

Le climat et la relation température-CO₂ Un réexamen épistémologique du message des carottes glaciaires

Pascal Richet

Institut de Physique du Globe de Paris, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

Traduction d'un article publié dans *History of Geo- and Space Sciences*, 12, 97-110 (2021)

Résumé

Un examen épistémologique des analyses géochimiques effectuées sur les carottes glaciaires de Vostok a été effectué très simplement à partir des fondements de la logique et des concepts de *cause* et d'*effet*. Il invalide l'effet de serre marqué sur le climat habituellement attribué au dioxyde de carbone (CO₂) et au méthane (CH₄). En accord avec le rôle déterminant joué par les cycles de Milankovitch, c'est la température qui est constamment restée le paramètre ayant contrôlé le climat au cours des 423 derniers milliers d'années, ainsi que les teneurs en CO₂ et CH₄ dont les variations ont exercé tout au plus une rétroaction mineure sur les températures elles-mêmes. Si elle n'est pas réfutée, cette démonstration indique que l'effet des gaz à effet de serre sur le climat au XX^e siècle et aujourd'hui reste à établir, comme cela a déjà été indiqué par divers autres arguments. La faiblesse épistémologique des modélisations climatiques actuelles provient du fait qu'elles ne reposent sur aucune preuve indépendante de l'influence des gaz à effet de serre sur le climat pendant des périodes de temps suffisamment longues. La validité des modèles climatiques ne pourra en particulier pas être démontrée tant que ceux-ci ne rendront pas compte au moins des principales caractéristiques des changements climatiques, à savoir les transitions glaciaires-interglaciaires et la durée des différentes périodes interglaciaires. De même, les retards de 7 000 ans lors des déglaciations des chutes des teneurs en CO₂ par rapport à celles des températures ont besoin d'être compris. Vu sous cet angle, le débat actuel sur le climat doit être considéré comme la dernière en date des grandes controverses qui ont ponctué la marche des Sciences de la Terre, en différant cependant des précédentes par ses implications sociales, environnementales, économiques et politiques les plus variées.

1. Introduction

Sans doute le trait le plus important de l'histoire des sciences est la manière dont des idées qui ont été unanimement acceptées pendant de très longues périodes ont fini par être fermement rejetées. Parmi d'innombrables exemples, deux des plus célèbres sont la position centrale de la Terre dans l'univers et la théorie des quatre éléments (feu, air, eau et terre) qui se transforment mutuellement les uns en les autres par échange de leurs quatre *qualités* (chaud, froid, sec et humide). Ces deux théories sont restées incontestées pendant deux millénaires en dépit de défauts qui avaient été signalés très tôt. Pour le géocentrisme, la rotation en 24 heures des très lointaines étoiles fixes autour du pôle, par exemple, contredisait catégoriquement la règle selon laquelle, des 27,3 jours de la lune aux 29,4 années de Saturne, les périodes sidérales de révolution augmentent très sensiblement avec la distance des corps célestes à la Terre. De même, la théorie des quatre éléments fut déjà critiquée par Théophraste (371-287), qui souligna que le feu est « incapable de persister sans combustible. Il semble donc insensé de parler du feu comme d'une substance première ou d'un élément originel ».

Aussi solides et convaincantes qu'elles puissent paraître, les théories sont rarement à l'abri de défauts de toutes sortes qui apparaissent plus ou moins rapidement et servent de germes à une reformulation majeure ou à un rejet complet, comme l'ont montré le géocentrisme et la théorie des quatre éléments. En partant de la prémisse raisonnable que nous ne sommes pas plus intelligents que nos prédécesseurs, un problème intrigant est d'identifier lesquelles des théories actuellement acceptées pourraient tomber dans l'oubli à l'avenir et amener les historiens à étudier pourquoi leur rejet n'a pas pris place plus tôt. L'objectif consiste alors à repérer les faiblesses pratiques ou théoriques de théories et d'évaluer si elles sont réellement significatives ou non. À cette fin, les approches épistémologiques sont les plus utiles car elles se concentrent sur les principes fondamentaux sans avoir à se plonger dans des détails techniques.

Une thèse pour laquelle une telle approche peut être suivie est celle que les émissions anthropiques de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre tel que le méthane induisent un réchauffement climatique aux conséquences funestes. Parce que les émissions de CO₂ sont considérées comme le facteur actuellement de loin le plus important affectant le climat, des efforts sans

précédents ont été engagés pour parvenir à des sociétés neutres en carbone d'ici quelques décennies. Compte tenu des grandes questions sociales, environnementales, politiques et économiques soulevées par une telle transition, deux questions méritent une attention particulière. La première concerne les preuves géochimiques disponibles démontrant l'effet de serre attribué au CO₂ (et également au CH₄) sur des périodes assez longues pour englober les grands cycles climatiques. La seconde porte sur la valeur heuristique réelle des simulations climatiques, qui semble être généralement acceptée sans avoir fait l'objet de véritables analyses approfondies. Ces deux questions seront donc examinées de manière critique d'un point de vue épistémologique dans la présente étude. A posteriori, la démarche poursuivie sera justifiée par les grandes faiblesses révélées sous ces deux aspects, qui permettront notamment d'illustrer une fois de plus pourquoi les *modèles* qui sont aujourd'hui si largement mis en œuvre dans de nombreux domaines de la science et dans les politiques publiques peuvent manquer de toute valeur démonstrative réelle.

2 Contexte

L'attention accordée à l'effet de serre du CO₂ atmosphérique n'est pas du tout récente : elle fut déjà portée par Fourier (1827), Tyndall (1861) et surtout Arrhenius (1896). Les effets d'augmentations constantes des émissions anthropiques de CO₂ ne sont cependant devenus un réel sujet de préoccupation que dans les années 1970, car il est impossible de distinguer les gaz anthropogéniques des gaz naturels dans les échanges complexes qui ont lieu en permanence entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. À cette époque, Broecker (1975) a créé l'expression de *réchauffement global* et a avancé, à partir d'un examen des données de la littérature, qu'un doublement de la teneur en CO₂ par rapport aux niveaux préindustriels entraînerait une augmentation de la température mondiale de 2,4 °C (ce qu'on appelle la sensibilité climatique).

La thèse du réchauffement climatique reçoit apparemment une confirmation géochimique importante quand l'étude des carottes glaciaires anciennes révéla que les augmentations de température passées étaient accompagnées d'augmentations marquées des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère (Lorius *et al.*, 1990). À cet égard, les analyses géochimiques très complètes de glaces carottées en Antarctique (Petit *et al.*, 1999 ; Lüthi *et al.*, 2008) restent ce qui semble être la preuve directe la plus convaincante des changements climatiques induits par les gaz à effet de serre sur un long intervalle de temps de 800 000 ans (800 ka). En plus de la température locale et des teneurs atmosphériques en CO₂ au moment du dépôt de la neige, les teneurs en CH₄, en sodium et en poussières ont également été mesurées avec précision. Cet ensemble de données géochimiques

représente donc une pierre de Rosette pour la climatologie grâce à l'enregistrement continu de cet ensemble de paramètres-clés qu'ils procurent.

L'existence de glaciations passées est restée controversée pendant plusieurs décennies après leur découverte par des géologues au début du XIX^e siècle (cf. Hallam, 1989). Après un autre long débat qui a duré jusque dans les années 1970, le contrôle des périodes glaciaires exercé par les variations de l'insolation terrestre a finalement été fermement établi à partir de la détermination de paramètres sensibles au climat mesurés dans deux carottes sédimentaires profondes du sud de l'Océan indien, à savoir les compositions isotopiques de l'oxygène de foraminifères planctoniques et les températures estivales de la surface de la mer estimées à partir des populations de radiolaires (Hays *et al.*, 1976).

Pendant les cycles identifiés par Milankovitch (1913), l'insolation varie dans le temps en raison d'interactions gravitationnelles complexes qui provoquent des changements périodiques des paramètres du mouvement de la Terre autour du Soleil, à savoir l'excentricité de l'orbite (période principale de 100 ka), l'angle de l'axe d'inclinaison (l'obliquité de l'écliptique) de 22,1 à 24,5° (période principale de 41 ka) et la précession de cet axe par rapport aux étoiles fixes (période principale de 26 ka). Dans le cadre des cycles de Milankovitch, les relations entre les températures passées et les teneurs en CO₂ sont généralement interprétées en termes d'un forçage orbital initial de la température qui est ensuite amplifié par le forçage du CO₂, lui-même amplifié à son tour par des rétroactions atmosphériques rapides qui agissent et continueront d'agir sur le climat présent et futur (cf., Petit *et al.*, 1999). On pense en conséquence que les augmentations anthropiques modernes des teneurs atmosphériques en CO₂ sont la cause principale du réchauffement climatique, une conclusion que les simulations numériques de l'atmosphère terrestre visent à soutenir de manière quantitative (IPCC, 2013).

Curieusement, cependant, l'attention maintenant accordée aux modèles de simulation est telle que les sources fondamentales d'information fournies par les carottes glaciaires n'ont été que partiellement exploitées. Bien que des renseignements sur les processus de déglaciation aient par exemple été tirés des décalages temporels marqués observés entre les variations de températures et de teneurs en CO₂ (Hertzberg et Schreuder, 2016 ; Broecker, 2018), ces analyses n'ont jamais été approfondies. Par exemple, Broecker a simplement noté que « les pics interglaciaires de CO₂ sont plus larges que ceux de la température de l'air ». Ainsi, le premier objectif de cette étude est d'analyser la nature de ces relations afin de déterminer si le CO₂ est ou non le véritable *moteur du climat de la Terre*.

Compte tenu de la nature globale affirmée du changement climatique, les teneurs atmosphériques

essentiellement homogènes du CO₂ (et du CH₄) font qu'il suffit de considérer un enregistrement unique mais précis et complet des températures et des teneurs en CO₂ passées pour déterminer la relation mutuelle entre ces deux paramètres. À cette fin, l'enregistrement de Vostok est idéal car il échantillonne adéquatement les caractéristiques fondamentales des cycles de glaciation-déglaciation, qui représentent depuis le début du XIX^e siècle la preuve la plus évidente des changements climatiques. Les intervalles de temps suffisamment longs considérés permettent en outre de négliger les variations climatiques causées par des facteurs tels que les changements de l'activité solaire et, même sur des échelles de temps de plusieurs milliers d'années, d'autres facteurs tels que les différences entre les dynamiques de formation et de fonte des calottes glaciaires et leur dépendance vis-à-vis de facteurs locaux.

