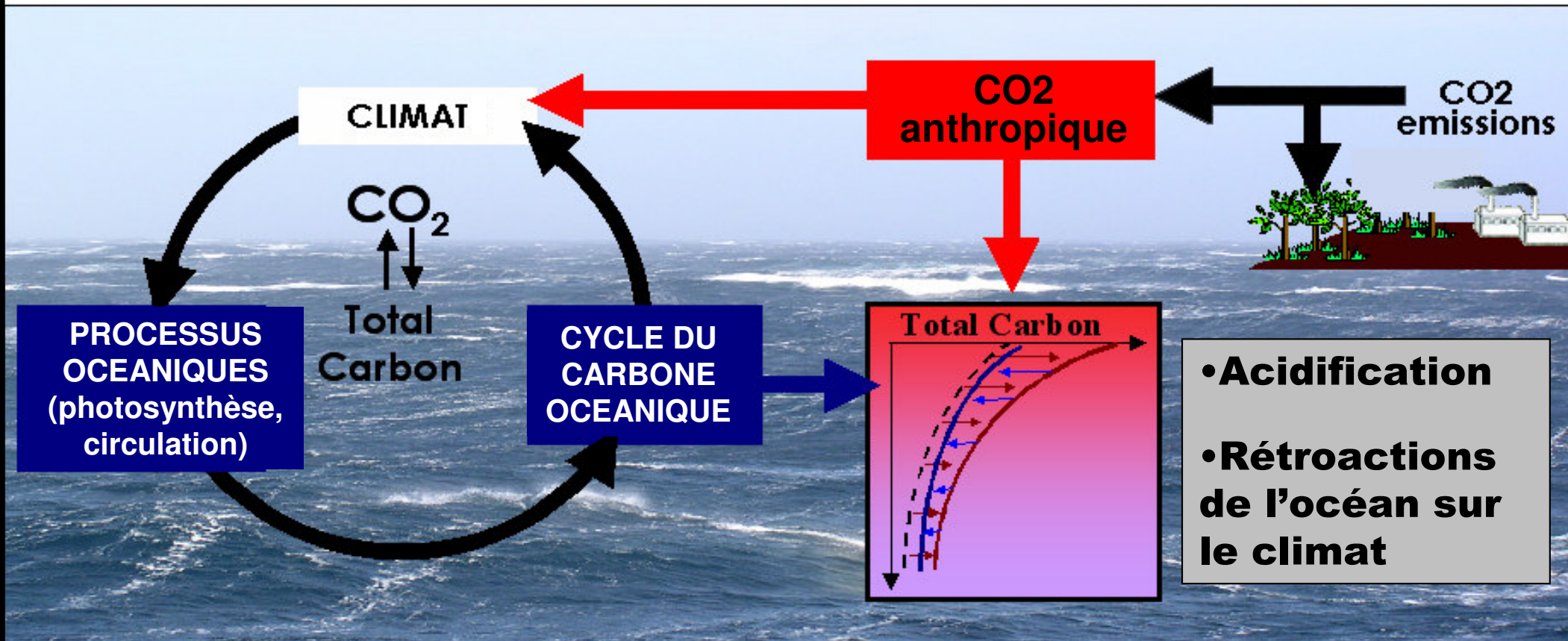
Laboratoire d'Océanographie et du Climat:
Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN-IPSL, Paris)



Budget de Carbone pour l'année 2007

Conclusions du Global Carbon Project (2008):

- Les émissions de CO₂ anthropique ont augmenté ~4 fois plus rapidement depuis 2000 que sur la décennie précédente, [...]
- Les puits naturels de CO₂ augmentent, mais plus lentement que le CO₂ 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* ?

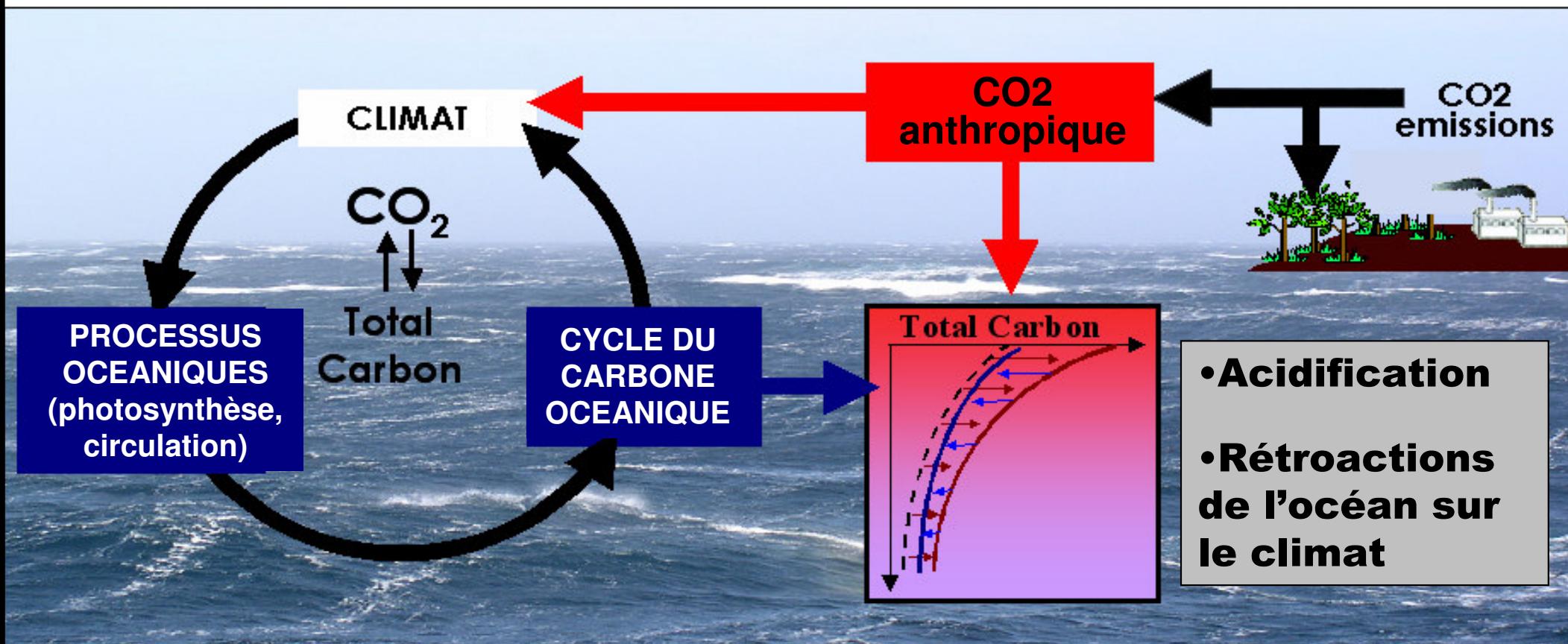
II. Comparaison Modèle/Observations

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

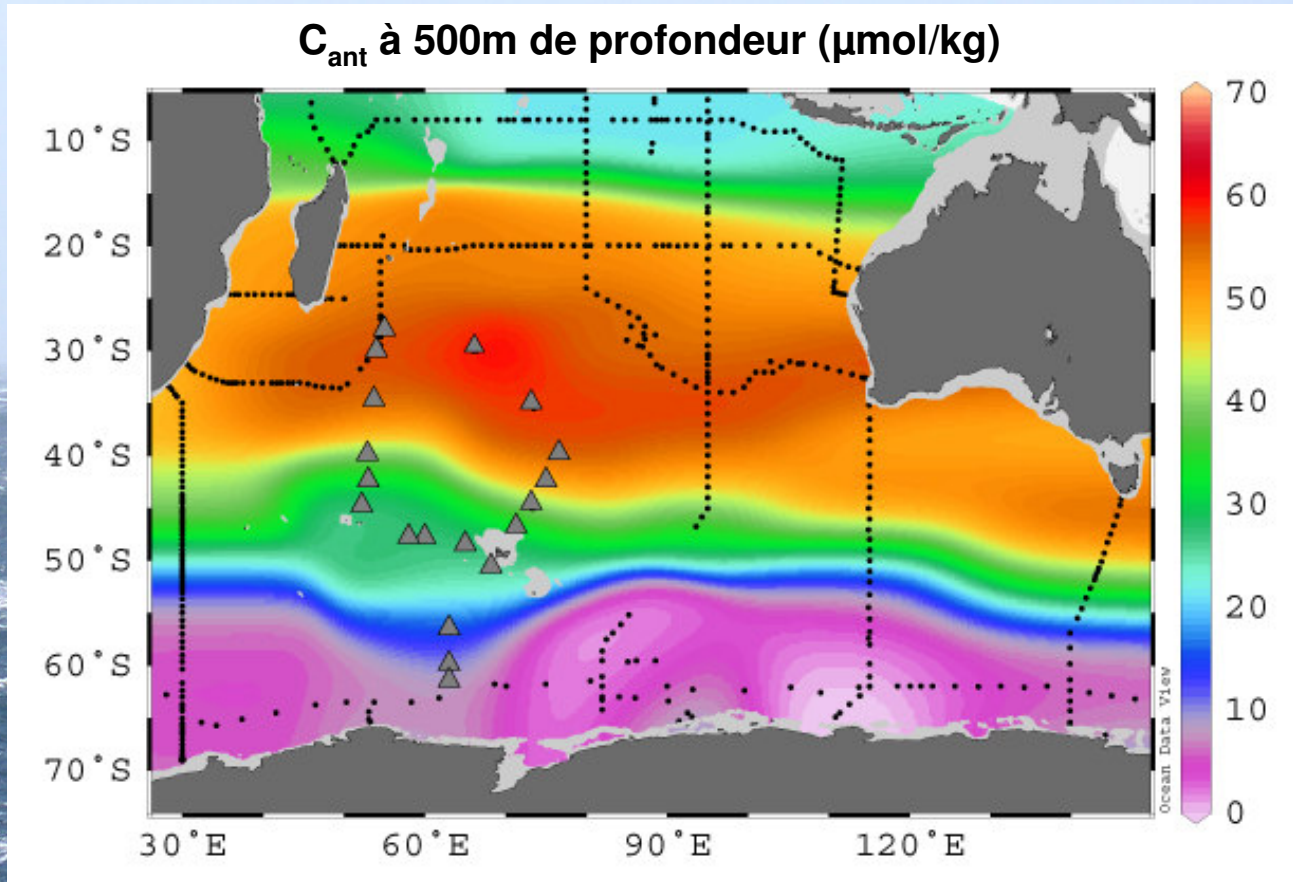
III. Travail en cours, perspectives

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



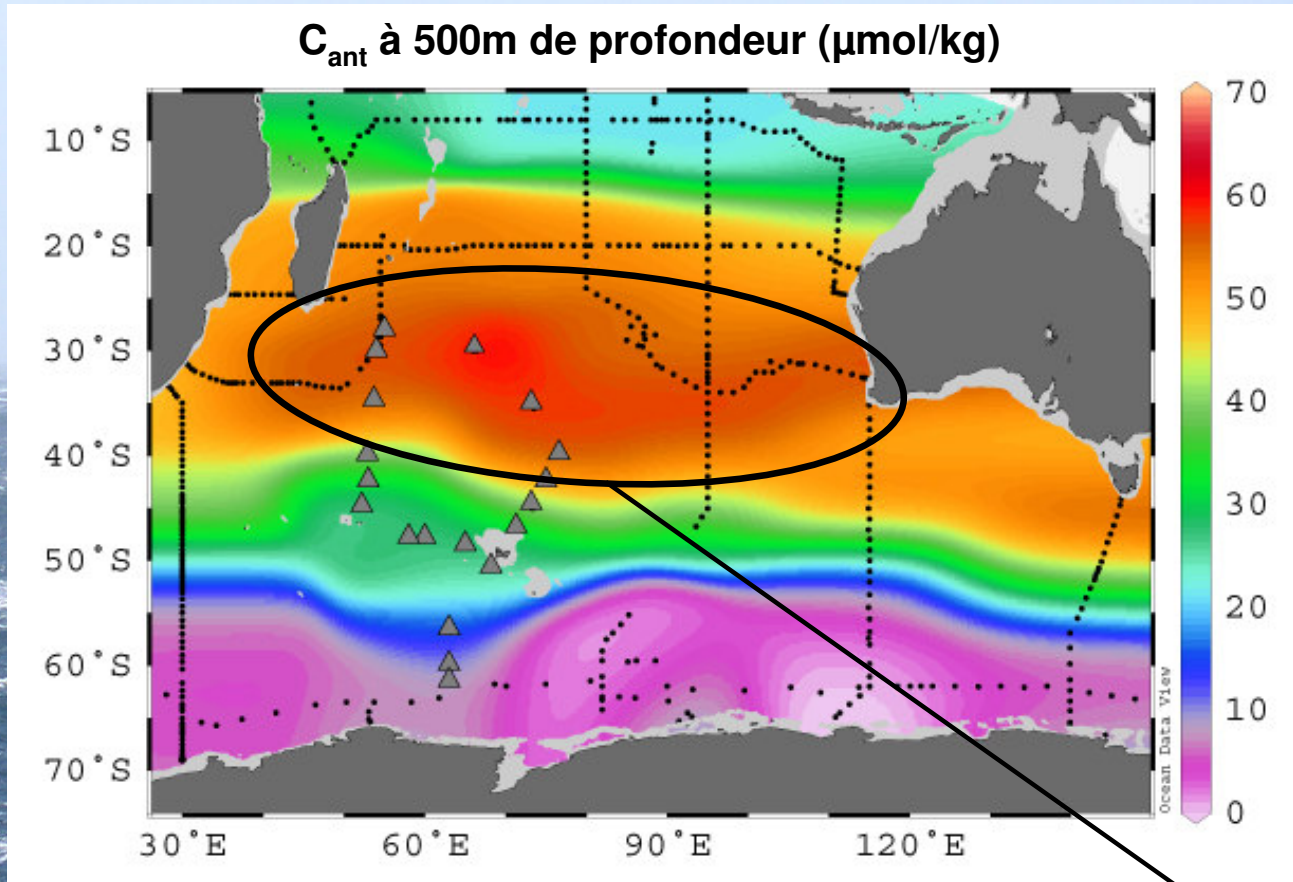
C_{ant} estimé à partir de
mesures *in situ* :

