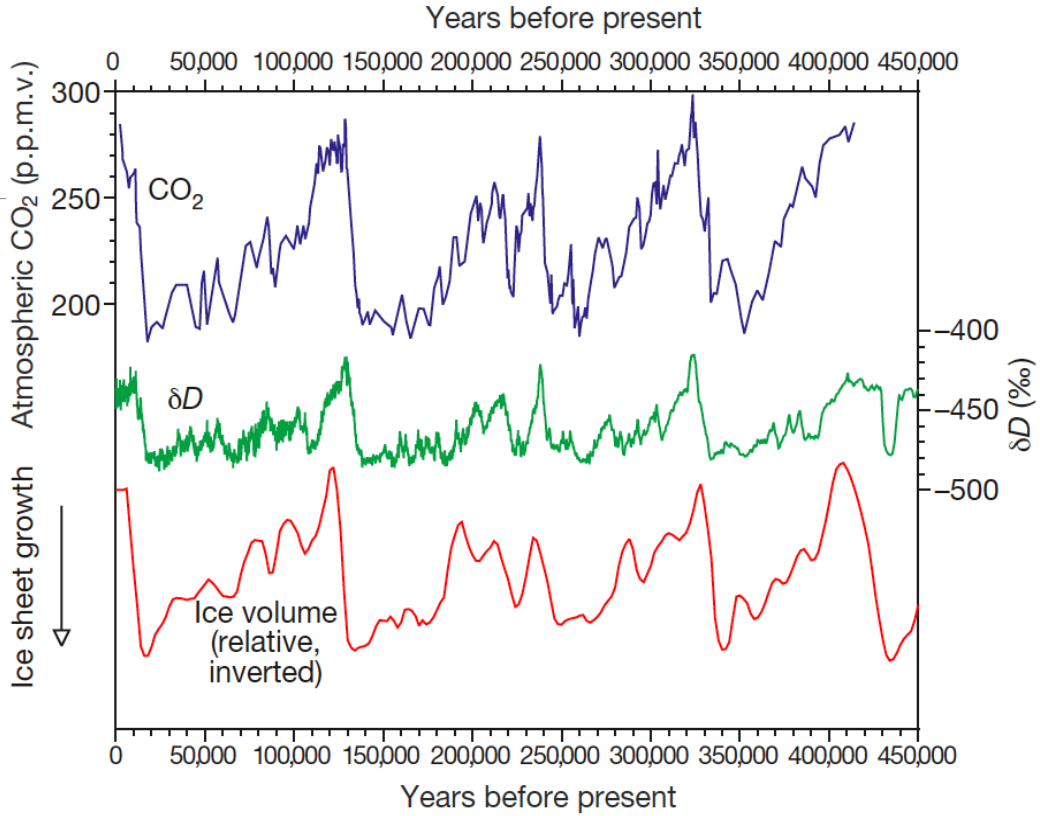
La modélisation en paléocéanographie



Définition : "Paléocéanographie"

> changements océanographiques
physiques et biogéochimiques
à l'échelle des cycles glaciaires-interglaciaires

Problématique :

. **tester des scénarios, des mécanismes**

> Quel contrôle pour pCO2atm ?
> Quel contrôle pour la formation des eaux profondes en Atlantique Nord ?
> Quels cycles de l'azote ou de la silice océanique ?
> ...

. être capable de **comparer les sorties de modèle aux données**.

. replacer ces mécanismes dans leur contexte de changement à grande échelle
(cycles glaciaires-interglaciaires)

> simuler des **états d'équilibre** ?
> simuler des **transitions** ?

Plan

1. Composantes des modèles (paléo-) climatiques
2. Données et reconstructions des conditions paléoclimatiques
3. Modèles biogéochimiques
4. Modèles de circulation

Océanographie/Paléo : Mécanisme Global

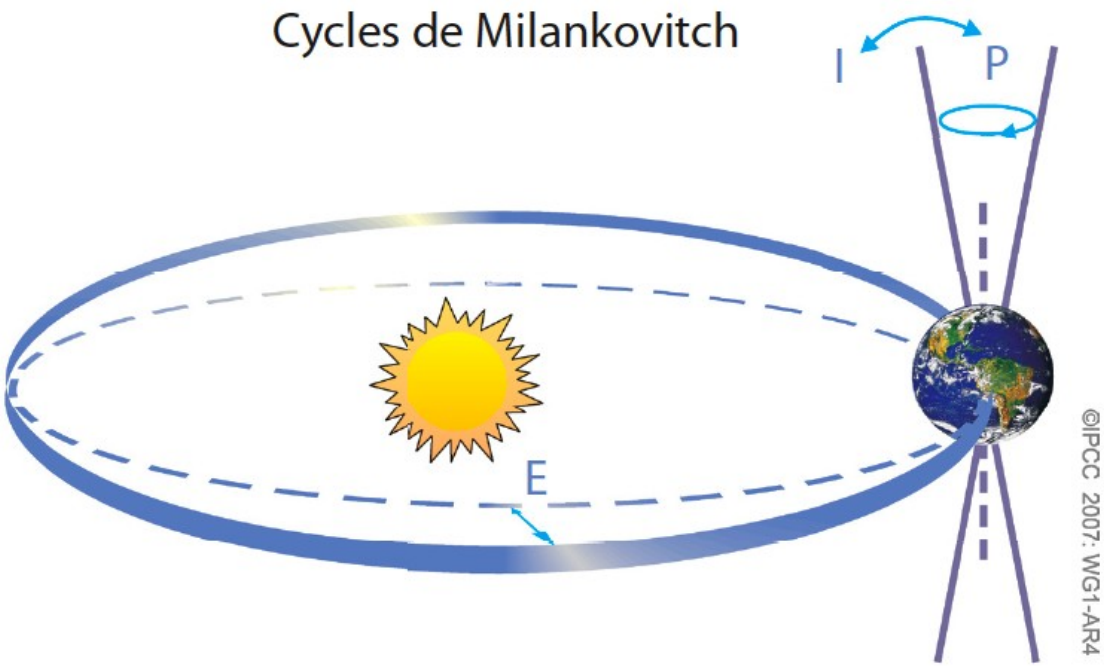
Insolation

Bilan radiatif :
circulation atmosphérique et océanique;

cycle de l'eau (formation des calottes glaciaires);

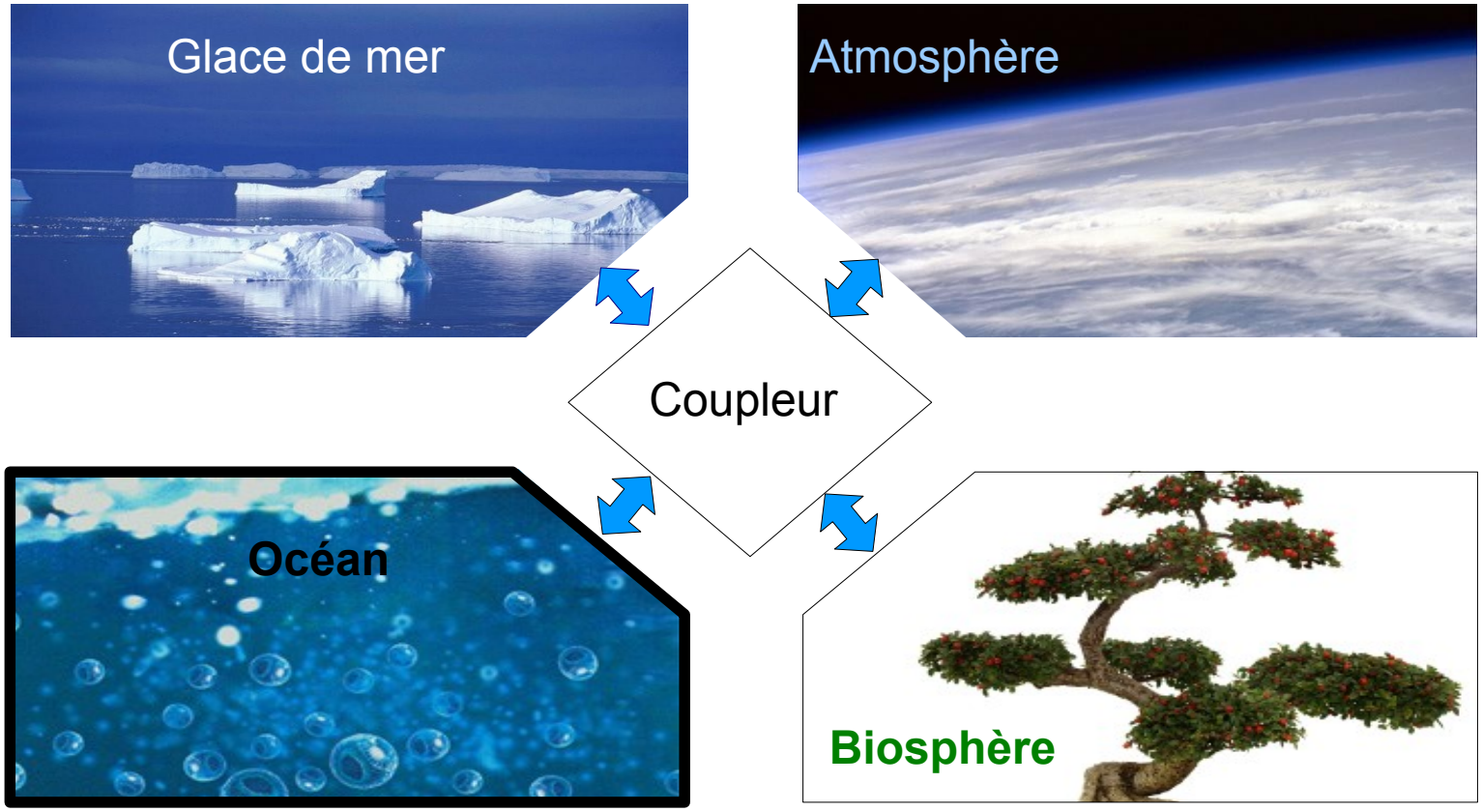
couvert de mer de glace;

cycle du carbone
(dont la biosphère continentale et océanique)



Océanographie/Paléo : Modularité des modèles

NCAR CCSM 3.0 : a coupled Earth System Model

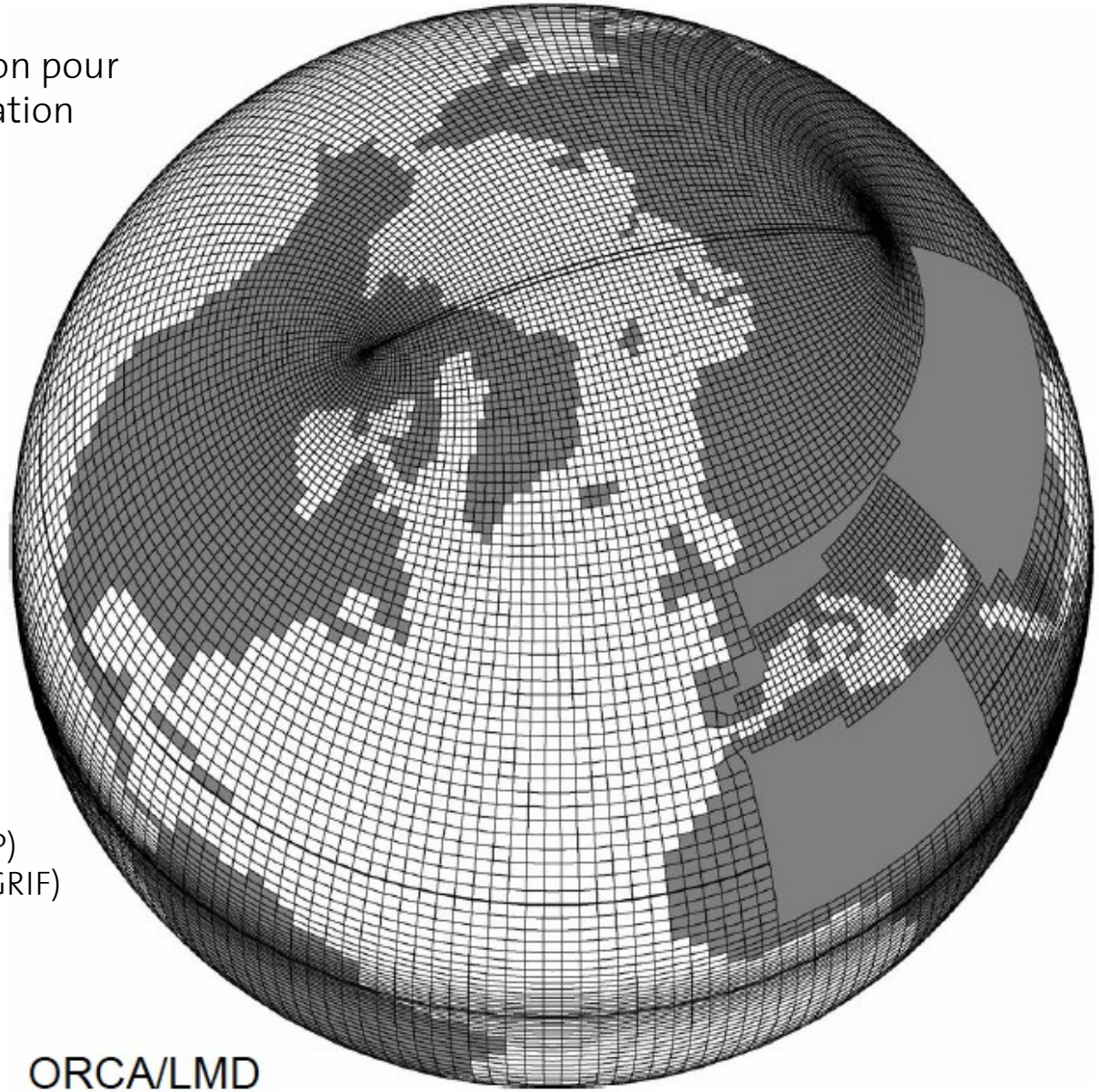


Fortran code, intel Fortran compiler, intel MPI library

5 exécutables, communicants via un "MPI Common World"

Océanographie/Paléo : Mêmes modèles - Conditions différentes.

Exemple de résolution pour un modèle de circulation océanique générale



NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) :

4 major components

* the blue ocean (ocean dynamics, NEMO-OPA)
* the white ocean (sea-ice, NEMO-LIM)
* the green ocean (biogeochemistry, NEMO-TOP)
* the adaptative mesh refinement software (AGRIF)

http://www.nemo-ocean.eu/

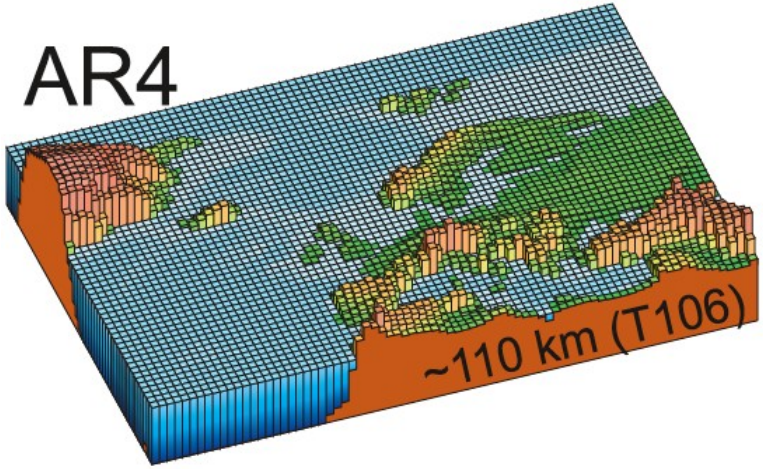
Résolution des Modèles climatiques

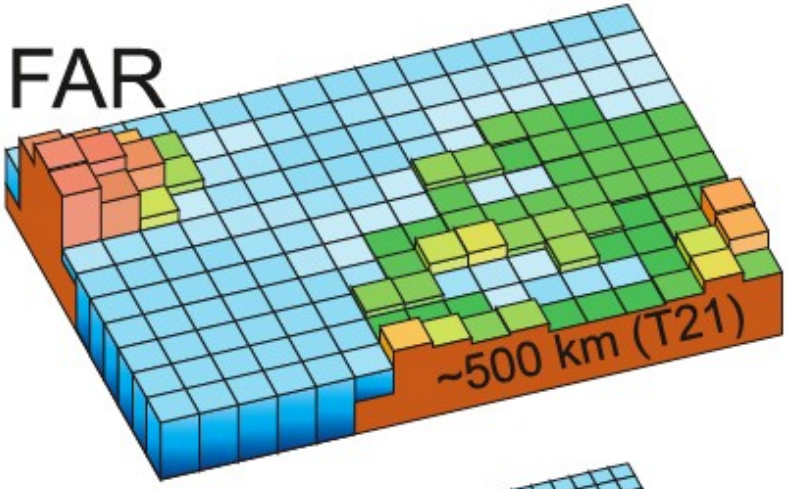
Formulation des modèles

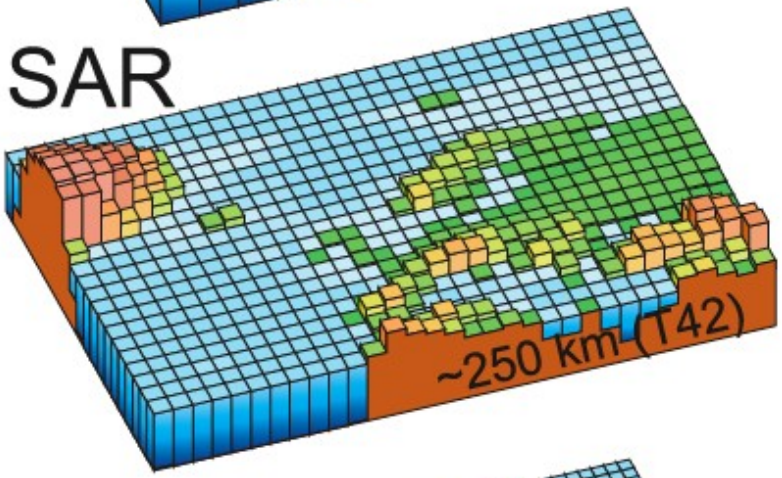
- Les modèles climatiques sont des représentations mathématiques du système climatique, exprimées en codes informatiques et traitées par des ordinateurs puissants.