Par le biais de cette approche, une évaluation rigoureuse des données des carottes glaciaires peut s'appuyer sur la logique pure et, donc, sur les fondements du raisonnement scientifique tels qu'ils furent établis par Aristote au IV^e siècle av. J.-C. Les conclusions obtenues apparaissent donc être particulièrement robustes car elles sont directement déduites de l'enregistrement fourni par les carottes glaciaires. En tant que telles, ces conclusions ne sont ni limitées à un cadre géographique spécifique, ni ne dépendent d'un quelconque mécanisme physique supposé être à l'œuvre dans le système complexe Soleil-Terre. De même, elles ne dépendent ni de modèles climatiques particuliers, ni des valeurs de leurs paramètres respectifs. Aussi surprenant que cela puisse paraître, le forçage supposé du climat par le CO₂ se montre alors incompatible avec les caractéristiques majeures et mineures des mesures effectuées. La présente démonstration indique au contraire que les effets de serre du CO₂ et du CH₄ atmosphériques sont tout au plus mineurs par rapport à celui de la vapeur d'eau tout au long des 423 derniers ka, à moins que la fausseté de ce raisonnement ne soit prouvée ou qu'on puisse montrer de manière inattendue que l'enregistrement fourni par les carottes glaciaires est intrinsèquement trompeur.

En accord avec les déductions récemment obtenues par d'autres arguments, cette conclusion contredit donc les modèles qui considèrent la teneur en CO₂ dans l'atmosphère comme le principal moteur d'un changement climatique en cours. À cette lumière, le débat actuel apparaît comme un nouvel épisode dans une série de longues controverses géologiques entretenues par la complexité déconcertante de la Terre en tant que sujet de recherche physique. La présente analyse met par ailleurs en évidence des décalages temporels bien définis de 7 ka entre les chutes de température et celles des diminutions de teneur en CO₂ à la fin des épisodes les plus chauds, qui ne paraissent pas avoir retenu l'attention jusqu'à présent. Elle ranime

également la question d'une nouvelle ère glaciaire débutant dans un futur proche, comme cela a été discuté dans les années 1970 quand la validité de la théorie de Milankovitch se trouva finalement acceptée.

3. La relation température-CO₂

3.1. Les analyses des carottes glaciaires

Les carottes glaciaires forées jusqu'à une profondeur de 3 310 m à la station russe de Vostok ont fourni le premier enregistrement climatique complet couvrant les 423 derniers ka (Petit *et al.*, 1999). Cinq grands cycles de glaciation-déglaciation, dont l'actuel, ont été observés. Les quatre plus anciens ont duré de 87 à 123 ka, des périodes au cours desquelles les températures de l'Antarctique ont fluctué d'environ 10°C et les teneurs atmosphériques en CO₂ ont varié entre 180 et 300 ppmv (Fig. 1), les valeurs les plus basses ayant ralenti mais pas empêché l'activité photosynthétique (Gerhart et Ward, 2003). Un autre enregistrement remontant à 800 ka a ensuite été obtenu sur le site du Dôme C du projet européen de carottage de glace en Antarctique (EPICA), à 560 km au sud de Vostok (Lüthi *et al.*, 2008). Les deux séries d'analyses sont très semblables pour leur période de recouvrement. Sur une profondeur de 200 m, l'enregistrement du Dôme C révèle quatre cycles glaciaires supplémentaires entre 400 et 800 ka. Peut-être en raison de perturbations et de réarrangements de la glace accumulée, ces carottes de glaces plus anciennes présentent des épisodes de réchauffement et de refroidissement sous forme de variations de température et de CO₂ plus étalées et émoussées. Bien que ces cycles supplémentaires soient précieux pour étudier les transitions entre conditions glaciaires et interglaciaires, ils ne seront pas considérés ici car leur résolution plus faible empêche d'obtenir plus de renseignements sur la relation température-CO₂.

Comme l'ont noté les chercheurs du Dôme C (EPICA, 2004), la série d'analyses de Vostok « est devenue une référence incontournable par rapport à laquelle les autres enregistrements et efforts de modélisation sont testés ». C'est pourquoi la présente analyse se limite à ces résultats. Pour les paramètres étudiés, cet enregistrement peut être considéré comme un spectre composé de pics de température, de concentrations de gaz et d'autres variables environnementales dont les amplitudes, les formes et les largeurs sont porteuses d'informations importantes. Il est donc utile de donner ici un bref aperçu de ces analyses géochimiques afin que les aspects techniques pertinents ne compliquent pas ensuite la discussion.

Les températures de dépôt initial de la neige sont exprimées comme des différences ΔT par rapport à la température actuelle de l'Antarctique au niveau atmosphérique. Pour les fragments de glace étudiés, elles ont été déterminées à partir des compositions D/H et ¹⁸O/¹⁶O via un étalonnage reposant sur la

température de surface du site de précipitation et sur la température au-dessus du niveau d'inversion où se forment les précipitations (Jouzel *et al.*, 1997). Ce qui importe avant tout à cet égard est la cohérence, de sorte que toute erreur mineure d'étalonnage devrait être sans importance puisque les autres mesures effectuées sur les mêmes fragments de glace sont rapportées à la même échelle de température. Les âges des échantillons ont été déduits des profondeurs des fragments analysés et d'un modèle d'accumulation et d'écoulement de la glace. Avec ses faibles incertitudes de 5 ka généralement estimées (Petit *et al.*, 1999), la chronologie originale a été d'autant plus conservée qu'elle est cohérente à la fois avec les données astronomiques et une échelle de temps révisée établie à partir de quatre carottages glaciaires différents de l'Antarctique et du Groenland (Lemieux-Dudon *et al.*, 2010).

Les concentrations de gaz rapportées sont celles des bulles d'air piégées lors de la compaction de la neige dans les pores de la glace solide. En raison de l'homogénéité dominante de l'atmosphère vis-à-vis du CO₂ et du CH₄, les concentrations mesurées dans ces pores doivent refléter celles de l'atmosphère elle-même au moment de la fermeture des pores. Le temps nécessaire pour que les pores de glace deviennent des micro-systèmes fermés représente une source d'incertitudes. Celles-ci sont cependant sans conséquence pour la présente analyse en raison de leurs valeurs estimées de quelques centaines d'années qui ont été déterminées à partir de corrélations chronologiques établies pour de mêmes événements volcaniques entre quatre carottages glaciaires différents (Gest *et al.*, 2017).

Pour les deux gaz comme pour les isotopes d'hydrogène et d'oxygène, l'enregistrement effectué par les glaces a pu être perturbé par des processus physiques et chimiques tels que physico-chimisorption, séparation par gravité, formation d'hydrates ou réaction avec la glace, ou même formation de fissures lors du forage (Raynaud *et al.*, 1993). Une diffusion verticale des isotopes et des gaz piégés à partir des régions de plus forte concentration vers les régions de plus faible concentration dans la colonne de glace causerait un élargissement de part et d'autre des pics respectifs de température et de concentration. Les cinétiques de diffusion dépendent des gradients de concentration via des gradients de potentiels chimiques. Pour le CH₄, les pics étroits observés ont probablement résulté de vitesses de diffusion très lentes assurées par une grande taille moléculaire, de très faibles concentrations et une faible affinité chimique avec H₂O. De même, la diffusion ne semble pas avoir été problématique pour les principaux

pics de CO₂ car les augmentations de teneurs au début des cycles sont aussi rapides que pour les températures.

Sans doute les gradients de potentiel chimique les plus abrupts concernent les isotopes d'hydrogène et d'oxygène, dont les fortes variations relatives sont à l'origine du bruit apparent et des pics de température en dents de scie visibles dans les données les plus récentes. Des processus d'interdiffusion des isotopes d'hydrogène et d'oxygène pourraient donc avoir été la raison pour laquelle le bruit et ces petits pics ont été moyennés dans l'enregistrement à mesure qu'on remonte dans le temps, sans en avoir affecté l'allure générale (Fig. 1). Si des différences de teneurs en CO₂ et de températures sont observées pour la même période sur différents sites, les valeurs les plus élevées (et les plus basses) doivent donc être considérées comme les plus proches de la réalité : toutes les perturbations ultérieures des colonnes de glace n'ont en effet pu qu'émousser les gradients de CO₂ et d'isotopes. À cet égard, le maximum très aigu de 300 ppm de CO₂ présent dans la Fig. 1 fait de ce pic un bon exemple.

3.2. Inférences géochimiques

A l'exception évidente du cycle I en cours, qui a commencé il y a 18 ka, tous les autres partagent la même allure générale selon laquelle une transition abrupte glaciaire-interglaciaire est suivie d'une série d'épisodes de réchauffement et de refroidissement de plus faibles amplitudes (Fig. 1). Même sans avoir jamais entendu parler des cycles de Milankovitch, on peut aisément tirer des conclusions fermes à partir de la quasi-périodicité de ces cycles et de leurs motifs communs. Dans un ordre logique, ces inférences sont les suivantes :

(i) Les pics majeurs ont nécessairement été sous contrôle astronomique car aucun phénomène naturel sur Terre ne présente quoique ce soit qui s'approche, même de très loin, les régularités observées dont les périodes sont des dizaines de milliers d'années.

(ii) Ce contrôle astronomique des cycles glaciaires s'est nécessairement exercé par des variations de l'énergie reçue par la Terre. Cette énergie n'a pu être émise que par le soleil. A puissance solaire constante, sa quantité dépend elle-même de manière complexe d'un grand nombre de paramètres locaux et saisonniers tels que l'étendue des calottes glaciaires.

(iii) En l'absence de production photochimique de CO₂ dans l'atmosphère, une augmentation de la quantité de chaleur transférée par les radiations solaires se traduit nécessairement et directement soit par des augmentations de température, soit par des changements de phases endothermiques (par exemple, fonte de glace) à la surface de la Terre.