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* :

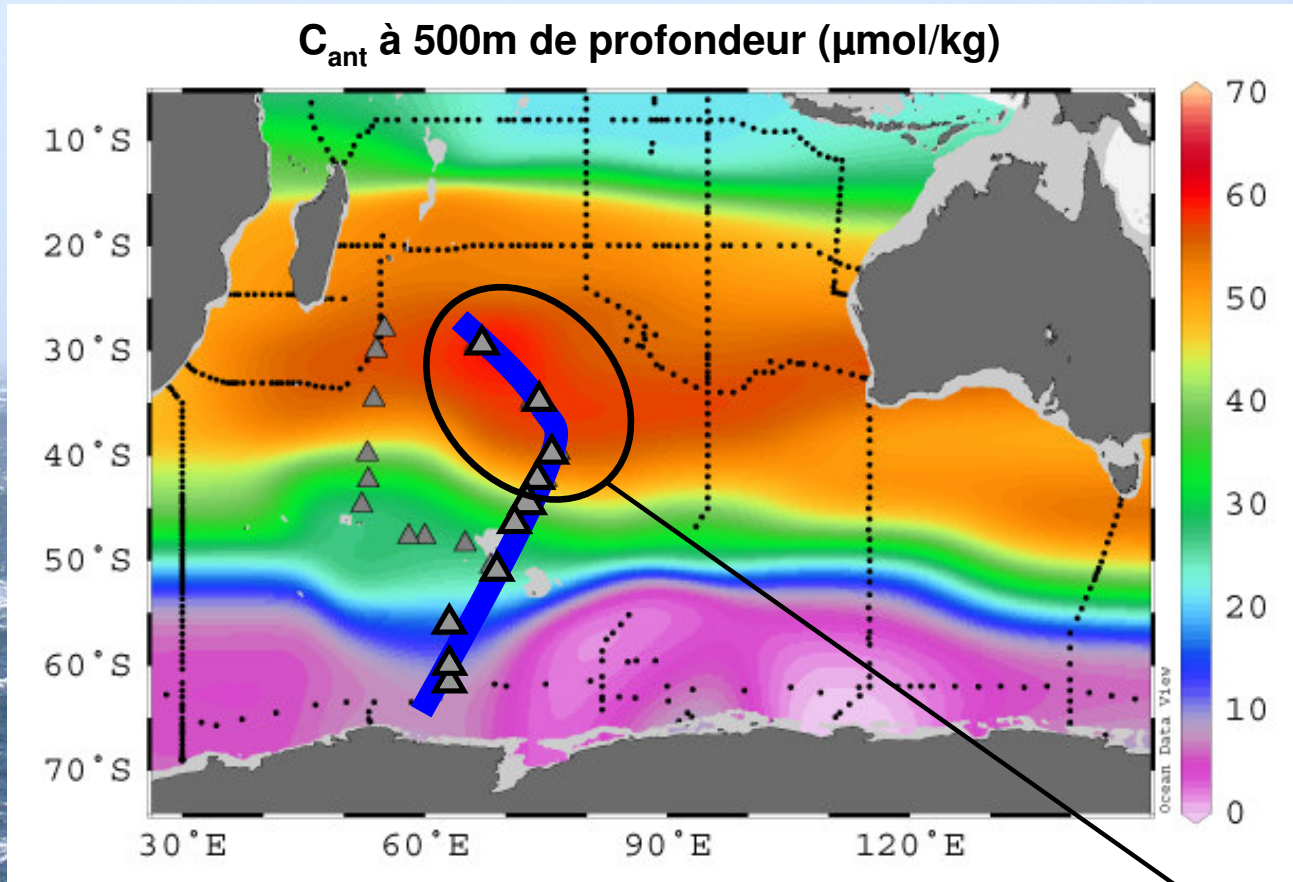
S, T, DIC, TA, O_2 , NO_3

• 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

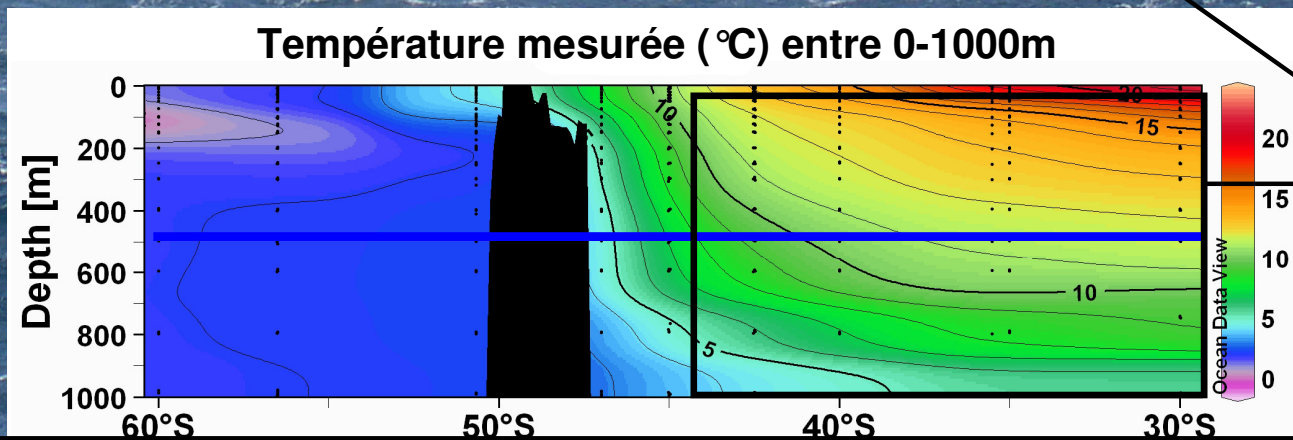


C_{ant} estimé à partir de
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA, O_2 , NO_3

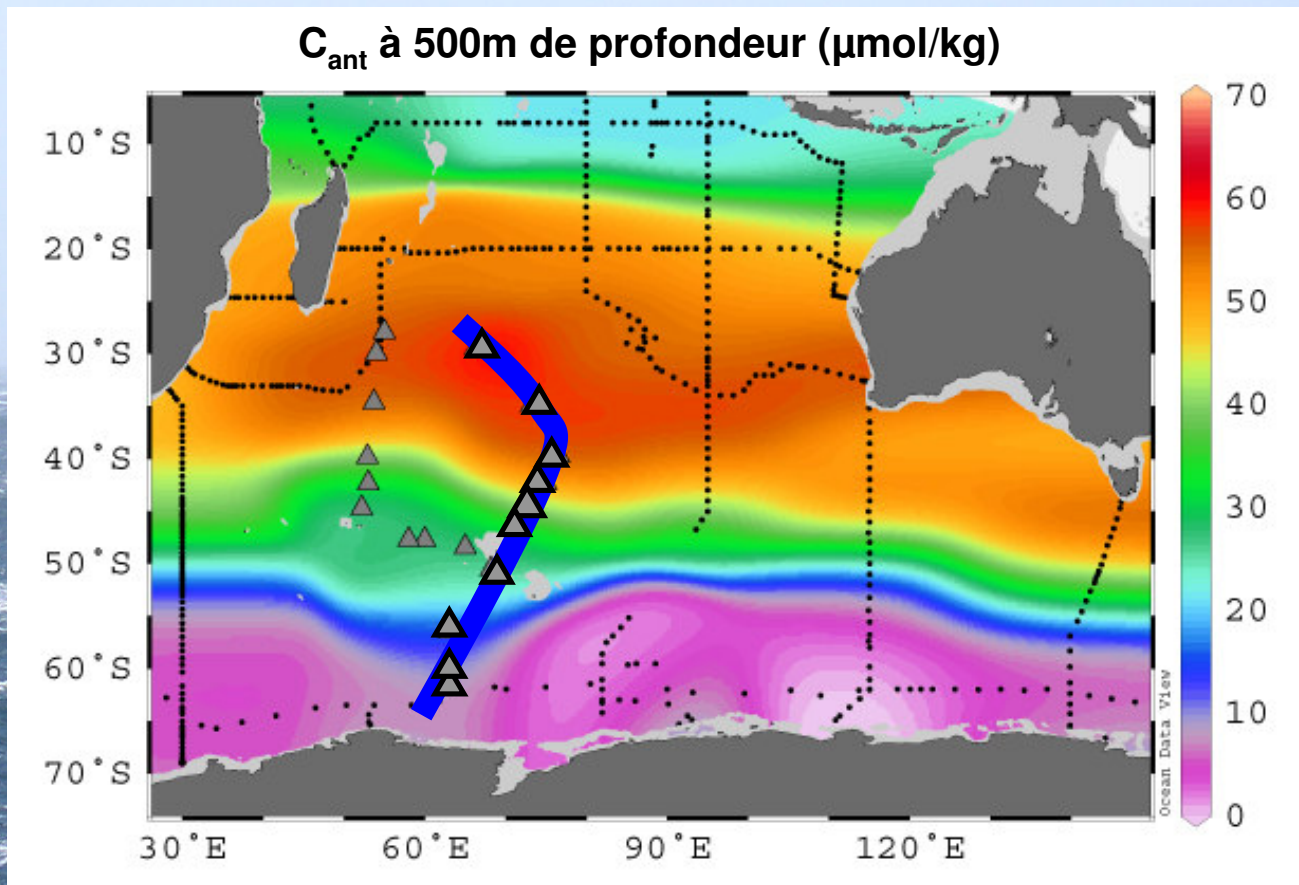
• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)



... dans les eaux de
mode

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

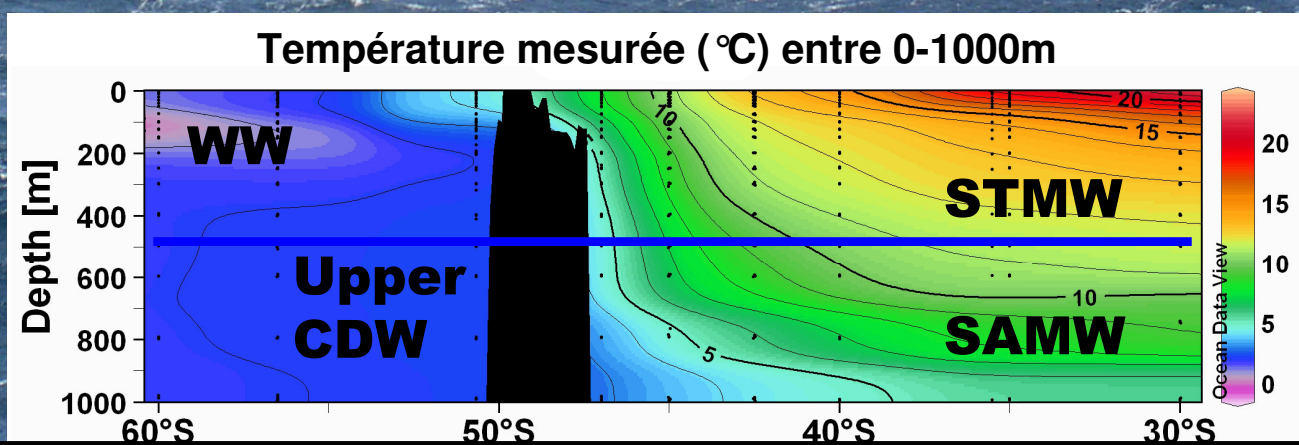


C_{ant} estimé à partir de
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA, O_2 , NO_3

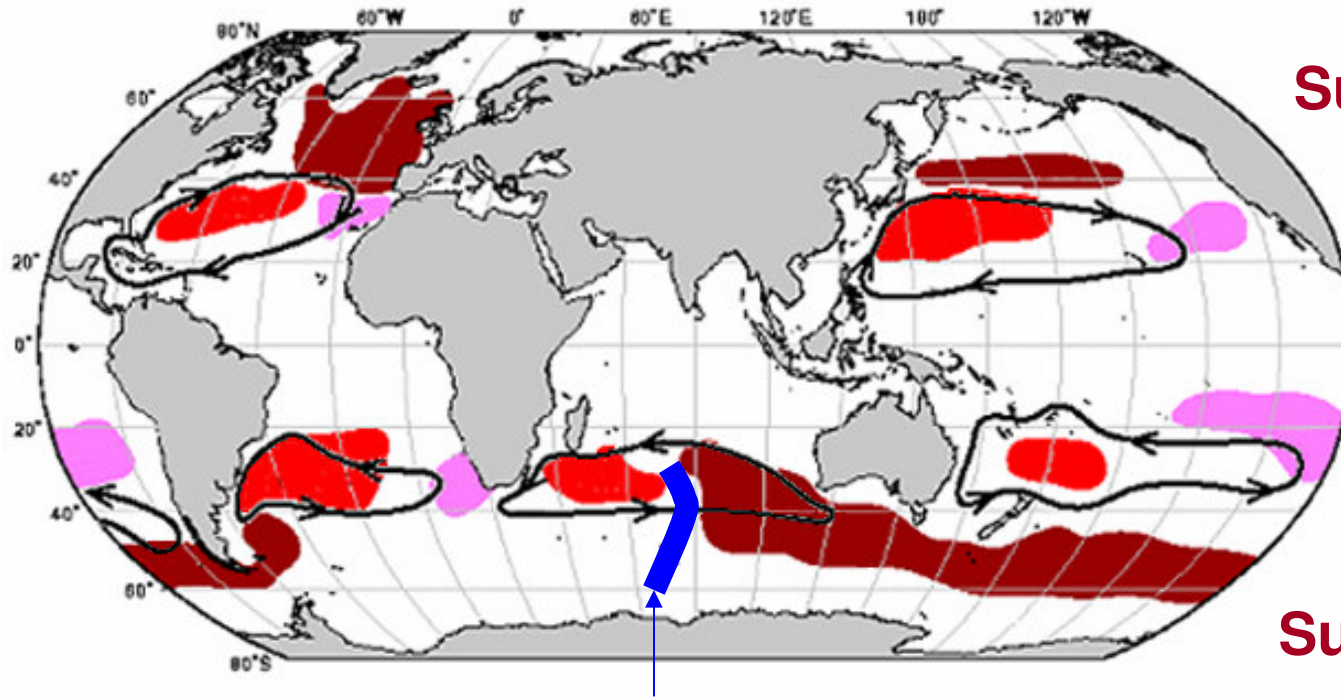
• WOCE (1993-1996)

