

# LES THEMES DE SCIENCE-CLIMAT-ENERGIE

SCE a vu le jour en juin 2018 sous l'impulsion de plusieurs professeurs d'universités européennes. Plus de 250 articles ont été publiés après examen par un Comité Editorial. Les articles sont repris dans une liste des auteurs ([ici](#)) et permettent un dialogue entre lecteurs et auteurs ou lecteurs entre eux, à travers une rubrique 'commentaires' dont les règles ont été fixées ([ici](#)).

Au terme de ces 5 ans, nous avons décidé de regrouper les articles sous forme de .pdf reprenant chaque fois un thème précis. Cela permet de disposer pour tout lecteur d'un document complet sur un sujet précis, plutôt que de devoir aller chercher les articles un à un sur une période de près de 5 ans. Une sélection des articles les plus représentatifs a été opérée afin de couvrir au mieux chaque thème.

Nous publierons au fur et à mesure ces documents reprenant les articles spécifiques.

Le présent document intitulé '**Ce que nous apprend le passé**' reprend des articles sélectionnés couvrant la période juin 2018 à mars 2023.

Nous espérons que ces documents seront utiles et diffusés à grande échelle.

## CE QUE NOUS APPREND LE PASSE

1. Le changement climatique : la règle en géologie, A.Préat
2. Quelques contre-vérité géologiques et historiques, A. Préat
3. Événements hyperthermaux du Tertiaire : précurseurs de la situation actuelle, A. Jacobs et A. Préat
4. Emmanuel Le Roy Ladurie. A (re)lire absolument, A. Préat
5. L'Optimum Climatique Médiéval : ce Grand Oublié, A. Préat
6. Que nous apprend l'Optimum Climatique Romain?, A. Préat
7. Des réchauffements répétitifs sans CO<sub>2</sub>?, P. Berth et A. Préat
8. La géologie, la température et le CO<sub>2</sub>, H. Masson et A. Préat
9. L'Odyssée Climatique d'*Homo sapiens*, A. Préat



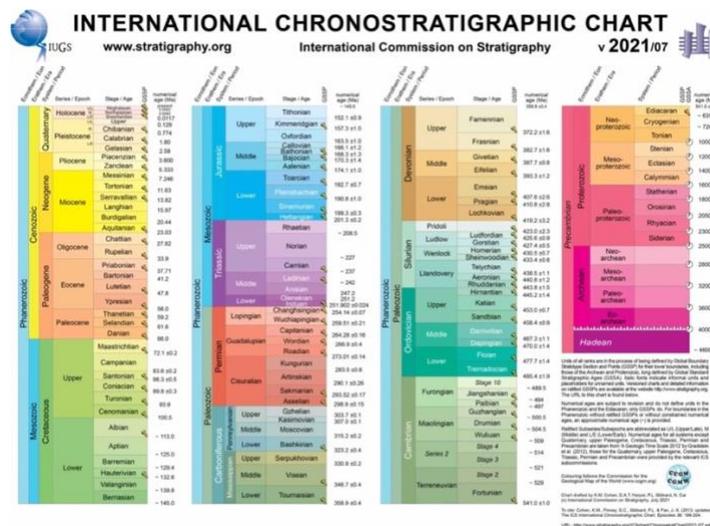
# 1 Le changement climatique : la règle en géologie

Mis en ligne SCE : 22.03.2018

**Le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique n'a jamais été aussi faible qu'aujourd'hui et la relation température/teneur en CO<sub>2</sub> reste encore mal comprise**

## 1.1. Un écheveau d'une incroyable complexité

Depuis que la Terre existe, c'est-à-dire depuis 4,567 milliards d'années<sup>1</sup>, 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 (voir figure ci-dessous pour la succession des âges géologiques).



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<sup>2</sup>.

## 1.2. 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<sup>3</sup> 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<sup>4</sup>. 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 (CH<sub>4</sub>), gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO<sub>2</sub>, s'y ajoutent l'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'azote (N<sub>2</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), l'ammoniaque (NH<sub>3</sub>) et même la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O). Le méthane, en l'absence d'oxygène à cette période<sup>5</sup> 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<sup>6</sup>), fait l'objet de nombreuses études et plusieurs hypothèses sont avancées pour sa quantification. Concernant le CO<sub>2</sub>, l'étude de paléosols, des BIF (= 'Banded Iron Formation'<sup>7</sup>) et de minéraux silicatés ou particuliers (pyrite, sidérite, uraninite)<sup>8</sup> montre que sa teneur dans l'atmosphère précambrienne était de 10 à 1000 fois l'actuelle.

L'origine de ce CO<sub>2</sub> 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).

### 1.3. 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 Paléoprotérozoïque) 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<sup>3</sup> 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<sup>4</sup>. 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 Paléoprotérozoïque) 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 Paléoprotérozoïque 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 (CH<sub>4</sub>), gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO<sub>2</sub>, s'y ajoutent l'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'azote (N<sub>2</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), l'ammoniaque (NH<sub>3</sub>) et même la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O). Le méthane, en l'absence d'oxygène à cette période<sup>5</sup> 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<sup>6</sup>), fait l'objet de nombreuses études et plusieurs hypothèses sont avancées pour sa quantification.

Concernant le CO<sub>2</sub>, l'étude de paléosols, des BIF (= '*Banded Iron Formation*'<sup>7</sup>) et de minéraux silicatés ou particuliers (pyrite, sidérite, uraninite)<sup>8</sup> montre que sa teneur dans l'atmosphère précambrienne était de 10 à 1000 fois l'actuelle. L'origine de ce CO<sub>2</sub> 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).

#### 1.4. 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 nanofossiles, alcénones, stomates, etc.). Il apparaît que le climat de la Terre a oscillé entre deux modes principaux suivant une périodicité d'environ 150 Ma<sup>9</sup> : 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<sup>10</sup>. 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<sup>11</sup> du CO<sub>2</sub> 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<sup>12</sup>. 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<sup>13</sup>. 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 CO<sub>2</sub> (et CH<sub>4</sub>) 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, le pH de l'océan était de 7,6 et la biodiversité fut touchée. Le taux de CO<sub>2</sub> estimé était de 1800 ppm et le niveau de la mer fut plus élevé de 6 m<sup>14</sup>.

#### 1.5. Notre atmosphère a toujours été riche en CO<sub>2</sub> (jusqu'il y a peu)

Il est évidemment impossible de mesurer précisément les teneurs en CO<sub>2</sub> (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<sup>15</sup>.

Ces modèles intègrent plus d'une dizaine de processus majeurs, à savoir taux de l'altération continentale des silicates (équations biochimiques), flux de CO<sub>2</sub> volcanique intrusif ou effusif, flux de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> atmosphérique variaient entre 3000 et 7000 ppm, de même les océans avec des valeurs de pH entre 7,2 et parfois jusqu'à 8,0. A comparer avec les teneurs atmosphériques récentes en CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> et glaciation, la glaciation ordovicienne, très brève, avec une température terrestre ayant diminué de 3°C présentait une teneur en CO<sub>2</sub> d'environ 4500 ppm. Pour résumer une courbe d'évolution du CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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

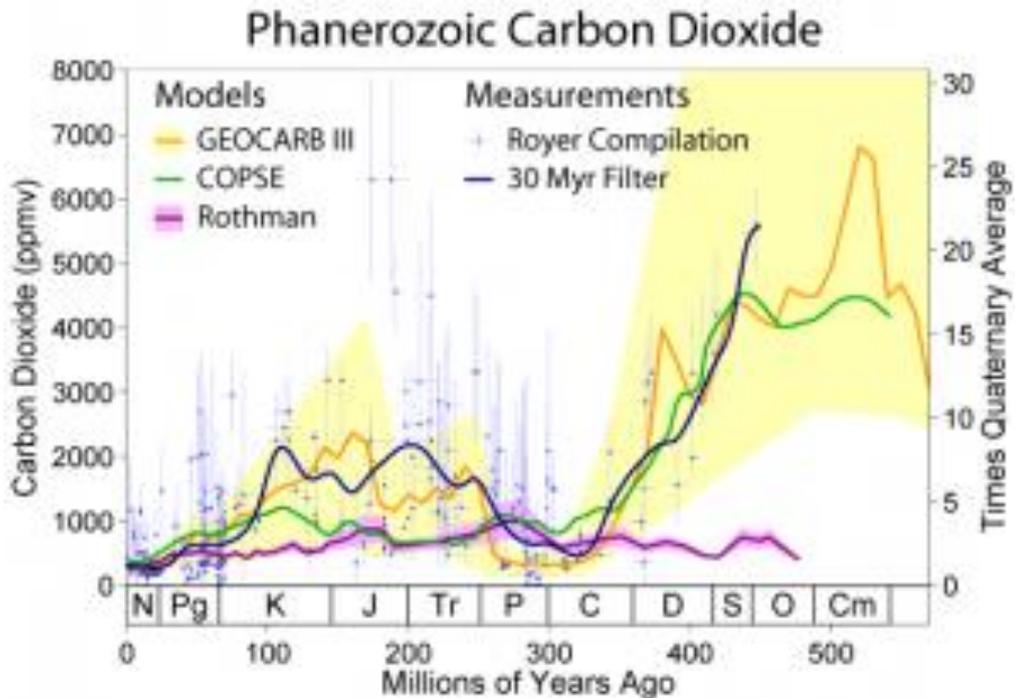
Que s'est-il passé après ce long épisode chaud avec une atmosphère de composition variable mais toujours riche en gaz à effet de serre ? Avec l'apparition des premiers organismes non microbiens à la transition Précambrien/Cambrien (vers 0,541 Ga) il est possible de reconstituer les environnements de 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 nanofossiles, alcénones, stomates, etc.).

Il apparaît que le climat de la Terre a oscillé entre deux modes principaux suivant une périodicité d'environ 150 Ma<sup>9</sup> : 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<sup>10</sup>.

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<sup>11</sup> du CO<sub>2</sub> 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<sup>12</sup>. 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<sup>13</sup>. 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 CO<sub>2</sub> (et CH<sub>4</sub>) 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, le pH de l'océan était de 7,6 et la biodiversité fut touchée. Le taux de CO<sub>2</sub> estimé était de 1800 ppm et le niveau de la mer fut plus élevé de 6 m<sup>14</sup>.



Légende : Cm = Cambrien, O = Ordovicien, S = Silurien, D = Dévonien, C = Carbonifère, P = Permien, Tr = Trias, J = Jurassique, K = Crétacé, Pg = Paléogène, N = Néogène.

### 1.6. Qui pilote le CO<sub>2</sub> à l'échelle géologique

La courbe d'évolution du CO<sub>2</sub> résultant de l'ensemble des modèles est confrontée aux données géologiques à diverses échelles. Tentons de voir pourquoi la teneur en CO<sub>2</sub> 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<sup>16</sup>. Elles 'capturent' le CO<sub>2</sub> à travers la photosynthèse (à raison d'environ 60GtC/an, bilan photosynthèse et respiration) et déstockent progressivement le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère pendant près de 150 Ma, jusqu'au Carbonifère. En même temps elles amorcent 'la

pompe à CO<sub>2</sub> liée à l'hydrolyse ou altération des silicates des parties émergées qu'elles ont envahi<sup>17</sup>. Le taux de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> est assez complexe. C'est par exemple ce que montrent les archives géologiques, au cours du Dévonien<sup>18</sup>(soit de 419 à 359 Ma) : on observe un découplage de l'évolution climatique de celle de la teneur en CO<sub>2</sub> durant cette période de 60 Ma, la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 événements hyperthermaux, évoqués précédemment, avec chaque fois une augmentation de la température d'environ 5°C suite à l'injection de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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).

### 1.7. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Il est pourtant difficile d'établir une relation entre la température et le CO<sub>2</sub> : 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>, ce dernier suivant l'augmentation de température avec un décalage de 800 années<sup>19</sup>.

### 1.8. En guise de conclusion ...

En conclusion bien que l'atmosphère terrestre ait presque toujours été caractérisée par des teneurs en CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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<sup>20</sup>. 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 CO<sub>2</sub> et la température**<sup>21</sup> et il semble également que l'augmentation de CO<sub>2</sub> soit une conséquence de l'augmentation de la température avec un décalage d'environ 11 mois<sup>22, 23</sup>. 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 CO<sub>2</sub> 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/CO<sub>2</sub> à court terme est loin d'être élucidée.

La géologie incite donc à la prudence<sup>24</sup> 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 CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### Références

<sup>1</sup> 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>

<sup>2</sup> Kasting, J.F. 2011 The Faint young Sun Problem

[http://www.isdc.unige.ch/sf2011/slides/Kasting/Lecture%203\\_Faint%20young%20Sun%20problem.pdf](http://www.isdc.unige.ch/sf2011/slides/Kasting/Lecture%203_Faint%20young%20Sun%20problem.pdf)

<sup>3</sup> Knoll, A.H. 2003. Life on a Young Planet. Princeton University Press, Princeton and Oxford, 277pp.

<sup>4</sup> Valey et al. 2014. Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. Nature Geoscience doi : 10.1038/ngeo2075

<sup>5</sup> Préat, A. 2015. L'oxygène : un poison pendant plusieurs milliards d'années

[http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_4467.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_4467.php)

<sup>6</sup> 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>

<sup>7</sup> 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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et l'hématite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ils représentent 90 %

## LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : LA REGLE EN GEOLOGIE

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).

<sup>8</sup> Canfield, D.E. 2014. Oxygen, A Four Billion Year History, Princeton University Press, Oxford, 196pp.

<sup>9</sup> 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>.

<sup>10</sup> Snowball Earth in Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Snowball\\_Earth](https://en.wikipedia.org/wiki/Snowball_Earth).

<sup>11</sup> 1ppm = une partie pour un million, soit un millionième [https://fr.wikipedia.org/wiki/Partie\\_par\\_million](https://fr.wikipedia.org/wiki/Partie_par_million)

<sup>12</sup> Joachimski et al. 2009. Devonian climate and reef evolution : Insights from oxygen isotopes in apatite. Earth and Planetary Science Letters, 284, 599-609.

<sup>13</sup> Cronin, Th.P. 2010. Paleoclimates, Understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press, 441 pages.

[http://www.geo.uni-bremen.de/~apau/dynamic\\_climate/CCYCLE/joachimski\\_et\\_al\\_2009.pdf](http://www.geo.uni-bremen.de/~apau/dynamic_climate/CCYCLE/joachimski_et_al_2009.pdf)

<sup>14</sup> Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. 2001. Trends, Rhythms, and Aberration in Global Climate 65 Ma to Present.

[http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Lectures/paleoklima/Zachos\\_et\\_al\\_Science\\_2001.pdf](http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Lectures/paleoklima/Zachos_et_al_Science_2001.pdf)

<sup>15</sup> notamment Modélisation GEOCARB

<http://earth.geology.yale.edu/~ajs/2001/Feb/qn020100182.pdf> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic\\_Carbon\\_Dioxide.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic_Carbon_Dioxide.png)

<sup>16</sup> Algeo T.J., Ingall, E. 2007. Sedimentary C<sub>org</sub> /P ratios, paleocean ventilation and Phanerozoic atmospheric pO<sub>2</sub>.

<http://homepages.uc.edu/~algeot/Algeo-Ingall-Palaeo3-CorgP-2007.pdf>

<sup>17</sup> Mackenzie, F.T., Anderson, A.J. 2013. The marine carbon system and ocean acidification during Phanerozoic time. Geochemical Perspectives, 2/1, April 2013, 227pp.

<sup>18</sup> Le Hir, G., Donnadieu, Y., Goddérés, 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.

<sup>19</sup> Caillon, N. et al. 2003. Timing of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature changes across Termination III. Science, 299, 5613, 1723-1731.

<sup>20</sup> Prétat, A. 2016. L'Histoire naturelle est chaotique, la biodiversité aussi...

[http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_4510.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_4510.php)

<sup>21</sup> Flageollet, C. 2010. Le réchauffement climatique en Europe. Depuis quand ?, Pourquoi ? De Boeck, 140pp.

<sup>22</sup> Hulm, O., Solheim J.E., Stordahl, K. 2011. Identifying natural contributions to late Holocene climate change. Global and Planetary Change, 79, 145-156.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818111001>

<sup>23</sup> Scaffetta, 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.

[http://scienceandpublicpolicy.org/images/stories/papers/reprint/astronomical\\_harmonics.pdf](http://scienceandpublicpolicy.org/images/stories/papers/reprint/astronomical_harmonics.pdf)

<sup>24</sup> Préat, A. 2015. Climate Change. The Rule in the Geological Record.

[http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages\\_perso/Preat\\_fichiers/climate\\_change\\_dec2015\\_Ac.pdf](http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages_perso/Preat_fichiers/climate_change_dec2015_Ac.pdf)

## **2 Quelques contre-vérité géologiques et historiques**

Mis en ligne SCE : 22.03.2018

### **2.1. La concentration actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique est très basse**

**La Terre avec ses 400 ppm de CO<sub>2</sub> atmosphérique actuel n'a jamais connu une concentration en ce gaz si basse excepté pendant une 'courte' période d'une partie du Carbonifère et du Permien** (voir 10.1) La Terre a commencé à se refroidir graduellement à partir de l'Eocène (56 Ma), époque durant laquelle la température était 6 à 7  C plus élevée qu'aujourd'hui, les glaces de l'Antarctique forment un inlandsis à la fin de l'Eocène (  environ 34 Ma) et celles de l'Arctique plus tard il y a 2,6 Ma, s'en suit alors 'l'âge glaciaire' marqué par des successions de périodes glaciaires et interglaciaires, dont la dernière est l'actuelle débutant il y 11 500 années avec l'Holocène. Pour ne parler que de cette période géologiquement récente du C nozo ique (avec l'Eocène mentionné ci-dessus), on voit que la Terre est passée d'un climat chaud à un climat froid à cette échelle temporelle.

**Il n'est pas question de réfuter un léger réchauffement actuel, mais non seulement il est minime (0,6 C entre 1975 et 1998), mais il est encadré de périodes de diminution de la température de même amplitude (1880-1910 et 1940-1975) [6].** Pour être complet mentionnons que la Terre ne se réchauffe plus depuis presque 20 ans, comme si elle avait atteint un plateau, un palier assimilé dans la littérature à une 'pause' qui met à mal le 'fameux consensus' qui représente la 'vérité officielle' martelée sans cesse par le GIEC [7], à savoir 'la Terre ne cesse de se réchauffer'. Cette pause n'avait jamais été prévue dans les très nombreux modèles du GIEC, ce dernier l'a d'ailleurs d'abord ignorée, il a ensuite invoqué des dizaines d'explications (souvent farfelues) sans jamais pourvoir en démontrer une seule, avant de la reconnaître, car pour une fois ce sont les observations (relevés de températures) qui ont pris le dessus. Kevin Trenberth, un climatologue du GIEC déclarait déjà en 2009 « *le fait est que pour l'instant, nous ne pouvons pas expliquer le manque de réchauffement observé depuis plus de 10 ans* »[8]. C'est toujours le cas aujourd'hui en 2018. **Enfin nous verrons que contrairement à ce qui est affirmé la contribution du CO<sub>2</sub> anthropique n'est que de quelques pourcents seulement.** Oui la Terre est bien soumise depuis sa formation aux variations climatiques, elles sont naturelles et n'ont jamais empêché les processus de la vie de se poursuivre....

## 2.2. Rien n'est figé ... tout fluctue sans cesse

Non seulement la Terre a connu d'importants bouleversements de la composition chimique de son atmosphère, mais également de bien d'autres de ses paramètres. Par exemple le niveau marin au Crétacé Supérieur était de 250 à 350 m plus élevé qu'aujourd'hui [9] suite à une activité tectonique particulièrement intense des rides médio-océaniques résultat de la dislocation du supercontinent Pangée [10]. Au total au moins six supercontinents se sont succédés depuis environ 2,5 Ga ce qui souligne bien le caractère sans cesse changeant de notre Planète. Le niveau marin ne reste donc jamais stable à l'échelle des temps géologiques, il fut très élevé au Crétacé Supérieur et son augmentation fut lente s'étendant sur des dizaines de millions d'années, par contre, il changea plus rapidement avec des fluctuations de plus de 100 m d'amplitude totale lors de la période récente marquée par la succession des âges glaciaires et interglaciaires : par exemple au cours du dernier épisode interglaciaire il y a environ 120 000 ans BP [11] (de 132 000 à 110 000 ans BP), connu en Europe sous le nom d'Eémien, le niveau marin était élevé de 5 m par rapport à l'actuel (d'après les données de terrain, ou de 2,2 m à 3,4 m suivant les modélisations) avant de diminuer pendant près de 100 000 ans, d'environ 140 m en plusieurs étapes lors de la dernière période glaciaire [12].

Cette succession des âges glaciaires et interglaciaires est liée aux variations des paramètres astronomiques de la Terre ('cycles de Milankovic [13]) qui opèrent de différentes façons depuis que notre Planète existe. Depuis la formation des premiers océans il y a plus de 4 Ga, les fluctuations du niveau marin d'amplitudes très diverses sont la règle en géologie[14], elles sont bien documentées et le plus souvent les processus à leurs origines bien compris (tectoniques, cycles de Milankovic ou autres). D'une façon générale, le niveau marin a presque toujours été plus élevé que l'actuel depuis la formation de la Terre, du moins depuis le début du Phanérozoïque (il y a 541 Ma), car les reconstitutions au cours du Précambrien sont plus incertaines, faute de données fiables (effacées au cours des orogènes successifs).

Mentionnons également des changements de tous types, tout au long de la longue histoire de la Terre avec notamment les variations du champ magnétique, ce dernier non seulement fluctue mais aussi s'inverse, le pôle sud magnétique devenant le pôle nord magnétique sans aucune cyclicité évidente. Pour prendre la période récente, notons que le champ magnétique nord actuel l'est depuis 780 000 ans, son intensité a diminué de 10% depuis 150 ans et on estime qu'il faut plus de 90% de fluctuation (ici diminution) pour que le champ magnétique s'inverse (à nouveau), donc si le processus se poursuit il s'inversera dans environ 1000 ans [15]. Les variations du champ magnétique terrestre sont bien connues depuis le Mésozoïque (il y a 251 Ma) et moins bien avant.

Les inversions peuvent être très brèves, de l'ordre de quelques milliers d'années. D'autres paramètres majeurs de la Terre ont également changé, citons par exemple la température des océans qui était de +70°C au début de l'Archéen (vers 4 Ga) puis des températures comprises entre 20 et 30 °C à la fin du Protérozoïque (541 Ma). Il en va de même avec la salinité des océans au cours des temps géologiques qui était 1,6 à 2 fois supérieure à la salinité actuelle [16]. Idem avec le taux d'oxygène dans l'atmosphère qui a connu des variations de 1 à 1000 ou plus depuis le Précambrien [17]. A nouveau ces modifications drastiques des conditions opérant sur la Terre n'ont pas empêché la vie de se poursuivre, voire même de se diversifier [18].

**Tous ces changements et bien d'autres, tout aussi drastiques, nous montrent que la Terre ne connaît pas de période de stabilité à l'échelle géologique, et que la pérennisation de la vie y trouve**

**plus que probablement son compte**, puisque les extinctions majeures (dites 'de masse') et mineures (qui ne le sont sans doute pas tant que cela) ont été suivies chaque fois d'un renouvellement des écosystèmes (faunes, flores, microbes, Fungi) s'appropriant toutes les nouvelles niches écologiques disponibles. **La Terre n'a donc de cesse de s'accommoder de bouleversements à toutes les échelles spatio-temporelles, et ce depuis plusieurs milliards d'années.**

### 2.3. L' action de l'Homme

Se pose alors la place et surtout l'action de l'Homme, qui fait tant de débats dans les médias aujourd'hui. Bien que notre long terme soit lié à celui de notre planète (vouée à disparaître dans quelques milliards d'années) à moins que nous nous installions ailleurs, nous n'avons pas d'autre choix que de nous intéresser au court terme de l'humanité, soit dans l'immédiat à nos générations et celles qui vont nous suivre, soit dans un lointain avenir, par exemple, au terme de ce nouveau millénaire entamé en 2001. Aujourd'hui l'Homme est devenu un agent géologique à part entière, il déplace et transporte autant ou plus de matériaux que ne charrient les fleuves [19], il modifie par ses activités industrielles la composition chimique de nombreux sites naturels, il perturbe la plupart des écosystèmes agissant directement ou non sur presque tous les organismes depuis les plus petits (micro-organismes) jusqu'aux plus grands. Force est de constater que ces modifications importantes ne mettent pas en péril la planète en tant que telle, ni même l'humanité quelle que soit l'horizon envisagé. Force est aussi de constater qu'à ces effets discutés, considérés comme négatifs pour certains, d'autres effets, cette fois-ci positifs, sont sans conteste au rendez-vous, comme par exemple l'espérance de vie qui partout augmente, les famines qui ne sont plus une fatalité (elles sont aujourd'hui liées aux guerres) et un confort de vie jamais égalé. Bien entendu cela ne concerne pas toute la population terrienne, mais la situation actuelle ne peut se comparer à celle qui prévalait il y a à peine quelques siècles. L'action de l'Homme s'accompagne également de pollutions diverses, le remède n'est pas la Nature, mais réside uniquement dans nos comportements, *in fine* résultat de l'Éducation. Ce point rejoint d'une manière générale la politique au sens large et n'a rien à voir avec la climatologie. **Évitons justement les amalgames entre climat et pollution qui sont légion dans la presse.**

### 2.4. Alors en quoi aujourd'hui l'Homme menace t'il sa survie, à défaut de celle de la Terre ? Y a-t-il un coupable ?

Il suffit d'ouvrir un journal, de parcourir une librairie, d'écouter la radio, la télévision, les hommes politiques, les médias ... les scientifiques (heureusement pas tous), et même l'Église, pour se rendre compte que le climat, ici le '*réchauffement climatique*' selon tous ces intervenants nous mène, par notre faute, dans le mur. Ne parle-t-on pas de '*réfugiés climatiques*', de situations catastrophiques dans presque tous les domaines depuis la fonte des glaces jusqu'à une submersion jamais vue en passant par des ouragans toujours plus nombreux et plus puissants. Le climat a bon dos et serait à même d'expliquer presque tout depuis l'anodin jusqu'au global[20]. L'alarmisme est omniprésent, est-il justifié? On peut sérieusement en douter à force de voir toutes les prédictions démenties [21.]

A qui la faute donc ? Le responsable numéro 1 est bien connu et il n'est pas un seul jour où il est pointé du doigt : il s'agit bien sûr du CO<sub>2</sub> dont la teneur '*explose*' selon le terme consacré par les médias, il ne cesse donc de croître à une échelle temporelle considérée comme jamais vue, et cette augmentation est presque entièrement attribuée aux activités anthropiques. Ces deux dernières assertions ne sont pourtant pas démontrées et font justement le jeu des médias au sens large. De plus, selon ces acteurs, c'est ce CO<sub>2</sub> qui est responsable de l'augmentation de température observée, alors que rien n'est non plus prouvé dans ce domaine, **puisque l'augmentation de CO<sub>2</sub> suit l'augmentation**

**de température à différentes échelles temporelles [22]. Il y a confusion entre cause(s) et effet(s). Ce point crucial n'est pratiquement jamais repris par les médias scientifiques ou non.** De plus l'histoire toute récente de la Terre nous a montré qu'une succession de périodes chaudes, équivalentes à l'actuelle, a eu lieu sans la moindre contribution de CO<sub>2</sub> anthropique, avec les '*optima climatiques*' (voir ci-dessous). Alors nous ment on ? *a minima* par omission..., ou plus probablement sciemment, comme le suggère dès 1938 la sélection des données des concentrations de CO<sub>2</sub> par Callendar, ingénieur anglais et météorologue amateur, qui écarta les valeurs anciennes trop élevées et les valeurs récentes trop basses afin de ne retenir que celles qui montraient le mieux une augmentation de la température entre les années 1860 et 1960 [23]. Ici la machine du '*réchauffement anthropique*' est lancée et la fameuse *courbe en hockey* de Mann et al. (1998) (qui s'est révélée fautive par la suite, cf. ci-dessus) va parachever la 'démonstration'...

Tout ceci devrait inciter les scientifiques à une extrême prudence avant de conclure [24]. D'autant plus que malgré des émissions de CO<sub>2</sub> qui ont triplé depuis ces dernières 50 années par rapport aux années précédentes, force est de constater que la température ne bouge presque plus, reste calée sur un plateau, représentant ce qu'il est convenu d'appeler dans la littérature '*le hiatus de réchauffement*' [25] mettant en friche le *fameux consensus* sur le réchauffement. Le tableau d'ensemble montre pourtant que nous ne vivons pas un épisode climatique si remarquable en regard d'une histoire dont l'échelle minimale est celle des siècles ou des millénaires.

Tous ces préliminaires où vérités et contre-vérités s'amalgament sont loin de valider la célèbre phrase d'Al Gore '*the science is settled*' ou bien les rapports du GIEC dont les conclusions ne sont pratiquement jamais vérifiées, **c'est d'ailleurs Al Gore (et le GIEC) qui en 2007, lorsqu'il reçut le Prix Nobel de la Paix a annoncé que dans 10 ans toute la glace arctique aurait disparu, et sans doute même, avant en 2013 [26].**

Puisqu'un des points centraux de la discussion porte sur le taux de CO<sub>2</sub> et sa vitesse d'augmentation à nos échelles humaines et annuelles, voyons ce qu'il en est réellement par rapport aux enregistrements géologiques. Pour cela on ne peut considérer que les périodes les plus récentes car la précision temporelle dans les séries géologiques est des plus mauvaises pour le problème qui nous occupe, elle est de plusieurs dizaines de milliers d'années dans le Cénozoïque, ensuite de plusieurs centaines de milliers d'années et plus encore en remontant le temps. Heureusement quelques études sur des périodes récentes apportent des informations précieuses. En 2002 une étude [27] consacrée à l'événement de refroidissement d'il y a 8200 ans B.P. a montré à partir de l'analyse des stomates [28] dans des feuilles préservées dans un lac danois que la région de l'Atlantique Nord a subi un refroidissement important entre 8400 et 8100 ans BP, entrecoupé de légers réchauffements, avec au total un déclin du CO<sub>2</sub> de 25 ppm sur moins de 100 années, soit au minimum 0,25 ppm/an.

Dans le détail cette évolution est accompagnée de plusieurs fluctuations, certaines ont pu être datées par le C14, **et on a ainsi une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de 35 ppm en 40 ans (de 8680-8640 ans BP) et de 33 ppm en 34 ans (de 7584-7550 BP), soit près de 1 ppm/an ce qui est l'ordre de grandeur de taux d'accroissement actuel du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les auteurs de cette étude concluent que '*the exact phase relationship between changes in temperature and CO<sub>2</sub> cannot be determined yet*' et que la température a fluctué dans une fourchette de 1 à 5°C.** Notons également que cette étude détaillée à partir des stomates a mis en évidence des teneurs de CO<sub>2</sub> jusqu'à 326 ppm alors que l'analyse classique des glaces antarctiques (à partir des bulles de gaz) de cette même période, non seulement ne met pas en évidence les nombreuses fluctuations reportées ici, mais donnent des teneurs en CO<sub>2</sub> toujours plus basses (< 265 ppm). Bien que concernant l'hémisphère nord cette étude montre donc que des fluctuations relativement significatives de la teneur en CO<sub>2</sub> peuvent se produire suivant des durées de quelques siècles ou de quelques dizaines d'années. Enfin, au vu de l'absence

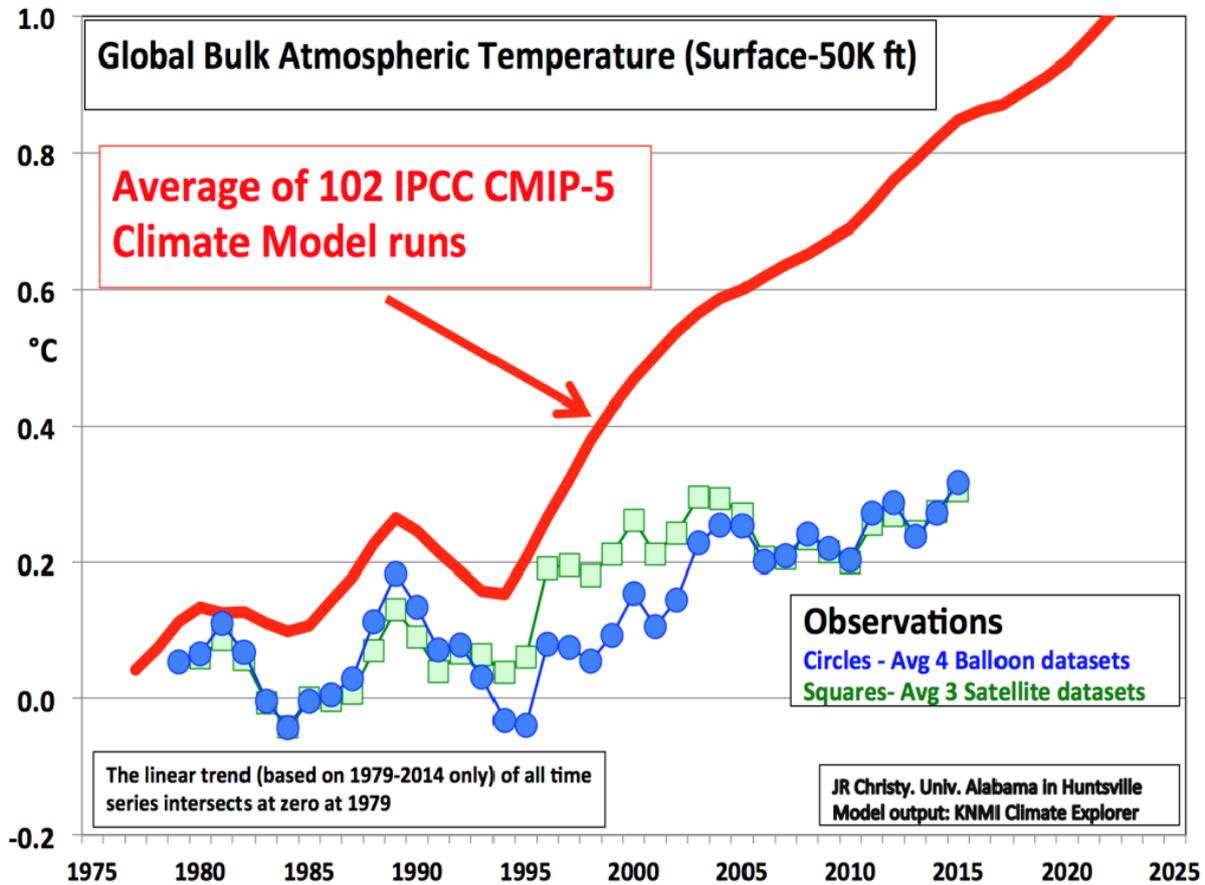
de variations significatives dans l'Antarctique, les auteurs s'interrogent sur la fiabilité des études pour la reconstitution du CO<sub>2</sub> atmosphérique à partir des bulles de gaz.

## 2.5. Quid de la température ?

La température peut donc fluctuer sur des échelles de temps très courtes. Prenons la période du dernier glaciaire (de 117 000 à 21 000 BP) fort étudiée et qui est caractérisée par des variations climatiques brutales surtout dans l'hémisphère Nord, marquée par la succession de plus de 20 stades froids et d'interstades chauds [29] avec chaque fois un cycle long et un cycle court. **Le cycle court (ou cycle de Dansgaard-Oeschger d'environ 1500 années) enregistre un réchauffement brutal de 8 à 10°C en quelques dizaines d'années seulement, soit à l'échelle d'une vie humaine.** Ce réchauffement est suivi d'un refroidissement généralement plus lent, de plusieurs degrés (de 2 à 8°C) sur quelques centaines d'années (200 à 800 ans) suivant les cycles. Notons que les augmentations de température sont décalées entre les deux hémisphères, débutant environ 220 ans en Antarctique pour chaque cycle. Ces augmentations fort importantes de température n'ont rien à voir avec le CO<sub>2</sub> (en encore moins avec un CO<sub>2</sub> anthropique inexistant à cette époque), et sont sans doute liées à la circulation thermohaline dans l'océan couplée notamment avec une réduction de la banquise [30]. D'autres cycles de variations de la température (événement de Heinrich, cycle de Bond) s'observent aussi dans cette période glaciaire et montrent à quel point la 'climatologie' de cette période pourtant bien documentée est complexe, et les processus à l'origine de ces variations loin d'être compris. En tous cas nul besoin ici d'invoquer le CO<sub>2</sub> ...

Revenons à l'augmentation récente du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Il est donc d'environ 1,5 à 2 ppm par an. Si on met cet accroissement annuel en regard de la variation annuelle de température correspondante on n'observe aucune corrélation entre les grandeurs [31]. Si une corrélation était néanmoins présente elle serait différente de ce que les médias ont réussi à nous faire croire, en réalité l'augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique suit celle de la température à différentes échelles temporelles longues (plus d'un millier d'années) ou courtes (9 à 12 mois) [32]. De plus il est à noter qu'après le réchauffement modeste du siècle dernier, la température de la planète est à peu près stabilisée depuis bientôt vingt ans, malgré le triplement de nos émissions de CO<sub>2</sub> ces cinquante dernières années. Enfin si l'on compare les anomalies de température en fonction de la consommation mondiale d'hydrocarbures depuis 1850-1860 jusqu'à 2010-2015 [33][34], les deux courbes obtenues ne montrent aucune corrélation satisfaisante, mettant en doute une contribution significative du CO<sub>2</sub> anthropique dans le réchauffement. **Le réchauffement anthropique est bien entendu à prendre en considération mais est minimum, de l'ordre de quelques pourcents suivant des études sérieuses, par exemple 4,3% ou 5%** [35]. Notons également qu'à force de marteler l'effet néfaste du CO<sub>2</sub> on en vient à oublier qu'une autre molécule, celle de l'eau (H<sub>2</sub>O) présente des variations 100 fois plus importantes variant naturellement dans l'atmosphère de 0 à 4% alors que le CO<sub>2</sub> présente aujourd'hui une concentration de 0,040% et de 0,028% à l'époque préindustrielle.

Tout cela concerne la période actuelle focalisée sur le fameux CO<sub>2</sub> anthropique, tant médiatisé alors que même le GIEC commence du bout des lèvres à reconnaître que cette contribution anthropique n'est pas si importante. Depuis près de 20 années d'ailleurs il n'y a plus de réchauffement et plus d'une soixantaine d'explications ont été proposées par les tenants de l'alarmisme [36] démontrant par la même occasion la fausseté des modèles développés depuis 1998 par le GIEC [37] (111 des modèles sur 114 ont été contredits par les observations, c'est-à-dire par les mesures ou encore les faits [38]).



Comparaison de l'évolution des anomalies de température moyenne entre modèles climatiques et observations par ballons sondes et satellites pour la période 1979-2016. La courbe rouge représente la moyenne des modèles lissée sur 5 ans. Source : J.C. Christy, University of Alabama at Huntsville. Présenté ainsi au Sénat américain. In 'Les modèles surchauffent'.

Toutes ces simulations exagèrent très significativement le réchauffement [39]? pourtant le GIEC estime leur degré de confiance à plus de 95%. Pourquoi? D'abord car le GIEC utilise des méthodes linéaires ('détection-attribution') pour ses modèles alors qu'il faudrait utiliser des modèles 'd'identification des systèmes dynamiques complexes' [40][41] qui intègrent un contribution chaotique qui est plus que probablement majeure [42], ensuite la sensibilité climatique a fortement été exagérée par le GIEC, un doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> devrait en réalité amener à une augmentation de 0,5-0,7 °C [43] ou moins, et non entre 2 et 4,5°C [44], ce qui est loin d'être immédiat puisqu'en ajoutant chaque année 2 ppm dans l'atmosphère, le doublement aura lieu dans juste un peu plus de 200 ans, et ce même si tout le CO<sub>2</sub> injecté était strictement anthropique.

Finalement le GIEC a produit tellement de courbes différentes de l'évolution de la température, que celles-ci s'entremêlent et constituent 'un plat de spaghetti', terme consacré aujourd'hui dans la littérature. Plus personne n'y voit clair et on peut se demander si tout cela est bien sérieux ?

D'autant plus que toute cette 'saga' autour de l'évolution de la température moyenne globale est partie de la courbe en hockey de Mann et al. (1998) dont il a été démontré [45] qu'elle était fautive à bien de points de vue, ce qui n'a pas empêché le GIEC de la diffuser, de s'en référencer etc. pour atteindre ses objectifs, cette courbe a finalement disparu avec le quatrième rapport.

## 2.6. Encore un peu de géologie (récente)...

D'ailleurs, sans nier le réchauffement (cependant minime de 0,7°C en 137 ans (entre 1880 et 2017), soit 0,0051°C/an avec des périodes à la fois d'augmentation et de diminution de la température annuelle moyenne il n'est pas besoin d'invoquer de CO<sub>2</sub> anthropique pour expliquer les nombreux optima climatiques : (i) limite Paléocène/Eocène ; (ii) Eocène inférieur ; (iii) Eocène moyen ; (iv) Eocène/Oligocène ; (v) Miocène moyen ; (vi) Pliocène moyen/Pliocène inférieur (vii) Holocène avec par exemple à la fin de l'événement Dryas ; (viii) Minoen (ix) Romain ; (x) Médiéval recensés au cours des temps géologiques récents (depuis le Cénozoïque) et historiques (depuis le Quaternaire). Notons que l'Optimum Médiéval (d'environ l'an 900 à 1300) qui est l'événement le plus chaud proche de la période actuelle ne figurait pas dans la courbe de Mann et al. (1998), car bien entendu trop gênante (période chaude sans CO<sub>2</sub> anthropique).

De nombreux épisodes très chauds sont également connus au cours des temps pré-Cénozoïques, citons uniquement une augmentation de 10°C à la transition Permien/Trias (252 Ma) 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 événements d'augmentation brutale de la température terrestre (les refroidissements sont également connus dans l'histoire géologique) sont multifactoriels avec de nombreuses boucles de rétroactions encore mal connues. Les résolutions temporelles dans ces séries géologiques ne permettent pas à l'heure actuelle d'établir les boucles de rétroaction et de corrélérer directement les concentrations en gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ... H<sub>2</sub>Ov) et la température, comme l'a par exemple bien démontré le forage de Vostok (Antarctique) avec, il y a 240.000 ans, l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique qui a suivi de 800 ± 200 ans une augmentation de température [46]. La géologie nous montre ainsi qu'il y a d'autres processus qui interviennent, que le CO<sub>2</sub> est loin d'être le coupable idéal. Quels processus ? Forcément des processus naturels, parmi les plus crédibles, citons notamment la corrélation très forte entre les rayons cosmiques, l'irradiance solaire et la formation des nuages [47], les courants ionosphériques induits par les variations de l'activité solaire [48].

