

**Modélisation des variations
glaciaires-interglaciaires
du CO₂ atmosphérique :**

Rôle de l'érosion continentale

**Modelling Glacial-Interglacial
Atmospheric CO₂ Variations :**

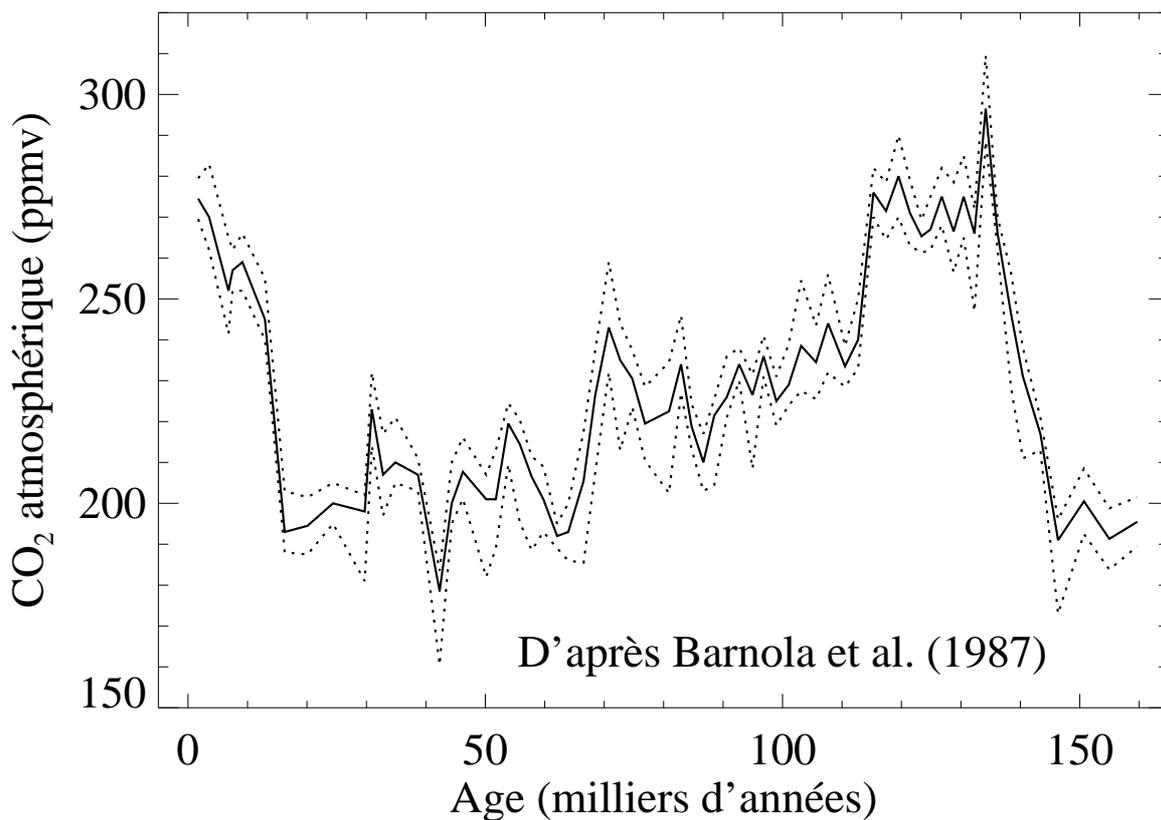
The Role of Continental Weathering

Guy MUNHOVEN

Laboratoire de Physique Atmosphérique et Planétaire
Institut d'Astrophysique et de Géophysique
Université de Liège

25 novembre 1997

Variations glaciaires-interglaciaires du CO₂ atmosphérique : Le signal de Vostok



- oscillation entre
 - niveau glaciaire de 190 – 200 ppmv
 - niveau interglaciaire de 260 – 280 ppmv
- bonne corrélation avec le climat

Organisation de la présentation

1. Cycle du carbone

- contemporain (actuel/préindustriel)
- changements glaciaires-interglaciaires
- nouvelle hypothèse pour variations de CO₂

2. Rôle de l'érosion continentale dans le cycle du carbone

- consommation de CO₂ et production de HCO₃⁻
- différence silicates-carbonates
- influence des variations sur CO₂ atmosphérique

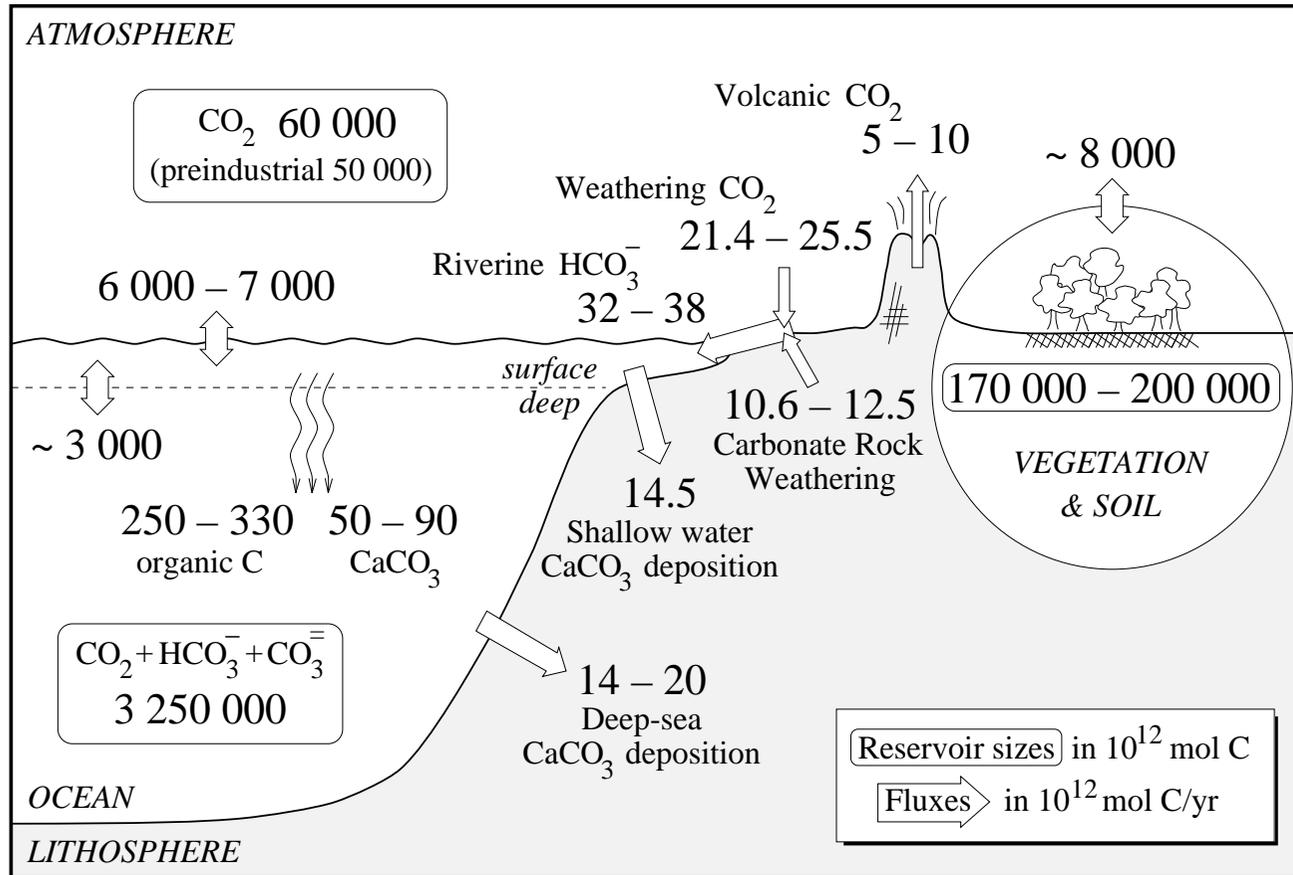
3. Modèle du cycle du carbone océanique

4. Reconstructions et simulations

- traceurs dans l'océan : (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr,) Ge/Si
- modèle d'érosion : GEM-CO₂

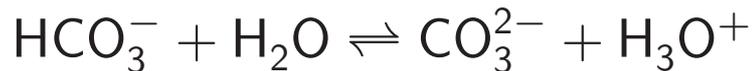
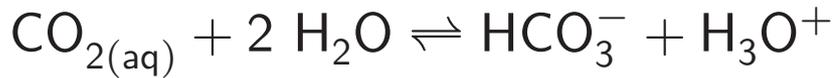
5. Conclusions et perspectives futures

