



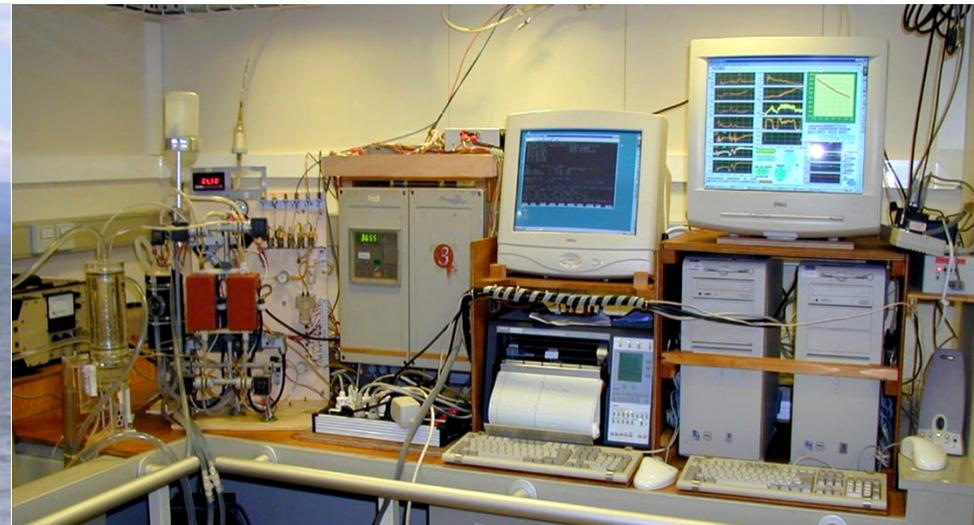
# Service d'Observation OISO

## Synthèse des observations de CO<sub>2</sub> dans la région de Kerguelen



Claire Lo Monaco, Nicolas Metzl, Christian Brunet,  
Anna Laurantou, Claude Mignon, Virginie Racapé

Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentation et Analyses Numériques  
Institut Pierre Simon Laplace, Université Pierre et Marie Curie, Paris





# Service d'Observation OISO



Responsable : N. Metzli, Coordination: C. Lo Monaco

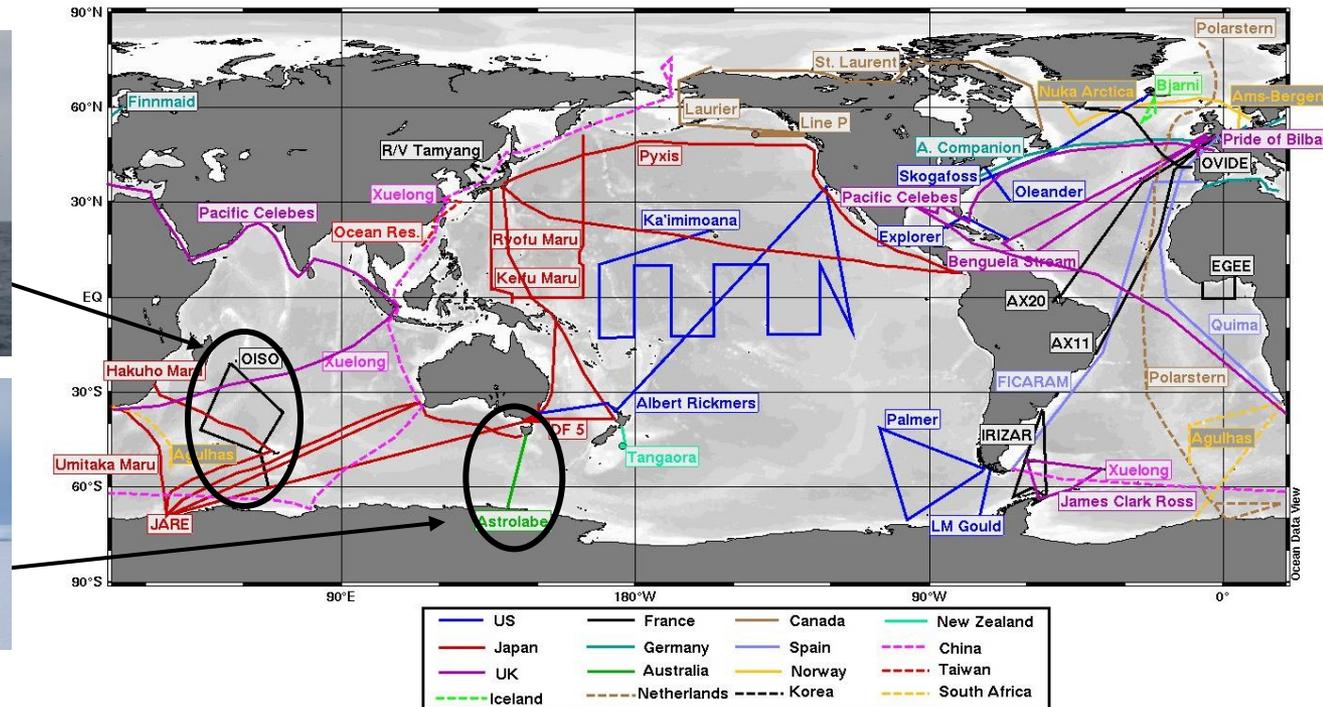
Suivi du CO<sub>2</sub> dans l'Océan Indien Sud et Austral depuis 1998

Soutiens INSU, IPEV, IPSL

Associé aux campagnes MINERVE depuis 2002 (O.R.E CARAUS)

Organisation nationale des activités CO<sub>2</sub> et autres GHG : SOERE Great Gas (P. Ciais)

Contribue au réseau international de surveillance du CO<sub>2</sub> (UNESCO/IOCCP)





# Service d'Observation OISO



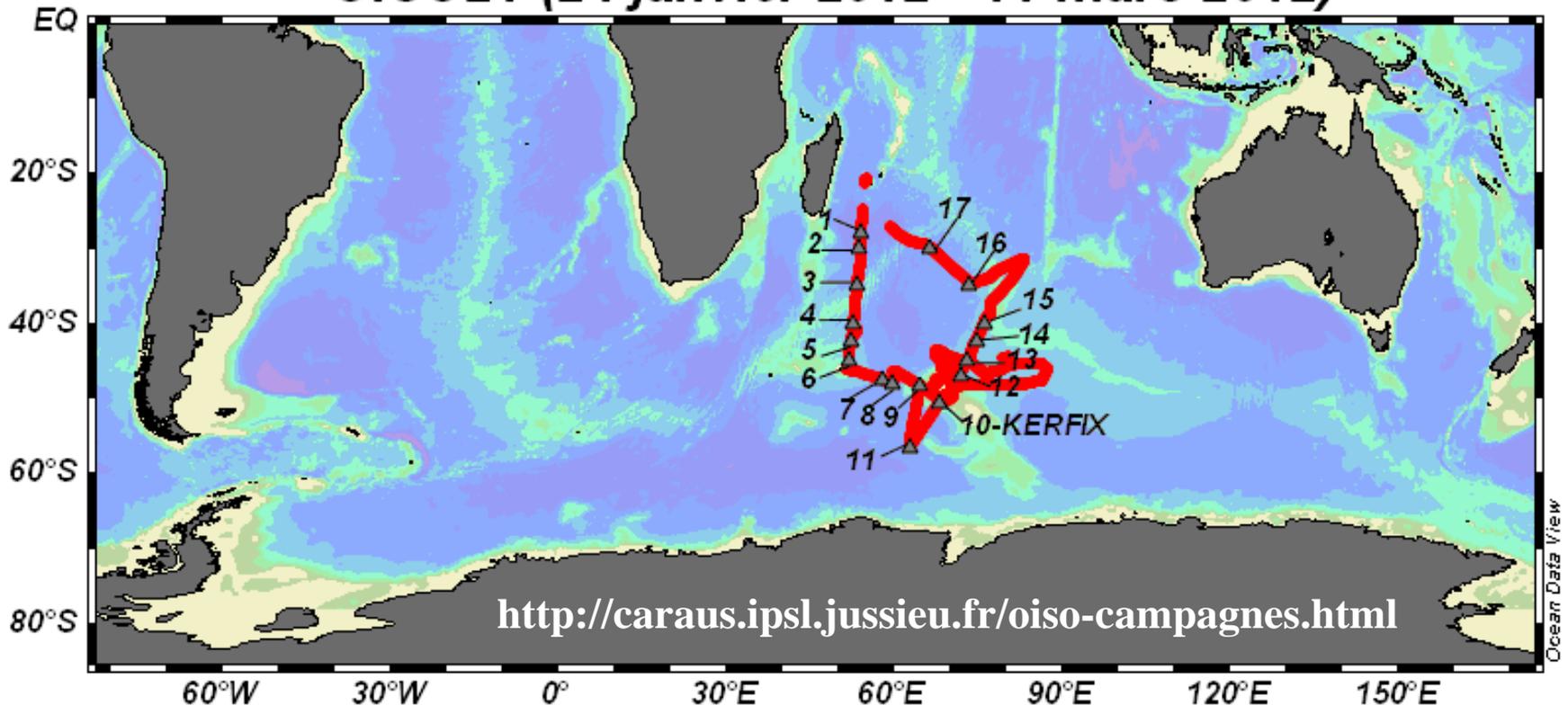
1 à 2 campagnes /an sur les trajets logistiques du Marion Dufresne

Mesures dans les eaux de surface (continu) + colonne d'eau (~17 stations)

pCO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> total, alcalinité, T, S, oxygène, sels nutritifs, chlorophylle-a, isotopes <sup>13</sup>C et <sup>18</sup>O, courants (ADCP de coque), observations météo

Accès aux données, metadonnées, publications, actualités : <http://caraus.locean-ipsl.upmc.fr>

## OISO21 (24 janvier 2012 - 11 mars 2012)

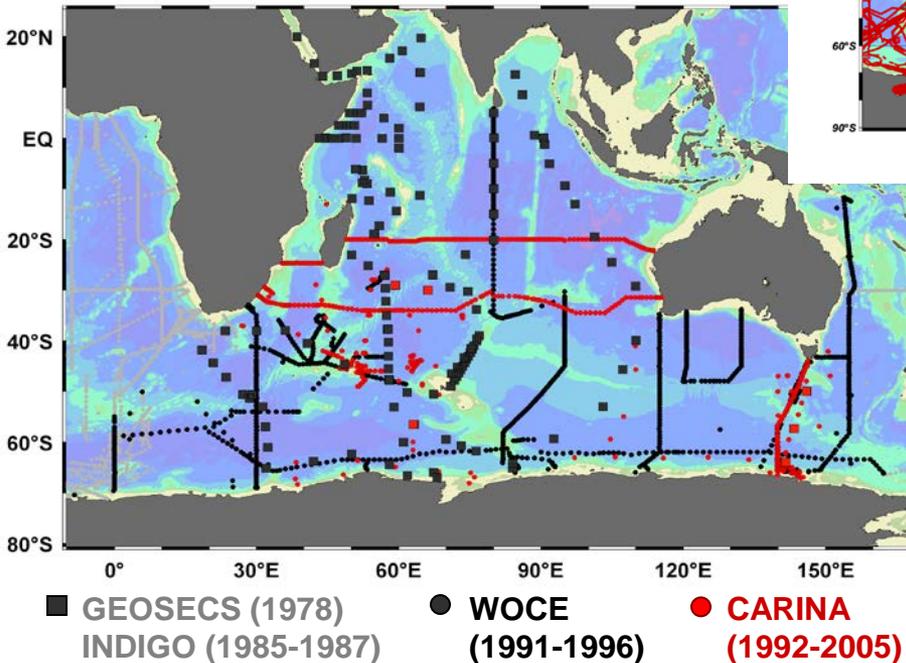
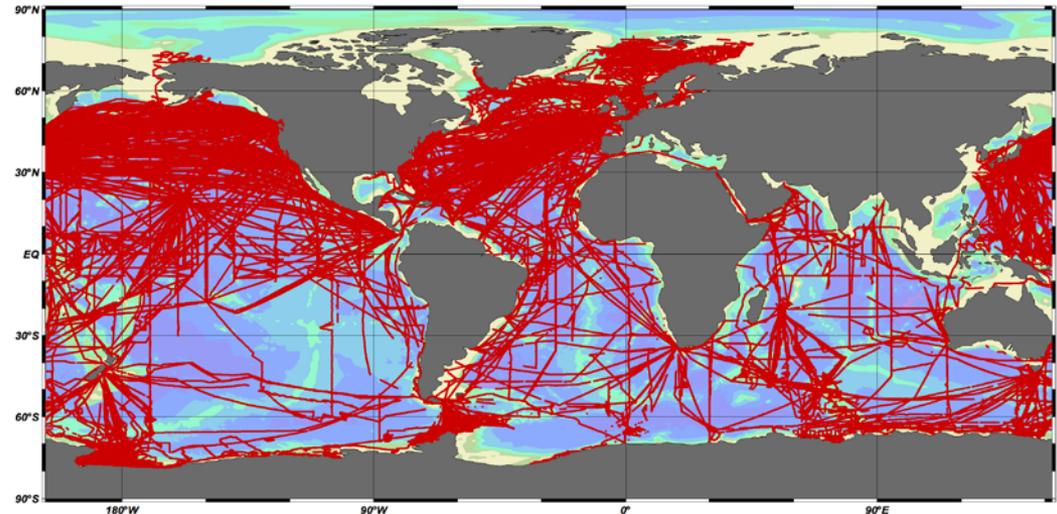




## Intégration des données OISO dans les synthèses internationales

### SOCAT (Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas)

Atlas des observations de pCO<sub>2</sub>  
dans les eaux de surface



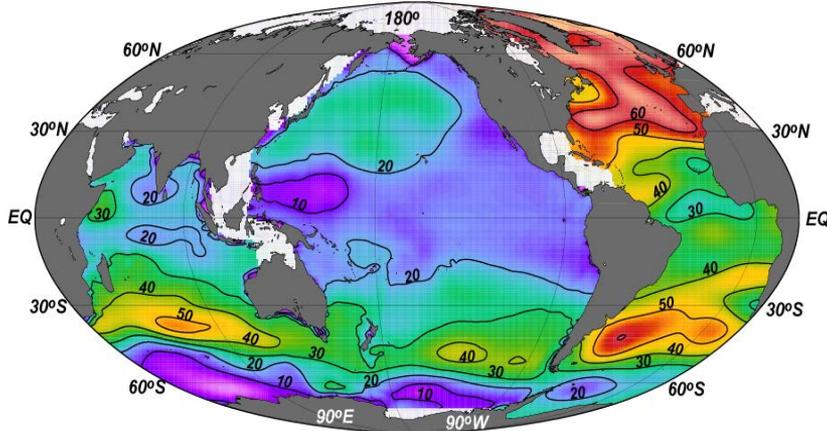
### CARINA / GLODAP

Synthèse des mesures biogéochimiques  
dans la colonne d'eau

## Intégration des données OISO dans les synthèses internationales

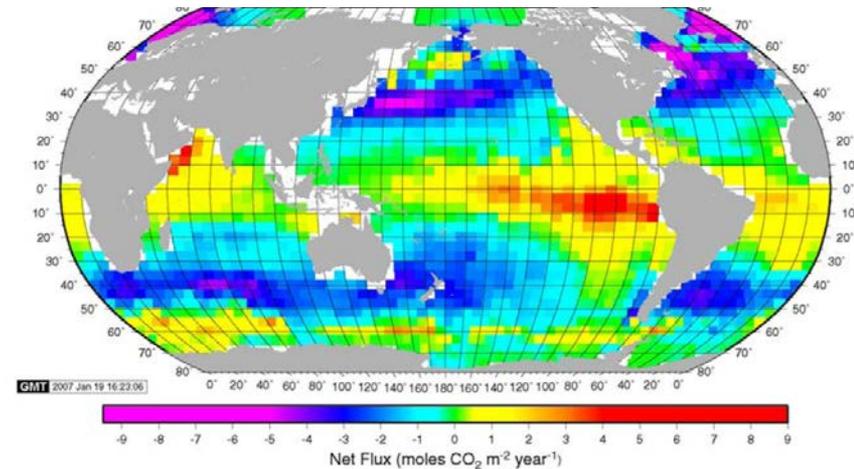
Inventaire de CO<sub>2</sub> anthropique (molC/m<sup>2</sup>)

