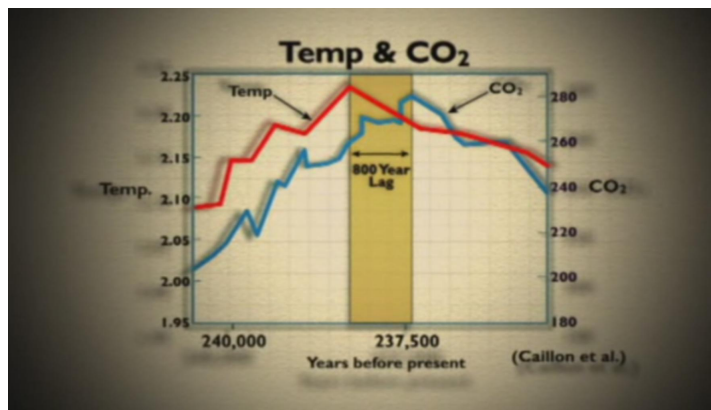


# CORRÉLATION CO<sub>2</sub>-TEMPÉRATURE DANS LE PASSÉ ET LE PRÉSENT

Isabelle Gouttevin et Georg Teiser

9 décembre 2008



## Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>La corrélation CO2-température dans le passé</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1      | Méthodes et incertitudes . . . . .   | 4         |
| 2.2      | Quelles carottes utiliser ? . . . . .  | 4         |
| 2.3      | Résultats . . . . .  | 5         |
| <b>3</b> | <b>Le rôle du CO2 dans les variations climatiques passées</b>  | <b>8</b>  |
| 3.1      | L'augmentation de CO2 lors des déglaciations est la conséquence d'une hausse des températures via des processus océaniques . . . . . | 8         |
| 3.2      | Mais le CO2 a amplifié les variations climatiques initiées par des facteurs orbitaux . . . . .                                       | 11        |
| <b>4</b> | <b>Le CO2 peut-il donc causer un réchauffement climatique aujourd'hui ?</b>  | <b>13</b> |
| 4.1      | Le CO2 a contribué à la dernière déglaciation de l'hémisphère nord . . . . .   | 13        |
| 4.2      | Le CO2 serait à l'origine de climats plus chauds dans le passé . . . . .   | 13        |
| 4.3      | À circonstances différentes, causalités différentes . . . . .  | 14        |
| 4.4      | L'argument des modèles . . . . .   | 15        |
| <b>5</b> | <b>Conclusion</b>  | <b>17</b> |

## 1 Introduction

Dans son film *An inconvenient truth*<sup>1</sup>, Al Gore insiste sur la complexité de la relation température-CO<sub>2</sub>. S'appuyant sur le graphe figure 1, il dégage cependant le phénomène suivant : "when there is more carbone dioxyde, the temperature gets warmer".

Les auteurs de *L'arnaque du réchauffement climatique*<sup>2</sup> s'attaquent à la relation de causalité sous-entendue par ce discours : Al Gore veut amener son public à croire que par le passé, l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a induit des augmentations de température. Or selon les professeurs Ian Clarck<sup>3</sup> et Frederick Singer<sup>4</sup>, qui témoignent dans *l'Arnaque du réchauffement climatique*, la courbe d'évolution du CO<sub>2</sub> suit celle de la température avec un retard de 800 ans lors des variations climatiques passées. Le CO<sub>2</sub> ne peut donc être à l'origine de l'augmentation des températures. Au contraire, il en serait une conséquence. L'hypothèse fondamentale d'un changement climatique d'origine anthropique est ainsi remise en question (dixit Professeur Tim Ball<sup>5</sup>, *l'Arnaque du réchauffement climatique*, 21'41").

Notre étude a pour objectif de présenter les certitudes et incertitudes scientifiques actuelles relatives à la corrélation temporelle entre le CO<sub>2</sub> et la température. Nous nous pencherons dans un premier temps sur les enregistrements de température et CO<sub>2</sub> des climats passés, pour en déduire des hypothèses plausibles quant au rôle du CO<sub>2</sub> dans ces variations climatiques. À leur lumière nous analyserons l'évolution climatique actuelle.



FIGURE 1 – Extrait du film d'Al Gore : *An inconvenient truth*. En rouge et bleu, respectivement, une reconstitution de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique et de la température sur terre entre 600 et 400 mille ans dans le passé, illustrant leur corrélation.

1. Dreamworks, Director : Davis Guggenheim, Writer : Al Gore
2. Producteur : Martin Durkin
3. Department of Earth Sciences, University of Ottawa
4. Former director, new scientist
5. Department of Climatology, University of Winnipeg

## 2 La corrélation CO<sub>2</sub>-température dans le passé

### 2.1 Méthodes et incertitudes

Les paléoclimatologues utilisent les carottes de glace pour remonter aux températures et concentrations en dioxyde de carbone des climats passés. En effet, sur les 800 000 dernières années, les enregistrements glaciologiques sont globalement la source la plus précise. Au-delà, différents proxys, tirés de l'analyse de sédiments notamment, permettent d'inférer température et CO<sub>2</sub> ; cependant les incertitudes importantes rendent ridicules l'étude d'un possible déphasage entre CO<sub>2</sub> et température sur la base de ces données.

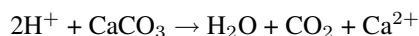
Dans une carotte de glace, la température est reliée à la composition isotopique de la glace ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) via le thermomètre isotopique. Le CO<sub>2</sub> est quant à lui mesuré dans les bulles d'air piégées dans la glace. Ces mesures permettent ainsi de remonter à la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> au moment où l'air a été emprisonné dans la glace (âge de fermeture ou *close-off*).

Des incertitudes affectent ces données, liées aux techniques de mesures et à la validité du thermomètre isotopique pour des climats différents du climat actuel. Mais la corrélation temporelle entre CO<sub>2</sub> et température pose la difficulté supplémentaire de relier, à une profondeur donnée, l'âge de la glace à l'âge des bulles d'air qui y sont enfermées, plus jeunes (ou ce qui revient au même : relier, pour un âge donné, la profondeur de la glace ayant cet âge et de l'air emprisonné ayant cet âge, plus profond). L'estimation de ce  $\Delta\text{age}$  (ou de ce  $\Delta\text{profondeur}$ ) requiert l'utilisation de modèles d'accumulation et de densification de la neige, dont la validation dans les conditions climatiques glaciaires est malaisée (Louergue et al. 2007 [11]). La synchronisation des enregistrements glaciaires de CO<sub>2</sub> et de température demeure donc entâchée d'incertitudes que nous quantifierons à la section suivante. Enfin la distribution en âges des bulles d'air à une même profondeur, liée à la physique du *close-off*, s'étend dans les conditions actuelles sur environ 300 ans à Vostok (140 ans à Taylor Dome). Elle serait multipliée par 3 dans des conditions glaciaires [10], et contraint à raisonner, à chaque profondeur, sur un âge moyenné.