Cycle du carbone actuel et préindustriel



Chimie des carbonates en milieu marin

Équilibres chimiques du système carbonate



Rôles particuliers de différentes espèces

- p_{CO_2} atmosphérique $\longleftrightarrow [\text{CO}_{2(\text{aq})}]_{\text{surface}}$
- dépôt de CaCO_3 $\longleftrightarrow [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{profond}}$

Spéciation calculée à partir de combinaisons

- Carbone Inorganique Dissous

$$C_T = [\text{CO}_{2(\text{aq})}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

- Alcalinité Totale

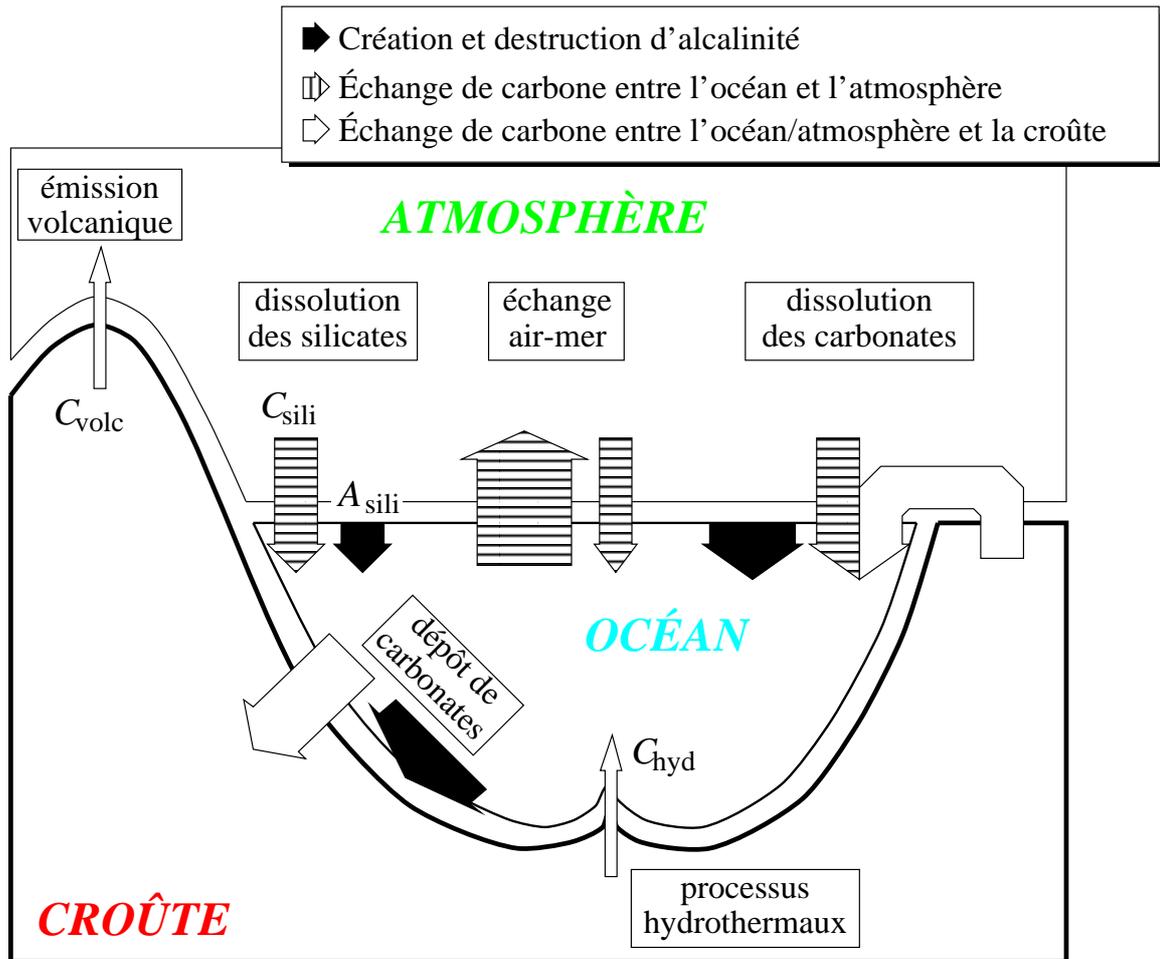
$$A_T \simeq [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}_3\text{O}^+]$$

Règles générales

$$C_T \xrightarrow{\oplus} p_{\text{CO}_2} \qquad C_T \xrightarrow{\oplus} [\text{CO}_3^{2-}]$$

$$A_T \xrightarrow{\ominus} p_{\text{CO}_2} \qquad A_T \xrightarrow{\oplus} [\text{CO}_3^{2-}]$$

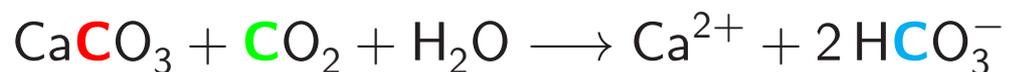
Rôle de l'érosion continentale dans le cycle du carbone



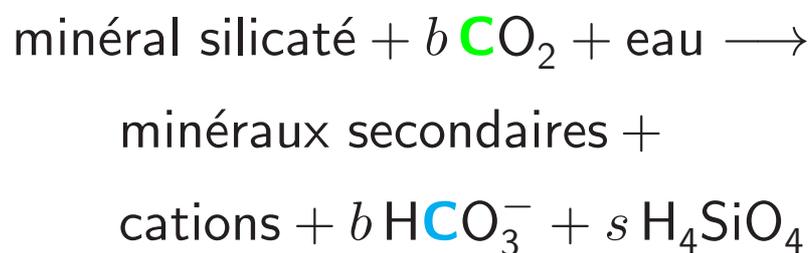
Sources et puits de carbone inorganique dissous et d'alcalinité pour l'océan

Sources : érosion continentale

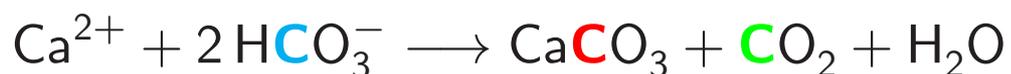
- roches carbonatées : dissolution *congruente*



- roches silicatées : dissolution *incongruente*

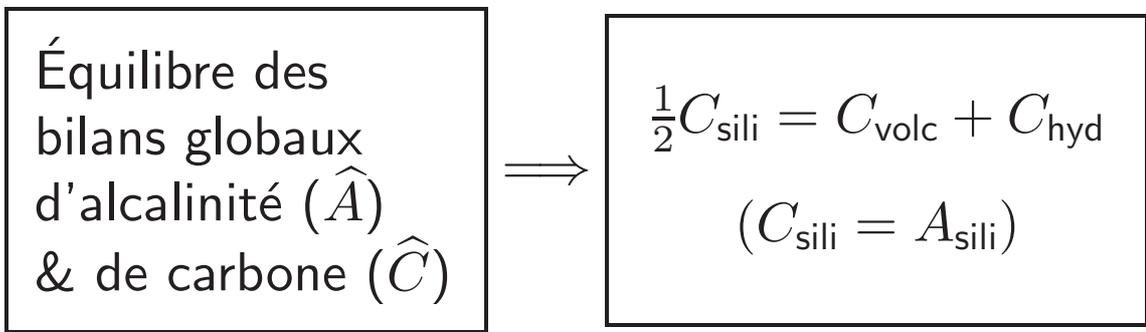


Puits : dépôt de carbonates biogéniques



Contraintes et propriétés fondamentales du système

- $\tau_{\text{carbone}} \simeq 100 \text{ ka}$ — $\tau_{\text{alcalinité}} \simeq 50 \text{ ka}$
- À long terme (typiquement $> 1 \text{ Ma}$)



- À l'échelle glaciaire-interglaciaire (10 – 100 ka) :
 - ★ contrainte respectée en moyenne
 - \implies fluctuations possibles
 - ★ activités hydrothermale et volcanique peu variables
 - ★ nouvelle contrainte

$$\frac{d\hat{A}}{dt} - 2 \frac{d\hat{C}}{dt} = C_{\text{sili}} - \overline{C_{\text{sili}}}$$