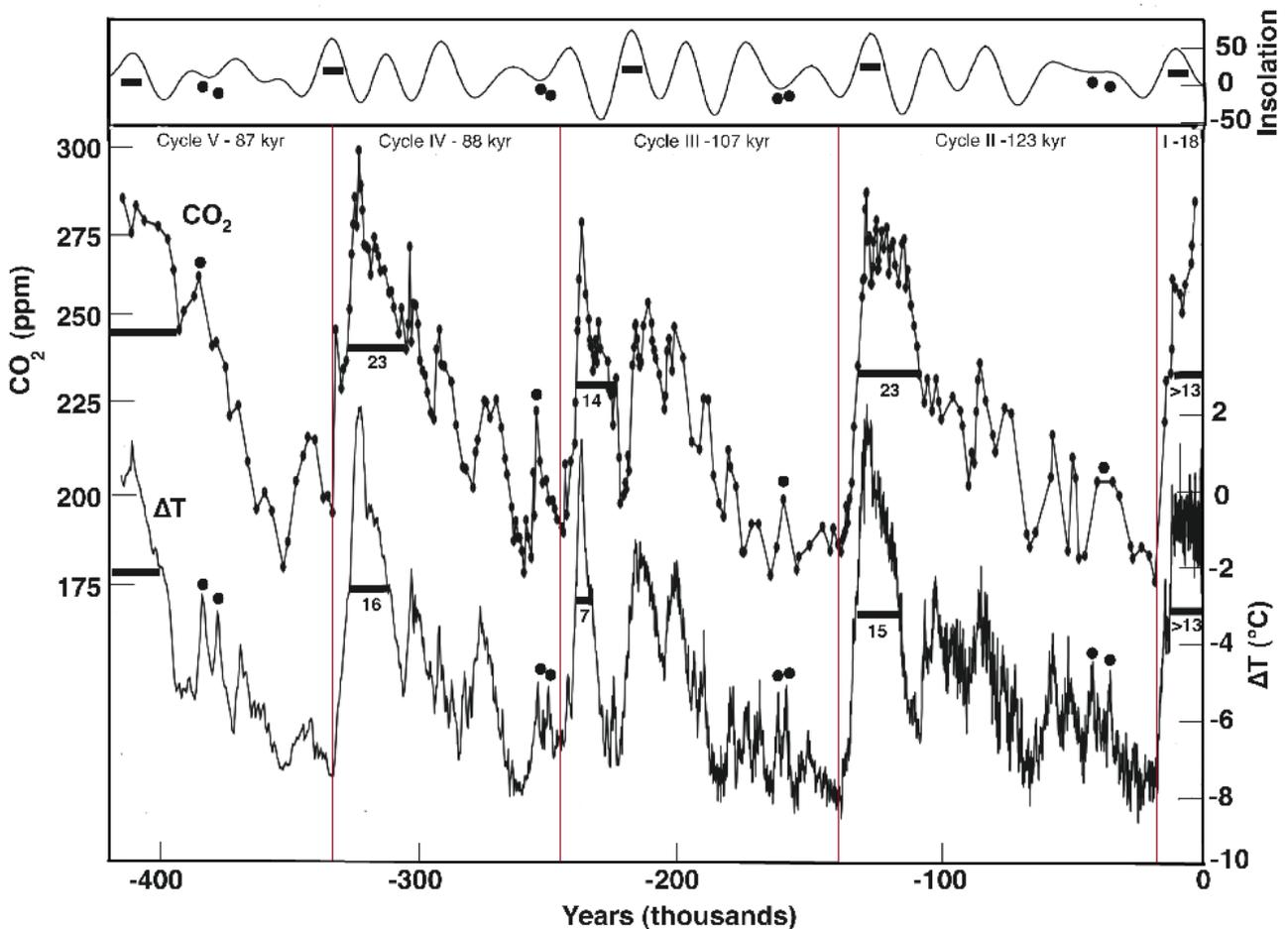


Fig. 1. Les variations de température (ΔT), cause des changements de teneurs en CO_2 de l'atmosphère pendant les 423 ka de l'enregistrement de Vostok, et leur contrôle par les cycles d'insolation de Milankovitch. Données de Petit *et al.* (1999) représentées chronologiquement de gauche à droite, en incluant les variations d'insolation (W/m^2) montrées en haut et rapportées à une latitude de référence de 65° Nord à la mi-juin. Les fines barres verticales soulignent la nature abrupte des augmentations de température et de teneur en CO_2 au début des cycles dont les durées sont indiquées (cycle V exclu en raison du début manquant). Largeurs à mi-hauteur indiquées par les traits horizontaux épais. Points noirs indiquant les oppositions entre doublets de température et singlets de CO_2 systématiquement associées à des variations réduites d'insolation dans les cycles de Milankovitch (points proches de la courbe d'insolation placés à la verticale des doublets de température).

(iv) Agissant aussi d'abord sur la température et le volume de glace, les changements opposés se produisent lorsque le bilan d'énergie radiative net de la Terre devient négatif.

(v) Les variations de température induisent elles-mêmes des changements de concentration d'espèces chimiques dans l'atmosphère : pour le CO_2 , par exemple, via les variations de sa solubilité globale dans l'eau de mer et celles des concentrations des espèces carbonatées, ou pour le CH_4 par ajustement de l'activité biologique.

(vi) Sauf événement exceptionnel tel que l'impact d'une météorite géante ou une méga-éruption volcanique, dont la signature n'est pas apparente dans

l'enregistrement de Vostok, les changements de température ont donc nécessairement été la cause déclenchante de tous les épisodes climatiques. Même la signature de l'événement volcanique le plus explosif du Quaternaire, la superéruption de Toba il y a 75 ka, n'a pas pu être détectée, en accord avec un manque d'effets climatiques révélé par les observations géologiques (Lane *et al.*, 2013).

(vii) Comme l'indique la nature accidentée de l'enregistrement, des fluctuations de température et de CO_2 ont constamment eu lieu avec une variété d'intensités et d'échelles de temps, les plus courtes apparaissant de nombreux pics en dents de scie superposés aux pics de température les plus récents.

(viii) Il n'y a aucune raison pour que ces pics de température en dents de scie aient été moins fréquents ou moins intenses dans la partie la plus ancienne de l'enregistrement des températures que dans la partie la plus récente. Le contraste entre les variations irrégulières de température et plus lisses de teneurs en CO₂ n'a donc probablement pas été limité au cycle le plus récent. Au contraire, il a plutôt existé dans tous les cycles avant que les variations de températures ne soient progressivement lissées avec le temps comme indiqué ci-avant.

Dans le cas des cycles de Milankovitch, la latitude et la période de l'année pertinentes pour calculer les changements d'insolation dans le passé ont longtemps été largement débattus (cf. Imbrie et Palmer Imbrie, 1979). A l'aide de l'analyse spectrale, de nombreux travaux ont visé à déterminer comment l'interaction complexe des périodicités astronomiques détermine les changements climatiques (cf. Crucifix *et al.*, 2006). L'effet critique de la puissance instantanée du rayonnement solaire aux solstices d'été a en particulier été souligné car il est corrélé à la dérivée du volume de glace par rapport au temps (Edvardsson *et al.*, 2002). Mais ces caractéristiques n'ont pas besoin d'être passées en revue ici : pour interpréter le message transmis par les archives glaciaires sur la relation température-CO₂ pendant des échelles de temps longues, auxquelles cette étude est consacrée, il suffira de noter que, pour des raisons évidentes de cohérence, les calculs d'insolation rapportés par Petit *et al.* (1999) pour la mi-juin et 65° Nord ont été utilisés (Fig. 1). Bien qu'elle ne soit évidemment pas parfaite, la concordance étonnamment bonne des principaux pics de température et de teneur en CO₂ avec les maxima d'insolation relevés par Petit *et al.* confirme en particulier la bonne précision de la datation des carottes glaciaires.

4. Analyse épistémologique

4.1. La teneur atmosphérique en CO₂ : un simple effet de la température ?

En dépit de l'inférence (iii), la remarquable proportionnalité entre les amplitudes des augmentations des températures et des concentrations en CO₂ au début des transitions glaciaires-interglaciaires a conduit à établir lequel de ces deux paramètres a contrôlé l'autre (Petit *et al.*, 1999). Pour les fortes hausses initiales, la détermination d'une différence temporelle entre les deux séries d'observations est problématique, en particulier en raison du temps nécessaire à la fermeture des pores de glace. D'autres études et interprétations ont néanmoins montré que les augmentations de CO₂ ont été en retard de moins de 1 ka par rapport aux augmentations initiales de température (Fisher *et al.*, 1999 ; Caillon *et*

al., 2003 ; Vakulenko *et al.*, 2004). Des travaux ultérieurs ont mis en évidence des décalages encore plus courts (Pedro *et al.*, 2012) ou même un quasi synchronisme (Parrenin *et al.*, 2013). Ce couplage étroit est en accord avec la rapidité avec laquelle la teneur en CO₂ atmosphérique s'ajuste aux changements de la température de surface de l'océan, comme cela a été observé dans une étude couvrant la période 1980-2011 (Humlum *et al.*, 2013).

Pour étudier plus précisément les relations entre température et CO₂, il est utile d'emprunter à la littérature spectroscopique le concept de *largeur maximale à mi-hauteur* d'un pic donné afin de quantifier les intervalles de temps des transitions glaciaires-interglaciaires. A cet effet, les fines barres verticales marquant dans la Fig. 1 le début de chaque cycle ont été utilisées pour déterminer les minima des pics de CO₂ et de température d'une manière objective et cohérente. Comme indiqué par les barres horizontales épaisses de la Fig. 1, les largeurs de pics à mi-hauteur varient d'environ 7 à 16 ka pour les températures et de 14 à 23 ka pour les teneurs en CO₂. Indépendamment de la configuration particulière de Milankovitch à laquelle ils sont associés, tous les autres pics sont également plus étroits pour les températures que pour les teneurs en CO₂, en moyenne de $1,3 \pm 1,0$ ka (Mudelsee, 2001).

Pour tous les pics de température et de CO₂, identifier quelle est la cause et quel est l'effet est en principe simple car un effet ne peut pas durer moins longtemps que sa cause alors que l'inverse peut évidemment être vrai. Si on suppose qu'une augmentation de teneur en CO₂ est à l'origine de l'élévation de température, alors les différences de largeur dans leurs signaux respectifs poserait le sérieux problème de savoir pourquoi, après certains intervalles de temps, des niveaux élevés de teneurs en CO₂ ou même de nouvelles augmentations de teneurs en CO₂ (cf. cycle II) entraîneraient des baisses de températures.

