

TD 1. La coévolution Terre/Vie: exemple de la coévolution de la productivité primaire et de la géosphère

1. L'évolution précambrienne de la productivité primaire

1.1. Le message du $\delta^{13}\text{C}$

- Définissez les mots "isotope" et "fractionnement isotopique".
- Donnez l'expression du $\delta^{13}\text{C}$.
- D'après la **Figure 1**, commentez l'allure générale du $\delta^{13}\text{C}$ moyen dans les carbonates et dans la matière organique. Par quel processus le carbone est-il fixé dans les cellules photosynthétiques et quelle enzyme fondamentale est en jeu dans ce mécanisme? Comment expliquez-vous le fractionnement isotopique (moyen) observé?

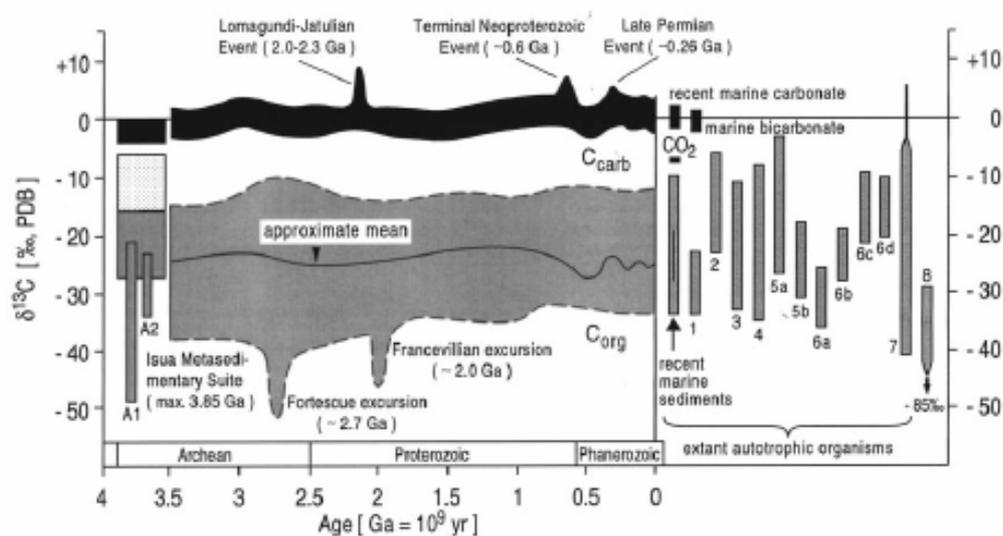


Figure 1 – Composition isotopique de carbonates sédimentaires marins (C_{carb}) et de carbone organique (C_{org}) depuis 3.8 Ga (Schidlowski, 2001).

- Le $\delta^{13}\text{C}$ des carbonatites, diamants et du carbone entrant dans la composition des basaltes de ride médio-océanique (MORB) a des valeurs typiquement comprises entre -3 et -8 ‰. En considérant que le carbone "primitif" avait un $\delta^{13}\text{C} = -5$ ‰, estimez la proportion moyenne de carbone organique présente dans les réservoirs superficiels.

- D'après la **Figure 2**, vous observez qu'en fonction du métabolisme producteur de matière organique, le fractionnement isotopique du carbone est sensiblement variable (même s'il est toujours responsable d'un $\delta^{13}\text{C}$ négatif dans la matière organique). En utilisant les valeurs reportées dans ce graphe, interprétez les deux excursions du $\delta^{13}\text{C}$, à -2.7 et -2.0 Ga.

