

Le changement climatique : la règle en géologie...

Le taux de CO₂ atmosphérique n'a jamais été aussi faible qu'aujourd'hui et la relation température/teneur en CO₂ reste encore mal comprise. Depuis que la Terre existe, c'est-à-dire depuis 4,567 milliards d'années[1], s'il est bien une constante c'est qu'elle n'est jamais restée figée telle quelle, et qu'elle fut sans cesse profondément modifiée de façon plutôt aléatoire. Cela concerne autant les processus internes (notamment la composition de la lithosphère et les variations des mécanismes affectant la dérive des continents) que les processus externes.

Parmi ces derniers l'atmosphère n'a cessé de varier du tout au tout notamment en ce qui concerne sa composition gazeuse. L'ensemble de ces processus internes et externes se sont sans cesse 'télescopés' et ont entraîné des rétroactions complexes à l'origine des nombreux changements climatiques observés dans les archives géologiques. A ces paramètres s'ajoutent également ceux pilotés à l'échelle extraterrestre, parmi les plus importants citons l'activité du Soleil ou les variations des paramètres orbitaux de notre Planète (précession, obliquité, écliptique). Le résultat est une combinaison extrêmement complexe de processus cumulatifs réguliers, irréguliers, linéaires ou non, chaotiques souvent, jouant à toutes les échelles temporelles et affectant à tout moment le climat qui en constitue une réponse. Physiciens, chimistes, biologistes, géographes... géologues tentent chacun à partir de son pré-carré de démêler cet écheveau particulièrement difficile à comprendre. Les synergies entre les disciplines sont heureusement nombreuses et le système climatique est peu à peu mis à nu à travers les temps géologiques.

Echelle géologique de la Terre

© International Commission on Stratigraphy (ICS) - Licence : Tous droits réservés

L'étude du climat actuel semble plus simple que celle des paléoclimats, il s'agit cependant également d'une situation complexe vu l'importance des paramètres mesurables et mesurés qui contribuent à établir la dynamique de notre atmosphère aujourd'hui. L'étude de l'atmosphère est donc bien un des points incontournables pour qui veut comprendre un système climatique, elle est en prise directe avec la partie interne de la Terre (exemple des volcans, de l'érosion continentale suite aux orogénèses ou formations des chaînes de montagnes...), avec la partie externe ou superficielle (exemple des océans, des forêts...) et la composante extraterrestre (exemple des flux des rayons galactiques cosmiques, des impacts de météorites ...). Nombre de ces paramètres sont cernés de manière satisfaisante depuis que la Terre existe. Cette connaissance débute avec le modèle du 'paradoxe du Soleil froid' ou hypothèse astronomique du Soleil pâle[2].

Les premières atmosphères, des réservoirs de gaz à effet de serre

Ce modèle d'évolution du Soleil prédit que sa luminosité était plus faible de 25 à 30% de l'Hadéen à l'Archéen, soit d'environ 4,6 à 4,0 Ga (Ga = milliards d'années). Si l'on

considère que la Terre possédait durant cette période une atmosphère semblable à la nôtre il faudrait alors attendre 2 milliards d'années (donc jusqu'au début du Paléoproterozoïque) pour que sa température de surface dépasse 0°C, la température initiale à 4,6 Ga étant comprise entre -43 et -23°C suivant le modèle du 'paradoxe du Soleil froid'. La quasi-totalité des océans aurait dû être couverte de glace. Les géologues n'ont jamais relevé de trace de glaciation globale durant cette longue période excepté quelques glaciers locaux à 2,9 Ga (glaciation 'pongolienne') et à 2,4 Ga (glaciation huronienne). Ils concluent bien au contraire à une période chaude comme en témoignent notamment la présence de cyanobactéries à 3,8 Ga[3] et d'un cycle érosif de l'eau déjà actif ayant mené à l'accumulation de petits cristaux de zircon il y a 4,4 Ga[4]. L'eau était donc déjà présente 160 Ma (= millions d'années) après la formation de la Terre et les températures océaniques déduites des isotopes de l'oxygène et du silicium mesurés sur des roches siliceuses variaient entre 30 à 50°C (Archéen et Paléoproterozoïque) bien loin d'un climat qui aurait dû être globalement très froid comme le laisserait supposer un 'Soleil pâle' de faible luminosité.