L'analyse détaillée des variations de température [49] montre qu'il n'y a pas eu un réchauffement régulier, continu depuis 1860, mais au contraire deux périodes d'augmentation (1860-1880, 1910-1945) séparées de deux périodes de refroidissement (1880-1901, 1945-1998) d'environ 0,15 à 0,16°C/décade. Ces fluctuations de températures moyennes globales de surface se corrélaient avec les changements du signe de la PDO Océan (*Pacific Decadal Oscillation*) et les changements de pente de l'AMO (*Atlantic Multidecadal Oscillation*) suggérant ainsi un cycle ou une sinusoïde d'environ 60 ans (64 ans [50]) dont le sommet correspondrait à la fameuse pause. Nous sommes probablement sur un plateau de température élevée, et il n'est pas donc pas étonnant que les années dites les plus chaudes 'de mémoire d'homme' s'observent actuellement. Hélas cette frénésie à déceler chaque fois la nouvelle année la plus chaude suscite des raccourcis qui n'ont plus rien à voir avec la science : ainsi les climatologues de la NASA ont-ils affirmé en 2016 que l'année 2014 fut la plus chaude de 0,02°C par rapport à 2010. Le 0,02°C n'était bien entendu pas relayé dans les médias quels qu'ils soient, et encore moins le fait que la NASA estimait que cette affirmation était juste à 38%, et que la méthode de calcul comprenait une marge d'erreur de 0,1°C (la température de l'année la plus chaude est donc fautive à 62% sans parler de la marge d'erreur...).

**En d'autres termes, l'erreur sur la mesure étant plus grande que la mesure elle-même, on ne peut absolument rien déduire de ces valeurs.** Ce type de 'désinformation' est régulier dans le monde des climatologues catalogués 'giecistes' : notons par exemple que dans son rapport de 1999 le GIEC estimait 'que l'année la plus chaude était 1934 dépassant de 0,6°C l'année 1998'. Ensuite sous prétexte

de recalibrage des données satellitaires, le GIEC annonça en 2011 que l'année 1934 avait été moins chaude que 1998... De nombreux exemples qui interpellent sont repris dans le livre 'Climat : 15 Vérités qui dérangent' (cité ci-dessus) ainsi que dans de très nombreux ouvrages du même type, ou parfois dans la presse. De plus les phénomènes océaniques (El Nino, PDO, AMO etc.) sont présentés par le GIEC comme des causes alors que ce sont globalement des effets des fluctuations de la répartition de la chaleur océanique.

## 2.7. Que conclure ?

Finalemment si le CO<sub>2</sub> continue de croître, d'environ 2 ppm/an, et ajoutera ainsi 166 pm en 2100, l'augmentation de température par simple extrapolation (nous avons cependant vu qu'elle n'avait en réalité aucun fondement scientifique) serait de 0,2°C (à probablement moins si l'on tient compte de la courbe la sensibilité ou saturation CO<sub>2</sub>/température) sans grand impact. Le coût pour lutter contre cette augmentation si elle était anthropique a lui un fort impact, il est aujourd'hui de 19 milliards de dollars par jour (Banque Mondiale, 2015). L'Agence Internationale de l'Energie a estimé en 2013 le coût de la lutte contre le changement climatique à 45 trillions de dollars (= milliards de milliards ou 45<sup>^</sup>12\$) à raison de 19 milliards de dollars par jour. Tout cela, si le GIEC avait raison pour éviter une augmentation de 166 ppm de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (à raison de 2 ppm/an) d'ici l'an 2100, ce qui représenterait par rapport à aujourd'hui une augmentation de la température d'environ 0,2°C (toujours suivant les 'modèles' du GIEC).

Rappelons également que l'ensemble de la démarche actuelle est basé sur une température moyenne globale et annuelle de la Terre, qui pose elle aussi beaucoup de questions [51] non abordées ici (par exemple le problème des îlots urbains), notons par exemple que les extrêmes journaliers de températures peuvent varier d'environ 55°C (+53,7°C en Iran, 2017) à -90°C (-89,2°C en Antarctique, en 1983) sans parler des fortes ou très fortes variations de température sur une journée 24 heures en un lieu donné. La température est une grandeur intensive qui ne se combine pas par simple addition lorsque des systèmes sont réunis en un seul [52].

**Il est manifeste que la science est loin d'avoir été dite, que les 'médias' altèrent consciemment ou non les faits, que la climatologie en est à ses balbutiements et que le GIEC avec ses 20 000 experts a sans doute mis la charrue avant les bœufs en définissant, à sa création, son premier objectif comme étant 'de comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine'.** Les variations liées à des processus naturels ne sont donc pas prises en considération, pourtant on ne peut les négliger [53]. Autrement dit, reprenons la déclaration d'Al Gore, qui n'est pas un scientifique, loin s'en faut, qui déclara en 2007 devant le Congrès que '*la Science est dite*' ... Donc Acte ?

*Nb : Depuis la parution de cet article, la relation CO<sub>2</sub> (dégazage au Paléocène/Eocène) et température a été 'décortiquée' et la libération du CO<sub>2</sub> fut liée à un réchauffement initié par une variation des paramètres astronomiques de la Terre ([ici](#)), le CO<sub>2</sub> a donc suivi l'augmentation de température d'au moins 1000 ans.*

## Footnotes

- 1 ^ Prétat, A. 2016. Le changement climatique : la règle en géologie... Le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique n'a jamais été aussi faible qu'aujourd'hui et la relation température/teneur en CO<sub>2</sub> reste encore mal comprise. <http://www.science-climat-energie.be/climat-et-geologie/le-changement-climatique-la-regle-en-geologie/>
- 2 ^ Prétat, A. 2017. <https://www.notre-planete.info/actualites/4562-variation-CO2-temperatures-eres-geologiques>
- 3 ^ The Geological Time Scale: <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>

## QUELQUES CONTRE-VERITE GEOLOGIQUES ET HISTORIQUES

- 4 ^ 1ppm = une partie pour un million, soit un millionième [https://fr.wikipedia.org/wiki/Partie\\_par\\_million](https://fr.wikipedia.org/wiki/Partie_par_million)
- 5 ^ Un procaryote est un organisme (bactérie, cyanophycée) unicellulaire qui ne possède pas de noyau. L'ADN est circulaire, généralement unique et regroupé.
- 6 ^ <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8511670.stm>
- 7 ^ GIEC (IPCC) ou Groupe d'Experts Intergouvernemental du Climat, [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml)
- 8 ^ [https://en.wikipedia.org/wiki/Kevin\\_E.\\_Trenberth](https://en.wikipedia.org/wiki/Kevin_E._Trenberth) et [https://en.wikipedia.org/wiki/Climatic\\_Research\\_Unit\\_email\\_controversy](https://en.wikipedia.org/wiki/Climatic_Research_Unit_email_controversy)
- 9 ^ par exemple, De Wever P. 1999. L'Europe au Mésozoïque. In Fröhlich F.& Schubnel H.L. (éd). Les âges de la Terre, Muséum National Histoire Naturelle éd., Paris, 6-69.
- 10 ^ Préat, A. 2017. <https://www.notre-planete.info/actualites/4575-formation-supercontinents-pangee-Terre>
- 11 ^ BP pour 'Before Present' pour désigner les âges exprimés en nombre d'années comptées vers le passé à partir de l'année 1950 du calendrier grégorien, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Avant\\_le\\_présent](https://fr.wikipedia.org/wiki/Avant_le_présent)
- 12 ^ Van Vliet-Lanoë B., 2013. Cryosphère. Histoire et environnements de notre ère glaciaire. Vuibert, 405p.
- 13 ^ Ogg J.O. et al. 2016. A Concise Geologic Time Scale. Elsevier ISBN978-0-444-63771-0 and Gradstein F.M. et al., 2012. The Geologic Time Scale, Elsevier ISBN978-0-444-593900.
- 14 ^ Vail P.R. et al. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In Seismic stratigraphy. Application to hydrocarbon exploration, C.E. Payton (éd). American Association Petroleum Geologists, Memoir 26, 49-212.
- 15 ^ La Recherche, vol. 511, 2016. Terre, le champ magnétique va s'inverser. <http://www.larecherche.fr/parution/mensuel-511> et <http://www.lefigaro.fr/sciences/2012/08/24/01008-20120824ARTFIG00422-la-terre-va-t-elle-perdre-le-nord.php>
- 16 ^ Floriel et al. 2004. Biological control on Cl/Br and low sulfate concentration in a 3.5-Gyr-old seawater from North Pole, Western Australia. Earth Planet. Sci.-Review, 228, 451-463.
- 17 ^ Préat, A. 2016. [https://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_4467.php](https://www.notre-planete.info/actualites/actu_4467.php)
- 18 ^ Préat, A. 2016. [https://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_4510.php](https://www.notre-planete.info/actualites/actu_4510.php)
- 19 ^ Marshak S. 2010. Terre, portrait d'une planète. De Boeck, 833p. (hors annexes).
- 20 ^ Moreau J. 2017. Les épouvantables conséquences du changement climatique. <http://belgotopia.blogs.lalibre.be/archive/2017/06/02/les-epouvantables-consequences-du-changement-climatique-1158776.html>
- 21 ^ Javier, 2017. Some failed climate predictions, <https://wattsupwiththat.com/2017/10/30/some-failed-climate-predictions/>
- 22 ^ Gervais F. 2013. L'innocence du carbone. L'effet de serre remis en question. Albin Michel, 315p.
- 23 ^ Jaworowski, Z. 1997. Another global warming fraud exposed. Ice core data show no carbon dioxide increase. 21st Century and Technology, Spring 1997, 42-52.
- 24 ^ François Gervais 2018. L'Urgence climatique est un leurre. L'Artilleur, 302p. ISBN 9-782810-008513
- 25 par exemple <http://www.insu.cnrs.fr/node/5222>, <https://www.nature.com/articles/nclimate2531>, <https://mythesmanciesetmatematiques.wordpress.com/2017/09/26/le-hiatus-pas-de-quoi-en-faire-un-fromage-ni-une-publi/>
- 26 ^ [https://en.wikipedia.org/wiki/Al\\_Gore](https://en.wikipedia.org/wiki/Al_Gore), <https://www.quora.com/Why-do-people-say-the-science-is-settled-when-it-comes-to-climate-change-Isnt-the-point-of-science-that-nothing-is-settled>
- 27 ^ Wagner, F. et al. 2002. Rapid atmospheric CO2 changes associated with the 8,200-years-B.P. cooling event. PNAS, 99/19, 12011-12014, <http://www.pnas.org/content/99/19/12011.full.pdf>
- 28 ^ Un stomate est un orifice de petite taille présent dans l'épiderme des organes aériens des végétaux. Il permet les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant (O2, CO2, H2Ovap), <https://fr.wikipedia.org/wiki/Stomate>
- 29 ^ <https://judithcurry.com/2017/02/17/nature-unbound-ii-the-dansgaard-oeschger-cycle/> <http://www.co2science.org/articles/V6/N26/EDIT.php>
- 30 ^ Van Vliet-Lanoë B. 2013. Cryosphère. Histoire et environnements de notre ère glaciaire. Vuibert, 405p.
- 31 ^ Gervais F. 2013. L'innocence du carbone. L'effet de serre remis en question. Albin Michel, 315p.
- 32 ^ Humlum, O., Solheim J.E., Stordahl, K. 2011. [Identifying natural contributions to late Holocene climate change](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.05.002). Global and Planetary Change, 79, 145-156
- 33 ^ Debeil A. et al. 2004. Climat : 15 Vérités qui dérangent. Textis, 270p. <https://www.amazon.fr/Climat-15-v%20E9rit%E9s-qui-d%E9rangent/dp/2930650052>
- 34 ^ Boden T.A. & Andres R.J. 2015. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2, Emissions, CDIA [http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview\\_2011.html](http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview_2011.html) Egalement: <http://notrickszone.com/2017/03/26/new-literature-strongly-suggests-co2-residence-time-in-the-atmosphere-is-exaggerated/#sthash.emJlOfmJ.nPbaSQXG.dpbs>
- 35 ^ Harde H. 2017. Scrutinizing the carbon cycle and CO2 residence time in the atmosphere. Global and Planetary Change, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818116304787>
- 36 ^ Updated list of 66 excuses for the 18-26 year 'pause' global warming, 2014. <http://hockeyschick.blogspot.be/2014/11/updated-list-of-64-excuses-for-18-26.html>
- 37 ^ Climate Change 2014 : Synthesis Report (see p.43), Pachauri R.K. et al. 2014, <https://epic.awi.de/37530/>
- 38 ^ <https://www.climato-realistes.fr/incertitudes-sur-le-cycle-du-carbone/>
- 39 ^ Scafetta N. et al. 2017. Natural climate variability, part 1 : Observations versus the modeled predictions. Intern. J. of Heat and Technology, 35, S9-S17 ou [http://www.iieta.org/sites/default/files/Journals/IJHT/35.Sp01\\_02.pdf](http://www.iieta.org/sites/default/files/Journals/IJHT/35.Sp01_02.pdf)
- 40 ^ de Larminat S., 2019. Climat, et si la vérité (nous) rendait libre. Terra Mare, 153p. ISBN 9782918-677376.
- 41 ^ de Rougemont, 2017. Les modèles surchauffent. <http://blog.mr-int.ch/?p=4291>
- 42 ^ T. Mihailovic et al. 2014. Climate Predictions : The Chaos and Complexity in Climate Models. Advances in Meteorology, 2014, 14p.

- 43 ^ Kissin Y.V. A Simple Alternative Model for the Estimation of the Carbon Dioxide Effect on the Earth's Energy Balance. Energy & Environment, <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1260/0958-305X.26.8.1319>, et S.E. Schwartz et al., 2014. Earth' Climate Sensivity : Apparent Inconsistencies in Recent Assessments, AGU Publication, <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1260/0958-305X.26.8.1319>
- 44 ^ Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse, Pachauri R.K. et al. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf)
- 45 ^ Wegman, E. et al. 2006. Ad hoc committee report on the 'hockey stick' global climate reconstruction. House Energy and Commerce Committee Republican (July 14), 92 pp. <https://www.uoguelph.ca/~rmckitri/research/WegmanReport.pdf>
- 46 ^ Caillon, N., Severinghaus, J.P., Jouzel, J., Barnola, J.-M., Kang, J. and Lipenkov, V.Y. 2003. Timing of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature changes across Termination III. Science **299**: 1728-1731. [Discussion, CO<sub>2</sub>science]. Egalement <http://joannenova.com.au/2009/12/carbon-rises-800-years-after-temperatures/>
- 47 ^ Carlsaw K.S. et al. 2002. Cosmic Rays, Clouds, and Climate. Science 298, 1732. Egalement Svensmark H. et al. 2012. Effects of cosmic ray decreases on clouds microphysics. Atmosph. Chem. Phys. Discuss., 12, 3595-3617. <https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/global-change-debates/Sources/Cosmic-rays/more/even-more/cosmic-rays-and-clouds-Science-review-2002.pdf>
- 48 ^ Tinsley, B. A., and R. A. Heelis, 1993. Correlations of atmospheric dynamics with solar activity. evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity, and cloud microphysics, J. Geophys. Research <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/93JD00627/full>
- 49 ^ <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8511670.stm>
- 50 ^ Wyatt M.G. et al., 2007. Atlantic Multidecadal Oscillation and Northern Hemisphere's climate variability. [http://88.167.97.19/temp/Atlantic%20Multidecadal%20Oscillation%20and%20Northern%20Hemisphere\\_s%20climate%20variability\\_WKT\\_poster.pdf](http://88.167.97.19/temp/Atlantic%20Multidecadal%20Oscillation%20and%20Northern%20Hemisphere_s%20climate%20variability_WKT_poster.pdf) Kravstov S. et al. 2014. Two contrasting views of multidecadal climate variability in the twentieth century. AGU Publication, Geophysical Research Letters <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1002/2014GL061416/asset/grl52167.pdf?v=1&t=j9i7w0dp&s=e5b6565c1b99cb c3b5e39d58581cd8c41eb6fee8>
- 51 ^ Essex, Ch. et al., 2006. Does a Global Temperature Exist? Journal of non-equilibrium thermodynamics, 24p. <http://www.uoguelph.ca/~rmckitri/research/globaltemp/GlobTemp.JNET.pdf>
- 52 ^ Meynard F. 2011. La légende de l'effet de serre. Manuel de démystification des problèmes et faux problèmes climatiques. Favre, 268p. ISBN9782828-911584.
- 53 ^ Préat, A. 2017. [http://apreat.ovh/wp-content/uploads/2016/12/PREAT\\_climate\\_8dec2016.pdf](http://apreat.ovh/wp-content/uploads/2016/12/PREAT_climate_8dec2016.pdf)

### 3. Événements hyperthermiques du Tertiaire : précurseurs de la situation actuelle ?

Mis en ligne SCE : 27.04.2019

#### 3.1. Introduction

Le but de cet article est de montrer combien la climatologie (actuelle et celle du passé) est complexe et que *la science est loin d'être dite*. Pour ce qui est de la climatologie actuelle de très nombreux articles existent, dont une partie sur SCE. Pour la climatologie du passé les exemples géologiques ne manquent pas (également quelques articles généraux sur SCE, [ici](#)). Le propos de cet article est basé sur une analyse détaillée des événements hyperthermiques de la limite Paléocène/Eocène il y a 56 Ma et de l'Eocène inférieur (pour l'intervalle 54-52 Ma, Figure 1). **Cet exemple montrera que la Terre a connu à de nombreuses reprises des températures bien plus élevées que celles d'aujourd'hui, avec des océans plus chauds, parfois plus acides et une atmosphère beaucoup plus riche en CO<sub>2</sub> (ou en CH<sub>4</sub>) que l'actuelle.** Cela n'a jamais empêché la vie de se développer, et 'ironie du sort' c'est au cours d'un de ces événements hyperthermiques du Tertiaire (ou PETM, voir plus loin), qui fut l'un des plus chauds qu'ait connu la Terre, que les mammifères ont poursuivi une radiation évolutive (= diversification des espèces) sans précédent entamée après l'extinction des dinosaures à la limite Crétacé/Tertiaire [1, 2].

### 3.2. Le Tertiaire ou Cénozoïque (Figure 1 )

La Terre a connu une série d'événements soudains et abrupts (= 'événements hyperthermiques') de réchauffement global à la transition Paléocène/Eocène (càd au Paléogène inférieur, Figure 1) se superposant à une tendance chaude amorcée au Mésozoïque. Le premier et le plus marqué de ces événements s'est déroulé il y a ~56 Ma (à la transition Paléocène/Eocène [3]), il est connu sous le sigle PETM (pour *Paleocene-Eocene Thermal Maximum*) et est marqué par une augmentation de la température globale de plusieurs degrés (voir-ci-dessous) en quelques milliers d'années. Cet événement majeur est enregistré dans les séries géologiques de cet intervalle stratigraphique par un pic de > 3‰ du δ<sup>13</sup>C traduisant une injection massive de carbone 12 (<sup>12</sup>C) dans l'océan et dans l'atmosphère avec une acidification de l'océan profond de 0,3-0,4 unités de pH.

Le caractère abrupt de l'événement PETM ne fait aucun doute car le pic de plus de 3‰ apparaît sans valeurs intermédiaires dans les séries du Paléocène inférieur. Par contre comme nous le verrons plus loin la délimitation temporelle *sensu stricto* de l'événement est loin d'être acquise, principalement suite à la qualité de l'enregistrement stratigraphique et aux difficultés de corrélations des coupes ou sections géologiques étudiées. Ces difficultés sont inhérentes à tout enregistrement temporel en géologie et vouloir à tout prix une résolution à l'échelle de quelques années est illusoire dans le cas qui nous occupe.

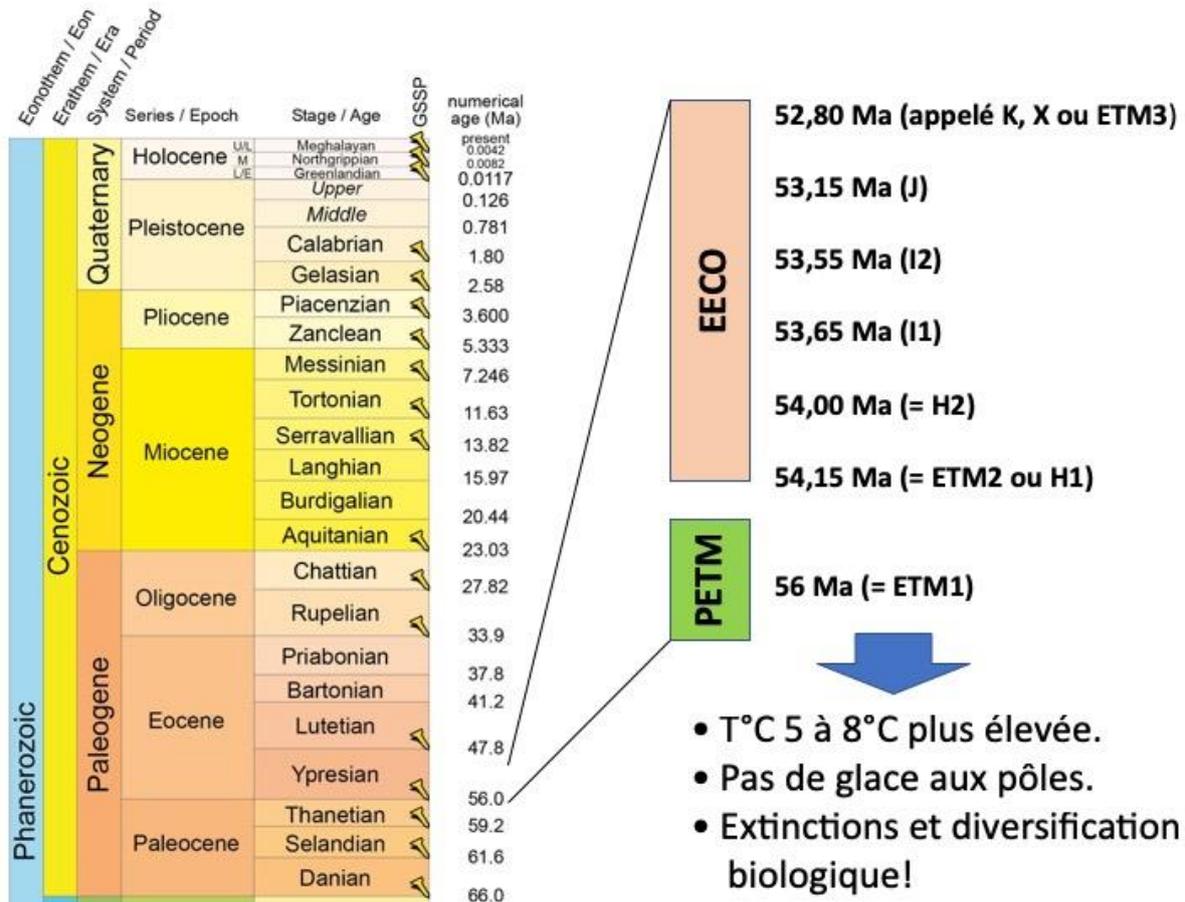


Figure 1 : Légende, page suivante.

Figure 1. A droite (sur la partie gauche) les âges absolus en millions d'années ou 'Ma' (radiométrie), les clous jaunes (= 'clous d'or') représentent des coupes ou sections-types (= 'stratotypes') de référence mondiale pour la définition des étages géologiques (colonne Stage/Age). Ne pas confondre Paléogène (Système/Période) et Paléocène (Série/Epoque) = formalisme et convention internationale en stratigraphie. A droite succession stratigraphique et âge des six événements hyperthermiques suivant la nomenclature PETM-EECO et données principales les concernant (température, glace et organismes). PETM = Paleocene Eocene Thermal Event, EECO = Early Eocene Climatic Optimum (voir texte). Se reporter à [DeConto et al. 2012](#) pour l'échelle stratigraphique.

Le Paléogène inférieur (Figure 1) est caractérisé par un système climatique dynamique opérant à la fois sur le long terme (> 10<sup>6</sup> années) et le court terme (< 10<sup>4</sup> années). Une période chaude de long terme fut ainsi présente de ~58 Ma (Paléocène supérieur) à ~50 Ma (Eocène inférieur), elle est connue sous le sigle 'EECO' (pour *Early Eocene Climatic Optimum* avec six événements hyperthermiques de 54,2 à 52,8 Ma, voir ci-dessous). La température globale fut pendant 2 millions d'années la plus élevée du Cénozoïque (de 5 à 8 °C par rapport à l'actuelle, et jusqu'à 10°C suivant certains auteurs, voir ci-dessous), soit la plus élevée au cours des 66 derniers millions d'années, et même pendant plus longtemps (~100 Ma) si l'on remonte au Crétacé (Mésozoïque)[4]. Les sédiments marins et continentaux de cette période ont été étudiés à partir de forages océaniques et de nombreuses coupes réparties à l'échelle du globe. Les analyses ont montré que des changements environnementaux et paléontologiques majeurs ont eu lieu et, ont par exemple conduit à une crise biologique (sur environ 1000 ans) avec une extinction partielle des foraminifères benthiques alors que les foraminifères planctoniques se diversifient, à une expansion des dinoflagellés subtropicaux et d'autres groupes en domaine marin ..., à une extinction de certains groupes de mammifères, suivie par une diversification de nombreux mammifères modernes d'Europe et d'Amérique du Nord en domaine continental, avec en particulier l'apparition de nouveaux ordres (*Artiodactyla*, *Perissodactyla* et Primates) [5].

Ainsi une crise biologique n'est pas nécessairement synonyme 'd'extinction catastrophique', bien loin de là. Les crises, qui sont monnaie courante dans l'histoire géologique, sont un des éléments participant à l'Évolution. Elles n'ont jamais arrêté les processus de vie qui se sont déroulés sans interruption sur plusieurs milliards d'années avec par exemple le passage des procaryotes aux eucaryotes [6]. La distribution des continents et la circulation océanique étaient aussi différentes et il n'y avait pas de calottes glaciaires en ce début de Tertiaire limitant ainsi l'albédo. L'Antarctique libre de glace était couvert par la forêt et la toundra, favorable au piégeage de carbone dans les sols et sédiments [7]. Une situation assez différente de l'actuelle caractérisée par l'englacement des pôles et régions voisines.

### 3.3. Le problème ?

Les séries géologiques montrent clairement que le changement climatique s'est toujours produit au cours du temps ([ici](#)). De (très) nombreux épisodes chauds et froids se sont en effet succédés suivant diverses fréquences avec d'importantes fluctuations de température, les épisodes les plus froids pouvant mener à des glaciations (déjà présentes au Précambrien) et les plus chauds conduisant aux événements hyperthermiques très bien documentés au Cénozoïque, mais également présents au cours des autres ères géologiques [8, 9]. **Cet article se concentrant sur les événements hyperthermiques du Cénozoïque (ici Paléocène/Eocène) va tenter de déterminer qui de 'l'œuf ou de la poule' est le premier, et dans notre cas, qui de la température ou du carbone (sous forme de CH<sub>4</sub> ou/et de CO<sub>2</sub>) vient en premier, auquel cas celui qui arrive en second ne peut en aucun cas être la cause du premier, une cause devant nécessairement précéder un effet. Il convient de souligner ici que la précédence n'est pas une preuve de causalité. C'est une condition nécessaire mais pas suffisante.** En effet, les deux phénomènes pourraient être l'effet d'une cause commune, agissant selon deux mécanismes différents et ayant des constantes de temps différentes. Pourquoi juste ces deux paramètres ? Simplement parce que les événements hyperthermiques repérés dans les séries géologiques de tous âges montrent à l'évidence l'importance de ces deux paramètres [9].

En effet, que montrent ces événements hyperthermiques? Ils montrent presque toujours une augmentation de température significative bien documentée par de nombreux 'proxies' ou indicateurs, par exemple les isotopes de l'oxygène, les isotopes du strontium, la minéralogie des argiles, les microfossiles, etc., et une augmentation ou des teneurs plus élevées en CH<sub>4</sub> et/ou de CO<sub>2</sub> (également bien documentées par de nombreux 'proxies', isotopes du carbone, isotopes du bore, [alcénones](#), matière organique, paléosols...) dans l'océan et/ou l'atmosphère [9].

La géologie nous montre donc non seulement que la température fut souvent bien plus élevée sur la Terre que celle d'aujourd'hui, mais également que la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère fut plus élevée, le plus souvent de plus de 5 (Mésozoïque) à 25 (Paléozoïque) fois l'actuelle, voire 100 à 1000 fois plus élevée au Précambrien ([ici et ici](#)). Pour les tenants de l'hypothèse de l'effet de serre, la conclusion est évidente, ce sont les gaz CH<sub>4</sub> et/ou CO<sub>2</sub> (également N<sub>2</sub>O ?) qui ont provoqué les réchauffements du passé.

Comment en être sûr ? Là est toute la question, et nous allons voir ici que grâce à des résolutions temporelles magnéto- et bio-stratigraphiques assez précises couplées à une cyclostratigraphie liée au forçage orbital de la Terre, c'est l'inverse qui s'est produit, à savoir que le CO<sub>2</sub> suit l'augmentation de la température. Cet article ne prétend pas tout résoudre, loin de là, mais il est fidèle à la conviction ou pensée de SCE que la science (climatique) n'est pas dite (« *the science is not settled* »). En fait la science n'est jamais dite, quel que soit le niveau de consensus obtenu autour d'une hypothèse. Comme Einstein le faisait remarquer, *un seul résultat expérimental peut suffire à rejeter cette hypothèse*, si l'on s'en tient rigoureusement à l'application de la méthode scientifique. Ou encore pour paraphraser Popper « *il n'est jamais possible de prouver qu'une hypothèse est vraie ; elle n'est valable que jusqu'à preuve expérimentale du contraire* ».

### 3.4. L'intervalle EECO

L'analyse détaillée de l'intervalle chaud de l'EECO (*Early Eocene Climatic Optimum*) montre qu'il est jalonné de plusieurs périodes de fluctuations de températures de court terme, menant à des événements climatiques hyperthermiques. Six périodes, s'étendant de 54,2 à 52,8 Ma, sont bien documentées principalement sur base de l'évolution des compositions isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) des roches carbonatées échantillonnées à la fois dans les forages océaniques et sur les sections à terre. **Ces périodes ou événements climatiques hyperthermiques sont aujourd'hui bien caractérisés et nommés [10,11, 12, 13], ils se rencontrent à 54,15 Ma (= ETM2 ou H1 pour 'Elmo Event'); à 54,0 Ma (= H2); à 53,65 Ma (I1); à 53,55 Ma (I2); à 53,15 Ma (J) et à 52,80 Ma (appelé K, X ou ETM3) (Figure 2).**

La succession des événements est bien connue mais les âges 'absolus' diffèrent suivant les auteurs. La précision est de 0,02 Ma pour les événements ETM1 et ETM2 [13,14]. L'étude isotopique du carbone et de l'oxygène montre que ces périodes correspondent à des épisodes hyperthermiques avec des augmentations de température des eaux profondes jusqu'à 2°C, et ~1,5° à ~2 °C dans l'atmosphère [13]. Une analyse spectrale détaillée à partir de la stratigraphie des séries a montré que ces épisodes sont en phase avec les cycles d'excentricité de l'orbite terrestre de 405 ka et de ~100 ka [10, 14]. La datation absolue des séries est obtenue à partir de radiométrie absolue (méthode <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) sur des cendres volcaniques interstratifiées dans l'Atlantique Nord [15].

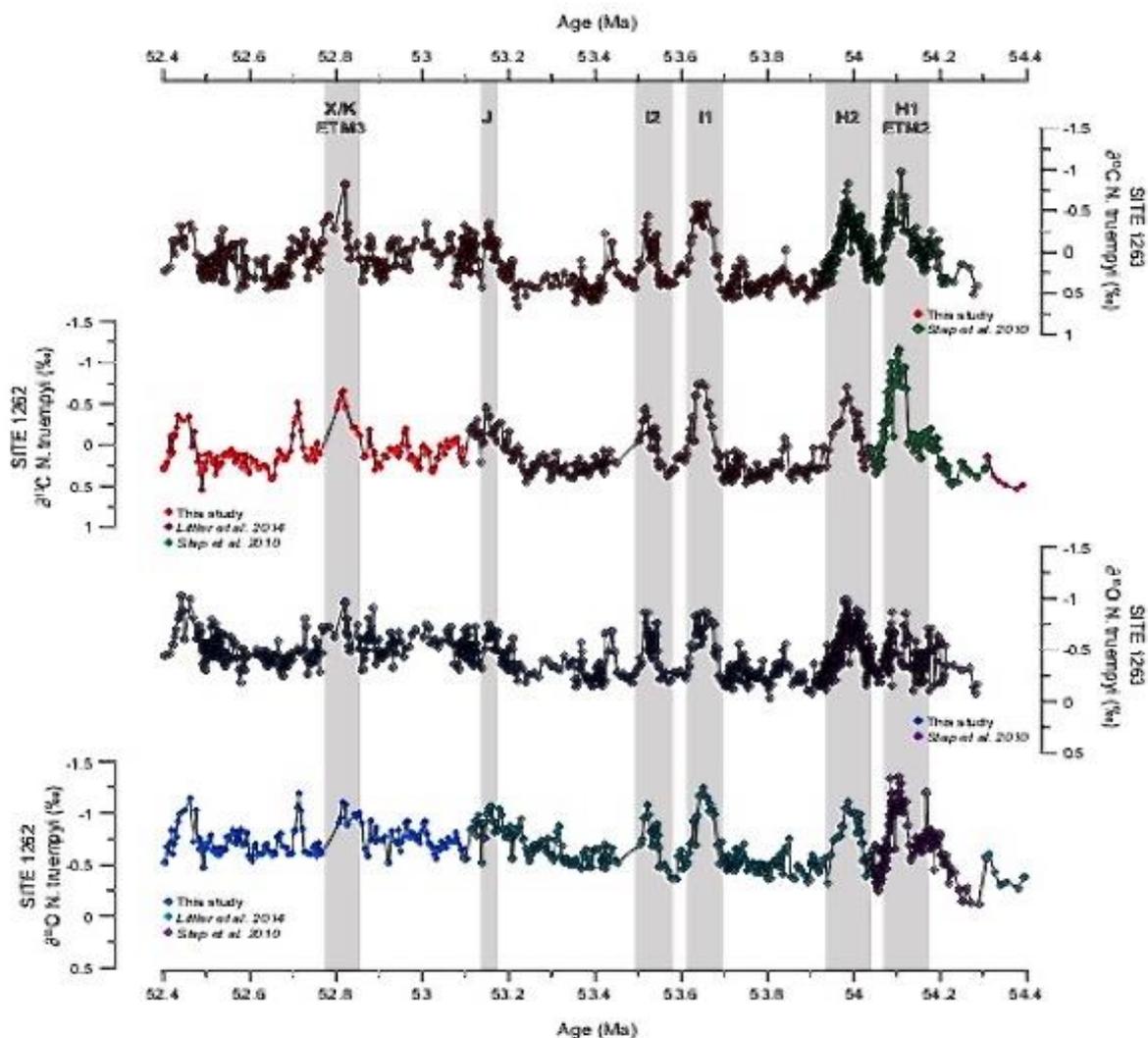


Figure 2 : Compositions isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de foraminifères benthiques (*N. truempyi*) à partir de deux forages océaniques (Site 1263 et Site 1262) en regard des âges absolus. D'après Lauretano et al. (2015) [13].

### 3.5. L'événement PETM

Ces six événements hyperthermiques de l'EEO sont précédés d'un événement encore plus chaud, à savoir l'événement PETM (*Paleocene Eocene Thermal Event*, également appelé ETM1 à ~56, Figure 3 et [ici](#)). Il fut en effet le plus chaud du Tertiaire (ou Cénozoïque), et même au-delà, au moins depuis 100 millions d'années (Crétacé, Mésozoïque) et dura un peu moins de 220 000 ans ou 170 000 suivant les différents auteurs. La température globale augmenta de 5° aux tropiques et de 8 à 10°C aux hautes latitudes (déduit des  $\delta^{18}\text{O}$  et des rapports Mg/Ca des foraminifères benthiques et planctoniques ([13], voir également [4]), et des quantités massives de carbone furent émises, et estimées entre ~3000 PgC ('P' = Peta pour  $10^{15}$ ) et plus de 10 000 PgC [16, 17, 18, 19], soit de même ordre de grandeur que les réserves actuelles de carbone fossile [20, 21]. Ces émissions de carbone dans le système océan-atmosphère furent enregistrées sous forme d'un pic (ou 'excursion') négatif de > 3‰ du  $\delta^{13}\text{C}$  (Figure 3) et sont à l'origine d'une dissolution partielle des sédiments carbonatés déposés sur les fonds marins. Cet événement fut lié aux cycles court et long d'excentricité (cf. ci-dessus).

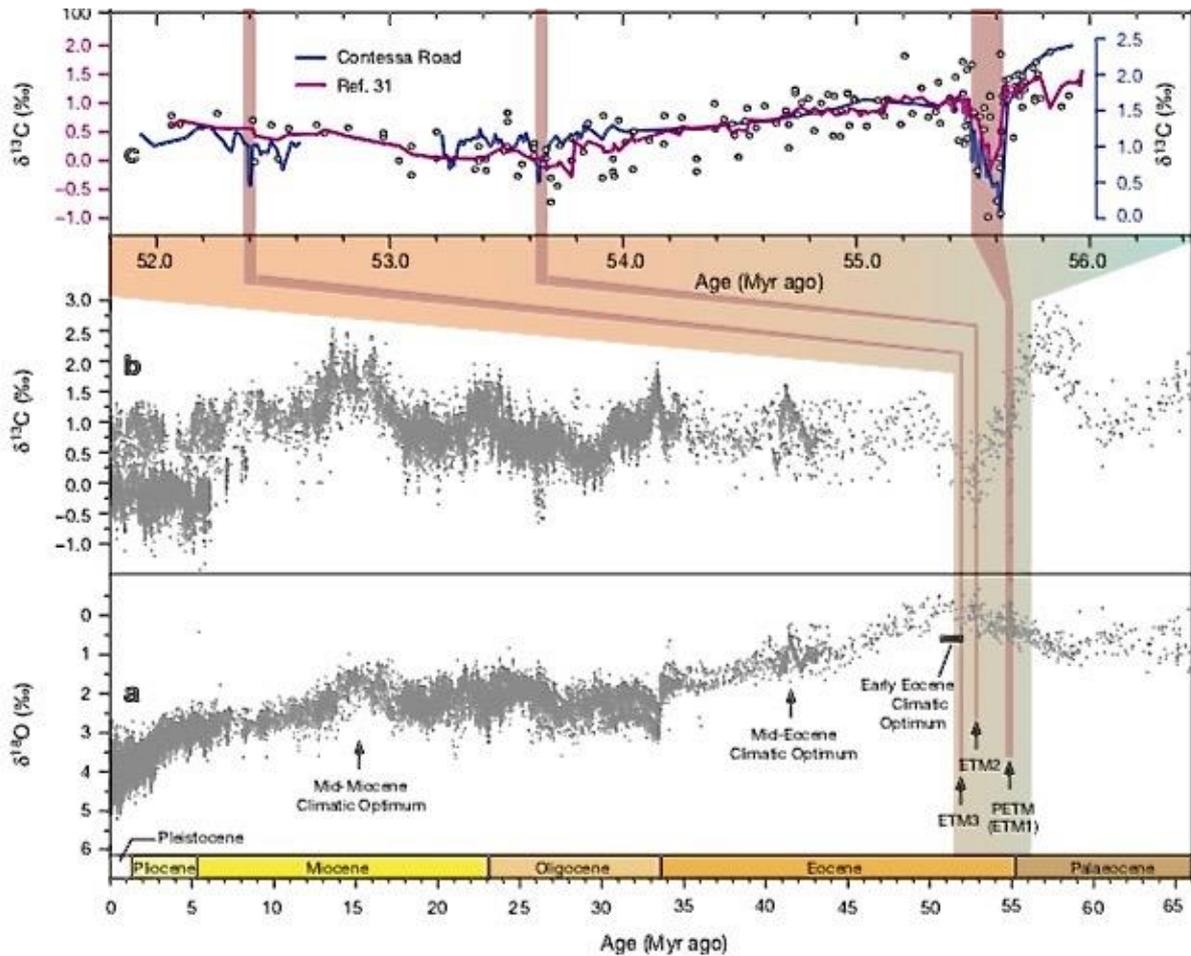


Figure 3 : Compositions isotopiques du carbone de l'oxygène (a) et du carbone (b) des foraminifères au cours du Tertiaire. Les graphiques montrent la forte excursion négative du  $\delta^{13}\text{C}$  culminant à l'Eocène inférieur (événement PETM ou -ETM1). La partie (c) du graphique montre la position des événements ETM2 et ETM3 sur la courbe figurée en (a). Egalement se reporter à la Figure 2. Les Optima Climatiques de l'Eocène moyen et du Miocène moyen sont également mentionnés dans le graphique (a), mais pas discutés ici. D'après DeConto et al. (2012) [7].

**La fourchette d'estimation de la quantité de carbone est large car elle dépend des hypothèses sur l'origine du carbone émis et des modèles utilisés.** Les sources possibles de carbone sont nombreuses et bien documentées dans la littérature consacrée à l'événement PETM [par ex. 9]: méthane biogénique (clathrates ou 'hydrates de méthane'), méthane thermogénique, carbone provenant du permafrost, carbone lié au feux ou incendies avec combustion des tourbes et de charbons, carbone provenant d'une comète, carbone lié à la dessiccation et à l'oxydation de la matière organique ou provenant du manteau terrestre, notamment par l'activité volcanique sous forme de  $\text{CO}_2$ . Dans ce dernier cas cette activité serait liée à l'émission de magmas lors de la dérive ou fragmentation continentale de l'Atlantique Nord lors de la mise en place de la Province volcanique Nord-Atlantique (séparation du Groenland et de l'île de Baffin à l'ouest, et de l'Angleterre et des îles Féroé à l'est [22]). Notons que parmi ces sources régulièrement invoquées dans la littérature, celle du permafrost est une des plus citées [7]. Or il semble qu'à cette époque et jusqu'à au moins 48 Ma (sommet de l'Eocène inférieur), il n'y avait pas de permafrost en Antarctique (Figure 4 *in* [23] (ou alors il était très limité aux très hautes latitudes).