Il y a très longtemps, Aristote (IV^e s. av. J.-C.) discuta de telles situations dans sa célèbre *Métaphysique*. Comme il le souligna, croire « que la même chose est et n'est pas » impliquerait « d'avoir des opinions contraires simultanées ». Avec son *principe de non-contradiction*, Aristote affirma en outre qu'il « est impossible que le même attribut appartienne et n'appartienne pas en même temps, au même sujet et sous le même rapport. ». Comme il l'expliqua également sans jamais avoir été contredit depuis lors dans les études scientifiques, « c'est pourquoi toute démonstration se ramène à cet ultime principe, car il est naturellement principe, même pour tous les autres axiomes ».

Le fait que les largeurs de pic soient systématiquement plus grandes pour la teneur en CO₂ que pour

la température implique donc que les variations des concentrations de CO₂ ont été induites par les changements de température tout au long des cycles et pas seulement à leurs débuts. Les pics signalés par un ou deux points noirs dans la Fig. 1 sont particulièrement intéressants à cet égard. Dans chaque cas, un seul pic de CO₂ est corrélé avec un doublet de température de sorte de telles caractéristiques violeraient à nouveau clairement le principe de non-contradiction si les variations de concentration du CO₂ étaient considérées comme des causes et les changements de température comme des effets.

Il est aisé de donner un sens physique à cette conclusion. La quantité totale de CO₂ dans l'atmosphère ne représente qu'une infime partie de celle qui est présente dans les océans (Lee *et al.*, 2019). Même si les propriétés acido-basiques des solutions aqueuses contenant du CO₂ et le rôle biologique des ions carbonate et bicarbonate rendent le tableau difficile à démêler quantitativement (cf. Michard, 2008), des augmentations de température entraînent en effet une diminution générale de la solubilité du CO₂ dans les océans et, corrélativement, des augmentations de teneur en CO₂ atmosphérique.

À cet égard, les différences de largeurs de pics observées dans la Fig. 1 révèlent un important contraste d'échelle temporelle dans chaque cycle entre la très forte transition initiale glaciaire-interglaciaire et les épisodes suivants. Avec leurs variations relativement faibles de température et de teneur en CO₂, ces épisodes présentent des décalages temporels réduits de l'ordre de 1 ka seulement entre ces deux paramètres, qui sont semblables aux échelles de temps habituellement attribuées à l'homogénéisation entière des océans. Dans ces cas, les échanges avec l'atmosphère semblent donc s'effectuer presque aussi rapidement que pendant les périodes de réchauffement, ce qui est cohérent avec un équilibrage rapide entre atmosphère et hydrosphère (Humlum *et al.*, 2013). Pour les transitions abruptes glaciaires-interglaciaire, les largeurs des pics de température varient grandement de 7 à 16 ka (Fig. 1) mais leurs différences avec celles des pics de CO₂ correspondants ont néanmoins la même grande valeur de 7 ka. Si ce n'est pas une coïncidence, ce décalage commun suggère des échelles de temps beaucoup plus longues que ce qui est généralement supposé pour une homogénéisation entière des océans après de fortes chutes de température. De telles échelles de temps ont été liées à des changements de la couverture de glaces et de la constitution de la biosphère terrestre (Fisher *et al.*, 1999). Contrairement à ce qu'ont suggéré ces auteurs, ces modifications ne dépendraient cependant pas de la durée de la période chaude précédente.

4.2 La rétroaction du CO₂

La relation simple température-CO₂ décrite dans la section précédente n'est cependant pas couramment considérée car elle ignore tout effet de serre. Pour se conformer au paradigme arrhénien, Petit *et al.* (1999) ont repris l'idée qu'une augmentation initiale de teneur atmosphérique en CO₂ (induite par une augmentation de la température au début d'un cycle de Milankovitch) amplifie à son tour le forçage orbital initial et est elle-même amplifiée par des rétroactions atmosphériques. Épistémologiquement, un tel processus en quatre étapes doit être examiné à la lumière du *principe de parcimonie*, qui a également été énoncé pour la première fois par Aristote dans ses *Topiques* : « Il existe encore une faute que voici au sujet des raisonnements déductifs, à savoir quand on montre quelque chose par des étapes plus longues, alors qu'on peut le faire par des étapes moins nombreuses ». Pour être justifiées, de telles étapes supplémentaires nécessitent donc des preuves indiscutables.

Des rétroactions sont effectivement possibles, par lesquelles une cause devient alternativement un effet et un effet une cause. Par définition, cependant, un tel mécanisme implique le synchronisme des causes et des effets à l'échelle de temps de leurs interactions mutuelles. Dans le cas de Vostok, la rétroaction du CO₂ renforcerait les augmentations de température pendant les périodes de réchauffement mais aussi, réciproquement, les diminutions de température pendant les phases de refroidissement des cycles de Milankovitch. D'après le double mode de fonctionnement de la rétroaction, les diminutions et les augmentations de température devraient donc être semblables pour les mêmes concentrations de gaz à effet de serre, *quel que soit le temps de résidence de ces gaz dans l'atmosphère*.

Or le synchronisme des causes et des effets n'est bien respecté que pendant les périodes de réchauffement où le décalage temporel entre l'augmentation de la température et celle de la teneur en CO₂ est très faible. Comme on l'a déjà souligné, à l'opposé, le synchronisme est clairement rompu pendant les périodes de refroidissement, et plus clairement encore lorsque les températures diminuent fortement alors que les teneurs en CO₂ restent élevées (Fig. 1). Cette caractéristique est la plus évidente dans la transition glaciaire-interglaciaire du cycle III, où le pic de température est étroit et symétrique, tandis que le pic de CO₂ présente un large épaulement représentant le décalage temporel de 7 ka mentionné ci-dessus. Cette désynchronisation est aussi clairement visible dans le cycle II, où le pic de CO₂ en dents de scie contraste avec l'ampleur rapidement décroissante du pic de température.

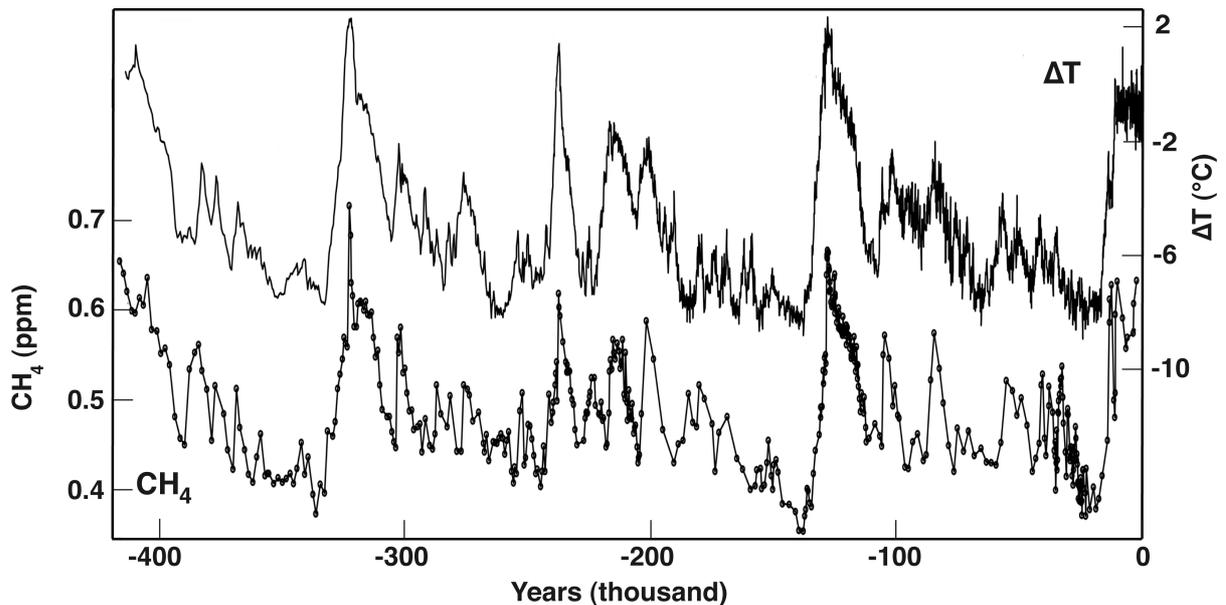


Fig. 2. La corrélation remarquable entre les variations de température et la teneur en méthane dans l'enregistrement de Vostok. Données de Petit *et al.* (1999) représentées par ordre chronologique de gauche à droite.

Dans tous les cycles, le fait que les diminutions de température ne dépendent pas de façon notable de la teneur en CO_2 démontre par conséquent que le synchronisme requis par le mécanisme de rétroaction fait défaut. Ce mécanisme est en outre contredit par les contrastes marqués entre les larges maxima des teneurs en CO_2 et les doublets de pics de température pointus signalés par les points noirs de la Fig. 1. Comme l'indiquent les données du cycle IV, ces contrastes ne sont pas dus à une différence de résolution entre les deux paramètres. Qu'ils ne sont pas non plus une coïncidence est révélé par leur observation systématique uniquement dans les parties des cycles de Milankovitch où les variations d'insolation sont les plus faibles (Fig. 1).

De même, un fait frappant est que, comme le montrent les points noirs placés près des courbes d'insolation du haut de la Fig. 1, les doublets de température se trouvent à chaque fois à des endroits à la fois bien définis et analogues des cycles d'insolation. En d'autres termes, les pics marqués par des points de la Fig. 1 démontrent à nouveau que la température est sensible à de faibles changements d'insolation, mais pas à des variations notables de teneur en CO_2 , une conclusion également cohérente avec le contraste irrégulier-lissé des enregistrements de température et de teneur en CO_2 .

Vis-à-vis de la rétroaction du CO_2 , les teneurs en CH_4 soulèvent une autre difficulté qui pourrait être plus fondamentale encore. Comme celles du CO_2 , leurs variations n'ont pas pu être directement causées par des

changements d'énergie solaire transférée à l'atmosphère terrestre. Elles ont nécessairement résulté de changements de température. Si les teneurs en CO_2 avaient exercé une rétroaction notable sur les températures, alors les largeurs de pic des teneurs en CO_2 et en CH_4 devraient être fortement corrélées. Une telle corrélation *causale* est en fait inexistante car, contrairement aux teneurs en CO_2 , celles en CH_4 ne présentent aucun décalage temporel ou autre par rapport aux températures. Ces teneurs en CH_4 sont en revanche remarquablement bien corrélées aux températures, comme le montre le fait que les pics de ces deux paramètres ont presque les mêmes largeurs (Fig. 2). Des données plus récentes ont même révélé des corrélations encore plus étroites (cf. Buizert *et al.*, 2015).