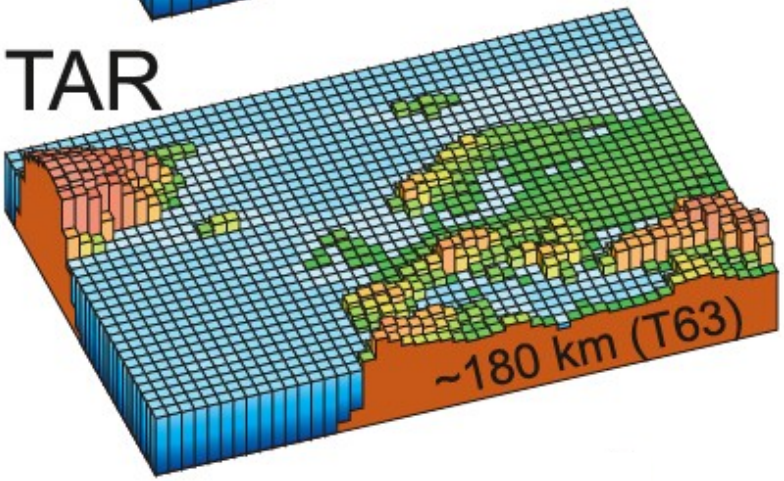
- les modèles fondamentaux sont basés sur des **principes physiques éprouvés**, tels que la conservation de la masse, de l'énergie et de la vitesse, ainsi que sur de **nombreuses d'observations**.

- La formulation des MCGAO s'est développée à travers l'amélioration de la **résolution spatiale** et à travers des améliorations dans les concepts chiffrés et dans le **paramétrage**.

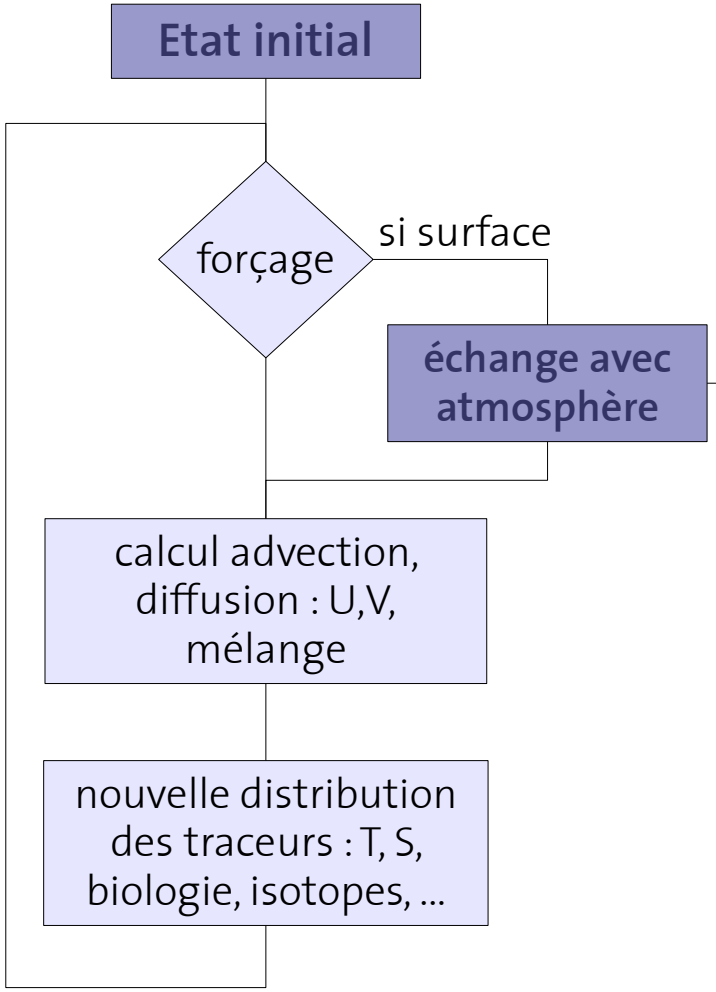








Flow chart et conditions de surface



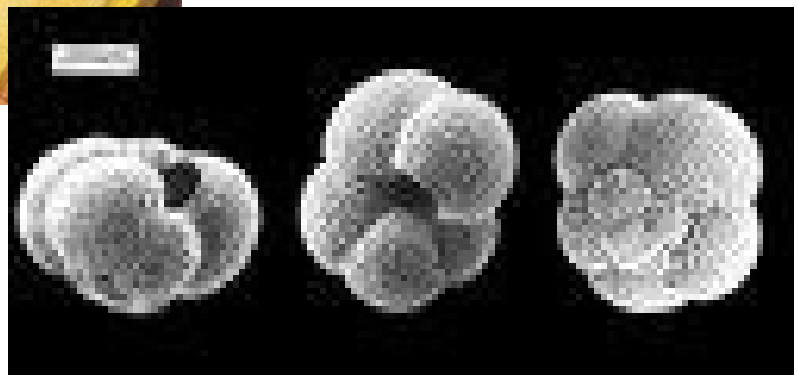
Le **forçage de surface** de l'océan nécessite :

. direction et intensité des champs de vent
. flux net de chaleur
. flux net d'eau douce (Evaporation-Précipitations)
. flux de chaleur sensible
. radiation solaire incidente

Si cela n'est pas fourni par un modèle atmosphérique (ou un Earth Climate Model),

> **Quelles données** pour reconstruire ces paramètres ?

Illustration des carbonates biogéniques



principalement les tests de **foraminifères** planctoniques
(vivants dans les couches de surface de l'océan) ou benthiques
(vivants à l'interface eau-sédiments ou dans les sédiments)

Origine et usage des traceurs

1. Exemple de traceurs servants au **forçage** du modèle :

SST (Sea Surface Temperature)
et SSS (Sea Surface Salinity)

$\delta^{18}O$ du test des foraminifères	volume glaciaire, SST, SSS
Mg/Ca du test des foraminifères	SST
alkénones produit par les coccolithophoridés	SST

Flux de rivières (eau douce, éléments terrigènes)

2. Exemples de traceurs servants à l'**évaluation** du modèle :

Carbone organique dans les sédiments
Silice
Assemblage phytoplanctonique
isotopes : $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$

> **Cycles biogéochimiques** (Carbone, Azote, Phosphore)

> **Modèle biogéochimiques + traceurs paléo**

Exemple : Océan Atlantique au Dernier Maximum Glaciaire

Paul et Schäfer-Neth, 2003, Modeling the water mass of the Atlantic Ocean at the Last Glacial Maximum, *Paleoceanography*, 18 (3), 1058

Construire une "climatologie" mensuelle des conditions de surface de l'Océan Atlantique au Dernier Maximum Glaciaire (LGM)
CLIMAP : 1981
GLAMAP : 2003 (Glacial Atlantic Ocean Mapping)

Table 1. GLAMAP Data Employed for This Study

Region, Season[a]	Organisms[b]	Method[c]	Age,[d] ka BP	Reference
		SST		
Tropical to North Atlantic, February/August	F	MAT	22–18	*Pflaumann et al.* [2003]
South to tropical Atlantic, annual mean/seasonality	F	TF	23–19	*Niebler et al.* [2003]
South Atlantic, February	F R D	TF MAT	23–19	*Gersonde et al.* [2003] *Niebler and Gersonde* [1998] *Abelmann et al.* [1999] *Zielinski et al.* [1998]
		Ice Cover		
North Atlantic, February/August	via SST	22–18	*Pflaumann et al.* [2003]	
South Atlantic, August	D	A	23–19	*Gersonde et al.* [2003][e] *Gersonde and Zielinski* [2000]

[a]August indicates the three months July–September. Likewise, February denotes January–March. "Winter" and "summer" would have been more appropriate but could cause confusion when considering the Southern and Northern Hemispheres. To avoid this, we adhere to the months' names.
[b]Abbreviations are as follows: F, foraminifera; R, radiolaria; D, diatoms; C, coccolithophores; and Dc, dinocysts.
[c]TF: Transfer functions. Abbreviations are as follows: MAT, modern analog technique and A, abundance.
[d]Calendar ages.
[e]"Average sea-ice" curve.

Océan Atlantique au Dernier Maximum glaciaire

Carte des données utilisées

L'**algorithme d'interpolation** doit être capable de :

- prendre en compte les structures fines dans les zones ou la densité de données est élevée,

- compléter les larges zones sans données

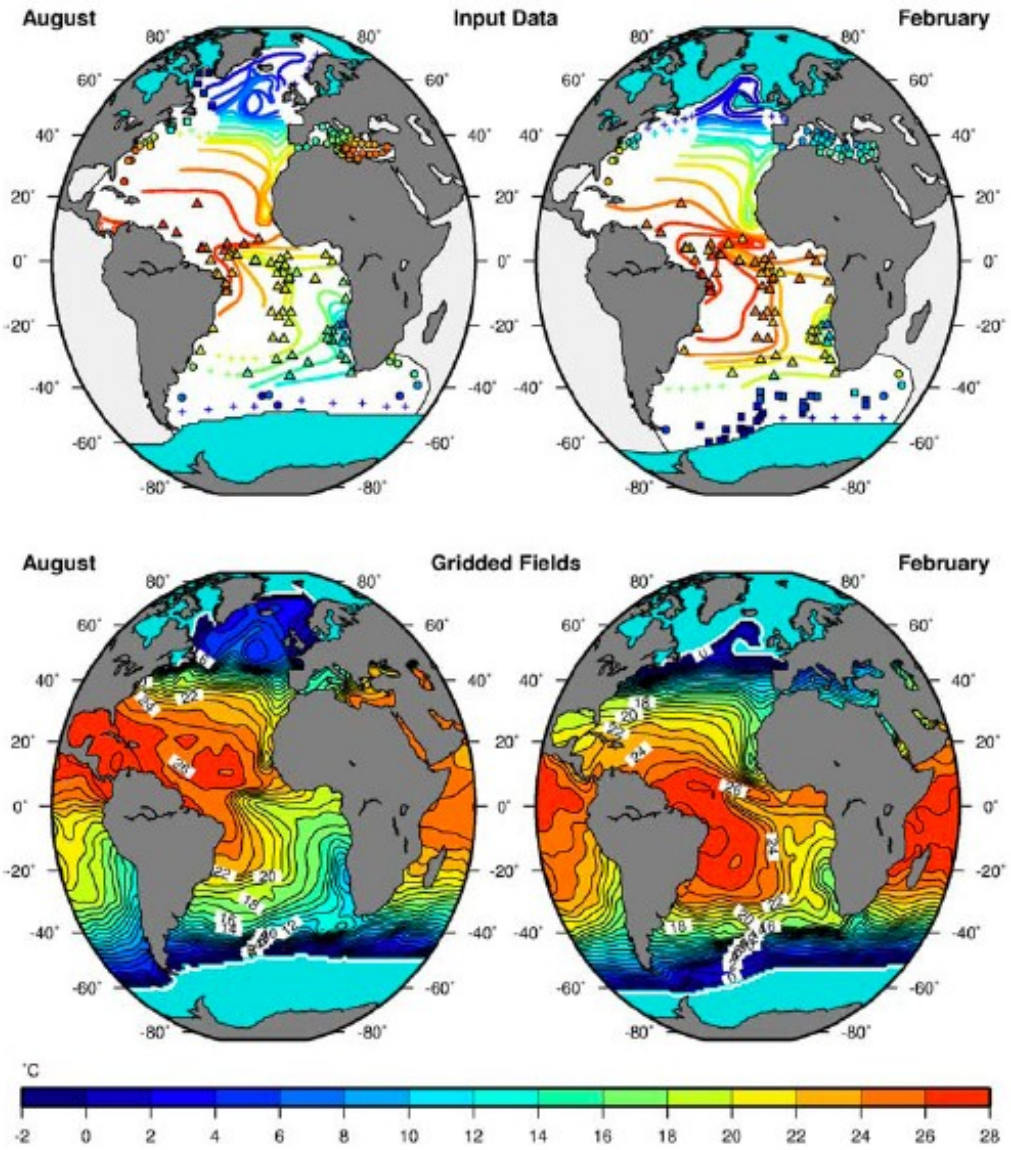


Figure 1. Glacial sea surface temperature (°C). (top) Database. Isolines, *Pflaumann et al.* [2003]. Triangles, *Niebler et al.* [2003]. Squares, *De Vernal et al.* [2000] (August) and *Gersonde et al.* [2003] (February). Circles, *Prell* [1985] (Atlantic) and *Bigg* [1994] (Mediterranean). Blue (medium gray), ice cover after *Pflaumann et al.* [2003], *De Vernal et al.* [2000], and *Gersonde and Zielinski* [2000]. Light gray, SST data taken from *CLIMAP Project Members* [1981]. Pluses, artificial tie points to prevent unrealistic gradients in the interpolated fields. (bottom) Resulting 1° × 1° gridded fields; white lines denote ice edge.

Océan Atlantique au Dernier Maximum glaciaire

SST plus froides de 1.2°C en moyenne

Le **champ de vent** est reconstruit grâce au modèle ECHAM3 (modèle atmosphérique) ...

... qui utilise les SST comme conditions océaniques.

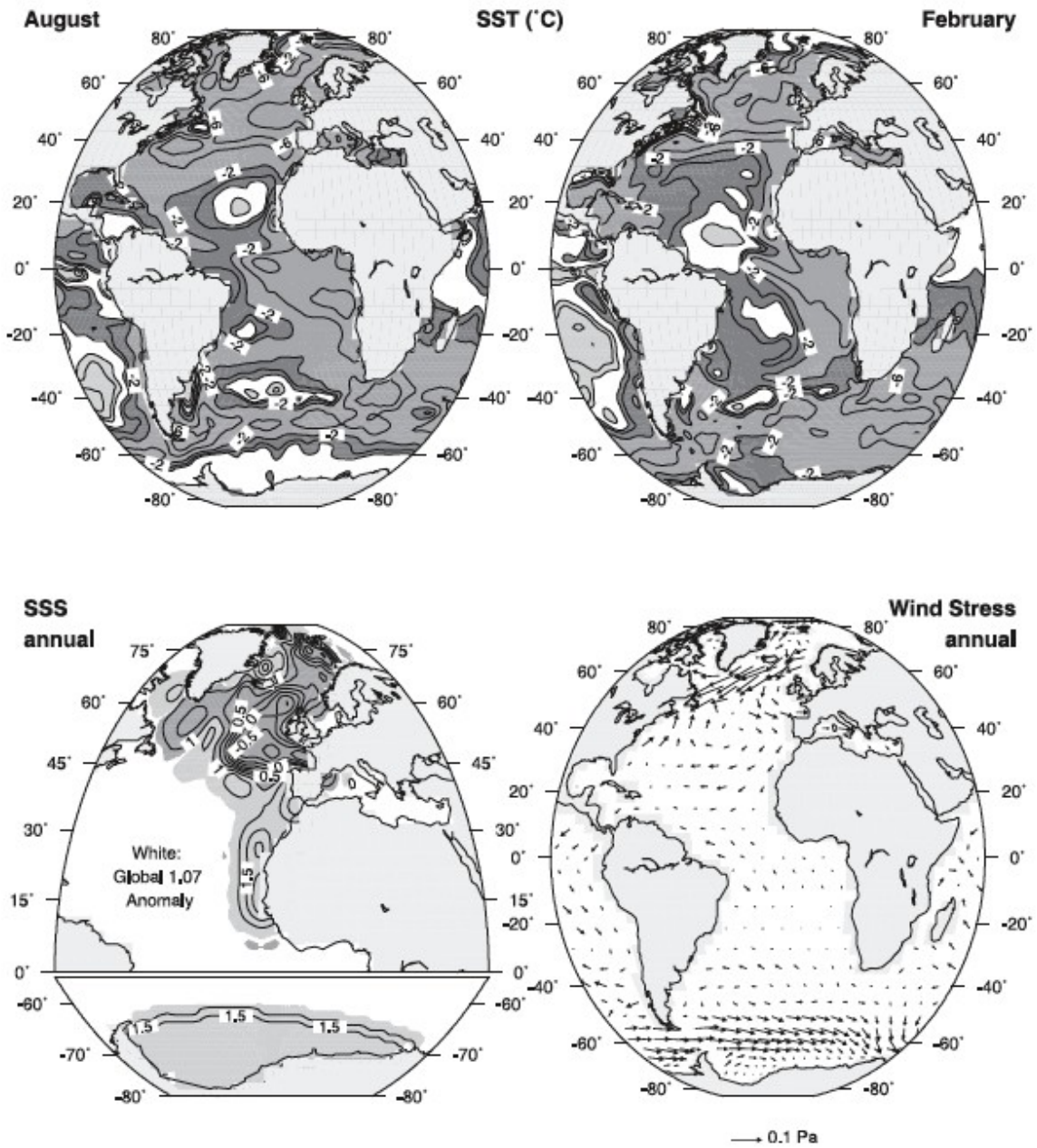


Figure 2. Glacial minus modern anomalies of the model forcing data. Step-like structures along the coasts indicate the model's spatial resolution. (top) SST (contours at ±0.5, ±1, ±2, ±4, ±6, and ±10°C). (bottom) SSS (dark shading, below global anomaly; light shading above, contour interval is 0.25) and wind stress (Pa).