L'hypothèse d'érosion des silicates

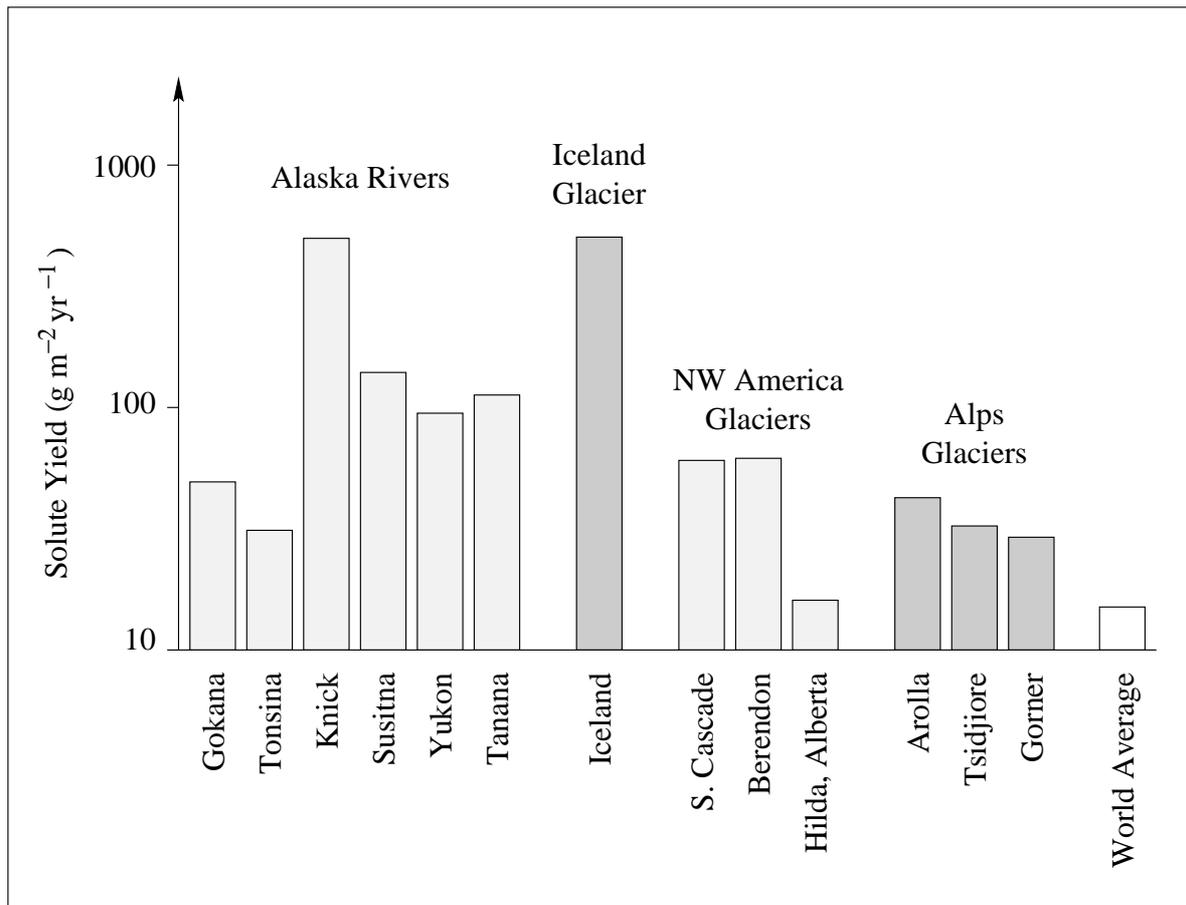
Une consommation accrue de CO_2 par les processus d'érosion, et plus spécialement d'érosion de silicates, pendant les périodes glaciaires contribue de manière significative à réduire la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

Cependant :

- grandes étendues couvertes de glace
- climat plus froid et plus sec

⇒ réduction de l'intensité générale de l'érosion

Specific Solute Yield From Glaciated Basins

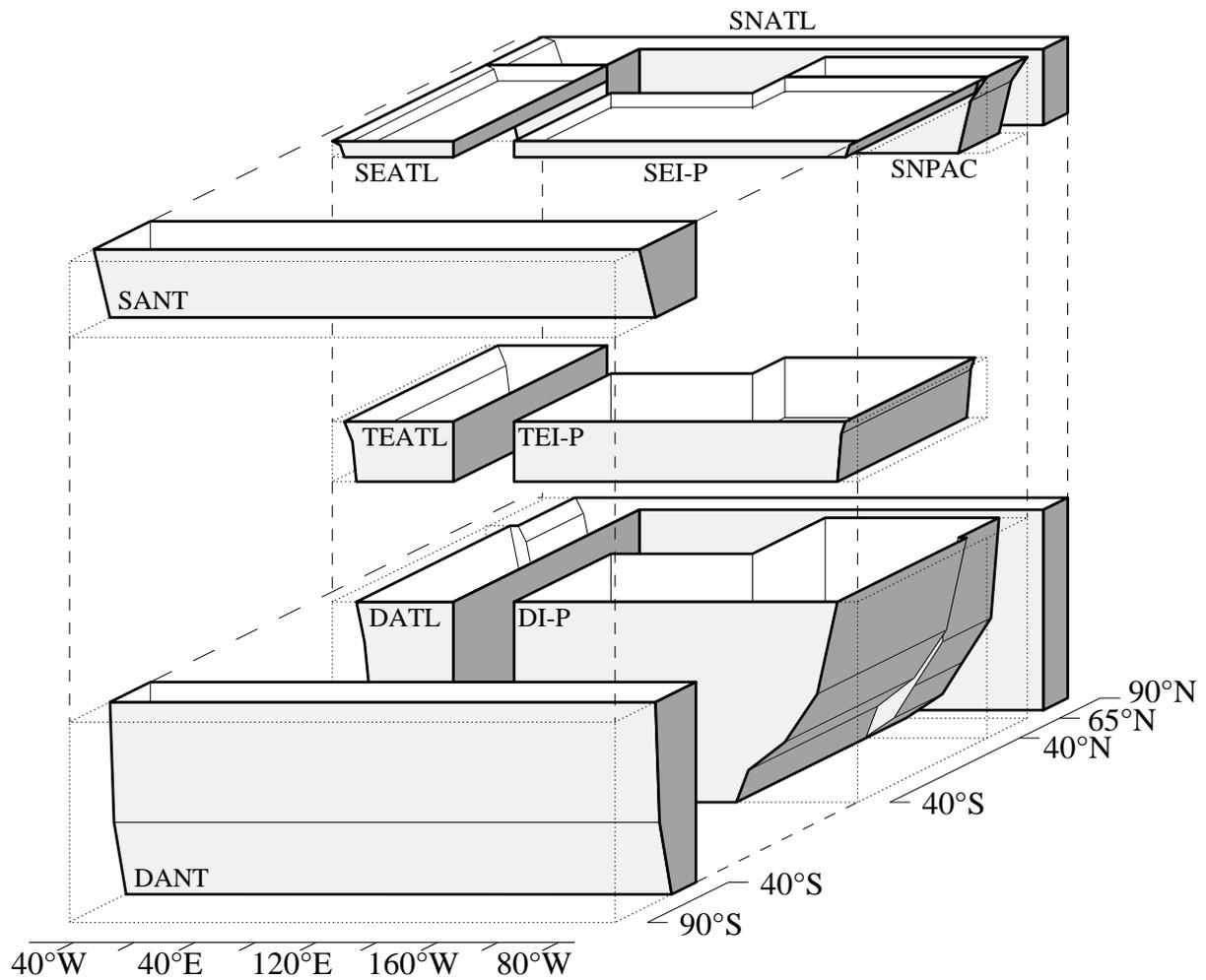


D'autre part :

- réduction de la roche en fines particules sous l'action des glaciers
- observation : production spécifique de matières dissoutes sur bassins partiellement glacés supérieure à la moyenne

⇒ effet net difficile à prévoir

Modèle du cycle du carbone océanique



Atlantique

Antarctique

Indo-Pacifique

Caractéristiques du modèle

Configuration

- Volumes et salinités :
niveau de la mer & 5 profils hypsométriques
- Niveau de la mer $\div \Delta\delta^{18}\text{O}$ (SPECMAP)
- Températures selon reconstructions

Traceurs modélisés

- C_T – Carbone inorganique dissous
- A_T – Alcalinité totale
- PO_4 – Phosphate
- O_2 – Oxygène
- p_{CO_2} – CO_2 atmosphérique
- $\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$