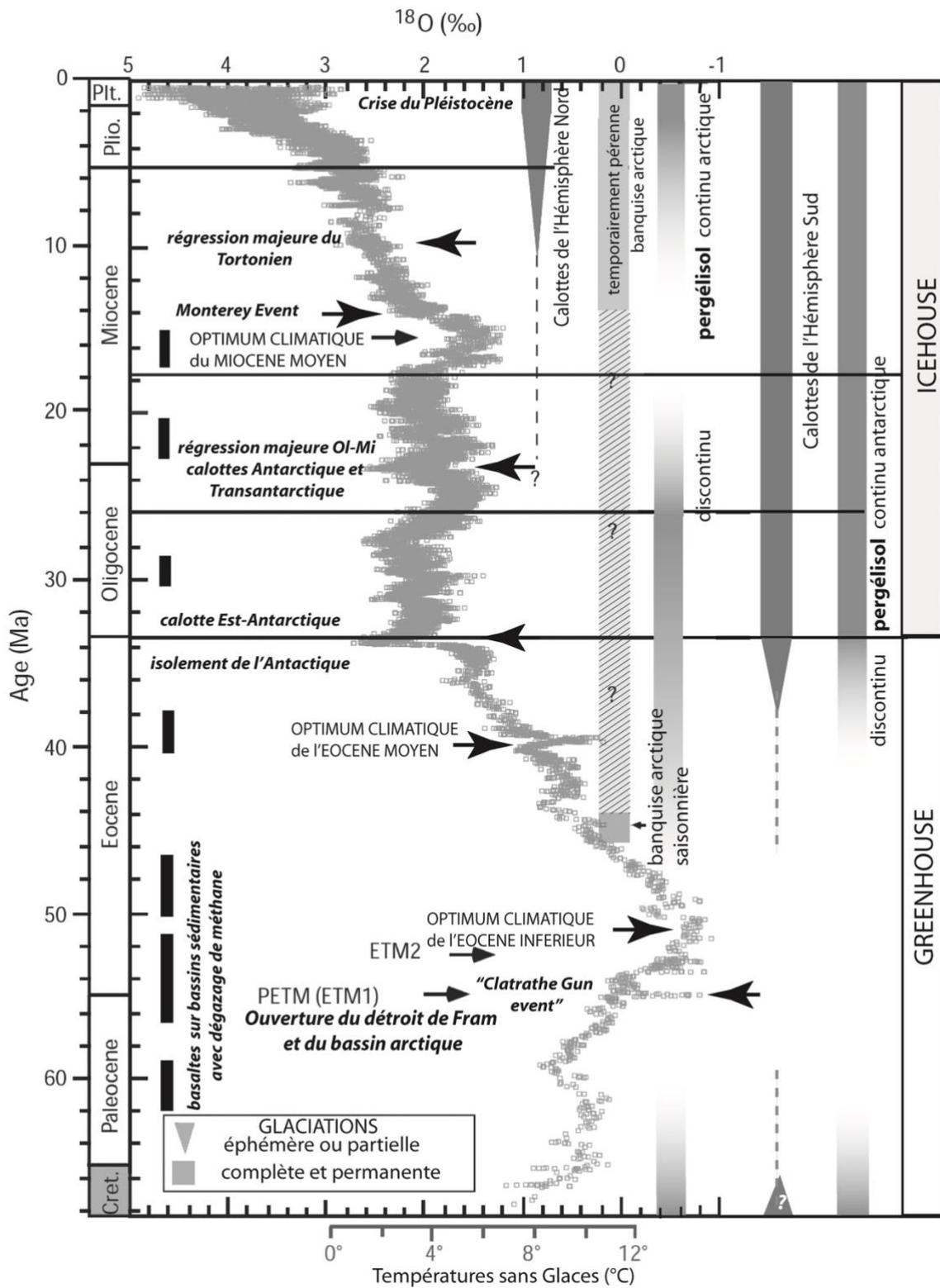


Figure 4 : Événements thermiques et eustatiques amenant à l'entrée en glaciation (passage du mode greenhouse au mode icehouse) in Zachos et al. , 2008 (Nature 451, 279-283) modifié et complété par Brigitte Van Vliet-Lanoë, 2013 [23]. Le permafrost ou pergélisol antarctique n'est pas documenté au Paléocène et apparaît plus tardivement (dernière colonne grisée à droite). Les Optimas climatiques de l'Eocène moyen et du Miocène moyen ne sont pas discutés ici, ni les variations du niveau marin (ou variations eustatiques, ici régressions).

**Chaque source de carbone a une composition particulière en  $\delta^{13}\text{C}$  (comprise entre ~-60‰ pour les clathrates et jusqu'à ~-6‰ pour le manteau terrestre) et l'estimation du pourcentage de chaque source est difficile à établir et est en conséquence approximatif, rendant l'estimation du carbone total émis peu précis.** En termes mathématiques on dirait que l'on effectue une moyenne pondérée (par le % de contribution pondérale de chaque source), mais les poids n'étant pas connus avec grande précision, l'estimation de la moyenne pondérée est alors approximative. On retiendra donc seulement l'ordre de grandeur. Par exemple pour DeConto et al. 2012 [7], le carbone provient principalement de la fonte de sols circum-arctiques riches en matière organique et du permafrost antarctique libérant des clathrates, et l'anomalie de  $> 3 \text{‰}$  en  $\delta^{13}\text{C}$  enregistrée durant le PETM correspondrait à une émission de  $\sim 2000 \text{ PgC}$ , insuffisante suivant ces auteurs pour expliquer le réchauffement. Selon ces auteurs, le réchauffement menant à la libération des clathrates fut initié par un forçage orbital avec conjonction d'une haute excentricité et d'une haute obliquité. Initialement, c'est-à-dire dès 1995, ce sont surtout les clathrates qui ont été invoqués pour expliquer le pic négatif du  $\delta^{13}\text{C}$ .

Bien que cette hypothèse ait rapidement été mise en doute [24], de nombreuses études ont ensuite confirmé leur rôle majeur, mais ont aussi montré que les autres sources avaient un rôle, secondaire pour certains auteurs ou au contraire important pour d'autres. En effet, les contributions de chaque source ne sont pas encore bien établies et la situation sur ce sujet n'est pas encore claire aujourd'hui. De même pour la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère au cours du PETM, environ 900 ppm dans des simulations [7], jusqu'à 2200 ppm au moment du pic à partir d'une teneur de 800 ppm en situation de pré-pic [25]. Notons que la plupart des études s'accordent **sur une teneur pré-pic supérieure à l'actuelle (souvent plus du double). Ces teneurs n'ont rien d'exceptionnel dans les séries géologiques, plusieurs événements hyperthermiques présentaient des teneurs plus élevées jusqu'à 4000 ppm (fin du Trias) et 7000 ppm (à la transition Permien/Trias) [25] durant des périodes 7 à 30 fois plus longues que celle du PETM.** Pour Gutjhar et al. 2017 [19], la source majeure du carbone n'est pas liée au permafrost (non démontré, comme mentionné ci-dessus, cf. Figure 4) mais provient de carbone isotopiquement plus 'lourd' associé au  $\text{CO}_2$  volcanique émis lors de la mise en place de la Province volcanique Nord-Atlantique. De même, pour Frieling et al. 2016 [26] la source majeure de carbone proviendrait du méthane hydrothermal ou thermogénique (=résultant du métamorphisme de contact) lié à l'intrusion de sills basaltiques [27] mis en place dans les roches riches en matière organique des bassins de Vöring et de Möre en Mer de Norvège. Plus de 700 sources hydrothermales ont été mises en évidence dans ces bassins. **On voit donc que l'identification de la source, ou de la contribution de chacune des sources évoquées (et aussi de la quantité) du carbone émis lors de l'événement est encore très incertaine.**

L'excursion négative (ou pic négatif) du  $\delta^{13}\text{C}$  fut donc abrupte et apparut en 20 000 ans ou moins (basé sur le flux cosmogénique de  $^3\text{He}$  [28]) qui représente la période durant laquelle le carbone ( $\text{CH}_4$  ou/et de  $\text{CO}_2$ ) fut introduit dans l'atmosphère. L'analyse détaillée de l'évolution isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) dans cet intervalle suggère que les gaz furent émis massivement lors de deux pulsations de durées inférieures à 2000 ans (voir ci-dessous) à raison de 1 à 2  $\text{PgC/an}$  à comparer avec les 3,8  $\text{PgC/an}$  émis de 1870 à 2014 ([www.co2.earth](http://www.co2.earth) in [25]). Selon Cui et al. 2011 [16] l'émission de carbone fut plus faible (de 0,3 à 1,7  $\text{PgC/an}$ ) durant la maximum thermique du PETM. **Les données géologiques sont à prendre avec précaution car les valeurs affichées dépendent de la durée d'émission et du nombre de périodes d'émission du carbone au cours de l'intervalle PETM** (Figure 5). Le ou les pics d'émissions de  $\text{CO}_2$  auraient été suivis 10 000 à 20 000 ans après l'intervalle PETM *sensu stricto* par une nouvelle période d'émission de  $\text{CO}_2$  liée à l'oxydation de carbone fossile remobilisé par une période active d'érosion (liée au réchauffement du PETM). Une quantité de 100 à 10 000  $\text{PgC}$  aurait ainsi été émise [29], ce qui correspond plus ou moins à ce qui a été émis au cours du PETM. Cette émission 'secondaire' montre à quel point il est difficile d'établir

avec précision la durée du pic PETM *sensu stricto* comme le suggère la Figure 5, et d'établir avec certitude les émissions de carbone sur une base annuelle.

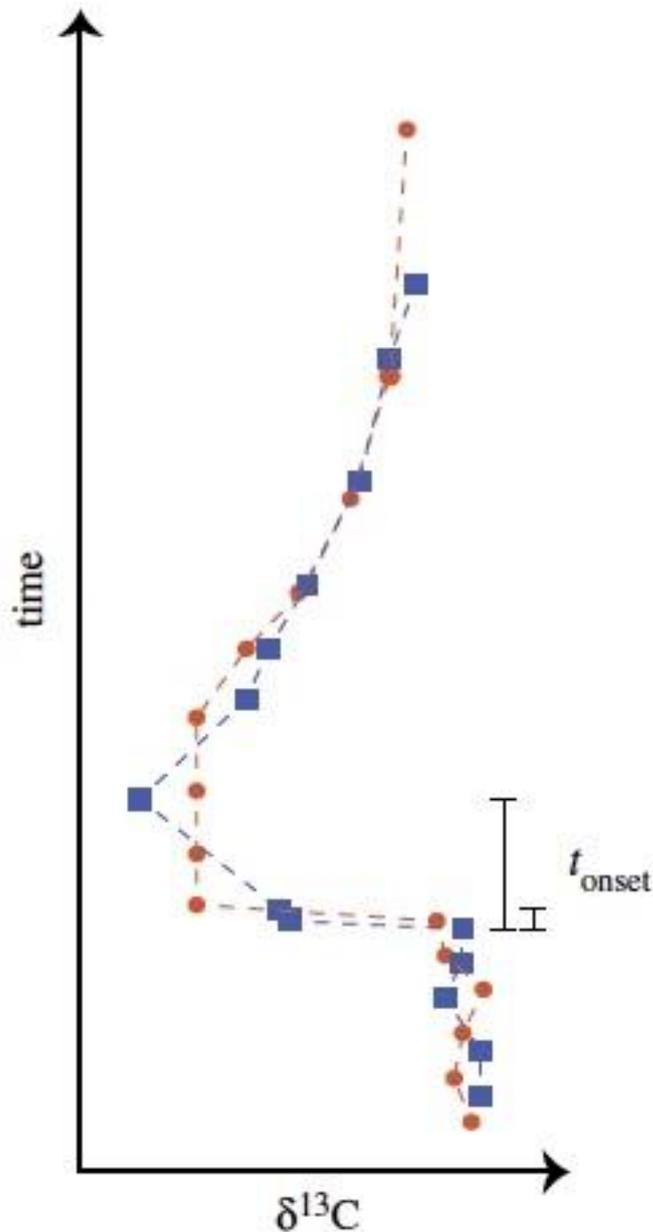


Figure 5 : Graphique illustrant la difficulté de définir précisément la durée de l'intervalle PETM ( $t_{onset}$ ) et de l'identification précise du pic négatif du  $\delta^{13}C$  à partir de la période pré-pic. Aujourd'hui il est difficile de déterminer 'géologiquement' si le déclin du  $\delta^{13}C$  s'est effectué en plusieurs étapes ou non. D'après Turner (2018) [30]. Les carrés bleus et ronds rouges sont symboliques, ils illustrent le fait que suivant le 'zoom temporel' dont on dispose (et qui dépend de l'échantillonnage adéquat surtout lié aux discontinuités sédimentaires), plusieurs (ici deux) versions d'une anomalie sont possibles. En géologie, on a souvent plus de deux versions possibles en l'état actuel de nos connaissances stratigraphiques.

**Les données fournies par l'analyse de  $^3He$  suggèrent que le réchauffement a précédé de 3000 ans le pic négatif du  $\delta^{13}C$  et donc l'émission du carbone dans l'atmosphère [31]. La cause du réchauffement à l'origine de l'émission des clathrates est inconnue pour ces auteurs.**

### 3.6. Les causes à l'origine des événements hyperthermiques

De nombreuses causes sont envisagées et le débat est toujours ouvert. Cela n'a rien d'étonnant pour des séries anciennes, il suffit de se reporter sur les nombreuses variations climatiques du Quaternaire et même à la situation actuelle pour mesurer la complexité du problème. Parmi les très nombreuses causes invoquées et bien documentées, retenons surtout la mise en place des magmas en Atlantique Nord avec une intense activité volcanique, un impact lié à une comète, la combustion de tourbe et de charbon, le forçage astrophysique avec augmentation de l'insolation aux hautes latitudes, l'émission de clathrates à partir de permafrosts et de sols, la modification de la circulation thermohaline ... à l'origine de l'émission des 'gaz à effet de serre', toutes causes qui sont fréquemment invoquées, puisqu'elles sont toutes compatibles avec l'anomalie du  $\delta^{13}\text{C}$ . Les hydrates de gaz sous-marins peuvent aussi être relargués par un réchauffement lié à la proto-circulation thermohaline, spécialement le long des marges atlantiques au Paléocène supérieur, leur accumulation antérieure ayant été caractéristique du refroidissement de la masse océanique depuis le Crétacé terminal (Maastrichtien *in* [23], voir également Figure 1). A l'époque l'océan arctique n'est pas encore ouvert.

On est cependant confronté ici à la question de départ de l'œuf et de la poule.

**La question de l'EEO et particulièrement du PETM (épisode de réchauffement global le plus extrême) est de grande importance puisque cet intervalle est considéré par presque tous les auteurs comme un analogue potentiel de la situation actuelle [21], même si toutes les conditions initiales ne sont pas du tout les mêmes. Or la chimie de  $^3\text{He}$  [31] a montré que le réchauffement a précédé l'émission du carbone dans l'atmosphère et l'analyse spectrale (forçage astronomique) à partir des données bio- et magnétostratigraphiques montre l'importance des cycles d'excentricité durant le Paléogène inférieur [32, 33] et leur lien avec les périodes de réchauffement [34].**

Pour Lauretano et al. 2015 [13], les six événements hyperthermiques sont approximativement en phase avec les maxima des cycles d'excentricité (405 ka et 100 ka) auxquels se superposent chaque fois les pics négatifs du  $\delta^{13}\text{C}$ . Selon ces auteurs, sur base de l'analyse des  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ , le réchauffement opérant tout au long de l'EEO et l'oxydation progressive de la matière organique qui accompagnent cet événement auraient libéré le  $\text{CO}_2$  dans le système océan-atmosphère. Ensuite il y aurait eu dissolution de carbonates (= acidification) dans l'océan et amplification du réchauffement de l'atmosphère. **Ce dernier processus est presque toujours invoqué dans ces événements hyperthermiques et fait bien entendu appel à l'hypothèse d'injection de gaz à effet de serre sans pour autant que l'augmentation de température soit quantifiée (elle l'est parfois mais très rarement), ni même que l'on envisage le rôle de la vapeur d'eau (elle l'est parfois aussi, mais également très rarement) ou encore d'autres possibilités (voir ci-dessous).** Ces gaz auraient amplifié une augmentation initiale de la température par une série de rétroactions positives des milieux géologiques et biologiques jamais discutées dans les articles. Tout comme pour la situation actuelle la démonstration n'y est donc pas ([ici](#)). Pour d'autres auteurs et sur base d'une modélisation, le réchauffement initial fut lié à une conjonction de cycles de haute excentricité et de haute obliquité ayant augmenté l'insolation de  $85 \text{ W/m}^2$ [7].

La plupart des auteurs estiment ainsi que ces événements hyperthermiques résultent de la conjonction de facteurs orbitaux ou solaires à l'origine de l'augmentation de température qui aurait alors libéré le carbone des sédiments, des sols et du permafrost [7][25], bien que la présence de ce dernier durant le Paléocène (et même après jusqu'à 48 Ma) soit sujette à discussion (Figure 4 *in* [23]). Une étude basée sur les isotopes du Nd (néodyme) a montré que les changements de la circulation océanique régionale, à savoir la circulation thermohaline, n'est pas encore fonctionnelle au Paléocène, elle débute vraiment vers 38 Ma, avec les premières traces de glaciers et de banquise au Groenland

NE, même en hémisphère nord et surtout avec l'ouverture du Déroit de Fram qui relie l'océan Arctique et l'Atlantique Nord ([ici](#)). Dans ce contexte, le réchauffement climatique, repris par Turner et al. [30], et basé sur la déstabilisation des clathrates et de leur émission de méthane dans l'océan et l'atmosphère doit être considéré avec précaution. Dans leur hypothèse [30], les bulles s'échappant de l'océan ont induit des boucles convectives verticales entraînant les eaux chaudes de surface vers les grandes profondeurs. **On voit néanmoins qu'un réchauffement lié au forçage orbital est l'élément déclencheur de l'émission du carbone dans les océans et l'atmosphère.** Le forçage orbital est donc l'élément essentiel et premier du changement car aucun des autres processus envisagés (comète, volcanisme, fonte du permafrost ?, circulation thermohaline ...) ne peut présenter une telle régularité et répétitivité conduisant aux six événements hyperthermiques.

**Ainsi malgré une abondance exceptionnelle de données (stratigraphie, géochimie), le fin mot du réchauffement du Tertiaire inférieur n'est pas donné ou démontré et ce réchauffement est probablement issu d'une cascade de facteurs juxtaposés. En tous cas, au Tertiaire inférieur, de l'œuf ou de la poule, l'élément premier est le forçage orbital et l'élément second les 'gaz à effet de serre'.** Malgré une résolution temporelle qui semble excellente on est très loin de la situation actuelle (résolution annuelle ou décennale) dont on s'écarte d'un facteur d'au moins  $10^4$  (les cycles d'excentricité courts de 100 ka) et les comparaisons presque toutes alarmistes ne sont pas étayées. Malgré à nouveau un grand luxe de détails, des pans entiers du problème nous échappent : *quid* de la vapeur d'eau ?, des rayons cosmiques ?, du vent solaire ?, de la circulation océanique ?, de l'albédo ? A nouveau l'absence de proxies fiables et une résolution temporelle inadéquate rendent toute comparaison avec la situation actuelle difficile, voire dérisoire.

**Comment sort-on d'un événement hyperthermique?** L'extrême chaleur liée au réchauffement induit une forte augmentation des précipitations qui accélèrent le cycle de l'altération continentale des silicates pendant quelques milliers ou dizaines de milliers d'années ; ces interactions représentent la période de 'feedback négatif' [7]. L'altération des silicates consomment le  $\text{CO}_2$  (= 'pompe à  $\text{CO}_2$ ' [35]), et avec l'atténuation du forçage orbital, un refroidissement a lieu qui permet au permafrost de se reconstituer avec reprise du stockage du carbone, si la source de carbone est bien majoritairement liée au permafrost (et à sa fonte). A nouveau cette hypothèse souvent reprise dans le cas qui nous occupe, doit être sérieusement mise en doute suite à l'absence probable de permafrost à cette époque (cf. ci-dessus). Pour Gutjahr et al. 2017 [19], c'est l'augmentation du carbone enfoui qui permet à la Terre de retrouver son état initial.

A nouveau, au vu de l'examen de la très grande majorité des publications concernant l'événement PETM, la seule hypothèse retenue est celle des 'gaz à effet de serre' qui suivant leur abondance déterminent l'évolution de la température. Notons également, pour être complet, que de nombreuses études consacrées à cet événement montrent que les régions plus sèches le deviennent plus, tandis que les régions plus humides, voient les précipitations augmenter.

**Alors que retenir ?** Surtout que la Terre a presque toujours connu des températures supérieures, souvent même bien supérieures, à l'actuelle, de même pour les océans qui furent souvent plus chauds que ceux d'aujourd'hui, parfois également plus acides, que le  $\text{CO}_2$  a presque toujours été plus abondant, et cela significativement jusqu'à 25 fois pour le Phanérozoïque (bien plus encore avant), et que l'essentiel de la climatologie aussi bien actuelle que passée nous échappe dans la succession des événements et des rétroactions, et reste à comprendre (ainsi *la science n'est pas dite*). Ces conditions de températures et de teneurs en 'gaz à effet de serre', n'ont jamais empêché la vie de se développer pleinement en domaines marin et terrestre, elle est d'ailleurs née dans ces conditions, et malgré les événements hyperthermiques la Terre se régule et n'a jamais connu d'océans en ébullition,

ni ne s'est jamais durablement transformée en 'Terre Boule de Neige' comme à la fin du Protérozoïque [36].

### 3.7. L'alarmisme des médias ?

**Ainsi faut-il se méfier des démonstrations simplistes ? Oui comme le montre cet article très récent de 2019 (ici) reflétant de nombreux articles équivalents dans les médias. Cet article annonce sans nuance aucune la catastrophe : 'Une nouvelle étude montre que l'homme émet 10 fois plus de dioxyde de carbone dans l'atmosphère que les gaz à effet de serre émis lors du réchauffement climatique planétaire qui a eu lieu il y a 56 millions d'années, entraînant l'acidification des océans et l'extinction d'espèces marines. Dans moins de cinq générations, nos émissions de gaz à effet de serre pourraient se traduire par un réchauffement climatique planétaire équivalent à celui du dernier événement de ce type qu'a connu la Terre....'**

*En d'autres termes, les émissions massives de gaz à effet de serre dues aux activités humaines mènent notre planète vers une situation inconnue, à un rythme inconnu. Si cela n'est pas préjudiciable pour l'avenir de notre planète et de la vie qui a été maintes fois chamboulée par des extinctions massives, il en est tout autrement pour notre civilisation qui n'y survivra pas'*

**Pourtant déjà quelque lignes plus loin on rentre dans le règne de l'à peu près, et on se demande comment le discours catastrophique précédent peut-être si affirmatif, il est en effet mentionné : 'Les scientifiques ne peuvent évaluer précisément ni les quantités de carbone injectées dans l'atmosphère au cours du PETM ni la durée précise de ces émissions. Leurs analyses des prélèvements effectués dans les sédiments océaniques, qui gardent la trace des transformations des minéraux carbonés déposés pendant cette période, donnent une large fourchette estimée entre 3 000 à 7 000 gigatonnes de carbone accumulées sur 3 000 à 20 000 ans'. Notons au passage que ce ne sont pas 'les minéraux carbonés' qui permettent d'analyser le carbone émis, mais bien les compositions isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) des carbonates (par exemple dans les tests de foraminifères) et de la matière organique dans les séries géologiques.**

### 3.8. La science est-elle dite ?

**Revenons donc à ce que l'on sait ou plutôt ce que l'on ne sait pas.** Une récente étude (2018) [30] reprend le problème de la durée de l'événement PETM, c'est le point le plus important qui peut nous interpeller pour 'l'avenir de l'Humanité'. D'abord l'étude reprend ou confirme tout ce qui a été dit sur l'augmentation de température, l'acidification ... et la cyclostratigraphie, bien qu'ici l'aspect concerne les cycles de précession à des fins 'utilitaires' (calages temporels sur les cycles de ~21 kyr pour améliorer la résolution temporelle). **Mais surtout l'étude passe en revue toutes les références sérieuses (basées sur la géologie et/ou la modélisation) sur la durée de l'événement PETM. Citons-les toutes de la plus courte à la plus longue : 1 an ou moins in [37], 13 ans, 500 ans, 1ka, 5 ka, 10ka, 20 ka, 50ka.** Entre quelques années et 50 ka (= 50 000 ans) il y a bien entendu une large fourchette qui montre que la quantité de carbone ( $\text{CH}_4$  ou/et  $\text{CO}_2$ ) émise par année varie dans de grandes proportions. De plus l'étude souligne le fait qu'il n'est pas établi si l'émission du carbone s'est déroulée en une ou plusieurs phases, cela résulte à nouveau du suivi de la courbe de  $\delta^{13}\text{C}$  avec une résolution (géologique) temporelle insuffisante dans les coupes marines et terrestres. Pour certains auteurs [38] les deux tiers de l'émission du carbone auraient eu lieu en deux phases de moins de 1000 ans chacune, le reste au cours des 52 000 années suivantes. Selon Bowen et al. [37], l'émission de carbone s'est déroulée en

deux phases d'environ 1500 années chacune avec retour à des valeurs 'background' entre les émissions.

D'autres études montrent qu'il n'y a pas d'accord sur la 'forme' de la courbe du pic PETM [39,40, 41] et sur l'émission qui fut ou non en plusieurs phases. Malgré ces imprécisions inhérentes à la démarche géologique de séries anciennes, il est étonnant que le résumé de l'étude [30] suggère que les émissions humaines soient 10 fois celles du PETM par année, et pourtant juste après avoir donné cette estimation, l'auteur poursuit (toujours dans le résumé ou *abstract*) avec la phrase suivante : **'Emissions rate estimates for the PETM are hampered by uncertainty over the total mass of PETM carbon released as well the PETM duration'**. Sautons à la conclusion dont la dernière ligne est : *'A key remaining challenge for the PETM, however, is in separating the total contribution of carbon from volcanic sources (either at a typical value of -6‰ or more depleted values associated with sill intrusion from true surface carbon cycle feedbacks'*. C'est bien ce que montre le tableau récapitulatif de l'article en question [30], avec suivant les auteurs repris dans ce tableau (études de modélisation effectuées de 2009 à 2018), des valeurs de compositions isotopiques du carbone 'PETM' retenues variant de -6 ‰ à -50 ‰ représentant une émission totale de carbone variant de 3284 Pg à 10 200 Pg et une durée de l'événement PETM variant de 3 ka à 21 ka. Ces valeurs donnent une fourchette de 0,3PgC/an à 2,0PgC/an (ce qui est assez différent du  $\ll 1\text{PgCyr}^{-1}$  de l'abstract de l'article), mais de l'ordre de grandeur de ce qui a été émis entre 1810 et 2014 (3,8 PgC/an). Cette fourchette de valeur d'émission du carbone au cours de l'événement PETM, basée sur des modèles, est certainement provisoire, puisque la fourchette est assez large s'étendant de quelques années à 50 000 ans.

**Enfin il ne faut pas perdre de vue que d'autres effets amplificateurs ou associés tout simplement ne sont jamais pris en considération faute de proxies (et aussi à nouveau faute de résolution temporelle suffisante) et qu'aucune autre hypothèse que celle de l'hypothèse de l'effet de serre basé sur le CO<sub>2</sub> (et CH<sub>4</sub>), toujours mentionnée dans les articles (sauf très rare exception [41]), n'est envisagée.** Selon ces auteurs [41] *'a more humid atmosphere helps to explain PETM temperatures, but the ultimate mechanisms underlying the shift remain unknown'*.

Les quantités de carbone émises par année au cours du PETM se basent sur des modèles dont une des clés d'entrée est la composition isotopique du  $\delta^{13}\text{C}$ . Nous avons vu qu'elle varie dans une très large fourchette de valeurs (de -60 ‰ à -6 ‰ pour la majorité des auteurs) et que plusieurs sources sont probablement à l'origine du PETM en des temps différents. **Ainsi la Science 'climatologique' n'est pas dite, pas plus dans le passé qu'aujourd'hui et de nombreux travaux sont encore nécessaires avant de conclure 'définitivement'.**

A SCE nous avons déjà montré que pour aujourd'hui le bilan carbone était loin d'être précis et connu ([ici](#)), que ce sont les espèces écologiques envahissantes qui affectent la biodiversité ([ici](#)), que l'acidification des océans ne se résume pas à une catastrophe ([ici](#)), et que le changement climatique est la règle en géologie ([ici](#)), avec notamment les événements hyperthermiques de l'Oligocène, du Miocène, du Pliocène et les Optimas Climatiques (Holocène, Minoen, Romain, Médiéval) du Quaternaire auxquels ils convient d'ajouter les nombreuses périodes chaudes qui se sont succédées au Paléozoïque et Mésozoïque [42] sans parler du Précambrien. De même, de nombreuses périodes plus froides se sont succédées par exemple au Maastrichtien (interrompant provisoirement la période chaude initiée au Crétacé) ou à la limite Eocène-Oligocène, pour ne rester que dans le Tertiaire, avec un refroidissement très significatif au Néogène (Figure 1) menant aux glaciations du Quaternaire avec les cycles glaciaires et interglaciaires [23]. Oui, le changement climatique est bien la règle en géologie ...

### 3.9. Addendum et conclusion provisoire

#### Quelques éléments de réflexion pour terminer... et pistes à explorer

D'où viennent les variations cycliques ?

Les caractéristiques du changement climatique, telles que l'humidité, la température, la sédimentation, les courants océaniques ne sont que les émanations externes des grandes forces de notre système solaire. En fin de compte, la plupart de ces forces sont d'origine gravitationnelle, la Terre n'étant pas isolée et interagissant avec son environnement spatial, et en particulier avec le Soleil qui est sa source d'énergie externe dominante.

Il y a plus de cent ans, que les calculs de Milutin Milankovic effectués à l'aide de papier et de crayons ont montré que les paramètres orbitaux tels que l'excentricité, l'obliquité et la précession affectent l'orbite de la Terre autour du Soleil et donc *in fine* l'insolation ou la quantité d'énergie que reçoit la Terre. Bien que la succession des principales périodes glaciaires du Pléistocène ait nécessité un ajustement par rapport à ces cycles, ce fut le début de la prise de conscience que les (paléo)climats ont souvent changé de façon cyclique au cours de l'histoire de la Terre.

Les cycles de Milankovic mesurent les événements de mécanique céleste (force de gravitation) modifiant le mouvement de la Terre, à l'échelle de dizaines et centaines de milliers d'années. Le Soleil lui-même, en termes de variances électromagnétiques, présente également des « événements » distincts de plus courte durée. **Une attention particulière est aujourd'hui portée sur les cycles solaires liés à la tachocline**, qui représente à 0,7 rayon du centre solaire la zone de transition entre la zone centrale de rotation (ou zone radiative) uniforme et la zone de rotation différentielle (ou zone convective). Elle pourrait jouer un rôle important dans la génération du champ magnétique et de la dynamo solaires ([ici](#)) en induisant des cycles courts. Selon Jean Van Vliet (igr physicien, communication personnelle), l'activité solaire est due à des phénomènes gravitationnels, et non à un effet dynamo fort à la mode, mais jamais encore prouvé par les magnéticiens.

Les cyclicités de Milankovic sont cependant difficiles à mettre en évidence dans les séries anciennes, suite aux résolutions temporelles insuffisantes et également ou surtout ? au caractère chaotique du comportement orbital surtout pour de très longues périodes, plus de quelques dizaines de millions d'années (Laskar, [2010](#) et [ici](#)).

La température fluctue bien sur des échelles de temps très courtes. Prenons la période du dernier glaciaire (de ~117 000 à ~21 000 [BP](#)) fort étudiée et caractérisée par des variations climatiques brutales, surtout dans l'hémisphère nord, marquées par la succession de plus de 20 stades froids et d'interstades chauds avec chaque fois un cycle long et un cycle court. **Le cycle court (ou cycle de Dansgaard-Oeschger d'environ 1500 années) enregistre un réchauffement brutal de 8 à 10°C en quelques dizaines d'années seulement, soit à l'échelle d'une vie humaine.** Ce réchauffement est suivi d'un refroidissement généralement plus lent, de plusieurs degrés (de 2 à 8°C) sur quelques centaines d'années (200 à 800 ans) suivant les cycles. Notons que les augmentations de température sont décalées entre les deux hémisphères, débutant environ 220 ans en Antarctique pour chaque cycle. On voit ainsi que deux modes climatiques ont lieu en même temps, un mode chaud dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord et un mode 'froid' dans l'hémisphère sud, ces deux modes alternant au cours du temps (en fonction de la succession des cycles, références *in* [9]). Ces changements climatiques ne sont donc pas synchrones à l'échelle de la planète. Les augmentations fort importantes de température n'ont rien à voir avec le CO<sub>2</sub> (en encore moins avec un CO<sub>2</sub> anthropique inexistant à

cette époque), et sont sans doute liées à la circulation thermohaline dans l'océan couplée notamment avec une réduction de la banquise [23]. D'autres cycles courts de variations de la température (événement de Heinrich, cycle de Bond ... références *in* [9] s'observent aussi dans cette période glaciaire et montrent à quel point la 'climatologie' de cette période pourtant bien documentée est complexe, et les processus à l'origine de ces variations loin d'être compris. En tous cas nul besoin ici d'invoquer le CO<sub>2</sub>... et encore moins le 'CO<sub>2</sub> anthropique'.

Ici on revient indirectement à la question de l'œuf et de la poule : visiblement le paramètre à l'origine de ces changements brutaux de climat est lié à la circulation thermohaline liée à l'avancé vers le sud de la banquise [23]. Quel est donc le facteur à l'origine de ces changements répétitifs ?

D'intéressantes pistes ont été proposées par Charvatova en 2009 [44], Charvatova et Hejda, 2014 [45], Duhau et de Jager en 2010 [46] et de Jager et al. 2016 [47]. Ces auteurs ont montré que cette succession de cycles récents est probablement due à des effets gravitationnels dans le système planétaire, les oppositions et conjonctions (c'est-à-dire les deux modes qui sont synchrones ou non suivant les types de cycles, ces derniers sont plus nombreux que les cycles mentionnés ici) « perturbant » les orbites régulières des planètes, et aussi aux variations du magnétisme radiatif solaire (tachocline). Ces auteurs ont également mis en évidence des périodes encore plus courtes de 178,7 années liées au mouvement inertiel solaire et séparées par des périodes d'un nombre impair de mouvements « désorganisés » soulignant ici le caractère chaotique du système. Une récente et fort intéressante synthèse de l'influence de l'activité solaire sur le climat vient d'être publiée et montre qu'il reste beaucoup à faire dans ce domaine [48].

**Ces quelques exemples concernant la période la plus récente montrent à quel point les incertitudes sont grandes et les connaissances faibles. Pour en revenir aux événements de type PETM en géologie, rappelons qu'il est aujourd'hui illusoire de conclure sur le ou les mécanismes à l'origine des changements climatiques, cessons d'être obnubilés par le CO<sub>2</sub> et son soi-disant effet de serre. Reconnaissons qu'il reste beaucoup plus d'incertitudes, à la fois dans l'Actuel et le passé (géologique) et n'écartons aucune voie de recherche, et surtout ne tirons pas des conclusions dans la précipitation 'alarmiste'.**

Après avoir écarté l'influence du Soleil ('constante solaire') et ignoré de manière systématique les interactions solaires ou planétaires, les agences de l'ONU qui financent le GIEC ne soutiennent hélas pas la recherche sur le climat extraterrestre. Heureusement que la NASA avec sa sonde Parker et l'ESA avec sa sonde Solar Explorer s'intéresseront d'un peu plus près, dans les années qui viennent, à celui qui reste le moteur de notre climat : le Soleil (Jean Van Vliet, communication personnelle).

## Notes

1. Tabucce, R. 1999. Un réchauffement propice aux mammifères. Pour La Science. <https://www.pourlascience.fr/sd/paleontologie/un-rechauffement-propice-aux-mammiferes-3685.php>
2. Smith, T., Rose, K.D. & Gingerich, P.D. 2006. Rapid Asia-Europe-North America geographic dispersal of earliest Eocene primate *Teilhardina* during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103,11223-7. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16847264>
3. <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>
4. Bender, M.L. Paleoclimate. Princeton Primers in Climate, 306p. ISBN 978-0-391-14555-6.
5. Hooker, J.J. 1996. Mammalian biostratigraphy across the Paleocene-Eocene boundary in the Paris, London and Belgian basins. In R.W. O'B. Knox et al. (Eds). Correlation of the Early Paleogene in Northwest Europe. Geological Society London Special Publications 111, 205-218.
6. Gould, S.J. 1991. La vie est belle. Les surprises de l'évolution. Seuil, Science ouverte, ISBN 9-782020-122696.
7. DeConto, R. et al. (+7) 2012. Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost. Nature 484, 87-92.
8. Deconinck, J.F. 2014. Paléoclimats. L'enregistrement des variations climatiques. Vuibert, 234p. ISBN 978-2-311-01193-7.

## EVENEMENTS HYPERTHERMIQUES DU TERTIAIRE : PRECURSEURS ...

9. Cronin, T.M. 2010. Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press, 441p., ISBN 978-0-231-14494-0.
10. Lourens *et al.* (+7) 2005. Astronomical pacing of late Palaeocene to early Eocene global warming events. *Nature* 435, 1083-1087.
11. Agnini, C. *et al.* (+9) 2006. An early Eocene carbon cycle perturbation at ~52.5 Ma in the Southern Alps: Chronology and biotic response. *Paleoceanography* 24, PA2209.
12. Zachos, J.C., McCarren, H., Murphy, B., Rohl, U. & Westerhold, T. 2010. Tempo and scale of late Paleocene and early Eocene carbon isotope cycles: Implications for the origin of hyperthermals. *Earth Planetary Science Letters* 299, 242-249.
13. Lauretano, V., Littler, K. Polling, M. Zachos, J.C. & Lourens, L.J. 2015. Frequency, magnitude and character of hyperthermal events at the onset of the Early Eocene Climatic Optimum. *Clim. Past* 11, 1313-1324.
14. Westerhold, T., Rohl, U., Laskar J. *et al.* (+4) 2007. On the duration of the magnetochrons C24r and C25n and the timing of early global warming events : Implications from the Ocean Drilling Program Leg 208, Walvis Ridge depth transect. *Paleoceanography* 22, PA2201.
15. Storey, M.R., Duncan, A. & Swisher C.C. 2007. Paleocene-Eocene Thermal Maximum and the opening of the Northeast Atlantic. *Science* 316, 587-589.
16. Cui, Y. *et al.* 2011. Slow release of fossil carbon during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Geoscience* 4, 481-485.
17. Zeebe, R.F., Zachos, J.C. & Dickens, G.R. 2009. Carbon dioxide forcing alone insufficient to explain Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Geoscience* 2, 576-580.
18. Le Quéré, C. *et al.* 2016. Global Carbon Budget. *Earth System Science Data* 8, 605-649.
19. Gutzjahr, M. *et al.* (+8) 2017. Very large release of mostly volcanic carbon during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature* 548, 573-577.
20. McGlade, C. & Ekins, P. 2015. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature* 517, 187-190.
21. Zeebe, R.E., Ridgwell, A. & Zachos, J.C. 2016. Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. *Nature Geoscience*, 9, 325-359.
22. Lovell, B. 2010. Challenged by Carbon. *The Oil Industry and Climate Change*. Cambridge University Press, 212p., ISBN 978-0-521-14559-6.
23. Van Vliet-Lanoë B. 2013. Cryosphère. Histoire et environnements de notre ère glaciaire. Vuibert, 405p.
24. Higgins, J.A. & Schrag, D.P. 2006. Beyond methane : Towards a theory for the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Earth Planetary Science Letters* 245, 523-537.
25. Foster, G.L., Hull, P., Lunt, D. & Zachos, J.C. 2018. Placing our current 'hyperthermal' in the context of rapid climate change in our geological past. *Philosophical Transactions, The Royal Society Publishing* A376, 20170086, 11p.
26. Frieling, J. *et al.* (+8) 2017. Extreme warmth and heat-stressed plankton in the tropics during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science Advances* 3, 1-9.
27. Sill : (mot anglais) 'filon- couche' ou lame de roche magmatique intrusive parallèle aux structures de l'encaissant. Au contact avec ce dernier il peut y avoir un métamorphisme de contact (ou métamorphisme thermique) lié à l'augmentation de la température et à la durée de cette augmentation.
28. Giusberti, L., Rio, D., Agnini, C., Backman, J., Fornaciari, E., Tateo, F., Oddone, M. 2007. Mode and tempo of the Paleocene-Eocene thermal maximum in an expanded section from the Venetian pre-Alps. *Geological Society of America* 119, 391-412.
29. Lyons, S.L. *et al.* (+ 11) 2019. Palaeocene-Eocene Thermal Maximum prolonged by fossil carbon oxidation. *Nature Geoscience* 12, 54-60.
30. Turner, S.K. 2018. Constraints on the onset of the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Philosophical Transactions, The Royal Society Publishing* A376, 20170082, 16p.
31. Sluijs, A. *et al.* (+9) 2007. Environmental precursors to rapid light carbon injection at the Palaeocene/Eocene boundary. *Nature* 450, 1218-1221.
32. Dinares-Turell, J., Westerhold, T., Pujalte, V. Röhl, U. & Kroon, D. 2014. Astronomical calibration of the Danian stage (Early Paleocene) revisited : Settling chronologies of sedimentary records across the Atlantic and Pacific Oceans. *Earth Planetary Science Letters* 405, 119-131.
33. Hilgen, F.J., Abels, H., Kuiper, K.F., Lournes, L.J. & Wolthers, M. 2015. Towards a stable astronomical time scale for the Paleocene : Aligning Shatsky Rise with the Zumaia-Walvis Ridge ODP Site 1262 composite. *Newsletters Stratigraphy* 48, 91-110.
34. Lunt J. *et al.* (+5) 2011. A model for orbital pacing of methane hydrate destabilization during the Paleogene. *Nature Geoscience* 4, 775-778.
35. Zaihu, L., Dreybrodt, W. & Huan KL. 2011. Atmospheric CO2 sink : Silicate weathering or carbonate weathering? *Applied Geochemistry* 26, S292-S294.
36. <http://www.snowballearth.org>
37. Bowen, G.J. *et al.* (+8) 2014. Two massive, rapid releases of carbon during the onset of the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Geoscience* 8, 44-48.
38. Röhl, U., Bralower, T.J., Norris, R.D. & Wefer, G. 2000. New chronology for the late Paleocene thermal maximum and its environmental implications. *Geology* 28, 927-930.
39. Sluijs, A. & Dickens, G.R. 2012. Assessing offsets between the d<sup>13</sup>C of sedimentary components and the global exogenic carbon pool across early Paleogene carbon cycle perturbations. *Global Biogeochemical Cycles* 26, GB4005.
40. Sluijs, A., Bowen, G.J., Brinkhuis, H., Lourens, L.J., Thomas, E. 2007. The Palaeocene-Eocene Thermal Maximum super greenhouse : biotic and geochemical signatures, age modes and mechanisms of global change. In deep time perspectives on climate change : marrying the signal from the computer models and biological proxies (Eds Williams M. *et al.*) The Micropalaeontological Society, Special Publications, London UK, The Geological Society, 323-349.
41. Bowen, G.J., Beerling, D.J., Koch, P.L., Zachos, J.C., Quattlebaum, T. 2004. A humid climate state during the Paleocene/Eocene thermal maximum. *Nature* 432, 495-499.
42. Frakes, L.A., Francis, J.E. & Syktus, J.I. 1992. *Climate Modes of the Phanerozoic. The History of the Earth's Climate over the Past 600 Million Year*. Cambridge University Press, 288p.
43. Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. & Ogg, G.M. 2012. *The Geological Time Scale 2012. Volume 2*, Elsevier, 1144p. ISBN 978-0-444-59425-9.