Simulations paléocéanographiques : séparer les effets

Modélisation de la circulation océanique au DMG

> **une série de simulations pour séparer les effets**

exp. M : forçage par les **conditions modernes**

exp. G0 : SST et Vents reconstruits pour le DMG
SSS modernes + offset global de +1.07 psu

> **isole l'effet des SST sur la circulation**

exp. G1 : G0 + SSS glaciaire

> G0 et G1 isolent l'**effet de la salinité en Atlantique Nord**

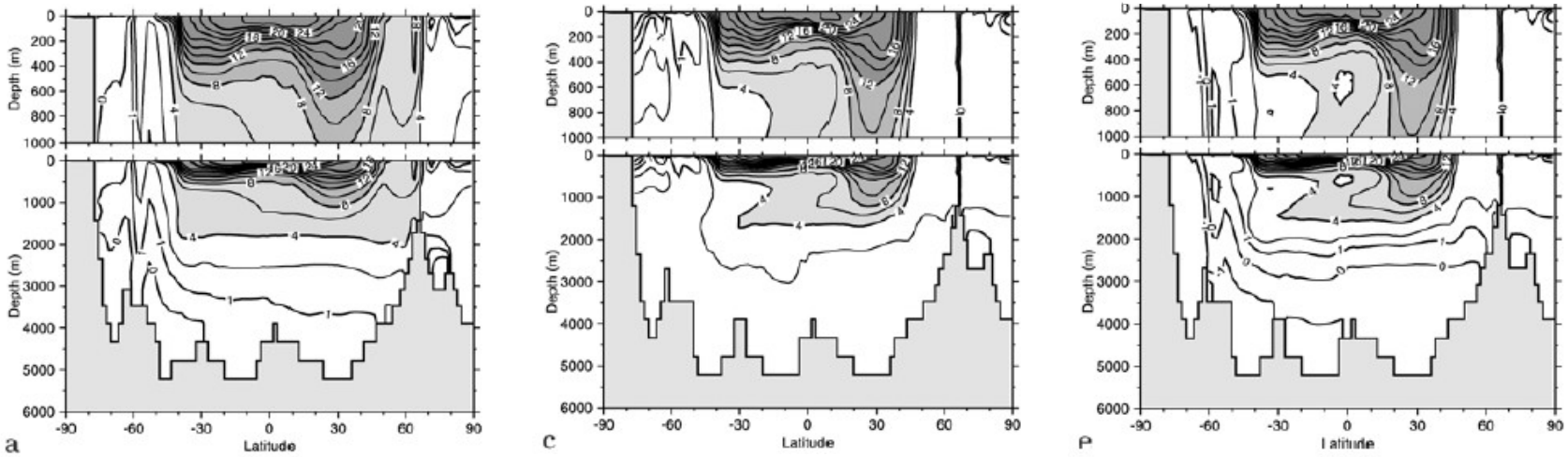
exp. G2 : G1 + la salinité en mer de Weddell augmentée de +0.55 psu
exp. G3 : G1 + la salinité en mer de Weddell augmentée de +1.00 psu
(formation de glace de mer accrue en hiver)

> isolent l'**effet de la salinité en Mer de Weddell**

Simulations paléocéanographiques : séparer les effets

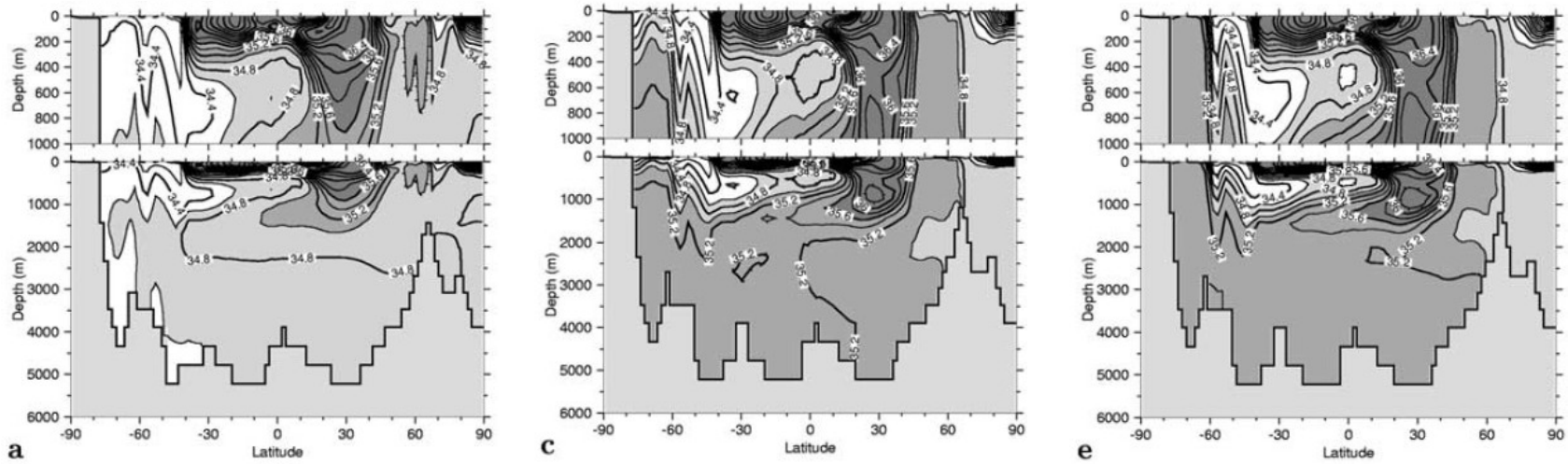
Température (Western Atlantic Ocean)

Experiment M **Experiment G1** **Experiment G3**



Salinité (Western Atlantic Ocean)

Experiment M **Experiment G1** **Experiment G3**



Modèles biogéochimiques océaniques

. Modèles NPZD

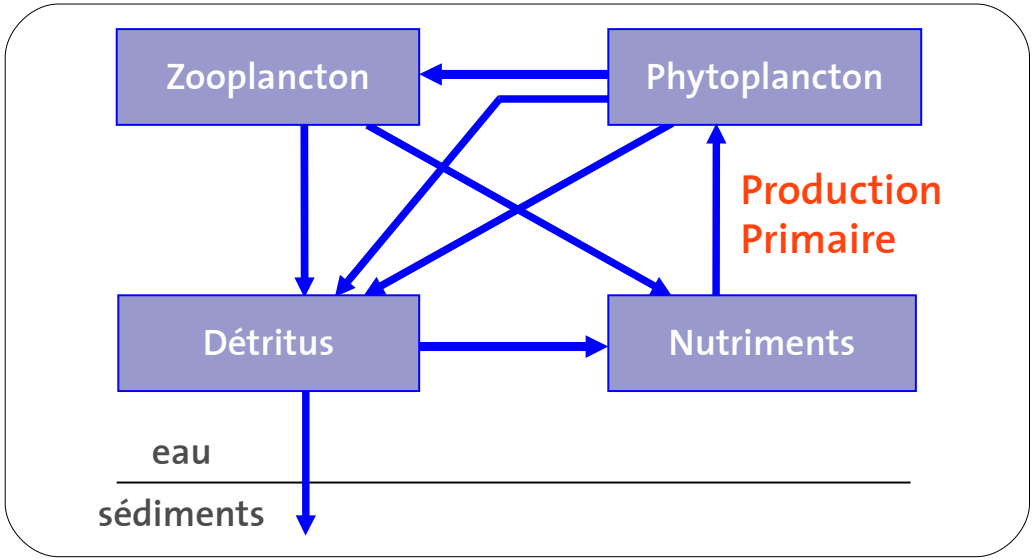
. Modèles PFT (Plant Functional Types)

Comparaison modèle donnée :

- chaque composante
  A-t-on les données pour cela ?

- les flux entre composantes :
  . **Production primaire**
  . le taux de reminéralisation
  ...

- quelques valeurs dérivées :
  . Chlorophylle
  ...



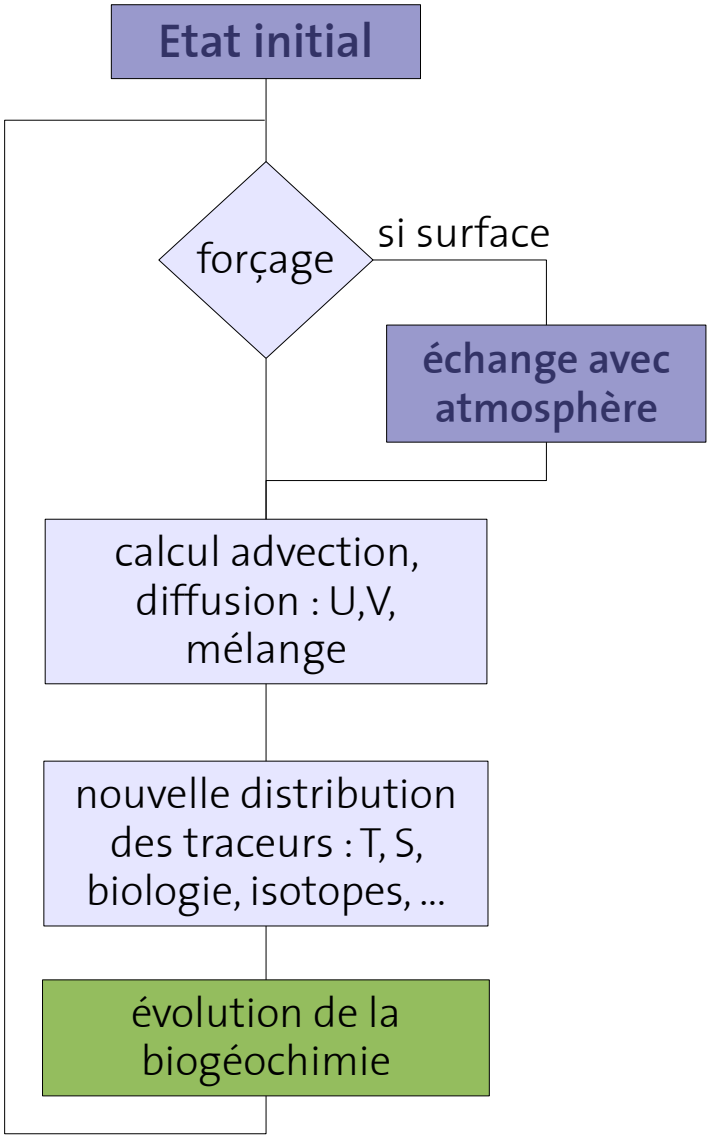
NO_3	NH_4	PO_4	SiO_3	Fe	O_2
spC	spChl	$spCaCO_3$	spFe		
diatC	diatChl	diatSi	diatFe		
diazC	diazChl		diazFe		
zooC					
DOC	DON	DOP	DOFe		
	DIC	Alk			
POC_{s+h}	$PSiO_2$	$PCaCO_3$	PFe		

adapté du modèle de Moore *et al.* (2002)

^{13}C

variables: 24 + 7

Modèles biogéochimiques océaniques



Exemple de code Fortran simplifié (CCSM3.0) :

`passive_tracer.F`

```
      if (ecosys_on) then
         call  ecosys_set_interior(k,
     &         TRACER(:,:,k,
     &         ecosys_ind_begin:ecosys_ind_end,curtime) )
      end if
```

`ecosys_mod.F`

```
      integer(kind=int_kind), parameter ::
     &  po4_ind     =  1,  ! dissolved inorganic phosphate
     &  no3_ind     =  2,  ! dissolved inorganic nitrate
     &  sio3_ind    =  3,  ! dissolved inorganic silicate

     ...

      DTRACER_MODULE(:,:,no3_ind) = RESTORE + NITRIF
     &  - NO3_V_diat - NO3_V_sp - DENITRIF
```

Modèles biogéochimiques : ajout de paléo-proxy

Exemple d'ajout du ^{13}C :

fractionnement

. lors de l'échange gazeux océan-atmosphère
. lors de la photosynthèse

Principe : Suivre chacun des isotopes, dans chaque réservoir.

$$d[CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma(P^s - P^a)$$

$$d[^{13}CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma\,\alpha_k\,\alpha_{aq-g}\left(\frac{P^s R_{DIC}}{\alpha_{DIC-g}} - P^a R_g^a\right)$$

Zhang *et al.* (1995)

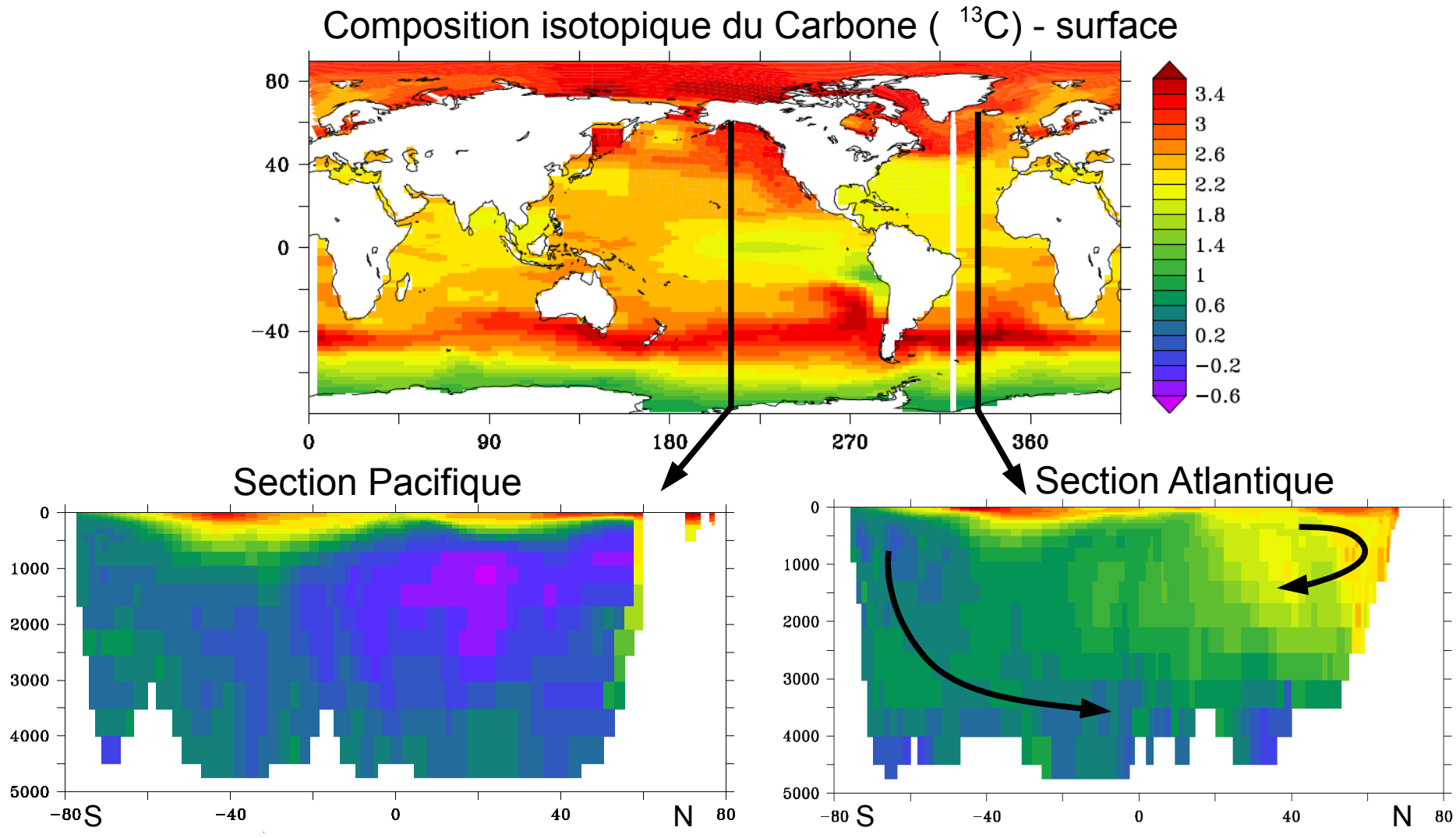
NO_3	NH_4	PO_4	SiO_3	Fe	O_2
spC	spChl	$spCaCO_3$	spFe		
diatC	diatChl	diatSi	diatFe		
diazC	diazChl		diazFe		
zooC					
DOC	DON	DOP	DOFe		
	DIC	Alk			
POC_{s+h}	$PSiO_2$	$PCaCO_3$	PFe		

adapté du modèle de Moore *et al.* (2002)