Sabine et al. (2004)



Flux air-mer de CO<sub>2</sub> (molC/m<sup>2</sup>/an)

Takahashi et al. (2009)



Émissions anthropiques FF+LU:

Accumulation dans l'océan :

<u>Total</u>	<u>1990-2009</u>
530 GtC	8.5 GtC/an
154 GtC (30 %)	2.1 GtC/an (25%)

Objectifs scientifiques  
du S.O. OISO

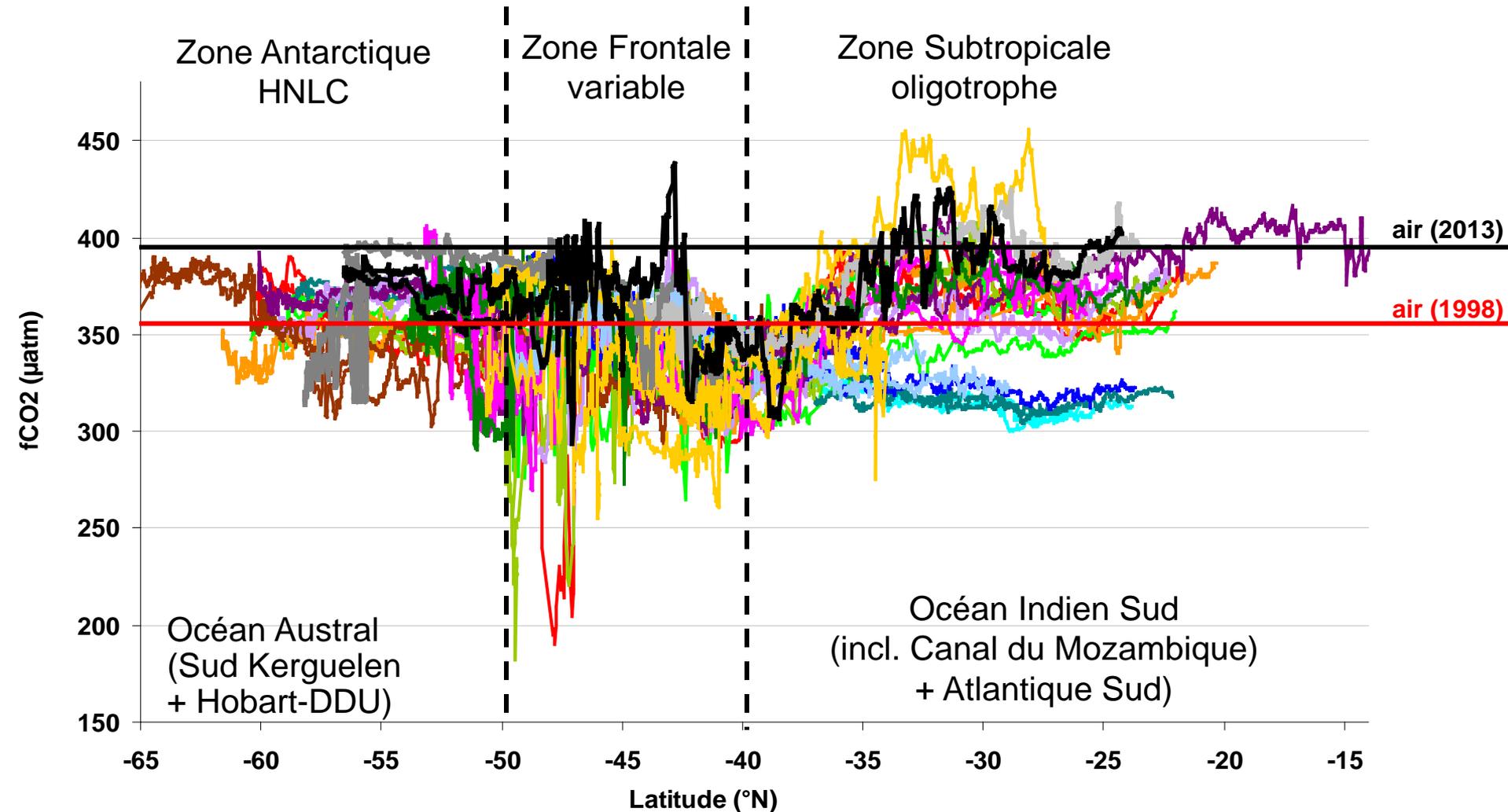
- Variabilité du flux air-mer de CO<sub>2</sub> (saisonnier à décennal)
- Invasion de CO<sub>2</sub> anthropique dans l'océan (interannuel, décennal)
- Acidification des eaux



# Variabilité du flux air-mer de CO<sub>2</sub>



Mesures de pCO<sub>2</sub> dans les eaux de surface depuis 1998

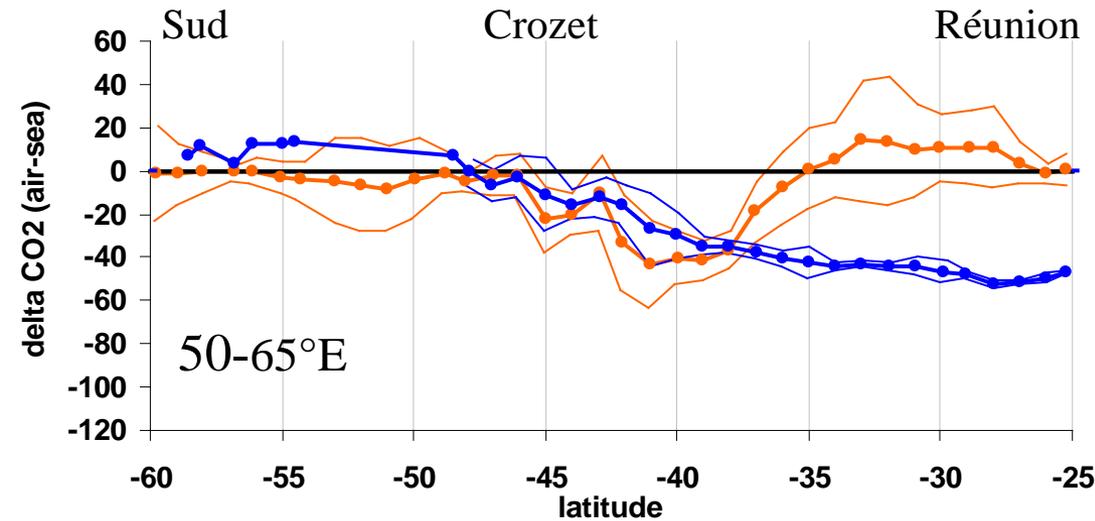




# Variabilité du flux air-mer de CO<sub>2</sub>



## Mesures de pCO<sub>2</sub> dans les eaux de surface depuis 1998

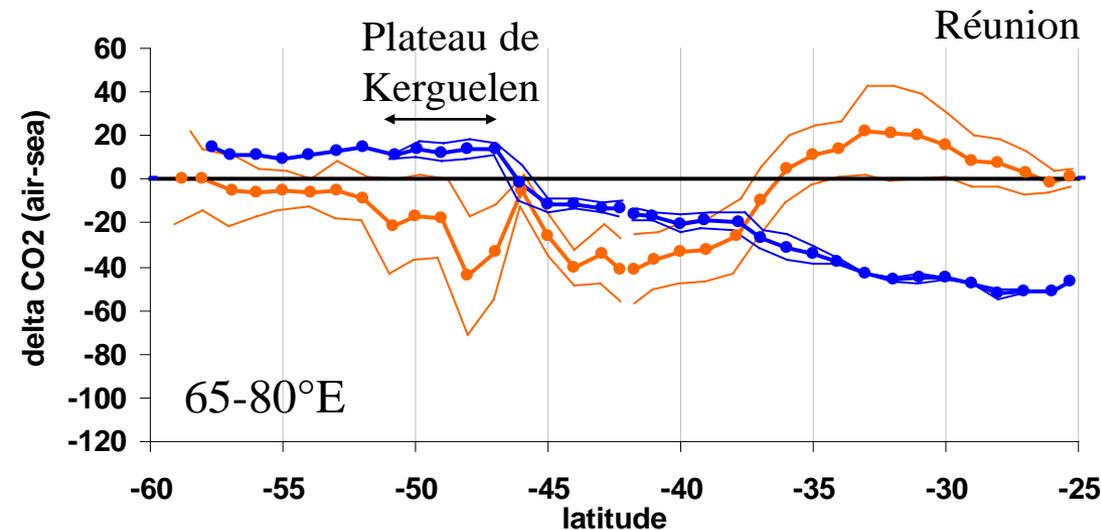


Variations saisonnières opposées au N et au S du Front Polaire (~50°S)

Zone Subtropicale (STZ), oligotrophe

→ puits de CO<sub>2</sub> important en hiver = pompe de solubilité

→ source de CO<sub>2</sub> en été (eaux chaudes), petit puits au S de Madagascar (bloom)



• Zone Antarctique (AZ <50°S)

→ petite source de CO<sub>2</sub> en hiver (upwelling)

→ proche de l'équilibre en été (faible production primaire)

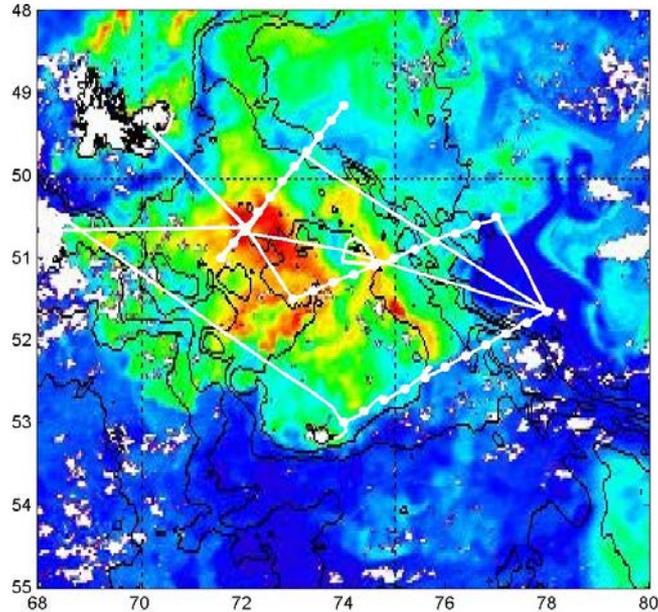
• Zone Frontale (AZ)

→ puits de CO<sub>2</sub> toute l'année, forte variabilité spatiale et temporelle

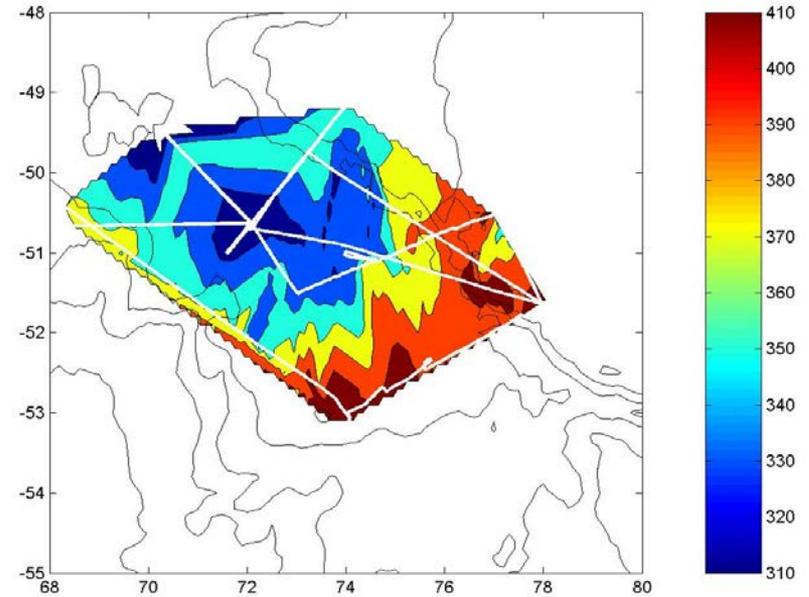
→ puits importants de CO<sub>2</sub> autour de Kerguelen (bloom récurrent)

## Campagne KEOPS1 / OISO12 Janvier/Février 2005

Chlorophylle-a (SeaWiFs, 21-Jan-2005)



$f\text{CO}_2$  ( $\mu\text{atm}$ ) mesurée en janvier 2005



Pompe biologique de  $\text{CO}_2 = 58 \pm 11 \mu\text{atm}$  (différence dans et hors du bloom)  
= 2 à 3 fois plus élevée que les expériences de fertilisation artificielle  
réalisées dans l'Océan Austral

*Blain et al. (2007, Nature)*

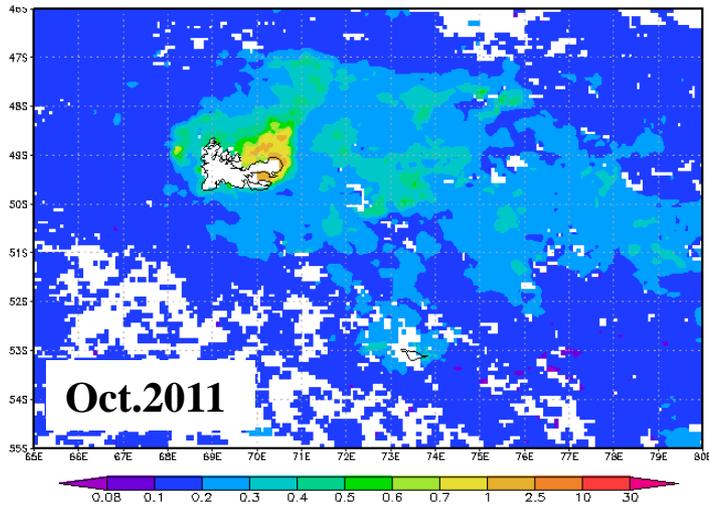
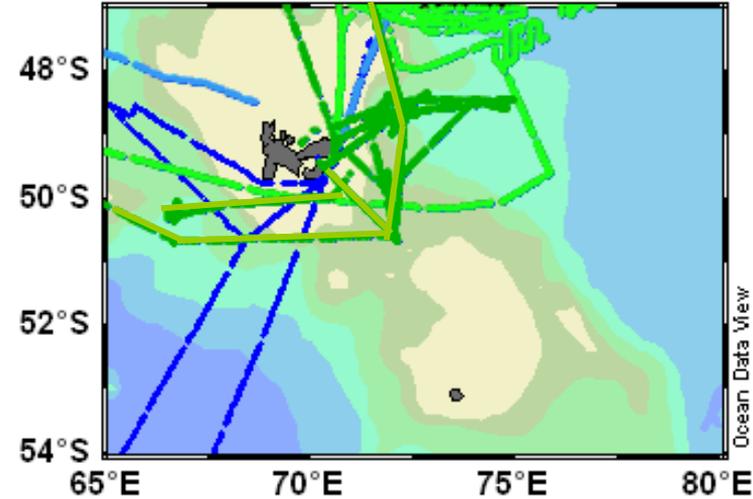
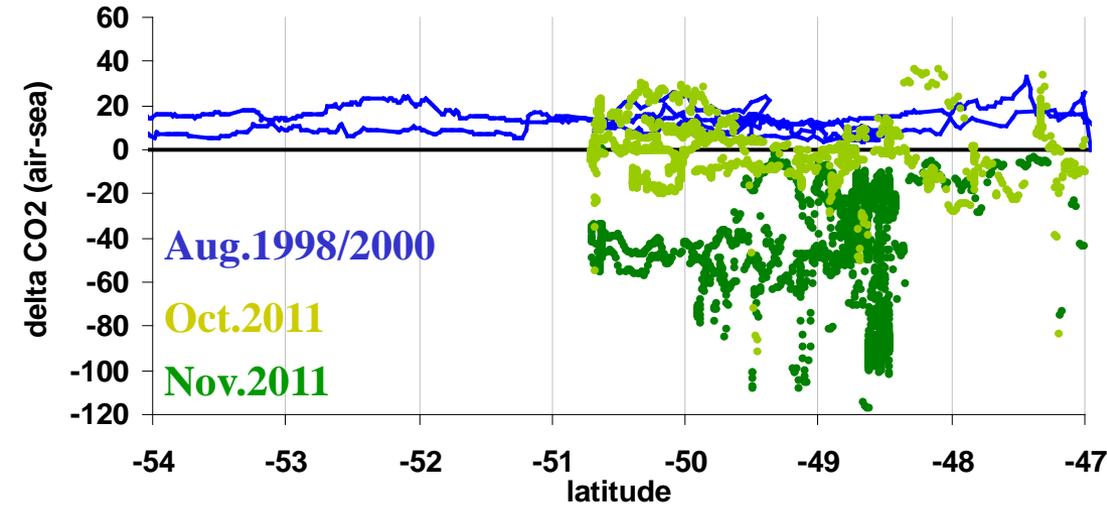