Circulation océanique

- dérivée de champs d'OGCM (Hamburg)
- calibrée sur distribution de $\Delta^{14}\text{C}$

Flux de matière

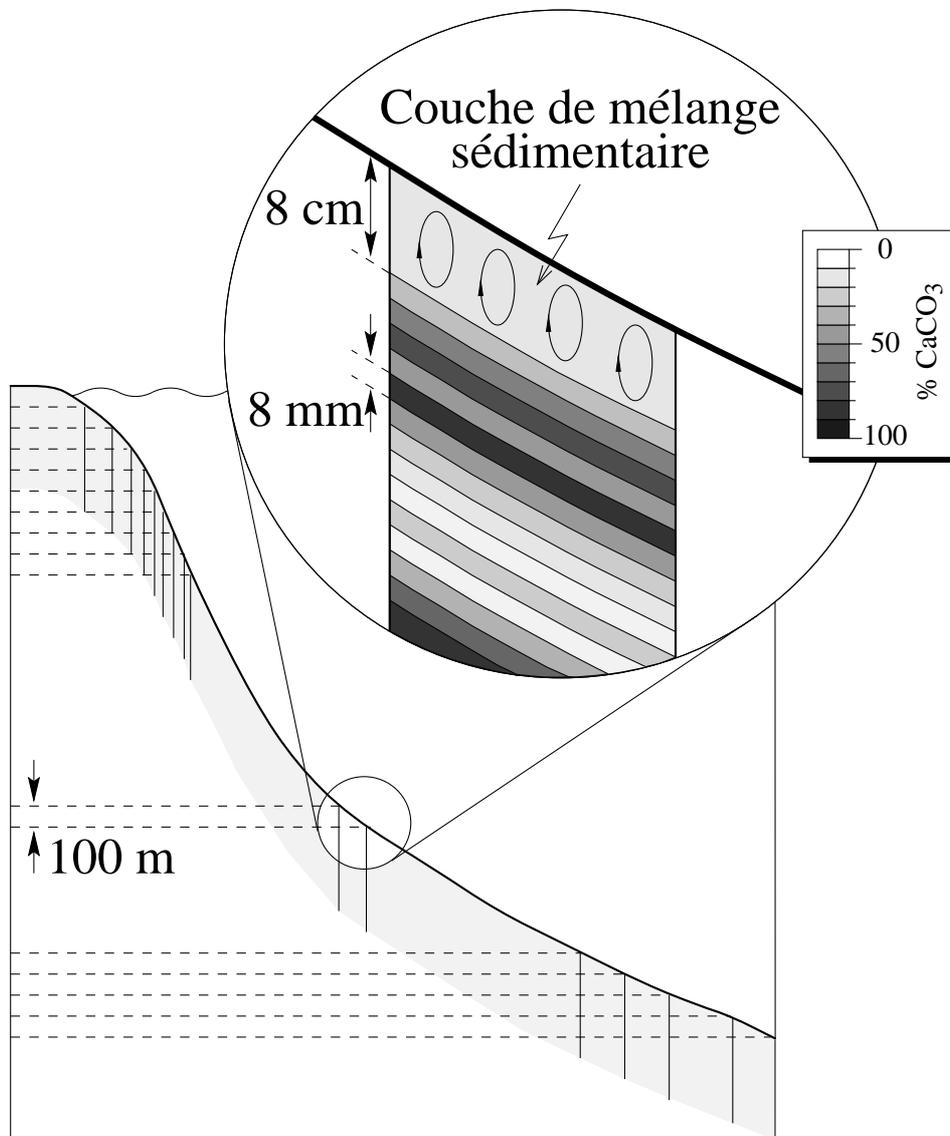
Flux de matière organique

- Surface → Thermocline et Profond :
proportionnel à $\mathcal{F}_{\text{PO}_4}$ entrant en Surface
- reminéralisation complète dans
les réservoirs Thermoclines et Profonds
- suivant C/N/P = 106/16/1

Flux de carbonate

- Marges continentales
 - Récifs de corail :
 - * profondeur < 100 m
 - * vitesse de variation du niveau de la mer
 - * $7,0 \times 10^{12}$ mol CaCO₃/an (0–5000 ans AP)
 - Bancs et marges :
 - * ÷ surface immergée
 - * $7,5 \times 10^{12}$ mol CaCO₃/an (0–5000 ans AP)
- Océan ouvert
 - production ÷ production organique
 - Profond : dissolution/accumulation déterminées
par *Modèle de colonne sédimentaire*

Modèle de colonne sédimentaire



Reconstructions et simulations

Approche par traceurs marins

I. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'eau de mer

- utilisé pour Cénozoïque et Phanérozoïque
- données problématiques

Résultats et conclusions

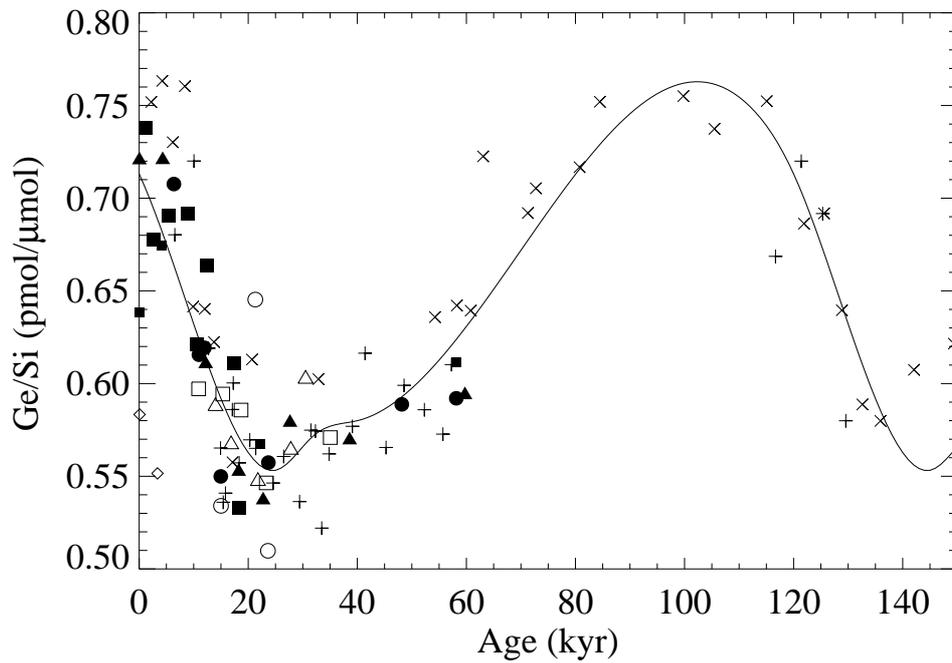
- érosion des silicates processus non négligeable pour CO_2 atmosphérique
- caractérisation des produits d'érosion des silicates par $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ insuffisante
⇒ possibilité de construire un scénario d'érosion en accord avec CO_2 de Vostok et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Mais :

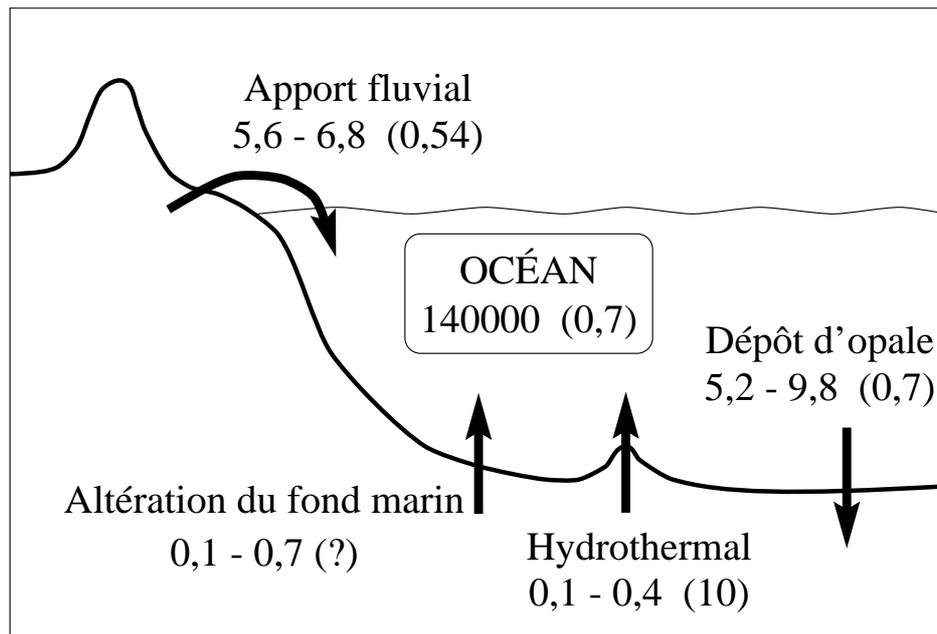
- Données retirées pour cause de non-reproductibilité