^{13}C

variables: 24 + 7

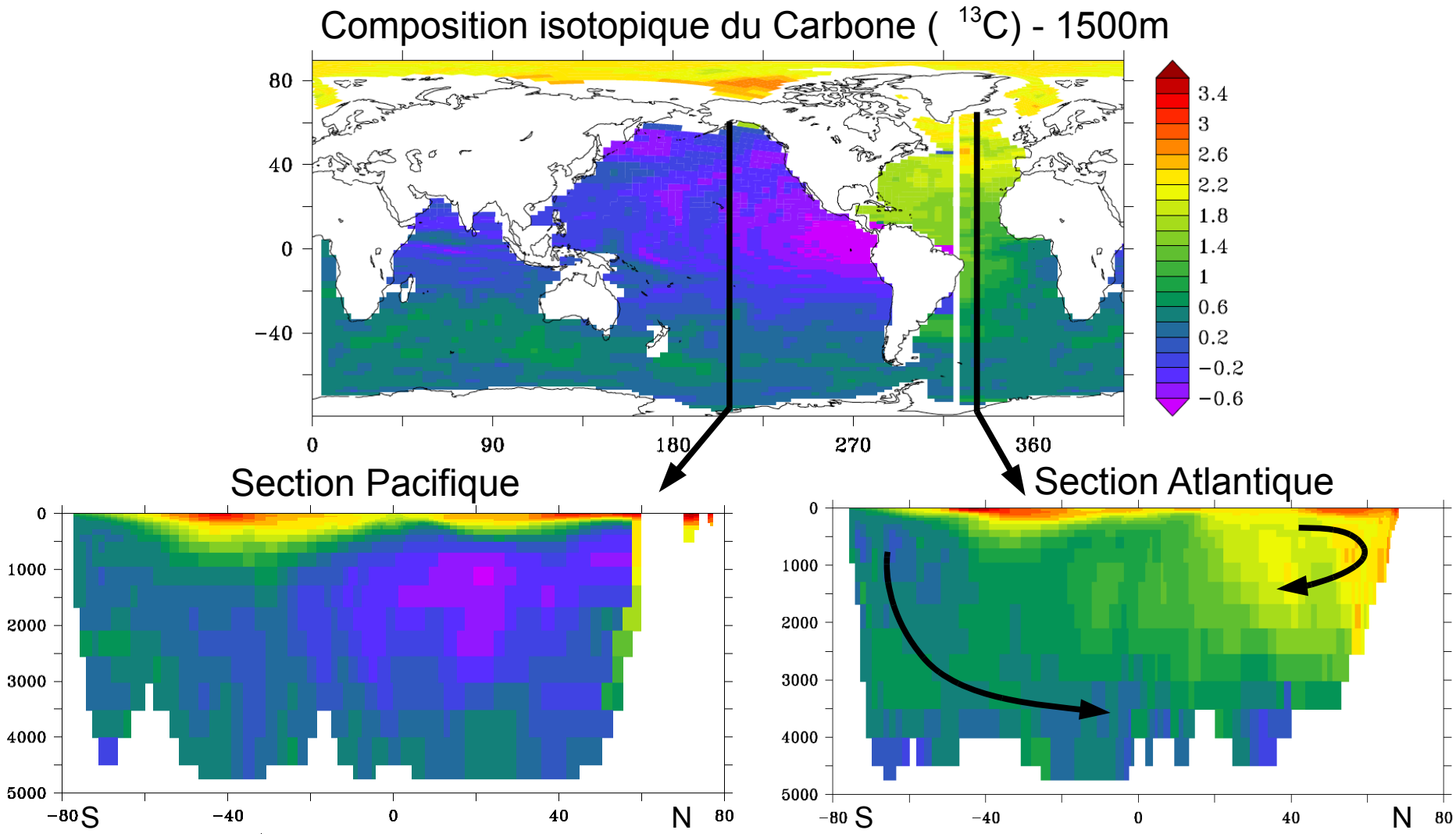
Traceur de la circulation ET de la biogéochimie



Carbon isotopes are fractionated during

- gas exchange of CO_2 (ocean-atmosphere)
- photosynthesis

Traceur de la circulation ET de la biogéochimie



Carbon isotopes are fractionated during

- gas exchange of CO_2 (ocean-atmosphere)
- photosynthesis

Etude de la fertilisation par le fer

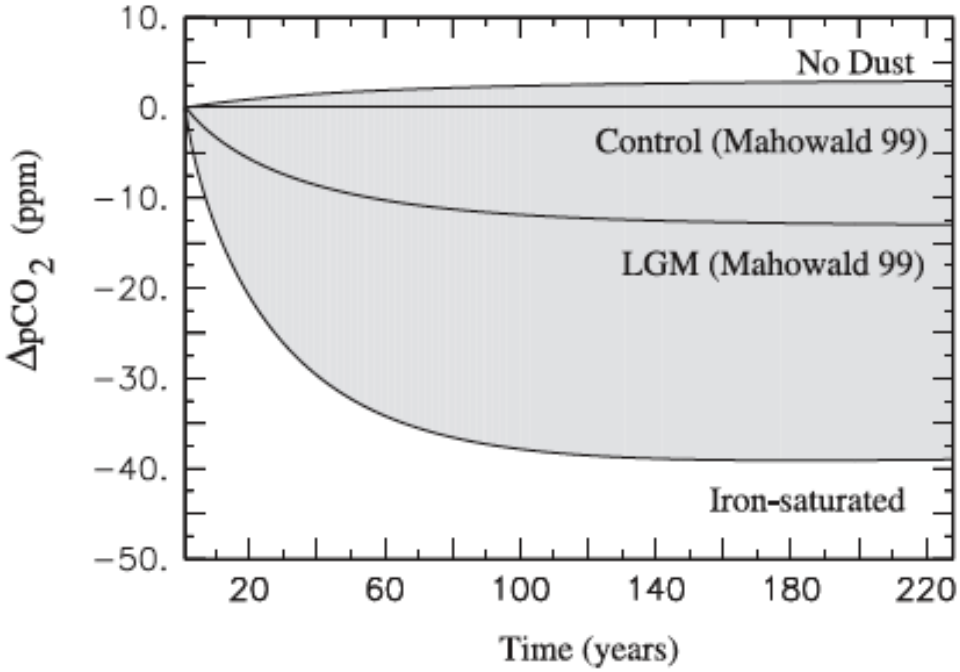


Figure 6. Dust impact on atmospheric CO_2 for different simulations: no atmospheric dust deposition, modern dust from *Mahowald et al.* [1999], LGM dust from *Mahowald et al.* [1999], iron-saturated ocean.

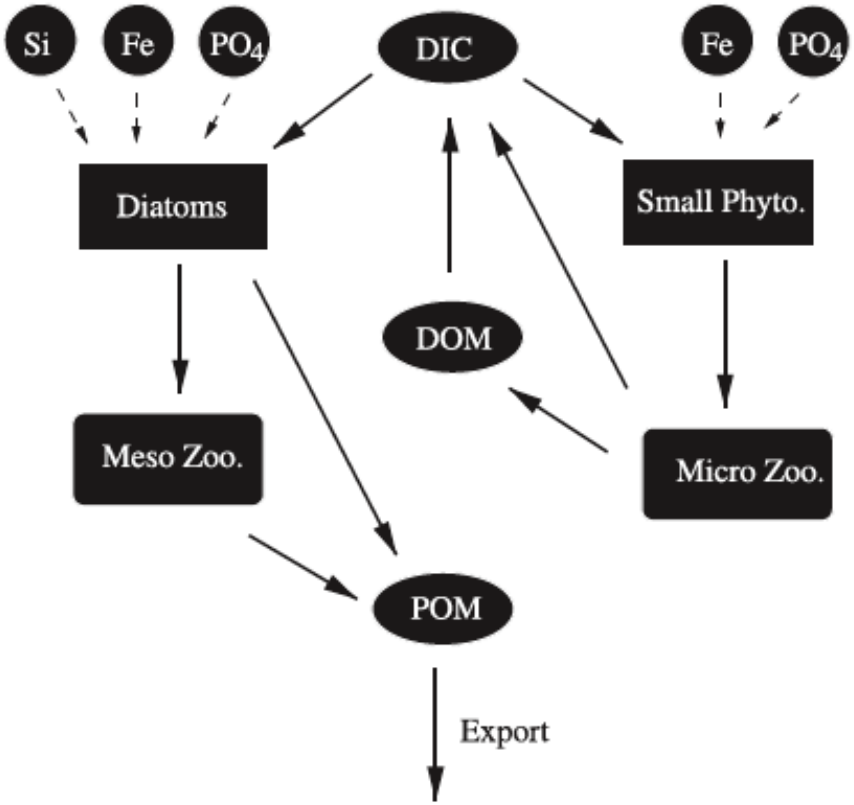


Figure 1. Main compartments of the PISCES ocean biogeochemistry model highlighting the competition between the export production by diatoms and mesozooplankton and the regenerated production by small phytoplankton and microzooplankton.

Bopp et al. (2003)

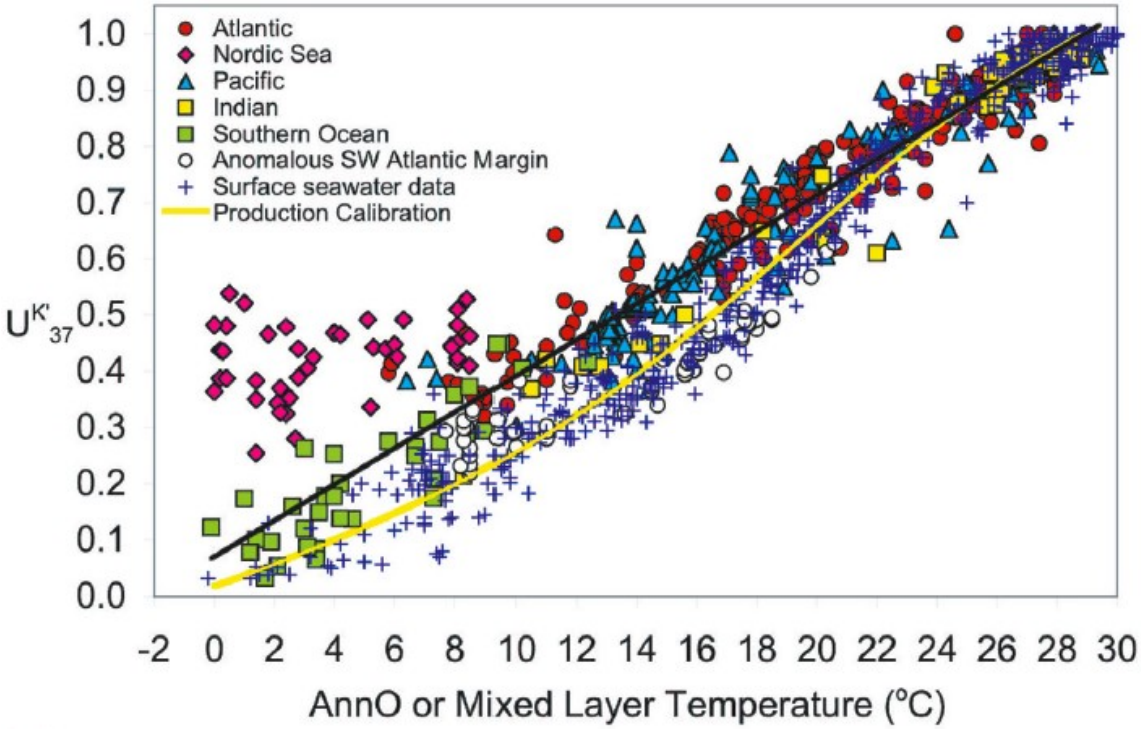
Reconstruction des données paléocéanographiques

exemple des alkénones

Conte et al., 2006, Globale temperature calibration of the alkenone unsaturation index (UK'37) in the surface waters and comparison with surface sediments, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 7 (2), Q02005

alkénones : . produits par certains coccolithophoridés vivants à la surface de l'océan
. préservés dans les sédiments

Relation entre température in situ et Uk'37 de la matière organique vivante
Relation entre SST (Sea Surface Temperature) et Uk'37 des sédiments
> ce ne sont pas les mêmes relations
> nous ne connaissons pas le mécanisme qui transforme ce signal



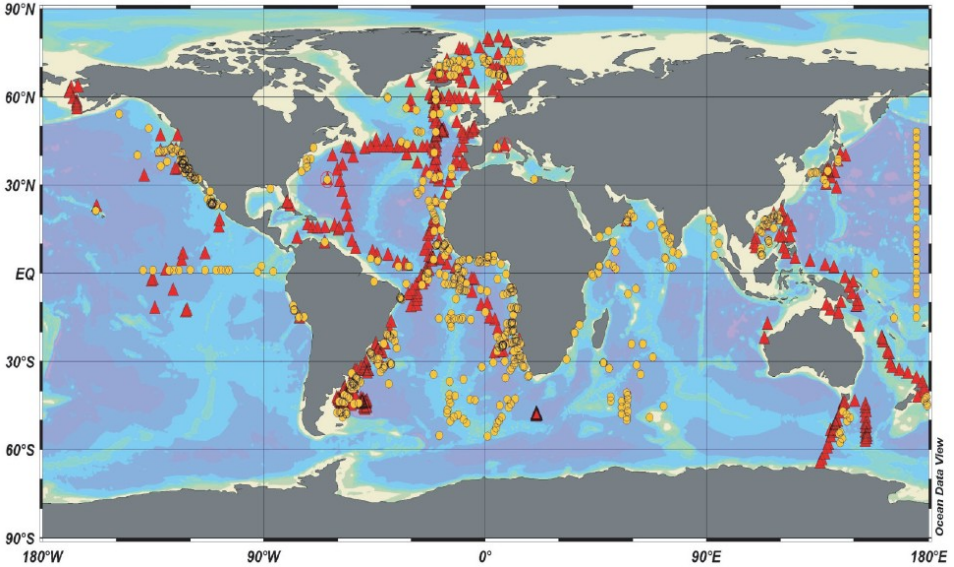
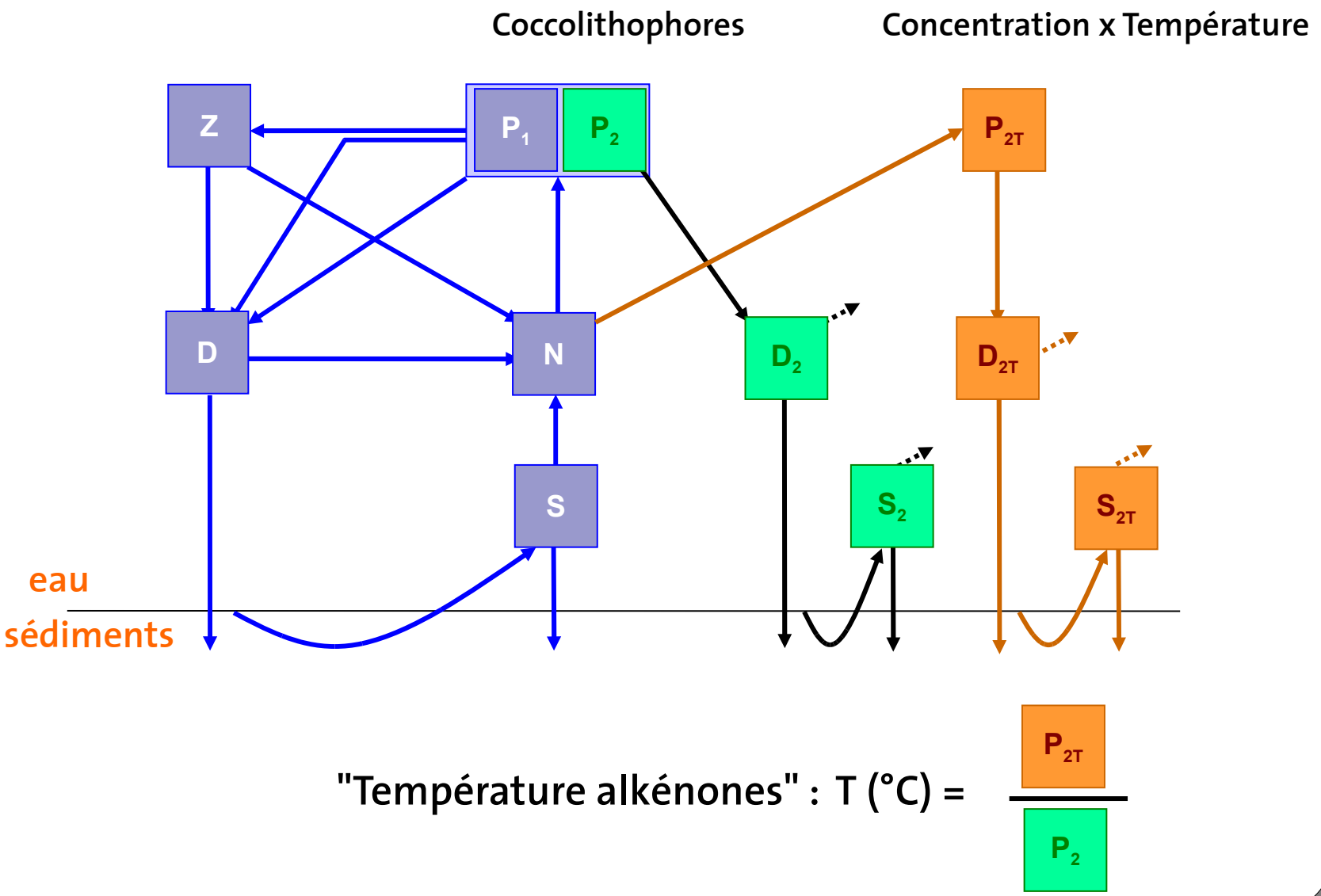


Figure 1. Map of sample locations of surface water (red solid triangles) and coretop sediment (yellow solid circles) data. Locations of time series sites where surface waters were sampled over the seasonal cycle are circled. References for the surface water and sediment data are given in Tables 1 and 2, respectively. Map produced using Ocean Data View (R. Schlitzer, 2004; available at http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV).