Selon Callion et ses collaborateurs [7], il semble aussi possible d'utiliser la composition isotopique en <sup>40</sup>Ar de l'air piégé dans la glace comme proxy de la température. Cette méthode permet de s'affranchir de l'incertitude majeure pesant sur le  $\Delta\text{age}$  (ou le  $\Delta\text{profondeur}$ ), cependant les mécanismes à l'origine de la corrélation <sup>40</sup>Ar - température demeurent partiellement inconnus [7].

### 2.2 Quelles carottes utiliser ?

Les carottes groenlandaises apparaissent impropres à la mesure des teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique lors des transitions climatiques (R. Delmas 1993 [9]). En effet, des modifications post-dépot affectent la composition de la glace et de ses bulles d'air : concernant le CO<sub>2</sub>, la réaction de carbonates, contenus dans les poussières, avec des espèces acides de l'atmosphère (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub><sup>-</sup>) produit du CO<sub>2</sub> :



Des réactions avec des composés organiques peuvent aussi entrer en jeu.

L'Antarctique semble moins affectée par ces modifications post-dépot (Monnin et al. 2001 [12]), aussi ce sont essentiellement les carottes antarctiques qui sont utilisées pour suivre l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique lors des glaciations et déglaciations (outre le fait que les carottes groenlandaises ne fournissent pas d'enregistrements antérieurs à 120 000 ans du fait d'un fort taux d'accumulation). C'est pourquoi nous nous concentrerons sur l'étude du déphasage CO<sub>2</sub>-température à travers les enregistrements des carottes glaciaires antarctiques.

### 2.3 Résultats

En 1988, Neftel et ses collaborateurs [13] reconstituent l'évolution de la température et du CO<sub>2</sub> atmosphérique à partir des carottes de Byrd sur les 50 000 ans avant notre ère (BP pour before present ultérieurement), inférant pour CO<sub>2</sub> un retard de phase de  $700 \pm 500$  ans.

En 1999, Fischer et ses collaborateurs [10] utilisent de récents enregistrements de Vostok ( jusqu'à 250 000 ans BP) et Taylor Dome ( jusqu'à 35 000 ans BP) pour investiguer ce possible retard sur les trois derniers cycles glaciaires. Ils utilisent un modèle de densification de la neige calculant à Vostok des  $\Delta$ age de 2000 à 6000 ans pour les périodes respectivement chaudes et froides, avec une précision de 100 ans pour la période récente mais de l'ordre de 1000 ans pour les périodes glaciaires. Pour la dernière déglaciation, les concentrations de méthane des bulles d'air permettent de plus la synchronisation des enregistrements antarctiques avec ceux du Groenland, dont le  $\Delta$ age est plus faible (entre 100 et 300 ans). Cependant de nouvelles incertitudes naissent de la synchronisation des enregistrements de Taylor Dome et Vostok avec respectivement GISP 2 et GRIP, qui sont en accord entre 10 000 et 15 000 ans BP mais en désaccord autour de 20 000 ans BP.

Cette étude conclut pour les trois derniers cycles glaciaire-interglaciaire à 2 modes d'évolution distincts du climat : la transition glaciaire-interglaciaire et la transition interglaciaire-glaciaire. La première est relativement similaire pour les trois dernières terminaisons (amplitudes et extensions temporelles similaires, bonne corrélation CO<sub>2</sub>-température) et le CO<sub>2</sub> y présente un retard de 400 à 1000 ans sur la température ( figure 2), temps de l'ordre de grandeur du temps de mélange des océans dans les conditions actuelles. Au vu des incertitudes sur le  $\Delta$ age, ce décalage peut encore s'expliquer par une surestimation de  $\Delta$ age. Les transitions interglaciaire-glaciaire présentent quant à elles des relations CO<sub>2</sub>-température différentes (une décroissance du CO<sub>2</sub> à peu près en phase avec la température après Termination III ; une teneur en CO<sub>2</sub> à peu près constante après une chute de 10 ppm après Termination II alors que la température décroît lentement ; et un CO<sub>2</sub> qui continue à croître au cours de l'Holocène) ; la corrélation directe CO<sub>2</sub>-température y est moins marquée et est restaurée après plusieurs milliers d'années pour les deux premiers épisodes. Nous nous intéresserons désormais uniquement aux déglaciations, épisodes de réchauffements susceptibles de nous éclairer sur l'évolution climatique actuelle et clairement visés par l'argumentaire de *L'ar-naque du réchauffement climatique*.

La même année, Petit et ses collaborateurs [14] publient une reconstitution de la composition atmosphérique et du climat des quatre derniers cycles glaciaire-interglaciaire à partir des carottes de Vostok ( figure 3).