Ironie de l'histoire, ce synchronisme évident pourrait faire du CH_4 , et non du CO_2 , un candidat potentiel pour un mécanisme de rétroaction. Mais les concentrations de CH_4 dans les carotes de Vostok n'ont varié que de 0,4 à 0,7 ppmv, des valeurs environ 500 fois inférieures à celles du CO_2 (Fig. 1) et 3 à 4 fois plus faibles que les teneurs actuelles. Si elle avait réellement été importante dans le passé, une rétroaction du méthane conduirait alors les températures à être aujourd'hui considérablement plus élevées que celles observées. Les données des carottes glaciaires excluent donc également toute influence notable du méthane.

5. Implications

5.1 L'énigme du CO_2

En règle générale, corrélation n'implique pas nécessairement causalité. A l'inverse, l'absence de corrélation exclut résolument toute causalité. Concilier le rôle moteur du CO₂ attribué par les modèles climatiques avec les conclusions opposées tirées ici de l'enregistrement des carottes glaciaires semble donc présenter des difficultés considérables. Par conséquent, les résultats des carottes glaciaires déplacent la charge de la preuve d'une quelconque influence du CO₂ sur les températures vers les partisans du mécanisme de rétroaction et rendent, en outre, toute détermination de la sensibilité du climat problématique.

En pratique, les modèles climatiques actuels ne se prêtent pas à *réfutabilité* au sens de Popper (1959) car ils sont si complexes, impliquent tant de paramètres physiques, reposent sur tant de données pour leur conception et leur évaluation, ne disposent pas de calculs appropriés de propagation des erreurs et souffrent du fait que les observations qu'ils visent à reproduire ne peuvent pas être modifiées à volonté pour vérifier leurs réponses dans des conditions très différentes. Il est en revanche avancé que les modèles sont fiables grâce à leur base physique solide, ce qui n'est pas confirmé par la présente analyse, tandis qu'on fait également appel à la notion subjective de *consensus* pour affirmer leur validité. Il n'est pas nécessaire de discuter longuement de la question de savoir si un tel consensus prévaut ici car cette notion n'est pas pertinente d'un point de vue épistémologique. Comme on l'a déjà évoqué, l'histoire des sciences n'est rien d'autre qu'une longue promenade dans le cimetière où des idées qui ont été généralement acceptées reposent maintenant en paix.

Pour la présente question, ce point a été remarquablement bien illustré à la fin du XIX^e siècle, puis à nouveau au milieu du XX^e, par le consensus atteint successivement *pour* et *contre*, et finalement *pour* le contrôle astronomique des périodes glaciaires. Comme l'ont noté Imbrie et Palmer Imbrie (1979) pour cette dernière période, « au cours des années 1930 et 1940, la plupart des géologues européens étaient acquis à la théorie de Milankovitch » et « la majorité des scientifiques ont continué à favoriser la théorie astronomique jusqu'en 1950. Mais au début des années 1950, on a assisté à un revirement spectaculaire puisque, en 1955, la théorie astronomique était rejetée par la plupart des géologues ». Les arguments *contre* cette théorie devinrent particulièrement forts lorsque la nouvelle technique de datation au ¹⁴C « révéla un modèle de changement climatique qui était en désaccord sur presque tous les points avec la théorie astronomique ». Peu de temps avant que Hays, Imbrie et Shackleton (1976) ne publient leur étude qui fit date, il s'ensuivit que, selon Imbrie et Palmer Imbrie, « en 1969, la majorité des scientifiques étaient

suffisamment impressionnés par les preuves apportées par le radiocarbone contre la théorie de Milankovitch pour éliminer l'idée en tant que concurrent sérieux » dans l'explication des âges glaciaires.

Contrairement aux simulations climatiques, la présente analyse se prête à réfutabilité puisque sa fausseté éventuelle pourrait être démontrée sans ambiguïté. A cet égard, on peut souligner que l'approche suivie ici intègre directement, avec le poids approprié, tous les facteurs pertinents pour le problème et qu'elle est absolument indépendante de tout mécanisme physique invoqué, de toute interaction supposée entre les variables climatiques, de toute considération sur le cycle du CO₂, de toute analyse statistique d'ensembles sélectionnés de données supposées représentatives du problème, et de toute autre caractéristique des simulations climatiques.

L'une des règles cardinales en science est de rejeter une hypothèse contredisant clairement les résultats expérimentaux qu'elle est censée expliquer, surtout si elle contredit également le principe le plus fondamental de la science, le principe de non-contradiction, « le plus certain » de tous, comme le souligna Aristote dans la *Métaphysique*. Si la présente analyse ne peut pas être réfutée, il faut alors rejeter le paradigme Arrhenian et conclure (i) que les changements de teneur en CO₂ atmosphérique jusqu'à 300 ppm ont eu des effets mineurs, tout au plus, sur les températures au cours des 423 dernières ka ; (ii) que, comme décrit dans la section 4.1, la teneur en CO₂ atmosphérique s'est simplement ajustée pendant cette période aux conditions de température prévalant à la surface de la Terre, dont les variations ont principalement été déterminées par les changements d'insolation au cours des cycles de Milankovitch ; (iii) et que des contributions significatives du CO₂ et du CH₄ aux changements de température à la surface de la Terre ne sont pas étayées par des preuves directes et indépendantes.

La possibilité évoquée que les hausses de température au cours des cycles de Milankovitch aient pu être déclenchées par des augmentations de concentration de CO₂ est en fait surprenante car elle violerait les principes fondamentaux de la thermodynamique. Comme on le sait depuis les travaux de Planck, des radiations représentent non seulement de l'énergie mais aussi de l'entropie. Indépendamment de la manière par laquelle l'entropie des radiations est transférée à la surface et à l'atmosphère de la Terre, ou perdue, le fait fondamental est que la température et l'entropie sont les variables conjuguées respectivement intensive et extensive de l'énergie thermique. Dans toutes les circonstances, les changements de température d'un système (ou plus généralement d'enthalpie) sont donc nécessairement causés par une

variation d'entropie (cf. Richet, 2001). C'est une autre façon d'affirmer que les gaz à effet de serre ne peuvent affecter le climat que par le biais de changements thermiques. En tant que tels, leurs effets doivent se manifester dans les données de Vostok et dans tout autre enregistrement de températures, qui doivent ainsi être considéré comme des thermogrammes d'analyses thermiques.

Évidemment, on peut aussi rappeler que d'autres facteurs que les interactions CO₂-température sont impliqués dans le problème très complexe du climat ; en ce cas, un aspect important est que des changements de teneur en CO₂ atmosphérique de dizaines ou même de centaines de ppm ne pourraient certainement pas affecter directement le volume de glace ou les points de basculement affectant par exemple les modes de circulation océanique, pour ne citer qu'un seul élément important, mais ne pourraient agir que par le biais de changements thermiques tels que décrits ci-dessus. La conclusion reste donc qu'il n'est pas fondé de mettre autant l'accent sur les effets du CO₂ dans les modèles climatiques ou sur les réductions d'émissions dans les politiques environnementales.

Pour les carottes de Vostok, un premier facteur clé qui garantit des évaluations fiables des températures en rapport avec concentrations de CO₂ et de CH₄ est la détermination de ces trois paramètres pour les mêmes fragments de glace, d'âges connus. Un deuxième facteur est le fait que les variations de température pouvant atteindre 12°C au cours des cycles climatiques observées dans les régions polaires sont beaucoup plus importantes que les 2 à 3°C qui ont affecté la Terre entière, ce qui explique la résolution beaucoup plus élevée des enregistrements polaires. Enfin, un troisième facteur est l'échelle de temps de ces observations, qui est plus de mille fois plus longue que celles des simulations climatiques et des mesures disponibles des températures et des teneurs en gaz de l'atmosphère. Il est particulièrement important que les 423 ka considérés ici soient assez longs pour englober quatre cycles glaciaires complets pour lesquels les fluctuations climatiques à court terme peuvent être négligées, mais suffisamment courts pour ne pas être affectés par d'autres facteurs tels que les changements de position des continents qui jouent un rôle important pour les échelles de temps encore plus longues. En outre, l'absence de corrélations en faveur d'un forçage par le CO₂ n'est pas affecté par les biais inévitables qui surviennent lorsque des ensembles de données sans rapport entre eux sont utilisés pour différents paramètres, en particulier lorsque certains sont tirés indirectement d'études de "proxies" ou lorsque les études effectuées portent sur de courtes périodes de temps.

Dans l'atmosphère, la teneur maximale en CO₂ de 300 ppm trouvée dans l'enregistrement de Vostok a été atteinte à nouveau dans les années 1910. Au cours des cycles climatiques (Fig. 1), l'effet principal de ces concentrations élevées a été simplement d'augmenter considérablement le décalage temporel entre les décroissances des teneurs en CO₂ et celles des température, sans effets significatifs sur les climats passés. Il est donc douteux qu'un réchauffement global significatif ait pu être causé par les émissions humaines pendant la majeure partie du XX^e siècle via l'augmentation supplémentaire de 50 ppm de CO₂ observée jusque dans les années 1980. En raison de l'absence de preuves de mécanismes de rétroaction, qui est particulièrement bien démontrée par les mesures de CH₄, il faudrait en fait déterminer à partir de quel niveau, s'il y en avait un, les concentrations de CO₂ commenceraient à avoir quelque effet ainsi qu'à établir les conséquences désastreuses des niveaux actuels de CO₂.

Le principe de parcimonie conduit plutôt à conclure qu'un réchauffement actuel ne représenterait qu'une nouvelle fluctuation analogue à celles qui ont été récurrentes dans les deux derniers cycles climatiques et n'ont pas encore été moyennées dans l'enregistrement de Vostok (Fig. 1) ; de manière étonnante, celles-ci semblent d'ailleurs avoir été négligées dans les discussions sur les variations de température à court terme. Comme on l'a souvent fait remarquer, ce serait en fait une hypothèse arbitraire que de poser qu'un système aussi chaotique et hautement hétérogène que la Terre, qui doit être décrit en termes d'ensembles complexes d'équations non linéaires couplées, évoluerait toujours de manière régulière sur de longues périodes.

La discussion géochimique la plus approfondie des cycles glaciaires en rapport avec les effets du CO₂ sur le climat a probablement été publiée par Broecker (2018), qui a souligné que certaines caractéristiques importantes du climat passé ne pouvaient pas être expliquées en termes de variations de teneur en CO₂. Broecker a néanmoins relevé que «les archives géologiques montre clairement que le CO₂ a joué un rôle déterminant dans les changements climatiques passés», ajoutant que «comme le montre clairement l'enregistrement des 150 derniers millénaires», le CO₂ « n'a pas agi seul » car les cycles d'insolation, la circulation ou le réarrangement des océans et les gradients de température latitudinaux ont également contribué.»