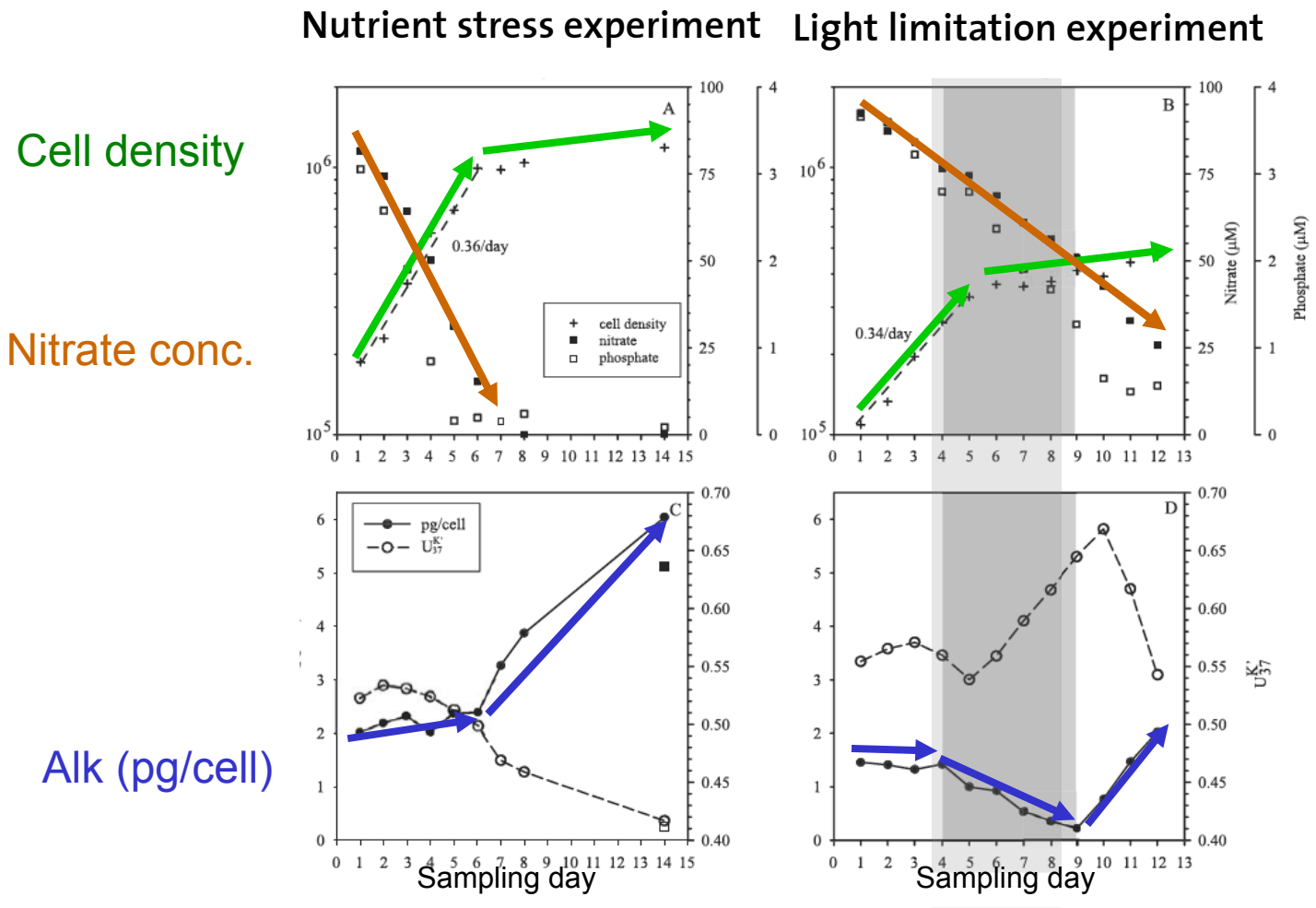
Exemple de module "paleo-traceur" : les alkénones



"Température alkénones" : T (°C) = $\frac{P_{2T}}{P_2}$

Exemple de module "paleo-traceur" : les alkénones

Etablir la fonction de production, à partir de données expérimentales



Prahl et al. (2003)

- Fonction de production selon les conditions de surface …

De l'usage des différents modèles

Modèles de circulation générale
Modèles de complexité intermédiaire
Modèles en boîte
Modèles régionaux / Modèles emboîtés

Modèle en boîte : Exemple de la circulation atlantique intermédiaire

Sigman et al., 2003, Evaluating mechanisms of nutrient depletion and 13C enrichment in the intermediate-depth Atlantic during the last ice age, *Paleoceanography*, 18 (3), 1072

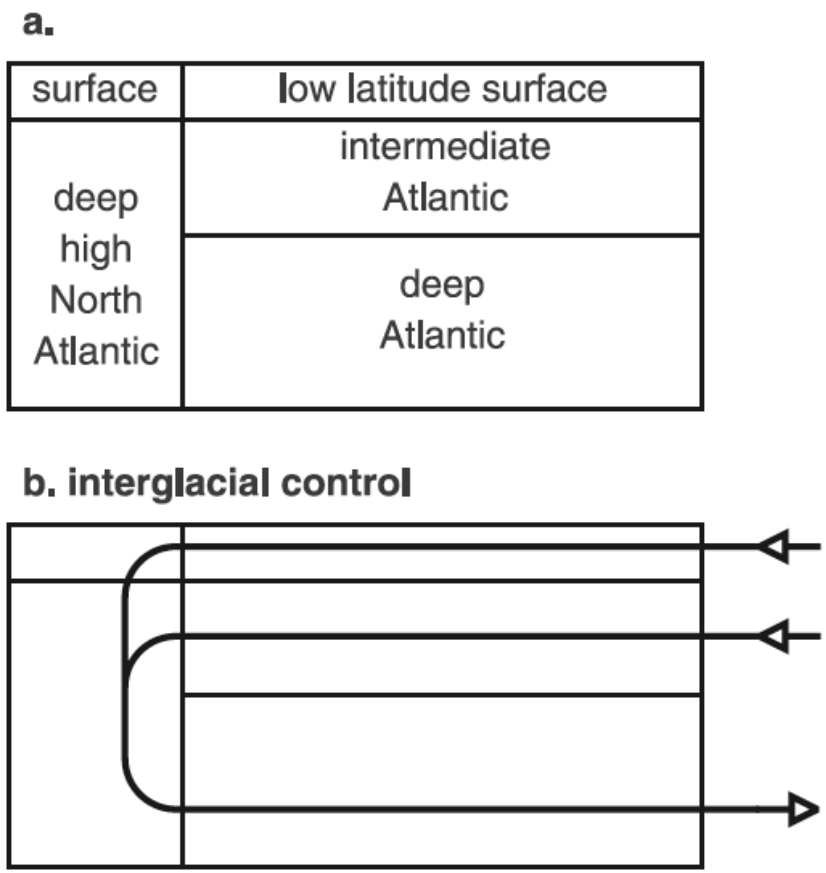


Figure 2. The hypotheses for glacial Atlantic circulation that are examined in the model experiments. Dashed lines in Figure 2d refer to the Atlantic intermediate water export included in experiment 3.

Choix d'une division en boîtes,
selon les **objectifs de modélisation**.

ici : éclairage sur la différence glaciaire-interglaciaire entre eaux intermédiaires et profondes, en tant que réservoir des nutriments, via un schéma de circulation différent.

Modèle en boîte : Exemple de la circulation atlantique intermédiaire

Sigman et al., 2003, Evaluating mechanisms of nutrient depletion and 13C enrichment in the intermediate-depth Atlantic during the last ice age, *Paleoceanography*, 18 (3), 1072

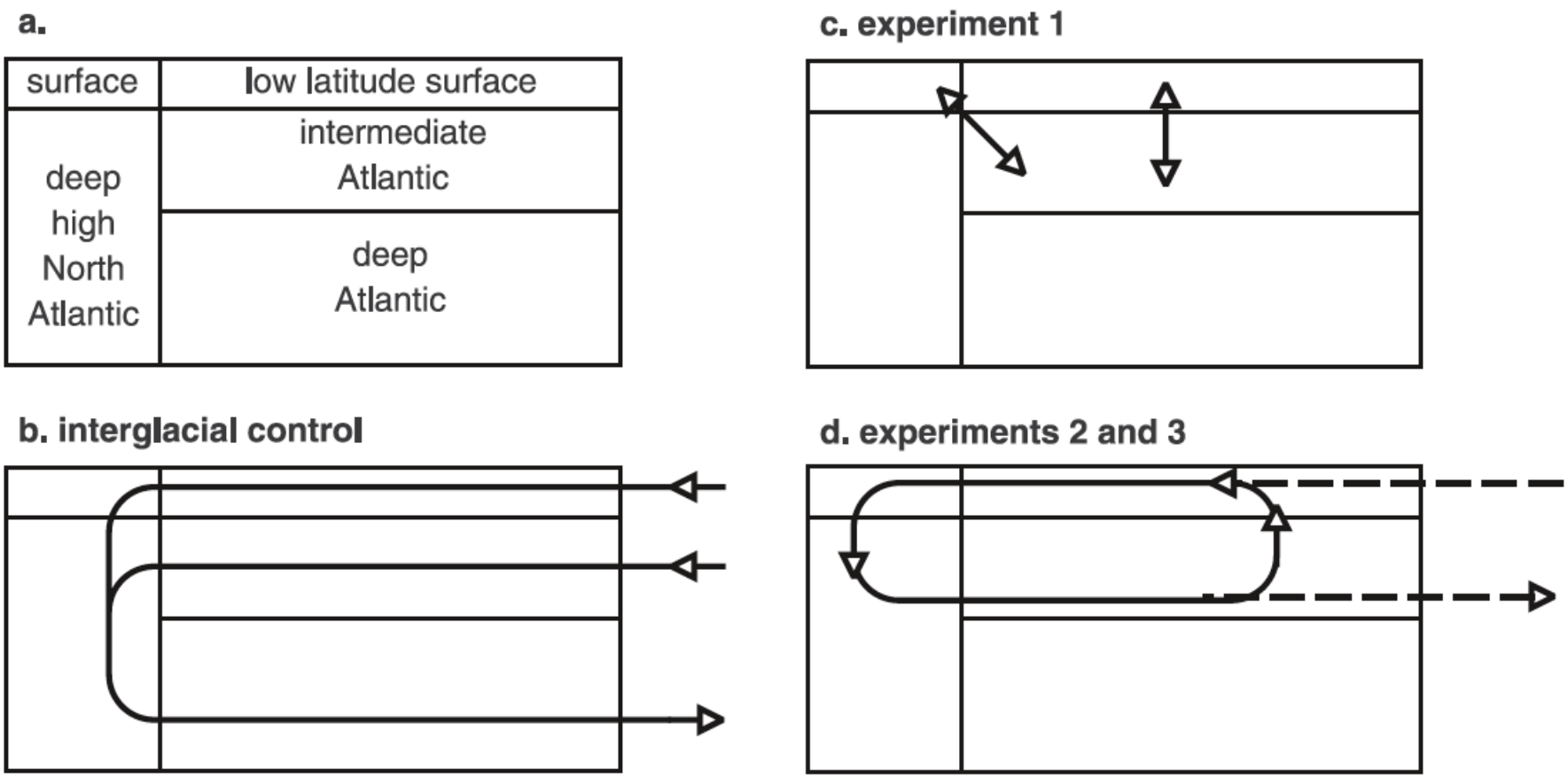
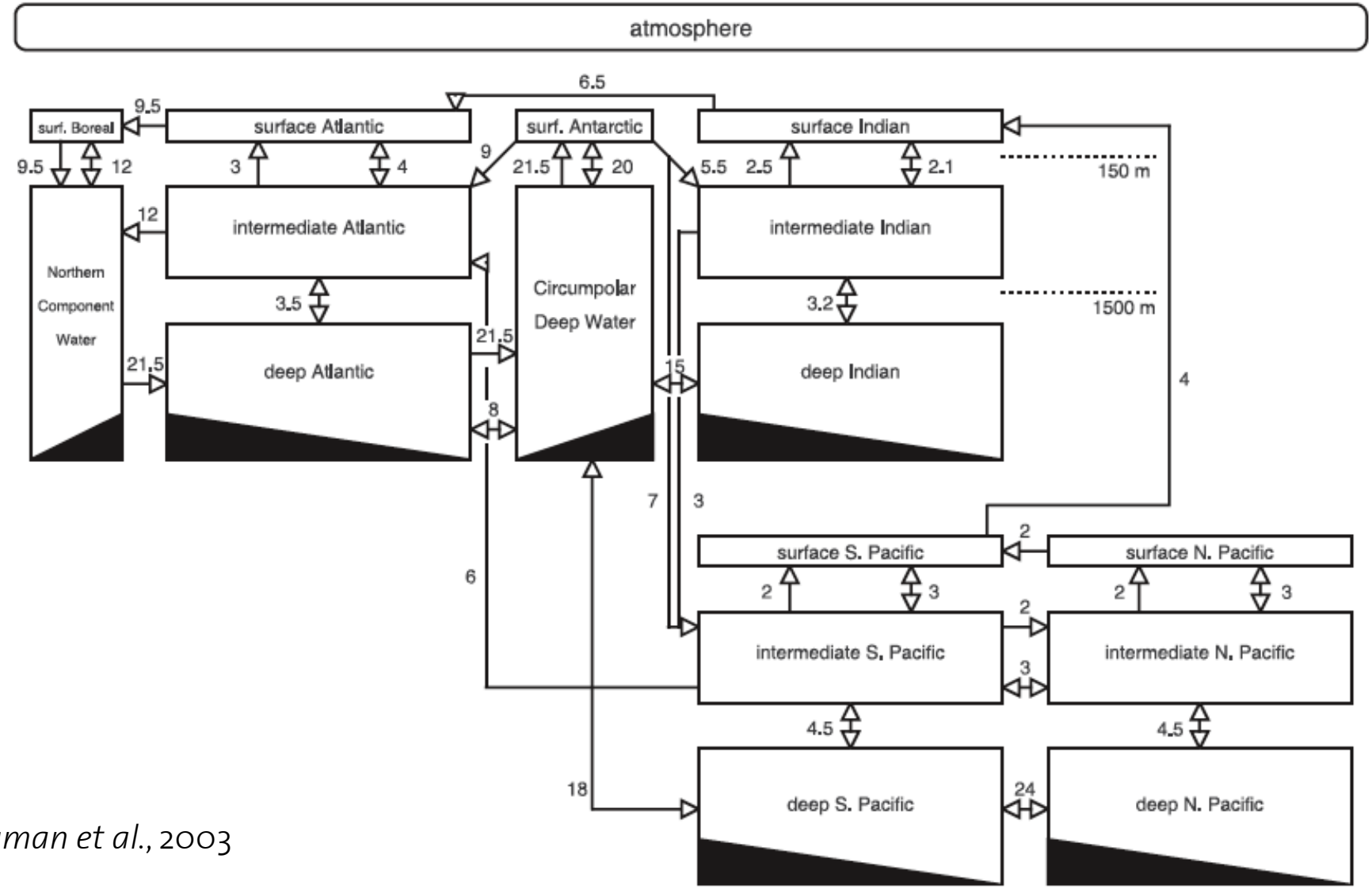


Figure 2. The hypotheses for glacial Atlantic circulation that are examined in the model experiments. Dashed lines in Figure 2d refer to the Atlantic intermediate water export included in experiment 3.

Modèle en boîte : Exemple de la circulation atlantique intermédiaire



Sigman et al., 2003

Figure 4. The architecture and interglacial control circulation of the CYCLOPS model [*Keir*, 1988]. Fluxes are in Sv (10^6 m^3 s^{-1}). Advective and mixing fluxes are shown separately. The "surface boreal" box refers to the high-latitude North Atlantic surface.

Modèle en boîte : Exemple de la circulation atlantique intermédiaire

Un modèle en boîte complexe :

traceurs : PO_4, DIC (dissolved inorganic carbon), alcalinité, O_2, 12C, 13C et 14C.

processus : cycles biologiques, circulation océanique, échanges gazeux, dissolution des carbonates.

Usage de deux traceurs simultanés pour choisir entre les options de circulations :

Cd : co-varie avec PO_4,
trace donc le cycle du phosphate (production primaire, reminéralisation en profondeur)

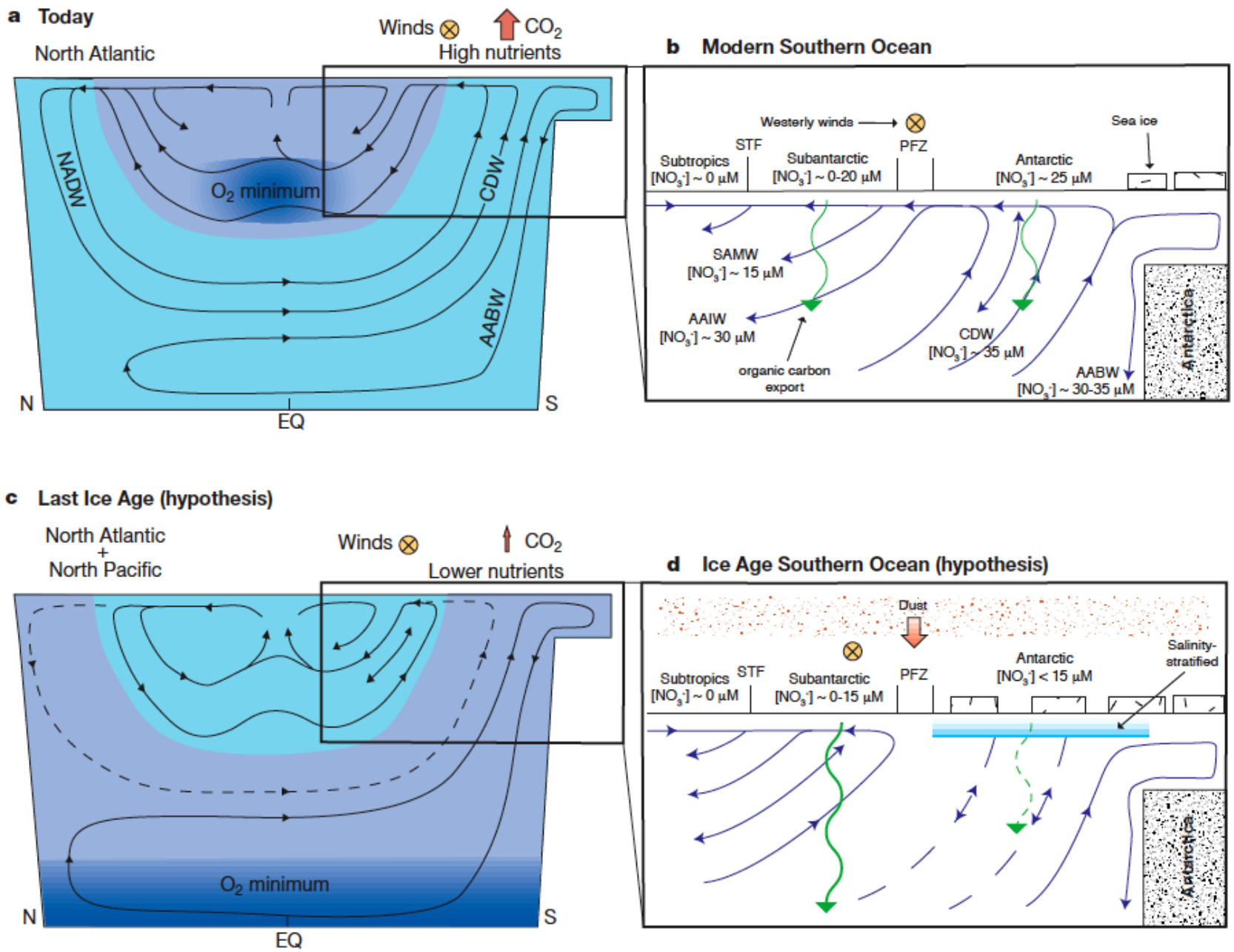
13C/12C : co-varie avec PO_4, trace les effets de reminéralisation de la matière organique,
mais est aussi dépendant des échanges atmosphériques, i.e. du temps de résidence
et de la température des eaux sources.