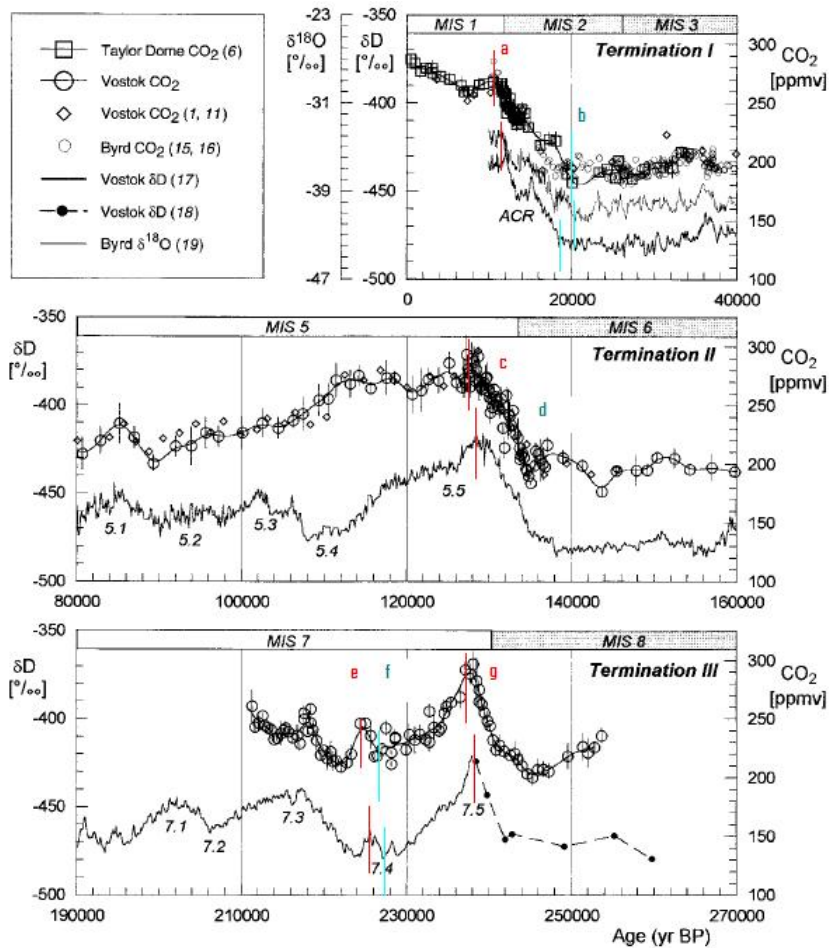


FIGURE 2 – Extrait de Fischer et al 1999. Enregistrements de concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et de température isotopique issus des forages de Byrd, Vostok et Taylor Dome. Les points où des déphasages CO<sub>2</sub>-température sont constatés et/ou estimés par Fischer et al. sont marqués par des lettres et traits colorés : **b**. Le début de l'augmentation des températures lors de Termination I semble synchrone avec l'augmentation de CO<sub>2</sub> pour le thermomètre isotopique de Byrd, en revanche la température de Vostok accuse un retard de ~ 1000 ans. **c**. Lors de Termination II le pic de concentration de CO<sub>2</sub> est atteint 400 ± 200 ans après le maximum des températures. **d**. Le début du réchauffement principal est difficile à déterminer pour Termination III. **e**. Pic de CO<sub>2</sub> à 1000 ± 600 ans après le pic de température. **f**. Minimum de CO<sub>2</sub> de 1000 à 2000 ans après le minimum de température. **g**. Maximum de CO<sub>2</sub> à 600 ± 200 ans après le maximum des températures.

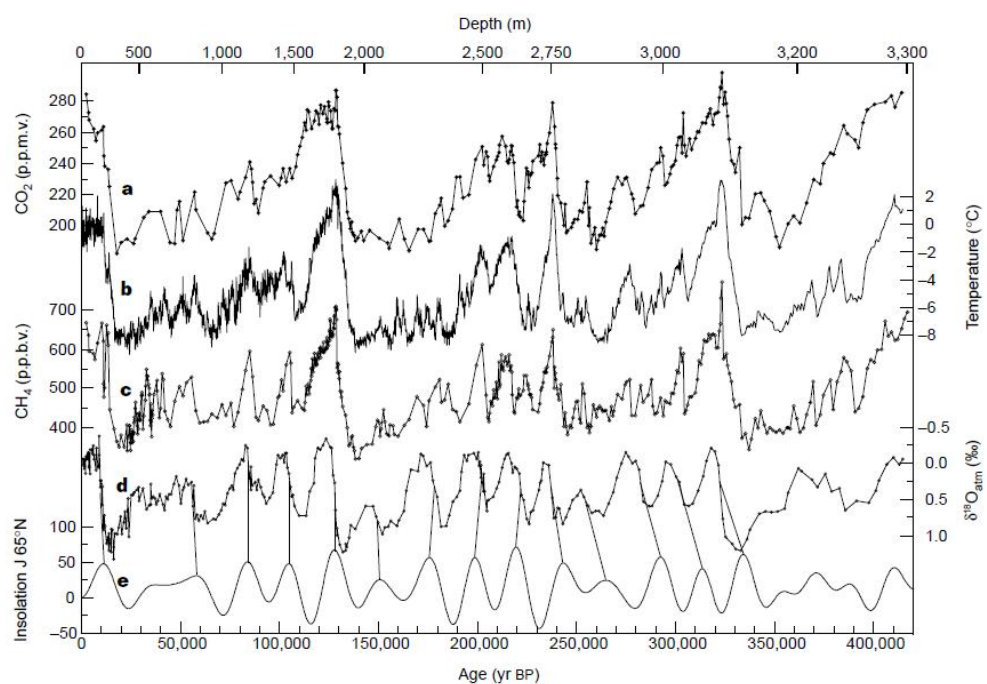


FIGURE 3 – Extrait de Petit et al. 1999. Climat et composition atmosphérique issus du forage de Vostok, suivant l'échelle de temps GT4. Courbe a : CO<sub>2</sub> atmosphérique,  $\pm$  20 ppbv, résolution temporelle moyenne de l'ordre de 1500 ans, et jusqu'à 6000 ans au plus vieux de l'enregistrement. Courbe b : température isotopique de l'atmosphère.

Cet enregistrement confirme la corrélation positive entre la concentration en CO<sub>2</sub> et la température en Antarctique (coefficient de corrélation  $r^2 = 0,75$  sur les quatre derniers cycles glaciaires). Plus précisément, l'évolution de la température semble précéder celle du CO<sub>2</sub> lors des déglaciations, autour de 140 000, 240 000 et 340 000 ans. Cependant, l'incertitude sur ce déphasage est estimée à plus d'un milliers d'années, conséquence de la fréquence d'échantillonnage en CO<sub>2</sub> (résolution temporelle de l'ordre de 1500 ans, et supérieure 6000 ans au plus vieux de l'enregistrement) et de l'incertitude sur la différence d'âge entre la glace et le gaz ; cette étude conclut que les incertitudes ne permettent pas de trancher quant au signe du déphasage entre CO<sub>2</sub> et température lors des trois dernières déglaciations.

En 2001, utilisant un modèle amélioré de densification nivale sur les carottes d'EPICA Dome C, Monnin et ses collaborateurs [12] aboutissent à un retard de CO<sub>2</sub> sur la température de  $800 \pm 600$  ans pour la dernière déglaciation (figure 6). Sur la carotte de Siple Dome, Ahn et ses collaborateurs l'estiment entre 210 et 330 ans (Ahn et al. 2004 [3]).

En 2003, Callion et ses collaborateurs [7] étudient plus précisément la chronologie de l'évolution du CO<sub>2</sub> et des températures antarctiques lors de la troisième déglaciation ( $\sim 240\,000$  ans BP). Ils utilisent des enregistrements à meilleures résolution spatiale (échantillonnage tous les 10 cm) et s'affranchissent de l'incertitude sur  $\Delta$ age en utilisant l'argon <sup>40</sup>Ar en phase gaz comme proxy de la température. Ainsi, le proxy pour la température et le CO<sub>2</sub> appartiennent à la même phase et ont le même âge dès lors qu'ils sont à la même profondeur dans la carotte. Avec l'hypothèse de simultanéité des variations de <sup>40</sup>Ar et de température, la meilleure corrélation entre les courbes de CO<sub>2</sub> et température est obtenue pour un retard du CO<sub>2</sub> de  $800 \pm 200$  ans (cf. figure 5). Cependant des incertitudes subsistent quant à la corrélation temporelle entre <sup>40</sup>Ar et la température, dont l'origine physique est mal connue.