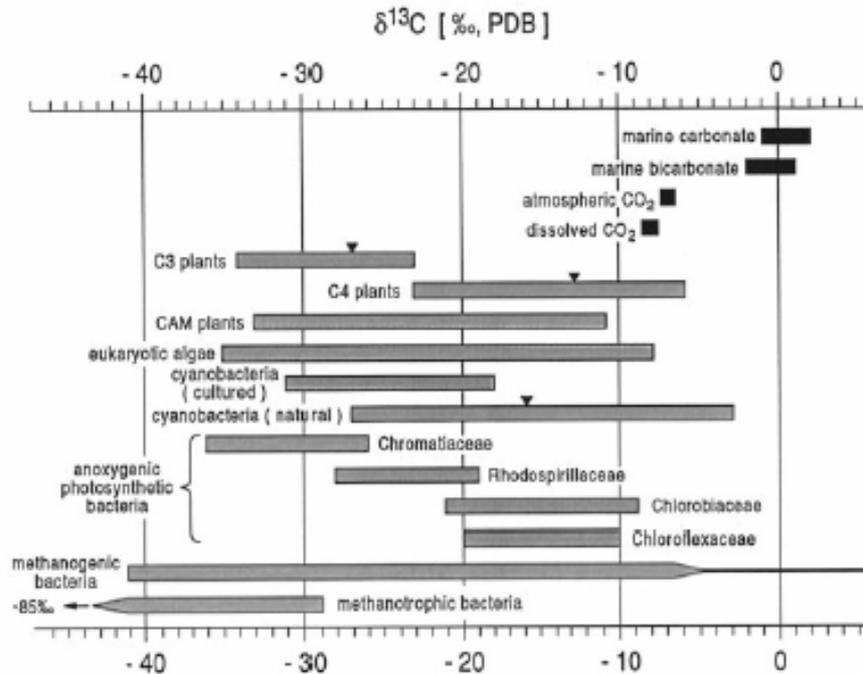


Figure 2 – Composition isotopique du carbone produit par les principaux groupes de microorganismes autotrophes et de végétaux, comparée aux signatures de carbone inorganique (en noir) (Schidlowski, 2001).

- Imaginons que la quantité de matière organique piégée double. Par quels phénomènes pourrait être expliqué ce doublement? Calculez alors la nouvelle la valeur du $\delta^{13}\text{C}$ dans les carbonates? Interprétez les trois excursions positives du $\delta^{13}\text{C}$ dans les carbonates à -2, -0.6 et -0.25 Ga. Quelle pourrait être une des conséquences sur la composition de l'atmosphère terrestre à ces époques?

1.2. Les effets de l'évolution de la productivité primaire sur l'évolution de la Terre précambrienne

- Les Banded Iron Formations (BIF) sont d'immenses gisements de fer, formés essentiellement entre -2.7 et -1.9 Ga (Fin Archéen – début Protérozoïque). Ces dépôts sédimentaires (issus de l'altération des continents) sont constitués de l'alternance de lits centimétriques à métriques riches en fer et de lits riches en silice. Les bancs riches en fer sont constitués de minéraux tels que la sidérite FeCO_3 , la magnétite Fe_3O_4 et l'hématite Fe_2O_3 . Parallèlement, des dépôts rouges, riches en hématite sont observés à partir de -2.3 Ga.

Quel est le degré d'oxydation du fer dans chacun de ces trois minéraux?
 Qu'en déduisez-vous quant à l'évolution de la composition de l'atmosphère et de la surface de la Terre au cours de cette période?

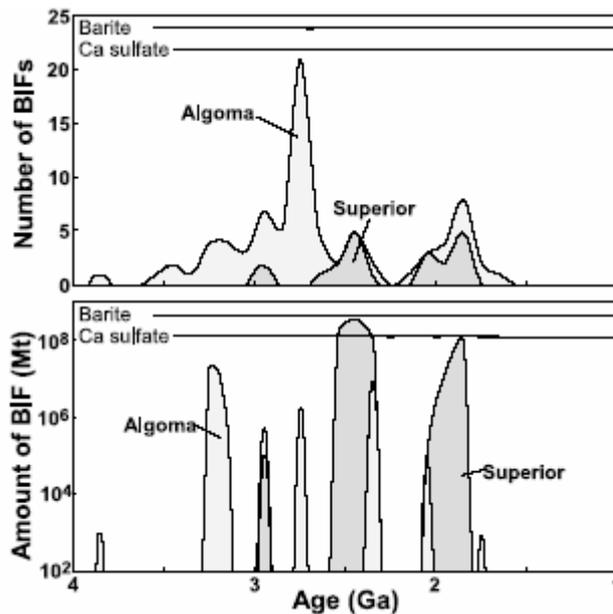


Figure 3 – Evolution du nombre et de la quantité de Banded Iron Formation entre -4 et -1 Ga (Huston and Logan, 2004).

- Quels organismes (et quel type de métabolisme) sont à l'origine de l'oxygénation de l'atmosphère terrestre?
- Quel paramètre géologique est contrôlé par le dioxygène (produit de l'activité biologique)?

2. La mise en place et l'évolution précoce de la photosynthèse

- Les premiers organismes pratiquant la photosynthèse oxygénique et responsables de l'oxygénation de l'atmosphère sont apparus il y a 3.5 Ga environ (nous verrons dans un prochain TD que les dates sont controversées). L'apparition des premiers eucaryotes photosynthétiques est datée vers -1.6 Ga (d'après le registre fossile et l'horloge moléculaire), très peu de temps après l'apparition des premiers eucaryotes et à des dates contemporaines de l'oxygénation de l'atmosphère.