II. Ge/Si de l'eau de mer

Ge/Si : Variations glaciaires-interglaciaires



Cycles océaniques de Ge et Si



Taille de réservoir : 10^{12} mol Si (Ge/Si: 10^{-6} mol/mol)

Flux : 10^{12} mol Si/an (Ge/Si: 10^{-6} mol/mol)

Ge/Si marin — méthodologie

- Interprétation de $(\text{Ge}/\text{Si})_{\text{opale}}$
 - ★ fractionnement biologique (-20% , 0%)
 - ★ accumulation d'opale (taux const., temps de résid. const.)
 - ★ variations du drainage (-20% , 0% , $+20\%$)
 - ★ $(\text{Ge}/\text{Si})_{\text{hyd}}$ (5×10^{-6} , 10×10^{-6} , 20×10^{-6} ,)

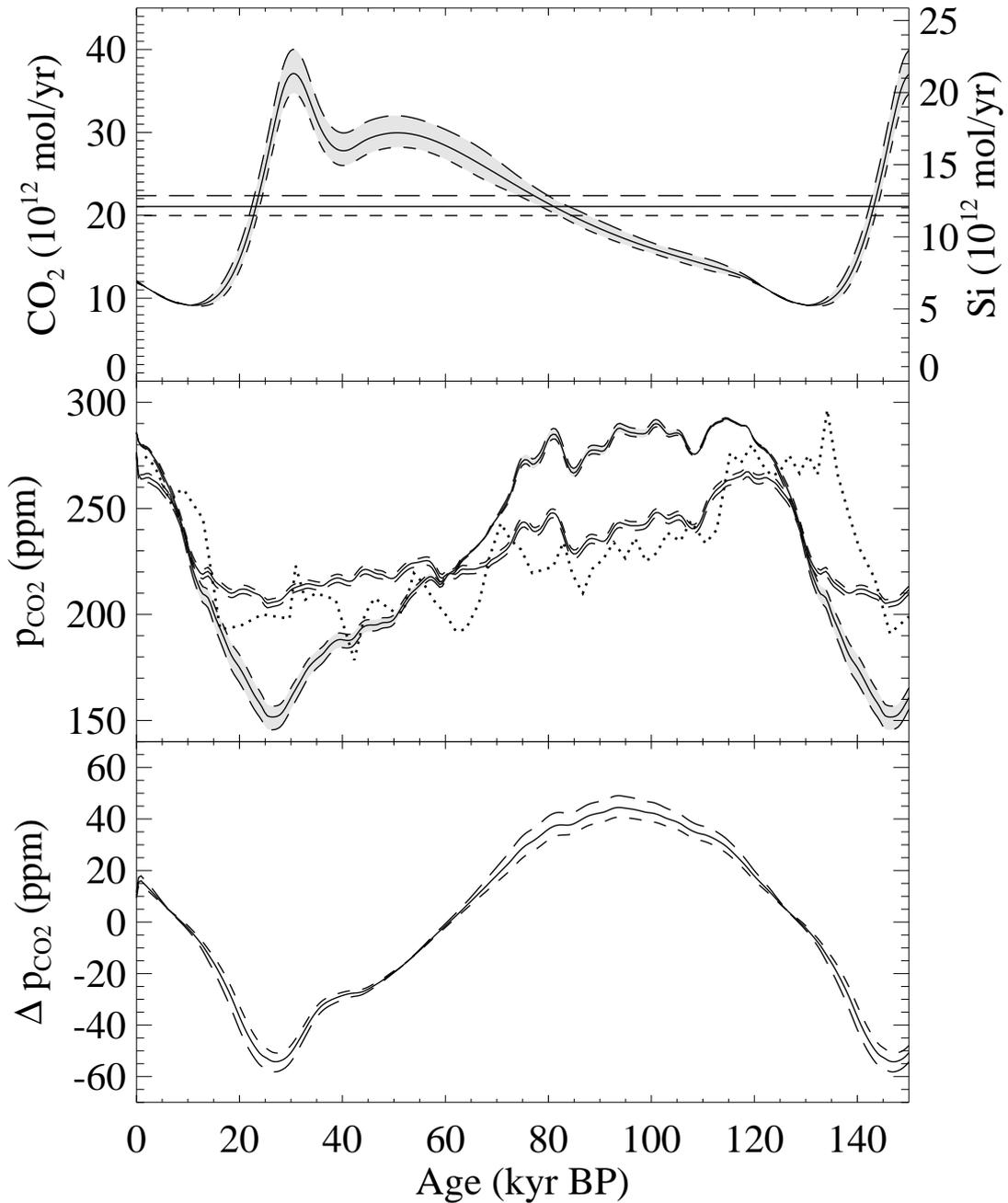
⇒ apport fluvial 2 – 3,5 fois plus important au LGM que maintenant
- Conversion *Flux de Si* → *Flux de HCO_3^-*

Étude de la relation

$$\text{intensité d'érosion} \longleftrightarrow [\text{HCO}_3^-]_{\text{sili}} / [\text{H}_4\text{SiO}_4]$$
 - ★ moyenne globale : $1,76 \pm 0,10$
 - ★ Amazone : 1,04 – 1,10
 - Congo/Zaire : 0,55
 - ★ ⇒ zones tempérées et froides : $\sim 3,2$

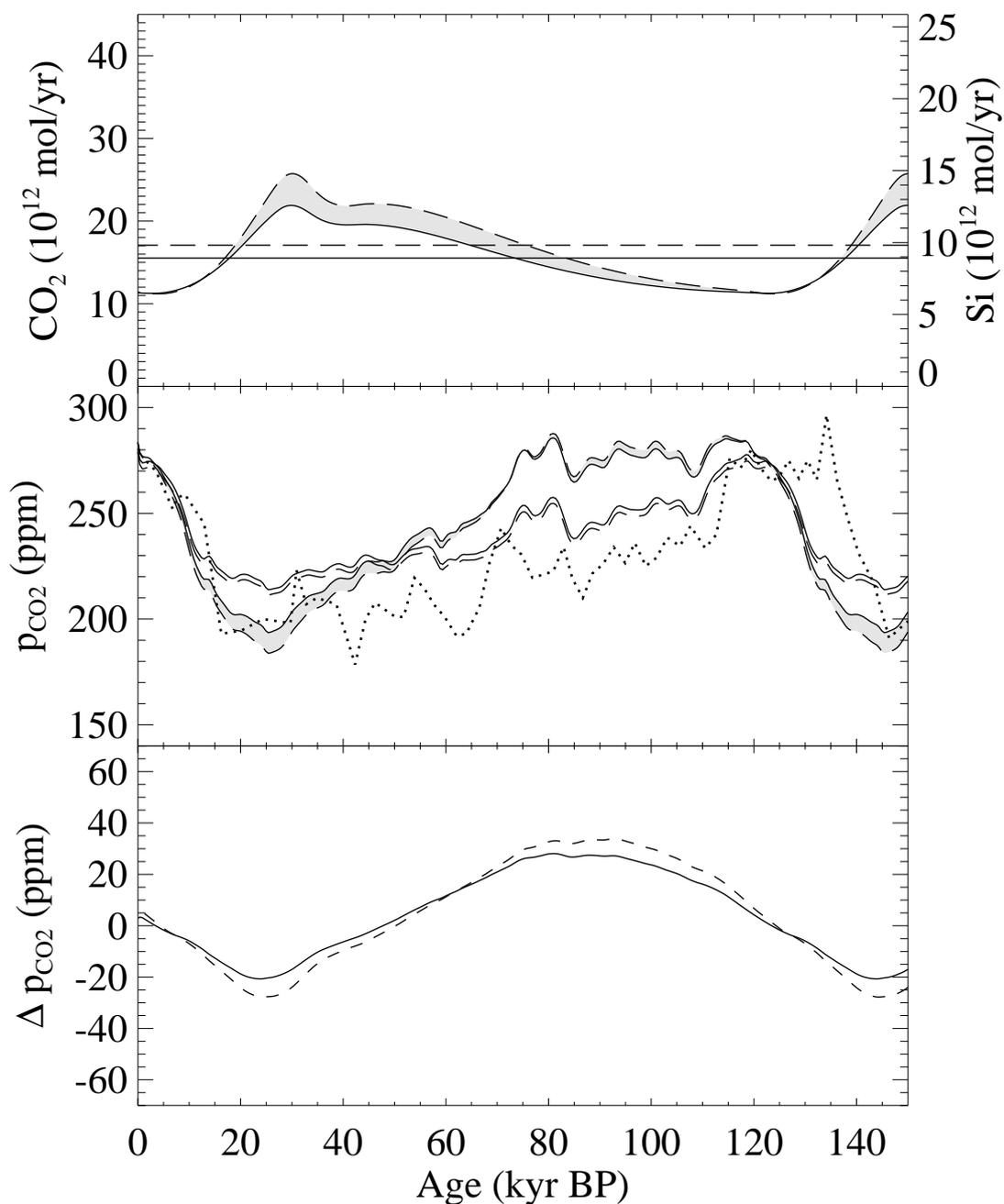
Approche choisie : $[\text{HCO}_3^-]_{\text{sili}} / [\text{H}_4\text{SiO}_4] \equiv 1.76$