Plus récemment, suite à une étude comparative des carottes d'EPICA Dome C et EPICA Dronning Maud Land, Loulergue et ses collaborateurs [11] concluent que le modèle de densification nivale utilisé pour l'estimation du  $\Delta$ age à Dome C surestime cette différence d'âge sur la dernière période glaciaire de plus de 1000 ans par endroits. Le retard de phase de CO<sub>2</sub> sur la température déduit des enregistrements de ces carottes ( $800 \pm 600$  ans, Monnin et al. 2001 [12] pour Termination III) serait donc lui aussi très surestimé.

### **3 Le rôle du CO<sub>2</sub> dans les variations climatiques passées**

#### **3.1 L'augmentation de CO<sub>2</sub> lors des déglaciations est la conséquence d'une hausse des températures via des processus océaniques**

Le temps de retard du CO<sub>2</sub> par rapport à la température lors des déglaciations, et l'amplitude de ses variations ( $\sim 100$  ppm), suggèrent que des processus océaniques sont en jeu dans ce dégagement de CO<sub>2</sub>. En effet, les océans constituent le seul réservoir terrestre de CO<sub>2</sub> suffisamment important (un calcul grossier sur la base d'un contenu en carbone océanique de 900 Gt montre qu'il pourrait induire une augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique de 270 ppm) et avec des temps d'échange suffisamment



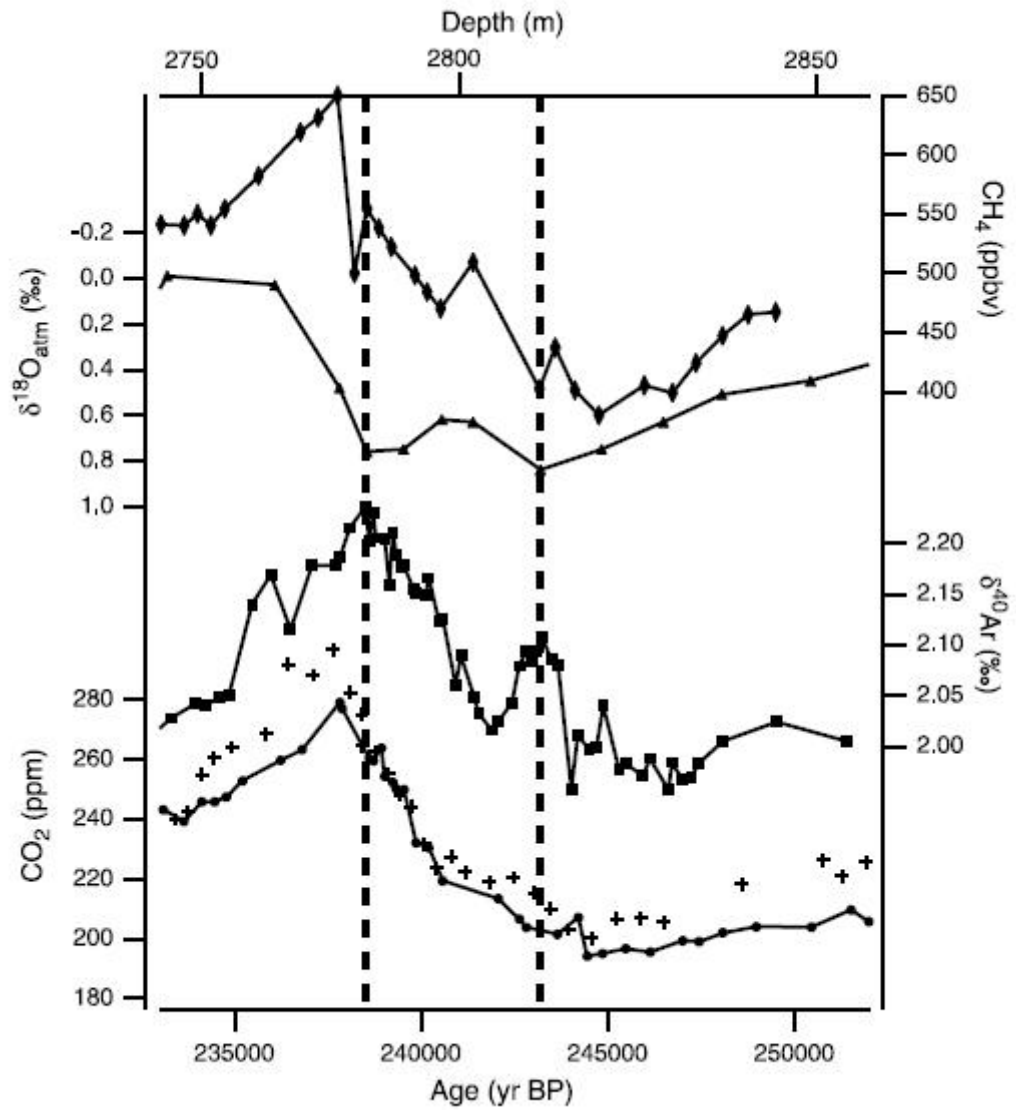


FIGURE 4 – Extrait de Callion et al 2008 : Enregistrements de Vostok autour de Termination III. Pour le CO<sub>2</sub>, les cercles proviennent de Petit et al 1999, les croix de Fischer et al 1999.