Quel est donc le ou les responsables qui ont permis que la surface de la Planète fût chaude jusqu'au moins le Paléoproterozoïque il y a 2,5 à 2,4 Ga ? Les températures atmosphériques reconstituées étaient comprises entre + 55 et + 85 °C à l'Archéen. Le candidat numéro 1 est le méthane (CH₄), gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO₂, s'y ajoutent l'éthane (C₂H₆), le dioxyde de carbone (CO₂), l'azote (N₂), l'oxyde nitreux (N₂O), l'ammoniaque (NH₃) et même la vapeur d'eau (H₂O). Le méthane, en l'absence d'oxygène à cette période[5] présentait des teneurs de 100 à 1000 fois la teneur de l'atmosphère actuelle. L'origine de ce méthane, probablement abiotique et biotique (production par les archées méthanogènes[6]), fait l'objet de nombreuses études et plusieurs hypothèses sont avancées pour sa quantification. Concernant le CO₂, l'étude de paléosols, des BIF (= 'Banded Iron Formation'[7]) et de minéraux silicatés ou particuliers (pyrite, sidérite, uraninite)[8] montre que sa teneur dans l'atmosphère précambrienne était de 10 à 1 000 fois l'actuelle. L'origine de ce CO₂ est mieux cernée que celle du méthane, et surtout liée au volcanisme. L'oxyde nitreux pourrait être d'origine biologique dès que les micro-organismes sont apparus. Il apparaît ainsi que durant une période couvrant au moins la moitié de l'histoire de la Terre (depuis sa formation il y a 4,567 Ga jusqu'à 2,5-2,0 Ga) l'atmosphère fut très riche en gaz à effet de serre. Pendant cette période la teneur en oxygène était très basse (0,0001% de la teneur actuelle) comme l'indiquent les minéraux cités ci-dessus qui ne peuvent se former qu'en la quasi absence d'oxygène. Cet oxygène deviendra plus abondant (0,1%) à la limite Archéen/Protérozoïque vers 2,5 Ga, pour atteindre des valeurs proches de l'actuelle dès le Cambrien (il y a 0,541 Ga). C'est avec la photosynthèse suite à l'apparition des cyanobactéries que cet oxygène est produit autour de 2,5 Ga (d'autres processus abiotiques, liés à la tectonique ont également joué de manière importante). Ainsi le faible ensoleillement d'une grande partie de la Planète fut compensé par des gaz à effet de serre sans que cela n'empêcha la Vie de se développer pleinement (prolifération de procaryotes, et plus tard apparition des eucaryotes).

Les climats soufflent le chaud et le froid

Que s'est-il passé après ce long épisode chaud avec une atmosphère de composition variable mais toujours riche en gaz à effet de serre ? Avec l'apparition des premiers organismes non microbiens à la transition Précambrien/Cambrien (vers 0,541 Ga) il est possible de reconstituer les environnements de dépôts de manière plus précise et de suivre leurs évolutions jusqu'à aujourd'hui. Ces données faunistiques et floristiques sont

complétées de très nombreuses données notamment de géochimie (par exemple isotopes du carbone, de l'oxygène, de l'azote, du soufre, du strontium, etc.), de physique (géochronologie, paléomagnétisme, stratigraphie magnétique etc.) et de biologie (biomarqueurs, micro- et nannofossiles, alcénones, stomates, etc.).

Il apparaît que le climat de la Terre a oscillé entre deux modes principaux suivant une périodicité d'environ 150 Ma[9] : un mode chaud ('greenhouse' ou 'hothouse') et un mode froid ('icehouse'), ce dernier avec ou sans glaciations. Citons les trois glaciations majeures du Paléozoïque (ou Ere Primaire), à savoir celle de la fin de l'Ordovicien autour de 444 Ma, celle du Carbonifère à 320 Ma qui s'achève à la fin du Permien vers 280-255 Ma connue sous le nom de 'glaciation gondwanienne' omniprésente sur les continents de l'hémisphère sud, et les glaciations plus récentes du Plio-Quaternaire qui débutent il y a environ 15 Ma au Miocène dans l'hémisphère sud avec la formation de l'Antarctique, et il y a 2,5 Ma au Pléistocène dans l'hémisphère nord avec la formation de l'Arctique et l'alternance d'épisodes glaciaires et interglaciaires.