# Variabilité du flux air-mer de CO<sub>2</sub>

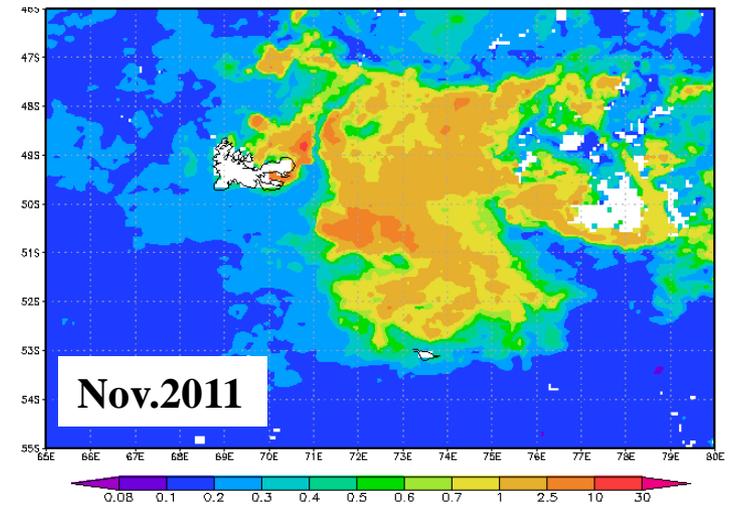


Campagne KEOPS2 / OISO20

Octobre/Novembre 2005

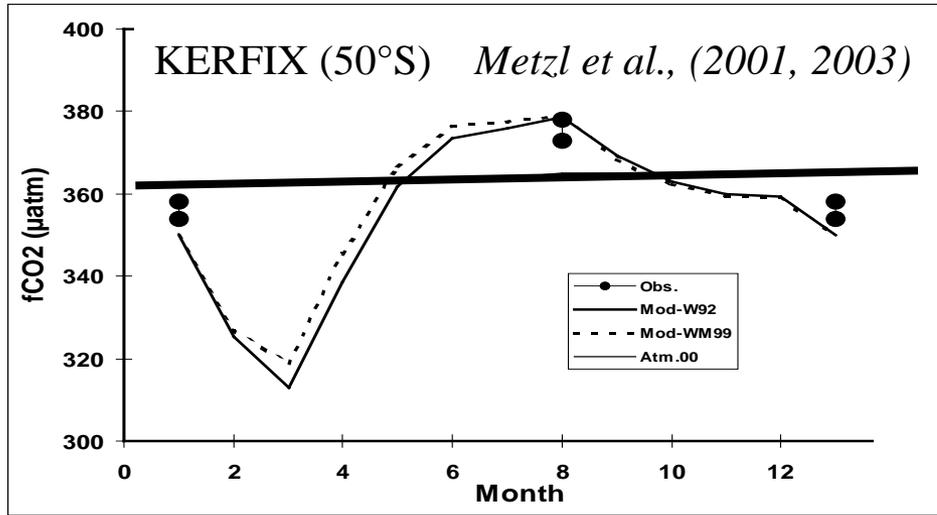
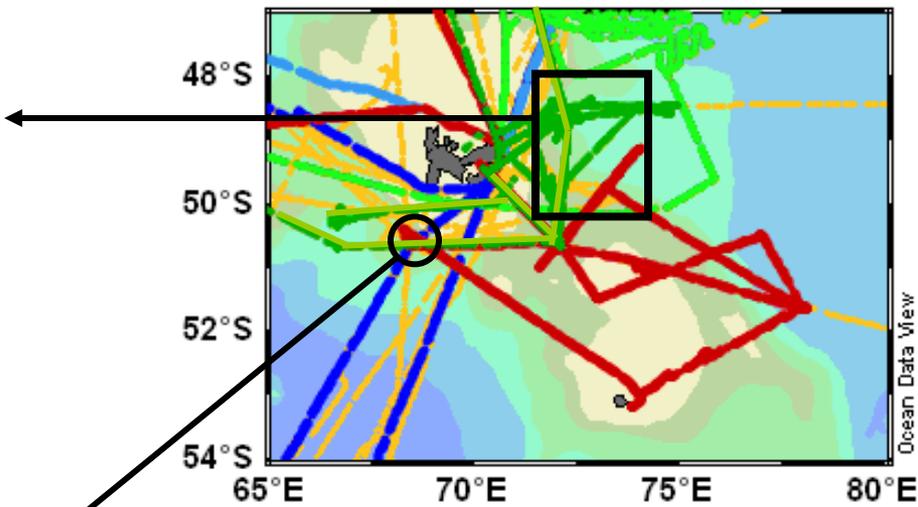
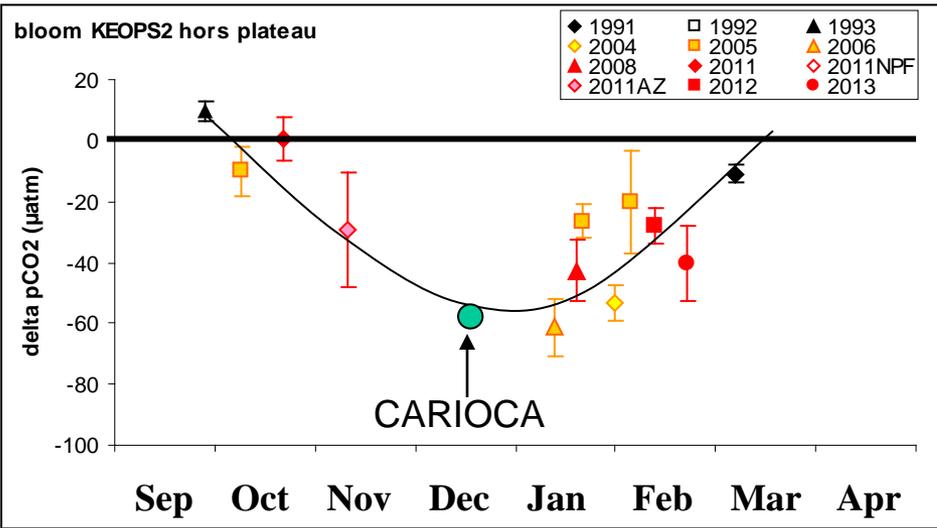


Chl *a*  
MODIS



Lo Monaco et al. (in prep)

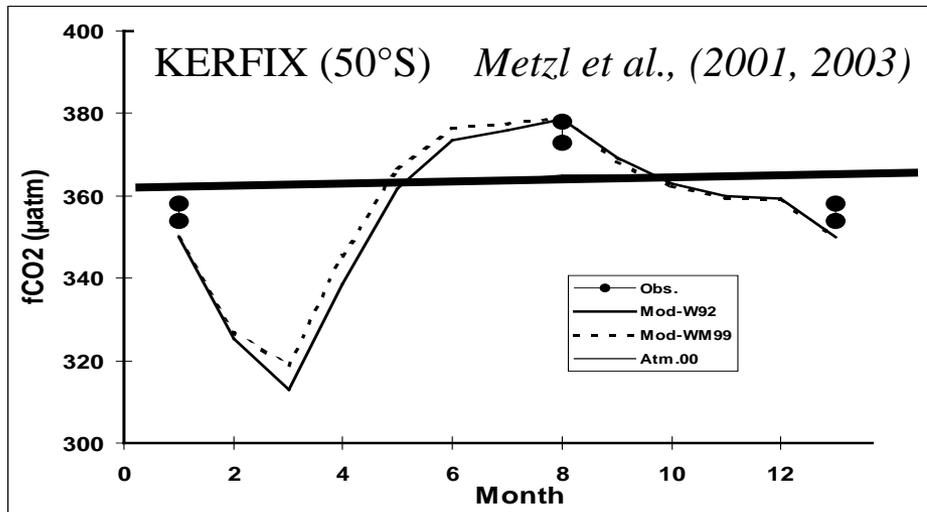
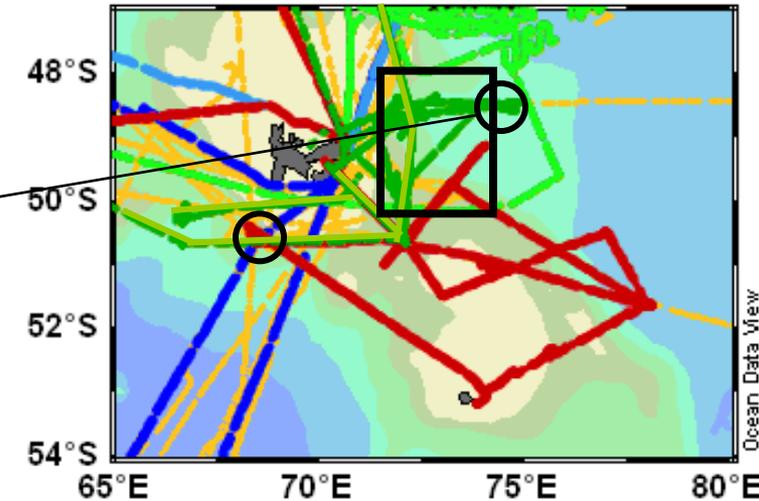
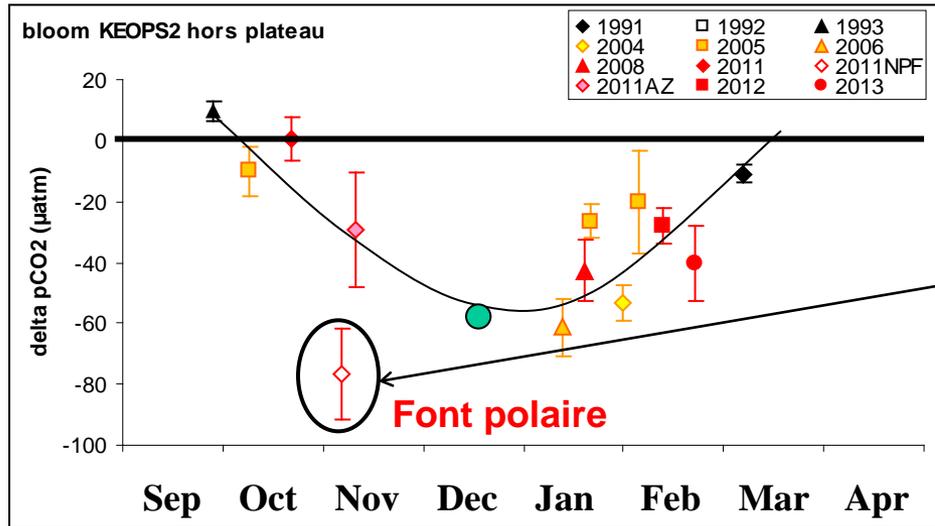
## Synthèse des observations de CO<sub>2</sub> autour de Kerguelen (bloom vs. HNLC)



dans les eaux fertilisées :  
 puits de CO<sub>2</sub> précoce (nov-jan)  
 et intense (60-80 µatm)

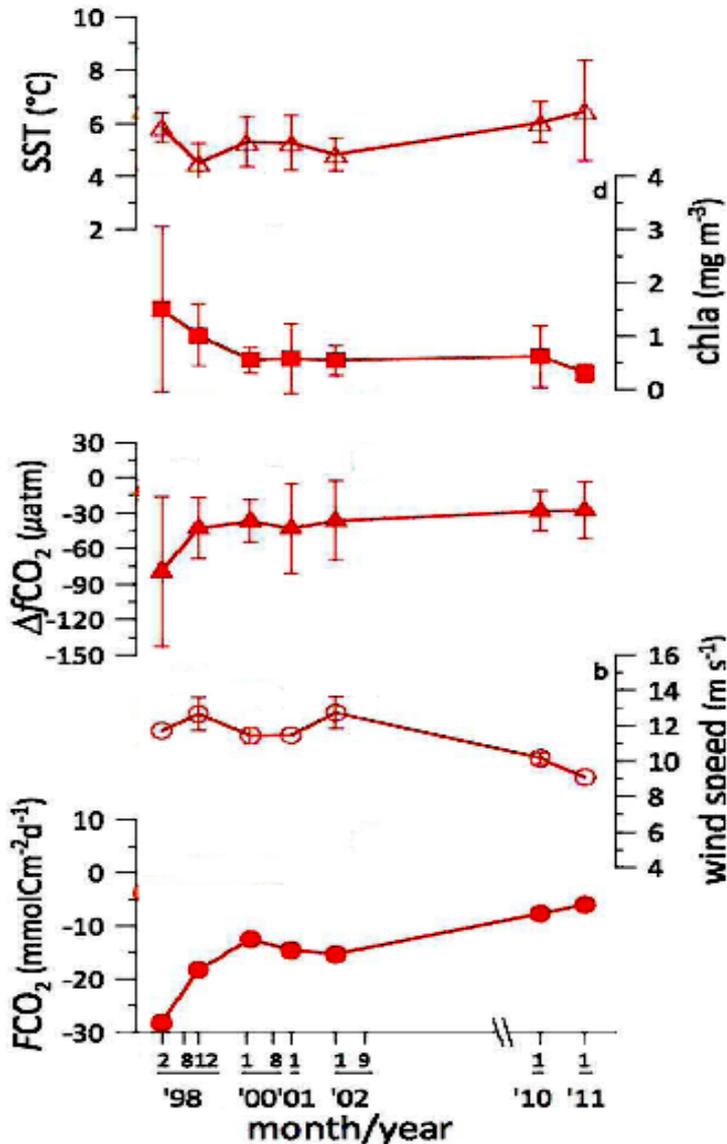
dans les eaux HLNC (e.g. Kerfix)  
 puits de CO<sub>2</sub> plus tardif  
 max en fév. (40 µatm)

## Synthèse des observations de CO<sub>2</sub> autour de Kerguelen (bloom vs. HNLC)



dans les eaux fertilisées :  
 puits de CO<sub>2</sub> plus intense au nord  
 du Front Polaire (SAZ) que dans la  
 zone Antarctique  
 rôle de la température ?  
 différentes populations phyto?