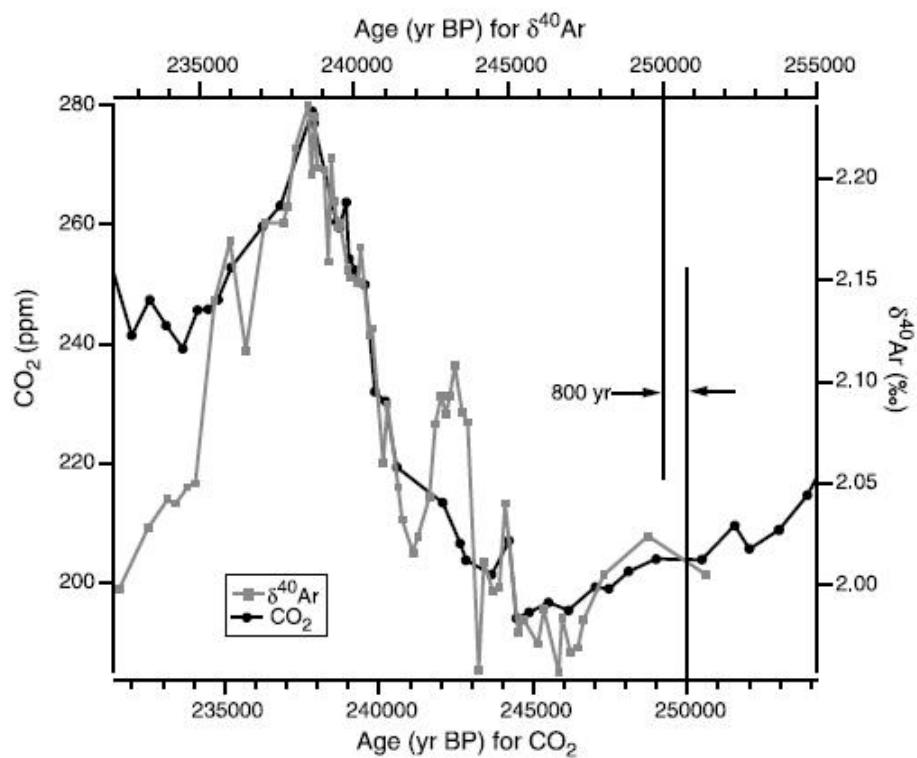


FIGURE 5 – Extrait de Callion et al 2008 : Enregistrements de Vostok autour de Termination III. La courbe du  $\text{CO}_2$  a été avancée de 800 ans, permettant la meilleure corrélation entre  $\text{CO}_2$  et  $\delta^{40}\text{Ar}$ .

faibles ( $\leq 1000$  ans) pour rendre compte des amplitudes et vitesses du dégagement observé. Beaucoup d'hypothèses ont été avancées concernant les mécanismes de ce dégazage (cf. [2], chapitre 6, Box 6.2); les plus probables aux échelles de temps et amplitudes des derniers cycles glaciaire-interglaciaire sont :

1. La diminution de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau avec l'augmentation des températures.
2. Le ralentissement de la "pompe organique" à CO<sub>2</sub> : en effet les enregistrements de Vostok révèlent une nette corrélation entre le réchauffement et la diminution des poussières retrouvées dans les carottes. Or, ces poussières véhiculent vers les océans du sud des minéraux comme le fer qui sont les facteurs limitants de la croissance organique. Les océans de l'hémisphère sud et surtout l'océan antarctique (zone d'upwelling où beaucoup de nutriments importants restent inutilisés) ont probablement été le lieu principal de ces changements [2].
3. L'augmentation des échanges air-océan par fonte des glaces.

Les données suggèrent également que des mécanismes liés à l'hémisphère nord peuvent avoir provoqué des variations de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> à l'échelle du globe. En particulier lors de la dernière déglaciation, l'augmentation brutale de CO<sub>2</sub> lors de l'évènement de Bölling/Allerod ( fig 6), telle qu'enregistrée en Antarctique, correspond à un réchauffement rapide de l'hémisphère nord constaté dans les carottes de GRIP. Broecker et ses collaborateurs [6] en imputent la cause à la formation de North Atlantic Deep Water (NADW). L'augmentation de la concentration globale en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère à cette époque pourrait donc être liée à une débâcle glaciaire et modification de circulation thermohaline initiée dans l'hémisphère nord, notamment par dilution d'alcalinité.

### **3.2 Mais le CO<sub>2</sub> a amplifié les variations climatiques initiées par des facteurs orbitaux**

Selon diverses études (Petit et al 1999 [14], Callion et al 2003 [7], ... ) le retard de 800 ans du CO<sub>2</sub> sur la température lors des déglaciations est faible en comparaison de la durée de ces épisodes ( $\geq 5000$  ans), et l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> a pu jouer un rôle important dans l'évolution de la température au delà des premiers 800 ans (en plus des autres rétroactions positives comme l'albédo notamment). La corrélation positive entre CO<sub>2</sub> et température tiendrait en partie à l'amplification, par le CO<sub>2</sub> gaz à effet de serre, des forçages orbitaux initialement responsables des variations climatiques du passé. Le plus grand pic de CO<sub>2</sub> des 4 derniers cycles glaciaire-interglaciaire (entre 330 000 et 340 000 ans BP) aurait ainsi contribué à un réchauffement de 0,75 °C [14] lors de la transition climatique correspondante. Une formulation analytique du Global Temperature change Potential telle que proposée par Shine et al. 2005 [15], extrapolée aux concentrations de référence des périodes glaciaires et à un pulse d'émission de 100 ppm, rend le CO<sub>2</sub> responsable d'une augmentation de température de 0,3 K lors des déglaciations, sans prise en compte des autres rétroactions positives induites par ce réchauffement. Gaz à effet de serre à mélange atmosphérique rapide en comparaison de la durée d'un épisode de déglaciation, le CO<sub>2</sub> a pu par ailleurs contribuer à homogénéiser sur l'ensemble du globe l'augmentation de température initiée dans l'hémisphère sud, contribuant ainsi aux déglaciations de l'hémisphère nord [7].