Les glaciations phanérozoïques furent précédées de plusieurs autres à la fin du Néoprotérozoïque (Précambrien final) dont la fameuse glaciation marinoenne il y a 635 Ma à l'origine de la fameuse théorie de la 'Terre boule de neige' avec des températures d'environ -40°C[10]. Outre ces glaciations spectaculaires, des épisodes froids sont également présents, au moins tout au long de l'histoire phanérozoïque, par exemple à la limite Frasnien/Famennien (Dévonien Supérieur) marquée par un refroidissement de 8° à 10°C des océans qui mena à une extinction majeure des organismes. Dans le détail il y eut deux refroidissements qui s'accompagnèrent d'une diminution de 1500 ppm[11] du CO₂ atmosphérique pendant 1 à 3 Ma avec une baisse de 3° à 4°C, puis de 4° à 7°C des températures des eaux équatoriales[12].

Des épisodes particulièrement chauds ont également été mis en évidence au cours du Phanérozoïque, citons une augmentation de 10°C à la transition Permien/Trias avec une atmosphère présentant des températures de +50 à +60°C pendant 5 millions d'années et des températures océaniques de surface de +40°C. L'océan Crétacé est à +37°C, bien au-dessus des températures océaniques actuelles au niveau de l'équateur. Ces épisodes chauds sont toujours bien représentés au Cénozoïque avec des périodes dites 'hyperthermales', à la limite Paléocène/Eocène, à l'Eocène inférieur, à l'Eocène moyen, au Miocène moyen et plus récemment au Quaternaire avec le Pléistocène et surtout pour la période historique avec les optima climatiques de l'Holocène, Romain, Médiéval et actuel[13]. Ces épisodes chauds sont bien étudiés, celui de la limite Paléocène/Eocène (54,98 Ma) a par exemple duré près de 200 000 ans au cours desquels un rapide dégazage de CO₂ (et CH₄) a rejeté dans les océans et l'atmosphère 2000 à 6000 milliards de tonnes de carbone en 20 000 ans. La température augmenta de 5°C aux tropiques et 8°C aux hautes latitudes dans l'océan profond et l'océan fut acidifié avec un pH de 7,6 et la biodiversité fut touchée. Le taux de CO₂ estimé était de 1800 ppm et le niveau de la mer fut plus élevé de 6 m[14].

Notre atmosphère a toujours été riche en CO₂ (jusqu'il y a peu)

Estimations des concentrations de CO₂ durant le Phanérozoïque, l'éon actuel Cm = Cambrien, O = Ordovicien, S = Silurien, D = Dévonien, C = Carbonifère, P = Permien, Tr = Trias, J = Jurassique, K = Crétacé, Pg = Paléogène, N = Néogène

© Robert A. Rohde / Wikimedia Commons - Licence : CC BY-SA

Il est évidemment impossible de mesurer précisément les teneurs en CO₂ (et autres gaz à effet de serre) et la température au cours des temps géologiques. On connaît néanmoins

la plupart (mais sans doute pas tous) des mécanismes qui ont opéré, de sorte que des modélisations sont possibles[15]. Ces modèles intègrent plus d'une dizaine de processus majeurs, à savoir taux de l'altération continentale des silicates (équations biochimiques), flux de CO₂ volcanique intrusif ou effusif, flux de CO₂ métamorphique, processus diagénétiques affectant les roches carbonatées, taux d'enfouissement ou de prélèvement du carbone organique et inorganique, orogénèses etc. De très nombreux indicateurs ou 'proxies' sont utilisés pour contraindre ces processus. Malgré la grande complexité du problème posé l'ensemble des modèles issus de ces études montrent que la teneur en CO₂ a toujours été plus élevée depuis au moins le Cambrien il y a 541 Ma que les teneurs actuelles liées aux cycles glaciaires et interglaciaires.