Bien que moins importants que les cycles d'insolation, les autres facteurs mentionnés par Broecker doivent certainement être pris en compte dans des représentations plus détaillées.

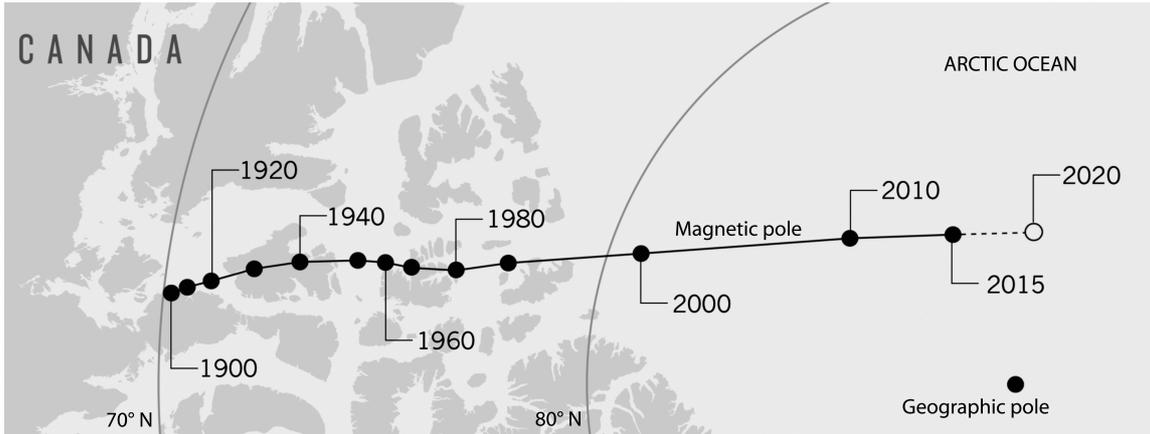


Fig. 3. Le déplacement fortement accéléré du pôle nord magnétique (d'après Witze, 2019) : les distances semblables parcourues de 1900 à 1980 et de 2000 à 2020 sont corrélées quantitativement (mais bien sûr de manière fortuite) pendant les deux périodes avec un accroissement d'environ 40 ppm de la teneur en CO₂ de l'atmosphère (Observatoire d'Hawaii, 2019).

Dans l'ensemble, l'importance fondamentale des enregistrements de l'Antarctique repose cependant sur le fait que les cycles de glaciation/déglaciation sont les caractéristiques les plus visibles des changements climatiques et que les variations du niveau de la mer, qui en résultent, ont nécessairement affecté l'ensemble de la planète. Ce qui est particulièrement intéressant à cet égard est le synchronisme des épisodes de réchauffement et de refroidissement observés sur de longues échelles de temps entre le Groenland et l'Antarctique (Pedro *et al.*, 2011). En outre, le synchronisme remarquable des variations de température et de méthane indique l'absence de décalages temporels latitudinaux majeurs, puisque la teneur en méthane atmosphérique semble presque entièrement contrôlée par des sources et des puits tropicaux (Louergue *et al.*, 2008), et non par des interactions avec l'eau de mer (Reeburgh, 2007)

5.2. Les dangers du raisonnement circulaire

Petit (2013) a affirmé que « le rôle amplificateur du CO₂ sur la température globale, lors des changements climatiques » a été démontré pour la première fois par les analyses de Vostok, et a ajouté que ces résultats ont ensuite été « très vite pris en compte par le GIEC qui est récemment arrivé à la conclusion que les activités humaines sont responsables du réchauffement climatique actuel ». L'importance des résultats de Vostok a donc été centrale dans le débat actuel, même s'il est maintenant communément souligné que le réchauffement climatique est plutôt démontré par une compréhension quantitative des mécanismes physiques par lesquels les températures et les teneurs en CO₂ sont liées dans des modèles climatiques avancés.

A propos de leurs analyses de Vostok, Petit *et al.* (1999) ont conclu que « les résultats de diverses simulations climatiques permettent de supposer raisonnablement que les gaz à effet de serre ont, à l'échelle mondiale, contribué de manière significative (peut-être environ la moitié, soit 2 à 3°C) au changement de température glaciaire-interglaciaire moyen mondial ». Le fait que cette affirmation soit clairement contredite par la présente analyse invalide à son tour les simulations climatiques dont elle est issue. La rétroaction du CO₂ censée être démontrée par les analyses de carottes glaciaires semble plutôt illustrer une situation assez commune où une notion préconçue de causalité a conduit à interpréter incorrectement les mesures effectuées — peut-être aussi parce que celles-ci n'ont pas été représentées en fonction du temps, mais de la profondeur, ce qui a pu faire naître l'illusion que les pics de CO₂ précèdent systématiquement ceux de température.

Cette situation illustre le péril de transposer des concepts théoriques à un système très complexe lorsque le support observationnel est incomplet ou lorsqu'une évaluation indépendante et rigoureuse de la validité de la procédure est absente. En d'autres termes, l'interprétation des enregistrements de CO₂ et de température des carottes glaciaires à la lumière des modèles climatiques a représenté un saut méthodologique injustifié. En réalité, toute affirmation selon laquelle les modèles reproduisent avec précision l'évolution climatique décrite depuis la fin du XX^e siècle illustrerait plutôt leur nature fallacieuse, et non leur validité, si on accepte que les hausses de température de cette période ne sont pas causées par des augmentations de teneur en CO₂.

Les modèles climatiques présentent en outre une grande faiblesse épistémologique car les échelles de temps de 150 ans au plus qu'ils considèrent avec des observations directes ou indirectes sont extrêmement courtes, même par rapport à celles des fluctuations les plus brèves, qu'on trouve dans les enregistrements climatiques (Fig. 1). La situation est analogue à celle à laquelle on serait confronté en tentant de comprendre les fondements physiques des marées en se concentrant sur une seule vaguelette à la surface de l'eau et non sur des cycles entiers de marées montantes et descendantes d'amplitudes variables. La fiabilité des modèles climatiques doit donc être établie à partir de leur capacité à reproduire au moins les principales caractéristiques des derniers cycles glaciaires, à commencer par les transitions abruptes glaciaires-interglaciaires. Compte tenu du rôle fondamental attribué aux gaz à effet de serre, tout modèle ne pourra être considéré comme valide tant que les différences de largeur entre les pics de températures et de teneurs en CO₂ ne seront pas reproduites de manière quantitative.

En réalité, les modèles actuels souffrent de la nature circulaire du raisonnement qui sous-tend leur mécanisme de rétroaction supposé, par lequel, en dernière analyse, l'influence prédite du CO₂ se conforme simplement aux effets postulés dans une situation où les augmentations anthropiques de teneur en CO₂ accompagnent celles des températures. Dans une sorte de raisonnement par l'absurde, une situation analogue serait rencontrée si la corrélation quantitative observée entre les augmentations récentes des teneurs en CO₂ atmosphérique et le déplacement géographique du pôle Nord magnétique (Fig. 3) était interprétée comme une relation de causalité — ce qui ne pourrait évidemment pas être pris au sérieux en raison d'une implausibilité physique complète !

Dans un exposé bien connu, l'auteur latin Macrobe (fl. début du Ve s.) illustra il y a longtemps une telle circularité de raisonnement en expliquant pourquoi la place de la Terre était au centre du monde. Comme il l'affirma d'une manière rappelant des rétroactions complexes, « vraiment indissolubles sont les causes liées par des connexions mutuelles et réciproques ; du fait que l'une crée l'autre et qu'elles naissent réciproquement l'une de l'autre, elles ne sont jamais libérées de l'emprise de leur association naturelle. Tels sont les liens dans lesquels la nature a enserré la Terre ». Ainsi, conclut Macrobe, « c'est par de tels liens que la nature a retenu la Terre fermement : Si tous les corps se portent sur elle, c'est parce que, étant située au milieu, elle est immobile ; si elle est immobile, c'est parce qu'elle est tout en bas ; et elle ne pourrait pas n'être pas tout en bas puisque tous les corps se portent sur elle. »

5.3. Les sciences de la Terre, une fabrique de pièges

Pour un praticien des sciences de la Terre, le débat actuel sur le climat rappelle la longue série de controverses auxquelles la géologie a été particulièrement sujette (cf. Hallam, 1989). La taille gigantesque, les échelles de temps très longues, la complexité et le grand nombre de paramètres à prendre en compte pour le système Terre dans son ensemble ont plus d'une fois complètement induit en erreur d'éminents scientifiques trop attachés à leur propre physique. L'affirmation que la science a définitivement résolu le problème du climat rappelle particulièrement à l'observateur deux débats célèbres. Au sujet de la mobilité continentale, le mathématicien très influent et grand théoricien de la géophysique H. Jeffreys (1929) eut raison lorsqu'il affirma que, dans une Terre rigide, la « dérive séculaire » des continents par rapport au reste de la croûte terrestre est, tel que l'ont soutenu Wegener et d'autres, hors de question ». Mais il eut néanmoins tort car il n'envisagea pas la convection dans un manteau très visqueux, qui fut proposée au même moment comme un mécanisme viable par A. Holmes (1929).

Le point culminant de la longue controverse sur l'ancienneté de la Terre à la fin du XIXe siècle est également pertinent. A cette époque, un âge inférieur à 100 millions d'années paraissait avoir été démontré avec la plus grande rigueur, c'est-à-dire sans aucun paramètre ajustable, de quatre manières totalement indépendantes à partir (i) de l'histoire du refroidissement d'une Terre initialement à l'état fondu ; (ii) de l'âge du Soleil déterminé via le premier principe de la thermodynamique ; (iii) du temps nécessaire aux océans pour acquérir leur salinité ; (iv) et du moment où la Lune se sépara de la Terre, lui-même déduit de considérations astronomiques (cf. Richet, 2007). Le célèbre physicien P.G. Tait (un ami proche de Kelvin) illustra alors la confiance en soi d'un théoricien en affirmant en 1885 : « Nous disons alors : tant pis pour la géologie telle qu'elle est à présent comprise par ses principales autorités, parce que, comme vous allez le voir, des considérations physiques tirées de points de vue indépendants rendent *absolument impossible* que plus de dix ou quinze millions d'années soient accordées. »

Peut-être encore plus pertinent est le consensus clair qui fut atteint dans les années 1890 lorsque les géologues évaluant l'âge de la Terre trouvèrent des moyens de se conformer au moins partiellement aux exigences des physiciens : en ajustant leurs estimations des épaisseurs de la colonne stratigraphique et des taux moyens de sédimentation, ils parvinrent à des âges allant de 26 à 100 millions d'années. Ainsi, la grande ironie de la situation est que ce consensus atteint spontanément — c'est-à-dire par le seul poids de

l'autorité scientifique, sans aucune pression financière, sociale ou politique — pour se conformer au nouveau paradigme *physique* dominant vola en éclats moins de vingt ans après la déclaration de Tait, lorsque les datations radioactives commencèrent à indiquer un âge de plusieurs milliards d'années pour la Terre (cf. Richet, 2007).