44. Charvatova, I. 2009. Long-term predictive assessments of solar and geomagnetic activities made on the basis of the close similarity between the solar inertial motions in the intervals 1840-1905 and 1980-2045. *New Astronomy* 14, 25-30. <http://files.klimaskeptik.cz/200001060-891438a1e7/charvatova%202009%20newastronomy.pdf>
45. Charvatova, I. & Hejda, P. 2014. Responses of the basic cycles of 178.7 and 2402 yr in solar-terrestrial phenomena during the Holocene. *Pattern Recognition in Physics* 2, 21-26. <http://www.pattern-recogn-phys.net/2/21/2014/prp-2-21-2014.html>
46. Duhau, S. & de Jager Ph.D. 2010. Fothcoming Grand Minimum of Solar Activity. *Journal of Cosmology*, 8, 1983-1999.
47. de Jager et al. A Remarkable Recent Transition in the Solar Dynamao. *Space Science Review* 1-4, 109-145. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-016-0293-9>
48. Zerebtsov, G.A., Kovalenko, V.A., Molodykh, S.I. & Kirichenko, K.E. 2019. Solar variability manifestations in weather and climate characteristics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 217-222.

## **4. Emmanuel Le Roy Ladurie. A (re)lire absolument**

Mis en ligne SCE : 03.10.2019

### **4.1. Introduction**

S'il est un livre, et un des premiers, à s'être penché de manière aussi détaillée sur l'évolution (récente) du climat, c'est celui d'Emmanuel Le Roy Ladurie 'Histoire du climat depuis l'an mil', publié en 1967, et toujours disponible en livre de poche (deux volumes, [ici](#)).

Rappelons cependant le livre précurseur de Joseph-Jean-Nicolas Fuster publié en 1845 et récemment analysé ici même à [SCE](#) (et toujours disponible, voir [ici](#)).

A lire ou relire ce livre de 366 pages (Figure 1), on ne peut qu'être stupéfié par l'analyse rigoureuse qui met en évidence la variabilité naturelle du climat aux échelles pluriséculaire et décennale, qui décortique et privilégie avec finesse le caractère local du climat par rapport à un climat global et fournit à partir d'indicateurs fiables des fourchettes de températures pour les variations climatiques observées à l'échelle pluriséculaire.

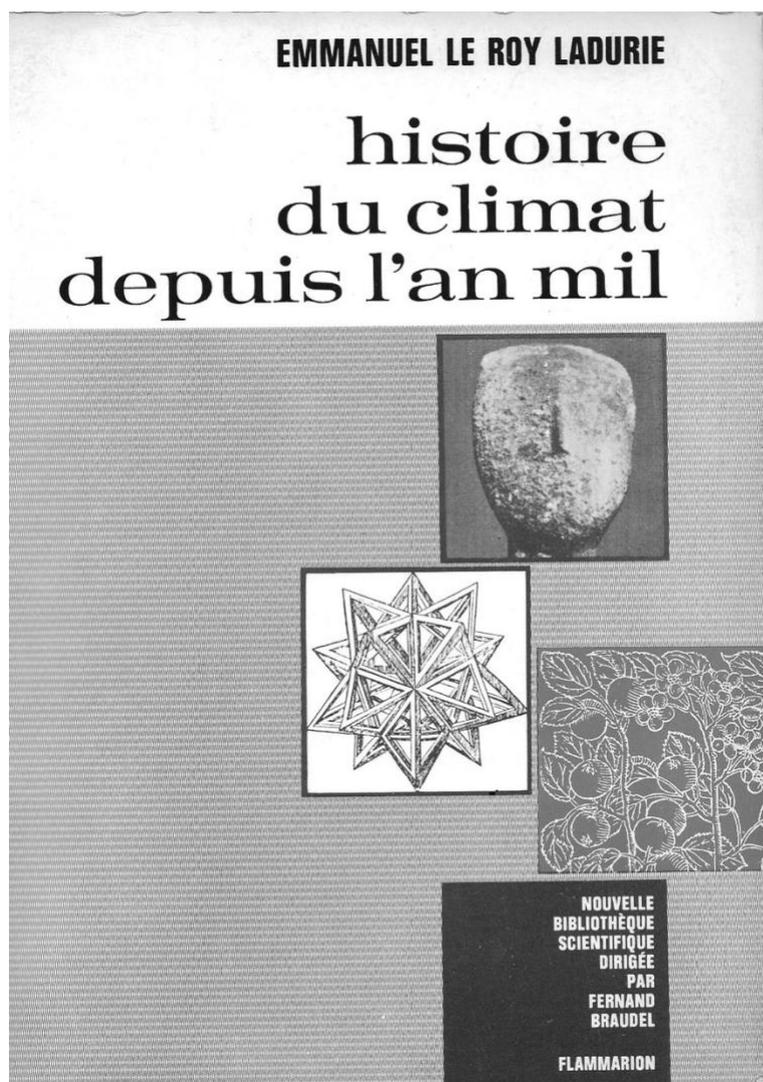


Figure 1. Histoire du climat depuis l'an mil, Flammarion, publié en 1967

Avant d'aborder ce sujet en détail, il semble qu'aucun modèle sorti des 'computers' (GIEC) n'ait été jusqu'à présent capable de rendre compte des évolutions rapportées dans le livre d' Emmanuel Le Roy Ladurie, ces modèles se prétendent 'globaux', contrairement à la conclusion du livre en question qui insiste particulièrement sur le caractère local des climats. Enfin il s'agit d'un livre de 366 pages bien illustré (photographies, cartes et graphiques) dans lequel **il n'est pas mentionné une seule fois 'le poison' des temps modernes, à savoir le CO<sub>2</sub>**. L'auteur, en 1967 (faut-il le rappeler ...), propose ou explore quand même des pistes pour rendre compte de la succession d'épisodes 'froids' et 'chauds', tout au long de ces 1000 années d'histoire, qui en fait débutent il y a 3500 ans (mais pour ces temps historiques plus reculés, les données fiables sont moins nombreuses).

## 4.2. Alors que dit Emmanuel Le Roy Ladurie ?

### 4.2.1. Les méthodes

Mentionnons d'abord la méthode suivie, c'est-à-dire les indicateurs ou 'proxies' utilisés. Ces indicateurs sont nombreux et dépendent en partie des périodes concernées, on y trouve de très

nombreux comptes rendus historiques (documents municipaux et ecclésiastiques, rapports judiciaires des 17<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> siècles, etc.), la phénologie ou vendémiologie (date des vendanges), la date des moissons, la dendrochronologie (modes croissance des arbres), la composition des forêts (hêtres, noisetiers, aulnes, tilleuls...), la palynologie, parfois la pluviométrie, la sécheresse, la datation de sédiment dont ceux des tourbières (carbone 14), les taches solaires, les aurores boréales, la succession (accumulation, divagation et ablation) des moraines et des langues glaciaires et l'archéologie (y compris la pédologie). Enfin pour la période plus récente, les relevés thermométriques sont utilisés. La région investiguée concerne l'Europe du Nord (surtout les Alpes) et l'Amérique du Nord (États-Unis et Canada). Ces méthodes lui permettent ainsi de reconstituer une histoire quantitative du climat depuis le 16<sup>ème</sup> siècle, illustrée sous forme de différents tableaux et d'un 'dépliant' hors-texte.

Le sujet est abordé de la manière la plus complète qui soit, chacune des méthodes est discutée, et parfois le lien ou 'corrélation' entre différentes méthodes est tenté avec par exemple un excellent résultat entre dates de vendanges et courbe thermique donnant lieu à un diagramme précis de la fluctuation des températures de 1600 à 1790 à partir des Alpes, de la Forêt Noire et du Massif Central. Par contre d'autres méthodes sont manifestement à prendre avec des 'pincettes', par exemple la dendrochronologie. Voici, sur ce dernier point, la conclusion de l'auteur après un examen détaillé, notamment repris de l'étude des arbres d'Arizona (séquoias, sapin de Douglas, pin Ponderosa, pin Bristlecone etc.), sur les périodes 600-1950 : « **Il faut donc cesser de demander aux courbes de croissance des arbres des renseignements sur une loi universelle d'évolution cyclique du climat** ». C'est également la conclusion du géographe J.C. Flageollet (2010), professeur de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Pour rappel une grande partie de ces arbres a servi à l'établissement de la fameuse courbe en forme de hockey ou courbe de Mann et al. (1998) du GIEC. En effet ces arbres ne pouvaient – et ne peuvent- convenir car ils n'enregistrent pas la température *sensu stricto*, la largeur des anneaux de croissance dépendant des conditions d'humidité liées aux précipitations, et donc du lieu (voir par exemple [ici](#)). L'auteur s'intéresse aussi à la fluctuation du prix (et de la production) des denrées alimentaires (céréales surtout), mais se garde bien d'en tirer trop de conclusions car ce paramètre dépend aussi des pratiques agricoles diverses, déjà présentes en ces temps historiques reculés.

Voyons ce que l'étude de dendrochronologie, utilisée avec précaution, a fini par apporter pour l'Ouest des Etats-Unis : la première conclusion est celle-ci : « *c'est la stabilité générale du climat dans le dernier millénaire, et en fait depuis 2000 ans au moins* ». La seconde conclusion « *concerne l'existence d'assez larges fluctuations météorologiques, ici pluviométriques. Pendant des périodes qui peuvent atteindre 20 ou 30 ans, et parfois même un siècle, la courbe s'écarte notablement de la position moyenne... la plus importante de ces fluctuations (de sécheresse ou d'humidité prolongées) se situe autour des années 1300... il y aurait eu un 13<sup>ème</sup> siècle aride, un 14<sup>ème</sup> siècle humide* ». Cette sécheresse, longue d'un siècle fait suite à celle très sévère des années 1200 et fut plus prononcée que celle de la fin du 16<sup>ème</sup> siècle et que celle des années 1900 et 1934 (illustrée par [les Raisins de la colère](#) de J. Steinbeck).

Ceci fixe le cadre général, mais l'analyse détaillée de ces différentes périodes de sécheresse est un avertissement pour les études actuelles, reprenant un auteur américain (Schulman, 1951, 1956) : « *il y a d'importantes nuances régionales dans la répartition de cette sécheresse, très forte en Californie [1571-1597, et jamais égalée de 1450 et 1950, date de l'étude], intense dans le Colorado [1573-1593], peu prononcée dans le Nord [1565-1599]...* ». Ainsi pour Emmanuel Le Roy Ladurie ***une telle différenciation géographique a son importance et revêt une portée générale : il est tout à fait vain d'étendre abusivement et absolument aux régions tempérées humides les conclusions valables pour les zones arides***. A méditer aujourd'hui en ces temps de globalisation à outrance ? D'ailleurs l'étude

d'arbres très âgés d'Europe nordique montre que *'le dernier millénaire a mis en évidence non pas tellement une oscillation séculaire, mais des successions intra-décennales, ou décennales ou inter-décennales, qui groupent tantôt des étés chauds, tantôt frais dans leur majorité'*. **Ces successions ne sont pas synchrones par rapport à leurs homologues américaines.**

#### 4.2.2. Les résultats

Après ce détour par l'Ouest américain aride, venons-en au cœur du livre consacré à nos régions tempérées et humides depuis l'Angleterre à l'Ukraine en passant par le Groenland et nos pays y compris le Portugal, l'Italie .... Reprenant les travaux de Aario (1945) et de Mayr (1964), cinq épisodes séculaires ou multiséculaires de même type que le 'Petit Age Glaciaire' (voir ci-dessous) sont identifiés. *'Ces cinq épisodes se répartissent dans deux millénaires fort contrastés avec le premier millénaire avant J.C. occupé par deux longues poussées glaciaires, à peine séparées par un intervalle d'un siècle de retrait. Au contraire, au cours des deux derniers millénaires (de notre ère) ... les intervalles chauds ou doux, de retrait, l'emportent nettement, en durée, sur les intervalles frais'*.

**Ces cinq épisodes majeurs des derniers 3500 ans (de - 2000 à aujourd'hui) se présentent comme suit suivant l'auteur**

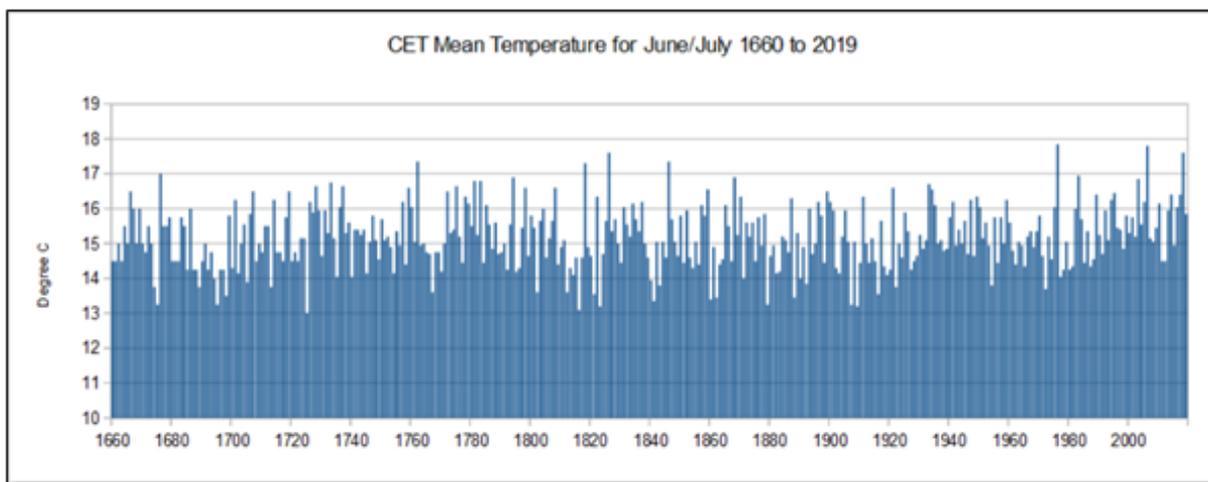
- -1400 à -1300 ans : maximum des glaciers alpins avec la langue terminale à 750 m en aval de son maximum de 1850;
- -900 à -300 ans : maxima des glaciers suivant deux poussées successives dont chacune se prolonge pendant deux ou trois siècles, elles sont séparées par un intervalle de retrait qui dure un siècle et demi;
- +400 à +750 ans : après un retrait intermédiaire [entre environ -250 et 400 ans = **Optimum Climatique Romain** avec la célèbre traversée des Alpes par Hannibal et ses éléphants], nouveau maximum glaciaire;
- +1150 ?/+1200 à +1300/+1350 ans ? : brève poussée glaciaire;
- +1550/+1590 à +1850 ans : nouveau maximum glaciaire.

Entre les périodes glaciaires s'intercalent des épisodes 'doux' ou chauds avec décroissance, pour l'actuelle, des glaciers alpins dès 1860. Signalons également entre 750 et 1150 une période de retrait glaciaire initialement nommée 'Optimum Climatique ou Wärmezeit', aujourd'hui Optimum Climatique Médiéval ou (**OCM**). **Il y aurait donc eu répétition d'au moins cinq cycles froids (= glaciers) de type 1550-1850 et chauds (= décroissance) de type 1860-2000' (le cycle actuel) au cours des 3500 dernières années. Ces oscillations ou alternances ne sont pas régulières** (en fait elles résultent de la somme - approximative- de plusieurs sinusoïdes de période différente, voir Scafetta, 2019 à la fin de l'article). Les périodes de poussées glaciaires durent environ 250 ans (entre 1590 et 1850 = Petit Age Glaciaire (ou **PAG**, voir plus loin), à peine plus de 100 ans (1150-1200 à 1300) ou plus de 300 ans (-900 à -300 ans). **Inversement, les phases de retrait et donc de climat doux ou chaud, peuvent atteindre 100 ans ou durer 300 à 400 ans, voire davantage.** Concernant cette homogénéité temporelle l'auteur signale *'que beaucoup de climatologues pensent qu'en définitive toutes les oscillations du climat sont*

de même type, qu'elles soient annuelles, décennales, séculaires, millénaires... ou d'ordre de grandeur géologique'.

Quel est ou serait alors l'écart de température entre ces phases ou épisodes formant un 'cycle'. Reprenant les travaux de Manley (1965) consacrés aux relevés thermométriques anglais sur 250 ans (il s'agit des seuls relevés complets disponibles en Europe, voir ci-dessous ces relevés complétés jusqu'en 2019, ce qui donne une continuité de 359 ans, Figure 2), **'l'écart observé en moyennes annuelles, des périodes les plus 'fraîches' aux plus récentes, atteindrait +1,6°C pour les périodes de 10 ans, 0,7°C pour les périodes de 40 ans, 0,4°C pour les périodes de 80 ans ou périodes quasi-séculaires'**.

## CET (UK) Temperature Record (longest record existing worldwide)



Average mean temperatures for July 2019 ended up at 17.5C, meaning that last month was an unremarkable 45th warmest since 1660, tying with years like 1847, 1870 and 1923. It was also 1.3C cooler than July 1783.

<https://notalotofpeopleknowthat.wordpress.com/2019/08/01/english-summer-failing-to-meet-alarmist-expectations-again/>

Figure 2. Série la plus complète (de 1660 à 2019) de relevés thermométriques existant à l'échelle mondiale provenant d'un seul endroit situé en Angleterre.

Et Emmanuel Le Roy Ladurie de conclure qu'il s'agit *'d'écarts modestes que l'historien du climat doit considérer comme vraisemblables quant aux fluctuations enregistrées lors des deux ou trois derniers millénaires...'*. Notons que depuis 1850, soit depuis près de deux siècles (exactement 170 ans de 1850 à 2020), **l'augmentation de la température moyenne globale (pour autant qu'elle ait une signification, voir [ici](#) et [ici](#)) est inférieure à 1°C (près de 0,9°C in Scafetta, 2019) restant dans les 'normes' historiques**. Ces dernières ne sont bien entendu pas connues *sensu stricto* (en fait elles ne sont pas connues du tout !) vu d'une part le manque de données, notons que les valeurs rapportées par Emmanuel Le Roy Ladurie à partir des travaux de Manley 1965 **ne concernent qu'un seul endroit d'une seule pays de la planète (Figure 2)**, et d'autre part par le bien-fondé même d'une 'température moyenne globale' (comme déjà discuté dans SCE, voir-ci-dessus les liens).

Ces écarts de température font l'objet d'une attention très particulière de l'auteur, qui analyse l'OCM en soulignant d'abord son caractère mondial (outre l'hémisphère nord, il est repéré aux latitudes équatoriales en Colombie et dans l'hémisphère sud en Nouvelle-Zélande). Depuis lors il a été reconnu dans de nombreuses régions africaines de l'hémisphère sud (par exemple [ici](#) en 2019). En se basant notamment sur des analyses palynologiques (noisetiers...) l'auteur conclut 'prudemment' *'qu'un écart thermique nettement supérieur à 2°C ou davantage, n'est pas nécessaire pour expliquer les caractères originaux de la période tiède de l'an mil.*

Cette période de retrait glaciaire est surtout marquée pas d'assez fortes sécheresses, résultant d'une pluviosité défailante et d'une forte évaporation. *Finalemnt 'le maximum de chaleur se situe entre 5000 et 3000 ans avant J.C. (= Optimum Climatique Holocène), avec végétation 'optimale' et glaciers très réduits'.*

Vient ensuite chronologiquement après l'OCM, le 'Petit Age Glaciaire' dont les premières manifestations apparaissent à la fin de 16<sup>ème</sup> siècle, précisément en 1588 dans les Alpes suisses où le glacier de Grindelwald défonce sa moraine terminale. **Dès lors la fin de la décennie et les trois siècles suivants verront les glaciers descendre de plus en plus bas dans les vallées avec tous les dégâts que cela suppose.** Une chronologie des poussées glaciaires 'agressives' est établie à partir de nombreux documents historiques (dates des vendanges, datation des arbres fossiles pris sous les moraines, avancées morainiques et des modifications des topographies). Les maxima historiques des glaciers alpins se situent en 1599-1600 et entre 1640 et 1650. Dès 1660 un reflux modéré a lieu dans les Alpes témoignant d'une variabilité du climat à l'échelle décennale. Ces périodes d'avancées ('crues glaciaires') et de reflux sont la règle tout au long de ces siècles de période globalement plus froide. Ces reflux *'sont également moindres que les reflux de notre époque plus chaude : par exemple le retrait alpin à la fin du 17<sup>ème</sup> siècle et à l'extrême début du 18<sup>ème</sup> siècle est limité à 500 m au plus au lieu de 1 à 2 km au 20<sup>ème</sup> siècle'.* **Il faut noter que ces oscillations présentent un caractère local à l'échelle pluri-décennale (entre 25 et 50 ans) comme le montrent notamment les positions des langues glaciaires terminales** (Lliboutry, 1964).

Pour ce dernier auteur, ce décalage serait plus le fait de facteurs météorologiques (locaux) que des caractéristiques intrinsèques des glaciers (temps de réaction, dimension, débit). Au final les phases paroxysmales des glaciers alpins (du Petit Age Glaciaire) se sont individualisées en 1660-1610, 1628, 1640-1650, 1676-1680 et 1716-1720 avec la plupart du temps des glaciers nettement plus importants qu'au 20<sup>ème</sup> siècle. Des périodes de décrue secondaire ont parfois lieu avec par exemple 200 à 300 m de retrait horizontal à Chamonix en 1784-1790. La période paroxysmale des glaciers est autour de 1740-1750 pour l'hémisphère nord.

**Le reflux commencera ensuite dès les années 1860-1870 et concerne tous les glaciers alpins :** *'l'ampleur du recul est considérable, et pour la première fois depuis trois siècles un point de non-retour est assez rapidement atteint'.* La mer de Glace (Chamonix) recule de 150m en un an (1867-1868) et de 757m en dix ans (4 nov. 1868 – 27 sept. 1878) soit 76m par an. La phase multiséculaire de crue glaciaire est donc terminée et inaugure la période actuelle. Le réchauffement se marquera par des premières neiges plus tardives et des dernières neiges plus précoces, traduisant le raccourcissement de la saison froide.

Pour visualiser ces oscillations voici une figure (Figure 3) reprise dans Emmanuel Le Roy Ladurie (2007) retraçant l'histoire complexe des grands glaciers alpins du 16<sup>ème</sup> au 20<sup>ème</sup> siècle.

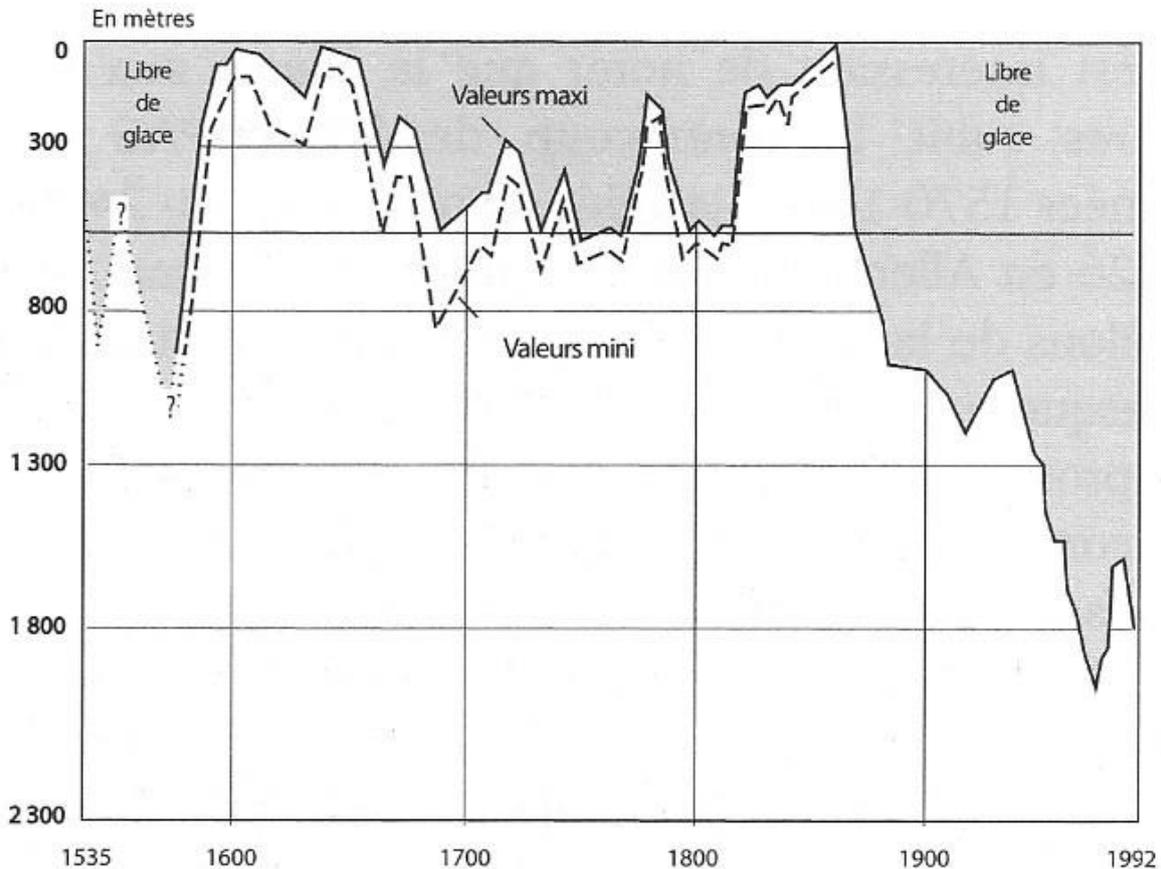


Figure 3. La figure (Emmanuel Le Roy Ladurie, 2007) montre un recul modéré, vers 1547-1560, ensuite une première poussée glaciaire de 1595 à 1640-1650. Puis situation de 'petit âge glaciaire' depuis à peu près le milieu du 17<sup>ème</sup> siècle jusque 1814 (Petit Age Glaciaire sensu stricto), puis nouvelle poussée des grands glaciers alpins atteignant leurs positions maximales de 1815 à 1859-1860 ('hyper Petit Age Glaciaire' suivant la terminologie de l'auteur). Finalement recul à partir de 1860 avec puissante régression de 1860 à 1880, et puis de 1930 à nos jours (ici 1992) poursuite de la régression. Abscisse : échelle temporelle, Ordonnée : minima glaciaires (vers le bas) et maxima vers le haut.

La figure 3 montre que de nombreuses fluctuations ont eu lieu, l'auteur en répertorie 11 (de durées comprises entre 16 et 60 ans) comprenant chacune deux séquences (de durées comprises entre 4 et 37 ans) auxquelles il a attribué un nom. Ce découpage est mentionné ici pour mémoire et a fait l'objet de critiques (par exemple [ici](#)). **Il n'est plus suivi aujourd'hui, son seul mérite est d'avoir souligné la récurrence des fluctuations l'échelle (pluri)-décennale.**

#### 4.3. Les conséquences

L'étude d'Emmanuel Le Roy Ladurie accorde une importance primordiale aux périodes 'fraîches' ou 'froides', correspondant à l'avancée des glaciers. **Cette 'asymétrie' entre périodes froides et chaudes rend en définitive assez compliqué la succession de ces épisodes pluriséculaires qui sont 'calés' sur les périodes froides (voir ci-dessus 2.2.) alors qu'aujourd'hui la littérature privilégie les épisodes 'chauds' qui conditionnent les analyses.**

**Pourquoi donc cette autre approche de la succession des épisodes chez Emmanuel Le Roy Ladurie ?** Simplement parce que son étude est basée sur des documents historiques et que ceux-ci relaient sans cesse des événements 'catastrophiques' liés à l'avancée des glaciers qui détruisent de nombreuses maisons, des zones de cultures, parfois des villages entiers. Ces avancées de glaciers étaient donc une menace permanente pour les habitants qui organisaient régulièrement des

processions avec un représentant de l'église afin de conjurer le sort. Ainsi en juin 1644 une procession et bénédiction près de Chamonix regroupant environ 300 personnes furent organisées suite à l'évolution dramatique du glacier des Bois ... *'et fort heureusement après la bénédiction épiscopale la menace paraît s'éloigner....'*. A ces effets négatifs pour les habitants s'ajoutaient ceux des pénuries et destruction des biens alimentaires (céréales, vignobles ...) dont les prix pouvaient s'envoler. Un exemple parmi d'autres témoignant de la froideur en ces périodes : *'en 1468 on débitait le vin à la hache et les gens le transportaient en glaçons dans leurs chapeaux'* (Pédelaborde, 1957). Ainsi et d'une manière générale une certaine forme de 'catastrophisme' était associé aux longs épisodes froids, on faisait bien avec, il n'y avait pas tous les jours des médias pour en 'rajouter', une situation tout à fait à l'opposé de l'actuelle, période chaude, où le 'catastrophisme' est mis à toutes les sauces, puisqu'on nous annonce rien de moins que la fin du monde. **Pour les paysans des périodes historiques froides il ne s'agissait certainement que de la fin des mois et rien de plus.**

#### 4.4. Discussion

Après cet inventaire factuel il est temps de dresser les interprétations qu'en donne l'auteur et éventuellement les confronter aux données et interprétations actuelles. Plusieurs phases glaciaires ont eu lieu au cours des quatre derniers millénaires avec des oscillations séculaires ou multiséculaires. Ne discutons pas ici les nombreuses subdivisions parfois contradictoires de cet intervalle et retenons que finalement le Petit Age Glaciaire couvrira la période 1660-1850. Pour l'auteur *'en dépit de fluctuations diverses.... le trend séculaire des températures moyennes, de 1590 à 1850 serait généralement demeuré ... de 0,3°C à 1°C en -dessous du niveau contemporain'*. En prenant les relevés de température à Annecy et *'en comparant -chiffres à chiffres- les moyennes 1173-1842 et 1843-1913, on voit que les différences au profit de la seconde période sont assez faibles, de l'ordre de 0,5° à 1°C, il n'en faut pas plus pour mettre en déficit les budgets glaciaires'*. Cette estimation faite par l'auteur est remarquablement en accord avec les études les plus récentes qui montrent que le Petit Age Glaciaire s'est développé avec des températures de 1,0 à 1,5°C plus froides (par exemple [ici](#)) par rapport à la période actuelle plus chaude.

Devant l'ensemble des faits climatologiques rapportés, Emmanuel Le Roy Ladurie ne peut, en tant qu'historien, en donner une interprétation scientifique et estime qu'il faut s'en remettre à *'un pur météorologiste'*. Il s'en réfère alors à Pédelaborde (1957) et Shapiro (1962) qui mettent en avant *'la circulation atmosphérique d'ensemble sur la répartition des masses d'air et du jet stream'*. Emmanuel Le Roy Ladurie tente aussi une corrélation entre périodes froides et chaudes à partir de l'activité solaire (taches solaires) et des perturbations magnétiques (aurores boréales). Ce sujet n'est pas approfondi et pour en venir à la période actuelle (réchauffement du 20<sup>ème</sup> siècle) l'auteur conclut *'à une très lente montée de l'indice d'activité solaire depuis 1900-1920'*. Parmi d'autres processus, l'auteur considère l'impact du réchauffement sur les océans dont le volume peut s'accroître. Mais assez rapidement il reconnaît que cette vue mène à une impasse car il ne lui est pas possible de distinguer la variation absolue du niveau marin (à partir des données marégraphiques) des phénomènes glacio-eustatiques (qui provoquent des variations relatives) induits par la tectonique, par exemple la subsidence. **Force est de reconnaître que l'auteur n'a pas de 'théorie' pour rendre compte de l'ensemble de ses conclusions basées sur les observations ?** De même pour P. Ascot (2009), historien du climat et chercheur CNRS. Cependant cet auteur insiste sur le fait que le CO<sub>2</sub> suit l'augmentation de température et n'est sans doute pas le bon cheval à suivre... (on semble l'avoir oublié aujourd'hui !).

Arrivé à ce stade de l'analyse, nous voyons qu'Emmanuel Le Roy Ladurie, qui n'est pas scientifique -ce qu'il reconnaît volontiers- ne peut avancer dans l'interprétation des observations. Il terminera néanmoins en vérifiant si les fluctuations séculaires du climat pourraient être attribuées

aux activités humaines 'à tel épisode majeur de l'histoire des hommes'. Au vu des connaissances scientifiques du moment et aussi de sa formation d'historien, l'auteur conclut sans grande surprise qu'il n'est pas possible de l'établir ou d'écarter un lien entre activité humaine et fluctuations climatiques. Finalement à la suite de Pédelaborde (1957),

**Emmanuel Le Roy Ladurie estime que les fluctuations pluriséculaires sont liées à la circulation générale de l'atmosphère avec un flux d'ouest de la zone tempérée qui charrie entre le 40<sup>ème</sup> et 70<sup>ème</sup> parallèle vers l'est les particules d'air 'encerclant le globe comme un anneau'. Ce flux étant soumis à d'importantes variations commanderait l'évolution du climat en Europe 'à toutes les échelles', avec circulation complète induisant les périodes de refroidissement et 'circulation contractée' pour les périodes de réchauffement.** Emmanuel Le Roy Ladurie développe les détails de cette dynamique climatique conditionnée par une circulation zonale ('les cyclones et anticyclones suivent une trajectoire Ouest-Est ...') et une circulation méridienne (perpendiculaire à la précédente) opérant à long terme. Dans le premier cas il y a un refroidissement, dans le second un réchauffement. 'Ce schéma simplificateur ne vaut que pour nos régions...'. Finalement pour cet auteur la climatologie dynamique est à même d'expliquer 'le problème des relations soleil-circulation-climat-intempéries' aussi bien pour aujourd'hui que pour le 12<sup>ème</sup> ou 17<sup>ème</sup> siècle.

#### 4.5. Que conclure de cette discussion ?

**D'abord qu'Emmanuel Le Roy Ladurie ne fait appel qu'à des processus naturels ('climatologie dynamique') pour décrire (du moins essayer d'expliquer) les cycles climatiques aux différentes échelles. Ensuite il montre :**

- Que les phénomènes climatiques depuis près de 4000 ans sont les mêmes et présentent des 'cyclicités à court terme' ('intra-séculaire') de même ordre de grandeur tout au long de ces millénaires, mais qu'elles ne sont pas parfaitement périodiques ;
- Que les périodes de refroidissement et de réchauffement sont de longue durée à l'échelle humaine, à savoir plusieurs siècles ;
- Que les écarts thermiques entre ces périodes sont faibles, voisins de 1°C ;
- Que ces fluctuations ne sont pas synchrones à l'échelle pluri-décennale et que l'évolution du climat présente un aspect local indéniable ;
- Que les effets négatifs pour nos activités sont plus importants en périodes de refroidissement important ;
- Que nous sommes dans une période de réchauffement depuis 1860 et qu'elle pourrait durer plusieurs siècles (à moins que le hiatus actuel ne corresponde à un maximum sur la courbe de cyclicité comme suggéré par Mao et al. 2019, et aussi par exemple [ici](#) et [ici](#)).

**Au vu de ces caractéristiques (valables *a minima* pour nos régions, sinon pour l'hémisphère nord), on peut conclure sur le caractère local ou régional des fluctuations climatiques (échelle pluri-décennale) qui furent la règle sur plusieurs milliers d'années et qui devraient continuer à être la règle aujourd'hui.** Même si les causes de ces fluctuations ne sont pas fondamentalement comprises il faut rester prudent dans l'interprétation du GIEC basée en grande partie sur le 'bouton CO<sub>2</sub>'. De plus la référence constante des organismes climatiques officiels (voir ci-dessus 2.2 , rapports et autres études) à une température moyenne globale est plus que probablement une mauvaise idée, la température étant une valeur **intensive** et non extensive, comme le suggèrent les reconstitutions de Emmanuel Le Roy Ladurie. Enfin nous avons montré ici à SCE l'importance du choix de la fenêtre temporelle pour tenter des extrapolations concernant l'évolution de cette 'température moyenne globale' (**ici**).

Où réside alors l'importance du travail de l'auteur. Tout simplement dans l'observation minutieuse des faits révélant aux échelles millénaire, (pluri)-séculaire, pluri- et intra-décennales une succession de périodes de refroidissement et de réchauffement. Cette succession semble uniquement liée aux processus naturels affectant la planète, non compris à l'époque de cette étude, et toujours non compris à l'heure actuelle.

**Il reste donc une fois de plus à rester prudent et ne pas mettre la charrue avant les bœufs...**

#### **4.6. A-t-on réellement compris ce qui se passe ? Probablement pas !**

Avec le recul il est possible de mettre en doute l'explication des zones de circulation zonale et méridienne proposée par Emmanuel Le Roy Ladurie : en effet cet auteur rapporte '*que de 1899 à 1948 la circulation méridienne a notablement diminué (in Dzerdzeevskii, 1961)* alors que la circulation zonale se serait intensifiée. Ceci devrait amener une période de refroidissement à l'échelle pluri-décennale, ce qui n'a pas été montré *a posteriori* puisque la 'température moyenne globale' enregistre un léger réchauffement encadré de deux légers refroidissements de durées équivalentes (**ici**). Notons enfin que les hypothèses ou interprétations météorologiques proposées par l'auteur furent établies lors d'une période où l'analyse par les satellites n'était pas encore développée.

#### **Epilogue ?**

**Finalement Emmanuel Le Roy Ladurie s'est rallié en 2015 à l'hypothèse ou 'théorie' de l'effet de serre (**ici**) :**

*« Pendant des décennies, il était impossible de dire à un collègue historien que l'on s'intéressait à l'histoire du climat... Mais, la situation a évolué depuis, la discipline s'est finalement peu à peu imposée. Par ailleurs, si je suis personnellement convaincu du rôle joué par le CO2 dans le réchauffement, j'estime que l'on n'a pas à exiger de quelqu'un qui s'intéresse à l'histoire du climat qu'il partage cette conviction ; je veux pouvoir éventuellement côtoyer des climato-sceptiques de façon à ce qu'il y ait un débat assez large. Nous devons naturellement être très respectueux des scientifiques qui sont considérés avec raison comme les plus importants. De leur côté, les*

*scientifiques admettent volontiers aujourd'hui que les historiens apportent leur pierre à l'édifice. Et c'est heureux, car les scientifiques ignorent souvent ce qui s'est passé avant le XIXe siècle et ne savent pas le latin, ce qui est tout à fait indispensable quand on étudie le XIIIe siècle... »*

#### Parole pleine de sagesse ?

#### 4.7. Pour aller plus loin ?

Pour une personne bien informée, la climatologie est une science encore en développement, et ses modèles, notamment ceux du GIEC, se révèlent très peu fiables. Tout scientifique 'sérieux' peut le constater par lui-même, la bibliographie est presque sans limite et SCE traite très régulièrement de ce sujet. Il n'est donc pas question dans cet article consacré au livre d' Emmanuel Le Roy Ladurie de (re)prendre ce sujet. Mentionnons seulement ce graphique (Figure 4) instructif très diffusé et commenté montrant l'important écart entre les prédictions des modèles du GIEC et les observations :

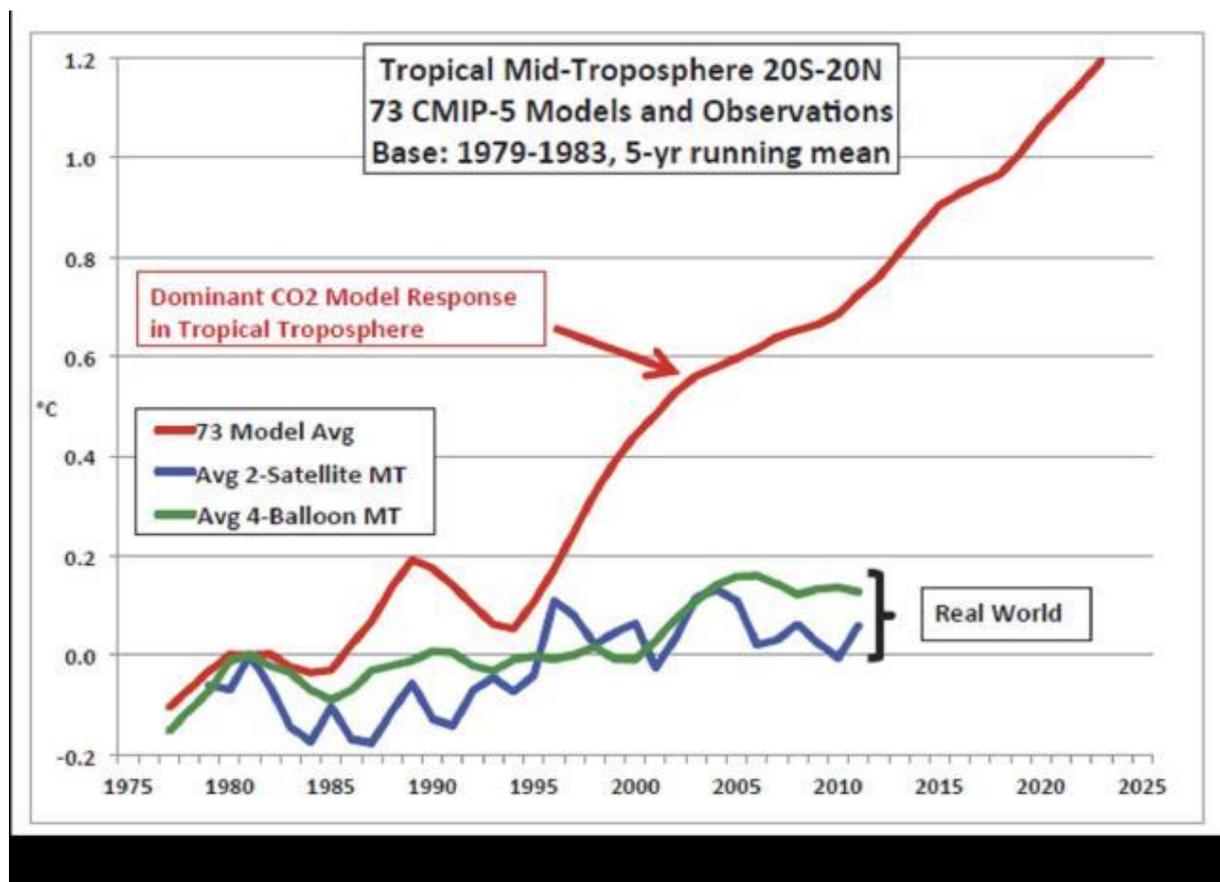


Figure 4. In A. Budbromley, 2017: 'Climate scientists admit their models are wrong' .  
Un graphique vaut souvent mieux que bien des discours....

Mentionnons quand même pour terminer les travaux de **N. Scafetta** de l'Université de Naples. Ce physicien qui a publié de nombreux articles dans des revues de haut rang (Earth Science Reviews, Global and Planetary Change etc.) vient de publier une étude en 'Open Access' dans **Italian Journal of Engineering Geology and Environment (2019)** qui démontre pourquoi les modèles du GIEC sont tous inadéquats, aucun n'est capable de mettre en évidence les fluctuations historiques (notamment celles rapportées par Emmanuel Le Roy Ladurie), tous 'surchauffent' (notamment car la valeur de la **sensibilité climatique** utilisée par le GIEC est trop élevée jusqu'à au moins un facteur cinq). Pour Scafetta, la physique de l'atmosphère n'est pas encore suffisamment connue pour se permettre des modélisations à coup d'ordinateurs, modélisations aboutissant à des résultats qui n'ont (plus) rien à voir avec les données d'observation comme illustré dans le graphique précédent. L'auteur propose un modèle semi-empirique basé sur les oscillations naturelles liées à des paramètres astronomiques et aux forçages induits par le Soleil et la Lune. Les périodes de fluctuations sont de 9,1-10,4-20-60-115-1000 ans.