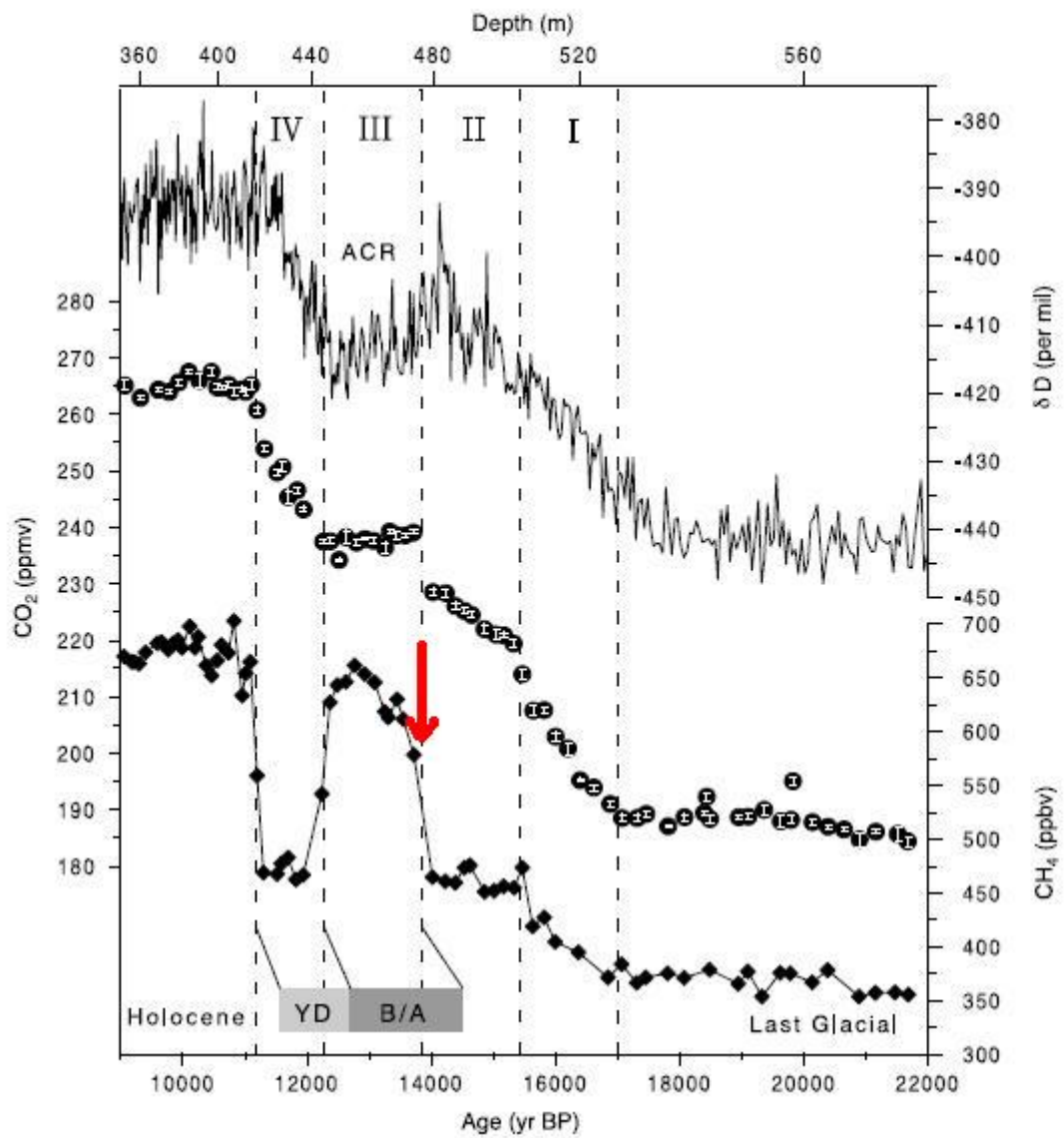


FIGURE 6 – Extrait de Monnin et al. 2001. Enregistrements climatiques issus de Dome C. Les événements de Bölling/Allerod (BA) et du Younger Dryas (YD), enregistrés dans les carottes groenlandaises, ont été reportés. La flèche rouge indique le saut de méthane correspondant au réchauffement rapide de l'hémisphère nord lors du BA.

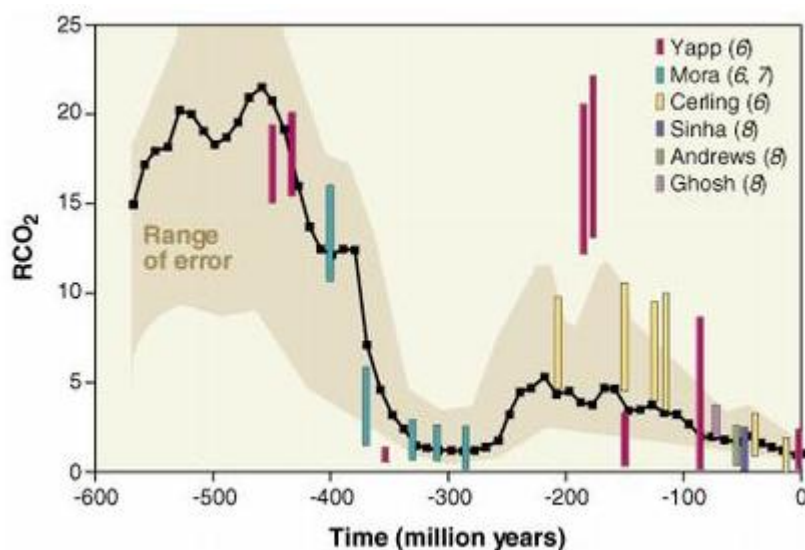


FIGURE 7 – RCO<sub>2</sub> en fonction du temps depuis 600 Ma. Ce paramètre est défini comme le rapport de la masse de CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la masse de CO<sub>2</sub> préindustrielle. Par le passé la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> a pu atteindre des valeurs bien supérieures aux valeurs actuelles.

## 4 Le CO<sub>2</sub> peut-il donc causer un réchauffement climatique aujourd'hui ?

### 4.1 Le CO<sub>2</sub> a contribué à la dernière déglaciation de l'hémisphère nord

Lors de la dernière déglaciation, l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère précède la déglaciation de l'hémisphère nord [7] ; celle-ci résulte en partie de l'amplification du forçage orbital par les gaz à effet de serre comme le CO<sub>2</sub>. La figure 6 en fournit l'illustration : le saut de méthane (flèche rouge) enregistré à Vostok 1380 ans BP correspond au réchauffement rapide de l'hémisphère nord entraînant sa déglaciation ; il intervient environ 4000 ans après l'augmentation des températures et du CO<sub>2</sub> à Vostok, suggérant qu'une rétroaction positive du CO<sub>2</sub> sur la température de l'ensemble du globe est en partie la cause de cette déglaciation.

### 4.2 Le CO<sub>2</sub> serait à l'origine de climats plus chauds dans le passé

On peut citer en exemple le secondaire, plus exactement le Crétacé (70 à 145 Ma), où de nombreux marqueurs géologiques pointent vers un climat globalement plus chaud de 5°C, expliqué par une concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique 4 à 10 fois supérieure à la concentration actuelle du fait de l'activité tectonique (Berner et al. 1997 cités par [19]).

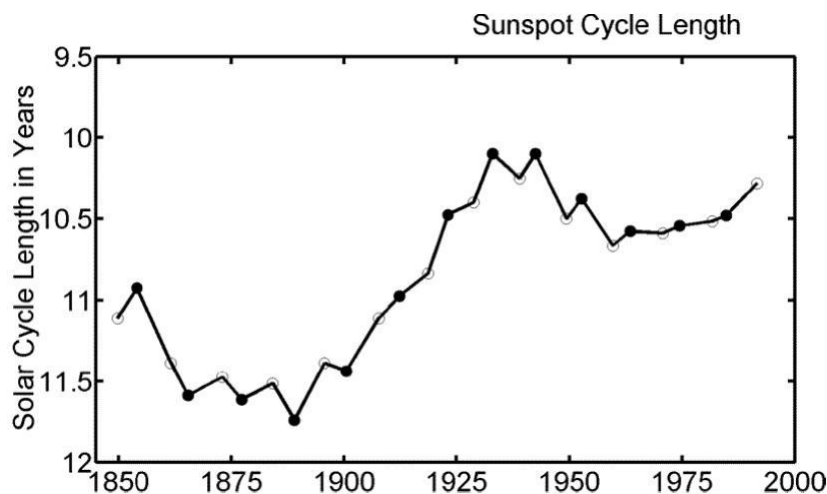


FIGURE 8 – Variation de la durée du cycle solaire (ou cycle de Schwabe) depuis 1860. Source : document transmis par Thomas Ulich, Sodankylä Geophysical Observatory, Université d'Oulu, Finlande.