▲ 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

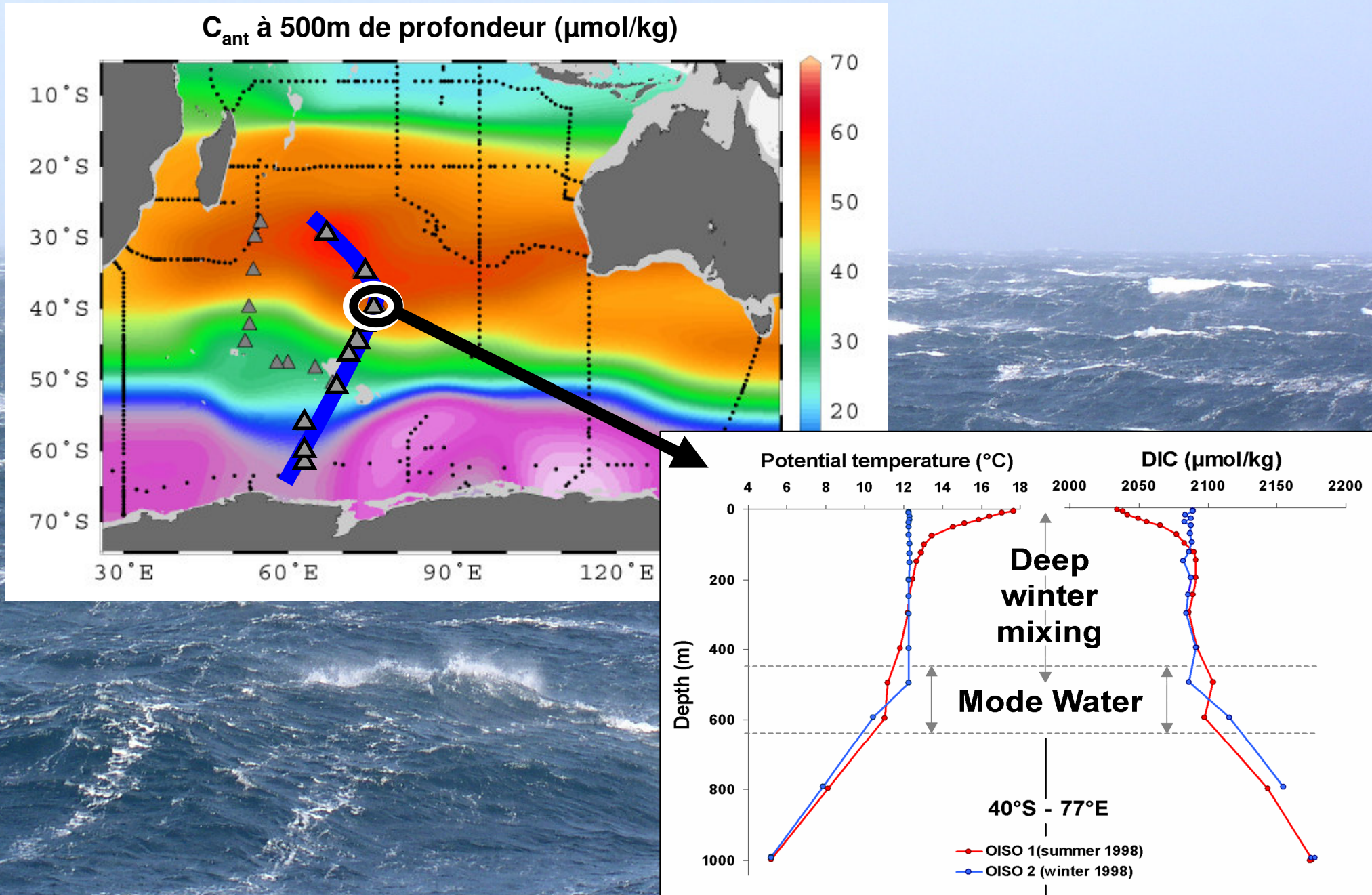
Eastern Subtropical MW

Subtropical MW

Subantarctic MW

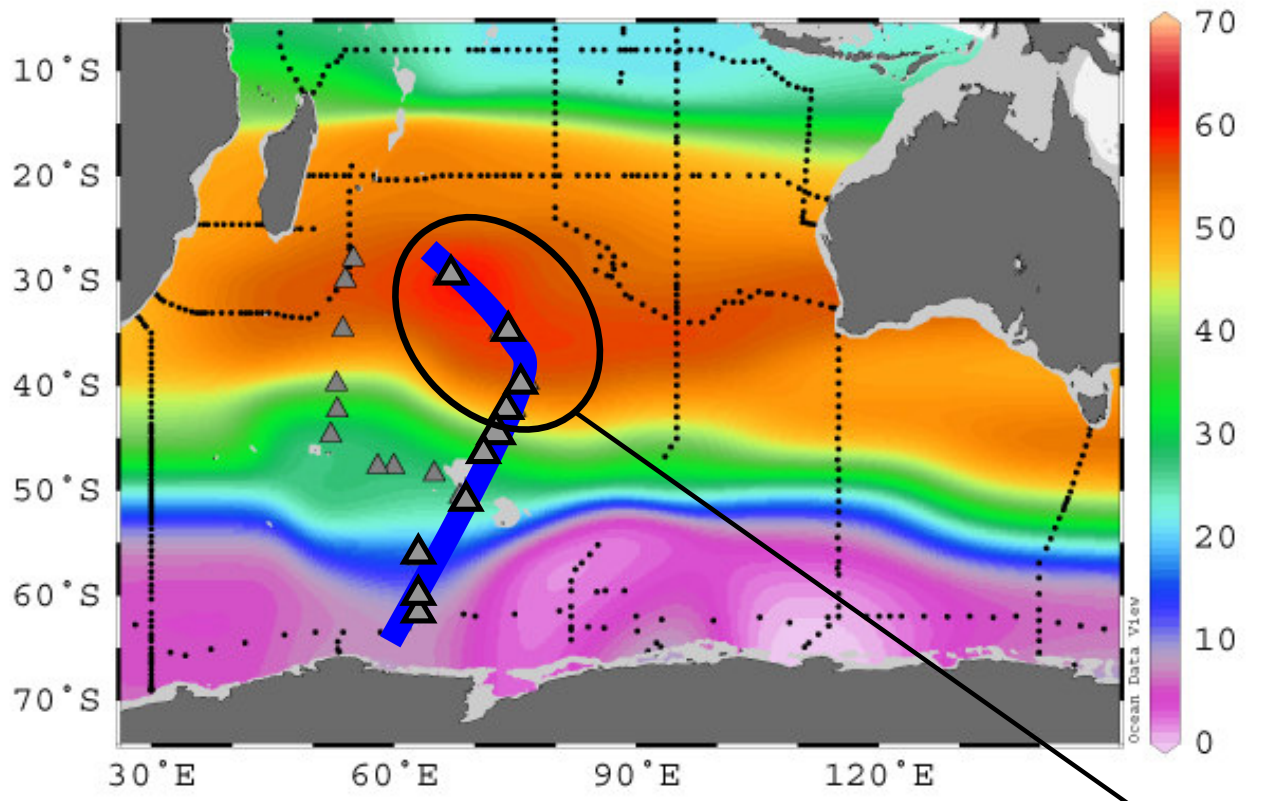
Section OISO

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 ($\mu\text{mol/kg}$)



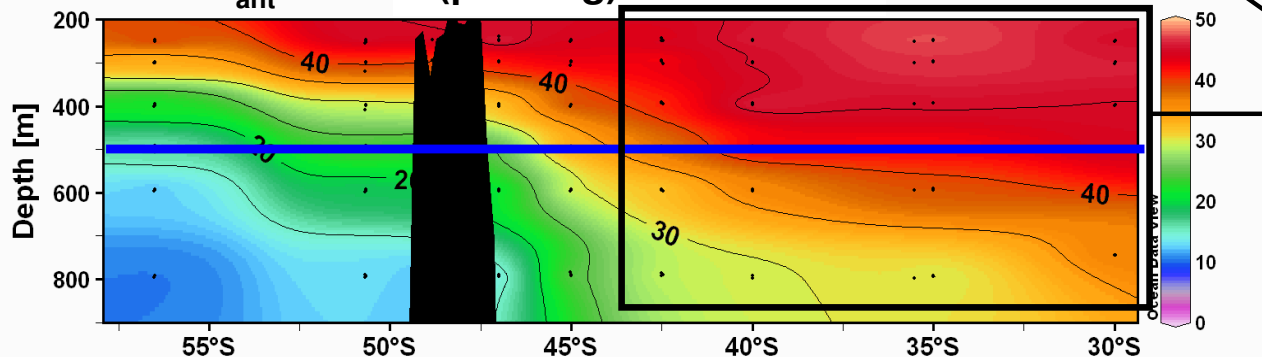
C_{ant} estimé à partir de mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA, O_2 , NO_3

• WOCE (1993-1996)

▲ OISO 1-6 (1998-2001)

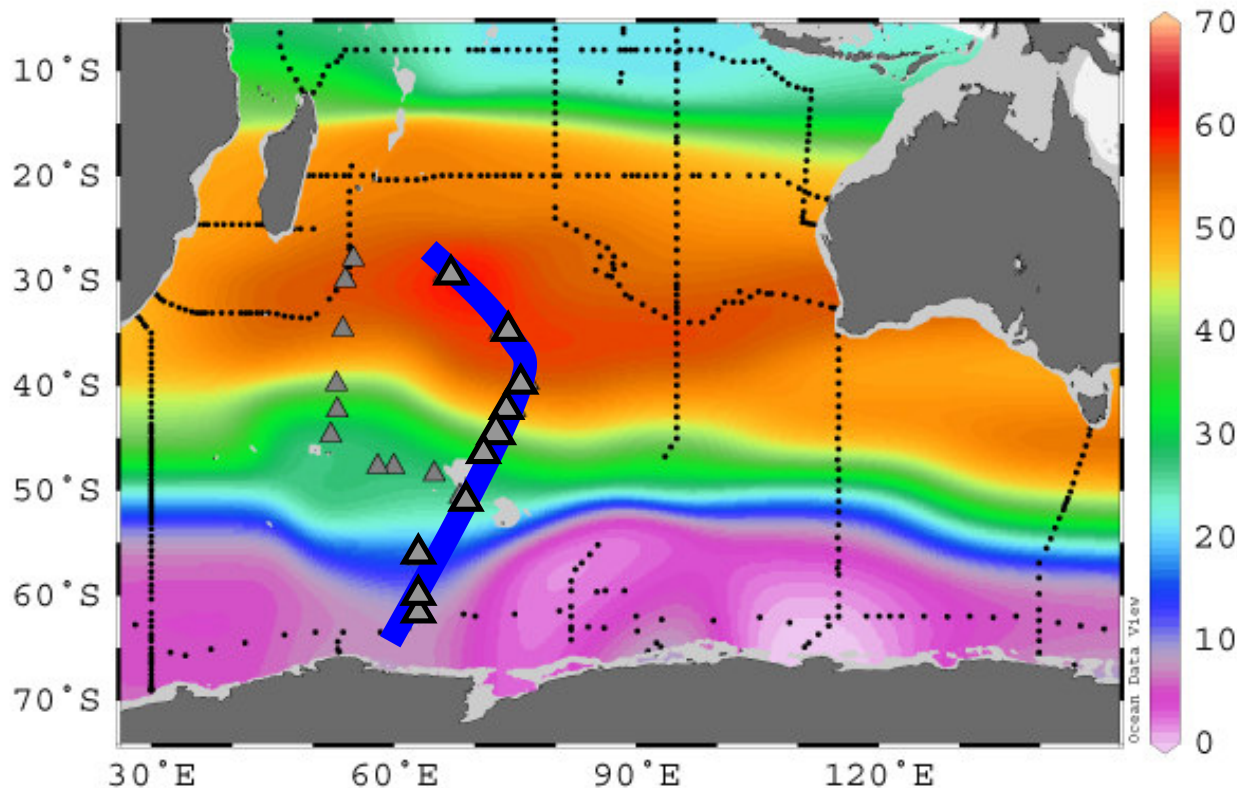
C_{ant} calculé ($\mu\text{mol/kg}$) entre 200m et 1000m