Quelques points de conclusions apportés par ce modèle :

Le schéma de **circulation glaciaire** impliquant la formation à hautes latitudes des eaux intermédiaires, upwelling aux basses latitudes, puis transport retours vers le pôle, explique l'objectif d'**appauvrissement en nutriments des eaux intermédiaires**. (schéma d)

Ce schéma de re-circulation rapide et uniquement Atlantique, ne correspond pas aux **données $\delta^{13}C$**. Il faut alors invoquer une **connexion de ces eaux intermédiaires vers les autres bassins**.

Importance des Vents d'Ouest en océan Austral



Sigman and Boyle, 2000

Importance des Vents d'Ouest en océan Austral

Rojas et al., 2009, The Southern Westerlies during the last glacial maximum in PMIP2 simulations

PMIP2 : Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase 2

Table 1 PMIP2 coupled ocean–atmosphere models employed in this analysis

Model name	Atmosphere res lon × lat	Vertical levels	Ocean lon × lat	Vertical levels	Years used in analysis
HadCM3M2	3.75 × 2.5	19	1.25 × 1.25	19	100
MIROC3.2.2	2.8 × 2.8	20	1.4 × 1.4	43	30
CCSM3.0 ver beta14	1.4 × 1.4	26	~1 × 1	40	30
IPSL-CM4v1	3.75 × 2.5	19	2.4 × 2.4 cosϕ	31	100

. Modèles couplés océan-atmosphère
. Modèles de circulation générale

. Forçage (Présent et Dernier Maximum Glaciaire) :

paramètres orbitaux	insolation
pCO2atm	bilan radiatif **Pas de réel cycle du carbone**
calotte glaciaire selon Peltier (1994)	Influence température (albédo, altitude) Influence circulation atmosphérique **Pas de modèle dynamique de formation de ces calottes**

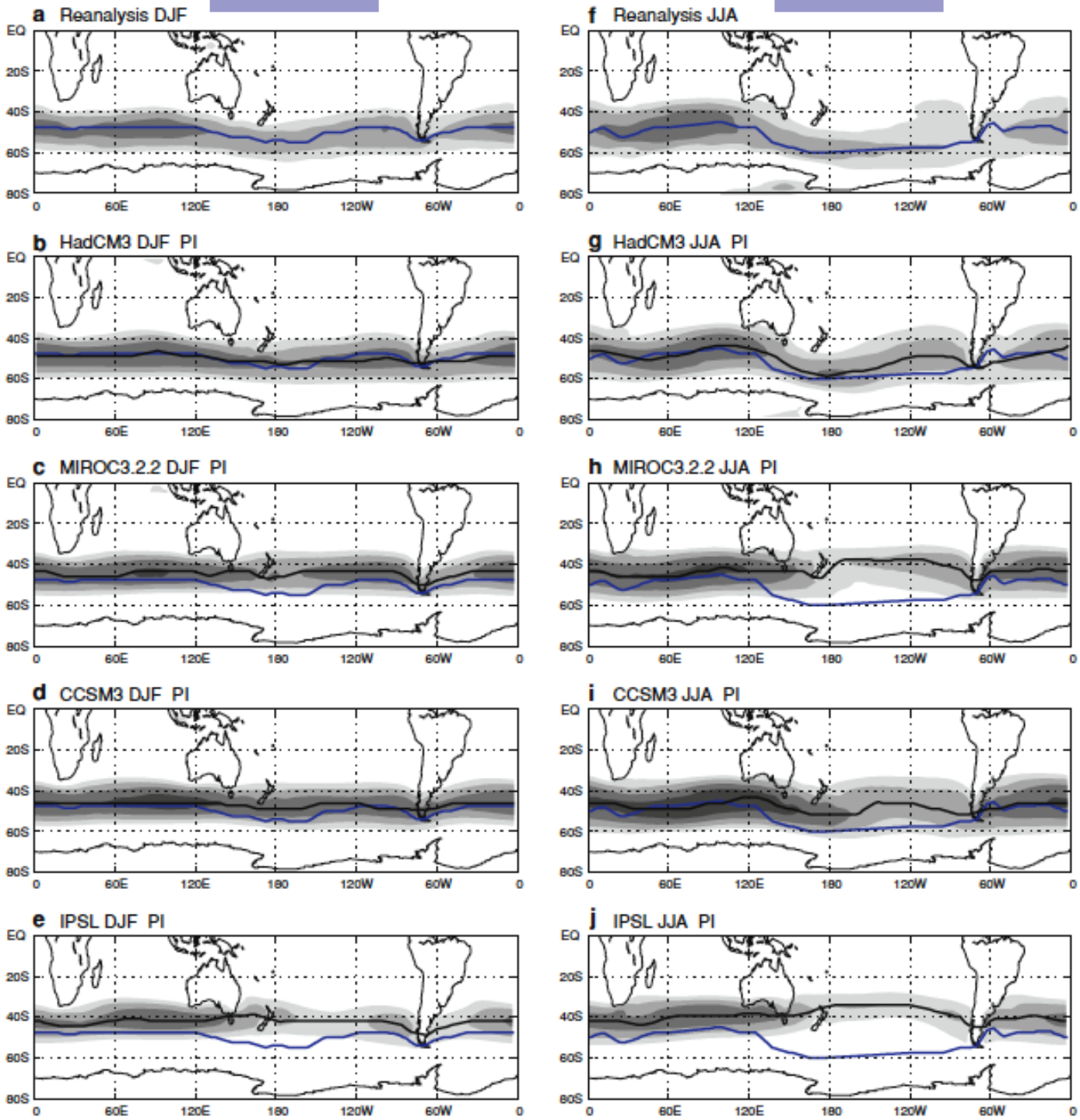
DJF

u–wind at 925hPa

JJA

Données

Modèles



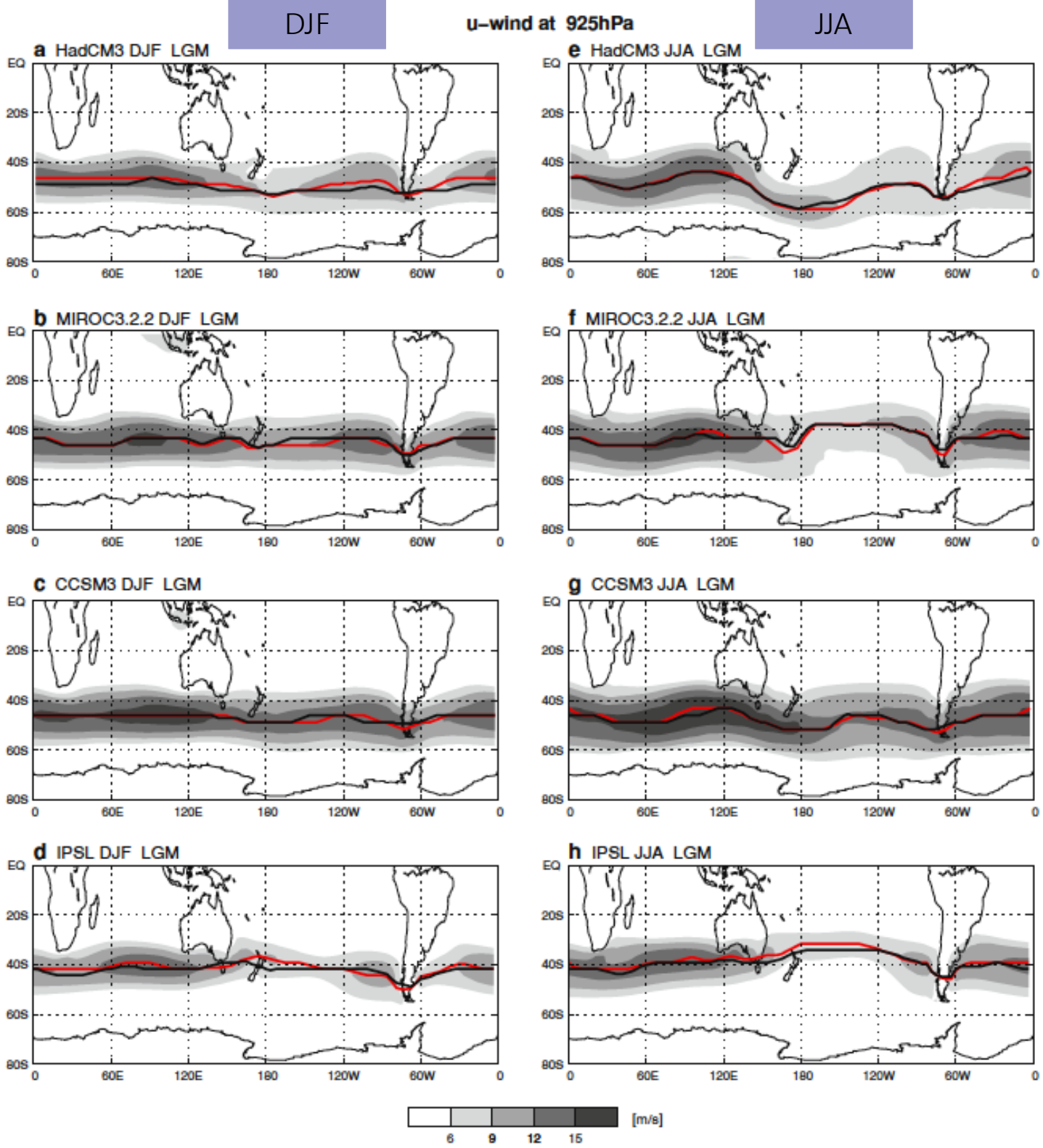
[m/s]

Vents d'Ouest
Actuel

Comparaison et
évaluation des modèles

Vents d'Ouest
Dernier Maximum Glaciaire

> Pas de shift net
> Vents légèrement moins forts



Prescrire le forçage

Exemple : Sijp and England, 2008

Prescrire "manuellement" le changement dans le forçage, et en étudier l'impacte sur la circulation

Modèle UVic (University of Victoria, Canada), de complexité intermédiaire

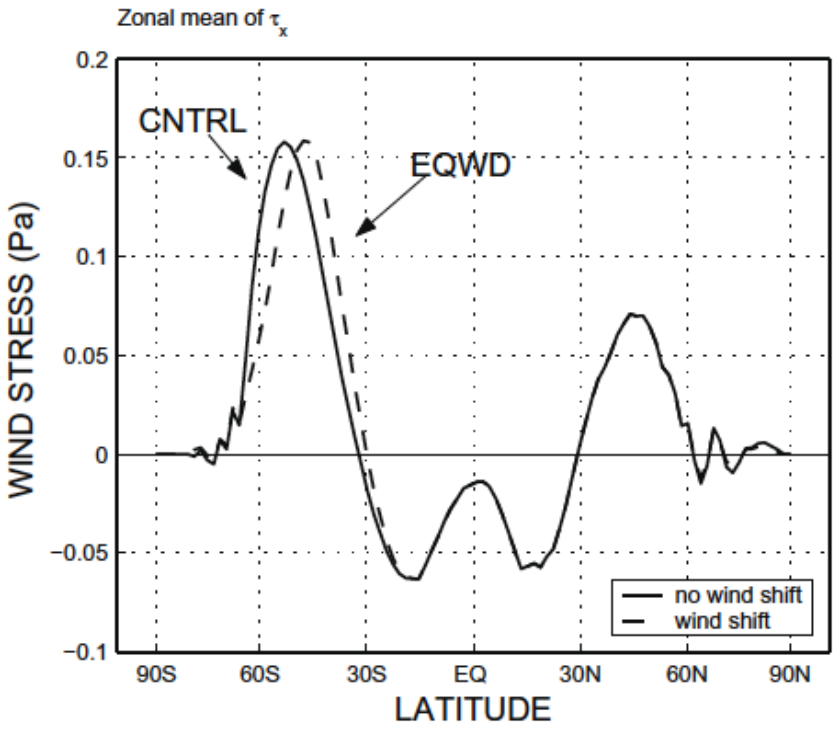


Fig. 1. Zonal mean of the zonal component of the wind stress (τ_x) for CNTRL (solid) and EQWD (dashed).

Température de Surface

Slinité de surface

Différence DMG - Présent

20 ans

200 ans

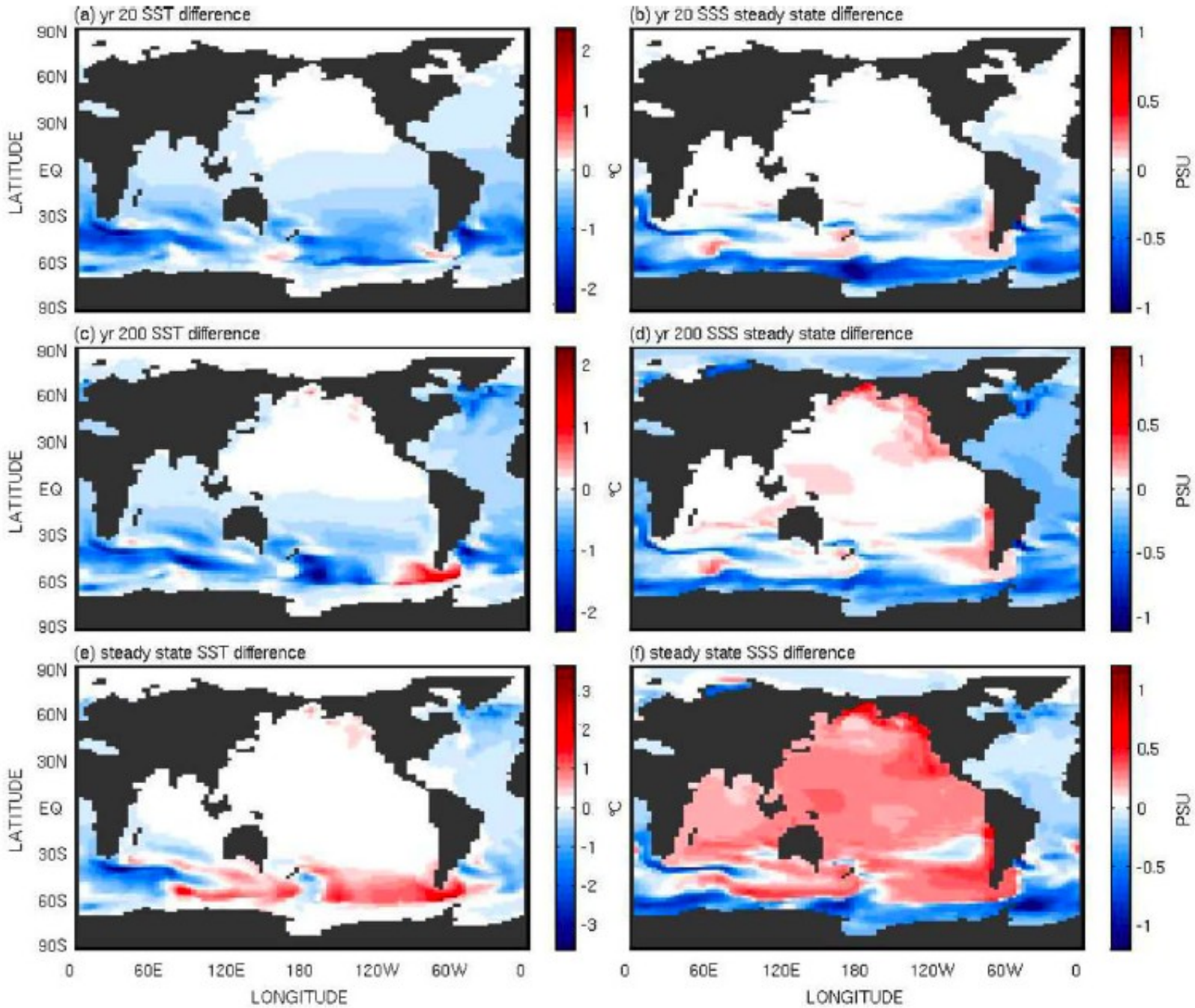
> Atlantique plus froid et moins salé

> inhibe la formation des eaux profonde en Atlantique Nord

Cohérence du champ de vent avec le nouvel état de l'océan ?