## Évolution du puits de CO<sub>2</sub> dans l'Océan Austral



Réduction du puits de CO<sub>2</sub> dans la zone frontale en été

- réchauffement des eaux
- diminution des vents
- réduction de la pompe biologique de CO<sub>2</sub> (réduction de l'apport de nutriments par mélange vertical)

*Lourantou and Metzl (2011, GRL)*



# Variabilité du flux air-mer de CO<sub>2</sub>

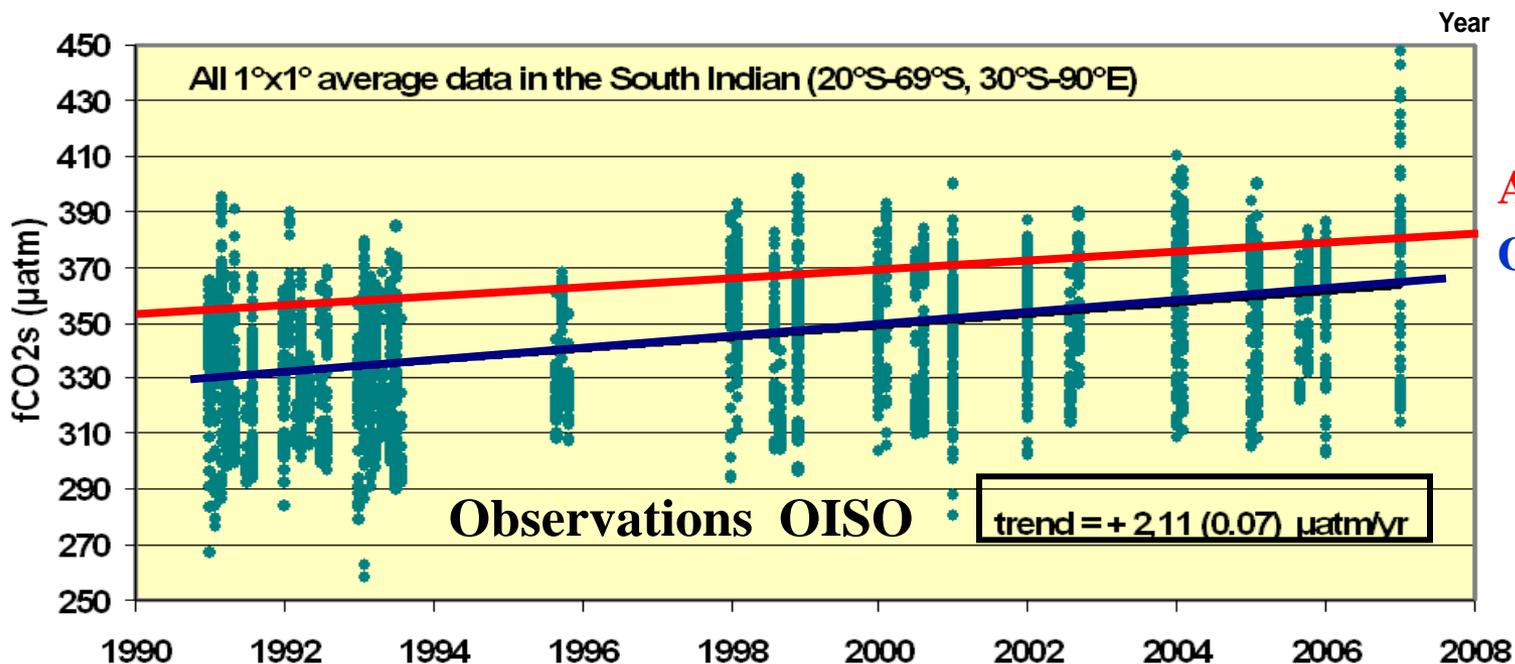
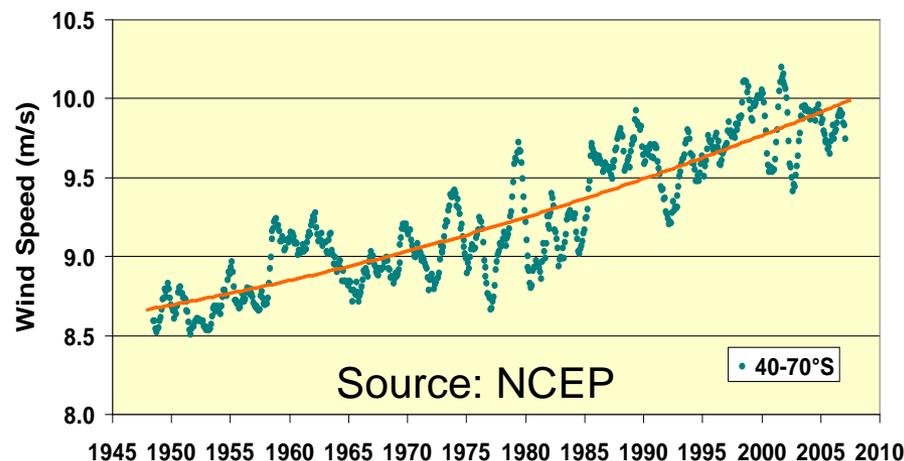


## Évolution du puits de CO<sub>2</sub> dans l'Océan Austral

Le CO<sub>2</sub> augmente plus rapidement dans l'eau que dans l'air :

pCO <sub>2</sub> atmosphérique :	+1.7 μatm/yr
pCO <sub>2</sub> océanique :	+2.1 μatm/yr
	<hr/>
	-0.4 μatm/yr

=> réduction du puits de CO<sub>2</sub> liée à l'augmentation des vents ?



**Atmosphère**  
**Océan**

Metzl, 2009

Communiqué de Presse CNRS



# Variabilité du flux air-mer de CO<sub>2</sub>



## Évolution du puits de CO<sub>2</sub> dans l'Océan Austral

Le CO<sub>2</sub> augmente plus rapidement dans l'eau que dans l'air :

pCO <sub>2</sub> atmosphérique :	+1.7 μatm/yr
pCO <sub>2</sub> océanique :	+2.1 μatm/yr
	<hr/>
	-0.4 μatm/yr

=> réduction du puits de CO<sub>2</sub>  
liée à l'augmentation des vents ?

*Metzl (2009)*, communiqué de presse CNRS

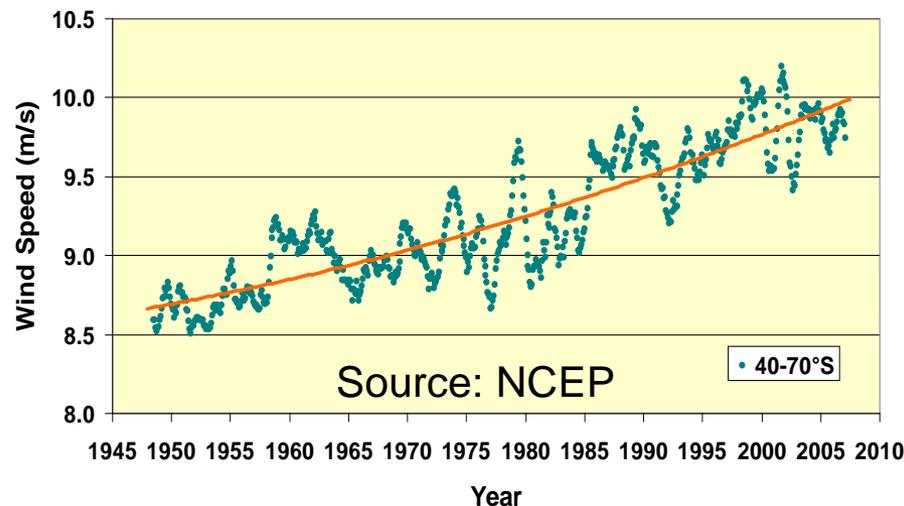
### Couplage Climat / CO<sub>2</sub> Océanique

Diminution de l'O<sub>3</sub> stratosphérique  
+ GHG (réchauffement)

→ intensification de la SAM

→ stabilisation du puits de CO<sub>2</sub> dans l'Océan Austral

*Lenton et al (2009)*,  
communiqué de presse CNRS



### Modèle couplé de l'IPSL

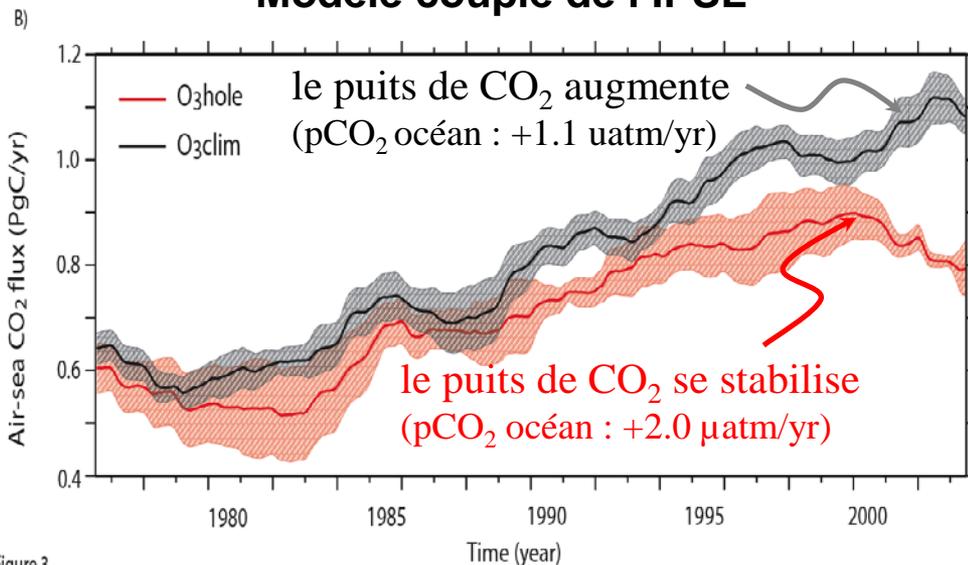
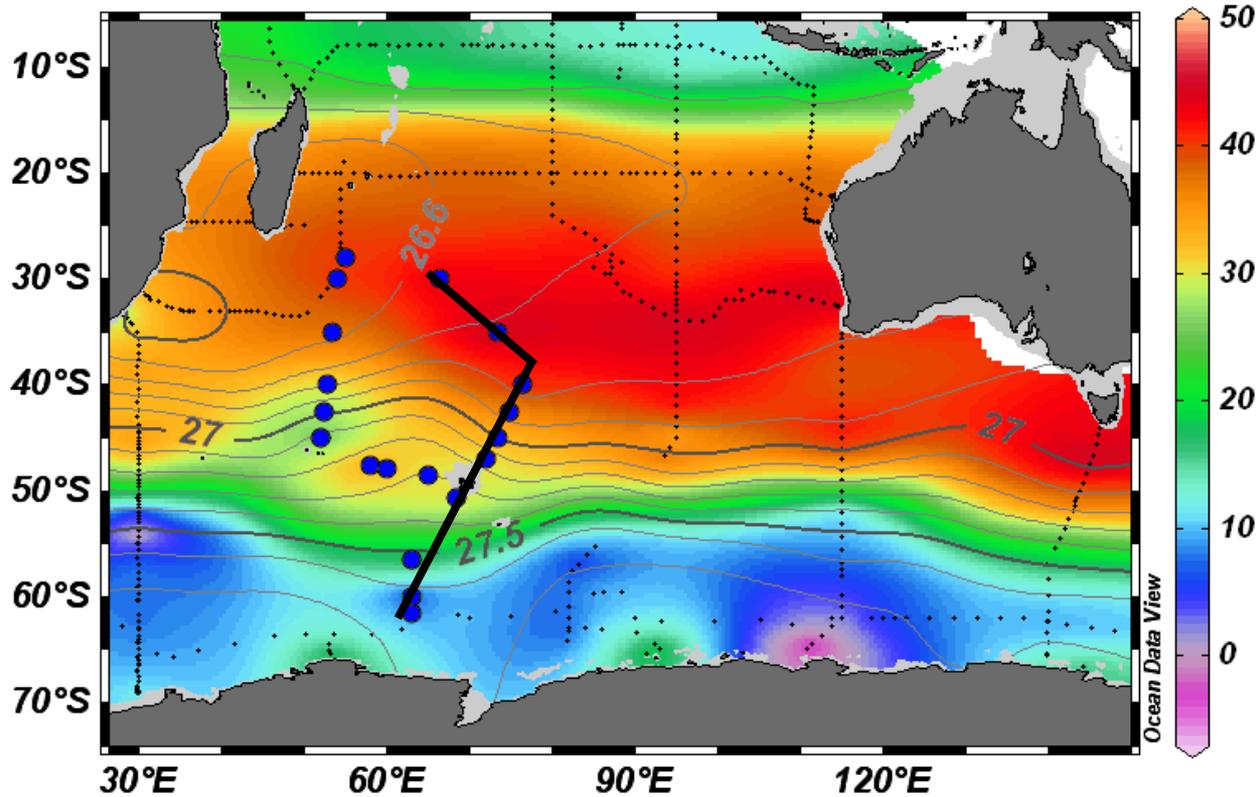


Figure 3

Concentrations de CO<sub>2</sub> anthropique (µmol/kg)  
observations WOCE + OISO (1993-1998)