Les fluctuations sont bien la règle et les teneurs en CO₂ atmosphérique variaient entre 3000 et 7000 ppm, de même l'acidité des océans était également plus forte avec des pH compris entre 7,2 et parfois 8,0. A comparer avec les teneurs atmosphériques récentes en CO₂ qui ont respectivement varié de 180 ppm à 280 ppm au cours des cycles glaciaires et interglaciaires du Quaternaire. La période actuelle est donc 'anormale' d'un point de vue géologique puisque les teneurs en CO₂ sont bien inférieures à 500 ppm et n'ont été rencontrées qu'une seule fois au cours du Carbonifère/Permien. Il semble même qu'il n'y a pas 'géologiquement' de lien entre teneur en CO₂ et glaciation, la glaciation ordovicienne, très brève, avec une température terrestre ayant diminué de 3°C présentait une teneur en CO₂ d'environ 4500 ppm. Pour résumer une courbe d'évolution du CO₂ établie à partir d'un modèle avec une résolution temporelle comprise entre 10 et 30 millions d'années (modélisation GEOCARB III, se reporter à la figure ci-dessous) montre que la teneur en CO₂ était 15 à 25 fois supérieure à l'actuelle au cours du Paléozoïque, de même ordre de grandeur que l'actuelle au cours d'une partie du Carbonifère et 3 à 8 fois supérieure à l'actuelle au cours du Mésozoïque, avant diminuer progressivement au cours du Tertiaire.

Qui pilote le CO₂ à l'échelle géologique ?

La courbe d'évolution du CO₂ résultant de l'ensemble des modèles est confrontée aux données géologiques à diverses échelles. Tentons de voir pourquoi la teneur en CO₂ a diminué d'un facteur 10 du Paléozoïque au Quaternaire avec des valeurs basses au Carbonifère.

A cette diminution qui démarre précisément à la limite Silurien/Dévonien correspond une évolution biologique majeure des plantes avec les bryophytes et les ptéridophytes : pour la première fois elles envahissent les continents en formant des forêts [16]. Elles 'capturent' le CO₂ à travers la photosynthèse (à raison d'environ 60GtC/an, bilan photosynthèse et respiration) et déstockent progressivement le CO₂ de l'atmosphère pendant près de 150 Ma, jusqu'au Carbonifère. En même temps elles amorcent 'la pompe à CO₂' liée à l'hydrolyse ou altération des silicates des parties émergées qu'elles ont envahi [17]. Le taux de CO₂ compris entre 3000 et 7000 ppm (suivant les modèles considérés) au Paléozoïque inférieur diminuera jusqu'à environ 300 ppm à la transition Carbonifère/Permien avec une baisse de 8°C de la température atmosphérique.

Dans le détail la relation température et CO₂ est assez complexe. C'est par exemple ce que montrent les archives géologiques, au cours du Dévonien[18] (soit de 419 à 359 Ma) : on observe un découplage de l'évolution climatique de celle de la teneur en CO₂ durant cette période de 60 Ma, la teneur atmosphérique en CO₂ a baissé très significativement de 6300 ppm à 2100 ppm au cours de cette longue période sans aucun refroidissement (excepté à la limite Frasnien-Famennien, cf. ci-dessus), la température fluctuant très

faiblement autour de 24-22°C. A la fin du Permien le supercontinent ('la Pangée de Wegener') s'est formé et les rides médio-océaniques vont ensuite le disloquer dès le Trias (début du Mésozoïque) en créant notamment l'Océan Atlantique. Cette fragmentation s'accompagne d'une activité volcanique intense, qui est le moteur des rides, et d'un rejet de CO₂ dans l'atmosphère dont la teneur passe à 2000 ppm, la température atmosphérique est plus élevée par rapport l'actuelle de 2°C à la fin du Jurassique et de 8°C à la fin du Crétacé. A nouveau l'activité des plantes, cette fois-ci avec la contribution majeure des gymnospermes et des angiospermes, va consommer ce CO₂ qui diminuera régulièrement au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque tout en restant à une teneur plus élevée que la concentration actuelle.