Reconstruction Ge/Si — Résultats



Inversion avec $\tau = 20000$ ans,
sans fractionnement biologique,
variation du drainage de -20 , 0 ou $+20\%$

Reconstruction Ge/Si — Résultats (II)



Inversion à accumulation constante ou $\tau = 20000$ ans,
avec fractionnement biologique de -20% ,
à drainage constant

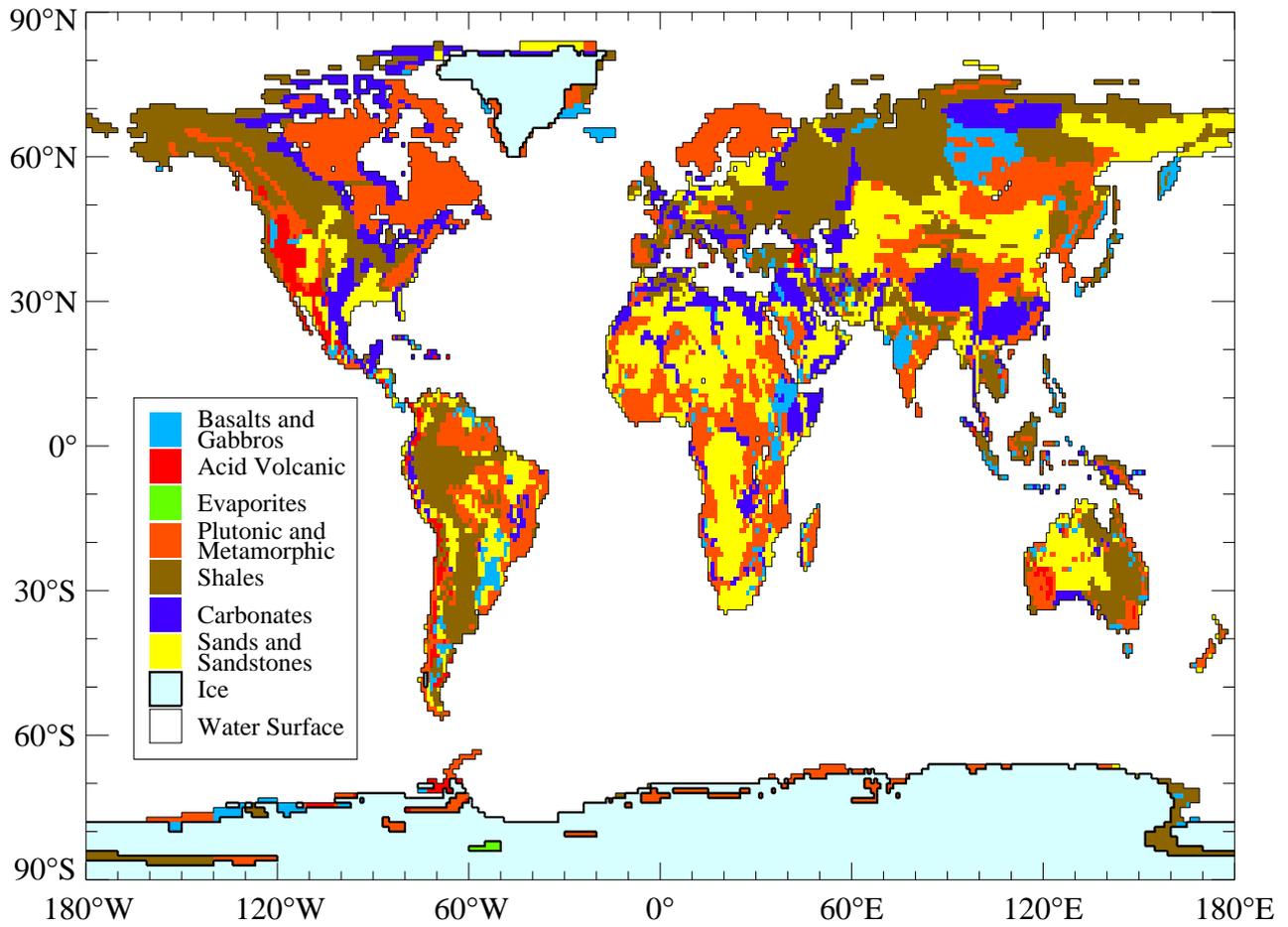
Reconstructions et simulations

Modèle d'érosion GEM-CO₂

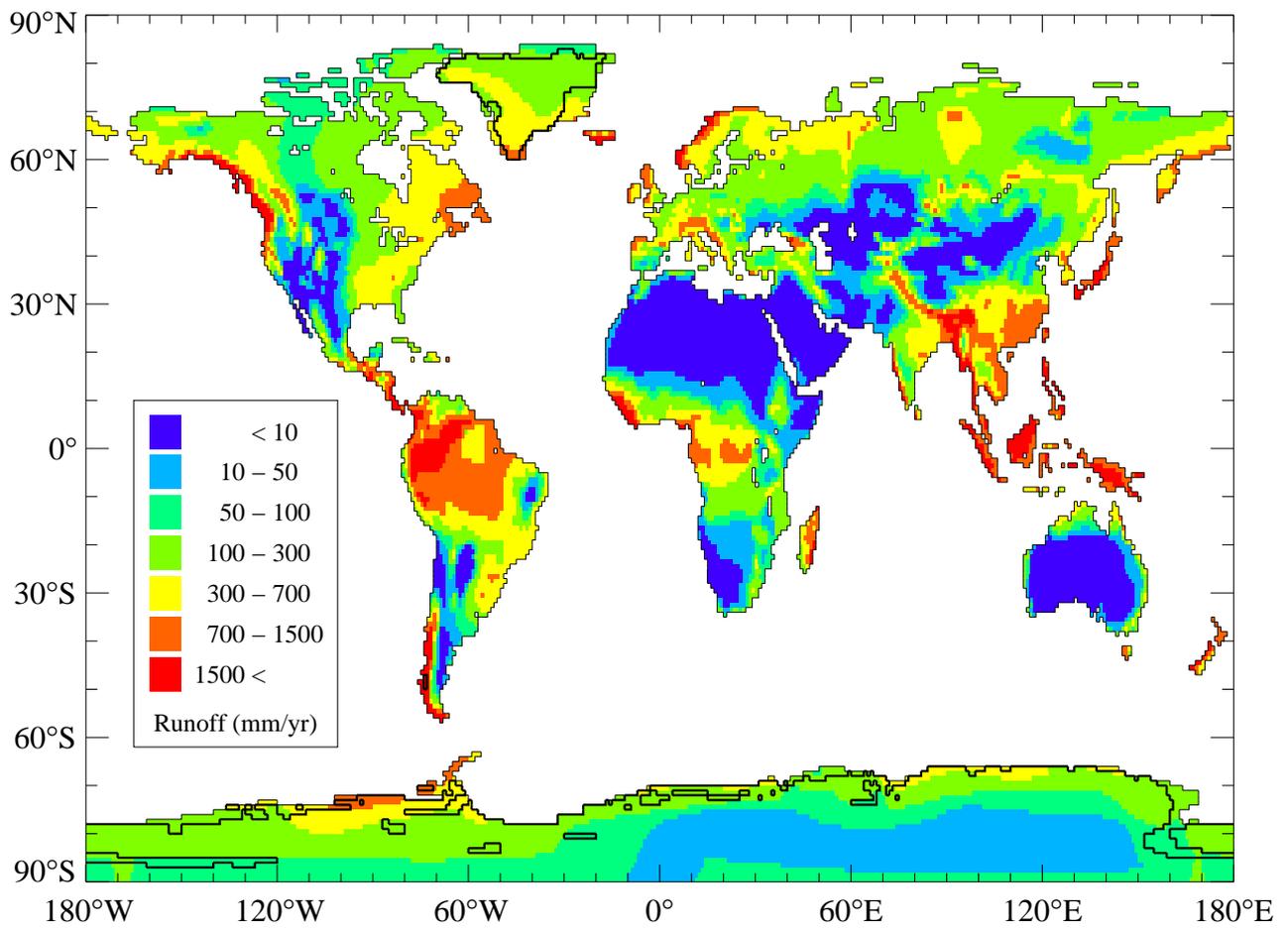
GEM-CO₂ – Global Erosion Model for CO₂ fluxes