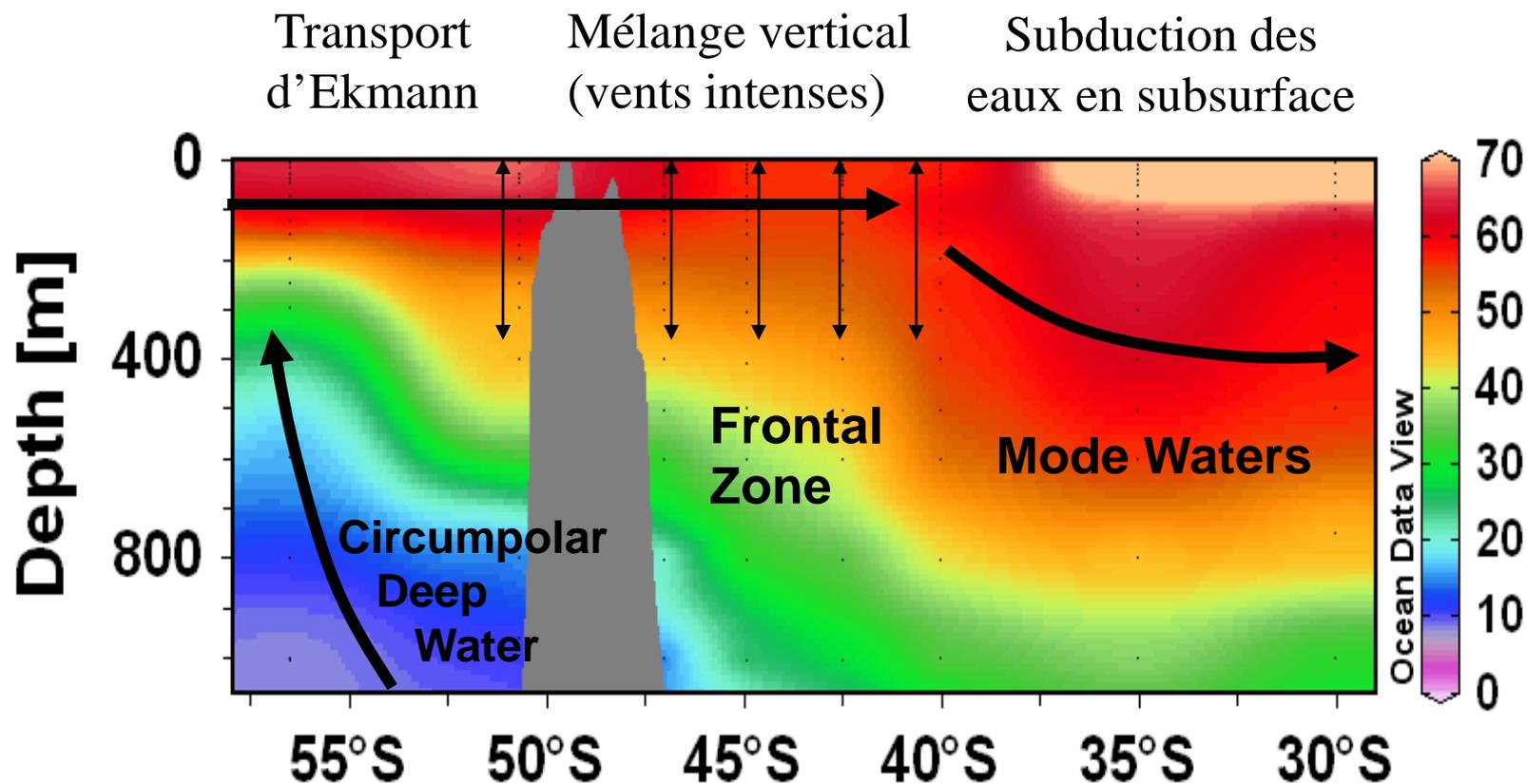
**profondeur = 400m**



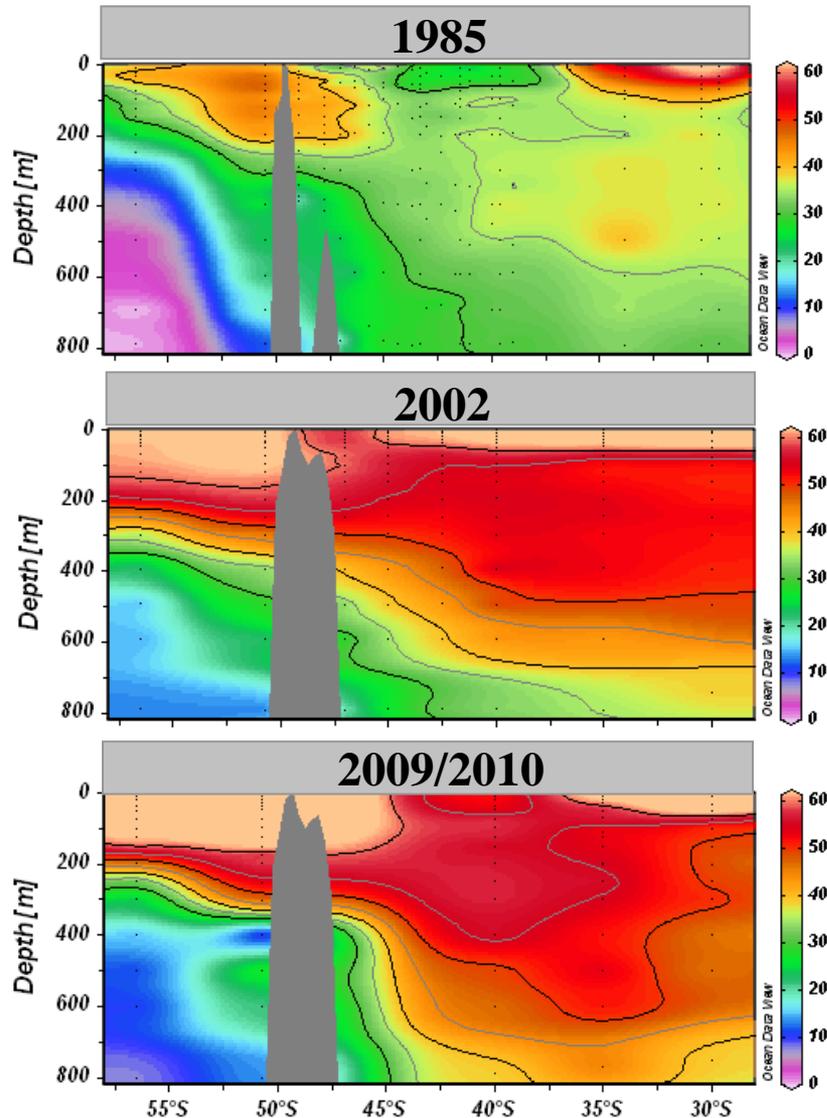
Isolignes = densité potentielle ( $\sigma_0$ )    Couleur = CO<sub>2</sub> anthropique(µmol/kg)

# Accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique

Concentrations de CO<sub>2</sub> anthropique (μmol/kg)  
en 2012 (OISO21)



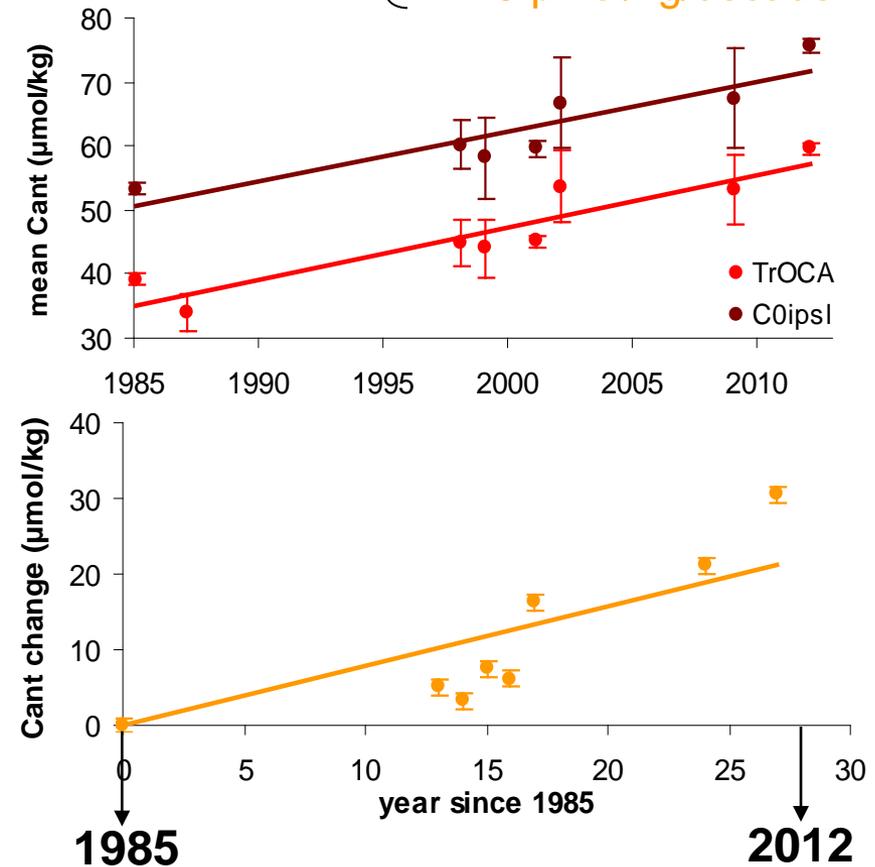
Evolution de l'accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique (μmol/kg)



Calcul de CO<sub>2</sub> anthropique basés sur les mesures océaniques :

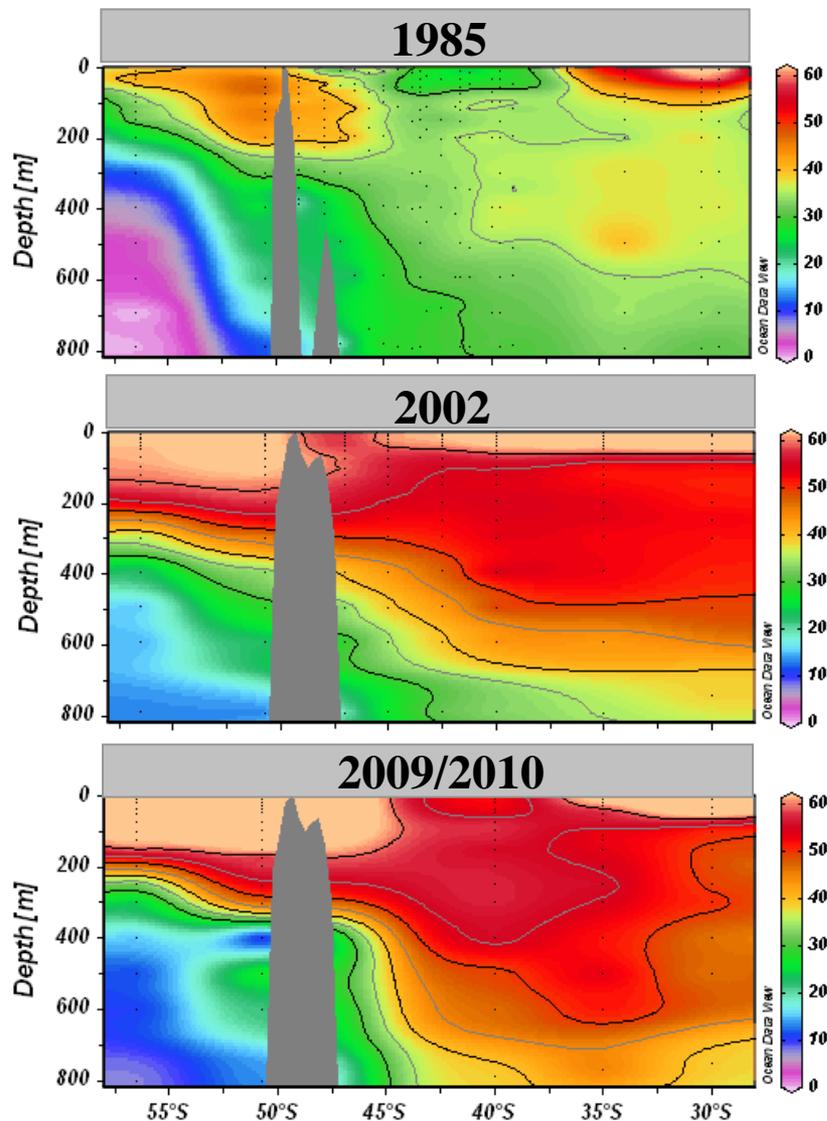
3 méthodes diagnostiques

+8.2 μmol/kg/decade  
+7.7 μmol/kg/decade  
+7.9 μmol/kg/decade



# Accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique

Evolution de l'accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique (μmol/kg)



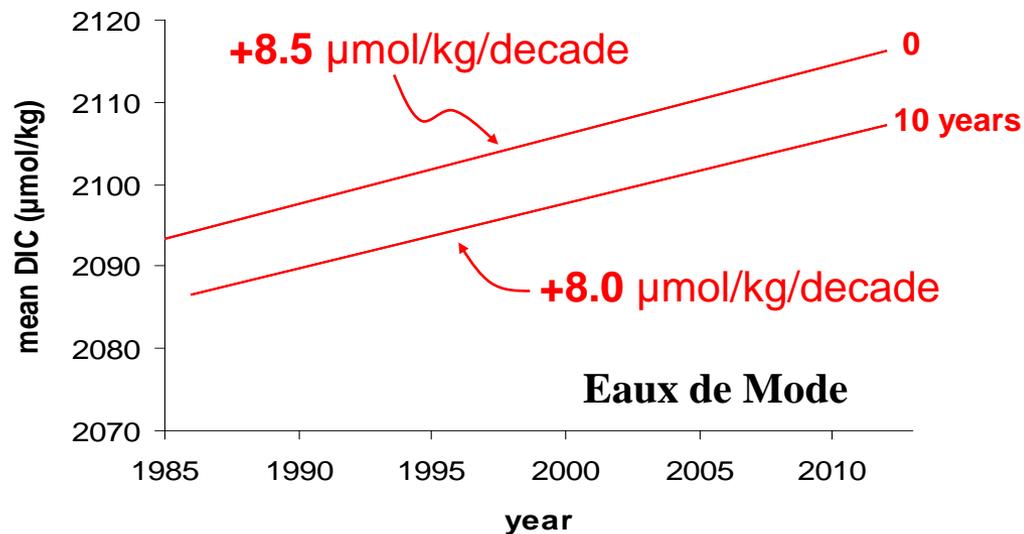
Calcul de CO<sub>2</sub> anthropique basés sur les mesures océaniques :

3 méthodes diagnostiques

- +8.2 μmol/kg/decade
- +7.7 μmol/kg/decade
- +7.9 μmol/kg/decade

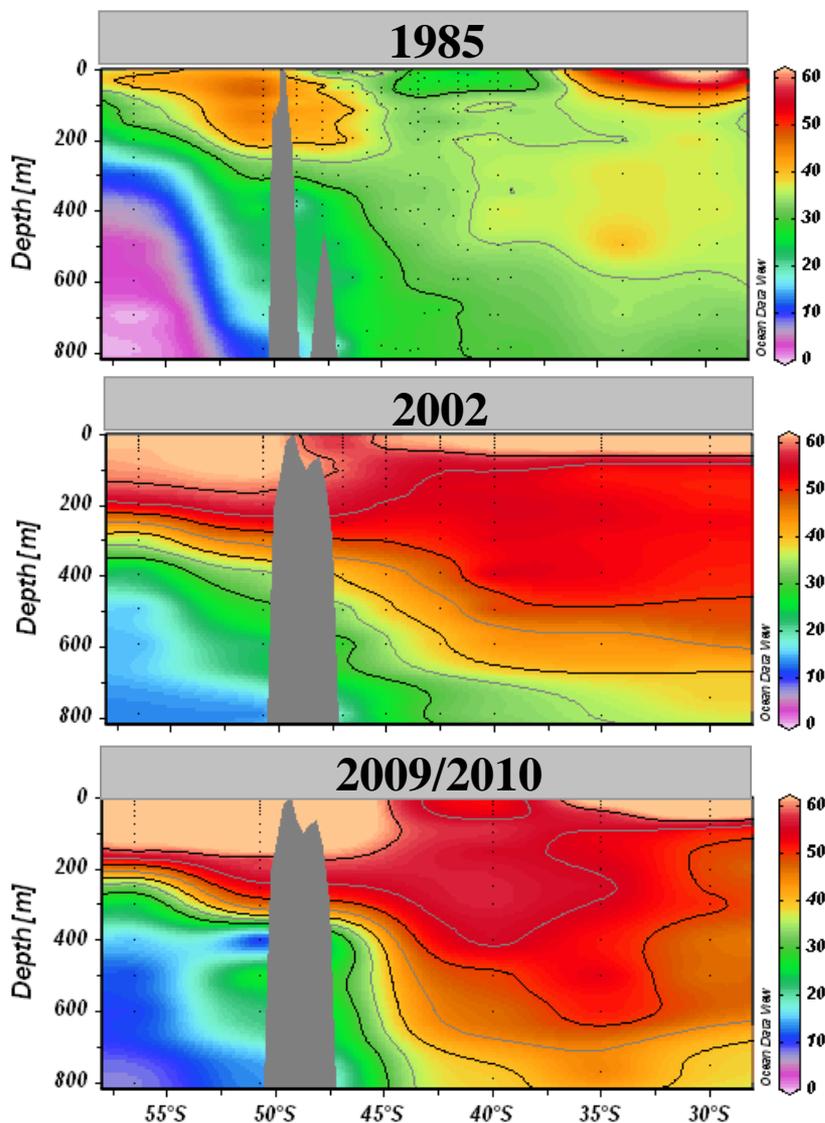
Calcul théorique : **+8.0 à +8.5 μmol/kg/decade**