Au Cénozoïque un refroidissement notable s'amorce et conduira surtout à partir de l'Oligocène aux âges glaciaires du Quaternaire. Cette période est cependant interrompue par plusieurs évènements hyperthermaux, évoqués précédemment, avec chaque fois une augmentation de la température d'environ 5°C suite à l'injection de CO₂ et de CH₄ dans l'atmosphère pendant des dizaines à centaines de milliers d'années. Finalement la Terre se refroidit significativement il y a 15 Ma (Miocène) et portera en permanence deux calottes glaciaires, l'une dans l'hémisphère sud (Antarctique, il y a 14 Ma), l'autre plus tard dans l'hémisphère nord (Arctique, il y a 2,5 Ma). Le taux de CO₂ est au plus bas et oscille en fonction des périodes glaciaires et interglaciaires qui rythment actuellement le climat, avec de longues phases froides et de courtes périodes chaudes (comme l'actuelle).

Les données géologiques incitent à la prudence... pour interpréter la situation actuelle

A l'échelle géologique les courbes d'évolution de la concentration atmosphérique du CO₂ et de la température déduite des nombreux indicateurs paléoclimatiques et des modélisations de type GEOCARB sont parallèles à celle des variations du niveau marin et de l'activité des rides médio-océaniques au cours du Phanérozoïque. La situation actuelle est géologiquement exceptionnelle avec, comme au Carbonifère/Permien, les plus faibles concentrations en CO₂. Il est pourtant difficile d'établir une relation entre la température et le CO₂ : au Permien la concentration atmosphérique passa sous les 210 ppm avec une augmentation de 8°C de la température et une forte diversification des plantes et des animaux. Par comparaison la modification actuelle de température n'est que de 0,5 à 0,7°C alors que le taux de CO₂ est de 400 ppm, de même de la fin du Jurassique à la fin du Crétacé la température était respectivement de 2°C à 8°C supérieure à l'actuelle alors que la teneur en CO₂ atmosphérique est passée de 2300 à 1000 ppm sur cet intervalle de temps.

Avant de conclure il est important de souligner que la courbe générale montrant le parallélisme entre CO₂ et température à l'échelle géologique ne permet pas de conclure une relation directe de cause à effet entre ces deux paramètres suite à la résolution temporelle qui est au mieux de plusieurs dizaines de milliers d'années. En ce qui concerne la période récente qui offre une meilleure résolution temporelle dans l'étude des processus il semble que c'est bien l'augmentation de température qui induit celle de la teneur en CO₂. C'est ce qu'a montré le forage de Vostok (jusqu'à 3623m, autour de 240 000 ans) en Antarctique : une analyse détaillée d'une carotte de glace a établi que c'est la température qui gouverne le CO₂, ce dernier suivant l'augmentation de température avec un décalage de 800 années[19].

En conclusion bien que l'atmosphère terrestre ait presque toujours été caractérisée par des teneurs en CO₂ bien plus élevées que l'actuelle, la Vie, d'abord microbienne

(bactéries et Fungi pour l'essentiel) dès le début du Précambrien il y a plusieurs milliards d'années, ensuite pluricellulaire avec notamment les métazoaires, s'est bien épanouie dans des milieux à fortes teneurs en CO₂. Ces milieux ont sans cesse changé suite aux variations climatiques qui sont la règle depuis la formation de la Terre sans que cela n'affecte les processus vitaux[20]. Ces variations sont certainement plus abondantes que celles déjà mises en évidence, et seront mises à jour à mesure que la résolution temporelle ou stratigraphique s'améliore. Dans le détail à notre disposition il n'y a aucune corrélation simple ou linéaire entre taux de CO₂ et la température[21] et il semble également que l'augmentation de CO₂ soit une conséquence de l'augmentation de la température avec un décalage d'environ 11 mois [22, 23]. Tout près de notre époque l'Optimum Climatique Médiéval nous rappelle qu'il a fait plus chaud qu'aujourd'hui pendant quelques siècles autour de l'an mil sans CO₂ anthropique. Les archives géologiques nous montrent la même chose, avec des écarts de températures encore bien plus élevés que ceux estimés pour l'Optimum Climatique Médiéval. La relation température/CO₂ à court terme est loin d'être élucidée.

La géologie incite donc à la prudence[24] quant à l'interprétation de la situation actuelle atypique puisqu'elle est caractérisée pour une des premières fois dans l'histoire de notre Globe par un faible taux de CO₂ dans l'atmosphère.