Reste plus qu'à consulter cette étude pour se convaincre du bien-fondé ou non de la démarche de Scafetta (2019)... car la différence dans la reconstitution des températures (et donc du réchauffement) entre l'approche 'GIEC' et celle intégrant les phénomènes naturels est grande comme le montre aussi la Figure 8 de Scafetta, 2019, reproduite ci-dessous (Figure 5, page suivante).

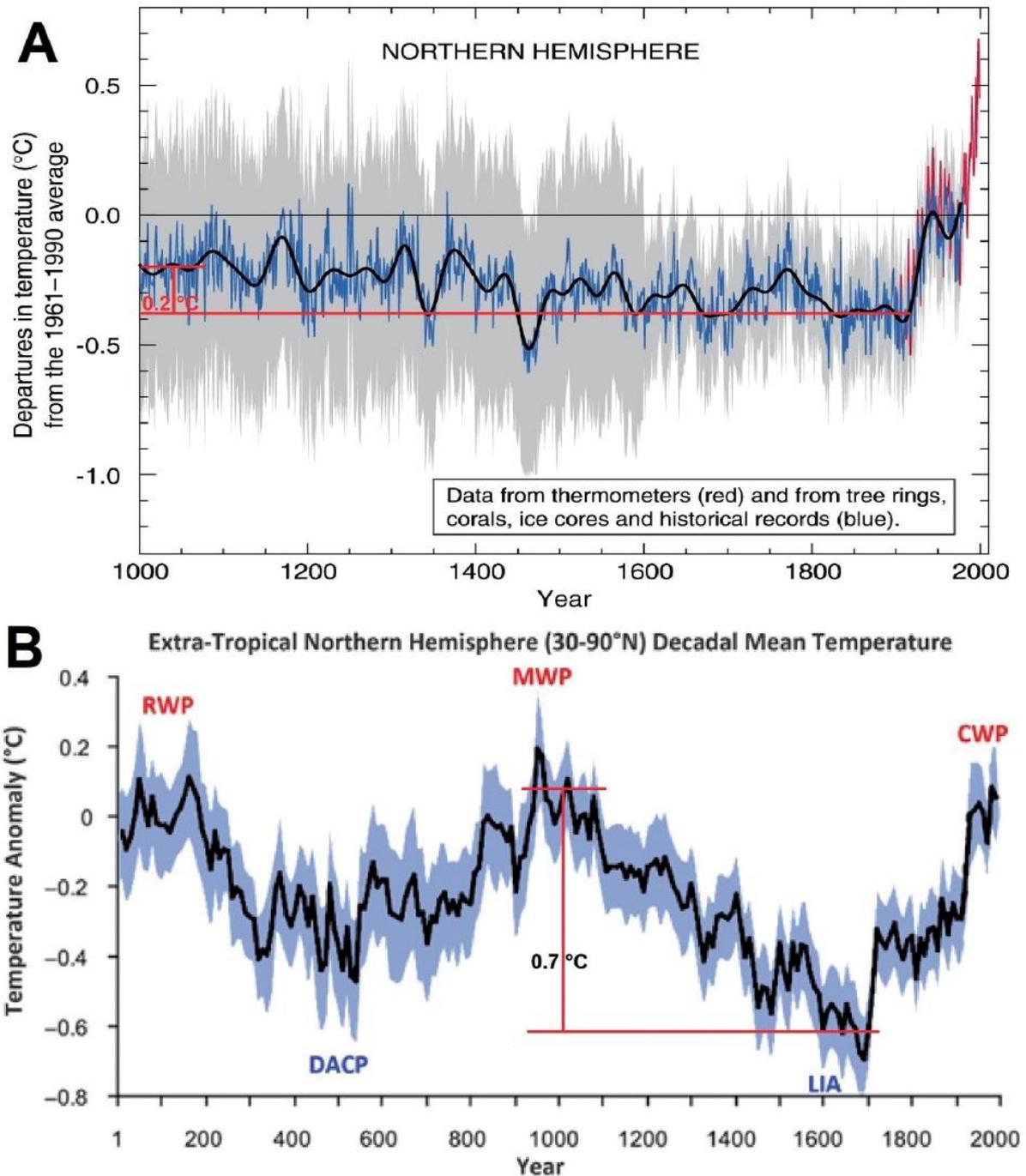


Fig. 8 - Comparison between [A] the Hockey Stick temperature reconstruction of the Northern Hemisphere showing a much smaller temperature change around 2000 (MANN et alii, 1999) and [B] a recent temperature reconstruction of the Northern Hemisphere showing a much larger temperature change (LJUNGVIST, 2010). Note the different amplitudes of the cooling (0.2°C versus 0.7°C) between the Medieval Warm Period (MWP) and the Little Ice Age (LIA)

Figure 5. Capture d'écran de la Figure 8 de Scafetta (2019) : On the reliability of computer-based climate models. IJEGE, 19, 49-70. En comparant les deux courbes on peut se demander si l'on parle de la même chose ! (RWP Roman Warm Period, DACP Dark Age Cold Period ou période froide post-romaine, MWP Medieval Warm Period, LIA Little Ice Age, CWP Current Warm Period). Pour rappel la courbe A du haut, est la fameuse courbe en forme de hockey de Mann et al. 1998 du GIEC.

Finalement en n'importe quel point du globe et depuis longtemps, les températures fluctuent suivant des phases de réchauffement, de stagnation et de refroidissement, ces phases n'étant pas synchrones suivant les différentes zones géographiques (ici et ici). Cette situation est typique d'oscillations cycliques avec un comportement intermittent non parfaitement périodique (Masson, 2018).

## EMMANUEL LE ROY LADURIE : A (RE)LIRE ABSOLUMENT

En matière de climatologie, on voit (Figure 5) bien que le débat scientifique est loin d'être clos. A titre instructif on consultera cet [article](#) qui montre que lorsqu'une erreur est reconnue, elle n'est hélas pas répercutée dans les médias, qui avaient fait leurs gros titres avec la publication de l'article erroné.

### Notes

Aario, L. 1945. Ein nachwärmrezeitlicher Gletschervorstoss in Oberfernau. *Acat geographica* (revue finlandaise) (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Ascot, P. 2009. Histoire du climat. *Perrin, collection Tempus*.

Dzerdzeevskii, B.L. 1961. The general circulation of the atmosphere. New York, , A.S., vol. 95, art. 1,5 : 188-200 (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Flageollet, J.C. 2010. Le réchauffement climatique en Europe. Depuis quand, Pourquoi ? *De Boeck*.

Le Roy Ladurie, E. 1967. Histoire du climat depuis l'an mil. Flammarion, 366p., hors annexes.

Le Roy Ladurie, E. 2007. Trente-trois questions sur l'histoire du climat. Du Moyen-Age à nos jours. *Arthème Fayard, collection Pluriel*.

Lliboutry, L. 1964. *Traité de Glaciologie*, Paris, vol. 1 et vol. 2 (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Manley, G. 1965. Possible climatic agencies in the development of post-glacial habitats. *Proceedings of the Royal Society, B*, 161, 363-375 (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Mayr, F. 1964. Untersuchungen über Ausmass und Folgen der Klima und Gletscherschwankungen seit dem Beginn der postglazialen Wärmzeit. Ausgewählte Beispiele aus den Stubaiäer Alpen in Tirol. *Zeitschrift für Geomorphologie* (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Pédelaborde, P. 1953. La circulation sur l'Europe occidentale. *Annales de géographie* (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Pédelaborde, P. 1957. Le climat du Bassin parisien, Paris (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Shapiro, R. 1962. Circulation pattern. Communication dans les *Proceedings d'Aspen*, p.59 sq. (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Schulman, E. 1951. Tree-ring Indices of Rainfall, Temperatures and River Flow. *Compendium of Meteorology*. The American Meteorological Society, Boston (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

Schulman, E. 1956. Tree-ring and History in the Western United States. *Smithonian Report for 1955*, 459-473, Smithsonian Institute of Washington (*in Emmanuel Le Roy Ladurie, 1967*).

## 5 L'Optimum Climatique Médiéval : ce Grand Oublié !

Mis en ligne SCE : 29.11.2019

### 5.1. Introduction

Comme rappelé dans un précédent article ([ici](#)) les événements hyperthermiques sont fréquents tout au long de l'histoire de la Terre. Bien que fréquents et étudiés avec détail, force est de reconnaître que le 'fin' mot de leur origine n'est toujours pas connu, sauf à leur attribuer à tous un lien de parenté avec l'un ou l'autre des gaz dits à effet de serre, sans qu'une démonstration en bonne et due forme soit présentée. C'est ce que décortique l'article paru dans SCE ([ici](#)) pour un des événements hyperthermiques les plus intenses (événement PETM pour *Paleocene-Eocene Thermal Maximum*) s'étant déroulé au début de l'ère Cénozoïque il y a environ 56 millions d'années.

Rappelons la succession de ces événements au Cénozoïque, d'abord l'événement PETM, ensuite E-O (*Eocene-Oligocene transition with climatic shift*), MMCO (*Mid-Miocene Climatic Optimum*), MPTO (*Mid-Pliocene Thermal Optimum*) et depuis environ 10 000 ans l'Optimum Holocène. **Ces événements montrent tous que la Terre a régulièrement connu de longues périodes chaudes avec des 'températures moyennes globales' plus élevées que l'actuelle** (voir par exemple Cronin 2010, également mentionné sur de nombreux sites web). L'indicateur climatique communément utilisé, la température moyenne globale est loin d'être parfait ([ici](#) et [ici](#)). Il ne faut donc pas prendre au pied de la lettre cette notion de 'température moyenne globale' car déjà pour aujourd'hui elle est plus que discutable, et pour le passé elle est plus qu'inconnue. Mais il n'en reste pas moins vrai que lors des événements hyperthermiques ou des optima climatiques la température était plus élevée qu'actuellement, nous le savons grâce à de nombreux indicateurs ou 'proxies' (voir plus loin). Ces événements ne concernent pas uniquement le Cénozoïque (y compris l'Holocène) mais l'ensemble de l'échelle des temps géologiques au-delà du Cénozoïque, avec parfois des températures fort supérieures à celles du Cénozoïque, comme par exemple au Permien ([ici](#)).

### 5.2 L'Optimum Climatique Médiéval

Revenons aux temps actuels, c'est-à-dire aux temps historiques. Plusieurs Optima Climatiques se succèdent depuis environ 6000 ans, avec pour la période la plus proche de nous, c'est-à-dire environ 3500 ans, la succession des Optima Climatiques Minoen, Romain, Médiéval et Actuel (Figure 1). Le plus récent est l'Optimum Climatique Médiéval (OCM) dont l'acmé se situe aux alentours de l'an mil. S'agissant de températures à peine plus élevées (1,5°C cfr [ici](#) et Le Roy Ladurie, 1967, également 1.0-1.4°C in [Easterbrook](#), 2011), la délimitation précise de cet intervalle par rapport aux périodes encadrantes est difficile et l'OCM est finalement compris du 8ème au 13ème siècle (= le 'petit optimum du Moyen Age' d'environ 700 à 1350 *sensu* Le Roy Ladurie, 1967).

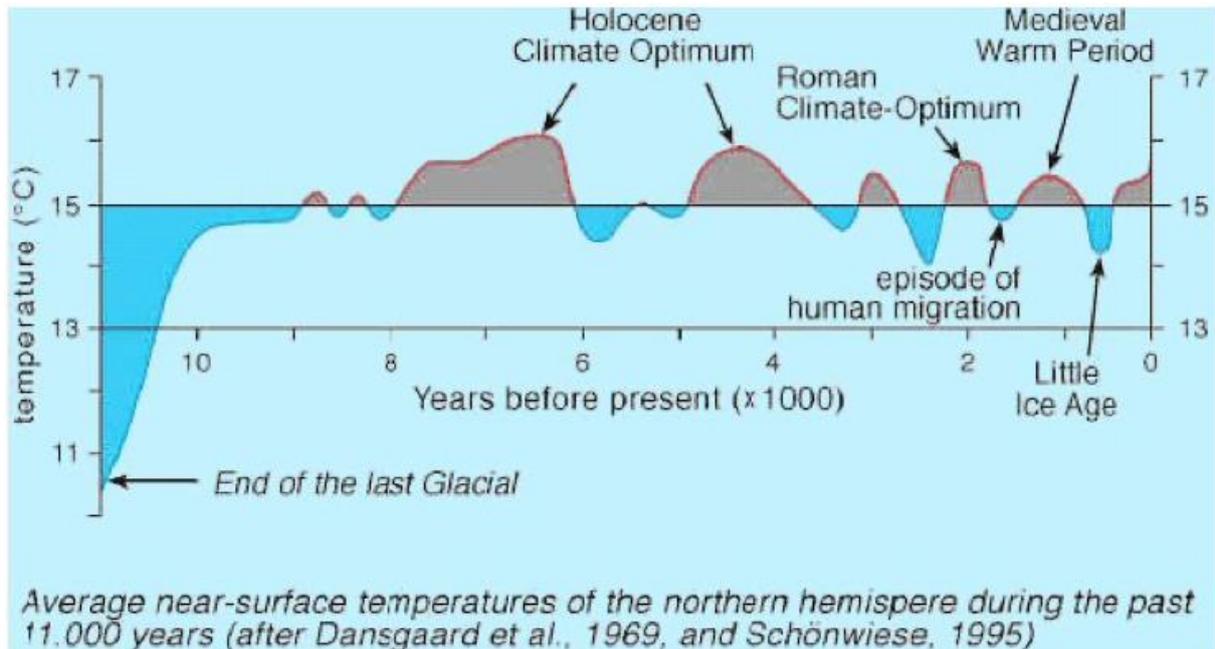


Figure 1. Succession des optima climatiques holocène, romain, médiéval et à l'extrême droite l'optimum climatique actuel. Les optima holocène, romain, médiéval (et minoen non repris dans la figure), posent un problème aux tenants de la théorie basée sur l'hypothèse de l'effet de serre, puisque il n'y avait pas d'émissions 'anthropiques' de gaz à effet de serre durant ces périodes. Ces optima ne peuvent s'expliquer que par des causes naturelles ce qui gêne fortement le GIEC pour qui la période chaude actuelle a une origine anthropique. On voit aussi que les périodes chaudes (optima en rouge) sont séparées de périodes froides (en bleu, par exemple le 'Little Ice Age') ce qui traduit une variabilité naturelle du climat à l'échelle pluriséculaire. De nombreux graphiques semblables à celui-ci peuvent être consultés [ici](#). NB: abréviation BP = 'before present', c'est-à-dire avant le présent, l'année considérée comme le présent étant 1950 de notre calendrier, date antérieure aux essais nucléaires qui ont perturbé la répartition d'isotopes utilisés en radio chronologie.

En se basant sur les différents types de cultures, les dates de moissons et vendanges, etc. les historiens ont accumulé de nombreuses données paléoclimatiques et par exemple montré que le vignoble européen s'étendait à l'époque de 500 km au-delà de sa limite septentrionale actuelle ([Lamb, 1964](#), Le Roy Ladurie, 1967, Deconinck, 2009). La vigne était cultivée dans des régions où elle était absente auparavant, comme la Belgique, l'Angleterre, l'Allemagne dès le 9<sup>ème</sup> siècle. Elle disparaîtra de ces régions vers l'an 1350. Durant l'OCM on note aussi la faible extension des glaciers alpins bien en-dessous des valeurs actuelles ([ici](#) et Le Roy Ladurie, 1967). Une des premières études détaillées de cet épisode est celle de [Lamb \(1964\)](#) de l'Office Météorologique d'Angleterre. Il estima à partir de données historiques, faunistiques, botaniques, glaciologiques et météorologiques que la température en Angleterre fut de 1,2-1.4°C supérieure à 'la température moyenne globale' actuelle et que les précipitations étaient de 10% supérieures. A l'échelle mondiale des températures plus élevées d'environ 1-2°C étaient la règle, et localement jusqu'à 4°C de plus le long de la côte du Groenland.

La vigne est remontée à la suite de la petite période chaude de Charlemagne en 800, ensuite le climat se refroidit jusqu'en 1200 avec des tempêtes monstrueuses (Van Vliet-Lanoë et al. 2014) en relation avec une forte instabilité des jet streams (contraste thermique entre Arctique froid et tropiques chaud, comme actuellement).

Ensuite la vigne remontait jusqu'au Sud du Danemark. Le glacier du Théodull à côté du Cervin dans les Alpes n'existait plus et le col qu'il recouvrait servait de passage pour les échanges commerciaux avec l'Italie.

Le Groenland connaissait des températures moyennes annuelles de 2-4°C supérieures à l'actuelle. Je ne reprends pas la discussion sur la signification 'erronée' de la 'température moyenne globale', déjà discutée dans SCE ([ici](#) et [ici](#)), mais il faut simplement retenir que l'OCM était caractérisé par des températures élevées, au moins égales aux actuelles, probablement supérieures.

**De nombreux indicateurs historiques montrent clairement que l'OCM était en effet une période particulièrement chaude mais instable** ( voir plus loin la figure 4). Elle se termina avec l'apparition d'une période de plus en plus froide, à savoir le Petit Age Glaciaire (PAG, [ici](#)) illustré dans les tableaux de Brueghel et caractérisé par une forte poussée des glaciers alpins. Le PAG est associé à des périodes de très faible activité solaire, entrecoupé de périodes plus tempérées qui nous ont valu la découverte de l'Amérique (voir plus loin la figure 3). Cet épisode froid eut lieu durant les fameux minima de taches solaires bien identifiées à la lunette, à savoir les minima de Spörer et de Maunder ([ici](#)), grâce à qui nous devons entre autre une famine marquée et la révolution française (voir plus loin la figure 3). Bien entendu aucune mesure thermométrique n'avait cours lors de l'OCM, les plus anciennes remontant à la fin du 18ème siècle, et les températures inférées le sont, comme nous l'avons vu, à partir des indicateurs ou 'proxies' analytiques ([ici](#)).

### 5.3. L'OCM ce grand oublié à la base d'une belle saga...

Comme nous allons le voir, le GIEC, à travers la fameuse courbe en crosse de hockey de [Mann et al. \(1998\)](#), va d'abord tenter de faire disparaître 'des radars' cet événement chaud qui mettait à mal la comparaison avec le réchauffement actuel fonctionnant avec le 'bouton anthropique CO<sub>2</sub>' difficilement transposable à l'OCM, ce dernier étant caractérisé par une activité humaine qui n'a pas injecté des quantités importantes de ce gaz dans l'atmosphère (malgré une déforestation importante pour l'agriculture -'les sarts'- et le chauffage au bois pour une population grandissante après l'épisode de la Gande Peste). Finalement Mann et al. 'élimineront' ou 'atténueront' cet OCM de leurs courbes mais l'objectivité sera rétablie grâce à des scientifiques scrupuleux qui ont fait 'leur boulot' de vérification, citons Briffa, (1999) McIntyre et McKittrick (2003, 2005), Wegman al. (2006), McKittrick et Ross (2010). **Le GIEC et ses associés vont ensuite tenter de minimiser la portée de l'événement en le restreignant uniquement à l'hémisphère nord.** Pourquoi ? Tout le monde a deviné, car durant cette période (et les précédents Optima), l'Homme n'était pas en mesure d'injecter du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ce gaz étant le cheval de bataille du GIEC. Bref une belle saga qui se déroula comme suit :

- Mann, Bradly et Hughes publient en 1998 dans [Nature](#) une première étude ('MBH98') donnant la température moyenne de l'hémisphère nord pour les six derniers siècles, l'année suivante ('MBH99') la reconstitution de la température est portée jusque l'an 1000 et publiée dans [Geophysical Research Letters](#). C'est la figure de cette deuxième reconstitution qui sera reprise dans le troisième rapport du GIEC et qui sera la figure phare pour illustrer l'effet du CO<sub>2</sub> à l'origine du récent emballement des températures, suivant ces auteurs. **La courbe établie dans cette figure devient la célèbre courbe en crosse de hockey ('hockey stick') destinée à frapper le public, médias, politiques et scientifiques (Figure 2 )**. Cette courbe fut ensuite relayée au plus haut niveau qui soit par [Al Gore](#) 'himself' qui la présenta quasi sous forme d'un spectacle à de nombreux auditoires de par le monde (voir plus loin). Le réchauffement climatique d'origine anthropique était, comme une fusée, lancé et la science était dite selon Al Gore ('science is settled');

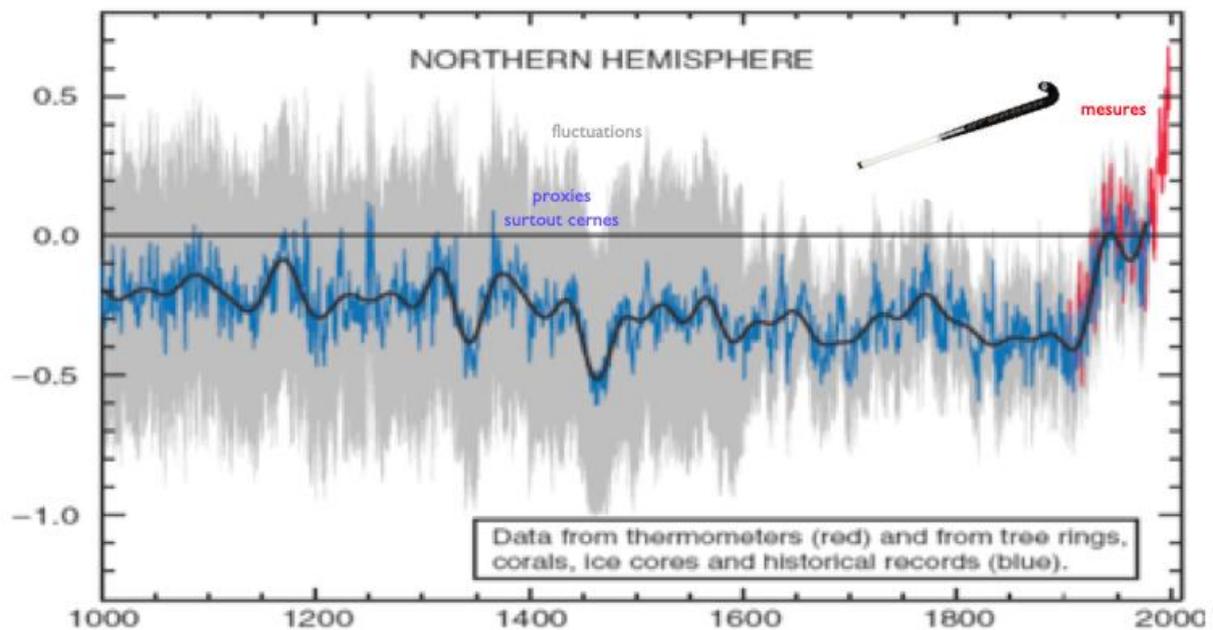


Figure 2. La courbe est établie à partir d'indicateurs climatiques indirects (cernes, coraux, carottes de glace). Biffra (1999) a montré que les cernes ne sont pas fiables (cfr. [ici](#)), McIntyre et McKittrick (2003, 2005) ont ensuite démontré que la courbe est mathématiquement biaisée. Des experts statisticiens (Wegman et al. 2006) nommés par l'Académie des Sciences (USA) ont donné raison à McIntyre et McKittrick. La succession OCM/PAG est à peine visible, et la pente générale de la courbe est négative, et traduit pour notre millénaire une diminution de la température (partie bleue), avant l'emballement récent de la température (extrémité droite du graphique, partie rouge). Cette présentation ne peut que frapper les esprits et la courbe prit le nom de la 'courbe en crosse de hockey'. Cette courbe ne correspond cependant pas à la réalité (cf. ci-dessus) et ne résiste pas à une analyse statistique sérieuse (Wegman et al. 2006, Rittaud, 2010).

#### 5.4. Une courbe qui a aussi son histoire !

##### Qu'avait donc de si particulier cette courbe de la température de notre millénaire ?

- D'abord elle s'est rapidement avérée fautive tant du point de vue de la mauvaise utilisation des proxies (coraux, dendrochronologie, datations, échantillonnages douteux des données) que de la statistique des données (voir ci-après), **mais surtout l'OCM et le PAG ont complètement disparu, comme par magie**, de plus si pente il y a, on voit qu'elle est négative depuis l'an mil, et s'inverse **drastiquement** aujourd'hui. C'est cette remontée spectaculaire qu'Al Gore mit en scène en 2005 dans un auditoire, debout sur un élévateur qui tentait d'approcher de manière théâtrale le sommet de la courbe, et donc des valeurs élevées la température et de CO<sub>2</sub>. **On aura facilement compris qu'en effaçant l'OCM, les températures actuelles n'en paraîtront que plus élevées**. De plus en ne reprenant pas trop clairement le PAG dans les graphiques, le réchauffement actuel n'en paraît que plus anormal, .... alors que quoi de plus normal que la fonte actuelle des glaciers (significativement depuis 1860) si une longue période chaude (l'actuelle) succède à une longue période froide (le PAG) répétant à l'envi une succession de 'cycles' pluriséculaires entrecoupés de cycles pluridécennaux comme c'est le cas depuis au moins 3000 ans, si pas plus (Le Roy Ladurie, 1967);
- La courbe est fautive, orientée ?, comme l'ont montré McIntyre et McKittrick en [2003](#) et [2005](#), notamment en réfutant la pertinence du choix des espèces arborées utilisées pour les données dendrochronologiques (thuya d'Occident et pin de Bristlecone, -nb Le Roy Ladurie, 1967 avait déjà mis en garde sur ce point !), ils ont aussi montré que les données formaient des séries tronquées ou au contraire prolongées de manière arbitraire, qu'il y avait de nombreuses erreurs de stockage

des données avec décalages temporels inexpliqués etc., et aussi une mauvaise utilisation de l'outil statistique (Rittaud, 2010). **Il s'agit donc d'une courbe hybride et les mesures thermométriques ont fréquemment été réalisées en milieu urbain très sensible au phénomène de chaleur urbaine** (Sarkar) et al., 2011, [Pont 2019](#) et [ici](#)). Voici la courbe corrigée de McIntyre et McKittrick (2003) qui se passe de commentaires (Figure 3).

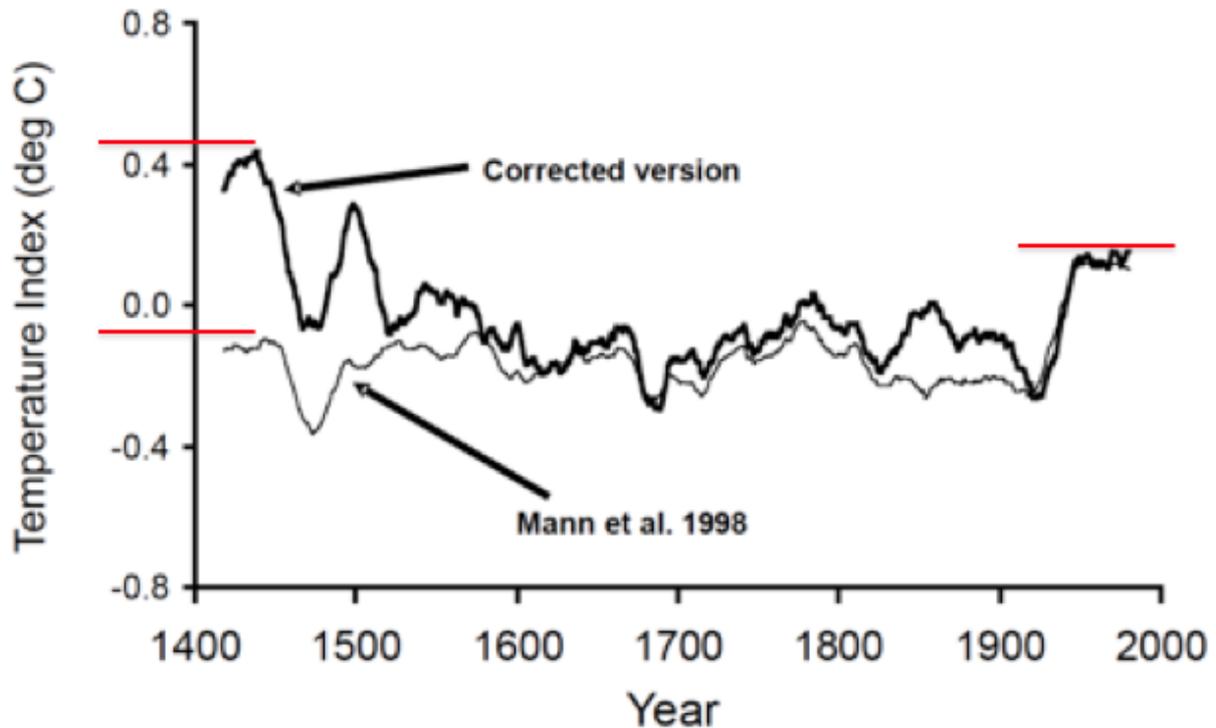


Figure 3. Moyenne mobile sur 20 ans, hémisphère nord, pendant le Petit Age Glaciaire, correction de la courbe de Mann et al. (1999) par un traitement statistique rigoureux sur la période 1400-1980 (McIntyre et McKittrick, 2003). Les températures moyennes du début du 15ème siècle (découverte de l'Amérique) apparaissent désormais plus chaudes que celles du 20ème siècle (voir les lignes rouges horizontales). Par contre le résultat du traitement erroné de Mann et al. (1998) incite à conclure que la période actuelle est 'anormalement' plus chaude.

- Finalement l'Académie des Sciences confia un audit à une équipe de statisticiens indépendants, Wegman et al. (2006) qui confirmèrent le non fondé de la courbe en croche de hockey MBH99, fer de lance du GIEC ;
- Ensuite Loehle (2007) établit la courbe de température pour cette période **SANS** les données dendrochronologiques (Figures 4 et 5):

L'OPTIMUM CLIMATIQUE MEDIEVAL : CE GRAND OUBLIE

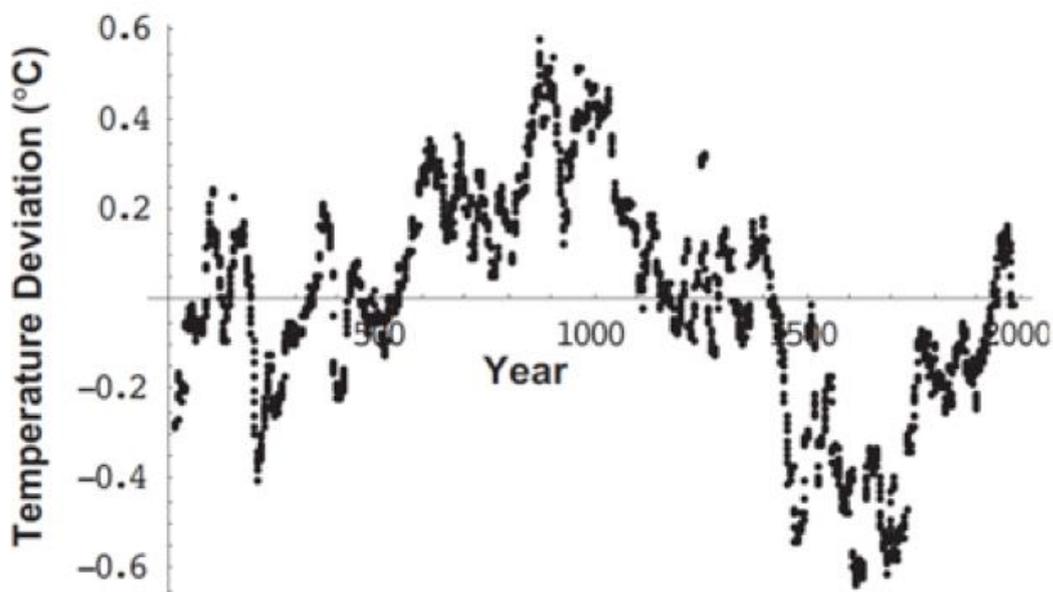
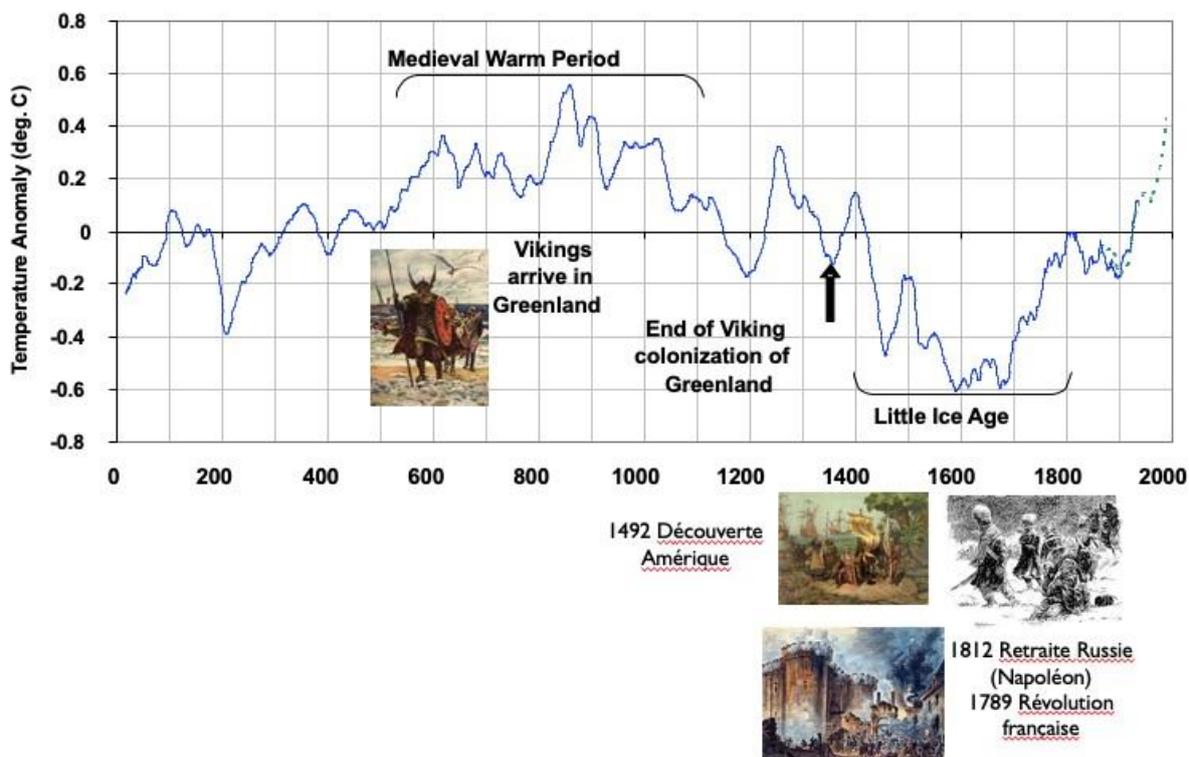


Figure 1. Mean of temperature data for 18 series.

Data archived at <http://www.ncasi.org/programs/areas/climate/LoehleE&E2007.csv>

Figure 4. Courbe d'évolution des températures établie **SANS** l'utilisation de la dendrochronologie (Loehle, 2007). L'Optimum Médiéval et le Petit Age Glaciaire sont bien caractérisés, ce qui n'était pas le cas avec la courbe en crosse de hockey (Mann et al. 1999). La 'température moyenne globale' est de 0,3°C supérieure à celle du 20<sup>ème</sup> siècle (Loehle 2007, sur base des compositions isotopiques de l'oxygène du forage GRIP, de séries marines -mer des Sargasses, Caraïbes...- et de stalagmites de grottes d'Afrique du Sud, de Chine, des rapports Mg/Ca de séries marines, des organismes planctoniques -diatomées-, des pollens de séries lacustres etc..).



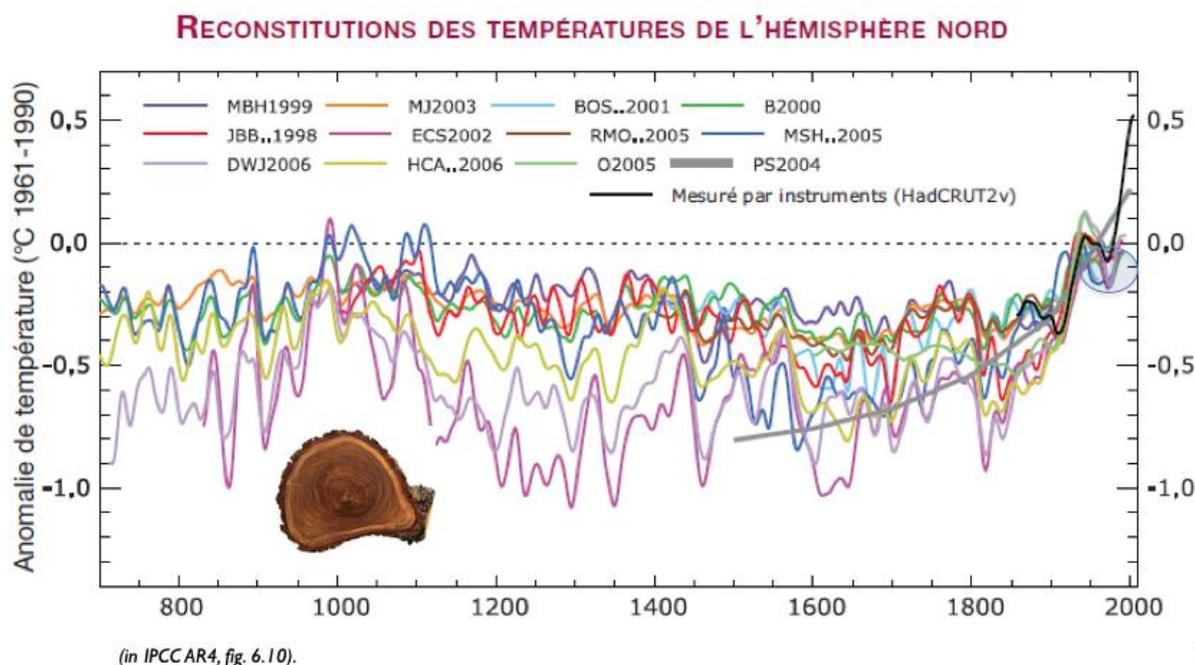
## L'OPTIMUM CLIMATIQUE MEDIEVAL : CE GRAND OUBLIE

Figure 5. Courbe d'évolution des températures établie **SANS** l'utilisation de la dendrochronologie montrant l'impact des variations naturelles des températures sur des événements particuliers de l'Histoire (Loehle, 2007), modifié avec ajout des photos, notamment présence des Vikings profitant du climat chaud de l'OCM et découverte de l'Amérique au cours d'une période tempérée du Petit Age Glaciaire.

Il est impossible de détailler cette saga, tant il y eut des conflits entre les acteurs concernés, allant jusqu'à la rétention des données par les auteurs de la courbe en crosse de hockey face aux demandes répétées de McIntyre qui souhaitait, en bon scientifique rigoureux, vérifier par lui-même la qualité de l'échantillonnage des données et leur traitement statistique. On trouvera le détail de ces épisodes dans de nombreux ouvrages, dont celui de Arezki (2010) qui conclut ainsi '**Car tout se passe comme si ces paléoclimatologues influents et reconnus cherchaient à tout prix à minorer voire à faire disparaître l'Optimum médiéval, en le cantonnant à l'Europe et en niant son caractère global, et à faire de l'évolution récente du climat, en l'occurrence des températures, un événement encore jamais vu depuis, avance-t-on parfois, dix millénaires**'. En 2003, E. Cook (Université Columbia New York) dit à peu près la même chose in Arezki (2010) '**Bien sûr les auteurs MBH ont une profonde aversion pour le concept d'Optimum médiéval et j'ai tendance à voir leurs évaluations comme émanant d'une perspective quelque peu biaisée**'. Notons que cette saga initiée il y a 20 ans se poursuit encore à l'heure actuelle, parfois devant les tribunaux.... ([ici](#) et [ici](#)).

**Finalement l'OCM est bien une réalité, contrairement à ce que laisse supposer la figure 2 et le GIEC ne peut plus s'en référer à une stabilité du climat suggérée dans la figure 2, avec in fine un réchauffement actuel sans précédent.**

Suite à cette controverse, le GIEC a fini par retirer sa figure de ses [rapports en 2007](#), mais le mal était fait et l'OCM ne fut plus trop mentionné. La courbe en crosse de hockey fut remplacée par les courbes en 'plat de spaghettis' (Figure 6), faisant l'impasse sur l'OCM et le PAG, en les occultant presque totalement. Tout ceci est peu crédible (voir également [ici](#) et [ici](#)) ... aussi concluons ce point avec [D'Aleo \(2011\)](#): '*Thus, the "hockey stick" concept of global climate change is now widely considered totally invalid and an embarrassment to the IPCC*'.



## L'OPTIMUM CLIMATIQUE MEDIEVAL : CE GRAND OUBLIE

Figure 6. On peut vaguement apercevoir dans ce fouillis (d'où le nom de spaghetti associé à ces ensembles de courbes) la période chaude du Moyen Age autour de l'an mil et le Petit Age Glaciaire des années 1500-1700. On constate aussi également la forte disparité des différentes reconstitutions (le plus souvent  $> 0.5^{\circ}\text{C}$  d'écart). Notons aussi que cette figure contient encore la reconstitution de Mann et al. 1999 (MBH99) et celle, revue et corrigée de Mann et Jones de 2003 (MJ2003).

### 5.5. L'OCM régional ou global ?

Un dernier (?) 'combat' (ou ultime? tentative) fut entamé par le GIEC afin de nier que l'OCM (et aussi le PAG) puisse être mondial, pour cet organisme l'événement OCM est régional (donc cela revient à minimiser l'événement) ce qui appuiera alors la thèse du réchauffement anthropique mondial à l'œuvre aujourd'hui, puisque le  $\text{CO}_2$  anthropique est émis globalement. Notons que le GIEC avait pressenti et craint cette faille (c'est-à-dire un OCM avec des températures élevées) comme l'ont montré les différents courriels révélés lors du fameux épisode du *Climategate* avec la célèbre phrase avec : 'We have to get rid of the Medieval Warm Period' ([ici](#) et [ici](#)). Ce point précis a d'ailleurs fait l'objet en 2012 d'un livre de A.W. Montford au titre révélateur '*Hiding The Decline*' et de nombreuses discussions (par exemple [ici](#)). Les études du Dr. Sebastian Lüning ([ici](#)) (et d'autres, cfr. Figure 7) ont ensuite montré que l'OCM revêt bien un caractère mondial ou global (l'hémisphère nord) et l'ensemble des données accumulées sont compilées et encodées sous forme de cartes Google interactives accessibles [ici](#) (Figure 7).