- Calcule la consommation de CO₂ atmosphérique et le transfert de HCO₃⁻ correspondant en fonction
 - du type de roche affleurante
 - de l'intensité du drainage
- Problèmes à résoudre pour l'application au Dernier Maximum Glaciaire
 - adaptation de la lithologie actuelle aux conditions géographiques appropriées (glace, marges continentales)
 - reconstruction de l'intensité du drainage

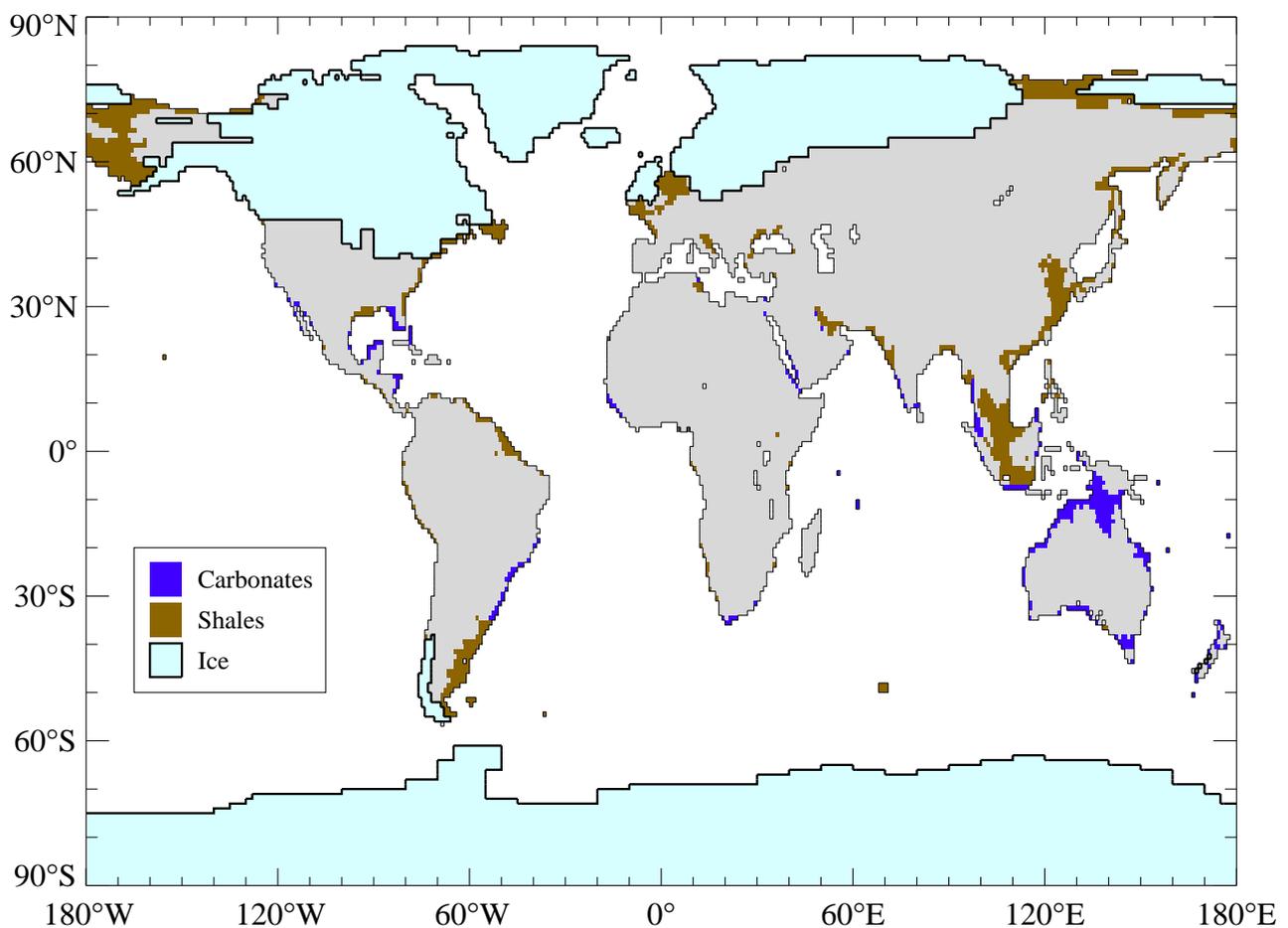
Lithologie actuelle



Drainage UNESCO



Lithologie des marges continentales et couverture de glace au dernier maximum glaciaire