équilibre

Sijp and England, 2008



Durée des simulations

Table 1 PMIP2 coupled ocean–atmosphere models employed in this analysis

Model name	Atmosphere res lon × lat	Vertical levels	Ocean lon × lat	Vertical levels	Years used in analysis
HadCM3M2	3.75 × 2.5	19	1.25 × 1.25	19	100
MIROC3.2.2	2.8 × 2.8	20	1.4 × 1.4	43	30
CCSM3.0 ver beta14	1.4 × 1.4	26	~1 × 1	40	30
IPSL-CM4v1	3.75 × 2.5	19	2.4 × 2.4 cosϕ	31	100

Simulations **à l'équilibre** (x 1000 ans)

Objectifs : **Simulations transitoires** - sur l'Holocène (0-10 000 ans)
- sur la transition glaciaire interglaciaire (0-21000 ans)

Limitations :
. longueur (x 10 000 ans)
. conditions changeantes :
. niveau marin : change la topographie du modèle océanique
. calotte glaciaire (accumulation ?)
. mécanismes rétroactifs

Alternatives :
. études de processus à l'équilibre
. utilisation de modèles de complexité moindre

Modèle de complexité intermédiaire

Exemple : Toggweiler et al., 2006

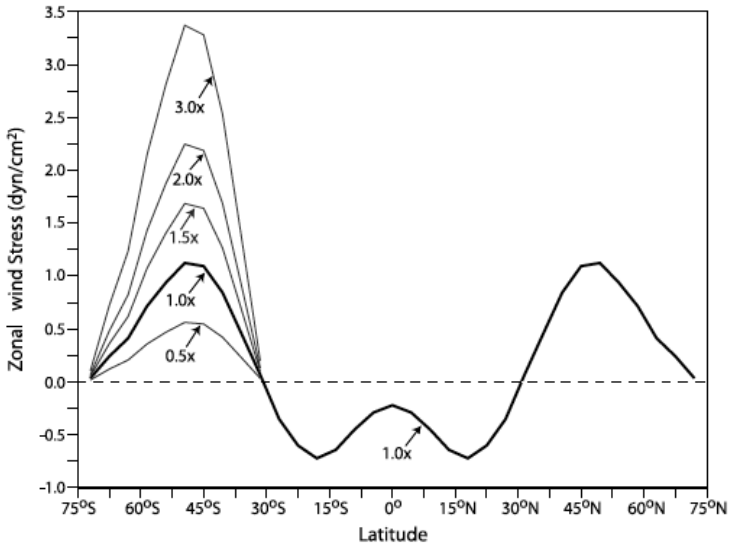
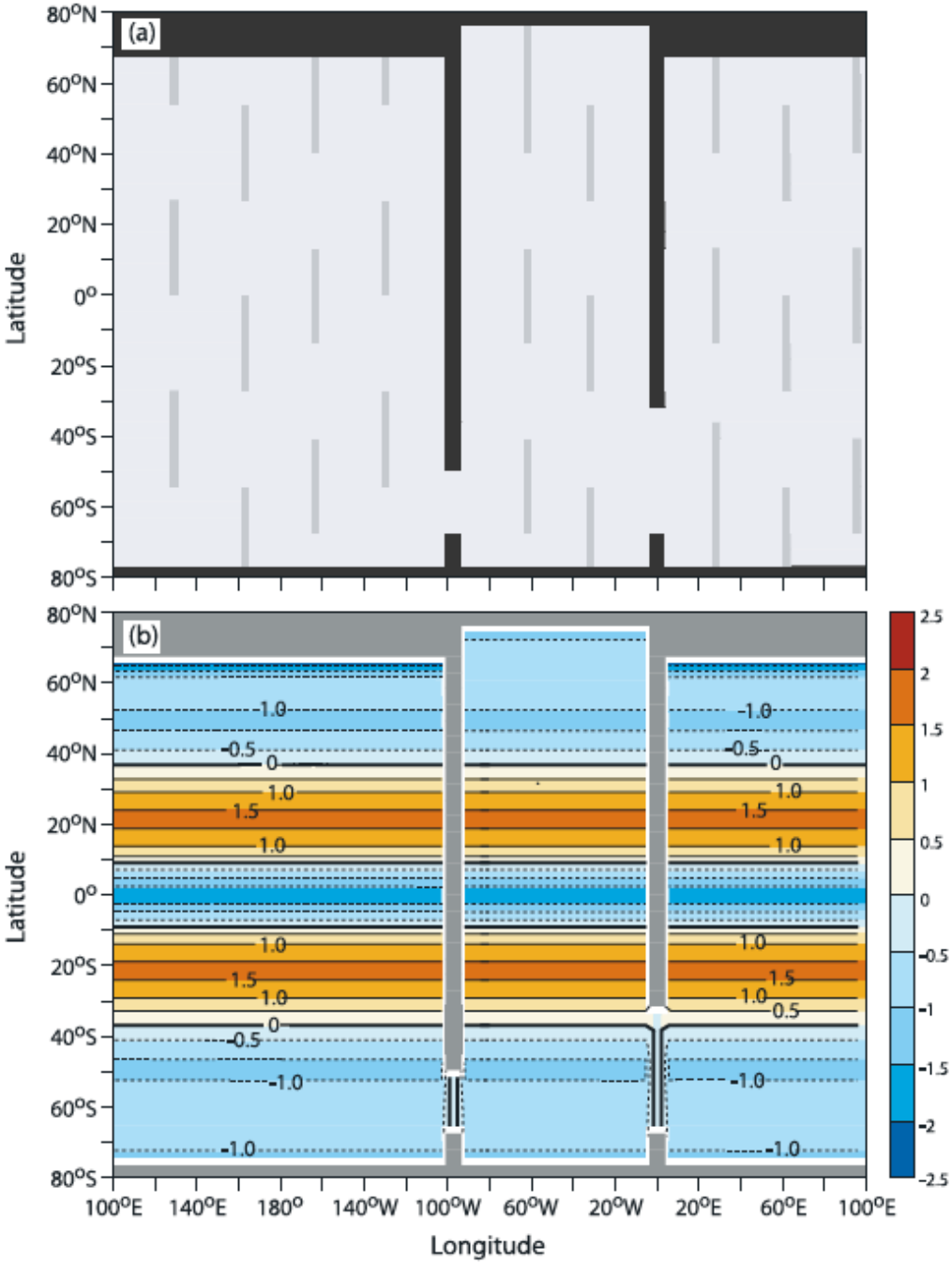


Figure 6. Latitudinal distribution of the wind stress patterns used to force the model. The basic stress pattern, 1.0x, is zonally uniform and symmetric about the equator but is modified so that the stress on the ocean south of 30°S is scaled by factors of 0.5x, 1.5x, 2.0x, and 3.0x. No meridional stress is applied.



Modèle de complexité intermédiaire

Exemple : Toggweiler et al., 2006

Modèle simplifié

Longue simulations

Obtention de cycles à 4000 ans

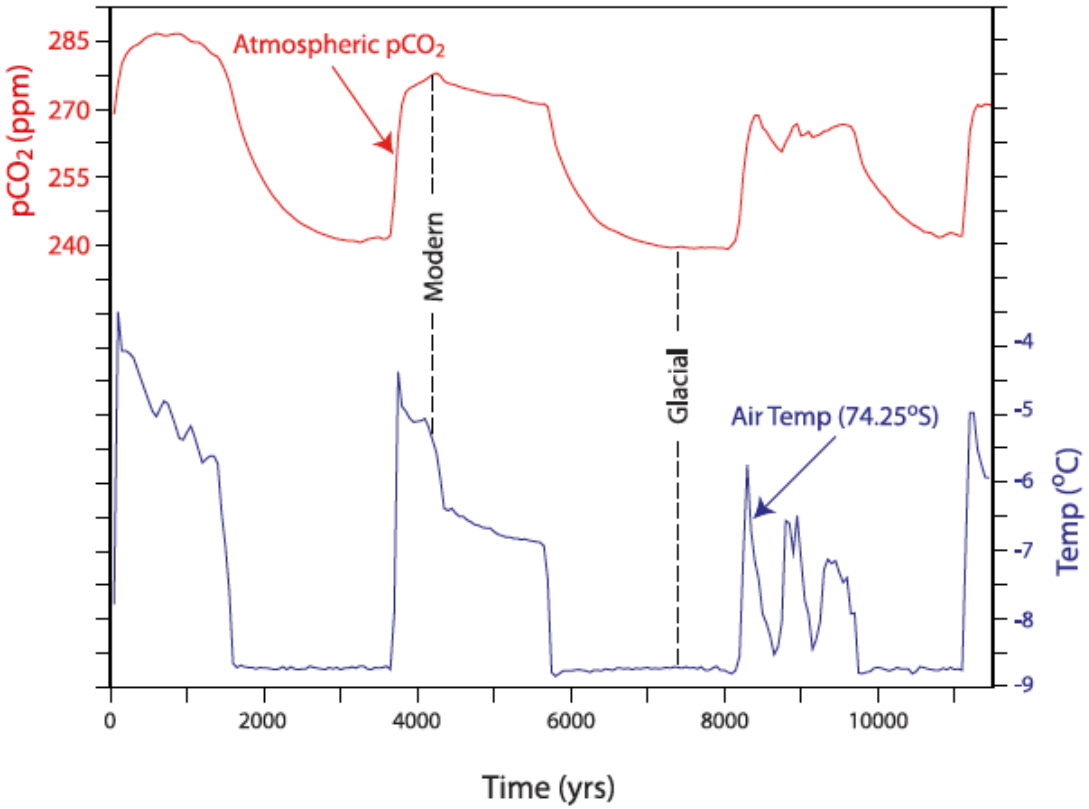
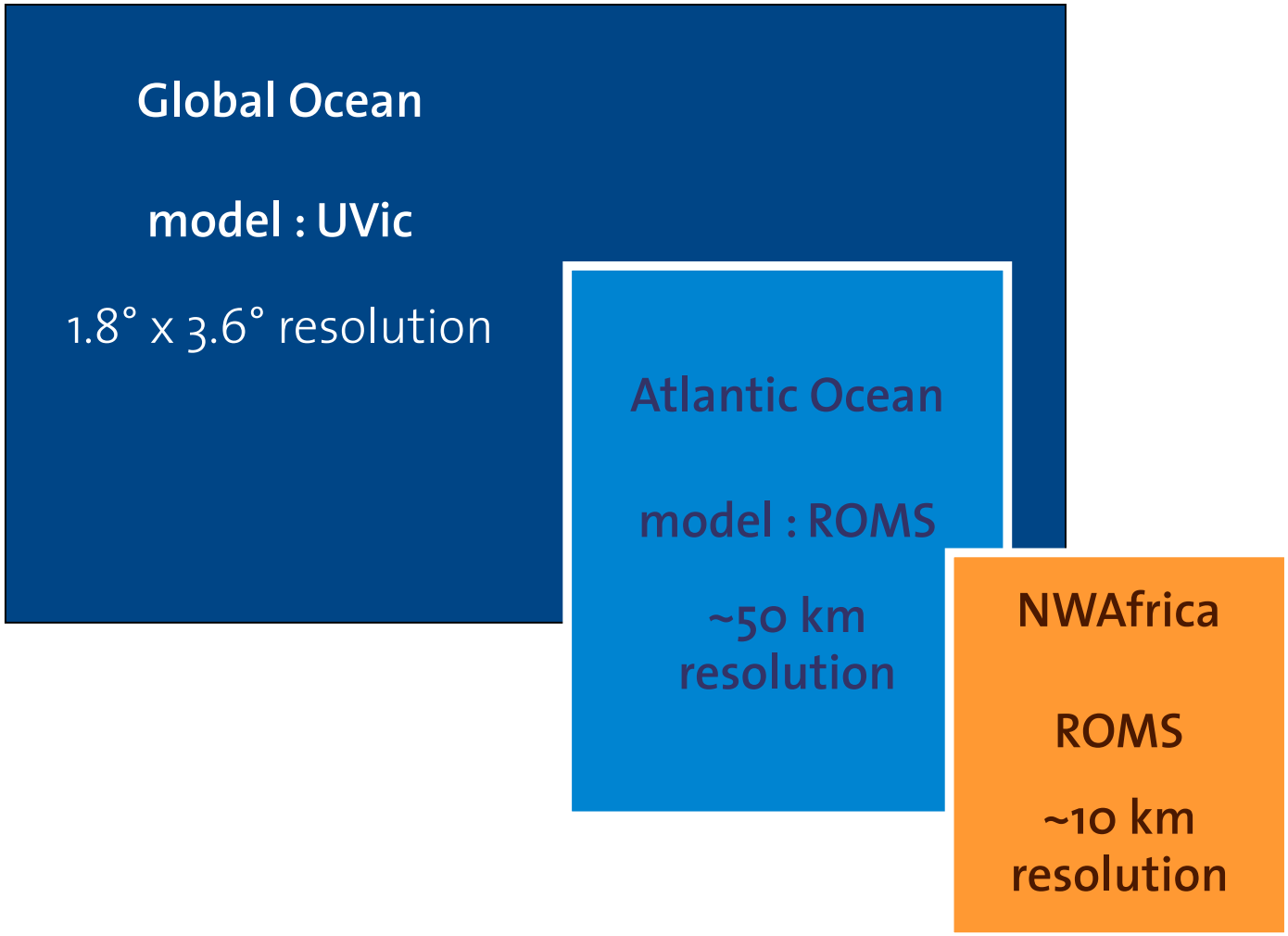


Figure 8. Temporal variation of atmospheric CO_2 and Antarctic air temperature from a 12,000-year run of the 1.5x model. See text for details. Two time slices "Modern" and "Glacial" are marked in Figure 8 and are used in Figures 7, 9, and 10.

Modèles régionaux / modèles emboîtés

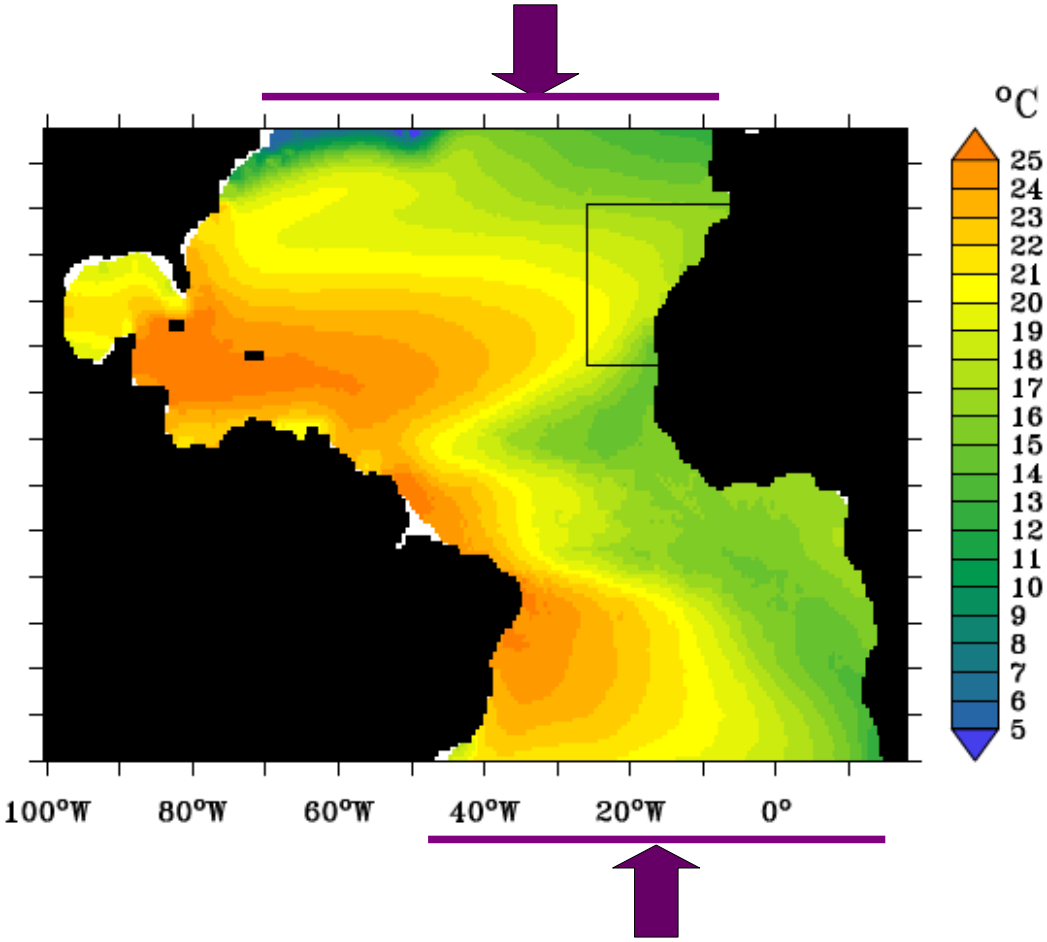


Long-term equilibrium ~1000 yrs

Short time scale ~10 yrs

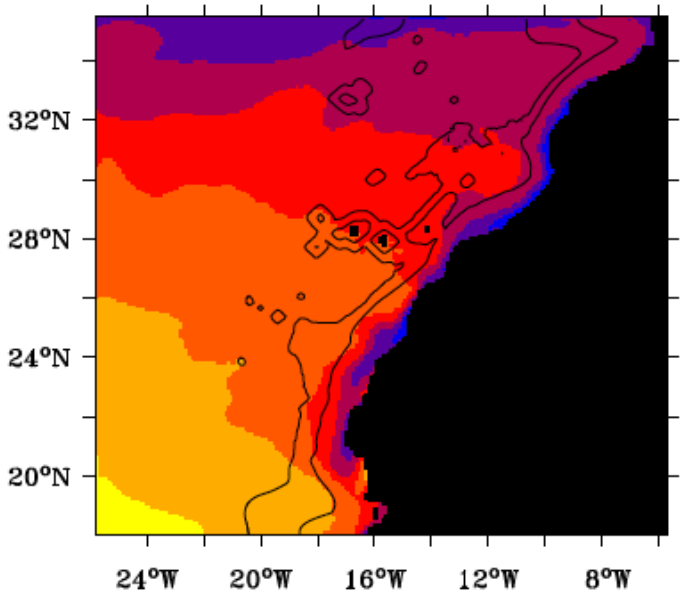
Modèles régionaux / modèles emboîtés

Forçage aux frontières par le modèle global



à haute résolution (10km)