### 4.3 À circonstances différentes, causalités différentes

Les changements climatiques passés peuvent éclairer l'évolution climatique actuelle, c'est l'un des enjeux de la paléoclimatologie. Cependant, les variations actuelles des températures terrestres et de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> sont à replacer dans un contexte différent de celles du passé.

\* **Une origine différente** : au quaternaire, les variations de température mesurées dans les glaces ont pour origine fondamentale des variations d'ensoleillement associées aux variations des paramètres orbitaux de la Terre. A l'échelle du réchauffement actuel (sur un siècle), la prise en compte de la variation de ces paramètres n'est pas pertinente pour expliquer une perturbation climatique de l'ampleur de celle observée. A l'échelle historique, des variations de température existent aussi, liées à des variations d'activité solaire (exemple : le petit âge glaciaire). C'est l'échelle de temps qui serait appropriée pour l'analyse de l'évolution actuelle, et le réchauffement actuel pourrait être imputé à une simple variation d'activité solaire. Les figures 8 et 9 montrent les limites de cet argument. Elles présentent les évolutions de l'activité solaire et du CO<sub>2</sub> atmosphérique du début de l'ère industrielle à nos jours. De 1900 à 1940, et de 1975 à nos jours, activité solaire et teneur en CO<sub>2</sub> augmentent avec la température terrestre globale, rendant difficile l'attribution du réchauffement à un facteur plutôt qu'à l'autre. Mais de 1940 à 1970, la teneur en CO<sub>2</sub> augmente alors que l'activité solaire diminue, la température globale restant stable. Cette stabilité suggère que l'influence de la teneur en CO<sub>2</sub> et de l'activité solaire s'équilibrent sur cette période. Ces facteurs seraient donc d'importance équivalente. Depuis 1975, activité solaire et teneur en CO<sub>2</sub> varient dans le même sens, ajoutant leurs effets. (Pour expliquer le réchauffement climatique, la part relative entre CO<sub>2</sub> et Soleil reste cependant aujourd'hui très difficile à chiffrer. Judith Lean et David Rind (Science, 292, 234, 2001, cités par [20]) ont montré qu'une augmentation du rayonnement solaire pendant le cycle de onze ans se traduit par une augmentation du bilan radiatif de la Terre de 0,2 W/m<sup>2</sup>, à comparer aux 0,35

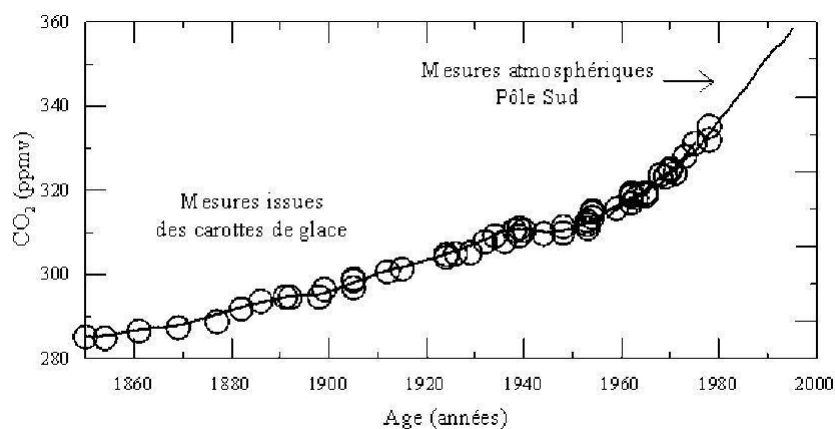


FIGURE 9 – Courbe d'évolution du CO<sub>2</sub> depuis 1850 à partir de l'analyse des carottes de glace antarctiques. Source : document transmis par Jean-Marc Barnola, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Grenoble

W/m<sup>2</sup> par décennie dus aux effets anthropiques. Aujourd'hui, les variations solaires semblent donc passer donc au second plan derrière l'effet des combustibles fossiles).

\* **Des proportions différentes** : la concentration actuelle en CO<sub>2</sub> est supérieure à celle des interglaciaires pour lesquels les carottes antarctiques nous fournissent des enregistrements précis : Petit et al. 1999 [14], Siegenthaler et al. 2005a [16], montrent que la concentration en CO<sub>2</sub> avait évolué entre 180 et 300 ppm pendant les derniers 650 000 ans. L'augmentation en CO<sub>2</sub> liée à la période industrielle est certes similaire en amplitude à celle des changements glaciaire-interglaciaire, mais elle commence à partir d'un niveau interglaciaire et présente de plus une vitesse d'évolution supérieure de 2 ordres de grandeur. Elle est donc par nature difficilement comparable avec celle des déglaciations des dernières centaines de millénaires, et donc difficilement explicable par les mêmes mécanismes.

\* **Une chronologie différente** : la concomitance entre l'augmentation actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique et des températures exclut la possibilité que le CO<sub>2</sub> soit systématiquement un produit de l'augmentation des températures au terme de mécanismes aux temps de réponse de plusieurs centaines d'années.

Différente des variations passées les plus documentée, l'évolution actuelle des températures et de la teneur en CO<sub>2</sub> n'est pas explicable par la même chronologie d'évènement. Aussi le retard de phase du CO<sub>2</sub> sur la température dans les déglaciations passées ne remet pas en cause l'origine anthropique des modifications climatiques actuelles.

#### 4.4 L'argument des modèles

Le quatrième rapport du GIEC [2] estime "extrêmement improbable" (< 5%) que l'augmentation avérée des températures terrestres depuis le début du siècle soit uniquement la conséquence de la variabilité interne climatique. Aucun modèle climatique