Figure 7. Carte ([interactive](#)) Google de la répartition des sites où l'événement OCM a pu être mis en évidence. Voir la carte interactive pour les localisations précises et les auteurs liés. Plus de 1200 références sont fournies dans ce site. Les sigles rouges = plus chaud, les jaunes = plus sec et les verts = plus humide).

Plus de 1200 publications ont ainsi vu le jour sur le sujet et confirment le caractère global de l'OCM ([ici](#)) documenté en Amérique du Sud, Nouvelle-Zélande ([ici](#)) , Congo, Gabon, Kenya, Namibie, Afrique du Sud ....([ici](#)) pour l'hémisphère sud y compris l'Antarctique dont les températures ont été

analysées à partir de 60 sites ([ici](#)). Le caractère global de l'OCM s'avère bien '*a mortal blow*' comme l'avaient pressenti les membres du GIEC ([ici](#)) et il n'est pas anodin de rapporter une conclusion de l'article de [P. Gosselin \(2019\)](#) '*Taken as a whole, for the alarmists the 1200+ papers are an extremely inconvenient body of facts and knowledge, so don't be surprised if efforts are made to make them disappear from the Google platform in the future*'. Notons également que Le Roy Ladurie (1967) avait également considéré l'OCM comme global, même s'il n'en a pas fourni une démonstration *sensu stricto*.

### 5.6. En a t'-on fini avec la saga de l'OCM ? ... hélas non !

Avant de terminer, il reste un point important à relever. Un groupe de chercheurs suisses, proche du GIEC conclut en 2019 ([ici](#)) : '*il a été montré que les périodes de chaud et de froid dans les 2000 dernières années n'étaient pas des phénomènes synchrones sur l'ensemble de la planète*' ([ici](#)). Ceci ne peut dans l'esprit des auteurs que renforcer le caractère exceptionnel du réchauffement actuel. Cette assertion est rapportée par [Pont \(2019\)](#). Le problème de la non-contemporanéité des phénomènes de réchauffement du passé (et même d'aujourd'hui !) avait déjà été envisagé par Le Roy Ladurie (1967). Mais s'agit-il d'un problème ? **Bien sûr que non, le climat étant avant tout local/régional il est tout à fait logique de s'attendre à des 'discontinuités temporelles' exprimant la non-synchronicité des phénomènes à l'échelle de la planète. Que faut-il alors considérer pour ne pas faire fausse route ?** Et bien, justement les échelles temporelles, et Le Roy Ladurie (1967) -encore lui !- avait montré que les cycles chauds/froids pluri-décadaux (et non synchrones) s'inscrivent dans de grands cycles chauds/froids pluriséculaires synchrones ou presque synchrones à l'échelle globale. Rappelons que l'étude de Le Roy Ladurie concerne principalement nos régions, au minimum l'hémisphère nord, et qu'aucun travail aussi détaillé n'existe pour l'hémisphère sud, sans parler de l'évolution climatique au niveau des océans qui représentent l'essentiel (71 %) de la surface de la planète. Finalement aucunes corrélations temporelles aux échelles régionales et globales n'ont pu être établies à partir des cycles en vue d'établir l'évolution de la température.

Il y a encore pas mal à faire en climatologie ('*climatology is not settled* ?) et heureusement quelques travaux vont dans ce sens, à savoir l'identification de cycles 'globaux' de haute fréquence ([Scafetta, 2019](#)). Retenons quand même le concept de périodes chaudes et froides de durées pluriséculaires synchrones ou presque synchrones probablement à l'échelle globale, ces périodes, par leur succession, expriment la variabilité naturelle du climat. Cette dernière est donc clairement exprimée *a minima* pour l'hémisphère nord. Pourquoi la nier envers et contre tout ?

**Notons que les écarts de température entre ces périodes pluriséculaires sont faibles (1°-1,5°C), nous en sommes à 0,7°-0,9° C en 120 ans ([Scafetta, 2019](#)), c'est-à-dire 0,07°C/décade ([Bjorklund, 2019](#)).**

Notons aussi que les problèmes de synchronismes et diachronismes sont courant à l'échelle géologique et constituent encore aujourd'hui un des problèmes majeurs pour l'interprétation de nombreux phénomènes, et particulièrement pour la compréhension des événements hyperthermiques du Précambrien et du Phanérozoïque.

### 5.7. Conclusion

Après cette longue discussion comparons les courbes entre elles et concluons comme dans l'article que j'ai consacré à Le Roy Ladurie ([ici](#)) en se demandant si les tenants de l'hypothèse de l'effet

de serre et ceux privilégiant les variations naturelles, parlent de la même chose. A l'évidence non (Figure 8):

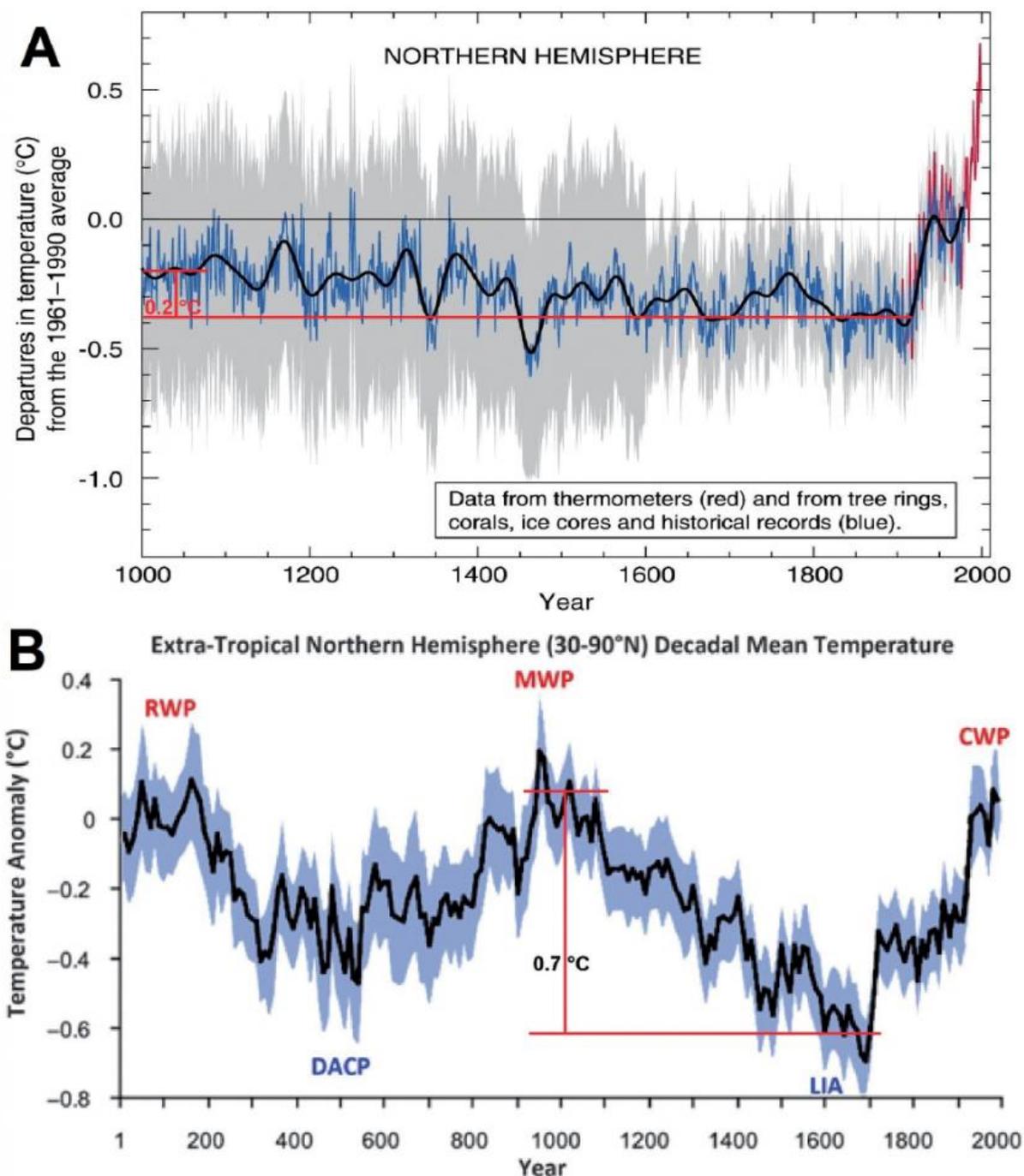


Fig. 8 - Comparison between [A] the Hockey Stick temperature reconstruction of the Northern Hemisphere showing a much smaller temperature change around 2000 (MANN et al., 1999) and [B] a recent temperature reconstruction of the Northern Hemisphere showing a much larger temperature change (LJUNGQVIST, 2010). Note the different amplitudes of the cooling (0.2°C versus 0.7°C) between the Medieval Warm Period (MWP) and the Little Ice Age (LIA)

Figure 8 (cfr. Figure 5 in Prétat, 2019). Capture d'écran de la Figure 8 de Scafetta (2019) : On the reliability of computer-based climate models. IJEGE, 19, 49-70. En comparant les deux courbes on peut se demander si l'on parle de la même chose ! (RWP Roman Warm Period, DACP Dark Age Cold Period ou période froide post-romaine, MWP Medieval Warm Period, LIA Little Ice Age, CWP Current Warm Period). Pour rappel la courbe A du haut, est la fameuse courbe en forme de crosse de hockey de Mann et al. 1998 du GIEC.

Comme quoi la comparaison de deux graphiques est à même d'illustrer la complexité de la climatologie qui reste une science fort jeune. **Il n'est déjà pas possible de s'accorder sur la description de la réalité (observation des cycles), alors que dire de l'interprétation des processus à leur origine et des modélisations ?** Il est cependant acquis que la courbe du haut (courbe A de Mann et al. 1999) n'est plus à prendre en considération, ayant même été retirée des rapports du GIEC. **Il est temps d'accorder toute sa place à l'événement OCM sans a priori.** De nombreux scientifiques s'y emploient, publient leurs résultats et hypothèses, mais à nouveau l'honnêteté commande à reconnaître que personne n'a (encore) l'explication de la 'cyclicité' des variations climatiques. Ces résultats et hypothèses n'ont pas été abordés dans cet article, qui s'est concentré à démontrer l'importance de l'OCM qui met à mal l'hypothèse de l'effet de serre du CO<sub>2</sub> dans la période du réchauffement actuel qui a débuté vers 1860, avec une fonte des glaciers pour ne mentionner qu'un des aspects les plus médiatiques.

Pour conclure, au risque de se répéter avec de nombreux articles parus à SCE, la climatologie est une discipline jeune et fort complexe, et l'ambition de la maîtriser si vite en modélisant ses paramètres (du moins en partie) ne peut qu'amener à une impasse. L'OCM en est un exemple parfait, et son traitement par le GIEC montre à quel point les manipulations de données traduisent ce qui apparaît comme un 'bricolage' ([ici](#)). Faut-il faire confiance aux modèles lorsque la barre d'erreur est 114 fois plus grande que l'augmentation de température inférée? ([ici](#)). De plus ces modèles sont incapables de restituer les courbes du passé. Pourquoi? Voyons-ci dessous une explication à partir d'un article récent de SCE, mentionné dans l'introduction ([ici](#)).

Les séries temporelles de température et proxies sont cycliques, asynchrones et non parfaitement périodiques: elles présentent une modulation d'amplitude, de phase et de fréquence, qui si elles sont considérées sur quelques années (cfr. les années récentes?) peuvent être prises pour des tendances catastrophiques, alors qu'il s'agit simplement d'une signature chaotique des signaux. Ces séries doivent être analysées à partir d'une d'une approche « big data » portant sur les mesures locales et instantanées, plutôt que de les examiner à partir d'une anomalie moyenne globale de température, car les algorithmes de consolidation spatio-temporelle induisent des erreurs algorithmiques considérables avec ce type de signaux non parfaitement périodiques.

**Ecarter d'emblée les variations naturelles dans l'évolution du climat n'était, et n'est pas une bonne solution...**

pour finir... **Le dernier rapport du GIEC**

Le dernier rapport du [GIEC](#) s'est intéressé à l'événement chaud du Miocène Moyen (MPWP, mid-Pliocene Warm Period ou MPTO, Mid-Pliocene Thermal Optimum) il y a environ 3,3 à 3,0 millions d'années et rapporte des concentrations en CO<sub>2</sub> comprises entre 300 et 450 ppmv (section SM4.1 du rapport, page 718) '*similar to or slightly lower than current levels ... and global mean temperature was 2°C–4°C warmer than preindustrial*'. Ainsi le GIEC reconnaît/accepte **sans le mentionner clairement** que 'la température moyenne globale' du MPWP était plus élevée que celle d'aujourd'hui, puisque cette dernière est moins de 1°C supérieure à la température pré-industrielle : les palmiers poussaient en effet en Bretagne et aux Pays-Bas et des Carcharodons (super requin blanc) hantait le Golfe du Morbihan ([ici](#) et [ici](#)). **Autrement dit il faisait plus chaud d'au minimum un degré à quelques degrés (au moins 3°C ou un peu plus) au MPWP avec des teneurs en CO<sub>2</sub> légèrement inférieures à l'actuelle.** Pour les tenants de l'hypothèse de l'effet de serre, cela devrait fortement les pousser à revoir leurs hypothèses de base. Il semblerait en effet qu'une température moyenne au moins égale à celle d'aujourd'hui, voire plus élevée, ait existé dans un passé « proche » sans que l'être

## L'OPTIMUM CLIMATIQUE MEDIEVAL : CE GRAND OUBLIE

humain n'en soit la cause, alors qu'il était présent en petit nombre et sans technologie digne de l'actuelle (avec impact plus que limité -ou quasi nul- en terme d'émissions de CO<sub>2</sub> ...).

Le MPWP n'est qu'un des nombreux événements chauds ou hyperthermiques de l'histoire géologique. A nouveau la science climatologique n'est pas dite, et il est grand temps de s'occuper sérieusement des processus naturels.

### Notes

*La plupart des références sont mentionnées dans le texte sous forme de liens web.*

Areski, H. 2010. Climat, mensonges et propagande. Thierry Souccar Editions, 320p.

Briffa, R. 1999. Annual climate variability in the Holocene : interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Review*, 19, 87-105.

Cronin, T.M. 2010. Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press, New York, 441p.

Deconinck, J.F. 2009. Paléoclimats. L'enregistrement des variations climatiques. Vuibert, Société Météorologique de France, 198p.

Le Roy Ladurie, E. 1967. Histoire du climat depuis l'an mil. Flammarion, 366p.

Loehle, C. 2007. A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree proxies. *Geophysical Research Letters*, 18(7-8), 1049-1058.

Mann, M.E., Jones, P. 2003. Global surface temperatures over the past to millenia. *Geophysical Research Letters* 30(15), 1820, 5-1/5-3, doi: 10.1029/2003GLO017814,2

McIntyre, S., McKittrick, R. 2003. Corrections to the Mann et al. (1995) proxy data base and Northern Hemisphere average temperature series. *Energy and Environment*, 14, 751-771.

McIntyre, S., McKittrick, R. 2005. Hockey sticks, principal components and spurious significance. *Geophysical Research Letters*, 32, doi:10.1029/2004GLO21750.

McKittrick, R., Ross, R. 2010. Atmospheric oscillation do not explain the temperature-industrialization correlation. *Statistics, Politics and Policy*, 1(1) in Meynard F., 2011, La légende de l'effet de serre.

Rittaud, B. 2010. Le mythe climatique. *Science Ouverte Seuil*, 204p.

Sarkar, A., De Ridder, K. 2011. The urban heat island intensity of Paris. A case study based on a simple urban surface parametrization. *Meteorology*; 138, 511-520.

Van Vliet-Lanoë, B., Goslin, J., Hallégouët, B. et al. 2014. Middle- to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part I- morphological impact and stratigraphical record. *The Holocene*, <https://doi.org/10.1177/0959683613519687>

Wegman, E., Scott, D., Said, Y. 2006. Ad hoc committee report on the 'hockey stick' global climate reconstruction. House Energy and Commerce Committee Republican (July 14), 91p.

## 6 Que nous apprend l'Optimum Climatique Romain ?

Mis en ligne SCE : 04.09.2020

### 6.1. Introduction

SCE a plusieurs fois rapporté que la période actuelle de réchauffement n'est pas exceptionnelle, qu'elle fait partie de cycles décennaux à pluriséculaires de refroidissement et réchauffement qui ont lieu dans des fourchettes de température fort modestes, de l'ordre de 0,15°C par 10 ans. SCE a aussi montré que le CO<sub>2</sub> tant incriminé dans ces changements, et surtout l'actuel, n'avait pas de raison d'être, ce gaz venant après l'augmentation de température. **Le 'bouton CO<sub>2</sub>' à même d'expliquer ou de 'justifier' le battage médiatique quasi-quotidien est donc à 'la remorque' de la température et, l'hypothèse de l'effet de serre reste avant tout une hypothèse (exemple [ici](#)).**

Enfin SCE a souvent rappelé ([ici](#) et [ici](#)) que la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> n'a jamais été aussi basse dans l'histoire géologique de notre planète, qui a connu la plupart du temps des concentrations jusqu'à 25 fois supérieures au cours du Phanérozoïque (à partir du Cambrien, il y a 541 millions d'années), et même encore bien plus élevées au cours du Précambrien. Nous partons de ce dernier point, puisque les médias et scientifiques sont toujours à nous rappeler, de manière assez dramatique, que la teneur actuelle est plus élevée que celle des 'derniers' millions d'années (articles médiatiques presque quotidiens, exemple [ici](#) parmi une pléthore d'articles). Est-ce bien le cas? et si oui –*et toujours pour ces 'derniers' millions d'années*– quid de la température ?

A nouveau (cf. plusieurs articles SCE), rappelons qu'une 'température moyenne globale' (TMG) n'a pas de sens physique ([ici](#)), cela n'empêche pas la communauté scientifique de valider ce paramètre, et force est de constater que ce paramètre est presque toujours utilisé dans la littérature pour les différentes périodes de changements climatiques. **Cet article tente de répondre à une question simple : Y a-t'il eu dans la période historique des "TMG' plus élevées que celle d'aujourd'hui et quid du CO<sub>2</sub>? Si oui, il est évident que cela pose ou posera un problème, puisque quelle que soit la concentration du CO<sub>2</sub>, et pour autant que ce gaz ait eu un rôle, il ne pourra s'agir de CO<sub>2</sub> anthropique.**

Comme rappelé ci-dessus, SCE a analysé en détail plusieurs périodes géologiques et historiques caractérisées par des changements climatiques abrupts ([ici](#) et [ici](#)) ou non ([ici](#) et [ici](#)). Ces périodes de réchauffement de la planète sont assez nombreuses et connues sous le nom d'Optimas Climatiques (exemples : **Optimum du Paléocène/Eocène, Optimum du Miocène moyen, Optimum du Pliocène moyen, Optimum de l'Holocène, Optimum Minoéen, Optimum Romain, Optimum Médiéval, Optimum Actuel** (par exemple *in* Cronin, 2010 [1] ; Bender, 2013 [2] et [ici](#), 2020) pour n'en citer que quelques-uns depuis l'Ere Cénozoïque. Nous allons nous concentrer sur l'Optimum Climatique Romain afin de montrer que la situation actuelle n'est pas atypique et fait partie de la succession de cycles climatiques qui interviennent en réponse à un 'télescopage' de processus naturels 'infinis', dont l'importance de certains restent à découvrir. Ces Optimas sont entrecoupés de périodes de refroidissements plus ou moins prononcés de durées inégales (par exemple les refroidissements à la transition Eocène/Oligocène, ou à la fin du Pliocène (au cours du Piacenzien). Notons qu'au cours du réchauffement de l'interglaciaire du Piacenzien moyen (il y a 3,2 millions d'années), la teneur

atmosphérique en CO<sub>2</sub> était comprise entre 331 ppm et 389 ppm ([de la Vega et al., 2020](#)), donc plus élevée que notre période dite 'pré-industrielle' (ce qui répond déjà à une des questions posées ci-dessus).

Mais avant d'analyser ces périodes, une précision s'impose concernant les différentes manières de 'compter' le temps par rapport à aujourd'hui c'est-à-dire sur le mode de fonctionnement de la chronologie récente, mode assez confus car basé sur des conventions suivies différemment par les chercheurs. Ce point est un vrai casse-tête pour ceux qui s'occupent des périodes récentes. On mentionne en effet souvent le temps passé avec les initiales 'BP', exemple 25 000 ans **BP** (= [Before Present](#)). BP, c'est-à-dire avant le présent, et l'année considérée comme le présent est fixée à l'année 1950 de notre calendrier. Cette année fut choisie comme année de référence, car elle est antérieure aux essais nucléaires qui ont perturbé la répartition d'isotopes utilisés en [radiochronologie](#). Cela n'est pas gênant pour les périodes lointaines mais pose des problèmes pour l'étude des périodes récentes pour lesquelles il est nécessaire de fixer plus précisément une origine des temps. Les anglophones, en particulier, utilisent **AD** (= [Anno Domini](#)) » pour caractériser les années postérieures à la naissance de Jésus-Christ dans le calendrier julien puis grégorien. AD donne en français : 'après J.-C'. Ces mêmes anglophones utilisent également BC pour (*Before Christ*) pour les années 'avant Jésus-Christ' (= *avant J.-C* pour les francophones).

D'autres conventions existent, mais elles sont moins employées. Finalement l'« année du Seigneur » décrétée 'an 1' inaugure l'ère chrétienne, également appelée 'ère commune' ou 'ère conventionnelle', elle est abrégée en 'EC' (francophone) ou 'CE' (anglophone). Pour les années précédant celles de l'ère commune, les anglophones utilisent BCE (Before Commune Era ou Before Christian Era). **BCE/CE** sont de plus en plus utilisés dans la communauté internationale, scientifique ou non.

## 6.2. L'Optimum Climatique Romain

### 6.2.1. Cadre général

Voyons l'Optimum Climatique Romain (OCR), s'étendant d'environ 250 ans avant J.-C à 400 après J.-C, c'est-à-dire au cours d'une période assez proche de la nôtre. C'est au cours de cet Optimum qu'[Hannibal](#) traversa (en 218 av. J.-C) les Alpes avec ses éléphants, situation impensable aujourd'hui. Cet OCR connu depuis assez longtemps (au moins depuis 1999 avec la première mention dans un article de [Nature](#)) est resté assez discret dans la littérature, cette dernière se portant plus volontiers sur l'Optimum Climatique Médiéval (autour de l'an mil), plus proche de nous. **Pourtant de nombreux articles suggèrent que l'OCR est l'Optimum le plus chaud de la période récente, du moins pour les deux ou trois derniers millénaires.** Un article récent de Margaritelli et al. (2020), en Open Access, publié dans [Nature](#) vient de montrer que c'est bien le cas, à savoir que l'OCR fut la période la plus chaude de ses 2000 dernières années (de plus 2°C, en moyenne par rapport à aujourd'hui dans la région étudiée de la Sicile et de la Méditerranée occidentale) et que l'augmentation de température fut principalement le fait de l'activité solaire ([Margaritelli et al., 2016](#)).

### 6.2.2. L'étude de Margaritelli et al. 2020

Cet article factuel ne prend pas en considération le CO<sub>2</sub> et ne conclut pas à une 'TMG' valable à l'échelle de la planète, faute de données suffisantes (à cette échelle). Ce point particulier n'est pas spécifiquement abordé dans l'étude et reste donc en suspens, même si l'article suggère que la 'TMG'

## QUE NOUS APPREND L'OPTIMUM CLIMATIQUE ROMAIN ?

de l'Optimum Climatique Romain portait au moins sur l'ensemble de l'hémisphère Nord et est liée à des processus naturels (activité solaire et NAO ou [Oscillation Nord-Atlantique, Margaritelli et al., 2016](#)).

L'étude porte sur la mer Méditerranée, à partir du Canal/Détroit de Sicile, qui forme un seuil (d'environ 500 m de profondeur), c'est-à-dire une barrière physique dans le bassin de la Méditerranée orientale, ce qui exerce un contrôle majeur sur les processus biogéochimiques dans le bassin. Les températures des eaux de surface ([SST](#)) sont déduites de l'étude (géo)chimique du zooplancton ([foraminifères](#)) dans les eaux du Déroit de Sicile. Les températures sont calibrées temporellement (datations isotopiques par le  $^{10}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{14}\text{C}$ ) et comparées à celles déjà publiées dans la mer d'Alboran, dans le bassin de Minorque et dans la mer Egée, soit sur une distance Ouest-Est de plus de 2000 kilomètres.

Ces comparaisons montrent un réchauffement conséquent, *a minima* à l'échelle régionale de l'ensemble de la Méditerranée lors de l'OCR. Ensuite la région subira un refroidissement entrecoupé de quelques oscillations de faibles amplitudes.

Les auteurs ont porté leur attention sur la mer Méditerranée car la région est fort sensible aux changements climatiques passés et actuels, étant située entre l'Afrique du Nord et les climats européens, soit de la zone aride de l'anticyclone subtropical aux flux d'air humides du nord-ouest. Plusieurs sites marins avaient déjà fait l'objet d'études et montré une variabilité climatique à court terme à l'échelle régionale durant le dernier millénaire [3,4] sans qu'un schéma général ne se dégage, faute de résolution temporelle suffisante. Selon [Margaretelli et al. \(2020\)](#) la variabilité climatique au cours de l'OCR n'a pu être mise en évidence au cours de ces études, les proxies (= 'indicateurs') utilisés et le manque de résolution temporelle ne permettant pas d'interprétation en terme de saisonnalité et/ou de processus locaux. **Les auteurs vont ainsi établir une nouvelle courbe d'évolution de la température des eaux de surface (SST) de la partie centrale de la mer Méditerranée, à partir d'un site de forage déjà connu (SW104-ND11) dans la partie nord-ouest du Déroit de Sicile (ici) en mesurant le rapport Mg/Ca sur les tests (ou 'coquilles') carbonatés du foraminifère planctonique *Globigerinoides ruber* pour les 5000 derniers mille ans BP, avec une attention particulière pour la période de l'OCR. La température des eaux de surface (1-15 m) varie de 22,0°C à 23,0°C en cet endroit de l'étude en juillet 2014.**

### 6.2.3. Les résultats

Les estimations de la SST déduites à partir des rapports Mg/Ca de *Globigerinoides ruber* vont de 16,4 °C ± 1,5 °C à 22,7 °C ± 1,5 °C avec une valeur moyenne de 19,5 °C ± 1,5 °C (Fig. 1) et un réchauffement progressif de 6,3 °C ± 2,0 °C de 3300 [BCE](#), à la base de la séquence étudiée, à 330 [CE](#), lors de la période romaine moyenne durant laquelle les maxima de la SST sont atteints (Fig. 1).

## QUE NOUS APPREND L'OPTIMUM CLIMATIQUE ROMAIN ?

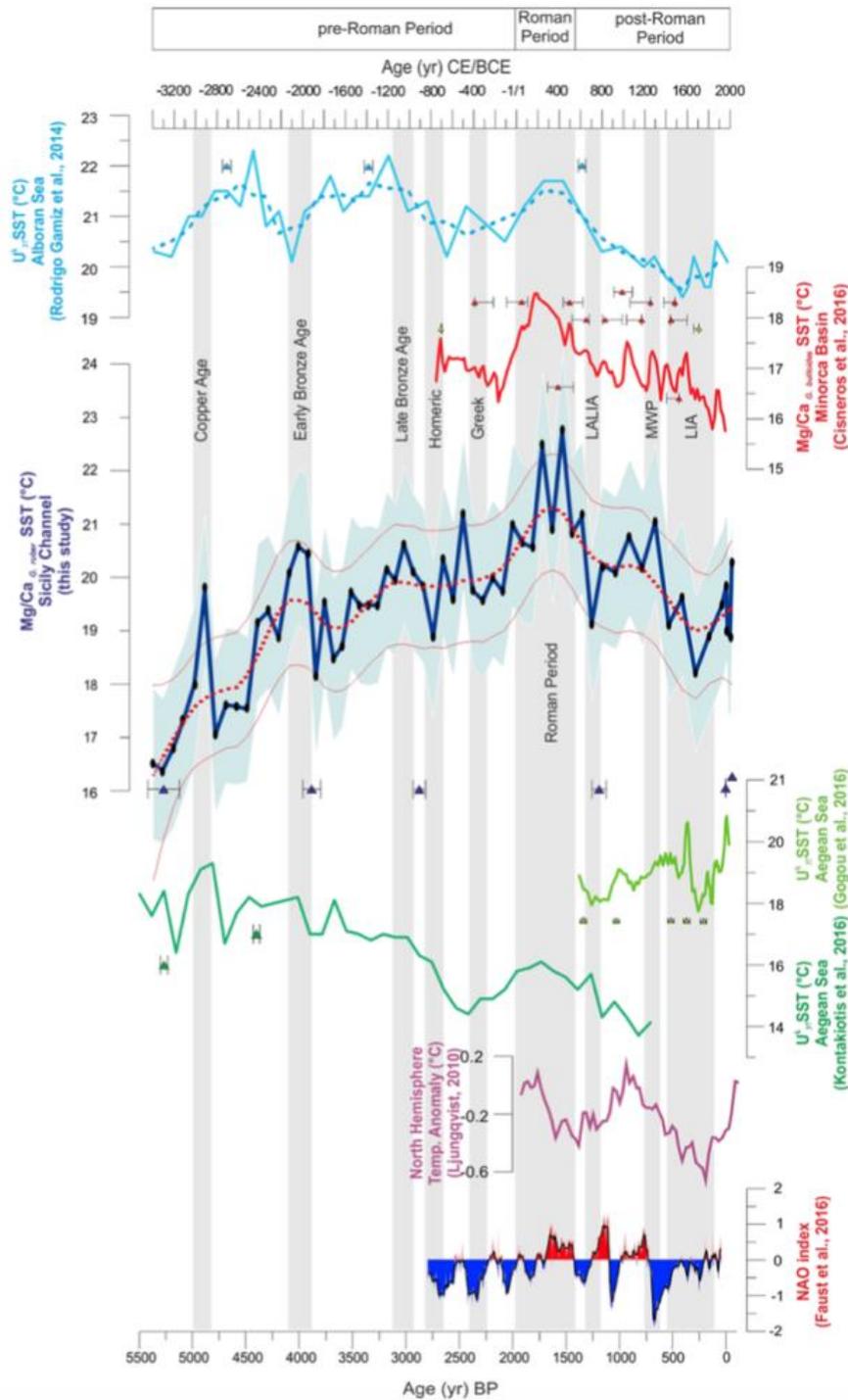


Figure 1. Comparaison temporelle des températures de surface de l'eau de mer (SST) du Déroit de Sicile (Mg/Ca G. ruber core SW104-ND11), de la mer d'Alboran, du bassin de Minorque, de la mer Égée, avec reconstitution de la température de l'hémisphère Nord et l'indice d'Oscillation Nord Atlantique (NAO). La ligne bleu clair (en haut) en pointillé, superposée aux données brutes de SST, concernant la mer d'Alboran, est une moyenne mobile de 3 points, la ligne rouge en pointillé du relevé du Déroit de Sicile représente la courbe lissée de l'IC - intervalle de confiance - à 95% (simulation de Monte Carlo) et les fines lignes rouges sont les réalisations ajustées des données de 2,5% et 97,5% de l'IC de 10000 LOESS. Les points noirs sur l'enregistrement du Déroit de Sicile (courbe bleue) représentent les données analysées et l'ombre bleu clair est l'erreur de propagation. Les bandes grises rapportent les principaux événements climatiques documentés dans le bassin méditerranéen. Les points de datation avec les barres d'erreur figurent pour presque tous les enregistrements de la SST. Abréviations : LALIA = Petit Age Glaciaire de la fin de l'Antiquité, MWP = l'Optimum Climatique Médiéval, LIA = Petit Age Glaciaire. D'après Margaritelli et al. (2020). Cette tendance au réchauffement à long terme est ponctuée de plusieurs oscillations à court terme d'amplitude et de durée différentes (Fig. 1). De la période romaine à 1700 CE, la SST montre une tendance au refroidissement de  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'enregistrement de la SST montre une légère tendance au réchauffement entre 1700 et 2014 CE.

## QUE NOUS APPREND L'OPTIMUM CLIMATIQUE ROMAIN ?

Ce résultat est ensuite comparé à d'autres valeurs de la SST déjà publiées pour la mer Méditerranée, établies soit par l'analyse des rapports Mg/Ca d'un autre foraminifère planctonique, *G. bulloides* à partir de 5 forages dans les îles Baléares, par l'analyse des alcénones dans deux sites de la mer Egée (U<sup>K</sup><sub>37</sub>, Fig. 1 et [Grauel et al., 2013](#)), et d'autres températures connues de l'hémisphère Nord ([Ljungqvist, 2010](#)) en relation avec l'indice NAO ([Faust et al., 2016](#)).

Bien que des biais soient présents dans les estimations des SST à partir de proxies différents, chaque fois particuliers à une zone d'étude (ici une séquence 'géologique' provenant de plusieurs forages), les auteurs comparent ensuite l'évolution des SST en Mer Egée, Mer d'Alboran, bassin de Minorque et au large de la Sicile. **Ils montrent que le trait marquant et commun sur plus de 2000 ans est le maximum de la SST durant l'OCR (de 1 à 500 CE, c'est-à-dire de 1 à 500 ans de notre ère, Fig. 2).**

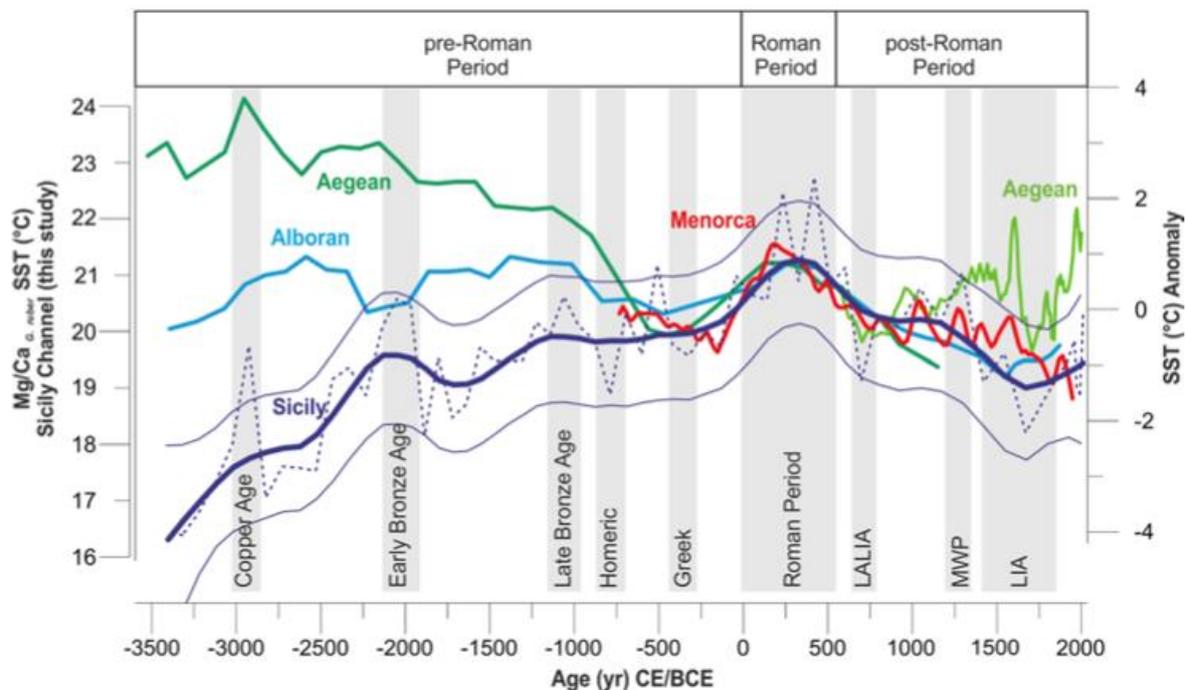


Figure 2. Comparaison des SST du Déroit de Sicile (ligne épaisse bleu foncé) de la mer d'Alboran (ligne épaisse bleu clair), du bassin de Minorque (ligne épaisse rouge) et de la mer Egée (lignes épaisses vert foncé et vert clair) exprimées en anomalies SST par rapport à la période de référence de 750 BCE (avant J.-C.) à 1250 CE (après J.-C.). Les données brutes de la SST du Déroit de Sicile sont superposées à la courbe lissée de l'IC -intervalle de confiance- à 95 % calculée comme le quantile de 2,5 % (ligne fine bleu foncé) et de 97,5 % (ligne fine bleu foncé) des 10 000 valeurs lissées. L'échelle graduée de la SST (°C) ne se réfère qu'aux données brutes de la SST du Déroit de Sicile. Les SST des mers d'Alboran, Minorque et Egée sont représentées par une moyenne mobile de 3 points. Les bandes grises indiquent les principaux événements climatiques documentés dans le bassin méditerranéen. Abréviations : LALIA = Petit Age Glaciaire de la fin de l'Antiquité, MWP = l'Optimum Climatique Médiéval, LIA = Petit Age Glaciaire. D'après [Margaritelli et al. \(2020\)](#).

**La courbe d'évolution de la SST montre que différentes situations régionales existaient dans la mer Méditerranée avant l'avènement de l'OCR.** Cela concerne donc la période pré-OCR avec un refroidissement général en Mer Egée, un réchauffement dans le Déroit de Sicile et des conditions stables en Mer d'Alboran (Fig. 2). Le Déroit de Sicile est affecté de plusieurs périodes de réchauffement (cf. 'Age ou période' du Cuivre, du Bronze, ... Fig. 2) et certaines sont à mettre en relation avec une aridification progressive rapportée dans le nord de l'Égypte (également mise en évidence par une nette diminution des pollens en Méditerranée centrale). Les conséquences dans les pratiques agricoles et l'effondrement des premières grandes civilisations sont énormes (non discutées ici) et traitées en détail par les archéologues. Mentionnons cependant, qu'à l'inverse, lors de la

## QUE NOUS APPREND L'OPTIMUM CLIMATIQUE ROMAIN ?

transition de l'Age du Bronze à l'Age du Fer, vers 800 BCE (soit lors de la 'période Homeric', Fig. 2) a lieu un refroidissement de court terme associé à un 'grand minimum solaire'. Durant cet intervalle les valeurs de l'indice NAO étaient négatives (Fig. 1) et l'agriculture fut en expansion en Méditerranée orientale.

**La période pré-OCR** (500 BCE à 200 BCE) était donc globalement plus froide malgré des oscillations, et correspond au début de la phase dite 'sub-Atlantique' ([Zolitschka et al., 2003](#) ; [Kotthoff et al., 2017](#)) avec un climat pluvieux, froid et humide qui a perduré jusqu'à environ 100 BCE. L'avance des glaciers est bien documentée pour cette période.

**La période post-OCR** est caractérisée par un refroidissement progressif de  $4,5^{\circ}\text{C} \pm 2,1^{\circ}\text{C}$  et se termine avec le Petit Age Glaciaire ([LIA](#)) (Fig. 1). La période est entrecoupée de deux brefs intervalles avec refroidissement important, à savoir le 'Petit Age Glaciaire de la fin de l'Antiquité ou '[LALIA](#)' de 650 à 700 CE et le LIA, et d'au moins une période de réchauffement important, représentée par l'Optimum Climatique Médiéval ([MWP](#)) autour de 1300 CE ([ici](#)), également reconnu en Méditerranée. Deux autres périodes de réchauffement (et refroidissement) moins important sont également observés sur la courbe SST de la figure 1, mais ne sont pas nommées vu leur moindre importance. Elles encadrent l'Optimum Climatique Médiéval (MWP). L'épisode LIA, popularisé dans les tableaux de Breughel l'Ancien exposés à Bruxelles, et ceux de la Tamise gelée exposés au Muséum de Londres ) s'étend de 1300 CE à environ 1700 CE et enregistre un refroidissement de  $2,1^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  (par exemple de  $1,5-1,0^{\circ}\text{C}$  in [Zharkova, 2020](#)). Il a affecté l'ensemble de la Méditerranée. Depuis environ 1700 CE la SST du Détroit de Sicile a augmenté malgré un court refroidissement en 1980 CE.

### 6.3. Discussion

L'OCR est une période de réchauffement importante, régionale et polyphasée entre 1 CE et 500 CE. Les auteurs de l'article (dé)montrent que ces conditions chaudes sont indépendantes des proxies considérés. **L'Optimum Climatique Romain est une réalité, même s'il est souvent ignoré des médias et de nombreux scientifiques climatologues. Les proxies considérés permettent d'établir que les conditions chaudes de l'OCR avaient cours toute l'année en Méditerranée, et n'étaient donc pas uniquement saisonnières.** Des différences de plusieurs degrés existaient néanmoins à l'échelle régionale avec des SST de  $19,6 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  à  $22,7 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  dans le Détroit de Sicile, de  $16,6$  à  $18,5^{\circ}\text{C}$  dans le bassin de Minorque, et  $14,4$  à  $16,1^{\circ}\text{C}$  dans les mers Egée et d'Alboran. **Ainsi à l'échelle régionale la température était-elle plus élevée de quelques degrés dans la partie centrale de la Méditerranée par rapport à ses bassins occidentaux et orientaux.** L'intervalle temporel le plus chaud (de l'OCR) se situe entre 240 CE et 420 CE et correspond également à la phase la plus chaude mise en évidence dans l'hémisphère Nord ([Liungqvist, 2010](#)). **Les disparités régionales des SST mentionnées ci-dessus montrent que l'évolution des températures n'est pas synchrone au cours de cet épisode globalement stable et chaud.** Les conséquences politiques et agricoles sont multiples et discutées dans l'article de Margaretelli et al. (2020).

Un autre paramètre semble associé aux fluctuations climatiques, il s'agit de l'indice NAO, ou Oscillation Nord Atlantique, basé sur une **différence de pression atmosphérique**, mesurée à la surface de l'eau de mer, entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande ([Hurrell et al., 2005](#), et partie 2.2 ici dans [SCE](#)). Cet indice a fluctué de valeurs négatives à positives durant l'OCR (Fig. 1) suggérant un transfert des zones de précipitations ou des pluies vers l'Europe Centrale et l'Europe du Nord. L'Europe du Sud et l'Afrique du Nord connaissent alors des conditions plus sèches pénalisant leur développement économique (agriculture).

#### 6.4. Alternatives ?

L'OCR ayant fait l'objet d'assez peu d'études, un manque de données par rapport aux MWP et LIA est évident. Néanmoins quelques auteurs ont tenté d'apporter une contribution à cet Optimum. Pour [Gilgen et al. \(2019\)](#), dans une étude très fouillée sur l'activité 'industrielle' des romains, ce seraient les aérosols anthropiques liés au brûlage de terre agricoles, c'est-à-dire à l'utilisation des sols (se reporter à [Goodchild, 2007](#) pour leur contexte géologique), qui sont responsables du réchauffement surtout vers 100 CE. Cette conclusion est basée sur un modèle utilisant des simulations avec des températures fixes à la surface de la mer (ce qui nous l'avons vu n'était pas le cas). L'étude de Gilgen et al. (2019) n'est d'ailleurs pas totalement claire sur le rôle exact des aérosols et leur conclusion est ambiguë, puisque ces auteurs écrivent (p.1906) : *'While our results imply that anthropogenic land cover change may have regionally contributed to this warming, aerosol–cloud interactions would have attenuated it, suggesting other causes of the Roman Warm Period, e.g. ocean dynamics or solar forcing. Our scenarios show that pasture burning could have been an important source of aerosol particles. A better understanding of the processes that drive the frequency, seasonality, and emissions of pasture burning could therefore be essential to quantify the anthropogenic impact far back in time'*.