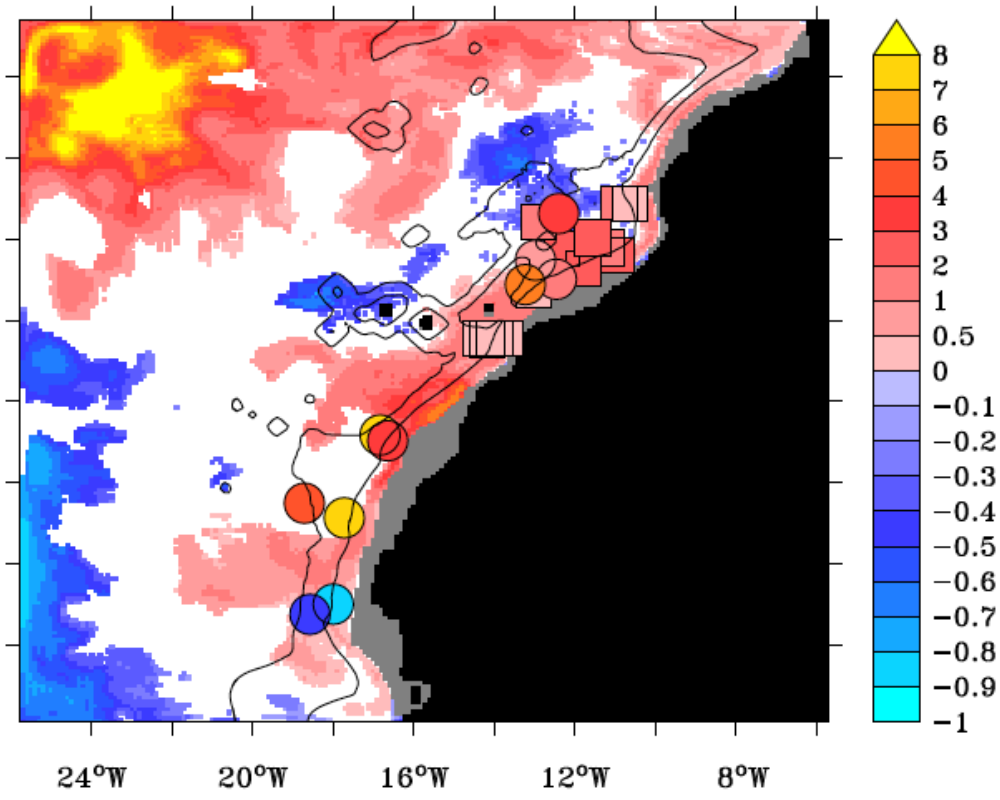
obtention des **structures fines**



Modèles régionaux / modèles emboîtés

La **résolution spatiale** du modèle est suffisamment grande pour distinguer l'environnement de **chaque carotte sédimentaire**

Variation de Production Primaire entre Glaciaire et Actuel



Conclusion et "Take Home Message"

. Océanographie / Paléocéanographie : mêmes modèles, et les mêmes équations

. Pas d'image claire de l'état de l'océan passé

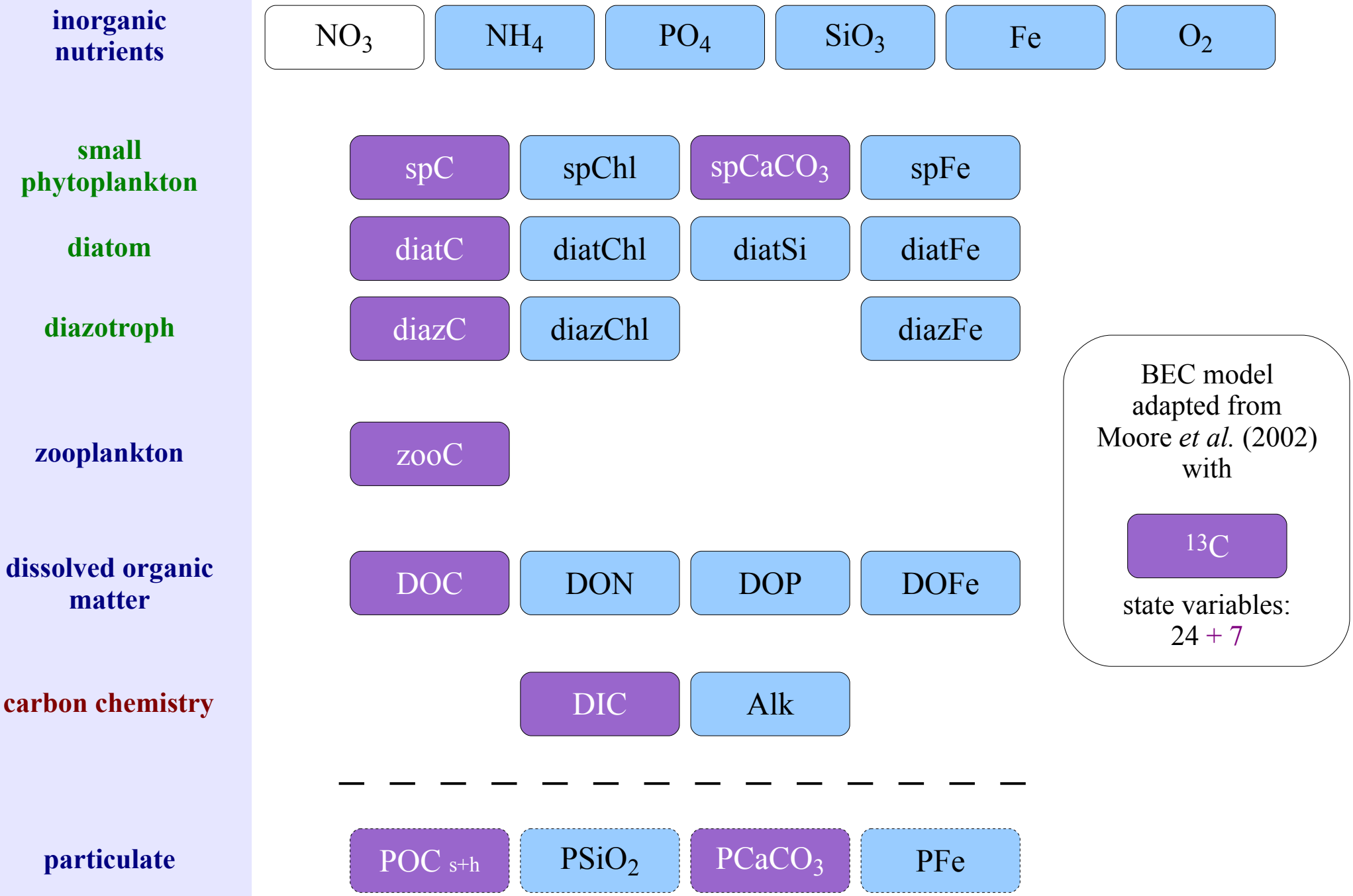
. Besoin des données sédimentaires : pour forcer les modèles
pour évaluer les modèles

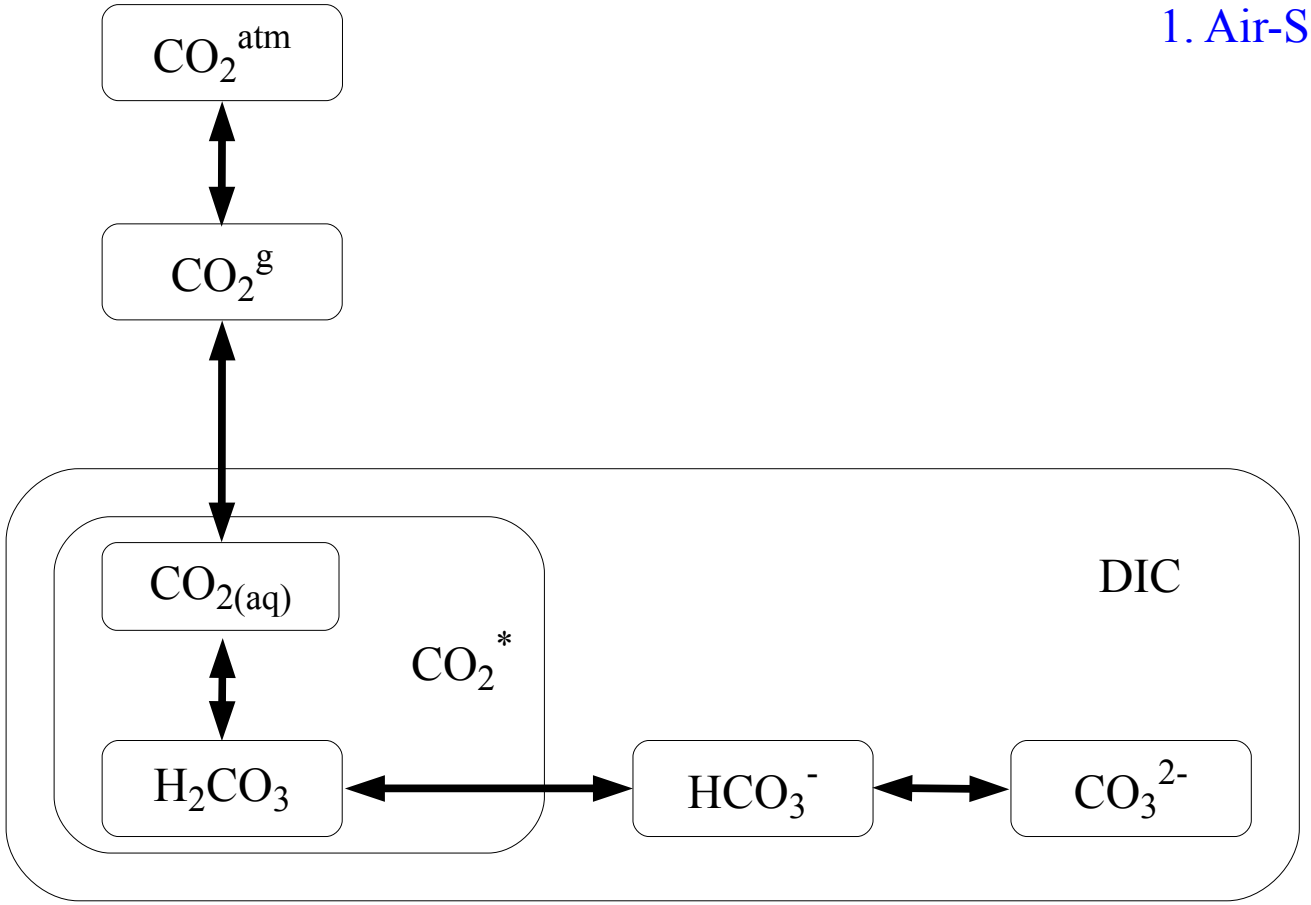
. Besoin de modèles de ces traceurs sédimentaires

. Besoin de moyens de modélisation "puissants"

pour des modélisations transitoires

passage d'un état Glaciaire à Interglaciaire

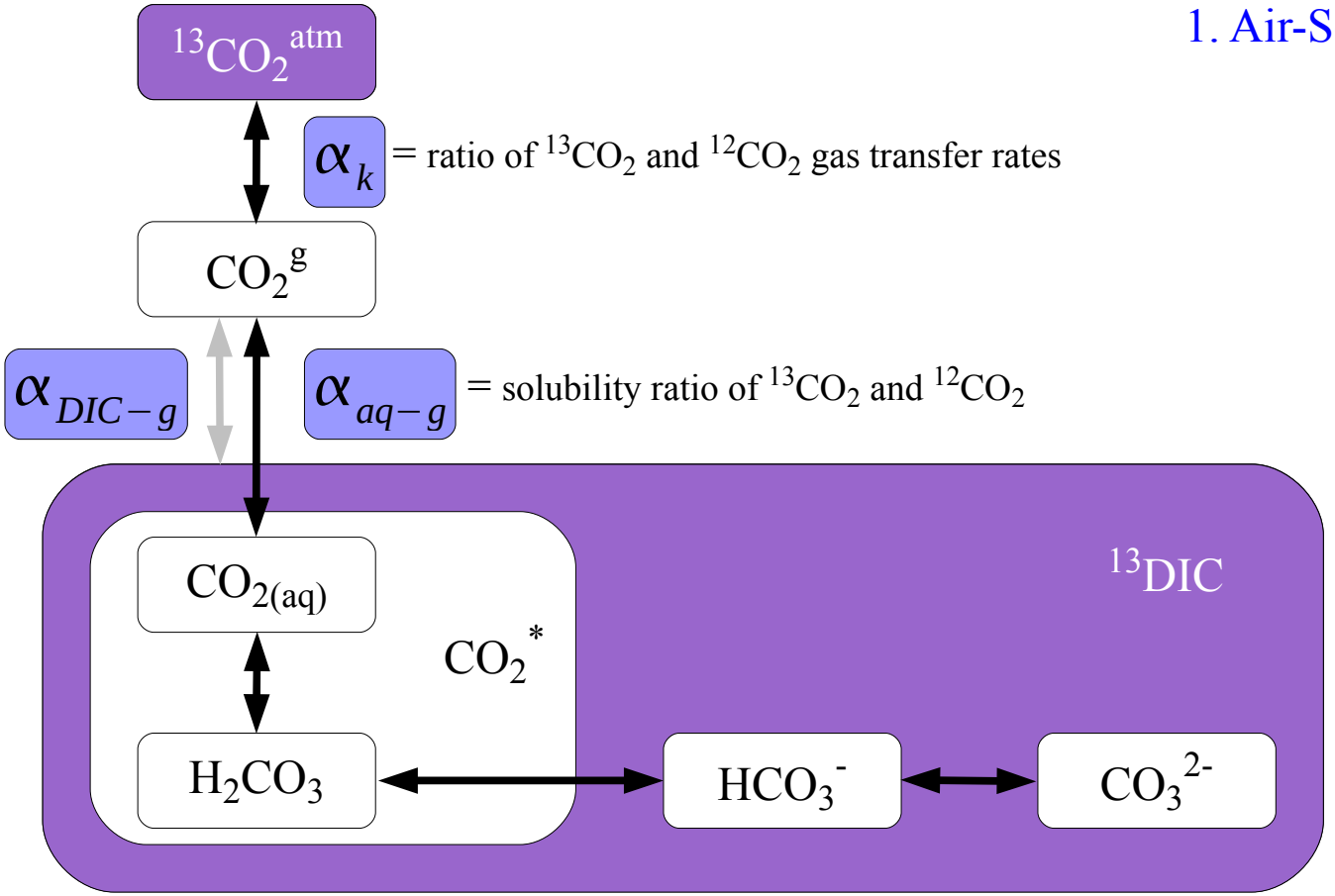

inorganic nutrients
NO_3
NH_4
PO_4
SiO_3
Fe
O_2
small phytoplankton
spC
spChl
$spCaCO_3$
spFe
diatom
diatC
diatChl
diatSi
diatFe
diazotroph
diazC
diazChl
diazFe
zooplankton
zooC
dissolved organic matter
DOC
DON
DOP
DOFe
carbon chemistry
DIC
Alk
particulate
POC_{s+h}
$PSiO_2$
$PCaCO_3$
PFe
BEC model adapted from Moore *et al.* (2002) with
^{13}C
state variables: 24 + 7



$$d[CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma(P^s - P^a)$$

Zhang *et al.* (1995)

1. Air-Sea Gas Exchange



$$d[CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma(P^s - P^a)$$

$$d[^{13}CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma\,\alpha_k\,\alpha_{aq-g}\left(\frac{P^s R_{DIC}}{\alpha_{DIC-g}} - P^a R_g^a\right)$$

Zhang *et al.* (1995)

$$d[CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma(P^s - P^a)$$

$$d[^{13}CO_{2(aq)}]/dt = -k\gamma\,\alpha_k\,\alpha_{aq-g}\left(\frac{P^s R_{DIC}}{\alpha_{DIC-g}} - P^a R_g^a\right)$$

Zhang *et al.* (1995)

k = gas transfer piston velocity (m/s)

γ = CO_2 solubility

P = partial pressure of CO_2

$$P\gamma = [CO_2^*]$$

$$d[CO_{2(aq)}]/dt = -k([CO_2^*] - [CO_2^*]^{atm}) = d[DIC]/dt$$

$$\alpha = 1 + \epsilon/1000$$

Zhang *et al.* (1995)

ϵ_k = constant ? -0.95 @5°C -0.81 @21°C

$$\epsilon_{aq-g} = -0.0049\,T - 1.31$$

$$\epsilon_{DIC-g} = 0.014\,T\,f_{CO_3} - 0.105\,T + 10.53$$

$0.05 < f_{CO_3} < 0.20$; $5°C < T < 25°C$

2. ^{13}C in trophic chain: Example of small phytoplankton

$$\frac{d[spC]}{dt} = NPP - grazing - mortality - aggregation$$

$$\frac{d[sp\,^{13}C]}{dt} = {}^{13}NPP - (grazing + mortality + aggregation) \cdot r_{sp}$$

Net Primary Production (NPP) expressed in ^{13}C

$$\boxed{{}^{13}NPP} = NPP \times \boxed{r_{NPP}}$$

^{13}C $\quad$ $^{12}C + {}^{13}C$ $\quad$ $\frac{^{13}C}{^{12}C + {}^{13}C}$

$$r_{sp} = \frac{^{13}C_{sp}}{^{13}C_{sp} + {}^{12}C_{sp}}$$

```
!-----------------------------------------------------------------------
!     small phyto Carbon
!-----------------------------------------------------------------------

      DTRACER_MODULE(:,:,spC_ind) = photoC_sp - graze_sp - sp_loss
     &  - sp_agg

#ifdef ETHZ_C13_v1.0
!-----------------------------------------------------------------------
!     small phyto Carbon 13C
!-----------------------------------------------------------------------

      DTRACER_MODULE(:,:,spC13_ind) = photoC13_sp
     &  - (graze_sp + sp_loss + sp_agg) * r13CT_sp

#endif
```