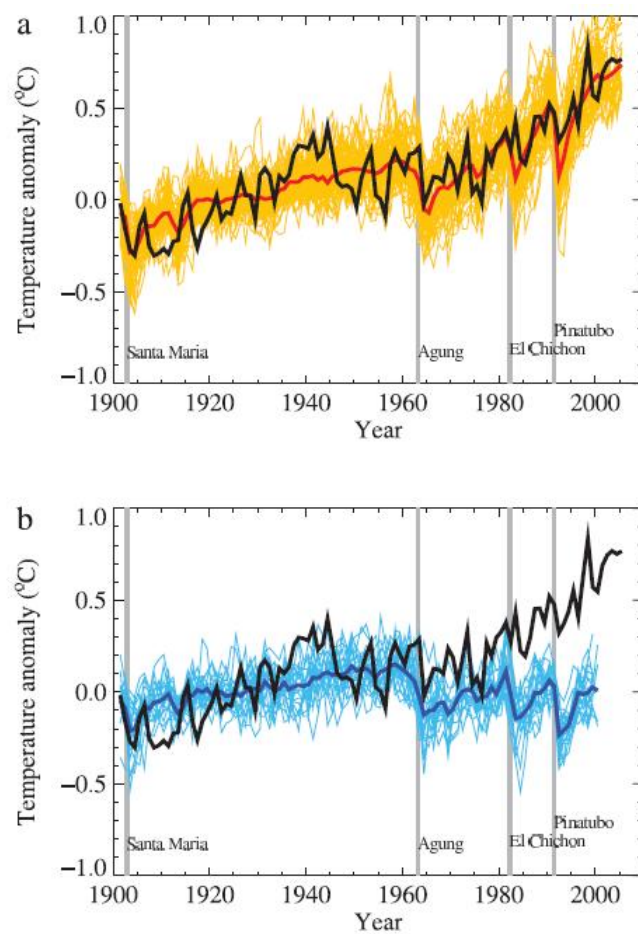


FIGURE 10 – Extrait de IPCC AR4, chap9. Anomalie globale moyenne des températures de surface, issue de mesures en noir, et de simulations : a. compte tenu du forçage anthropique. b. sans forçage anthropique

n'est d'ailleurs parvenu à retracer l'anomalie de température du XXe siècle avec pour seuls forçages les forçages naturels (cf. fig 10). En revanche, l'inclusion des forçages anthropiques conduit à des simulations en accord avec les observations.



## 5 Conclusion

Les enregistrements glaciaires antarctiques, analysés via des modèles de densification de la neige, permettent d'inférer un retard du CO<sub>2</sub> sur la température de quelques centaines d'années pour les dernières déglaciations. Si le signe de cette phase est avancé avec un certain degré de confiance, de fortes incertitudes subsistent quant aux chiffres présentés pour la quantifier.

Les variations des paramètres orbitaux de la terre semblent initialement à l'origine des cycles glaciaire-interglaciaire ; les changements de température initiaux ont provoqué des variations de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, notamment via des processus océaniques impliquant majoritairement l'hémisphère sud mais aussi probablement l'hémisphère nord ; ce CO<sub>2</sub> a à son tour eu une rétroaction positive sur le changement climatique initial en tant que gaz à effet de serre.

Cette chronologie n'est pas transposable à l'évolution climatique récente, dont l'origine et les mécanismes sont nécessairement différents. L'argument des 800 ans de retard du CO<sub>2</sub> sur la température dans les déglaciations du quaternaire n'est donc pas recevable dans un argumentaire niant la responsabilité anthropique du réchauffement climatique actuel.

## Références

- [1] IPCC 2001. *Climate Change 2001 : The scientific basis. Intergovernmental panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [2] IPCC 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- [3] J. Ahn, M. Wahlen, B. L. Deck, E. J. Brook, P. A. Mayewski, K. C. Taylor, and J. W. C. White. A record of atmospheric CO<sub>2</sub> during the last 40,000 years from the Siple Dome, Antarctica ice core. *Journal of Geophysical Research*, 2004.
- [4] M. Anklin, J. Schwander, B. Stauffer, J. Tschumi, A. Fuchs, JM Barnola, and D. Raynaud. CO<sub>2</sub> record between 40 and 8 kyr BP from the Greenland Ice Core Project ice core. *Journal of Geophysical Research*, 102(26) :539–26, 1997.
- [5] T. Blunier, R. Spahni, JM Barnola, J. Chappellaz, L. Loulergue, and J. Schwander. Synchronization of ice core records via atmospheric gases. *Clim. Past Discuss*, 3 :365–381, 2007.
- [6] W.S. Broecker, J.P. Kennett, B.P. Flower, J.T. Teller, S. Trumbore, G. Bonani, and W. Wolffi. Routing of meltwater from the Laurentide Ice Sheet during the Younger Dryas cold episode. *Nature*, 341(6240) :318–321, 1989.
- [7] N. Caillon, J.P. Severinghaus, J. Jouzel, J.M. Barnola, J. Kang, and V.Y. Lipenkov. Timing of Atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic Temperature Changes Across Termination III, 2003.
- [8] Gilles Delaygue and Pierre Thomas. Des cycles glaciaire-interglaciaire avant le quaternaire? <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOMquaternaire.xml>.
- [9] R.J. DELMAS. A natural artefact in Greenland ice-core CO<sub>2</sub> measurements. *Tellus B*, 45(4) :391–396, 1993.
- [10] H. Fischer, M. Wahlen, J. Smith, D. Mastroianni, and B. Deck. Ice Core Records of Atmospheric CO<sub>2</sub> Around the Last Three Glacial Terminations. *Science*, 283(5408) :1712, 1999.
- [11] L. Loulergue, F. Parrenin, T. Blunier, JM Barnola, R. Spahni, A. Schilt, G. Raisbeck, and J. Chappellaz. New constraints on the gas age-ice age difference along the EPICA ice cores, 0–50kyr. *Clim. Past Discuss*, 3 :435–467, 2007.
- [12] E. Monnin, A. Indermuhle, A. Dallenbach, J. Fluckiger, B. Stauffer, T.F. Stocker, D. Raynaud, and J.M. Barnola. Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations over the Last Glacial Termination, 2001.
- [13] A. Neftel, H. Oeschger, T. Staffelbach, and B. Stauffer. CO<sub>2</sub> record in the Byrd ice core 50, 000–5, 000 years bp. *Nature*, 331(6157) :609–611, 1988.
- [14] J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, NI Barkov, JM Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735) :429–436, 1999.
- [15] K.P. Shine, J.S. Fuglestedt, K. Hailemariam, and N. Stuber. Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. *Climatic Change*, 68(3) :281–302, 2005.

- [16] U. Siegenthaler, T.F. Stocker, E. Monnin, D. Luthi, J. Schwander, B. Stauffer, D. Raynaud, J.M. Barnola, H. Fischer, V. Masson-Delmotte, et al. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene, 2005.
- [17] T. Staffelbach H, B. Stauffer, A. Sigg, and H. Oeschger. CO2 measurements from polar ice cores : more data from different sites. *Tellus B*, 43(2) :91–96, 1991.
- [18] Pierre Thomas. Les variations du taux de CO2 dans l’atmosphère depuis 4,5 milliards d’années. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-co2-depuis-4ga.xml>.
- [19] Pierre Thomas, Gilles Delaygue, Edouard Bard, and Benoît Urgelli. Quel lien entre augmentation de la température terrestre et CO2 atmosphérique ? . <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-co2-temperature.xml>.
- [20] Pierre Thomas, Jean-Louis Dufresne, Jean-Marc Barnola, and Thomas Ulich. Activité solaire et climat du passé. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOMsoleil-climat.xml>.