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 ($\mu\text{mol/kg}$)



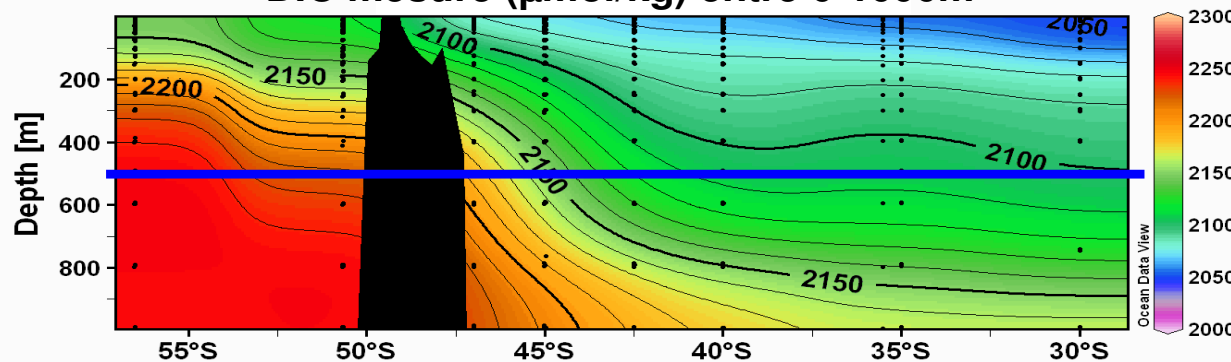
C_{ant} estimé à partir de
mesures *in situ* :

S, T, DIC, TA, O_2 , NO_3

• WOCE (1993-1996)

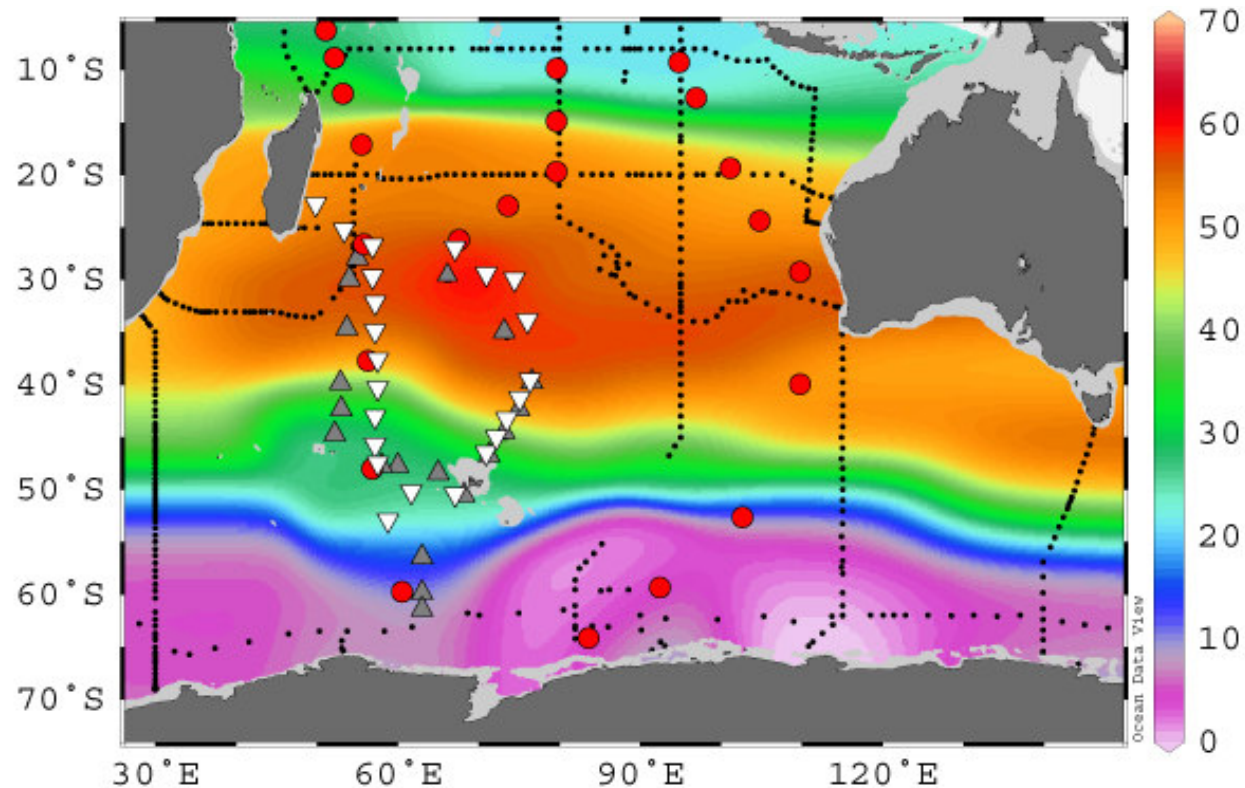
▲ OISO 1-6 (1998-2001)

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)

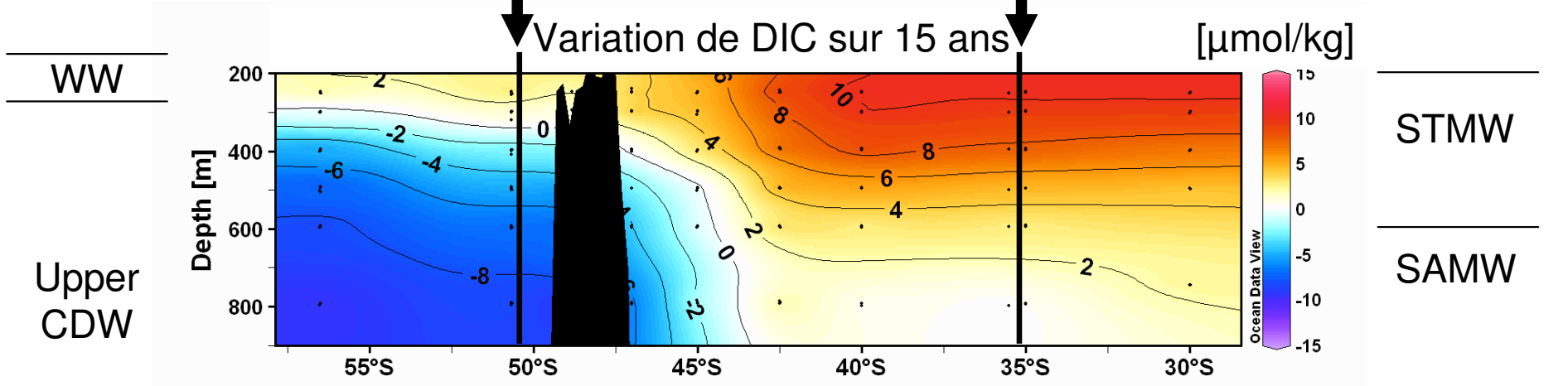
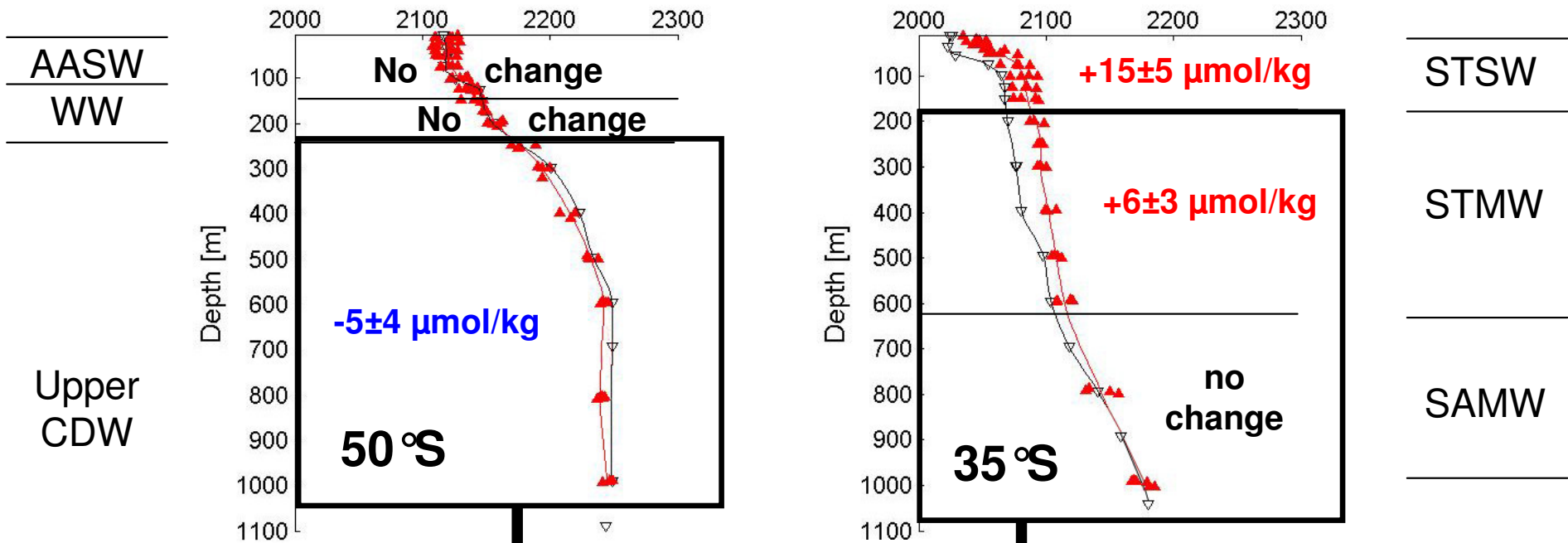
▽ INDIGO 1 (1985)

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)



Extended Multi-Linear Regression (eMLR) technique

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

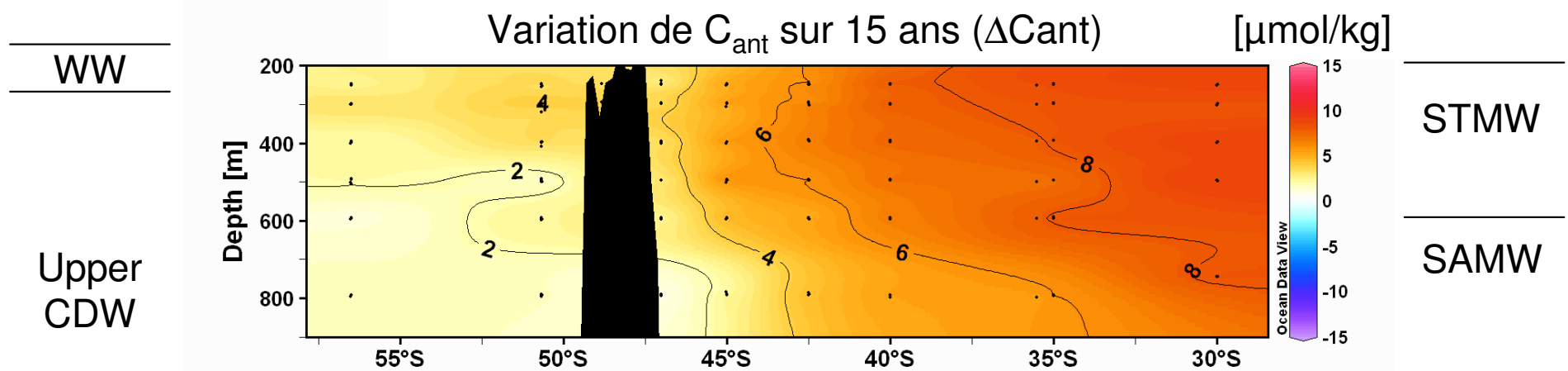
Multi-Linear regressions of Total Carbon against selected tracers (A, B, C...) determined using observations collected at time t_1 and t_2 .