Notes

- 1- Pour plus de détails sur l'échelle chronostratigraphique internationale se reporter à <http://www.notre-planete.info/actualites/4459-age-de-la-Terre> ou <http://www.stratigraphy.org>
- 2- Kasting, J.F. 2011 The Faint young Sun Problem
- 3- Knoll, A.H. 2003. Life on a Young Planet. Princeton University Press, Princeton and Oxford, 277pp.
- 4- Valey et al. 2014. Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. Nature Geoscience doi : 10.1038/ngeo2075
- 5- Prétat, A. 2015. L'oxygène : un poison pendant plusieurs milliards d'années
- 6- Les archées sont des micro-organismes unicellulaires procaryotes (il n'y a pas de noyau dans la cellule). Se reporter à <https://fr.wikipedia.org/wiki/Archaea>
- 7- Ou gisements de fer rubané formant des minerais très riches en fer constitués de l'alternance centimétrique de lits ou lamines quartzitiques et de lits ou lamines riches en oxydes ferriques (principalement la magnétite Fe₃O₄ et l'hématite Fe₂O₃). Ils représentent 90 % du minerai de fer exploité dans le monde (ils sont très abondants entre 2,5 et 2,0 Ga, ils apparaissent vers 3,7 Ga et disparaissent vers 0,7 Ga).
- 8- Canfield, D.E. 2014. Oxygen, A Four Billion Year History, Princeton University Press, Oxford, 196pp.
- 9- Frakes, L.A., Francis, J.E., Syktus, J.I. 1992. Climates Modes of the Phanerozoic. Cambridge University Press, 274pp. Depuis lors d'autres cycles de variations climatiques à l'intérieur de ces 'grands cycles' ont été mis en évidence, par exemple Svenmark, H., 2007 in <http://astrogeo.oxfordjournals.org/content/48/1/1.18.full.pdf>.
- 10- Snowball Earth in Wikipedia
- 11- 1ppm = une partie pour un million, soit un millionième https://fr.wikipedia.org/wiki/Partie_par_million
- 12- Joachimski et al. 2009. Devonian climate and reef evolution : Insights from oxygen isotopes in apatite. Earth and Planetary Science Letters, 284, 599-609.
- 13- Cronin, Th.P. 2010. Paleoclimates, Understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press, 441 pages.

- 14- Zachos , J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. 2001. Trends, Rhythms, and Aberration in Global Climate 65 Ma to Present.
- 15- notamment Modélisation GEOCARB
- 16- Algeo T.J., Ingall, E. 2007. Sedimentary Corg : P ratios, paleocean ventilation and Phanerozoic atmospheric pO₂.
- 17- Mackenzie, F.T., Anderson, A.J. 2013. The marine carbon system and ocean acidification during Phanerozoic time. *Geochemical Perspectives*, 2/1, April 2013, 227pp.
- 18- Le Hir, G., Donnadieu, Y., Goddérès, Y., Meyer-Berthaud, B. Ramstein, G., Blakey, R. 2011. The climate change caused by the land invasion in the Devonian. *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 203-212.
- 19- Caillon, N. et al. 2003. Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across Termination III. *Science*, 299, 5613, 1723-1731.
- 20- Prétat, A. 2016. L'Histoire naturelle est chaotique, la biodiversité aussi...
- 21- Flageollet, C. 2010. Le réchauffement climatique en Europe. Depuis quand ?, Pourquoi ? De Boeck, 140pp.
- 22- Hulm, O., Solheim J.E., Stordahl, K. 2011. Identifying natural contributions to late Holocene climate change. *Global and Planetary Change*, 79, 145-156.
- 23- Scafetta, N. 2011. Testing an astronomically based decadal-scale empirical harmonic climate model versus the IPCC (2007) general circulation climate models. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 80, 124-137.
- 24- Prétat, A. 2015. Climate Change. The Rule in the Geological Record.
- Source : notre-planete.info, <https://www.notre-planete.info/actualites/4562-variation-CO2-temperatures-eres-geologiques>

Source	https://www.notre-planete.info/actualites/4562-variation-CO2-temperatures-eres-geologiques
--------	---