Augmentation de CO<sub>2</sub> océanique déduite de l'augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique,  
Hypothèse : équilibre océan- atmosphère,  
âge des eaux de mode = 0 à 10 ans



# Accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique

Evolution de l'accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique (μmol/kg)



Augmentation de CO<sub>2</sub> anthropique :  
+8 à +8.5 μmol/kg/decade

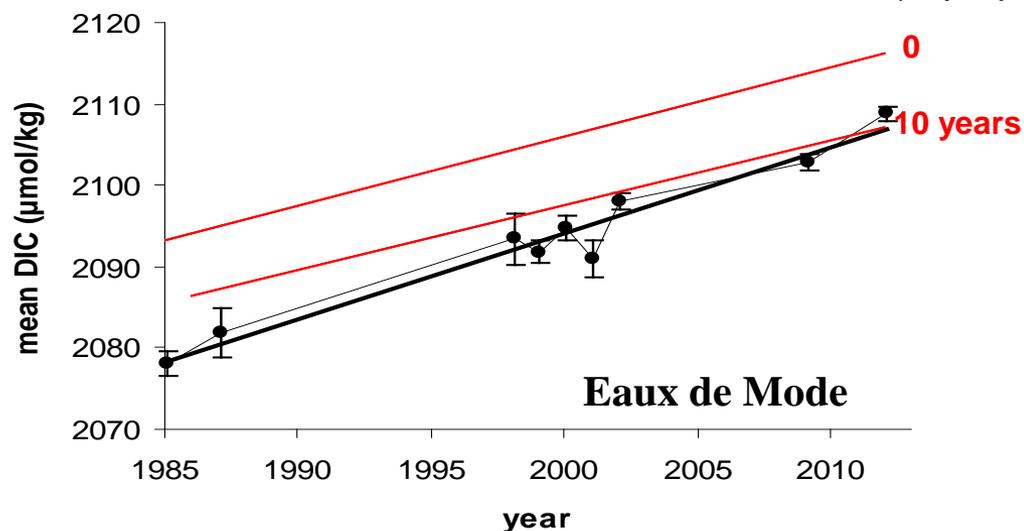
Augmentation du CO<sub>2</sub> total (=naturel+anthropique)  
dans les eaux de mode : +11 μmol/kg/an

→ Déséquilibre de CO<sub>2</sub> (zone de formation)

→ Augmentation de CO<sub>2</sub> plus rapide dans l'océan que  
dans l'atmosphère => augmentation du CO<sub>2</sub> naturel

Probablement lié à l'augmentation des vents dans  
l'Océan Austral (upwelling)

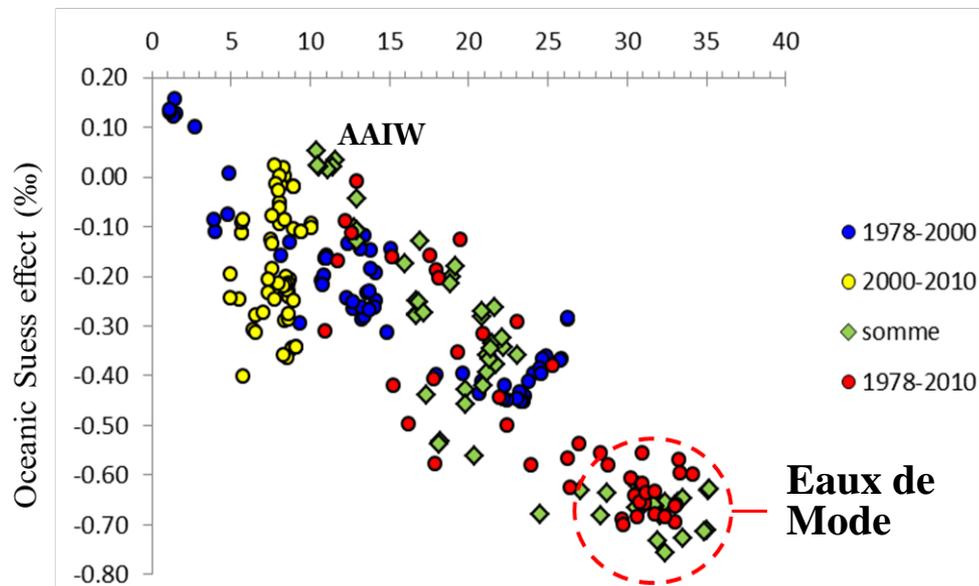
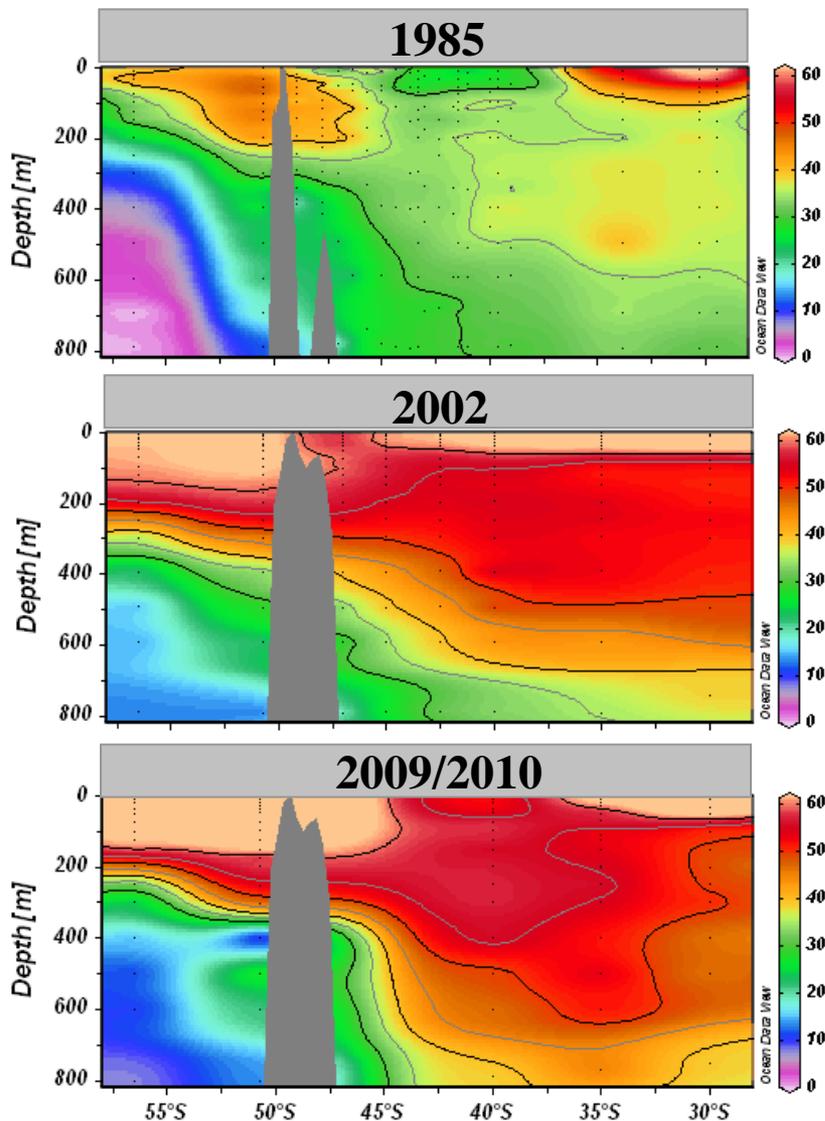
*Lo Monaco et al. (in prep.)*



# Accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique

Evolution de l'accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique (μmol/kg)

Anthropogenic carbon change (μmol/kg)



Les mesures de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  témoignent de l'invasion de CO<sub>2</sub> anthropique dans l'océan

= effet Suess océanique (diminution du  $\delta^{13}\text{C}$ )

→ maximum dans les eaux de mode

→ diminution de  $\delta^{13}\text{C}$  océanique :  $\sim 0.02$  ‰, proche du signal atmosphérique

V. Racapé, thèse, 2010-2013



# Acidification des eaux

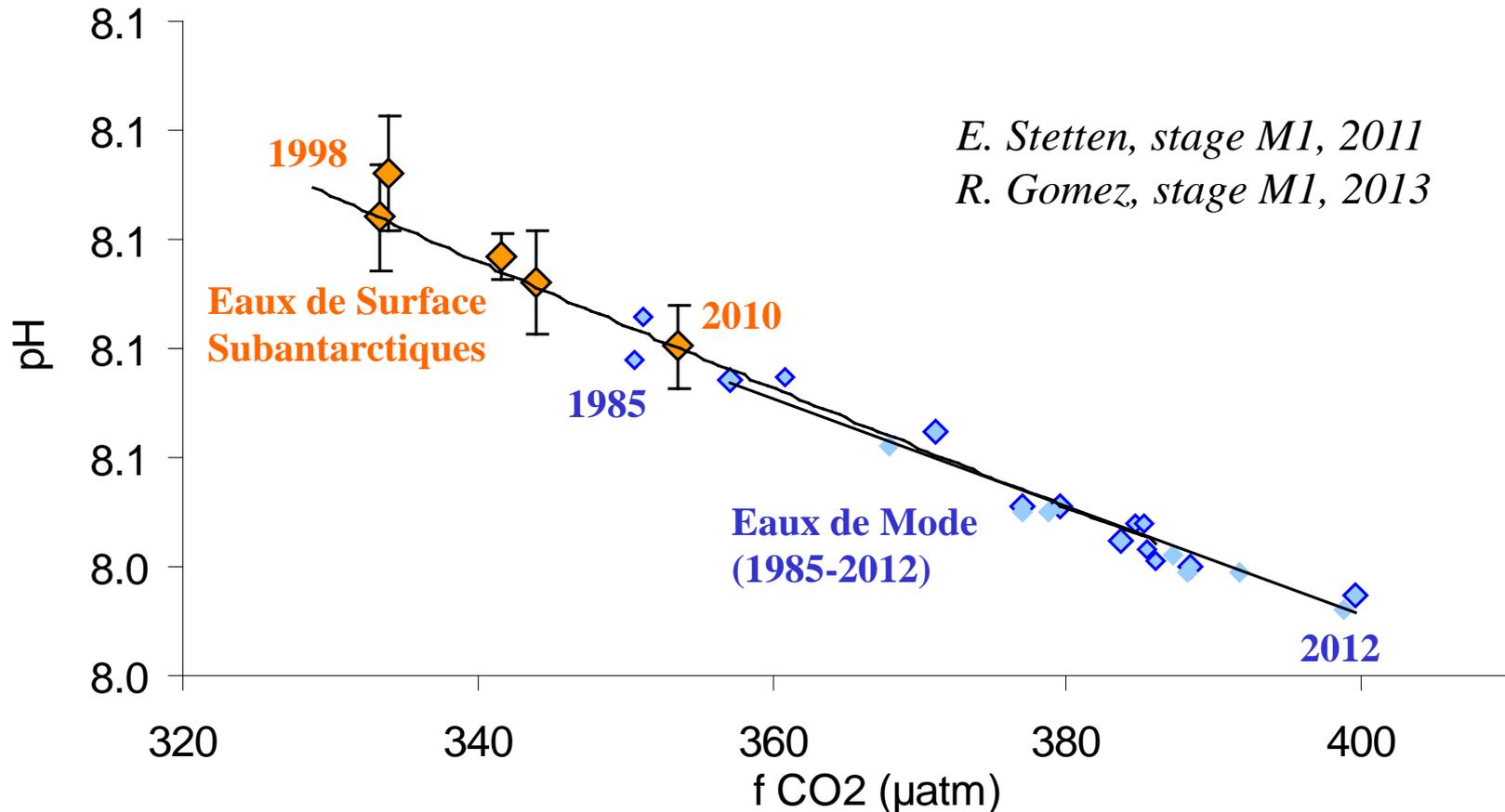


Diminution du pH des eaux en réponse à l'augmentation de CO<sub>2</sub>

Diminution du pH dans les eaux de surface et de sub-surface  
entre 1985 et 2012 : ~0.012/décennie

Tendance similaire en surface et dans les eaux de mode.

Acidification corrélée à l'augmentation de CO<sub>2</sub> océanique





# Conclusion



Intégration dans les bases de données nationales et internationales,  
et participation aux synthèses internationales du CO<sub>2</sub> océanique

Observations répétées en été + quelques campagnes en hiver  
→ meilleure compréhension de la variabilité des flux air-mer de CO<sub>2</sub>

Différentes échelles spatiales et temporelles (saisonnier, interannuel, décennal)

Identification des mécanismes de contrôles du CO<sub>2</sub> océanique

Réduction des incertitudes associées aux prédictions climatiques

Mesures dans la colonne d'eau

→ Évaluation de l'accumulation de CO<sub>2</sub> anthropique dans l'océan,  
sa variabilité spatiale et temporelle (interannuel, décennal)

→ mis en évidence de l'acidification des eaux en réponse à l'augmentation du CO<sub>2</sub>

→ lien avec la variabilité du climat et le changement climatique



# Merci de votre attention



## Références bibliographiques

Blain, S., et al., 2007. Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean, *Nature*, 446, doi: 10.1038/nature05700.

Racapé, V., C. Lo Monaco, N. Metzl and C. Pierre, 2010. Summer and winter distribution of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in surface waters of the South Indian Ocean (20° S-60° S). *Tellus-B*, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00504.x.

Lourantou, A., and N. Metzl, 2011. Decadal evolution of carbon sink within a strong bloom area in the subantarctic zone. *Geo. Res. Letters*, doi:10.1029/2011GL049614.

## En préparation

Lo Monaco C., N. Metzl, A. Lenton, C. Brunet, V. Racapé. Decadal changes in total and anthropogenic CO<sub>2</sub> in the Southern Indian Ocean. ICDC9 Special Issue (2014).