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) = $a_2.A_2 + b_2.B_2 + c_2.C_2 + d_2$

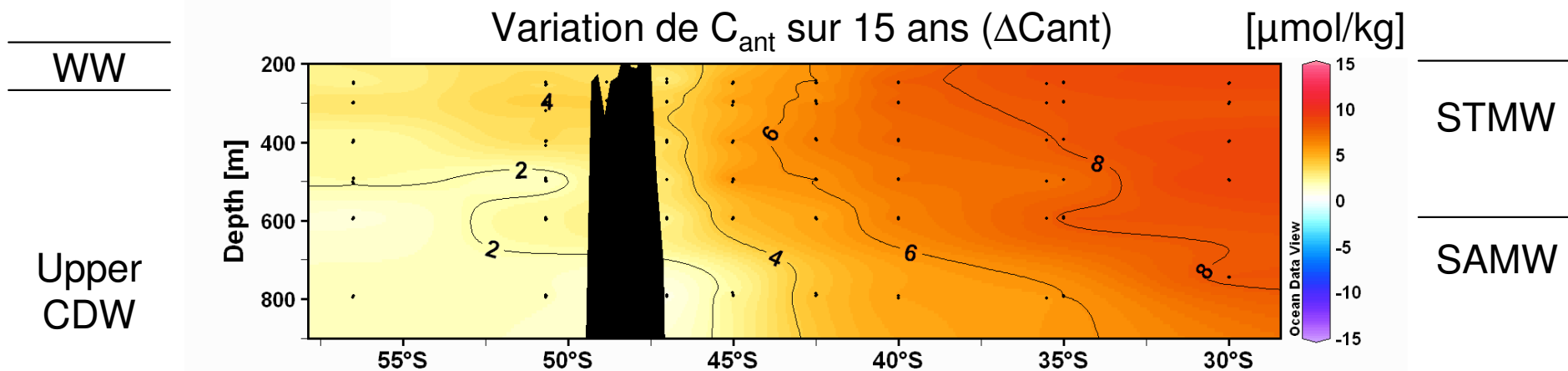
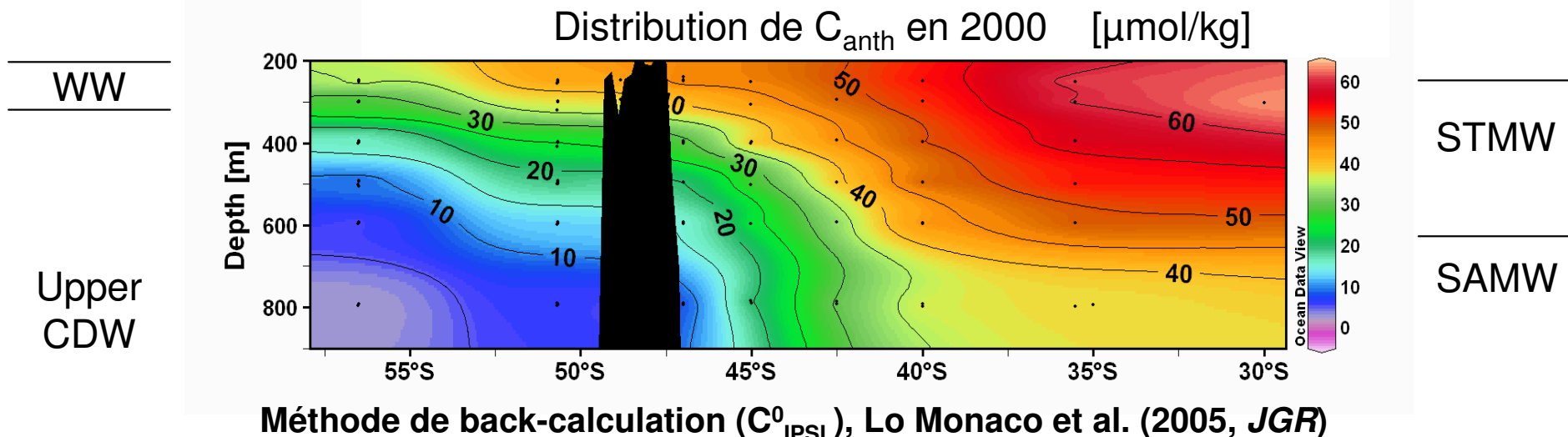
Coefficients determined for time t_1 and t_2 are then applied to the same set of tracers to evaluate the change in Total Carbon between t_1 and t_2 :

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

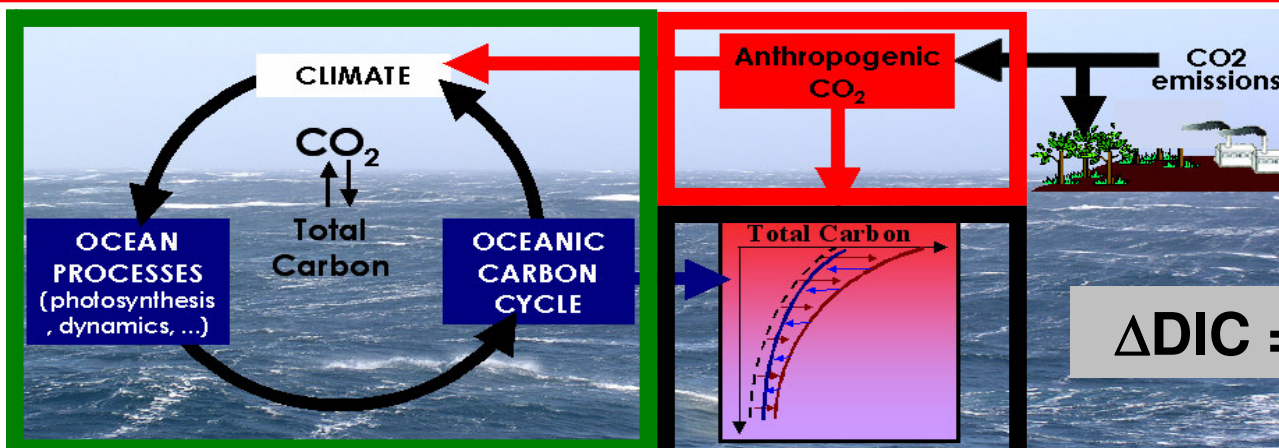
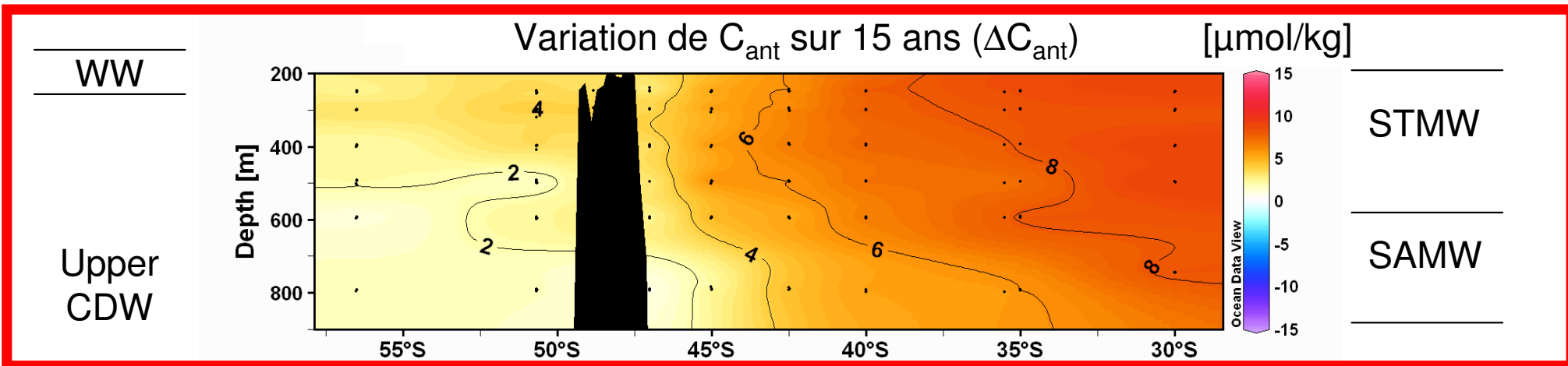
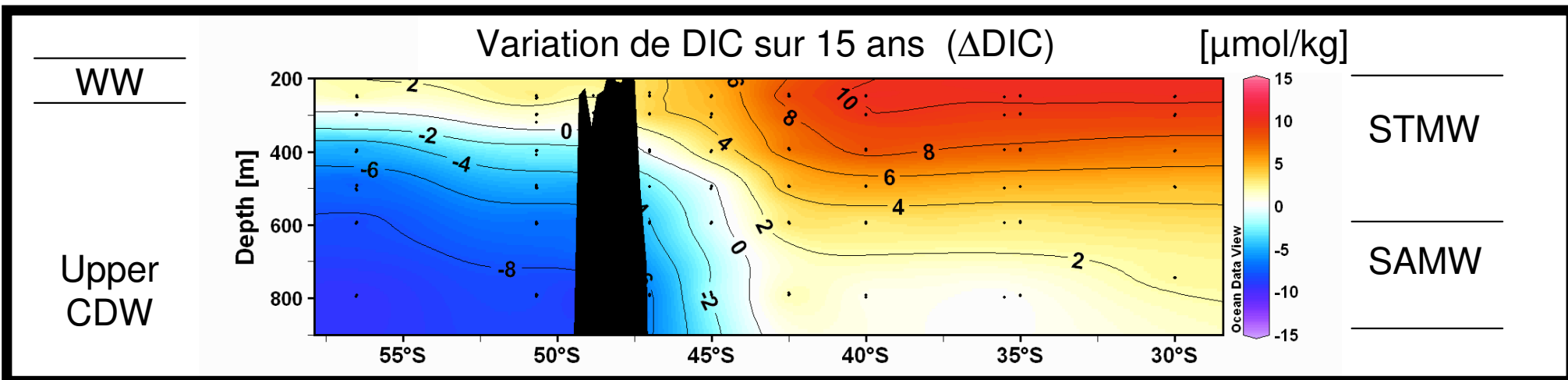


Accumulation de C_{ant} dans les eaux de mode:

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



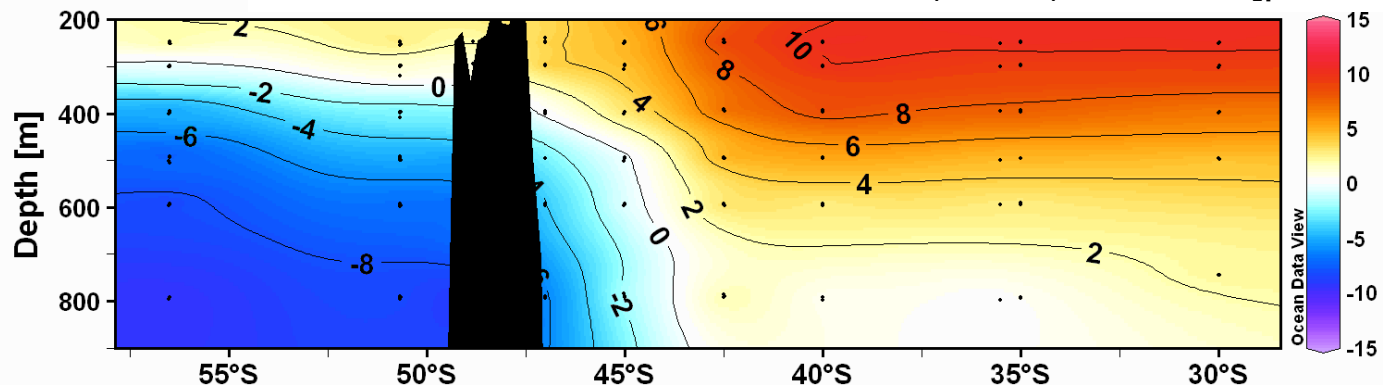
Méthode eMLR (Extended Multi-Linear Regression), Friis et al. (2005, *DSR.I*)



Variation de DIC sur 15 ans (Δ DIC)

[μ mol/kg]

WW



STMW

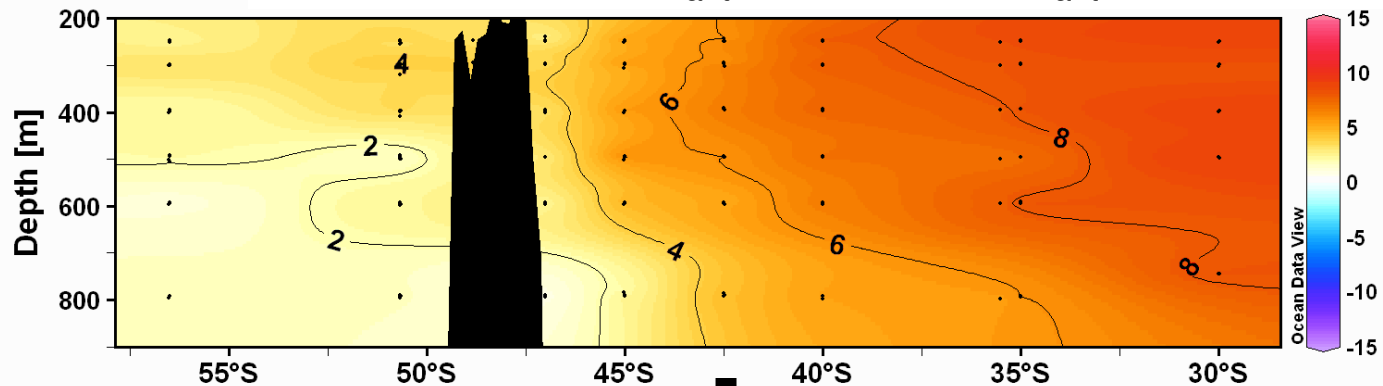
Upper
CDW

SAMW

Variation de C_{ant} sur 15 ans (ΔC_{ant})

[μ mol/kg]

WW



STMW

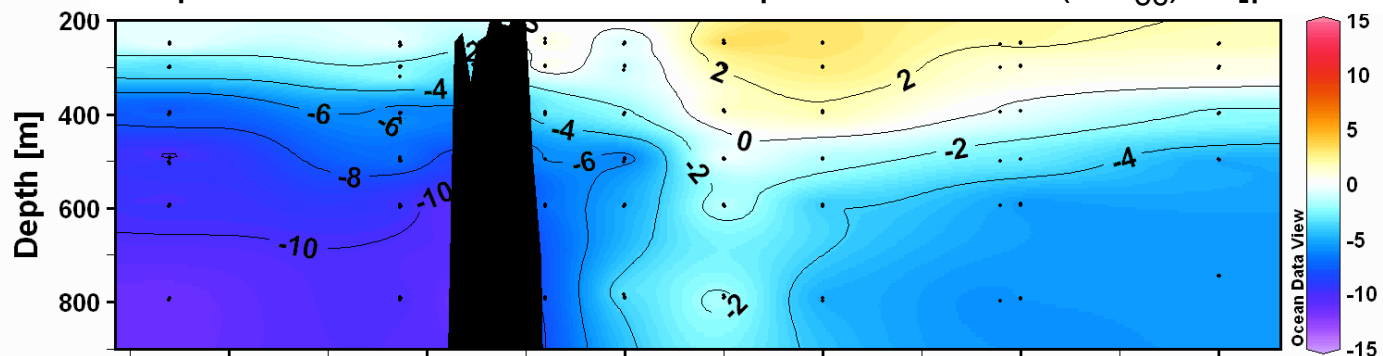
Upper
CDW

SAMW

Impact de la variabilité océanique sur le DIC (ΔC_{oc})