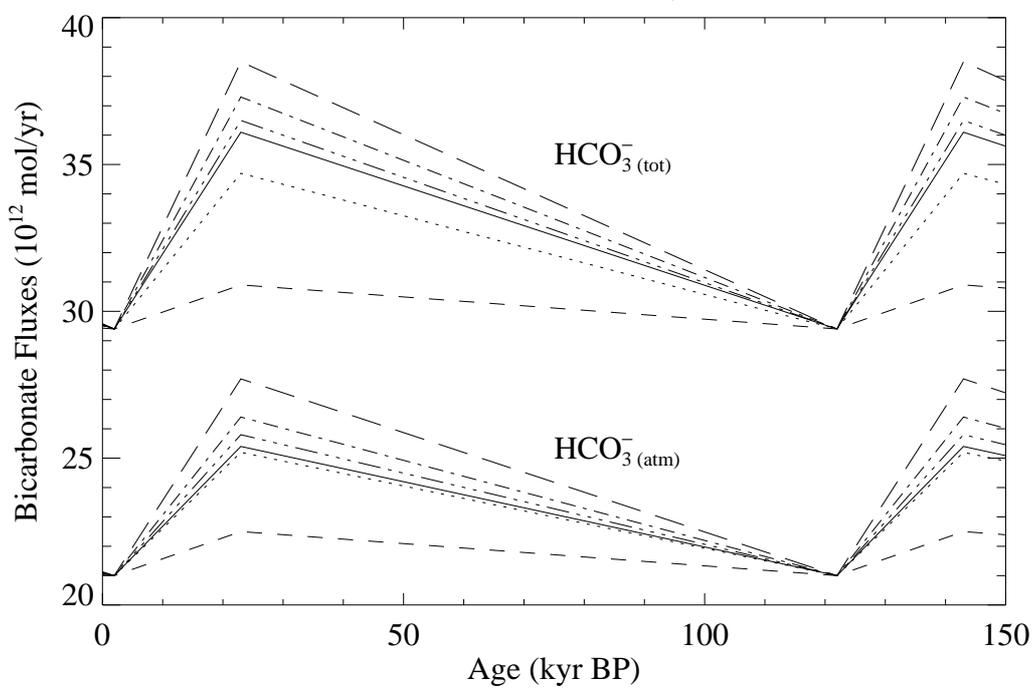
Reconstruction du drainage

Méthodologie

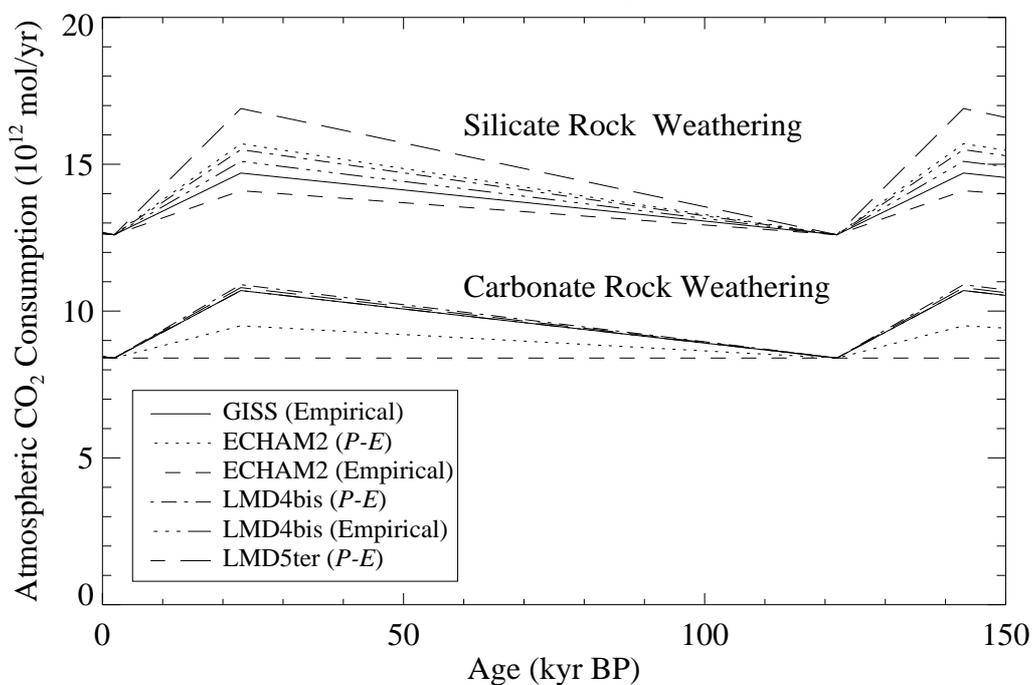
- Contraintes observationnelles → tendances
- Climatologies de GCM : GISS, ECHAM2, LMD4bis, LMD5ter
- 2 méthodes utilisées pour obtenir des distributions de drainage à partir des climatologies de GCM
 - $D^{\text{GCM}} = P^{\text{GCM}} - E^{\text{GCM}}$
 - modèle empirique reliant le drainage à
 - * saisonnalité des précipitations
 - * température
 - * morphologie
 - ⇒ $D^{\text{GCM}} = \text{fct}(P^{\text{GCM}}, T^{\text{GCM}}, \text{param. de terrain})$
- $$\Delta D = D^{\text{GCM}}(\text{LGM}) - D^{\text{GCM}}(\text{Actuel})$$
$$D(\text{LGM}) = D(\text{Actuel}) + \Delta D$$
- GEM-CO₂ → HCO₃⁻_(atm) & HCO₃⁻_(tot) au LGM

Apport de bicarbonate par les rivières

Contribution atmosphère/lithosphère

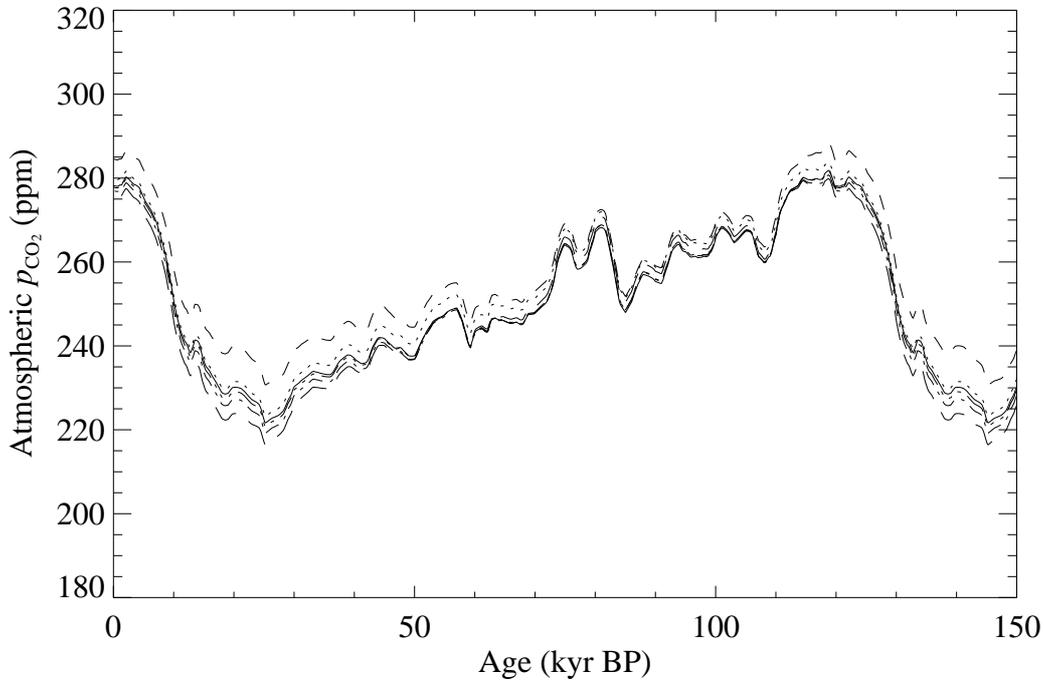


Contribution silicates/carbonates

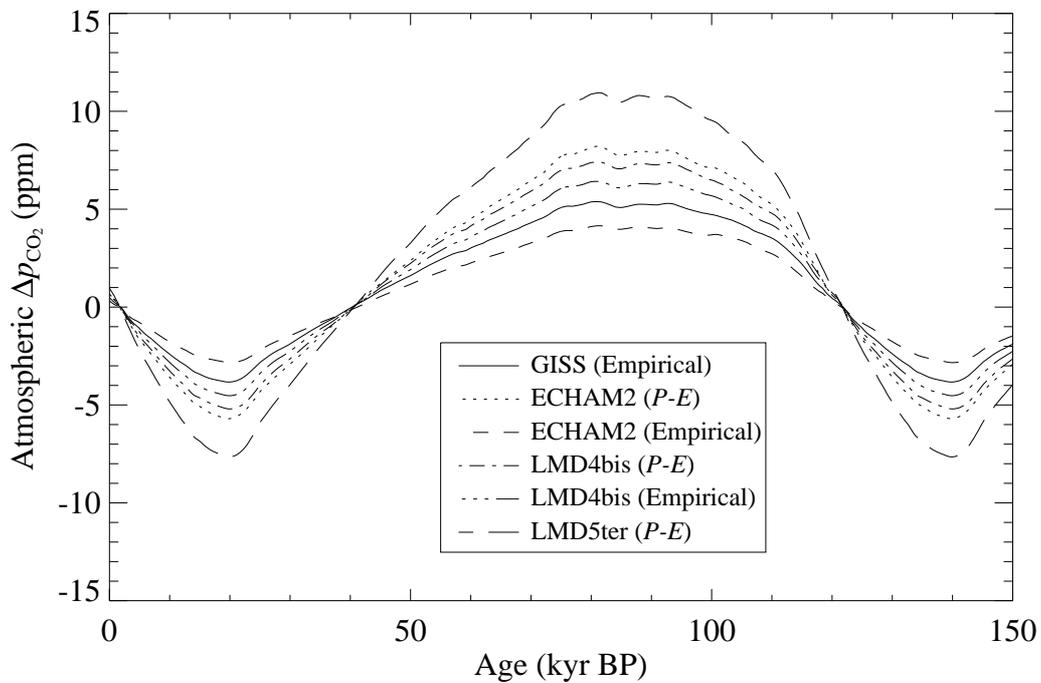


GEM-CO₂ — Résultats

Évolution du CO₂ atmosphérique



Contribution nette de l'érosion des silicates



Conclusions et perspectives futures

- Développement d'un modèle du cycle du carbone océanique
- Test d'une nouvelle hypothèse pour expliquer les variations glaciaires-interglaciaires de CO_2 atmosphérique

Hypothèse d'érosion des silicates

- Deux méthodes pour la reconstruction de la consommation de CO_2 et de la production de HCO_3^-
 - interprétation de traceurs marins
 - modèle d'érosion des continents
- Résultats très contrastés
- Perspectives
 - étude quantitative de l'érosion par les glaciers
 - étude systématique de $[\text{HCO}_3^-]_{\text{sili}}/[\text{H}_4\text{SiO}_4]$
 - amélioration du modèle