C. Lo Monaco C., N. Metzl, J. Llort, C. Brunet, F. D'Ovidio. Early establishment of the CO<sub>2</sub> sink in the fertilized waters of Kerguelen : results from the KEOPS2/OISO20 cruise. Special Issue KEOPS2 (2014)

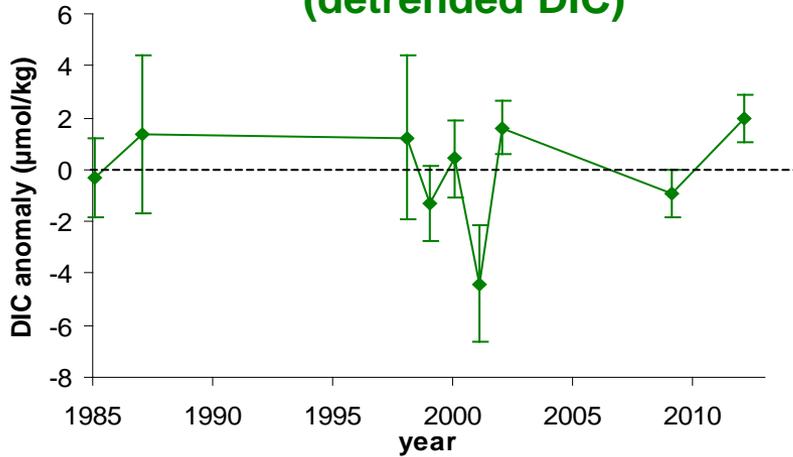
Liste complète des publications sur le Web

<http://caraus.locean-ipsl.upmc.fr>

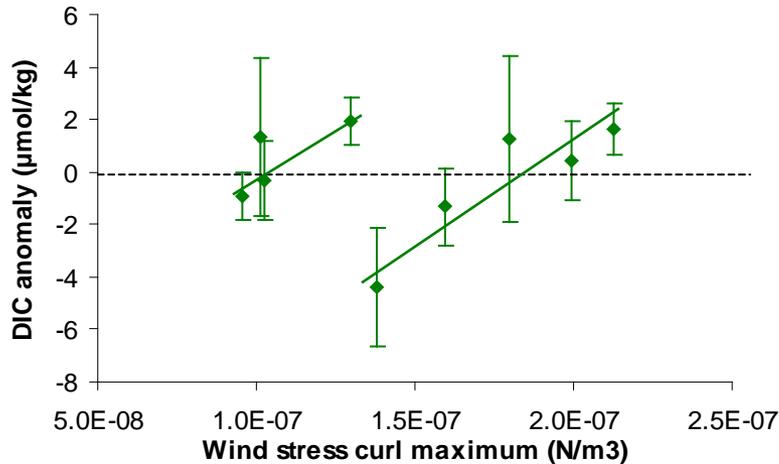
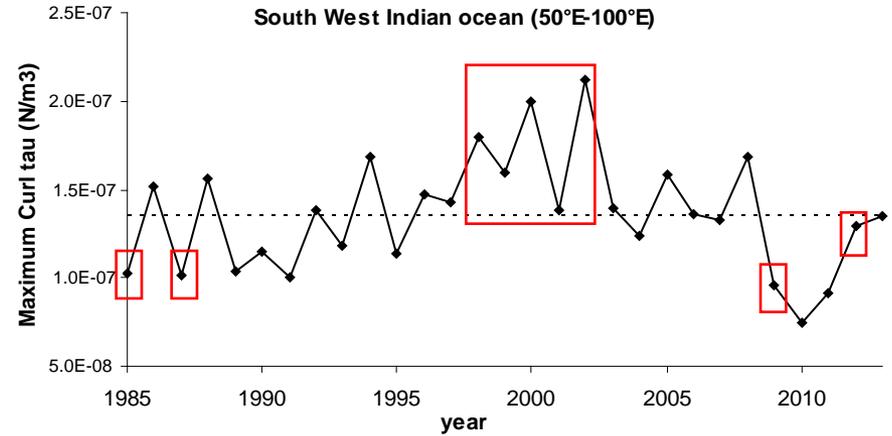
# Interannual variability in Mode Waters

## Link with changes in winds

### Interannual variability in DIC (detrended DIC)



### Magnitude of the maximum wind stress curl in January (NCEP winds)

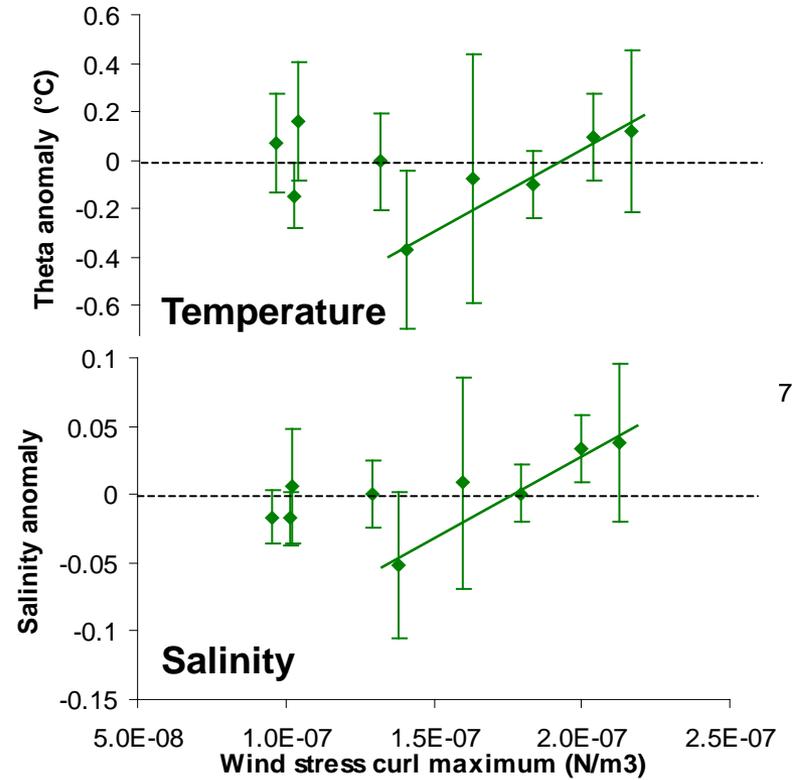
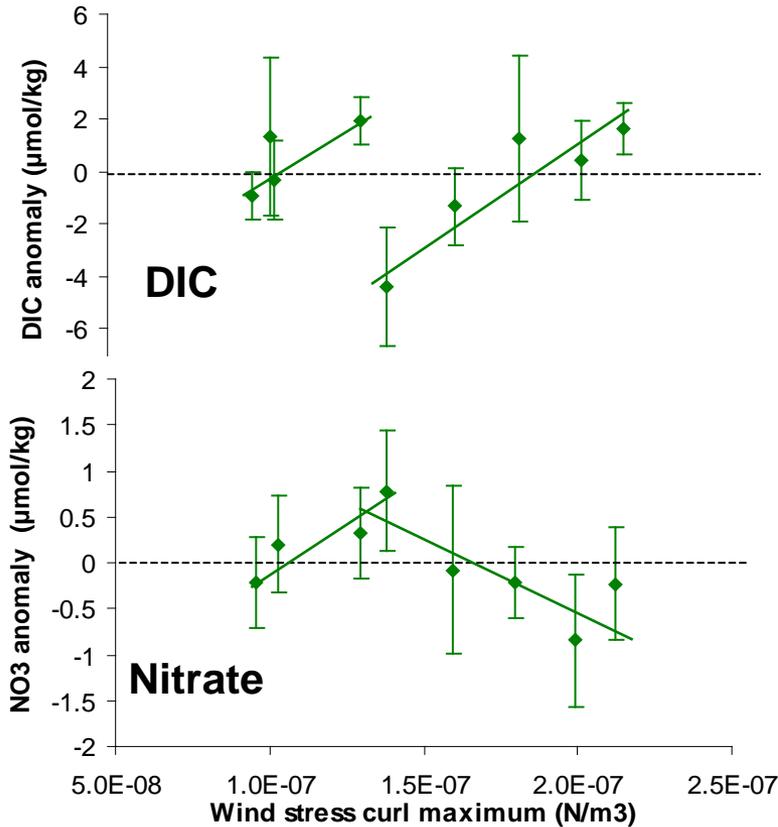


DIC anomalies are related to changes in winds

2 different relationships are found

# Interannual variability in Mode Waters

## Link with changes in winds



**Weak or no subduction** : changes related to **biological activity** (PP decreases with winds)

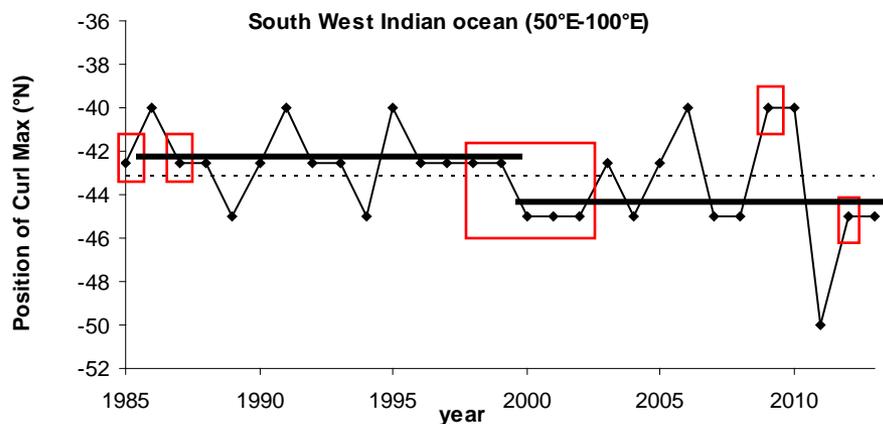
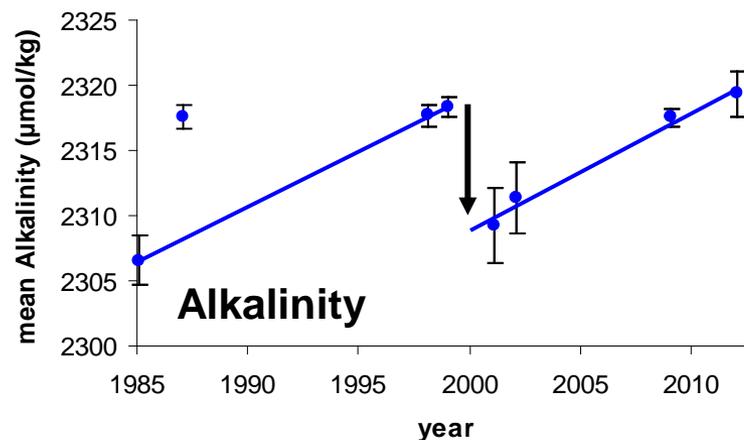
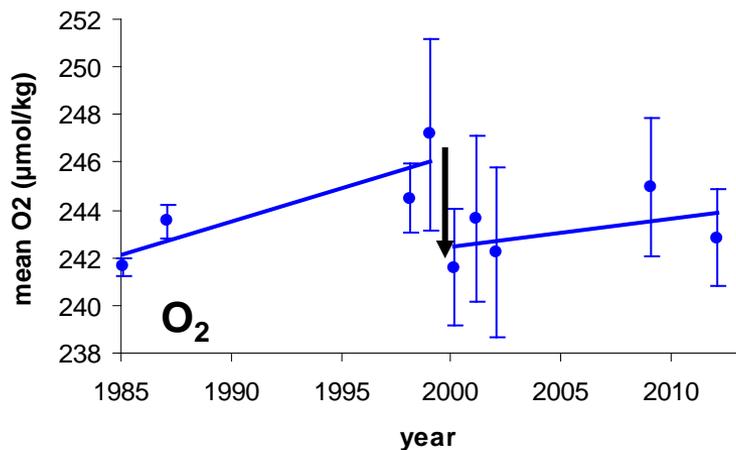
**With stronger subduction** : Temperature and salinity increase  
 Nitrate decrease  
 DIC increase → **invasion of Cant** } contribution of surface waters

# Decadal trends in Mode Waters

DIC increased faster than Cant

→ **increase in natural DIC**

associated with an **increase in Alkalinity and O<sub>2</sub>**  
and a **shift in 2000** towards lower concentrations



The **shift in O<sub>2</sub> and alkalinity** could be related to a **shift southwards of the fronts**

The impact (lower concentrations) is opposed to the decadal trends (increase)

This suggests that movements of the front do not explain the increase in natural DIC

# Decadal trends in mode waters

Evolution of total CO<sub>2</sub> measured in newly formed mode waters

## Theoretical trend in oceanic CO<sub>2</sub> :

Calculated from the increase in **atmospheric CO<sub>2</sub>**,

Using **mean-state ocean** properties

Time lag between ventilation and observation up to 10 years

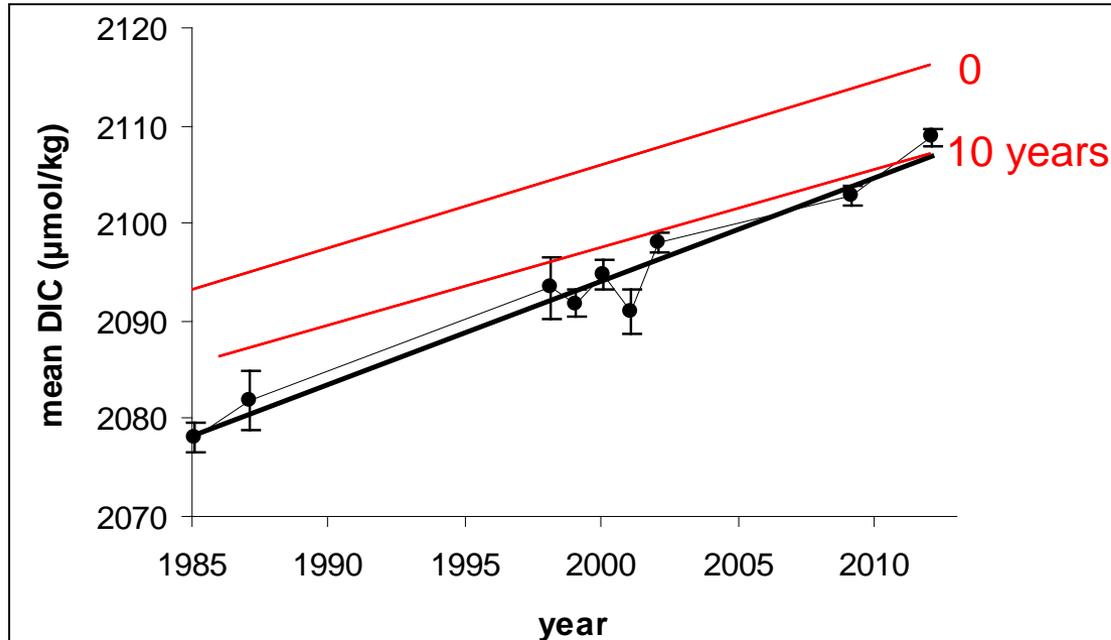
**+8 to +8.5  $\mu\text{mol/kg/decade}$**

Data-based estimates  
of the trend in Cant  
(3 methods)

**+7.7  $\mu\text{mol/kg/decade}$**

**+8.2  $\mu\text{mol/kg/decade}$**

**+7.9  $\mu\text{mol/kg/decade}$**



Measurements of total CO<sub>2</sub>  
(natural + anthropogenic)

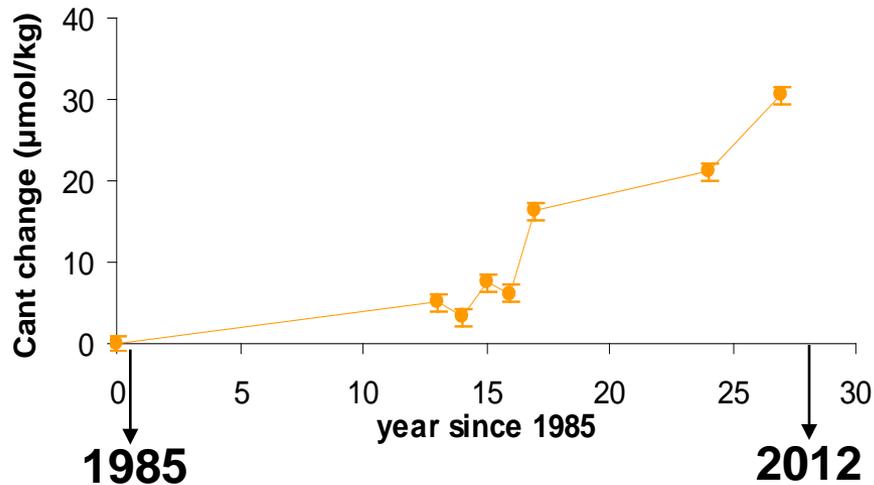
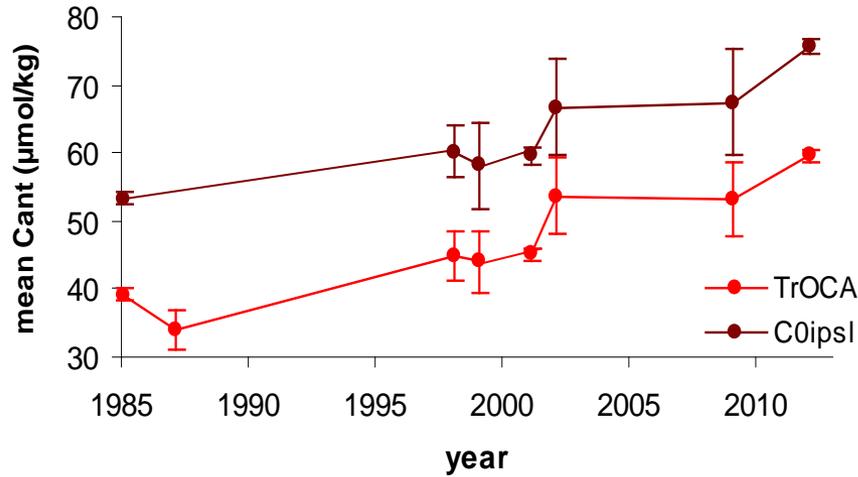
**+11  $\mu\text{mol/kg/decade}$**