[μ mol/kg]

WW



STMW

Upper
CDW

SAMW

OBSERVATIONS

Au Nord du front polaire: les eaux de mode transportent le CO₂ anthropique de la surface vers l'océan intérieur (~0-1000m)

STMW: l'invasion de CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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)

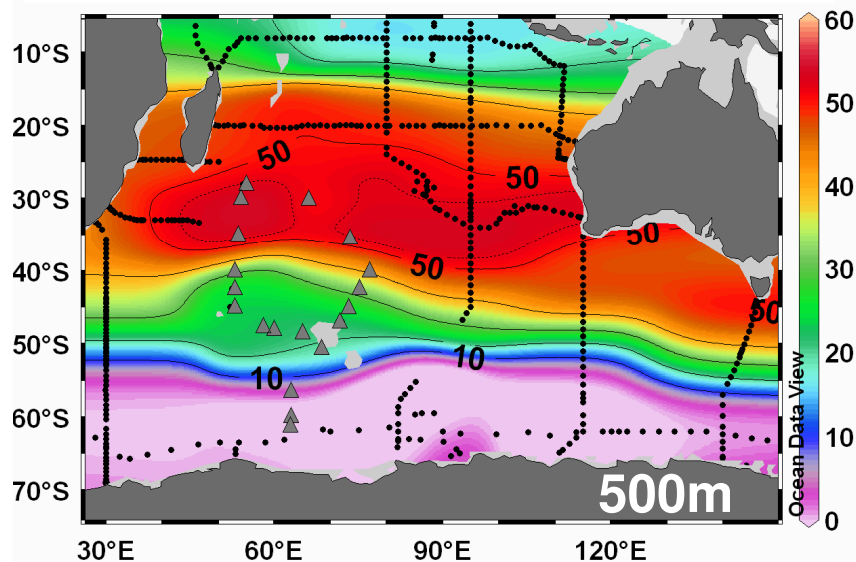
Scénario CO₂ :

Simulation Préindustrielle = CO₂ atmosphérique constant à 278 ppm

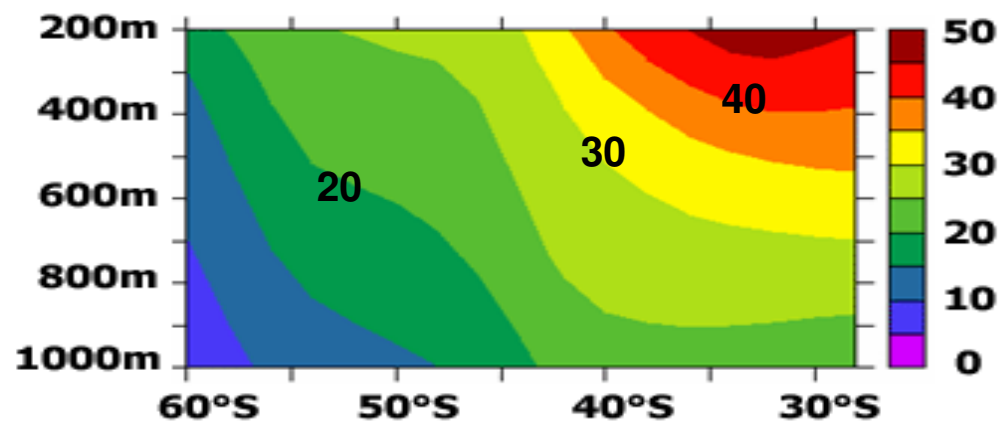
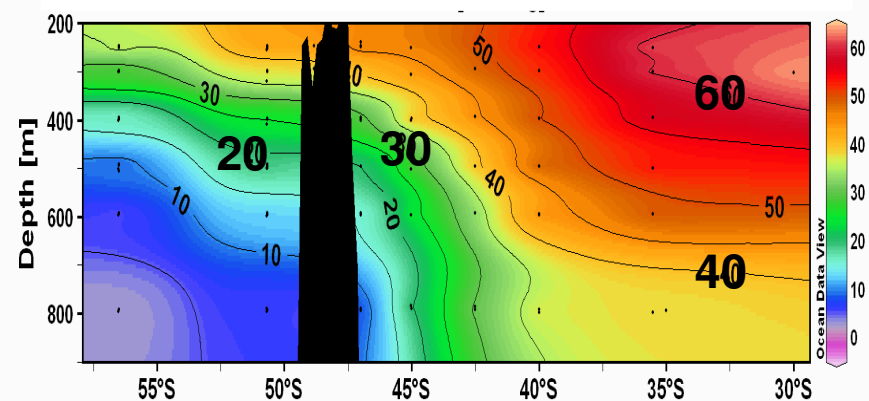
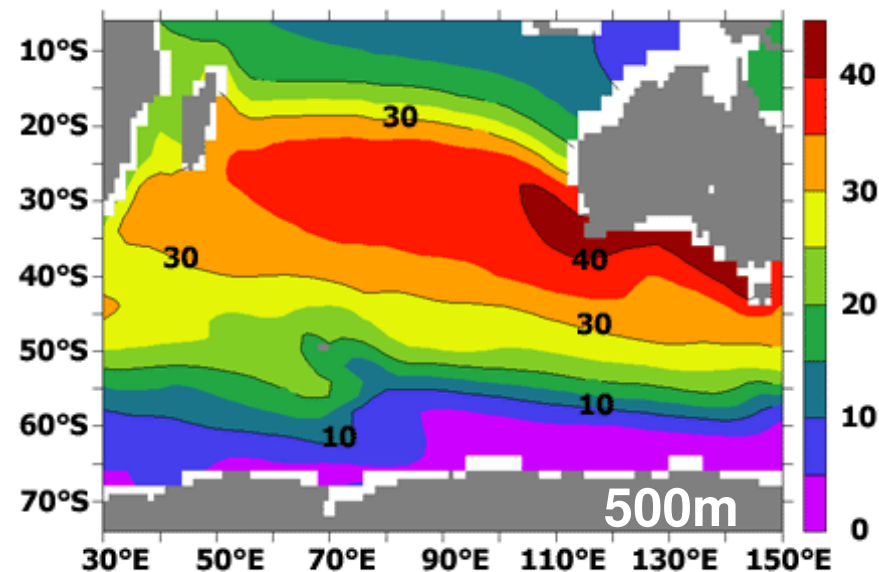
Simulation Anthropique = accroissement de CO₂ atmosphérique observé

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

OBSERVATION (1995-2000)

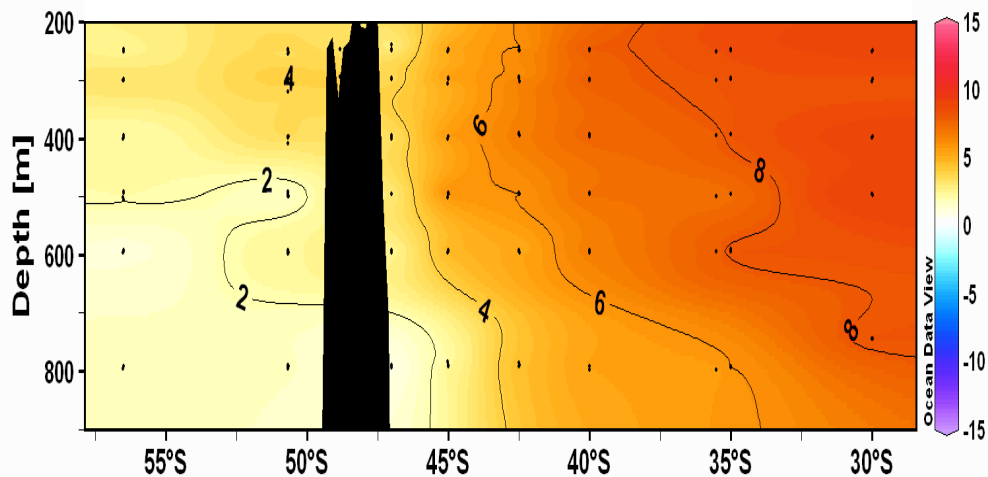


MODELE (année 2000)

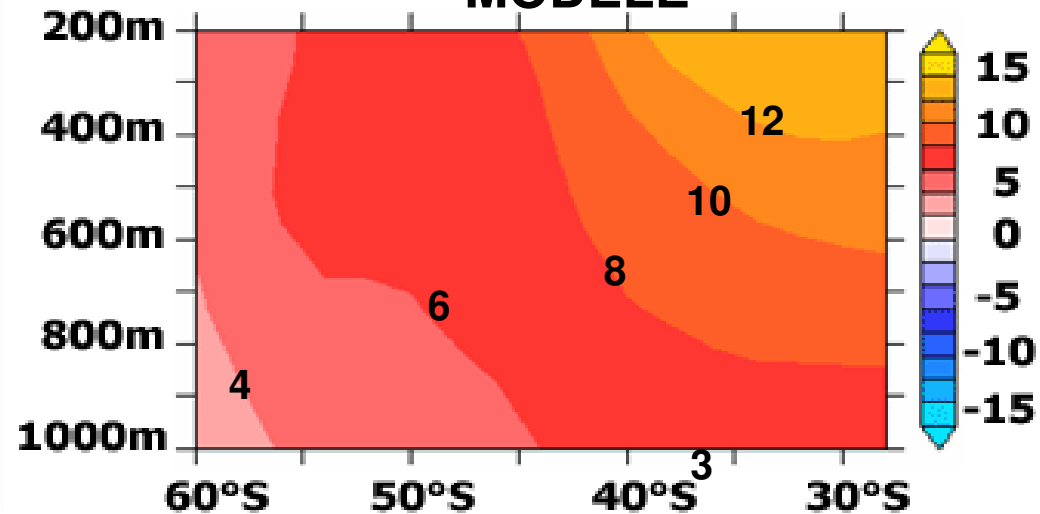


Accumulation de carbone anthropique : ΔC_{ant} ($\mu\text{mol/kg}$)

OBSERVATION

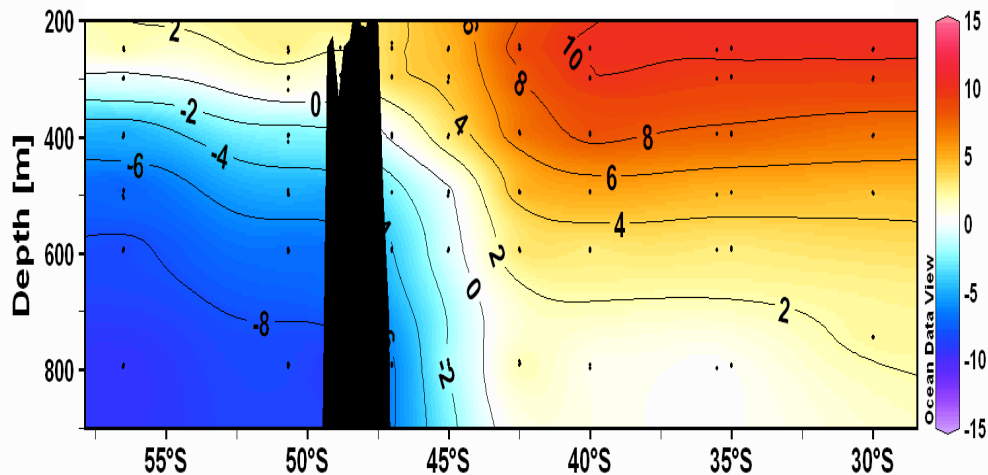


MODELE

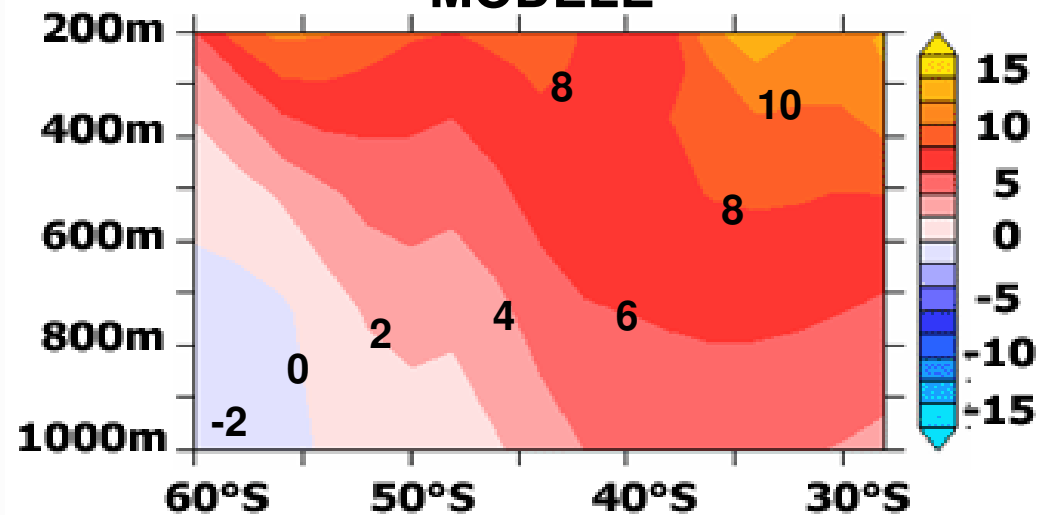


Augmentation du carbone total : ΔDIC ($\mu\text{mol/kg}$)