Contrairement au contexte des débats précédents, il est peu probable que de nouveaux principes fondamentaux doivent être découverts pour améliorer la compréhension du climat. Comme l'indiquent les limitations des modèles climatiques actuels soulignées au fil des ans (cf. Lindzen, 1997 ; Christy *et al.*, 2018 ; Lewis et Curry, 2018 ; McKittrick et Christy, 2020 ; Mitchell *et al.*, 2020), la question qui se pose est plutôt de déterminer lesquelles des hypothèses élémentaires et des procédures de calcul utilisées sont trop approximatives ou même incorrectes, et quels facteurs et interactions ont été omis ou n'ont pas été correctement pris en compte dans les simulations effectuées.

La question n'est en rien nouvelle puisque diverses suggestions ont déjà été faites à cet égard. Sans qu'il soit nécessaire de discuter ici la validité de ces approches, il suffira de constater (i) que le retard des changements de teneur en CO₂ par rapport au taux de variation du volume global de glace a déjà été souligné (cf. Roe, 2006) ; (ii) que le rôle du forçage radiatif du CO₂ et du CH₄ apparaît être plusieurs fois plus faible que celui des changements de l'insolation solaire dans les zones et aux latitudes clés sur le plan climatique (Soon, 2007) ; (iii) qu'un doublement des teneurs actuelles en CO₂ et CH₄ augmenterait les forçages de quelques pour cent seulement selon des calculs récents effectués pour les cinq gaz à effet de serre les plus abondants à partir d'un ensemble complet de plus d'un tiers de million de bandes rovibrationnelles (Van Wijngaarden et Happer, 2020) ; (iv) que les mécanismes d'effet de serre habituellement supposés ont aussi été fortement remis en question (cf. Chilingar *et al.*, 2008 ; Allmendinger, 2017 ; Hertzberg *et al.*, 2017 ; Nikolov et Zeller, 2017) ; (v) que les changements climatiques ont été peu étudiés du point de vue de la thermodynamique fondamentale de la production d'entropie dans l'atmosphère (Delgado-Bonal, 2017) ; (vi) et que le tableau d'ensemble a également été contesté dans une perspective plus large (cf. Hertzberg et Schreuder, 2016 ; Fleming, 2018 ; Frank, 2019). En suivant par exemple Blaauw (2017), il serait en particulier intéressant d'examiner si des modèles plus simples, exempts d'effets de serre, donneraient des résultats plus fiables pour des durées plus longues que celles qui sont à l'heure actuelle considérées.

5.4. Vers une nouvelle ère glaciaire ?

Comme on l'a déjà souligné, une caractéristique importante qui doit être prise en compte en termes de réponses dynamiques est le décalage constant de 7 ka entre les pics de température et de CO₂ aux transitions interglaciaires-glaciaires (Fig. 1). Ce décalage est beaucoup plus long que les temps d'équilibration de l'absorption de CO₂ par les océans, mais sa valeur constante indique des processus d'une reproductibilité globale à laquelle on pouvait ne pas s'attendre.

En termes de cycles de Milankovitch, un autre problème d'une importance particulière est de trouver une explication quantitative des rapports 1:2 observés pour les largeurs des pics de température entre les cycles III, et II et IV. La transition I de la Fig. 1 a rendu possible l'invention de l'agriculture et a conduit aux débuts et au développement de la civilisation., Avec une valeur de 13 ka, la largeur à mi-hauteur de son pic de température est cependant déjà bien plus grande que les 7 ka du cycle III et se rapproche des 15-16 ka des cycles II et IV, ce qui pose sérieusement la question de la survenue d'une nouvelle période glaciaire.

Quand la validité des cycles de Milankovitch a commencé à être reconnue, il fut communément admis que les températures avaient diminué depuis la fin des années 1930 (cf. Imbrie et Palmer Imbrie, 1979). Le fait que les épisodes de refroidissement sont beaucoup plus longs que ceux de réchauffement dans les grands cycles climatiques fut établi par les études de loess de Kukla (1970), un auteur qui défendait aussi la thèse d'un refroidissement général en cours. Ainsi, Kukla et Matthews (1972) ont suggéré à partir de faits tels que l'expansion de bancs de glace autour de l'île de Baffin, de la présence de glaces entravant la navigation, ou de l'avancée vers le Sud d'animaux recherchant la chaleur que « la fin naturelle de notre époque chaude est sans aucun doute proche si on considère une échelle de temps géologique ».

Dans le contexte actuel d'un réchauffement climatique, ces craintes d'une nouvelle ère glaciaire sont rétrospectivement prises très à la légère. Selon un modèle fondé sur une relation entre l'insolation pendant l'été boréal et la teneur en CO₂ de l'air, la période interglaciaire actuelle durerait probablement encore de 50 000 à 100 000 ans en fonction de la quantité d'émissions anthropiques de CO₂ (Ganopolski *et al.*, 2016). Même si un forçage par le CO₂ devait être avéré, la fiabilité d'un tel modèle devrait d'abord être établie à partir de sa capacité à reproduire quantitativement les durées respectives des périodes glaciaires passées.

Tant qu'une telle évaluation fera défaut, on peut plutôt supposer que la forte sensibilité du climat aux caractéristiques mineures des cycles de Milankovitch

(Fig. 1) rend a priori improbable que la période chaude actuelle dure beaucoup plus longtemps que les précédentes. A cet égard, la différence importante entre aujourd'hui et la situation rencontrée dans les années 1970 est que la succession de 8 cycles glaciaires majeurs au cours des 800 derniers ka est très bien établie : la chronologie précise fournie par les carottes glaciaires (Fig. 1) suggère plutôt qu'un début de refroidissement général pourrait être observé dans moins de deux millénaires. D'ici là, on peut s'attendre à ce que les modèles climatiques aient atteint le niveau de confiance nécessaire pour faire des prédictions précises. Il n'en reste pas moins que la menace d'une nouvelle ère glaciaire serait de l'ampleur extraordinaire déjà envisagée dans les années 1970, et ferait paraître insignifiantes les craintes actuelles suscitées par un réchauffement climatique.

6 Postface

Indépendamment de toute interprétation particulière des enregistrements climatiques, il paraît approprié de laisser le dernier mot au célèbre naturaliste Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788). Lui-même mathématicien de formation, Buffon lança dès 1749 une vigoureuse mise en garde contre les abus de ce qu'on appelle aujourd'hui les *modèles*, en exposant dans le *Premier discours* de sa monumentale *Histoire naturelle* les « inconvénients où l'on tombe lorsqu'on veut appliquer la Géométrie et le calcul à des sujets de Physique trop compliqués ». Comme le nota Buffon, il faut alors « dépouiller le sujet de la plupart de ces qualités, d'en faire un être abstrait qui ne ressemble plus à l'être réel » et après beaucoup de raisonnements et de calculs, « on transporte ce résultat idéal dans le sujet réel, ce qui produit une infinité de fausses conséquences et d'erreurs ». Ainsi, conclut Buffon, « le point le plus délicat et le plus important de l'étude des sciences » est « de bien distinguer ce qu'il y a de réel dans un sujet de ce que nous lui ajoutons arbitrairement lorsque nous le considérons : reconnaître clairement les propriétés qui appartiennent au sujet et celles que nous imaginons seulement qu'il possède ».

L'auteur remercie vivement K. Schlegel et G. Gregori pour l'intérêt porté à cet étude, M. Hovland, R. Lindzen et les deux autres rapporteurs anonymes de HGSS pour leurs commentaires positifs, constructifs et judicieux sur le manuscrit soumis, et également R. Hellmann, W. Nesbitt et d'autres collègues, bien trop nombreux pour être cités ici, pour des discussions fructueuses, examens critiques de ses arguments et commentaires utiles sur le manuscrit ; le regretté W.S. Broecker dont les articles l'ont mis sur la bonne voie ; et les techniciens, ingénieurs et scientifiques impliqués

dans la recherche sur les carottes glaciaires pour leurs exceptionnels travaux géochimiques.

Par ailleurs, l'auteur n'a jamais eu de relations professionnelles avec des compagnies pétrolières, gazières ou charbonnières, ni d'intérêt privé dans celles-ci, et n'a jamais demandé ou reçu de financement de la part d'une agence ou d'une organisation dédiée à l'environnement. La présente étude est donc entièrement exempte de tout préjugé, conflit d'intérêt ou influence extérieure. Elle représente simplement le résultat d'une quête à l'ancienne de la vérité — une chose qui « est au fond du puits » comme l'avait bien compris, il y a deux millénaires et demi, Démocrite (Ve-IVe s. av. J.-C.), le célèbre atomiste grec.