#### 6.5. Que conclure ?

L'OCR montre que les changements climatiques sont la règle confirmant plusieurs articles rapportés par SCE à la fois aux échelles géologiques et historiques. **Lorsque la résolution temporelle est bonne, on constate que les changements climatiques sont souvent rapides, de l'échelle pluriséculaire à l'échelle de plusieurs dizaines d'années, et qu'ils ne sont pas synchrones, même à une échelle régionale (le millier de km).** Ce dernier point confirme le non-sens de la notion de 'température moyenne globale' pour la planète, la température est bien, [une grandeur intensive](#) (également [ici](#)) comme le suggère les données de l'OCR, notamment par l'asynchronicité des changements climatiques. Les changements sont rapides, parfois même beaucoup plus rapides que ceux de la période récente de 0,8°C sur 150 ans ([ici](#) et voir [ici](#) pour une discussion de la 'TMG' récente). **La courbe d'évolution de la SST durant l'OCR montre deux fluctuations de 2°C sur chaque fois 100 ans, et même au-delà de 2°C pour la période de l'Age du Cuivre** (Fig. 1). Cette courbe établie sur un peu plus de 5000 ans, montre surtout que les fluctuations de la SST sont la règle à échelle séculaire à pluriséculaire. **Visiblement les fluctuations de l'OCR et de la période pré-OCR semblent plus importantes que celles qui ont suivi (MWP, LIA, et Aujourd'hui), ces dernières montrant des fluctuations d'à peine 1 °C à 1,5°C à l'échelle pluriséculaire.**

Au vu des marges d'incertitudes sur les proxies utilisés par Margartitelli et al. (2020), on ne doit pas conclure trop rapidement et on peut proposer *a minima* que le climat a varié dans des fourchettes de température de même ordre de grandeur tout au long des derniers 5000 ans, sans qu'une période excessive de réchauffement fort brutale ait eu lieu. Ce ne fut pas le cas, par exemple au Pléistocène ([ici](#)) ou à la transition Paléocène/Eocène ([ici](#)) avec des augmentations de températures de 10°C et plus en quelques dizaines d'années (50 ans).

Enfin il n'est jamais question de CO<sub>2</sub>, encore moins de CO<sub>2</sub> anthropique, dans les fluctuations de ces cinq derniers mille ans, et il semble il n'y ait pas d'autre alternative que d'envisager l'unique contribution de cycles naturels, pilotés comme suggéré par les auteurs de l'article par l'activité solaire

## QUE NOUS APPREND L'OPTIMUM CLIMATIQUE ROMAIN ?

agissant directement ou non sur les cycles océanographiques, dont ici ceux de la NAO qui épousent les variations de température de la courbe enveloppe des 5000 ans étudiés, avec un réchauffement global jusqu'à l'OCR suivi d'un refroidissement jusqu'à presque aujourd'hui. **L'OCR est au sommet de ce réchauffement, mais il est précédé d'épisodes de réchauffements plus importants (Age du Cuivre, début de l'Age du Bronze).**

A considérer ces fluctuations et celles, également nombreuses, liées aux événements hyperthermiques à l'échelle géologique, il faut rester raisonnable dans les interprétations, pour cela évitons sans cesse de parler de 'température moyenne globale' ou 'TMG', **portons notre attention sur les systèmes régionaux, voire locaux, dont l'évolution est à même d'expliquer l'asynchronisme des paramètres climatiques.** L'hémisphère sud enregistre, aujourd'hui, une tendance à la diminution de la 'température moyenne' depuis les cinq derniers mois ([Géoclimat, 2020](#)), ce qui se marque par des vagues de froid particulièrement intenses, notamment en Amérique du Sud et en Australie (cf. par exemple les [kangourous](#) récemment pris dans le froid et la neige, et ayant fait la 'Une' des médias). Cet asynchronisme n'est jamais abordé dans les médias et à peine dans la littérature scientifique. Il peut aussi 'se déduire' de diverses reconstitutions climatiques portant sur les derniers millénaires, qui montrent effectivement des différences entre des régions, comme en Chine depuis 2000 ans ([Ge et al. 2013](#)).

**Cet asynchronisme peu discuté est lourd de conséquence, puisqu'il met à mal la notion d'une 'température moyenne globale', et à vouloir aller trop vite n'a-t-on pas mis la charrue avant les bœufs... et fait fausse route ?** Ici même on touche au paradoxe le plus inattendu, puisque certains auteurs ([Neukom et al., 2019](#)) n'hésitent pas à utiliser cet argument de l'asynchronisme pour valider la thèse actuelle du réchauffement actuel (relativisons quand même, = 07-0,9°C en 120 ou 150 ans) global, donc synchrone (= toute la planète) et lié au CO<sub>2</sub> anthropique. Autrement dit, suivant ces auteurs, 'il n'y a pas de preuve pour des périodes de chaud et de froid globalement cohérente pour l'ère chrétienne' (**sauf bien entendu aujourd'hui!**). La thèse de ces auteurs est démontée par [Pont \(2019\)](#). Il est affligeant de voir cette sorte d'aveuglement dans le rejet des processus naturels en climatologie, car après avoir tenté de se débarrasser de l'Optimum Climatique Médiéval (rappel : 'We have to get rid of the Medieval Period', discussion [ici](#)), on se débarrasse (en tout cas on essaie) tout simplement de toute forme de réchauffement ou refroidissement conséquent dans le passé à l'échelle de la planète.

Oui la charrue est bien mise avant les bœufs car le problème du synchronisme ou non est bien réel, mais ne pourra à lui seul résoudre la question car comme mentionné ci-dessus la température est effectivement une grandeur intensive. Revenons à la fameuse phrase de Neukom et al. (2019) 'il n'y a pas de preuve pour des périodes de chaud et de froid globalement cohérente pour l'ère chrétienne'. **Quid des fortes variations de températures au cours des 25 cycles glaciaires de la fin du Pliocène et du Pléistocène ([ici](#) et [ici](#)) ?**, du Pliocène moyen ([de la Vega et al., 2020](#)) ? **Quid des périodes très chaudes du début de l'Eocène ([ici](#))?**, des glaciations de la fin du Carbonifère ([Rygel et al., 2008](#)), de la période extrêmement chaude du Permien (Cronin, 2010 ; [Choi, 2012](#)), etc.

**Ne cherchons pas midi à quatorze heures, considérons uniquement les faits sans a priori (théorique). Les faits basés sur l'activité solaire sont par exemple développés [ici](#) dans les**

**derniers articles de SCE. A chacun de juger sur base des faits, cela reste heureusement encore la liberté et la démarche de la science.**

Enfin l'extrapolation des STT aux températures atmosphériques est également un vaste problème qui nécessite des précautions infinies ([Kent et al., 2013](#); [Kent et al., 2019](#)). Cet article rapporte les erreurs potentielles associées à cette 'translation' et l'ensemble des paramètres jouant un rôle est quasi-infini et sont rarement analysés dans des séries non actuelles faute de proxies et de résolution temporelle suffisants. Pourtant les SST sont à prendre en considération car elles constituent un des éléments majeurs dans l'évolution du climat ([ici](#) et [NOAA](#)). Le système océan/atmosphère reste d'une complexité inouïe et croire l'avoir compris en le résumant au presque seul 'bouton CO<sub>2</sub>' ne peut que surprendre tout scientifique sérieux. Comme souvent rapporté à SCE, la science 'is not settled' et le système atmosphérique et ses interactions avec l'hydrosphère (l'océan) garde encore beaucoup de secrets (scientifiques)...

**Ainsi l'OCR nous apprend-il en premier lieu qu'une 'température moyenne globale' n'a pas de sens, et en second lieu que le réchauffement actuel n'est rien moins qu'une fluctuation climatique banale.**

**NOTES** (la plupart des références sont sous forme de liens dans le texte).

[1] Cronin, T. 2010. Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press, 441P.

[2] Bender, 2013. Paleoclimate. Princeton Primers in Climate. Princeton University Press, 306p.

[3] Corte-Real, J., Zhang, X. & Wang, X. Downscaling G.C.M. 1995. Information to regional scales: A non-parametric multivariate regression approach. Climate Dynamics 11, 413-42.

[4] Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P. & Boscolo, R. (Eds), 2006. Mediterranean Climate Variability. Elsevier, pp 438. ISBN: 0-444-52170-4.

## **7 Des réchauffements répétitifs sans CO<sub>2</sub>**

Mis en ligne SCE : 24.01.2020

Depuis le début des mesures thermométriques directes, **les 4 principales séries de température** que nous possédons (thermomètres terrestres et satellites) nous montrent que la température globale de la basse troposphère a augmenté de  $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$  en 138 ans (entre 1880 et 2018). Cela correspond à  $\pm 0,28^{\circ}\text{C}$  en 50 ans soit  $0,006^{\circ}\text{C}/\text{an}$  (actuellement environ  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{an}$  pour les 30 dernières années). Les médias nous rappellent chaque jour que cette hausse est exceptionnelle et que le CO<sub>2</sub> anthropique en est à l'origine, c'est-à-dire est le grand coupable suivant la terminologie consacrée.

Mais cette vitesse d'augmentation de la température, est-elle vraiment exceptionnelle? Dans les lignes qui suivent, nous allons vous démontrer qu'il n'en est rien. Au cours de la dernière période glaciaire, alors que l'espèce humaine existait déjà, **la température moyenne a parfois augmenté à une vitesse vingt fois plus élevée, et ce à de nombreuses reprises**. Ces phénomènes particuliers, qui n'ont pas fait disparaître la vie sur Terre, et que nous vous avons déjà mentionnés sur SCE ([ici](#)), sont appelés événements de Dansgaard-Oeschger ou 'DO' (des noms des deux scientifiques -danois et suisse- qui

furent les premiers à les mettre en évidence) et sont reconnus par le GIEC. Comme nous allons vous le montrer dans le présent article, le taux de CO<sub>2</sub> n'aurait qu'un rôle mineur dans ces événements.

### 7.1. Présentation des événements de Dansgaard-Oeschger (DO)

Selon un article récent de [Li et Born \(2019\)](#), les événements DO sont des fluctuations climatiques brusques qui ont ponctué la dernière période glaciaire (qui commence il y a environ 110 000 ans et se termine il y a environ 10 000 ans) et qui ont modifié le climat à l'échelle globale (Figure 1). L'espèce *Homo sapiens* existait déjà car elle est apparue il y a environ 300 000 ans (Hublin et al. 2017). Comme illustré sur la Figure 2, ces événements se sont essentiellement concentrés au cours de la période s'étendant de 57 à 29 ka [ka = milliers d'années] (recouvrant l'étage ou le stade isotopique MIS3 de la [chronologie isotopique MIS](#)). Durant cette période, une grande partie de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie ainsi que du Groenland et de l'Antarctique était recouverte de glaces. Dans le détail, le Glaciaire *sensu stricto* démarre par à-coups successifs et peut être découpé selon les stades isotopiques marins, commençant très tôt sur la côte ouest Atlantique Nord (vers 117 ka), et plus tardivement sur la Scandinavie (vers 110 ka) (Van Vliet-Lanoë, 2013). Rappelons que ce Glaciaire fait suite à la dernière période chaude, ou interglaciaire Eémien (130-110 ka) qui fut particulièrement chaud et instable avec notamment un niveau marin 5 à 6 m au-dessus de l'actuel.

Au cours du dernier Glaciaire, **de nombreuses périodes de réchauffement extrême avec des hausses de plus de 8°C en 40-50 ans** se sont produites! Au moins une dizaine de ces événements de réchauffement extrême se sont produits au cours de cette période du Paléolithique, **avec un taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique peu élevé (190 à 220 ppm)**. Ces événements (au nombre de 25 si l'on remonte jusqu'à 115 ka) présentent des durées comprises entre 500 et 2500 ans (pouvant parfois aller jusqu'à 4500 ans) et un profil de température asymétrique avec un rapide réchauffement et un lent refroidissement (voir Figure 2 ci-dessous).

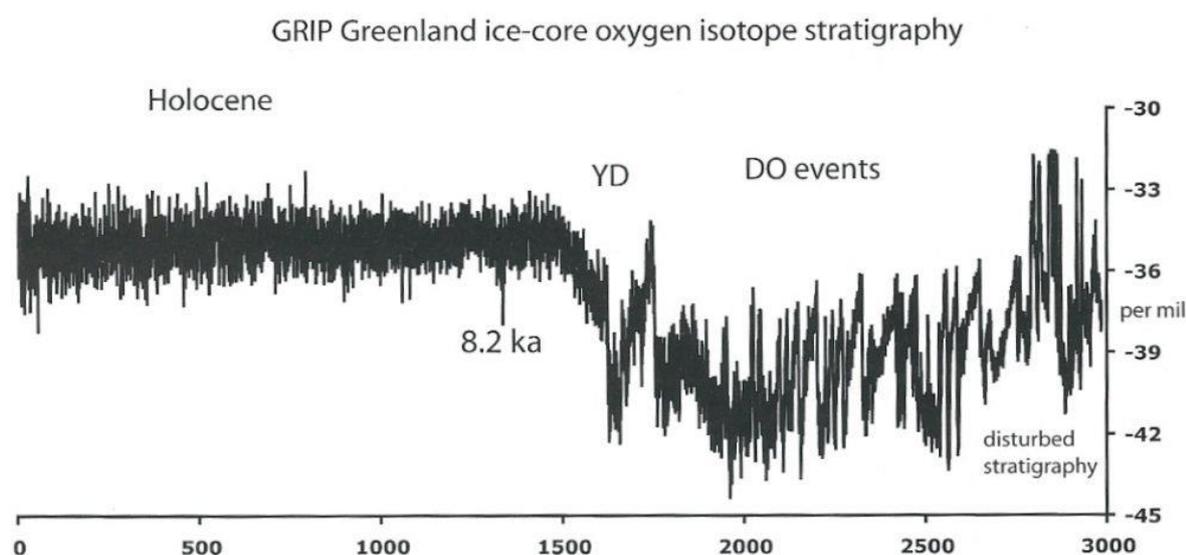


Figure 1. Stratigraphie isotopique de l'oxygène à partir des glaces du forage GRIP (Groenland). En ordonnée valeurs du  $\delta^{18}\text{O}$  en ‰ et en abscisse profondeur en mètres du forage (Cronin, 2010). Les compositions isotopiques de l'oxygène sont un indicateur de la température. La figure montre de manière très claire que l'interglaciaire actuel (Holocène, moitié gauche du graphique) est caractérisé par des fluctuations thermiques de faible amplitude (si l'on excepté un épisode plus froid vers 8,2 ka) alors que le Dernier Glaciaire (moitié droite du graphique) montre des changements climatiques fréquents, rapides et de grandes amplitudes (de 8°C à 16°C suivant les  $\delta^{18}\text{O}$  enregistrés pas les

## DES RECHAUFFEMENTS REPETITIFS SANS CO<sub>2</sub> ?

événements ou 'cycles' DO (Dansgaard-Oeschger events). Nb: YD pour Younger Dryas, correspondant à un refroidissement il y a 12800 ans BP (non discuté dans cet article)

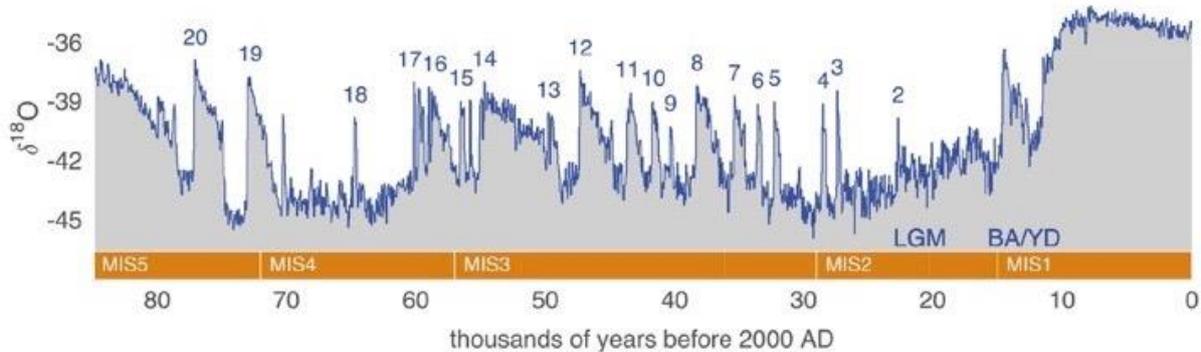


Figure 2. Événements de Dansgaard-Oeschger et enregistrement de la composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de la carotte de glace NGRIP du Groenland (Andersen et al. 2004), en milliers d'années avant l'époque actuelle. La composition isotopique de l'oxygène reflète la température. La carotte de glace provient du Groenland (75.10°N; 42.32°W) à 2917 m d'altitude. La barre orange horizontale représente la chronologie isotopique MIS (MIS = Marine Isotopic Stage). Les événements DO sont représentés par les chiffres bleus. Le dernier maximum glaciaire (LGM) et la transition Bølling-Allerød /Younger-Dryas (BA/YD) sont indiqués et associés aux MIS2 et MIS1 (non discutés ici). Source : Li & Born (2019). Nb : Une chronologie de ces événements (notés A1-A12, corrélations notamment basées sur les isotopes du béryllium) a également été établie pour l'Antarctique (Epica Community Members, 2006) et montre que ces événements sont décalés de 1500 à 3000 ans entre les deux hémisphères (Cronin, 2010). NB: 25 cycles DO sont répertoriés (si l'on remonte jusqu'à 115 ka). Egalement datation AD en abscisse.

Les événements DO sont les mieux documentés dans les glaces du Groenland où ils représentent des **sauts de température de 8–16°C** (déduits des isotopes de l'oxygène, Allay, 2014; Li & Born 2019). Dans l'ensemble de l'Atlantique Nord, les observations suggèrent des températures océaniques plus chaudes, peu de glace de mer et une chute de la salinité de surface dans les gyres subtropicales. **Ces événements ont une durée de l'ordre du millénaire (voir plus loin), et les transitions sont particulièrement rapides, se déclenchant toujours en une dizaine d'années ou moins.** Les proxies révèlent que les événements DO s'étendent à l'ensemble de l'Hémisphère Nord mais aussi à celui du Sud avec un décalage temporel. Les corrélations (sur base isotopiques) montrent en effet que les périodes de réchauffements durables de l'Hémisphère Nord (Groenland, DO 8 et 12 entre 45 et 36 ka BP [BP = Before Present, c'est-à-dire avant 1950]) sont en retard de 2-3 ka par rapport à leurs homologues de l'Antarctique. En moyenne le changement climatique de l'Antarctique devance celui du Groenland de  $1\pm 2,5$  ka sur la période  $47\pm 23$  ka BP (Blunier et al., 1998).

Ce phénomène diachronique correspond à un système de bascule bipolaire (ou 'bipolar seesaw') défini par Broecker, 1994). Les événements DO sont enregistrés à l'échelle globale aussi bien dans les carottes de glace que dans les sédiments marins, mais également dans les spéléothèmes (Wang et al., 2001), les dépôts loessiques (Van Vliet-Lanoë, 2013) et les lacs profonds (Gradstein et al., 2016). Pour être complet signalons également un type d'événements supplémentaires, à savoir les **événements de Heinrich**. (voir plus loin, Figure 4). Nous ne les discuterons pas ici, mais un événement de Heinrich clôt une série d'interstades DO d'intensité croissante et se traduit par un effondrement en cascade de toutes les calottes de glace autour de l'Atlantique Nord avec un vêlage accru d'icebergs (Van Vliet-Lanoë, 2013). La conséquence directe de ces débâcles d'icebergs est un ralentissement marqué de la circulation thermohaline et un refroidissement climatique dans l'Hémisphère Nord (Bender, 2013).

## 7.2. Processus impliqués dans les événements de Dansgaard-Oeschger

La cause des événements DO reste encore mystérieuse et de nombreuses hypothèses ont été proposées. Mais ce sont Broecker et al. (1985) qui furent les premiers à avancer une explication, principalement sur base de processus océaniques : ces événements seraient le résultat d'une **variabilité de la circulation thermohaline Nord Atlantique**, également appelé circulation **AMOC** (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*, Figure 3). Cette idée provient de l'observation d'une bistabilité (i.e., le fait d'avoir deux états d'équilibre stables possibles = *'bipolar seesaw'*) dans le modèle en boîtes de Stommel (1961) ainsi que dans les premiers modèles climatiques (Manabe et Stouffer, 1988). Remarquons que les modèles en boîtes sont des versions simplifiées de systèmes complexes, les réduisant à des boîtes (ou réservoirs) liées par des flux. **Cette bistabilité à l'échelle globale résulte ainsi d'un forçage semi-périodique en eau douce qui peut sous certaines conditions reproduire des fluctuations ressemblant aux événements observés (Gaonopolski et Rahmstorf, 2002)**. Restera ensuite d'essayer de déterminer la cause de ce forçage (voir plus loin).

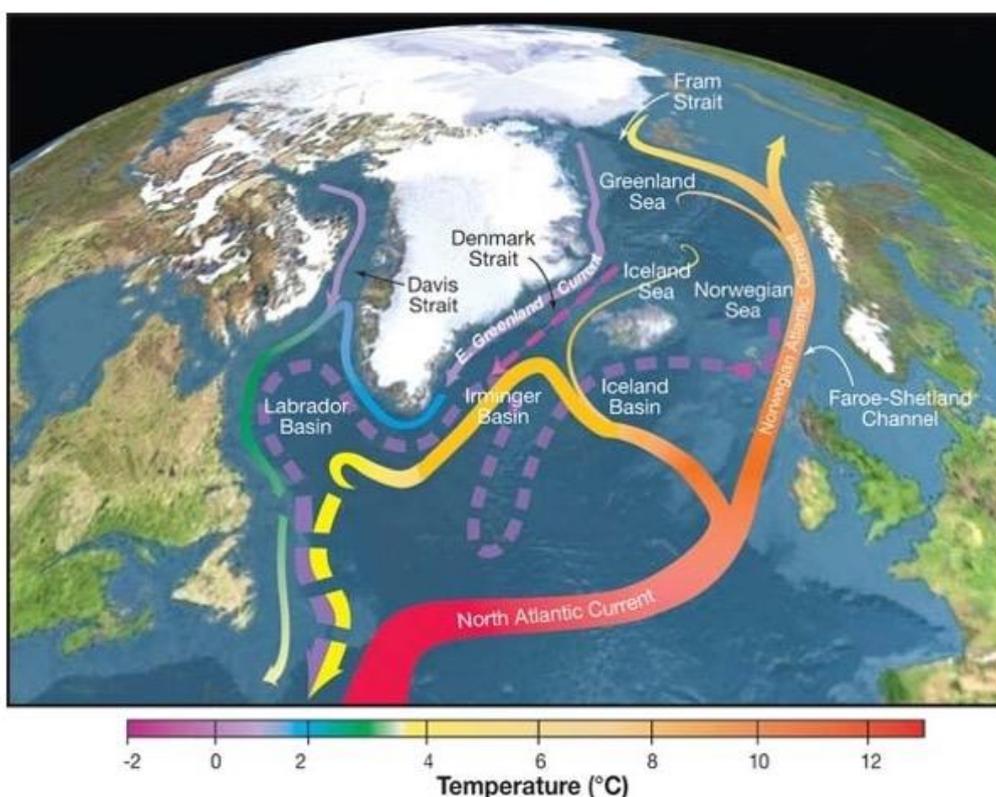


Figure 3. Carte topographique des mers nordiques et des bassins sous-polaires avec circulation schématisée des courants marins de surface (courbes solides) et des courants profonds (courbes en pointillés) qui forment une partie de la circulation AMOC. Les couleurs des courbes ou 'rubans' indiquent les températures approximatives de froid (couleurs bleutées, à gauche sur l'échelle des couleurs) à chaud (couleurs orangées/rouges sur l'échelle). Source : [ici](#).

Une **forte circulation AMOC** signifie un plus grand transport ou transfert de chaleur vers le nord par l'océan, ce qui **réchauffe le climat nordique**, tandis qu'une faible circulation AMOC induit un fort ralentissement de transport de chaleur vers le nord, ce qui provoque un refroidissement de la circulation (Clark et al., 2002; Rahmstorf, 2002, Bender, 2013).

Selon Li et Born (2019) et de nombreux autres auteurs (non repris ici), les évènements DO ne sont pas simplement causés par les mouvements d'un courant marin comme suggéré initialement par Broecker et al. (1985). La présence de glaces, d'eau douce et l'état de l'atmosphère (surtout les vents) sont également des paramètres importants. En fait il s'agirait d'une **oscillation « spontanée » du système couplé atmosphère-glace-océan** comprenant l'Atlantique Nord, les mers nordiques et l'Arctique. Cette hypothèse est soutenue par des observations et des simulations basées sur des modèles climatiques qui montrent que la région océanique polaire est une zone clé où des systèmes de vents vigoureux rencontrent la banquise. C'est là également que l'on rencontre les courants marins les plus variables de l'Atlantique Nord, avec des courants de convection possibles vers les profondeurs océaniques. Li et Born (2019) soutiennent donc que, dans ces conditions particulières, tous les composants peuvent interagir pour produire des évènements DO. Le mécanisme détaillé du fonctionnement des cycles DO peut être consulté dans [Sessford et al. \(2019\)](#) (voir plus loin également).

### 7.3. Le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique pendant les évènements DO

Les microbulles emprisonnées dans les carottes de glace peuvent nous renseigner sur le taux de CO<sub>2</sub> (et de CH<sub>4</sub>) pendant les évènements DO. Nous allons voir que les carottes de glace du Nord et du Sud ne produisent pas les mêmes résultats.

**Les carottes de glace des stations antarctiques**, par exemple la **station Byrd**, nous montrent que le taux de CO<sub>2</sub> de l'Hémisphère Sud au cours des évènements DO était plus faible qu'aujourd'hui et oscillait entre 200 et 220 ppm (Figures 4 et 5, courbe grise). Le taux de CO<sub>2</sub> en Antarctique était parfois stable au cours des évènements DO de courte durée (début DO n°13 et DO n°9), voire décroissant (par exemple DO n°11 et n°10, Figure 4). Ce n'est qu'au cours des évènements DO de longue durée (par exemple DO n°12 et n°8) que le CO<sub>2</sub> antarctique s'élevait légèrement pour atteindre 220 ppm (Figure 5). On peut conclure ici que **si l'on se base sur les données antarctiques, il est clair que le taux de CO<sub>2</sub> ne peut pas être la cause des évènements DO**, particulièrement pour les évènements courts.

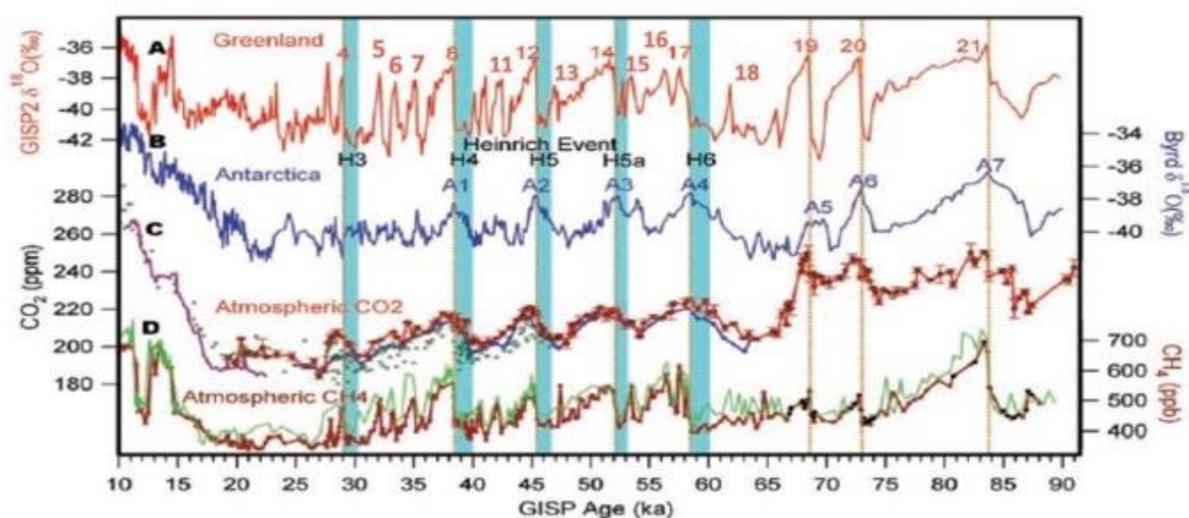
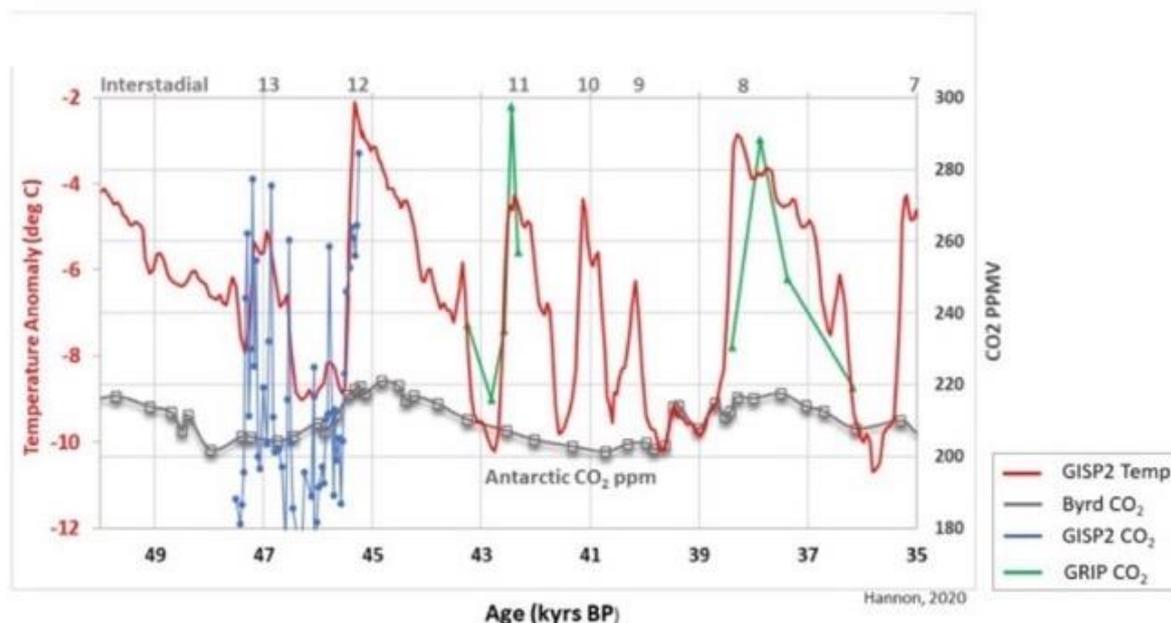


Figure 4. D'après Ahn et Brook (2008). **(A)** proxy de température du Groenland ( $\delta^{18}\text{O}$  de la glace), les chiffres rouges donnent le numéros des évènements DO. **(B)** proxy de température de la station Byrd en Antarctique ( $\delta^{18}\text{O}$  de la glace). **(C)** Taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique en ppm; carottes de glace de Byrd, Taylor Dome et EPICA Dome C. **(D)** Taux de méthane au Groenland et à la station Byrd. Les barres bleues représentent les évènements de Heinrich (ici H3 à H6). Le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique Antarctique pendant les évènements DO de la période MIS3 était inférieur à 220 ppm (actuellement il est de 410 ppm). Certains des évènements DO se sont produits alors que le taux de CO<sub>2</sub> en Antarctique était croissant (pendant les évènements DO n°4, 9, 13, 15, 18) mais plusieurs autres évènements DO se sont produits alors que le

## DES RECHAUFFEMENTS REPETITIFS SANS CO<sub>2</sub> ?

taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique toujours en Antarctique était stable ou même décroissant. Par exemple, entre 38 et 30 ka (événements DO n°5, 6, 7, 8), entre 45 et 40 ka (événements DO n°10, 11, 12), entre 52 et 47 ka (événements DO n°13 et 14) et entre 58 et 54 ka (événements DO n°16 et 17).



Voyons maintenant le taux de CO<sub>2</sub> dans les **carottes de glace du Groenland** (Figure 5, courbes bleues et vertes). Il faut savoir que ces carottes ne sont pas les préférées des paléoclimatologues. En effet, elles ne permettent pas de remonter aussi loin dans le passé que les carottes du sud et comportent des impuretés (surtout carbonatées) qui faussent le signal. Le taux de CO<sub>2</sub> mesuré est indiqué en Figure 5 pour deux zones des carottes GISP2 et GRIP du Groenland et une zone en Antarctique. Nous pouvons voir que ce taux semble avoir varié de manière beaucoup plus importante, entre 180 et 300 ppm, par rapport à l'Antarctique. De telles augmentations (ca. 100 ppm) en si peu de temps sont surprenantes. Nous voyons également que trois événements DO sont accompagnés par des taux de CO<sub>2</sub> élevés (DO n°8, 11, 12). Cependant, les études de Smith et al. (1997a, 1997b) suggèrent qu'il s'agit d'artefacts. En effet, le CO<sub>2</sub> mesuré à partir des carottes du Groenland proviendrait de la dissolution de carbonates emprisonnés dans les glaces et non de l'atmosphère. Le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique ne serait donc pas si élevé dans l'Hémisphère Nord pendant les événements DO.

Quoi qu'il en soit, de nouveaux forages et de nouvelles études du taux de CO<sub>2</sub> se révèlent nécessaires au Groenland avant de pouvoir conclure définitivement. En attendant, **il semble bien que le CO<sub>2</sub> n'ait pas joué de rôle majeur pendant les événements DO**. A consulter également un récente analyse de R. Hannon (ici). Notons enfin que selon **Martin et al. (2005) c'est bien la température qui pilote les variations des concentrations du CO<sub>2</sub> atmosphérique** :

« CO<sub>2</sub> changes during MIS 3 can be explained solely by temperature-dependent solubility driving variations in atmospheric pCO<sub>2</sub>. The deep-water temperature changes during MIS 3 may reflect changes in the temperature or relative contribution of Antarctic Bottom Water and play a role in the "bipolar seesaw." »

Selon [Ahn et Brook \(2007\)](#) le CO<sub>2</sub> est décalé (*'lag time'*) de  $720 \pm 370$  ans ( $\pm 1$  sigma) par rapport à la température en Antarctique (au cours de la période 65-30 ka).

#### 7.4. Le taux de CH<sub>4</sub> atmosphérique pendant les événements DO

Concernant le **méthane**, sa concentration augmente fortement durant un événement DO et son origine a pu être mise en évidence à partir de l'analyse isotopique du deutérium [ $\delta D(CH_4)$ ] dans les glaces du forage antarctique de Vostok ([Bock et al. 2010, 2013](#)). Il provient des marécages boréaux et tropicaux qui se sont étendus suite aux augmentations de la température et des précipitations, et non d'un largage à partir de clathrates des sédiments de l'océan profond comme supposé initialement. Selon ces auteurs ces émissions de méthane à partir des systèmes humides sont principalement liées à la température et l'importance des nappes phréatiques résultant d'une combinaison de l'insolation solaire, du niveau eustatique local et de l'intensité de la mousson. Dans ces conditions il y a une prolifération de bactéries méthanogènes dans les milieux anaérobiques. Sur base de l'analyse du  $\delta D(CH_4)$ , les auteurs ([Bock al. 2017](#)) concluent que **les émissions de méthane n'ont pu jouer qu'un rôle mineur dans les changements atmosphériques au cours des événements DO** et que le bilan glaciaire n'est pas dominé par les sources de ce gaz. Les concentrations de méthane sont également très variables (de 50 à 200 ppbv) et sont une conséquence de l'augmentation de la température ([Brook et al., 2000](#) ; [Cronin, 2010](#)).

#### 7.5. Origine des événements DO

Ces événements identifiés en 1972 par [Dansgaard](#) (voir [Dansgaard et al., 1993](#)) sont parmi les **plus spectaculaires répertoriés dans l'enregistrement géologique** : ils sont spectaculaires par leur brutalité (très forte hausse et/ou assez forte baisse de température), par leur répétition à l'échelle pluri-millénaire et par les changements induits (niveau marin, fonte des glaces, décharges détritiques etc.). Malgré ces effets frappants, force est de constater que le mécanisme à leur base reste encore inconnu. **Comme noté ci-dessus, les teneurs atmosphériques en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> ne jouent aucun rôle important, ou même aucun rôle du tout, dans l'installation, la répétition et la pérennité de ces cycles au cours des périodes considérées.**

Voyons donc quels pourraient être les mécanismes à l'origine de ces événements. Une des meilleures façons de procéder (à l'heure actuelle) est de tenter de déterminer la périodicité de ces événements. Rappelons d'abord leurs principales caractéristiques : ils sont fort asymétriques avec un réchauffement brutal d'environ 8°C à 16°C en quelques dizaines d'années, et un refroidissement lent sur au moins 200 ans (centaines à milliers d'années), suivi par un refroidissement brutal sur au moins 200 ans. Le réchauffement des cycles en Antarctique précède au moins de 220 ans celui des cycles de l'Hémisphère Nord (Groenland). Les oscillations ou cycles DO étant liées à une période glaciaire ils pourraient être influencés par les températures globales et donc par les changements orbitaux. Les cycles DO étant de haute fréquence (quelques milliers d'années), ils ne peuvent être mis en corrélation avec ceux de Milankovic (23 000 ans pour la précession, 41 000 ans pour l'obliquité et 100 000 pour l'excentricité).

Ces derniers interfèrent probablement en rendant le signal irrégulier, voir 'chaotique'. **Lors de la période 115-20 ka, l'insolation solaire de haute latitude liée aux processus orbitaux ne montrait pas de variabilité importante ([Cronin, 2010](#)) et pourtant l'atmosphère au niveau du Groenland a connu des augmentations brusques de 8 à 16°C de la température en quelques dizaines d'années** enregistrés par les événements ou cycles DO. En analysant la distribution de ces derniers à

l'échelle temporelle du Dernier Glaciaire, on voit que ces cycles sont effectivement absents des périodes chaudes d'obliquité maximale à 90, 50 et 10 ka BP et des périodes très froides après une obliquité minimale à 65 et 20 ka BP (Figure 6, Schulz et al., 1999). **Les changements brusques de DO ne semblent donc pas se produire en mode chaud ou très froid.** Ces auteurs ont ensuite mené une analyse temporelle (par filtrage harmonique) sur les derniers 100 000 ans et ont pu extraire à partir des données de température ( $\delta^{18}\text{O}$ , forage GISP2) un signal de 1470 ans.

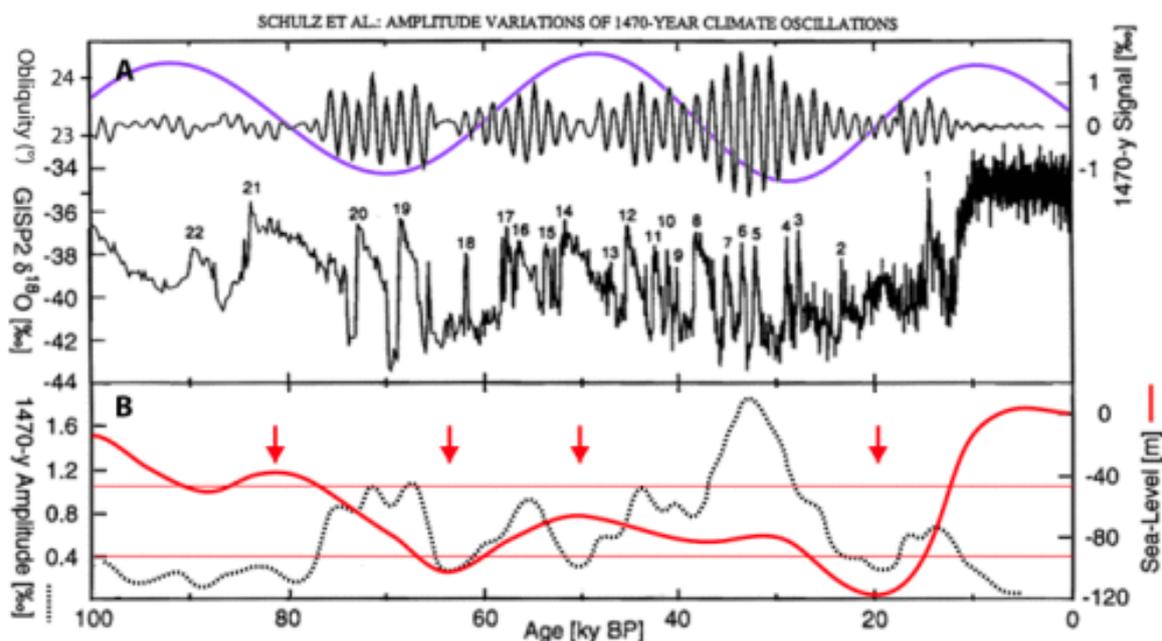


Figure 6. (A) Oscillations temporelles du signal de 1470 ans à partir du traitement algorithmique (filtrage harmonique, analyse spectrale) des isotopes de l'oxygène ('proxy' de la température) du forage GISP2, Groenland et succession des événements DO (de 1 à 22) ; (B) Amplitude lissée sur 2000 ans du signal de 1470 ans (courbe pointillée grise) et du niveau de la mer (courbe rouge). L'amplitude augmente fortement lorsque le niveau de la mer descend en dessous de -45 m et diminue lorsque le niveau de la mer descend en dessous de -90 m. Les minima d'amplitude prononcés coïncident avec les minima ou maxima locaux du niveau de la mer (flèches). Source : Composite des figures 1 & 2 de Schulz et al. 1999. Obliquité et bande de niveau de la mer de -90 m ajoutées (Schulz et al., 1999). Les conditions des oscillations DO pouvant être arrêtées, par exemple au cours du dernier maximum glaciaire, et leur redémarrage qui s'en suit, en maintenant toujours le même rythme de 1470 ans, suggère qu'un forçage externe est à l'origine des cycles DO.