OBSERVATION

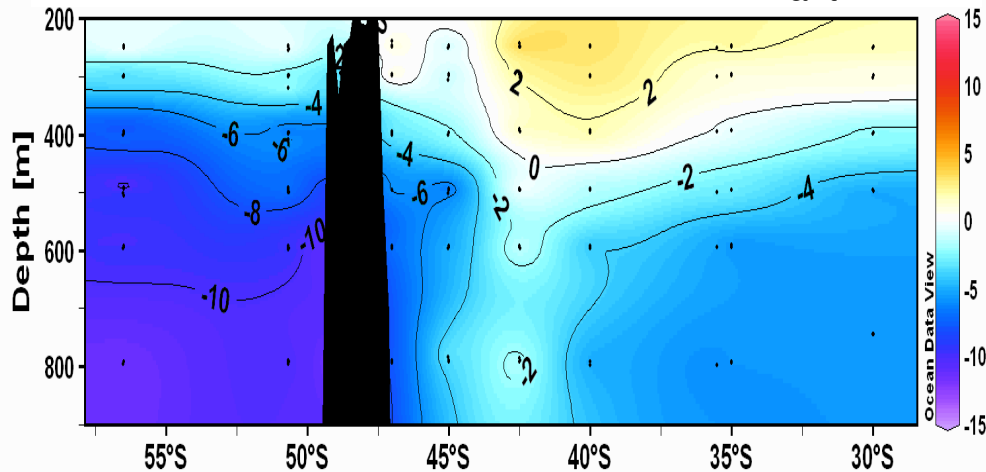


MODELE

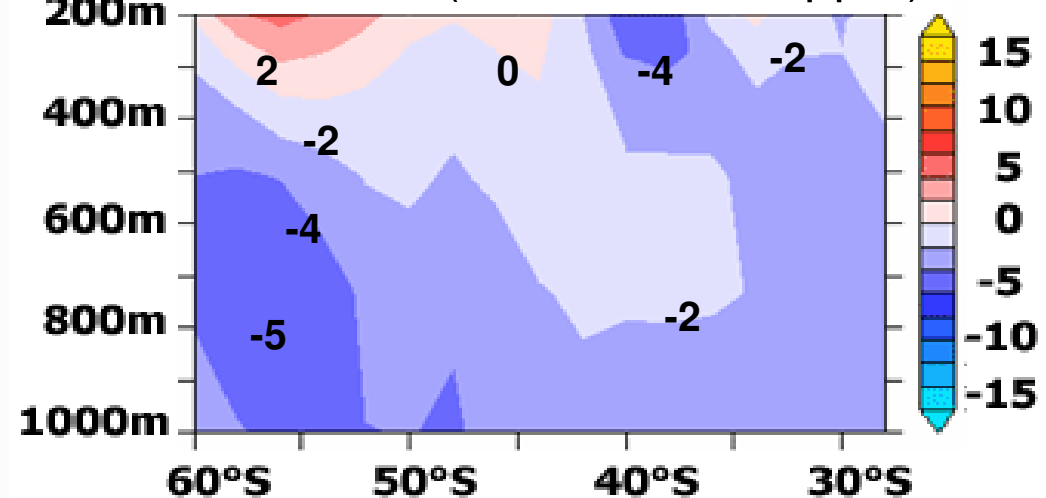


Impact de la variabilité océanique sur le DIC ($\mu\text{mol}/\text{kg}$)

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



MODELE ($\text{CO}_2_{\text{atm}} = 278\text{ppm}$)

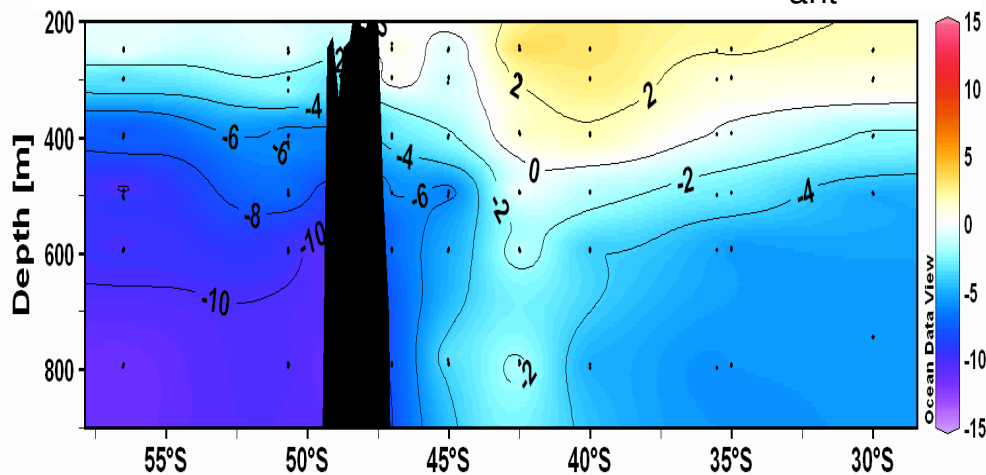


Quand on retire le signal anthropique → Impact de la variabilité océanique

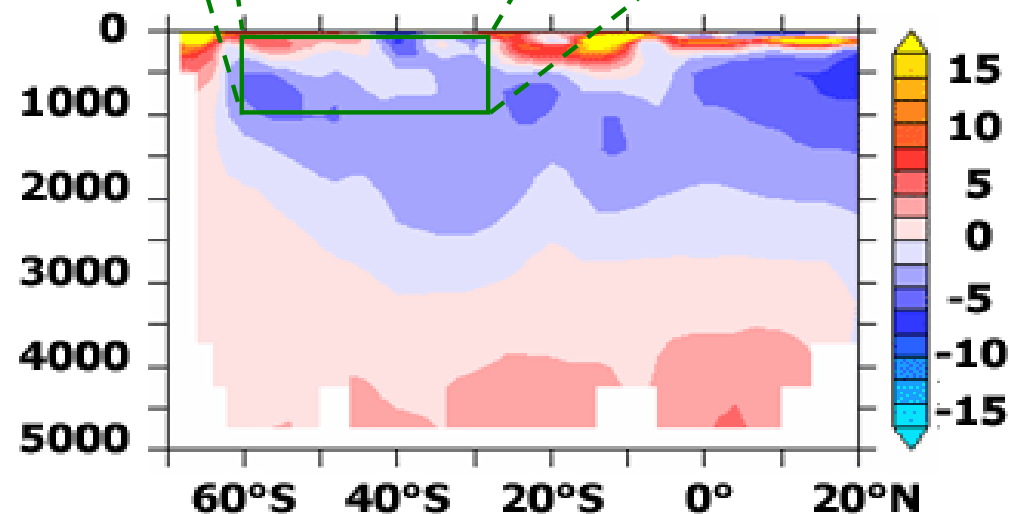
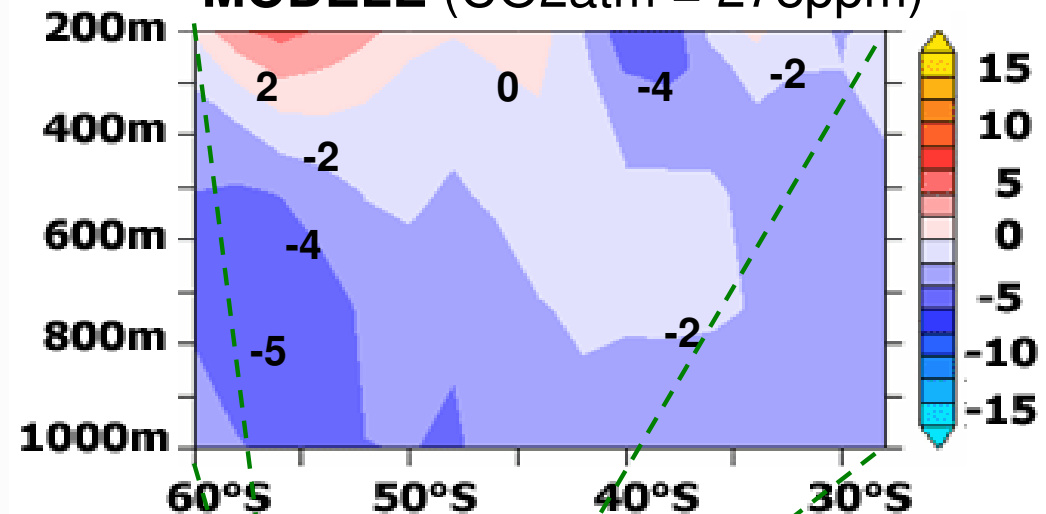
- pas de variation significative dans les STMW,
ni en sub-surface dans la zone de formation des MWs
- diminution du DIC en profondeur (sous la couche de mélange),
maximale dans les eaux antarctiques (upper CDW)
plus faible, mais significative, dans les SAMW

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

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

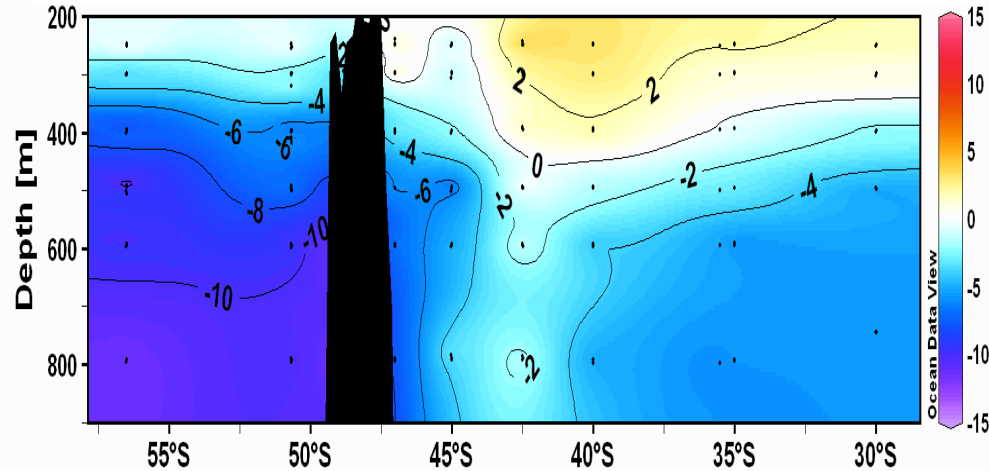


MODELE ($\text{CO}_2\text{atm} = 278\text{ppm}$)

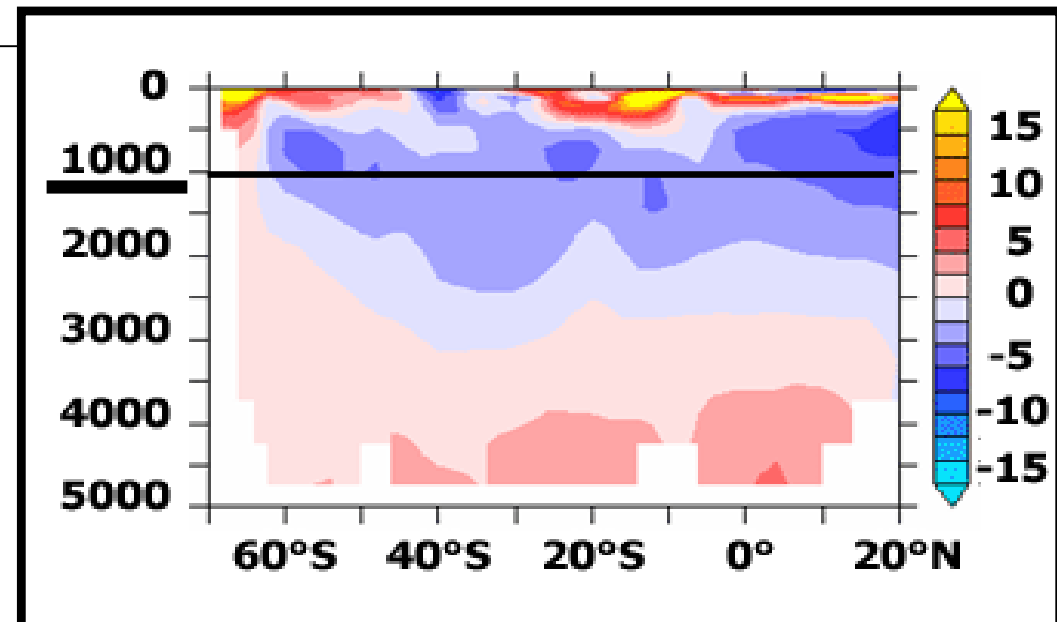
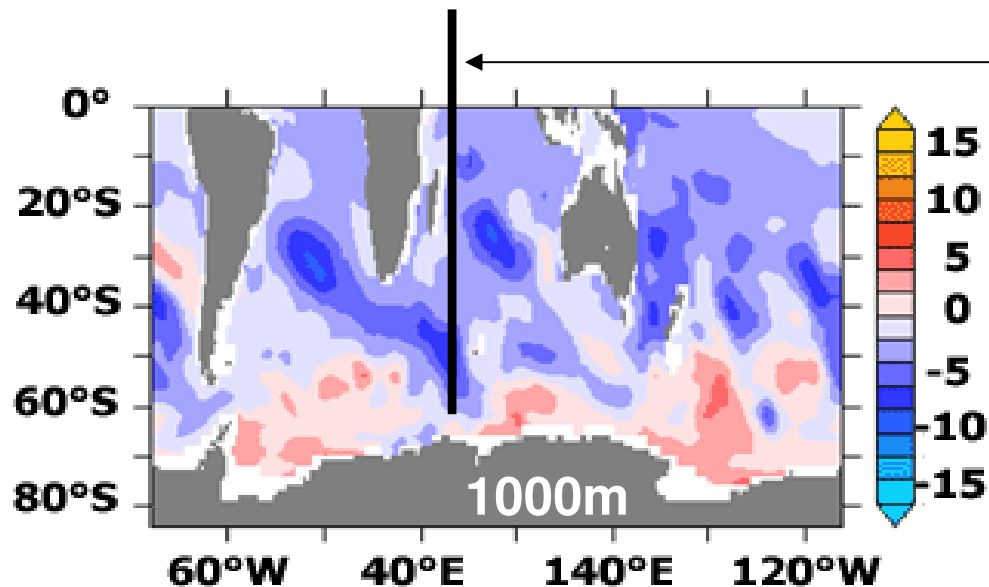
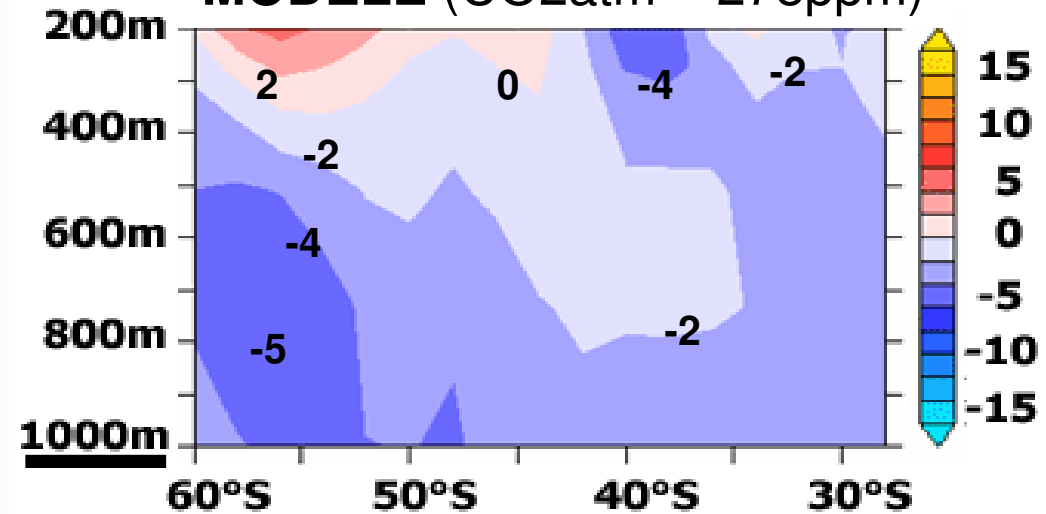