The total CO<sub>2</sub> increases faster  
than anthropogenic CO<sub>2</sub>

**→ Increase in natural CO<sub>2</sub>**

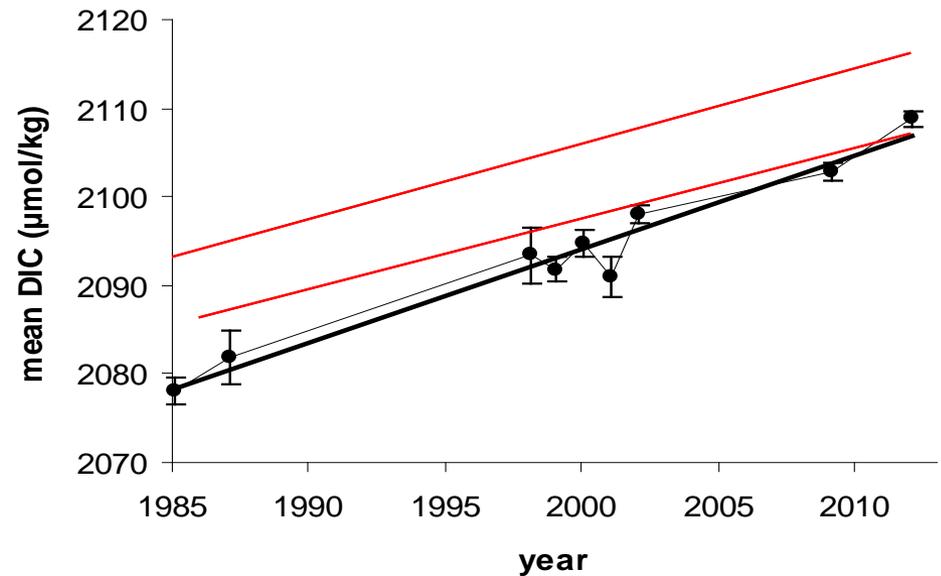
# Decadal trends in mode waters

Evolution of anthropogenic and total CO<sub>2</sub> in newly formed mode waters



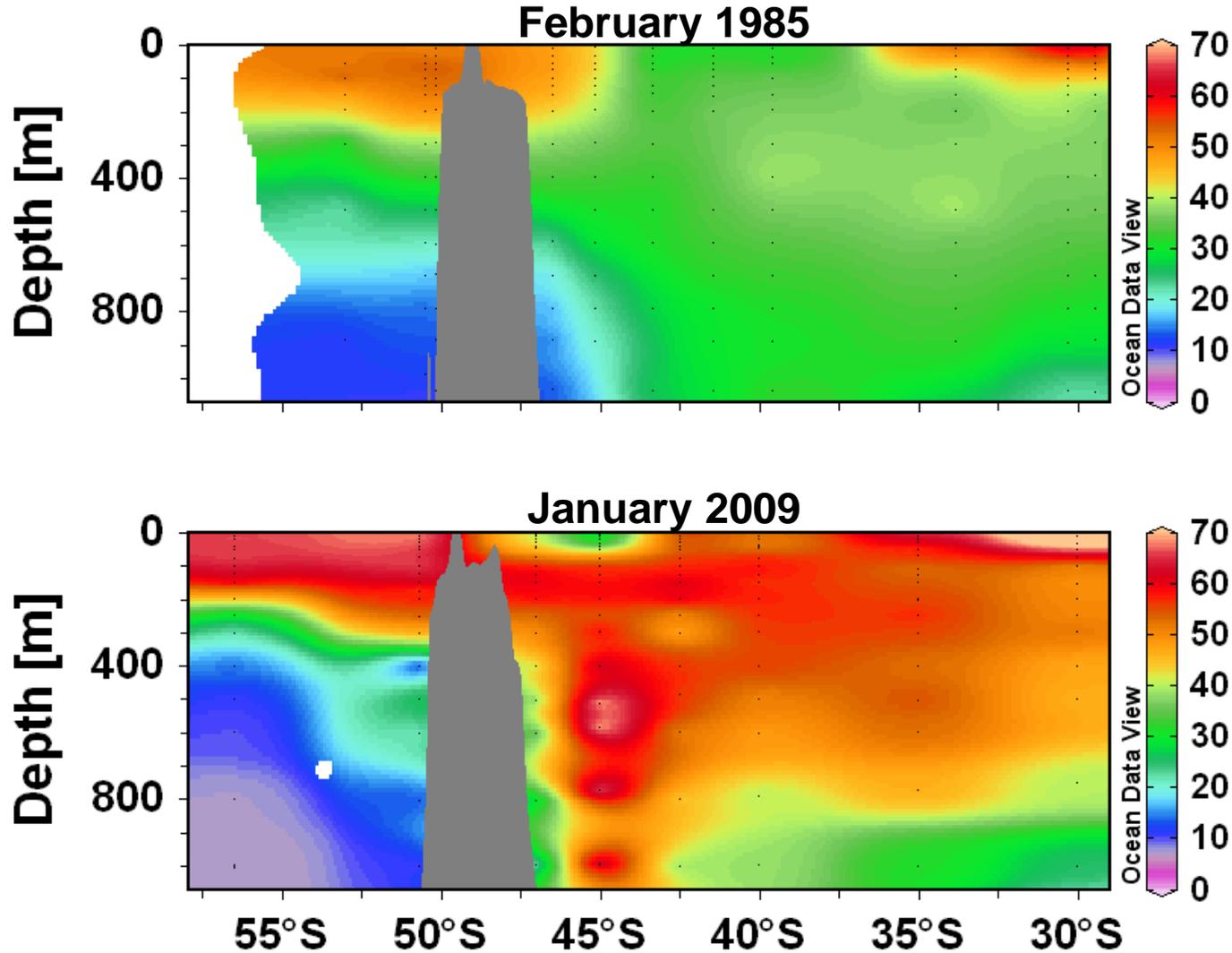
**Trends (µmol/kg/decade)**

1985-2000	2000-1012
<b>+6</b>	<b>+11</b>
<b>+7</b>	<b>+10</b>
<b>+4</b>	<b>+9</b>
<b>+11</b>	<b>+13</b>



# Change in the accumulation of anthropogenic CO<sub>2</sub>

Anthropogenic CO<sub>2</sub> concentrations (μmol/kg)



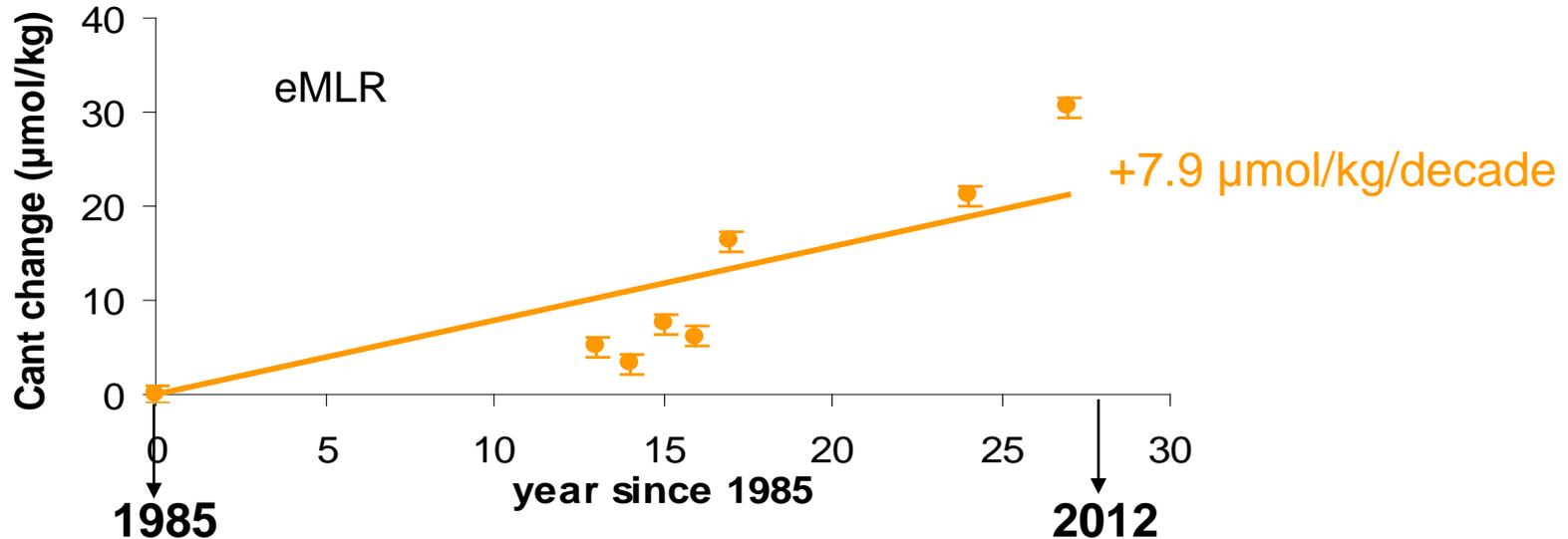
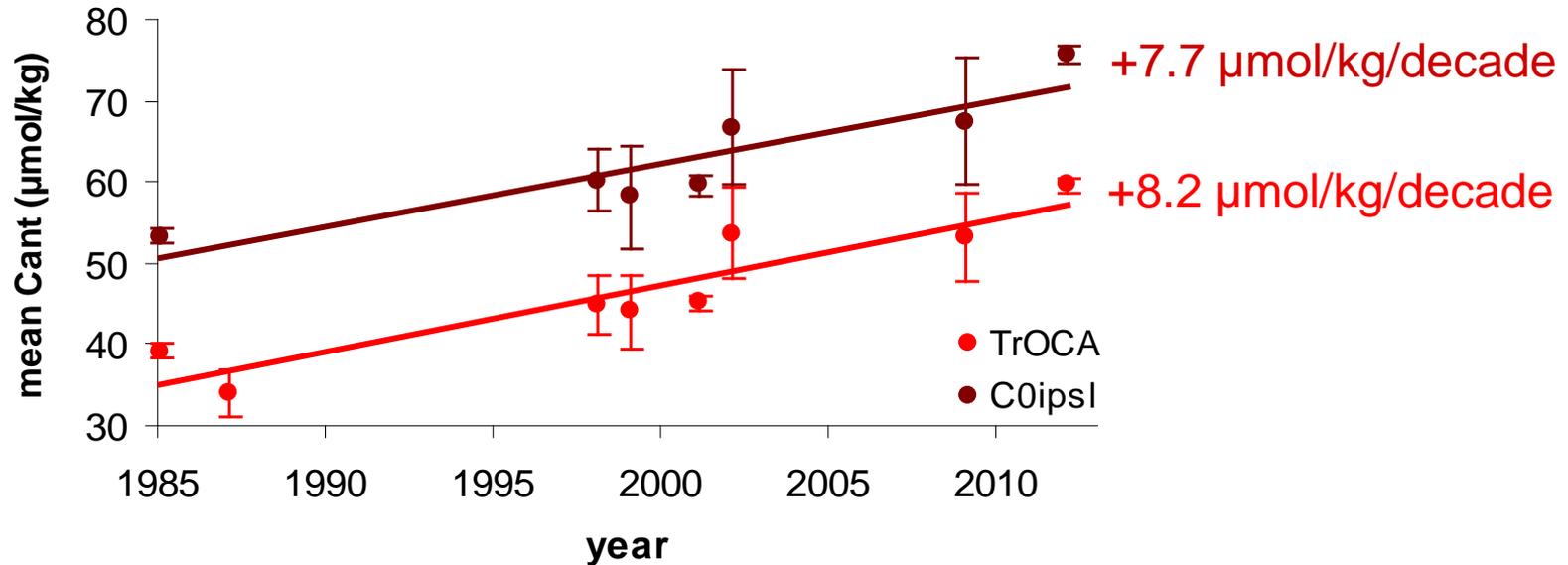
February 1985

**Mode Waters:  
+6 μmol/kg/decade  
over 24 years**

January 2009

# Decadal trends in mode waters

Evolution of anthropogenic CO<sub>2</sub> estimated in newly formed mode waters



# Decadal trends in mode waters

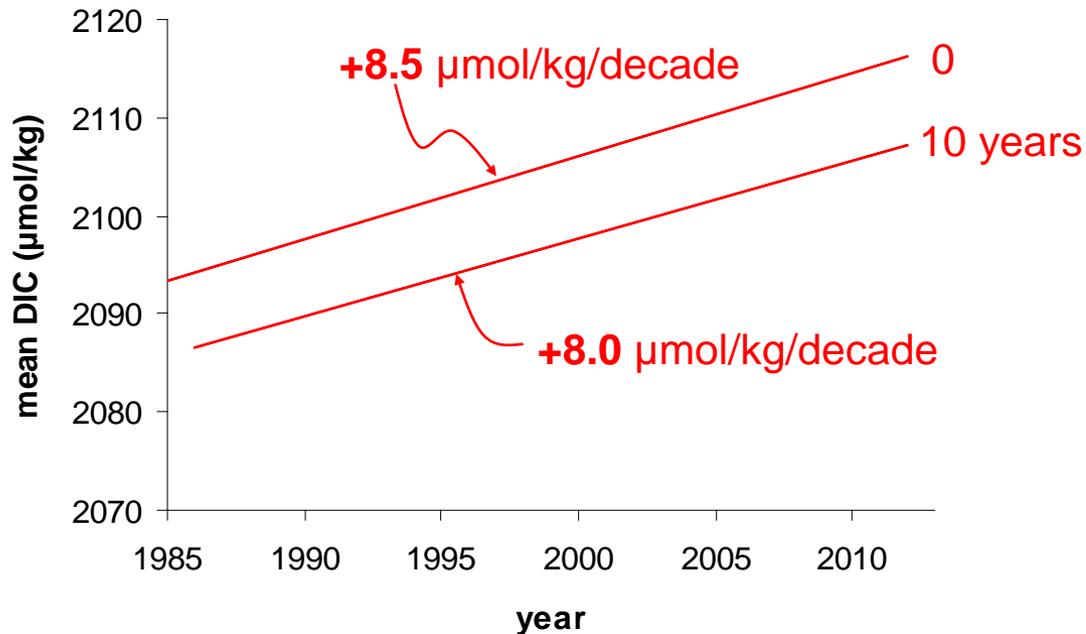
Evolution of anthropogenic CO<sub>2</sub> estimated in newly formed mode waters

## Theoretical trend in oceanic CO<sub>2</sub> :

Calculated from the increase in **atmospheric CO<sub>2</sub>**,

Using **mean-state ocean** properties

Time lag between ventilation and observation up to 10 years



## Data-based estimates of the trend in Cant (3 methods)

**+7.7 µmol/kg/decade**

**+8.2 µmol/kg/decade**

**+7.9 µmol/kg/decade**