Quel phénomène est invoqué pour expliquer l'apparition des plastes (et donc des eucaryotes photosynthétiques)?

- Peu de temps après ce phénomène, apparaissent des organismes dont les représentants actuels possèdent des plastes à 3 ou 4 membranes. Par quel phénomène est expliquée l'apparition de ces organites ?

3. L'évolution du phytoplancton eucaryote depuis le Jurassique

Le phytoplancton est actuellement responsable de 45% de la productivité primaire sur Terre. L'étude de l'évolution de la productivité primaire sur Terre nécessite donc de regarder de plus près ce réservoir en relation avec l'évolution des différents réservoirs de la géosphère.

3.1. L'évolution de la géosphère a guidé l'évolution récente du phytoplancton

- La **Figure 4** présente l'évolution du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ moyens enregistrés dans les sédiments depuis le Jurassique jusqu'à l'actuel. Sans tenir compte des 20 derniers Ma, quelle est la tendance générale de ces deux courbes? En vous souvenant des résultats du **1.**, formulez des hypothèses pouvant expliquer cette tendance.

Nous allons examiner successivement ces deux hypothèses:

1- Le phytoplancton est actuellement responsable de 45% de la productivité primaire sur Terre. Depuis environ 240 Ma (milieu du Trias), il est dominé par trois groupes: les diatomées, les coccolithophoridés et les dinoflagellés (**Figure 5**).

Quelles sont les caractéristiques communes à ces trois organismes? Lequel de ces trois groupes devient prédominant à partir de - 60 Ma environ? Quel biominéral est produit par ce groupe? Quel avantage évolutif peut représenter ce type de biominéralisation? Quel est finalement l'impact de cette innovation biologique sur le flux de carbone organique?

2- Examinons maintenant la seconde hypothèse. D'après la reconstitution paléogéographique donnée en **Figure 6**, quels événements tectoniques remarquables se déroulent entre -200 et -65 Ma? D'après la **Figure 5**, comment évolue le niveau marin au cours de cette période? Quels sont les effets de ces deux types de phénomènes (tectonique et variation du niveau marin) sur la productivité primaire et le devenir de la matière organique produite par le phytoplancton?

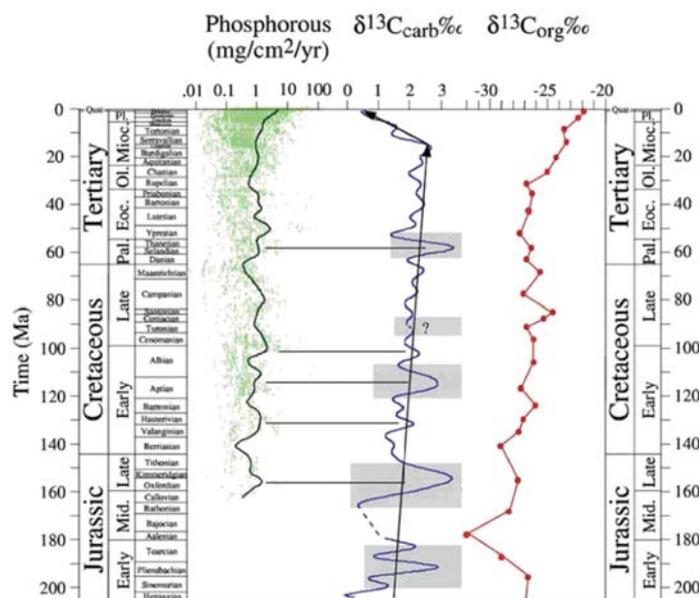


Figure 4 – Comparaison de l'évolution du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ depuis le Jurassique. Flux de phosphore moyen au cours de cette période (Katz et al., 2004).