Impact de la variabilité océanique sur le DIC ($\mu\text{mol/kg}$)

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

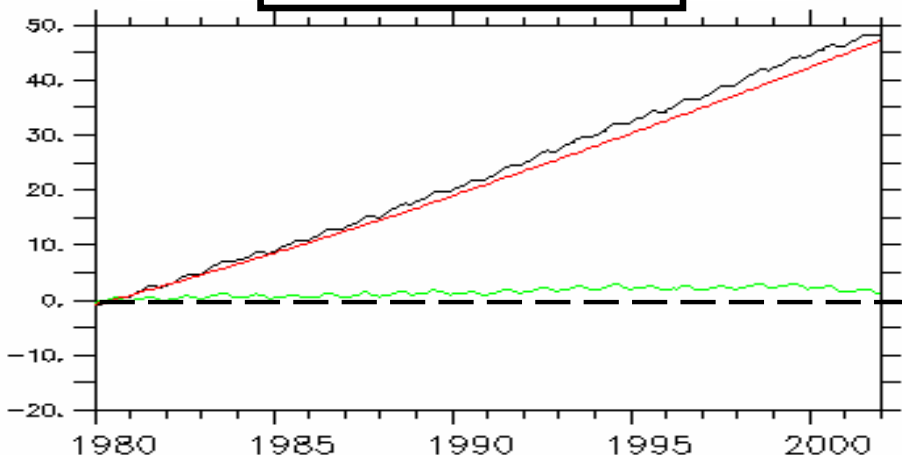


MODELE ($\text{CO}_2\text{atm} = 278\text{ppm}$)



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: $x=0-360^\circ, y < 20^\circ\text{S}$, $z=\text{surf} \rightarrow \text{fond}$)

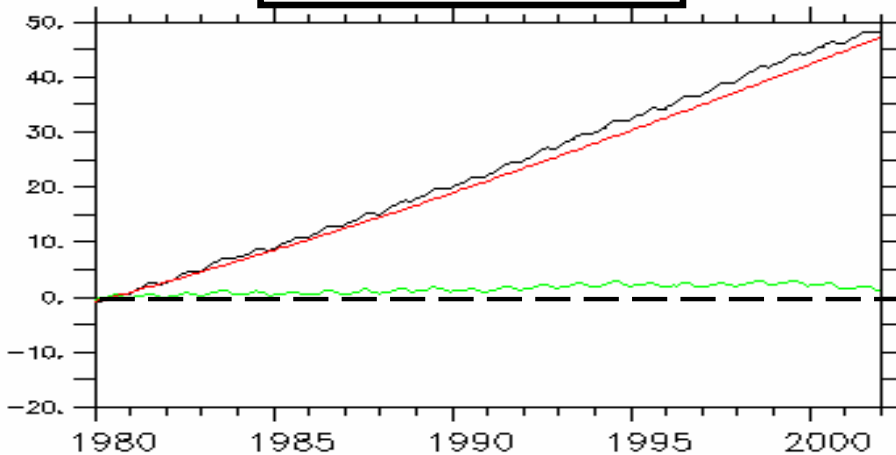
← année de référence 1980 ($\Delta\text{DIC} = 0$)

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

—	Augmentation de DIC	→	+ 48 GtC	(ΔC_{TOT})
—	Accumulation de Cant	→	+ 46 GtC	(ΔC_{ANT})
—	Variabilité océanique	→	+ 2 GtC	(ΔC_{OC})

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

Surface → Fond

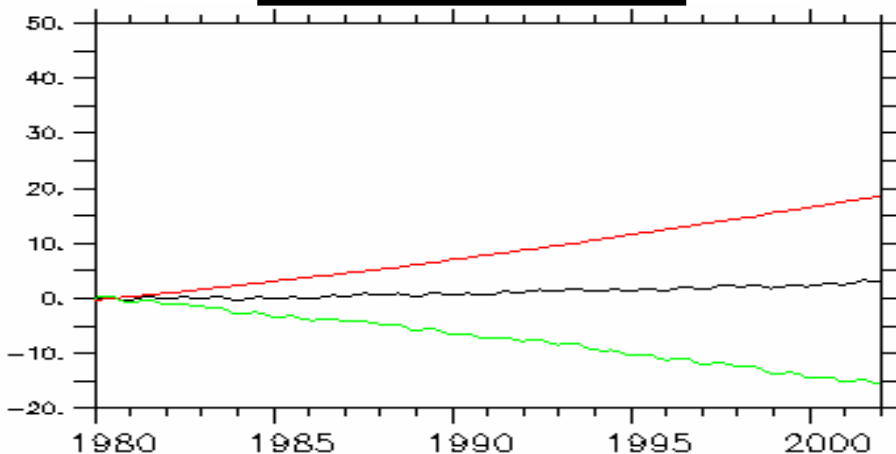


Axe Y : évolution du DIC au sud de 20°S en Pg de C (concentrations intégrées sur l'espace: $x=0-360^\circ, y < 20^\circ\text{S}$, $z=\text{surf} \rightarrow \text{fond}$)

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

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

500m-2000m



Surface-Fond

+ 48 GtC

(ΔC_{TOT})

+ 46 GtC

(ΔC_{ANT})

+ 2 GtC

(ΔC_{OC})

500-2000m

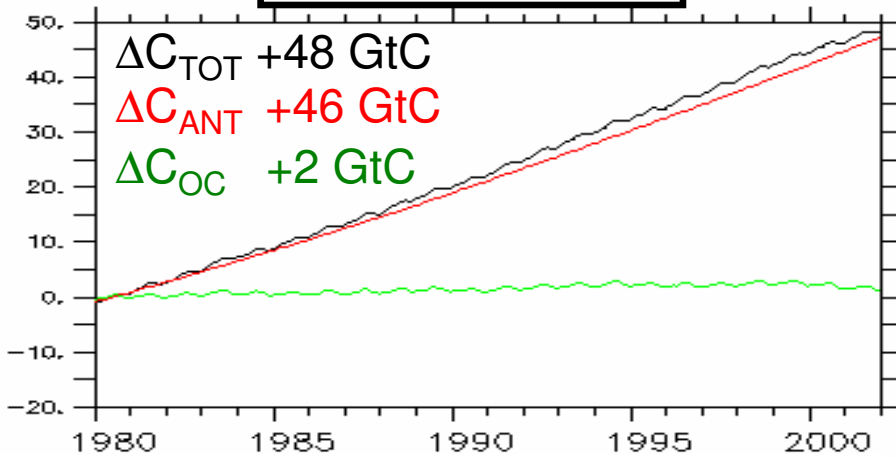
+ 3 GtC

+ 18 GtC

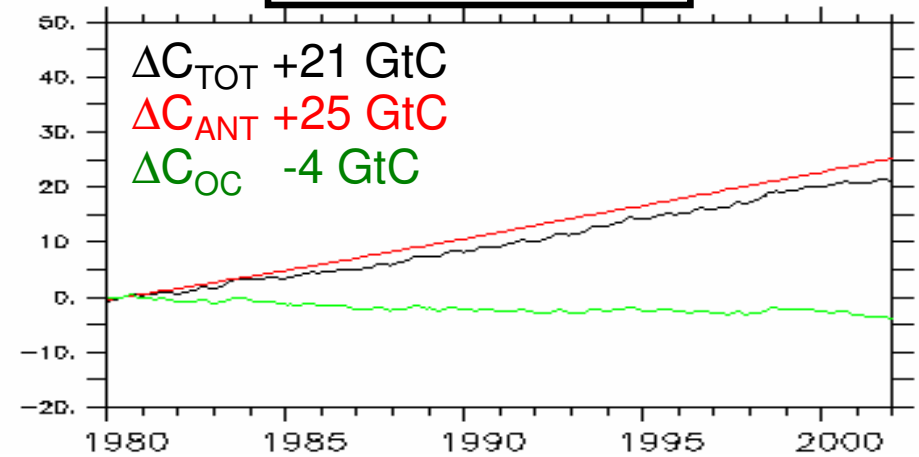
- 15 GtC

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

Surface → Fond

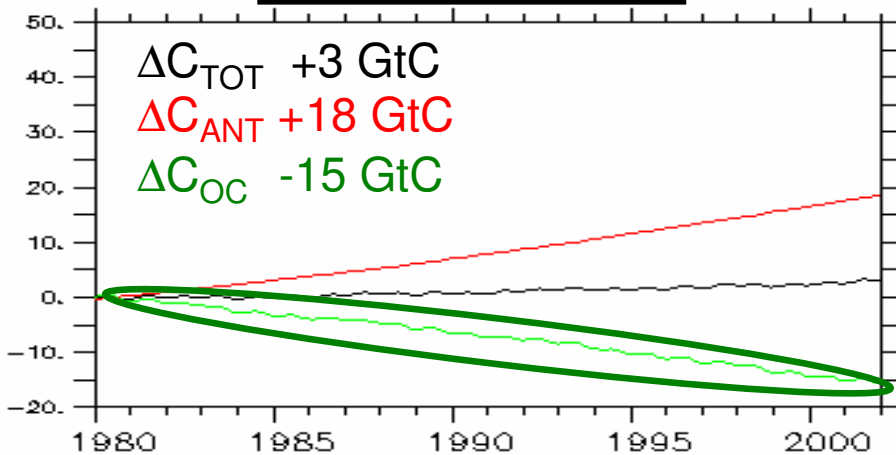


0-500m

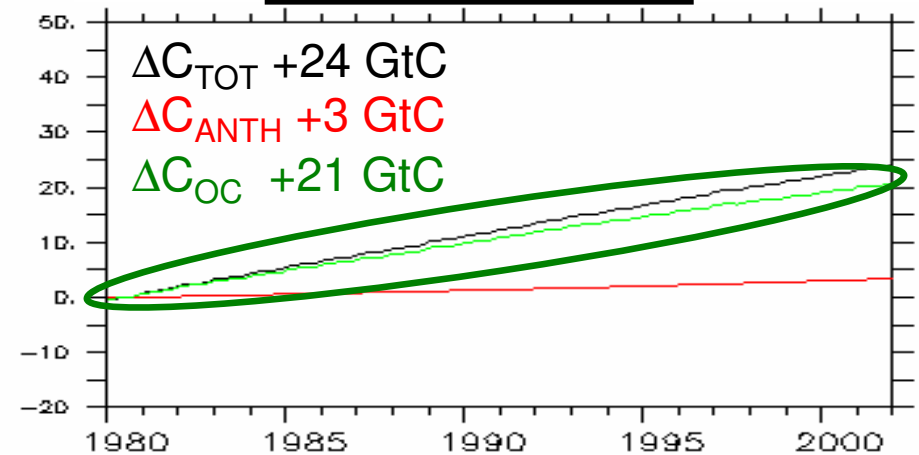


Résultat du modèle sur les 20 dernières années du XX^e s. (1980-2000) au sud de 20°S

500m-2000m



> 2000m



OBSERVATIONS

Au Nord du front polaire: les eaux de mode transportent le CO₂ anthropique de la surface vers l'océan intérieur (~0-1000m)

STMW: l'invasion de CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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}C , O_2 , nutriments, ...
- Lien entre les variations de pCO_2 en surface et du DIC dans l'océan intérieur