References

- Allmendinger, T.: The refutation of the climate greenhouse theory and a proposal for a hopeful alternative, *Environ. Pollut. Climate Change*, 1, 1000123, 19 pages, 2017.
- Aristote: *Metaphysica*, 1005b, IVe s., trad. par J. Tricot, *Métaphysique*, Paris, J. Vrin, rééd. 2000.
- Aristote: *Topica*, 162a 24-26, IVe s., trad. par J. Brunschwig, *Topiques*, Paris, Les Belles Lettres, 1967.
- Arrhenius, S.V.: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag.*, 41, 237-76, 1896.
- Blaauw, H.J.: Global warming: Sun and water, *Energy Environ.*, 28, 468-83, 2017, doi 10.1177/0958305X17695276.
- Broecker, W.S.: Climate change: Are we on the brink of a pronounced global warming? *Science*, 401, 460-63, 1975.
- Broecker, W.S.: CO₂: Earth's climate driver, *Geochem. Perspect.*, 7, 117-196, 2018.
- Buffon, G.-L. Leclerc, comte de: *Histoire naturelle*, Premier discours, *Histoire et théorie de la Terre* (1749), in J.L. Lanessan, éd., *Œuvres complètes de Buffon*, 14 vols, Paris, A. Le Vasseur, 1884-1885.
- Buizert, C., Cuffey, K.M., Severinghaus, J.P. et al.: The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology — Part 1 : Methane desynchronization (68-31 ka BP) and the gas age-ice age difference, *Clim. Past*, 11, 153-73, 2015.3 juin 2019
- Caillon, N., Severinghaus, J.P., Jouzel, J. et al.: Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across termination III, *Science*, 299, 1728-31, 2003.
- Chilingar, G.V., Sorokhtin, O.G., Khilyuk, L. et Gorfunkel, M.V.: Greenhouse gases and greenhouse effects, *Environ. Geol.*, 58, 468-83, doi 10.1007/s00254-008-1615-3, 2008.

- Christy, J.R., Spencer, R.W., Braswell, W.D. et Junod, R.: Examination of space-based bulk atmospheric temperatures used in climate research, *Int. J. Rem. Sensing*, 39, 3580-3607, 2018.
- Crucifix, M., Loutre, M.F., et Berger, A.: The climate response to the astronomical forcing, *Space Sci. Rev.*, 125, 213-26, 2006.
- Delgado-Bonal, A., Entropy of radiation: the unseen side of light, *Sci Rep.*, 7, 1642 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01622-6>.
- Démocrite: Témoignage D.K. 68 B117/184a, Ve-Ive s., trad par Dumont, J.-P., Delattre, D. et Poirier, J.-L., *Les Présocratiques*, Paris, Gallimard, 1988.
- Edvardsson, S., Karlsson, K.G., et Engholm, M.: Accurate spin axes and solar system dynamics: Climatic variations for the Earth and Mars, *Astron. Astroph.*, A384, 689-701, 2002.
- EPICA community members: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature*, 429, 623-28, 2004.
- Fisher, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D., et Deck, B.: Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations, *Science*, 283, 1712-14, 1999.
- Fleming, R.J.: An updated review about carbon dioxide and climate change, *Environ. Earth Sci.*, 77, 262, 13 pages, 2018.
- Fourier, J.: Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Mém. Acad. Sci.*, 7, 569-604, 1827.
- Frank, P.: Propagation of error and the reliability of global air temperature projections, *Front. Earth Sci.*, 7.223, doi: 10.3389/feart.2019.00223, 2019.
- Ganopolski, A., Winkelmann, R. et Schellnhuber, H.J.: Critical insolation-CO₂ relation for diagnosing past and future glaciation, *Nature*, 529, 200-03, 2016.
- Gerhart, L.M. et Ward, J.K., Plant responses to low [CO₂] of the past, *New Phytologist*, 188, 624-95, 2010.
- Gest, L., Parrenin, F., Beeman, J.C. et al.: Leads and lags between Antarctic temperature and carbon dioxide during the last deglaciation, *Clim. Past Disc.*, doi:10.5194/cp-2017-71, 2017.
- Hallam, A.: *Great Geological Controversies*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1989.
- Hays, J.D., Imbrie, I. et Shackelton, N.J.: Variations in Earth's orbit — pacemaker of ice ages, *Science*, 194, 1121-32, 1976.
- Hawaii Observatory, Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/odop/mlo/>.
- Hertzberg, M. et Schreuder, H.: Role of atmospheric carbon dioxide in climate changes, *Energy Environ.*, 27, 785-97, doi:10.1177/0958305X16674637, 2016.
- Hertzberg, M., Siddons, A., et Schreuder, H.: Role of greenhouse gases in climate changes, *Energy Environ.*, 28, 530-39, doi:10.1177/0958305X17706177, 2017.
- Holmes, A., Radioactivity and Earth movements, *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 18, 559-606, 1931 [N.B. conférence faite en 1928].
- Humlum, O., Stordahl, K., et Solheim, J.-E.: The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature, *Global Planet. Change*, 100, 51-69, 2013.
- Imbrie, J. et Palmer Imbrie, K.: *Ice Ages. Solving the Mystery*, pp. 117, 119, 121 and 141, McMillan, London, 1979.
- IPCC Working group I: *Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Climate change*, The Physical Science Basis, IPCC, Geneva, 2013.
- Jeffreys, H., p. 305 in *The Earth. Its Origin, History and Physical Constitution*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2nd ed., 1929.
- Jouzel, J., Alley, R.B., Cuffey, K.M. et al.: Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores, *J. Geophys. Res.*, 102, 26, 471-87, 1997.
- Kukla, G.J.: Correlation between loesses and deep-sea sediments, *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 92, 148-80 (1970).
- Kukla, G.J. et Matthews, R.K.: When will the present interglacial end? *Science*, 178, 190-91, 1972.
- Lane, C.S., Chorn, B.T. et Johnson, T.C.: Ash from Toba supereruption in Lake Malawi shows no volcanic winter in East Africa at 75 ka, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 110, 8025-29, 2013.
- Lee, C.-T., Jiang, H., Dasgupta, R. et Torres, M.: A framework for understanding whole-earth carbon cycling, in Orcutt, B.N., Daniel, I. et Dasgupta, R. (Eds), *Deep Carbon, Past to Present*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 313-57, 2019.
- Lemieux-Dudon, B., Blayo, E., Petit, J.-R. et al.: Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores, *Quatern. Sci. Rev.*, 29, 8-20, 2010.
- Lewis, N. et Curry, J.: The impact of recent forcing and ocean uptake data on estimates of climate sensitivity. *J. Climate*, 31, 6051-71, 2018.
- Lindzen, R.: Can increasing carbon dioxide cause climate change? *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 94, 8335-42, 1997.
- Lorius, C., Jouzel, J., Raynaud, D. et al.: The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, 347, 139-45, 1990.
- Louergue, L., Schilt, A., Spahni, R. et al.: Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years, *Nature*, 453, 383-86, 2008.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B. et al.: High-resolution carbon dioxide concentration record

- 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453, 379-82, 2008.
- Macrobe [Macrobius Ambrosius Theodosius] : *Commentarii in somnium Scipionis*, I, 22:2, début Ve s., éd. et tr. par Mireille Armisen-Marchetti, *Commentaire au songe de Scipion*, 2 vols, Les Belles Lettres, Paris, 2001-03.
- McKittrick, R. et Christy, J.: Pervasive warming bias in CIMIP6 tropospheric layers, *Earth Space Science*, 7, e2020EA001281, <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>, 2020.
- Michard, G.: Can we explain atmospheric carbon dioxide oscillations during the past 400,000 years?, *C.R. Géosciences*, 340, 483-94, 2008.
- Milankovitch, M.: Über ein Problem der Wärmeleitung und dessen Anwendung auf die Theorie des solaren Klimas, *Z. Mathem. Phys.*, 62, 63-77, 1913.
- Mitchell, D.M., Lo, Y.T.E., Servius, W.J.M., Haimberger, L. et Polvani, L.: The vertical profile of recent tropical temperature trends: Persistent model biases in the context of internal variability, *Environm. Res. Lett.*, 15, 1040b4, 2020.
- Mudelsee, M.: The phase relations among atmospheric CO₂ content, temperature and global ice volume over the past 420 ka, *Quatern. Sci. Rev.*, 20, 583-89, 2001.
- Nikolov, N. et Zeller, K.: New insights on the physical nature of the atmospheric greenhouse effect deduced from an empirical planetary temperature model, *Environ. Pollut. Climate Change*, 1:1000112, 2017.
- Parrenin, F., Masson-Delmotte, V., Köhler, P. et al.: Synchronous change of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature during the last deglacial warming, *Science*, 339, 1060-63, 2013.
- Pedro, J.B., van Ommen, T.D., Rasmussen, S.O. et al.: The last deglaciation: timing the bipolar seesaw, *Clim. Past*, 7, 671-83, 2011.
- Pedro, J.B., Rasmussen, S.O. et van Ommen, T.D.: Tightened constraints on the time-lag between Antarctic temperature and CO₂ during the last deglaciation, *Clim. Past*, 8, 1213-21, 2012.
- Petit, J.R.: Entretien avec F. Cristofol, Jean-Robert Petit, une vie antarctique, <https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/jean-robert-petit-une-vie-antarctique>, 2013.
- Petit, J.R. et al.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429-36, 1999.
- Popper, K.R.: *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson and Co, London, 1959.
- Raynaud, D., Jouzel, J., Barnola, J.M., Chappelaz, J., Delmas, R.J. et Lorius, C.: The ice record of greenhouse gases, *Science*, 259, 926-34, 1993.
- Reeburgh, W.S.: Oceanic methane biogeochemistry, *Chem. Rev.*, 107, 486-513, 2007.
- Richet, P.: *L'Âge du monde. A la découverte de l'immensité du temps*, Le Seuil, Paris; 1999.
- Richet, P.: Ch. 1, *Les Bases physiques de la thermodynamique*, Belin, Paris, 2000.
- Roe, G.: In defense of Milankovitch, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24703-, 2006.
- Soon, W.: Implications of the secondary role of carbon dioxide and methane forcing in climate change: past, present, and future, *Phys. Geogr.*, 28, 97-125 (2007).
- Tait, P.G.: *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science, with a Special Lecture on Force*, p. 169-70, Macmillan, London, 1885.
- Théophraste, *De Igne*, 9, IVe-IIIe s. av. J.-C., éd. et trad. par V. Coutant, *Theophrastus De Igne. A Post-Aristotelian View of the Nature of Fire*, Royal Vangorcum Ltd, Assen, 1971.
- Tyndall, J.: On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction, *Phil. Mag.*, 22, 169-94 and 273-85, 1861.
- Vakulenko, N.V., Kotlyakov, M., Monin, A.S. et Sonechkin, D.M.: Evidence for the leading role of temperature variations relative to greenhouse gas concentration variations in the Vostok ice core record, *Doklady Earth Sci.*, 396, 663-686-90, 2004.
- Van Wijngaarden, W.A. et Happer, W., Dependence of Earth's thermal radiation on five most abundant greenhouse gases. *arXiv:2006.03098v1 [physics.aoph]*, 2020.
- Witze, A.: Earth's magnetic field is acting up, *Nature*, 565, 143-44, 2019.