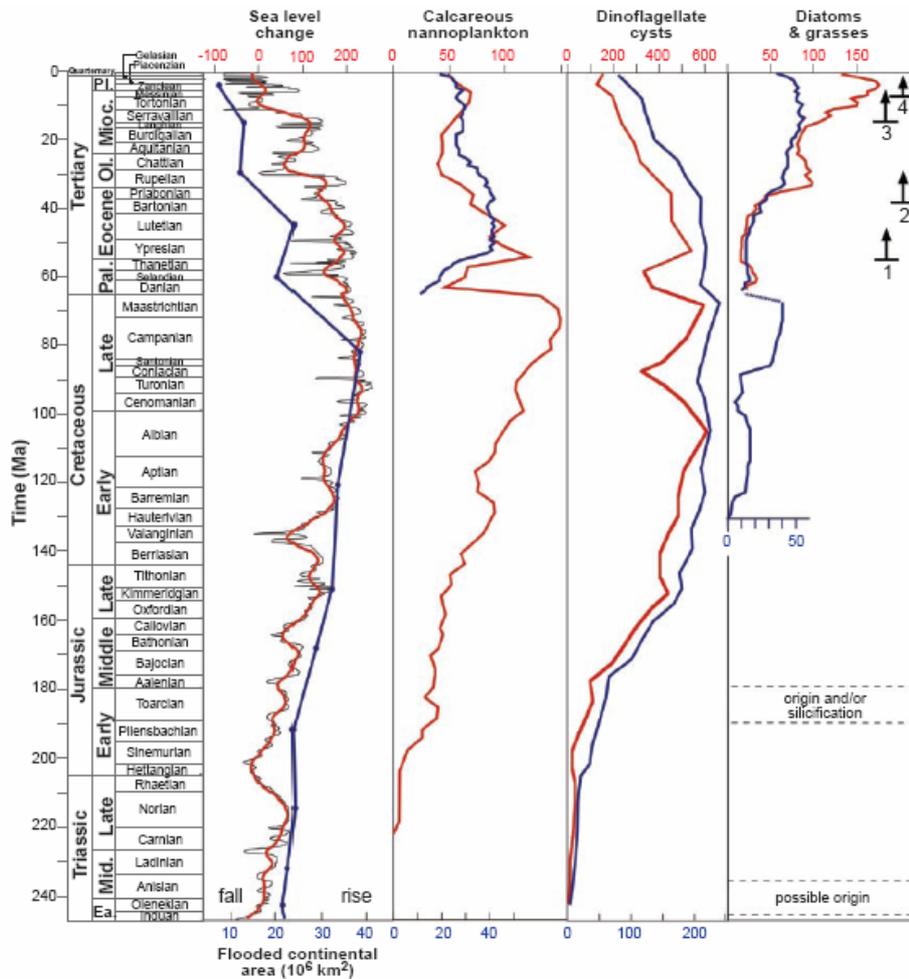
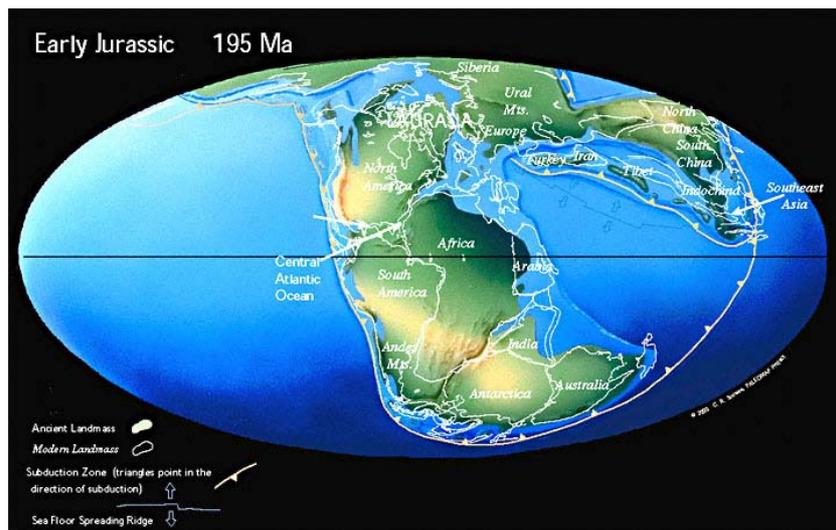


Figure 5 – Comparaison des courbes de diversité du phytoplancton eucaryote (espèces en rouge et genres en bleu) avec les variations du niveau marin, les aires continentales inondées et l'évolution des herbes. (1, 2: apparition et évolution des herbes en C3; 3, 4: apparition et évolution des herbes en C4) (Flakowski et al., 2004).



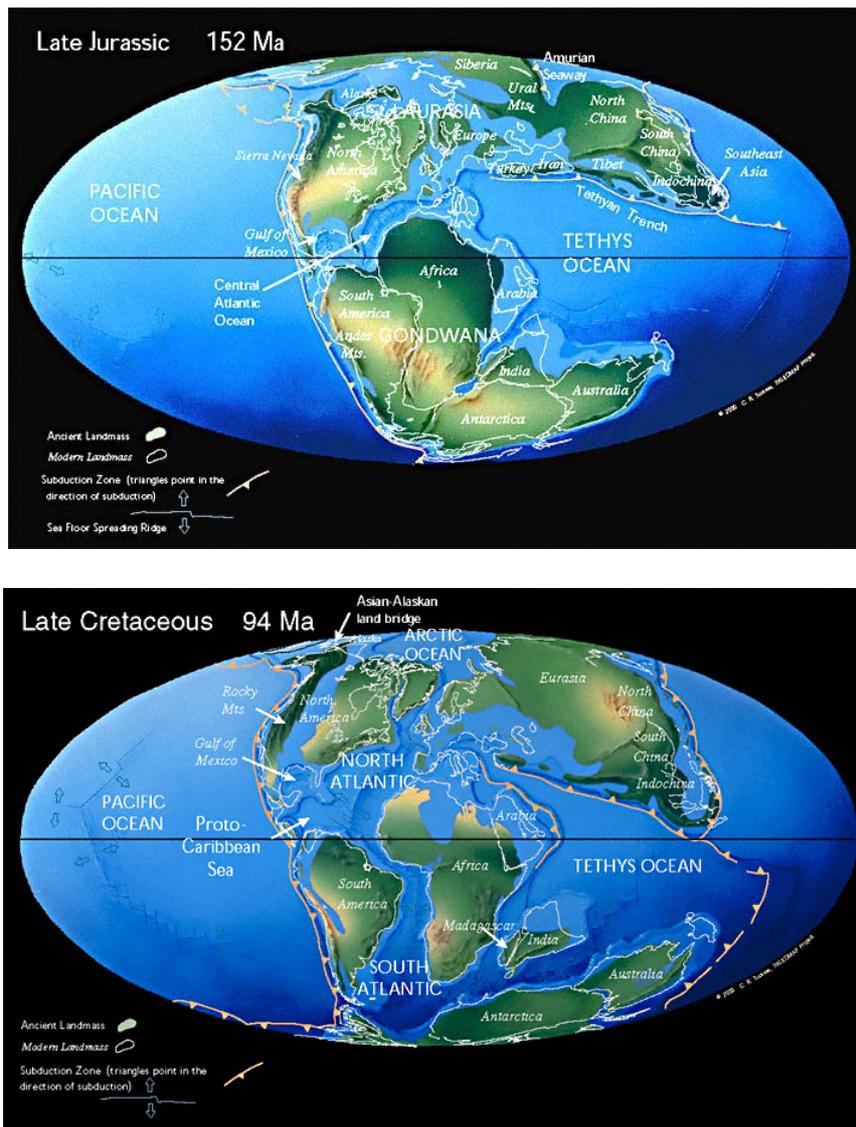


Figure 6 – Evolution de la paléogéographie du Jurassique au Crétacé (d'après Scotese – www.scotese.com).

3.2. L'évolution récente du phytoplancton rétroagit sur les caractéristiques physico-chimiques de la surface de la Terre ...

- Quelles sont les conséquences de l'évolution récente du phytoplancton sur l'évolution globale de la p_{CO_2} atmosphérique et sur la température de surface de la Terre depuis 200 Ma? Quels autres événements géologiques ont pu participer à cette tendance?

3.3. ... et agit également sur l'évolution de la biosphère continentale

Revenons sur l'évolution des systèmes photosynthétiques, au cours du Mésozoïque cette fois:

-Dans les plantes en C3, la Rubisco (ribulose, 1,5 biphosphate carboxylase oxygénase) fixe le carbone ET l'incorpore dans des composés en C3 via le cycle de Calvin. Ses propriétés de carboxylase ET oxygénase font qu'elle est peu spécifique de la fixation du carbone.

Dans quelles conditions de p_{CO_2} (faible p_{CO_2} ou forte p_{CO_2}), la fixation de carbone par cette enzyme est-elle donc privilégiée?

-Dans les plantes en C4, les étapes de fixation et d'incorporation du carbone sont découplées (dans l'espace). La première étape a lieu dans les cellules du mésophylle, où le carbone est fixé non pas par la Rubisco mais par la PEP carboxylase (phospho-enol pyruvate carboxylase). Le carbone est ensuite incorporé au cycle de Calvin par la Rubisco dans les cellules de la gaine périvasculaire. La PEP carboxylase est spécifique de la fixation du carbone et ne fixe pas l'oxygène.

Vous observez sur la **Figure 5** (flèches numérotées 3 et 4) que la photosynthèse en C4 est apparue et s'est développée à partir du Miocène. Comment expliquez-vous cette évolution (quelle pression sélective a pu contribuer à retenir ce type de photosynthèse)?

En utilisant la **Figure 2**, proposez une hypothèse expliquant l'évolution du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ depuis 20 Ma observée en **Figure 4**.