Ce signal se rencontre dans quatre périodes de plus grande amplitude séparées par des minima à 80, 65, 50, 20 et 10 ka BP (flèches de la Figure 6). Chaque période de plus grande amplitude correspond à des périodes d'oscillations DO. **Les auteurs ont ensuite remarqué une forte relation entre le signal de 1470 ans et les variations de la masse de glace continentale, telles qu'elles sont enregistrées dans les variations du niveau de la mer.** Chacun des cinq minima du signal de 1470 ans correspond à un point d'inflexion de la variation du niveau de la mer et quatre des cinq ont lieu lorsque le niveau de la mer est supérieur à -45 m ou inférieur à -90 m du niveau actuel. Le cinquième à 50 ka BP coïncide avec un maximum dans l'obliquité

D'après Rahmstorf (2013), l'épisode chaud (interstade) des événements présente une durée de 1470 années à  $\pm 8\%$  (pour l'ensemble des événements) et à  $\pm 2\%$  (pour les plus récents).

La périodicité de 1470 années semble donc bien établie pour les événements DO. Elle peut s'expliquer soit par des facteurs internes (oscillation de la circulation océanique, dynamique des calottes glaciaires...) ou externes (cycles orbitaux planétaires ou cycles solaires...). Les facteurs

internes étant fondamentalement très variables ne peuvent expliquer la régularité des cycles DO. D'autre part on ne connaît pas de cycle solaire proche de 1500 ans, ni de cycles orbitaux de cette durée. Finalement le cycle le plus proche est le cycle lunaire avoisinant 1800 ans, il agirait par l'intermédiaire des marées (Keeling et Whorf, 2000). Nous n'aborderons pas le mécanisme détaillé ici, reprenons seulement cet extrait de l'article :

*'We propose that strong tidal forcing causes cooling at the sea surface by increasing vertical mixing in the oceans. On the millennial timescale, this tidal hypothesis is supported by findings, from sedimentary records of ice-rafting debris, that ocean waters cooled close to the times predicted for strong tidal forcing'.*

Dans ce contexte des marées exceptionnellement fortes ont lieu avec des périodicités centenaires capables d'exercer un puissant mélange vertical même sous la glace de mer, fournissant ainsi un mécanisme pour déclencher un réchauffement interstadial abrupt de Dansgaard-Oeschger. Notons également que le niveau marin a aussi fluctué au cours des événements DO en fonction de la dynamique des calottes glaciaires. L'amplitude des variations eustatiques (déduite des compositions isotopiques de l'oxygène dans des terrasses coralliennes tropicales, dans des oscillations de salinité en Mer Rouge ...) n'est pas encore connue avec suffisamment de précision mais est estimée à environ 30 m (fourchette de 15 à 45 m, Sidall et al., 2007).

**Notons surtout, que comme de nombreux auteurs le soulignent, l'origine des cycles DO n'est pas totalement élucidée.** Pour Schmidt (2011) ils résultent probablement de l'interaction de changements de la circulation océanique (AMOC) et atmosphérique ('jet streams'). Pour d'autres (Paillard, 2004) les cycles sont liés aux oscillations internes de la circulation océanique sans mettre en jeu un forçage externe. Une revue des différentes hypothèses est donnée dans Clement et Peterson (2008) et dans Cronin (2010). Pour Sessford et al. (2019) le mécanisme à l'origine des DO n'est toujours pas compris et ces auteurs mentionnent notamment, la topographie glaciaire dans l'Hémisphère Nord, la libération des eaux de fonte, le changement graduel de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> ou encore un forçage lié aux vents. **Cependant ils privilégient les changements d'origine océanique liés à l'interaction des couches de glace des mers nordiques et une forte halocline constituée d'une couche de surface froide et douce surmontant des eaux plus salées.**

Ainsi l'instabilité climatique de la dernière période glaciaire est plus que probablement le résultat de la dynamique des calottes glaciaires, et en particulier de leurs bordures marines (Deconinck, 2006). Cette instabilité serait liée à un processus déclenché par un début de fonte des calottes glaciaires, soit par un réchauffement extérieur, soit par un mécanisme propre lié par exemple au gradient géothermique. Les quantités d'eau douce relâchées dans l'océan réduisent la salinité des eaux océaniques, donc leur densité, rendant plus difficile leur plongement et réduisant en conséquence la circulation thermohaline (Foucault, 2009).

Bien que ces cycles s'expriment très clairement dans le Dernier Glaciaire, au cours de périodes instables, des oscillations de même type sont présentes dans l'Eémien (avant-dernier interglaciaire et peut-être dans l'interglaciaire actuel (post-glaciation holocène) (Gradstein et al., 2016). Leur étude détaillée permettra de mieux comprendre la variabilité du climat marqué par des 'cycles' de haute fréquence, aux échelles décadales et millénaires (ici).

Notre Planète a donc subi des extrêmes de températures bien plus importants que les variations ou augmentations actuelles et, que l'on sache, cela n'a pas empêché les populations du Paléolithique

de perdurer, et n'a pas rendu notre Planète invivable non seulement pour les êtres humains mais aussi pour la faune, la flore et les bactéries. Finalement tout au long de sa longue histoire la Terre a toujours maintenu une température stable, selon [Eschenbach \(2009\)](#) les variations moyennes sont restées dans une limite de  $\pm 3\%$  durant les derniers 500 millions d'années (incluant les âges glaciaires) et de  $\pm 1\%$  durant l'Holocène. De nombreux paramètres sont à même d'expliquer cette stabilité de la température ([Eschenbach, 2020](#)). Le réchauffement actuel s'inscrit bien en deçà des écarts mentionnés ci-dessus.

## 7.6. Le GIEC et les évènements de Dansgaard-Oeschger

**Tout ce qui précède est reconnu par le GIEC.** Il suffit de consulter le dernier rapport de synthèse AR5 de 2013 pour voir que le GIEC nous parle des évènements de Dansgaard–Oeschger à 4 endroits différents : dans le résumé technique (*Technical Summary*), dans les chapitres 5 et 6, et finalement dans le glossaire (Annexe III). Au chapitre 6, le GIEC écrit par exemple la phrase suivante :

*« Le CO<sub>2</sub> a augmenté pendant les périodes froides (stadiales) au Groenland, plusieurs milliers d'années avant le réchauffement rapide du Groenland (Ahn et Brook, 2008) ».*

En d'autres mots, le GIEC considère que le taux de CO<sub>2</sub> ne peut pas avoir de rôle déterminant dans les évènements DO! **Curieusement, aucune conclusion n'est tirée dans le rapport quant au fait que le CO<sub>2</sub> ne joue aucun rôle dans les évènements de DO. Ceux-ci ne sont d'ailleurs pas mentionnés dans le résumé pour décideurs (SPM).**

Pour vous convaincre de tout ceci, vous trouverez **en Annexe** (voir ci-dessous) une traduction « maison » des 4 parties du rapport AR5 qui traitent des évènements de Dansgaard-Oeschger. Nous nous excusons d'avance pour le style un peu lourd des phrases, celles-ci sont écrites par le GIEC.

## 7.7. Conclusions

- Puisque des oscillations « spontanées » (i.e., avec ou sans forçage externe ?) du système couplé atmosphère-glace-océan ont été capables de produire des augmentations rapides et intenses de la température atmosphérique il y a par exemple 35 000 ans (plus de 8°C en maximum 50 ans, le GIEC mentionnant même un maximum de 16°C), et ce sans faire intervenir de CO<sub>2</sub> (ou le méthane), ne se pourrait-il pas que les légères augmentations de température actuelles (0,3°C en 50 ans) soient également provoquées par le même type de phénomène? La [circulation thermohaline](#) a un rôle plus important qu'on ne le croit et reste méconnue, comme nous le montrent de nombreuses publications, par exemple celle de Woodson (2018) avec son article concernant les « ondes internes » des océans ;
- Le GIEC reconnaît les évènements de Dansgaard–Oeschger et montre que le CO<sub>2</sub> ne peut avoir de rôle dans leur occurrence ;
- Le GIEC ne parle pas des évènements de Dansgaard–Oeschger dans son résumé pour décideurs. Serait-ce parce que ces événements ne soutiennent pas l'hypothèse de l'effet de serre?;

## DES RECHAUFFEMENTS REPETITIFS SANS CO<sub>2</sub> ?

- Le chapitre 9 (voir ci-dessous) est la reproduction fidèle de l'AR5 (GIEC) concernant cette thématique. Après lecture de ce chapitre nous estimons pouvoir conclure comme suit :

- On voit que les événements DO n'ont pas encore trouvé une explication totalement satisfaisante, mais on voit surtout que les très fortes variations de températures répétitives (plus de vingt de fois) pour chaque hémisphère ont été rapides (dizaines d'années) lors du dernier âge glaciaire et qu'aucuns des gaz dits à effet de serre ne peuvent être invoqués dans ces changements brutaux. On voit enfin que la situation actuelle n'est pas atypique au regard du récent passé, bien qu'elle soit de beaucoup plus faible amplitude thermique sans oscillations aussi rapides. Il faut donc rester très prudent dans son interprétation ;

- Il faut reconnaître que l'analyse présentée dans le chapitre 5 de l'AR5 (voir ci-dessous) est fort complète. **Et surtout qu'il y a beaucoup plus d'incertitudes que de certitudes, prouvant à nouveau que la climatologie (et l'océanographie) est très complexe. S'il se dégage une 'certitude', c'est que ni le CO<sub>2</sub>, ni le CH<sub>4</sub> ne pilotent la température, ces gaz ne sont d'ailleurs pas repris dans le résumé pour les décideurs.**

**On aurait pourtant pu le dire et l'écrire noir sur blanc dans le rapport aux décideurs!**

### Références

Ahn J, Brook EJ (2007) Atmospheric CO<sub>2</sub> and climate from 65 to 30 ka B.P. *Geophysical Research Letters*, 34:L10703, 4p.

Ahn J, Brook EJ (2008) Atmospheric CO<sub>2</sub> and Climate on Millennial Time Scales During the Last Glacial Period. *Science* 322:83-85.

Alley R.B. (2014) *The Two-Mile Time Machine. Ice cores, abrupt climate change and our future.* Princeton University Press, 229p.

Andersen et al. (2004) High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* 431:147-151.

Bender M.L. (2013). *Paleoclimate.* Princeton University Press, 306p.

Broecker WS, Peteet DM, Rind D (1985) Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? *Nature* 315:21-26.

Clark PU, Pisias NG, Stocker TF, Weaver AJ (2002) The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature* 415:863-869.

Cronin, TM (2010) *Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present.* Columbia University Press, New York, 441p.

Deconinck JF (2006). *Paléoclimats. L'enregistrement des variations climatiques.* Vuibert, 198p.

Foucault A (2009) *Climatologie et paléoclimatologie.* Dunod, 308p.

Hublin JJ, Ben-Ncer A, Bailey SE, Freidline SE, Neubauer S, Skinner MM, Bergmann I, Le Cabec A, Benazzi S, Harvati K, Gunz P (2017) New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*. *Nature* 546:289-292.

Li C, Born, A (2019) **Coupled atmosphere-ice-ocean dynamics in Dansgaard-Oeschger events.** *Quaternary Science Reviews* 203:1-20.

## DES RECHAUFFEMENTS REPETITIFS SANS CO<sub>2</sub> ?

Manabe S, Stouffer R (1988) Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. J. Clim. 1:841-866.

Rahmstorf S (2002) Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. Nature 419:207-214.

Smith, H.J., M. Wahlen, and D. Mastroianni. 1997. The CO<sub>2</sub> concentration of air trapped in GISP2 ice from the Last Glacial Maximum-Holocene transition. Geophysical Research Letters 24:1-4.

Smith, H.J., M. Wahlen, D. Mastroianni, K.C. Taylor, and P.A. Mayewski. 1997. The CO<sub>2</sub> concentration of air trapped in Greenland Ice Sheet Project 2 ice formed during periods of rapid climate change. Journal of Geophysical Research 102:26577-26582.

Stommel H (1961) Thermohaline convection with two stable regimes of flow. Tellus 13:224-230.

Van Vliet-Lanoë B (2013) Cryosphère, Histoire et environnements de notre ère glaciaire. Vuibert, 405p.

Woodson CB (2018) The Fate and Impact of Internal Waves in Nearshore Ecosystems. Ann Rev Mar Sci. 210:421-441.

### 7.8. Annexe : les évènements de DO dans l'AR5 du GIEC

Dans son 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation de 2013 (AR5), le GIEC nous parle des évènements de Dansgaard–Oeschger à 4 endroits différents : dans le résumé technique (*Technical Summary*), dans les chapitres 5 et 6, et dans le glossaire (Annexe III).

#### 7.8.1. Résumé technique de l'AR5

En ce qui concerne le résumé technique, les évènements DO sont mentionnés dans un encadré à la page 70 intitulé « Irréversibilité et changements brusques ». Nous y apprenons les choses suivantes (les nombreuses références du rapport citées ci-dessous sont disponibles dans l'AR5) :

*Les évènements DO sont des **changements climatiques brusques**. Le changement climatique brusque est défini dans ce 5<sup>e</sup> rapport comme un changement climatique à grande échelle, qui se déroule sur quelques décennies ou moins, persiste pendant au moins quelques décennies et provoque des perturbations importantes dans les systèmes humains et naturels. Nous apprenons ensuite que les évènements DO sont **irréversibles**. Un changement est dit irréversible si l'échelle de temps de récupération de cet état due aux processus naturels est significativement plus longue que le temps nécessaire au système pour atteindre cet état perturbé. Le résumé technique nous dit également que **de nouvelles simulations avec des modèles climatiques ont confirmé avec une grande confiance que des changements dans la force de l'AMOC peuvent produire des changements climatiques brusques à l'échelle mondiale avec une amplitude qui ressemble aux évènements DO.***

#### 7.8.2. Chapitre 5 de l'AR5

Les évènements de DO sont ensuite mentionnés dans le chapitre 5 de l'AR5, à la page 432, au point 5.7 : « Preuves et processus du changement climatique brusque ». Nous y apprenons que :

*Les évènements DO sont qualifiés de brusques car ils se déclenchent sur une échelle de temps de l'ordre de 10 à 100 ans. **Vingt-cinq évènements brusques de DO** (North Greenland Ice Core Project Members, 2004) et plusieurs évènements à l'échelle du centenaire (Capron et al., 2010b) se sont produits au cours du dernier cycle glaciaire. **Les évènements DO au Groenland ont été marqués par***

*une transition abrupte (en quelques décennies) d'une phase froide, appelée Groenland Stadial (GS) en une phase chaude, connue sous le nom de Groenland Interstadial (GI). Par la suite, au sein d'une phase chaude GI, un refroidissement progressif a provoqué un retour vers la phase froide GS qui a ensuite duré des siècles ou des millénaires. Landais et al. (2004) et Huber et al. (2006) suggèrent que **pour certains évènements DO la température au Groenland a augmenté jusqu'à 16°C ± 2,5°C (1 écart-type) sur plusieurs décennies.** De telles transitions étaient également accompagnées de changements brusques du taux de poussières atmosphériques et en excès de deutérium ce qui indique une réorganisation de la circulation atmosphérique (Steffensen et al., 2008; Thomas et al., 2009). Des reconstitutions pour l'Atlantique subtropical et la Méditerranée révèlent des changements concomitants de température de surface de l'eau de mer (SST) atteignant des valeurs de 5°C (par exemple, Martrat et al., 2004; Martrat et al., 2007).*

*Malgré la présence visible d'évènements DO dans de nombreux enregistrements paléoclimatiques des deux hémisphères, les mécanismes sous-jacents restent non résolus et vont d'oscillations internes et spontanées du système atmosphère–océan–glaces (Timmermann et al., 2003; Ditlevsen et Ditlevsen, 2009), à un forçage extérieur comme celui du soleil (Braun et al., 2008; Braun et Kurths, 2010). Cependant, étant donné le manque d'observations concernant la variation de l'irradiance solaire sur l'échelle de temps des évènements DO (Muscheler et Beer, 2006), le forçage solaire reste improbable. Il existe de fortes preuves issues de plusieurs observations paléocéanographiques et de la modélisation selon lesquelles la variabilité des évènements DO est souvent associée aux changements du courant AMOC, comme le suggèrent certains modèles climatiques (Ganopolski et Rahmstorf, 2001; Arzel et al., 2009) et enregistrements indirects marins (Piotrowski et al., 2005; Kissel et al., 2008; Barker et al., 2010; Roberts et al., 2010), mais aussi les influences potentielles de la couverture de glace de mer (Li et al., 2010b), la circulation atmosphérique et la topographie de la calotte glaciaire (Wunsch, 2006).*

*La présence généralisée de couches massives de détritiques transportés par les glaces dans les sédiments marins de l'Atlantique Nord fournissent des preuves que certains DO (GS de période froide), connus sous le nom de stades Heinrich, ont été associés à des décharges d'icebergs provenant des calottes glaciaires de l'hémisphère Nord. Pendant ces périodes, le niveau de la mer a augmenté de plusieurs dizaines de mètres (Chappell, 2002; Rohling et al., 2008b; Siddall et al., 2008; González et Dupont, 2009; Yokoyama et Esat, 2011), avec des incertitudes persistantes dans le timing, l'amplitude de l'élévation du niveau de la mer, le refroidissement stadial et les variations de circulation océanique par rapport aux décharges d'icebergs (Hall et al., 2006; Arz et al., 2007; Siddall et al., 2008; González et Dupont, 2009; Sierro et al., 2009; Hodell et al., 2010). Les instabilités internes de l'inlandsis laurentidien peuvent provoquer des événements de vèlage et de fonte des glaces semblables à ceux déduits à partir des enregistrements de proxies (Calov et al., 2002, 2010; Marshall et Koutnik, 2006). Alternativement, un affaiblissement initial de l'AMOC peut entraîner un réchauffement profond dans certaines parties de l'Atlantique Nord (Shaffer et al., 2004) et la fonte basale subséquente des plates-formes de glace du Labrador, avec une accélération des coulées de glace et des icebergs qui en résultent (Alvarez-Solas et al., 2010; Marcott et al., 2011). Actuellement, la dynamique non résolue des modèles de calottes glaciaires et les informations limitées aux proxies ne permettent pas de distinguer les deux mécanismes avec confiance.*

*Depuis l'AR4, les simulations des modèles climatiques (Liu et al., 2009b; Otto-Bliesner et Brady, 2010; Menviel et al., 2011; Kageyama et al., 2013) ont également confirmé la conclusion (degré de confiance élevé) que **les variations de la force de l'AMOC peuvent induire des changements climatiques brusques d'amplitude ressemblant aux données paléoclimatiques qui reproduisent les évènements DO et ceux de Heinrich.***

Des études récentes ont permis de mieux comprendre l'effet global des événements DO et de Heinrich. Un refroidissement général de l'Atlantique Nord et des anomalies de glace de mer pendant les phases GS (froides) induisent des **changements de la circulation atmosphérique** (confiance élevée) (Krebs and Timmermann, 2007; Clement and Peterson, 2008; Kageyama et al., 2010; Merkel et al., 2010; Otto-Bliesner and Brady, 2010; Timmermann et al., 2010) qui à son tour **affecte les précipitations tropicales** des deux hémisphères conduisant à un assèchement dans le nord de l'Amérique du Sud (Peterson et Haug, 2006), la Méditerranée (Fletcher et Sánchez Goñi, 2008; Fleitmann et al., 2009), l'Afrique occidentale équatoriale et l'Arabie (Higginson et al., 2004; Ivanochko et al., 2005; Weldeab et al., 2007a; Mulitza et al., 2008; Tjallingii et al., 2008; Itambi et al., 2009; Weldeab, 2012), de vastes régions d'Asie (Wang et al., 2008; Cai et al., 2010) (voir la figure 5.4e) ainsi que dans la région de la mousson australo-indonésienne (Mohtadi et al., 2011). Des conditions plus humides concomitantes ont été établies pour le sud-ouest de l'Amérique du Nord (Asmerom et al., 2010; Wagner et al., 2010) et le sud de l'Amérique du Sud (Kanner et al., 2012) (figure 5.4h). De plus, des changements dans la circulation atmosphérique sont invoqués (Zhang et Delworth, 2005; Xie et al., 2008; Okumura et al., 2009) pour expliquer les variations de température dans le Pacifique Nord, ils varient à l'unisson avec le changement climatique brutal de l'Atlantique Nord (Harada et al., 2008, 2012; Pak et al., 2012). D'autres facteurs qui peuvent avoir contribué aux anomalies climatiques du Pacifique Nord incluent un changement de la circulation à grande échelle dans l'océan Pacifique (Saenko et al., 2004; Schmittner et al., 2007; Harada et al., 2009; Okazaki et al., 2010) pendant les phases d'un AMOC faible. Des études récentes sur les carottes de glace à haute résolution (membres de la communauté EPICA, 2006; Capron et al., 2010a, 2010b, 2012; Stenni et al., 2011) montrent que **l'Antarctique s'est réchauffé progressivement pour la plupart des GS**, atteignant le maximum des valeurs au moment des transitions GS/GI, ce qui est en accord avec le concept de bascule bipolaire (Stocker et Johnsen, 2003; Stenni et al., 2011). Une récente compilation de la température mondiale (Shakun et al., 2012), les records de température de l'océan Austral (Lamy et al., 2007; Barker et al., 2009; De Deckker et al., 2012), les preuves provenant des enregistrements terrestres dans l'hémisphère sud (Kaplan et al., 2010; Putnam et al., 2010) et les modèles de climat transitoire (Menviel et al., 2011) fournissent plusieurs sources de données pour le caractère inter-hémisphérique de la variabilité à l'échelle du millénaire durant le dernier glaciaire et pour les événements DO (confiance élevée).

Les enregistrements marins nouvellement disponibles (Martrat et al., 2007; Grützner et Higgins, 2010; Margari et al., 2010; Kleiven et al., 2011), les enregistrements WMOGHG d'Antarctique (Loulergue et al., 2008; Schilt et al., 2010) et les analyses statistiques des données sur les carottes de glace de l'Antarctique (Siddall et al., 2010; Lambert et al., 2012) couplées à une modélisation de bascule bipolaire (Siddall et al., 2006; Barker et al., 2011) indiquent avec une grande confiance que des changements climatiques brusques, similaires aux événements DO et ceux de Heinrich du dernier cycle glaciaire, se sont produits au cours des périodes glaciaires précédentes qui s'étendent dans le passé jusque 800 ka et, avec une confiance moyenne, jusque 1100 ka.

### 7.8.3. Chapitre 6 de l'AR5

Les événements DO sont ensuite mentionnés dans le chapitre 6, à la page 483, avec le point 6.2.1.3 : Processus contrôlant les modifications du dioxyde de carbone, du méthane et de l'oxyde nitreux lors d'événements glaciaires brusques.

Les mesures de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O des carottes de glace montrent des changements nets (échelle du millénaire) au cours des glaciations, associés aux événements climatiques dits de Dansgaard-Oeschger (DO) (voir section 5.7), mais leur amplitude, leur forme et leur timing diffèrent. **Pendant ces**

*événements climatiques à échelle du millénaire, les concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> ont varié d'environ 20 ppm, en phase avec les températures de l'Antarctique, mais pas avec celles du Groenland. Le CO<sub>2</sub> a augmenté pendant les périodes froides (stadiales) au Groenland, plusieurs milliers d'années avant le réchauffement rapide au Groenland (Ahn et Brook, 2008). Le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O ont montré des transitions rapides en phase avec les températures du Groenland, avec peu ou pas de décalage. Les variations de CH<sub>4</sub> se situent entre 50 et 200 ppb (Flückiger et al., 2004), en phase avec le réchauffement de la température au Groenland, à une échelle décennale (Huber et al., 2006). Les variations de N<sub>2</sub>O sont importantes, de même amplitude que celles observées au cours des variations glaciaire–interglaciaire, et pour les événements DO les plus chauds et les plus longs, l'augmentation de N<sub>2</sub>O débute plusieurs siècles avant l'augmentation de température et de CH<sub>4</sub> du Groenland (Schilt et al., 2010b). Des hypothèses contradictoires existent sur les causes de ces variations sur des échelles de l'ordre du millénaire. Certaines simulations informatiques suggèrent que les fluctuations de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>O peuvent s'expliquer par des changements dans la circulation AMOC (Schmittner et Galbraith, 2008), les variations du CO<sub>2</sub> s'expliquent principalement par des changements dans l'efficacité de la pompe biologique qui affecte le stockage profond du carbone océanique (Bouttes et al., 2011), alors que les variations de N<sub>2</sub>O pourraient être dues à des changements de productivité et de concentration en oxygène dans l'océan de subsurface (Schmittner et Galbraith, 2008). Cependant, d'autres études suggèrent que les fluctuations du CO<sub>2</sub> peuvent s'expliquer par des changements dans le stockage du carbone sur les terres (Menviel et al., 2008; Bozbiyik et al., 2011). Pour le CH<sub>4</sub>, les modèles ont des difficultés à reproduire des changements dans les émissions des zones humides compatibles avec les variations atmosphériques des événements DO (Hopcroft et al., 2011), et les changements dans le pouvoir oxydant de l'atmosphère pendant les événements DO semblent être trop faibles pour expliquer les variations de CH<sub>4</sub> (Levine et al., 2012).*

#### **7.8.4. Annexe III de l'AR5**

L'Annexe III de l'AR5, page 1452, comporte simplement la définition des événements DO.

## 8 La géologie et la température

Mis en ligne SCE : 31.12.2021

### 8.1. Introduction

S'il est un problème récurrent et délicat en géologie 'climatique', c'est bien la relation température et teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub>, il y règne un flou artistique effarant, tout et son contraire sont légion. A bien y regarder cela n'est pas si anormal tant les imprécisions sont la règle : imprécisions sur les âges géologiques des périodes ou intervalles étudiés, imprécisions sur la quantification de la ou des températures (globales et/ou régionales), du taux de CO<sub>2</sub>, et de leurs enchaînements dans la suite des processus naturels. Est-ce à dire qu'on est complètement démunis ? Heureusement non, comme le montrent par exemple les événements hyperthermiques ([ici](#)) et les Optimas Climatiques ([ici](#) et [ici](#)). Néanmoins on reste sur sa faim car une vision globale à l'échelle géologique manque. C'est la qualité première de l'article de [J.W. Davis \(2017\)](#) d'établir une vision complète des relations T/CO<sub>2</sub>/ΔRF<sub>CO2</sub> (forcing CO<sub>2</sub>), depuis le début des temps [phanérozoïques](#) (soit 541 Ma suivant l'échelle des temps géologiques, [ici](#)) jusqu'à aujourd'hui.

Annonçons d'emblée le résultat ou plutôt les deux résultats majeurs de cette étude :

**1° premier résultat plutôt pressenti : il n'y a aucune corrélation entre la température (estimée à partir de nombreux 'proxies 'ou indicateurs) et la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours du Phanérozoïque, la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> ne pilote donc pas la température des climats anciens ;**

**2° deuxième résultat plutôt inattendu : limiter les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> n'est d'aucune utilité pour limiter le réchauffement actuel, mais serait essentiel pour préserver la biodiversité.**

Il n'est pas possible de reprendre ici l'ensemble de l'article de Davis (35 pages) qui est fort documenté et très technique avec des données géologiques accompagnées de traitements statistiques complets et détaillés. La discussion porte sur de nombreux points y compris ceux concernant une extrapolation des données. **Nous nous sommes donc limités à développer le premier point du résultat mentionné ci-dessus (à partir de l'article de Davis) et ensuite de le discuter en prenant d'autres articles. Le second point ou résultat (voir ci-dessus), n'est donc pas repris dans notre article, il sera à peine abordé dans la dernière partie.**

Avant de présenter l'étude de Davis (2017), insistons sur le fait que le premier résultat mérite effectivement une discussion tant il va à l'encontre de ce qui est souvent rapporté dans la littérature géologique. En effet, dès qu'une augmentation ou 'bouffée' de CO<sub>2</sub> apparaît dans une série géologique, elle est présentée comme l'explication unique de tous les processus : température, acidification océanique, extinction d'organismes, etc. Ces pics de CO<sub>2</sub> suivent portant le plus souvent une augmentation de la température, ce qui est généralement passé sous silence ou passe tout simplement inaperçu, faute de résolution temporelle suffisante. L'événement hyperthermique PETM ([ici](#)) en est un bon exemple : ce sont probablement les paramètres de forçage astronomique (les

cycles d'excentricité de Milankovic) qui sont à l'origine de la forte augmentation de la température à la limite Paléocène/Eocène. L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> vient après (environ 3000 ans, [Sluijs et al. 2007](#)) sans que cela soit signalé. L'exacte cause de cet évènement reste encore à déterminer ([ici](#)). De même (pour ne citer qu'un deuxième exemple), il y a 240000 ans au Pléistocène, le CO<sub>2</sub> suit l'augmentation de température avec un temps de retard de 800 ± 200 ans ([Caillon et al., 2003](#)).

Notons encore que presque toutes les études concernant la ou les températures au cours des temps géologiques (et pour une grande part aussi celles d'aujourd'hui) considèrent que ces températures sont des 'températures globales moyennes'. Or cette notion de 'température globale moyenne' est très critiquable, comme notamment montré [ici](#), [ici](#) et [ici](#).

## 8.2. Les 'proxies' ou indicateurs

L'étude de Davis (2017) est basée sur de nombreux proxies ([Prokoph et al., 2008](#)) dont surtout pour l'estimation de la température, les isotopes de l'oxygène (exprimés sous forme de  $\delta^{18}\text{O}$  ([Grossman 2012](#)), à partir de 6680 analyses réparties dans les latitudes tropicales, tempérées et arctique selon des rapports respectifs ~20:6:1 et couvrant la période 522 à 0 Ma (millions d'années) bp ([Veizer et al., 1999](#) ; [Prokoph et al., 2008](#) ; [Gérard et Veizer, 2019](#)). L'évolution des concentrations en CO<sub>2</sub> est couverte par 831 analyses portant sur la période de 425 à 0 My(bp). Ces analyses sont reprises indépendamment parmi plusieurs centaines d'auteurs (voir [Royer, 2014](#), pour les données et les proxies, à savoir principalement les valeurs du  $\delta^{13}\text{C}$  de paléosols, de foraminifères planctoniques et de plantes non vasculaires, également les indices stomatiques, le bore et les (hydro)carbonates de sodium marins). Le forçage radiatif du CO<sub>2</sub> (cf. l'auteur de l'article) qui varie avec la latitude et la couverture nuageuse est 'modélisé' à partir du logiciel MODTRAN, la référence usuelle pour estimer cet indicateur (ndt ou 'note des traducteurs' : le concept de forçage radiatif n'est pas accepté par tous les scientifiques ; il postule l'existence d'un effet de serre atmosphérique, qui n'est rien d'autre qu'une pétition de principe, car dans l'état actuel des connaissances, l'effet de serre atmosphérique n'a pas encore pu être décelé expérimentalement, voir par exemple [SCE](#)).

Inutile de dire que l'auteur dispose ainsi d'une base de données impressionnante, fort complète, qui doit permettre de préciser la relation température et CO<sub>2</sub> pour les climats anciens. Davis a basé son analyse sur le calcul des coefficients de corrélation, du spectre de puissance des fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée. L'utilisation de ces méthodes requiert de satisfaire de nombreuses hypothèses sous-jacentes, parmi lesquelles il convient de citer : l'existence d'une relation linéaire, indépendance des résidus de l'ajustement par rapport au temps, l'isoscédasticité des résidus, (écart-type constant en fonction du temps), une distribution normale et non auto-corrélée des résidus, la normalité asymptotique des estimateurs des coefficients de corrélation et des coefficients des droites de régression, et absence de points aberrants dans les données.

Afin de s'affranchir de ces hypothèses, Davis a effectué des comparaisons avec une partie de ses données répondant plus strictement à ces hypothèses en utilisant en complément du coefficient de corrélation de Pearson (rapport de la covariance sur les écarts-types des deux distributions marginales, à savoir celles des indicateurs considérés) celui de Spearman, qui lui est non-paramétrique, et donc indépendant des hypothèses mentionnées ci-dessus. Les résultats sont quasi équivalents, justifiant que l'auteur n'ait pas recouru à toute la série de tests nécessaires, et qu'il se soit affranchi de certaines hypothèses comme celle requérant une distribution uniforme des points le long de l'axe temporel, une condition que très clairement ses données ne remplissent pas, les mesures très anciennes étant beaucoup plus rares et donc plus « essayées » que les plus récentes.

Pour tester la condition isoscédasticité sur l'ensemble des données de température et de CO<sub>2</sub>, les valeurs de coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne) ont été moyennées sur un pas d'environ 2,5 Ma, (ndt : l'auteur utilise, en lieu et place de la variance, ou de sa racine carrée l'écart-type, le coefficient de variation parce qu'il fusionne des proxies de nature différente et ayant donc également des moyennes et des écarts-types qui peuvent varier dans l'absolu d'un échantillon à l'autre, selon les procédures de calibrage utilisées. L'emploi du coefficient de variation, qui est un rapport, pallie à cet inconvénient et permet donc des comparaisons de dispersion de résultats provenant d'échantillons différents. Il s'agit d'une pratique courante en paléoclimatologie).

La droite de régression en fonction du temps a été tracée (Prokoph et al., 2008). Le coefficient de corrélation de Pearson entre âge et coefficient de variation a été calculé. **Ce coefficient de corrélation est très faible et non significatif statistiquement, démontrant que la dispersion des mesures n'a pas changé en fonction du temps. Il est ainsi montré que les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  des séries géologiques anciennes n'ont pas été affectées, ou très faiblement, par rapport aux séries récentes, par la diagenèse (altération post-sédimentaire du signal, isotopique ici) ou tout autre processus d'enfouissement (Pearson et Palmer 2000 ; Pearson et al. 2001). Les âges stratigraphiques sont connus à moins de 5%, et une erreur expérimentale égale à 0,5% de l'âge moyen est appliqué à tous les échantillons.** Pour le CO<sub>2</sub> la résolution est moindre pour les séries anciennes, suite à un moins grand nombre de données. D'une manière générale la résolution est inférieure à 200 ppmv, mais parfois elle est moins bonne, sans que cela n'altère les résultats de l'étude.

Finalement les proxies de température sont moyennés sur différents intervalles temporels de 0,5 à 4 Ma. Les séries les mieux documentées permettent une résolution sur un intervalle de 59 Ka (Ka = milliers d'années). Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  sont aussi analysées sur base des moyennes mobiles, avec différentes fenêtres de 6 à 50 Ma et incréments de 3 à 10 Ma plus de détails dans Veizer et al. 1999). Le traitement des données de température a été effectué sur des données brutes et sur des données dont la composante linéaire a été soustraite (« linearly detrended »). Ce detrending est souhaitable pour calculer les fonctions d'auto-corrélation, de corrélation croisée et du spectre de puissance, afin d'éviter des effets parasites (ndt : cette opération de « detrending » revient à décomposer le signal brut en tendance linéaire, cycle non périodique et composantes périodiques + un résidu ; il s'agit d'une démarche courante en analyse de séries temporelles. La partie de l'étude de Davis effectuée sur les données filtrées linéairement concerne donc la somme des composantes cycliques (tendances non linéaires et non périodiques) et périodiques. Les données de température filtrées sont plus fiables pour l'analyse de corrélation car elles ne sont pas affectées par l'important refroidissement continu (8-9° C, Figure 1a)) du globe au cours du phanérozoïque, ce qui pourrait en principe dominer ou au moins influencer les coefficients de corrélation calculés.

**Compte tenu de ces pas d'échantillonnage pour les indices de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique, les déductions tirées de l'analyse de corrélation entre la concentration de CO<sub>2</sub> et de la température sont les plus fortes pour la partie la plus récente du Phanérozoïque (85 à 0 Ma), modérées pour la partie centrale de l'enregistrement (173 à 86 Ma), et faibles ou nulles pour le Phanérozoïque ancien (425 à 174 Ma), tout en restant non significatives statistiquement pour chacune des fenêtres temporelles considérées.**

Le forçage radiatif

(FR) du CO<sub>2</sub> (et d'autres gaz atmosphériques en traces) a été modélisé à partir du logiciel « freeware » MODTRAN (on trouvera également de nombreuses références dans l'article de Davis, 2017).

Pour évaluer la robustesse des résultats et des conclusions, plus d'une dizaine d'analyses exploratoires de données de corrélation entre la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et la température au cours du Phanérozoïque ont été réalisées. Ces études pilotes ont utilisé les bases de données de proxies originaux de la température (Veizer et al., 1999) et de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique (Royer et al., 2004). Elles comprenaient également des températures ajustées en fonction du pH de l'eau de mer par rapport à la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours du Phanérozoïque, des températures projetées à l'aide du modèle de cycle du carbone GEOCARB-III par rapport à la concentration de CO<sub>2</sub> (Royer et al. 2004), et des enregistrements de températures brutes ou filtrées linéairement et calculées à partir des  $\delta^{18}\text{O}$  des anciennes bases de données (Royer et al., 2004 ; Veizer et al., 2000 ; Veizer et al., 1999) ; une base de données actualisée, mais incluant les mesures plus anciennes, (Royer 2014) des données relatives à la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique a également été examinée.

**Au terme des travaux exploratoires de Davis, une base de données plus complète de 58532 estimations de températures phanérozoïques, couvrant les 512 derniers Ma, provenant de coquilles marines calcitiques à faible teneur en Mg (Veizer et Prokoph, 2015) a également été intégrée.**

Cette base de données incorpore la compilation précédente (Prokoph et al., 2008) mais est deux à trois fois plus large. Cet échantillonnage élargi n'a cependant pas modifié de façon visible la série chronologique des températures au cours du Phanérozoïque (cf. Figure 1 de Prokoph et al., 2008), à comparer avec la Figure 3 de l'article de Davis). Notons que cette nouvelle base de données n'inclut aucune données de substitutions supplémentaires pour la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique.

### **8.3. Les résultats**

#### ***8.3.1. Les proxies de température montrent une diminution de 8-9°C au cours du Phanérozoïque (du moins à partir de 522 Ma) suivant différents cycles (Figure 1a) .***

Cette diminution est mise en évidence autant à partir des données brutes qu'à partir des données filtrées linéairement. L'étude originelle de Veizer et al., 1999 avait déjà établi une périodicité de 135-150 Ma avec une amplitude de 4°C (Figure 1b, courbe violette en bas), confirmée par Prokoph et al., 2008 (Figure 1b, courbe rouge en bas).

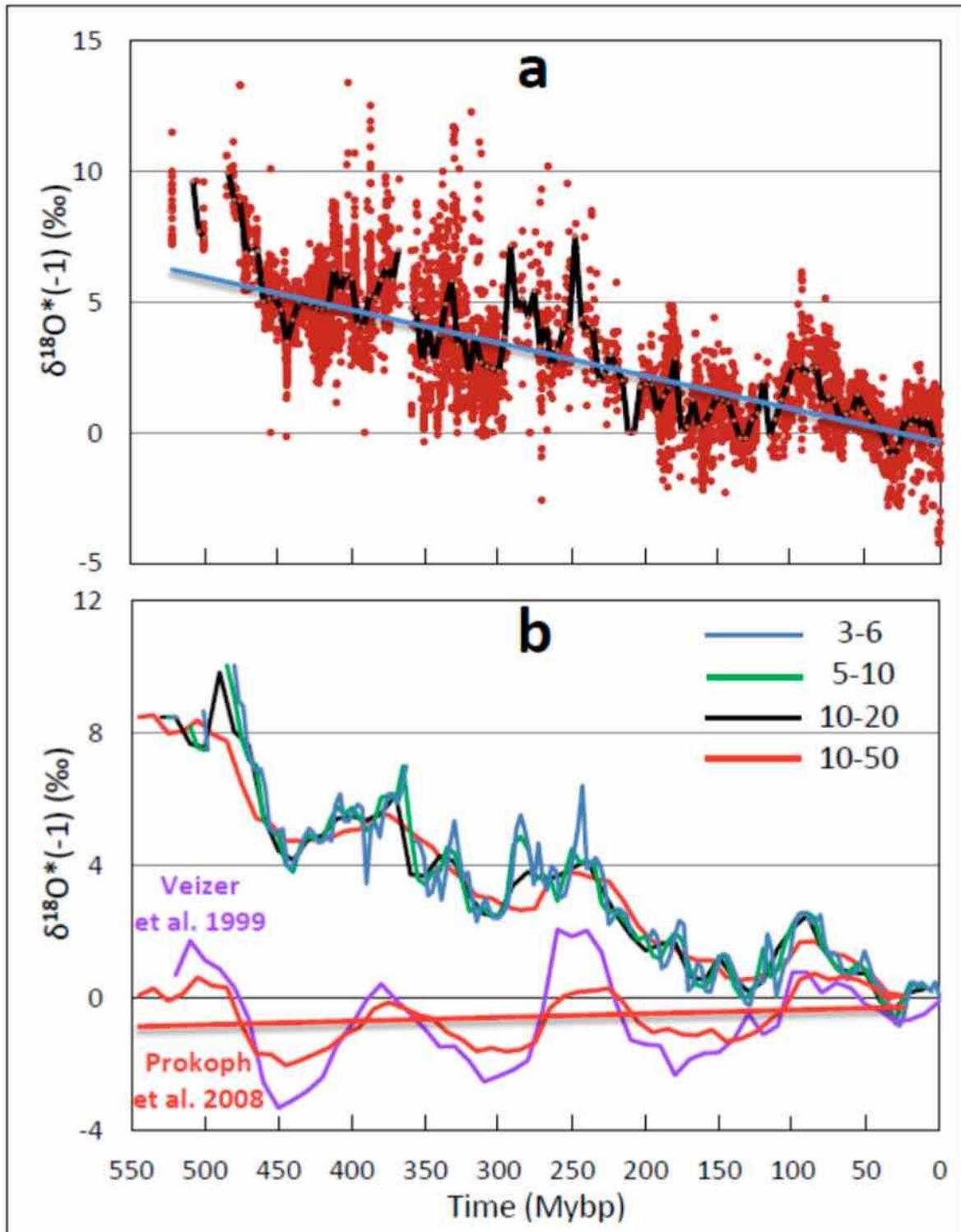


Figure 1 : Températures (proxies) au cours du Phanérozoïque. **(a)** Données brutes de température (points de données rouges) et courbe noire ajustée (moyenne mobile 3-6 Ma). Les données originales proviennent de Prokoph et al., 2008. **(b)** Moyenne des données de températures (proxies) brutes (courbes supérieures) et après élimination de la tendance linéaire (courbes inférieures). Les courbes des moyennes mobiles sont codées par couleur en suivant la clé en Ma. En **(b)** et courbes inférieures : données plus anciennes filtrées linéairement de Veizer et al., 1999, courbe violette. Les données plus récentes et plus complètes de Prokoph et al. 2008 sont comparées, courbe rouge.

La courbe des paléotempératures du Phanérozoïque (ici) a récemment été revue (Scotese et al., 2021) en intégrant de nombreuses données géologiques, par exemple les charbons, tillites, évaporites, calcrètes, bauxites, latérites, mangroves, récifs... et de nombreux minéraux typiques de processus

d'altération (= 'courbe géologique des températures') et géochimiques (isotopes de l'oxygène, du strontium, = 'courbe isotopique des températures'). La température moyenne globale ou 'GAT' ('Global Average Temperature') ou 'courbe géologique' (ou encore 'lithologique') de Scotese et al. (2021), basée sur 8500 proxies géologiques, est figurée en trait noir plein dans la Figure 2 et reprend les courbes de différents auteurs (compilation) :

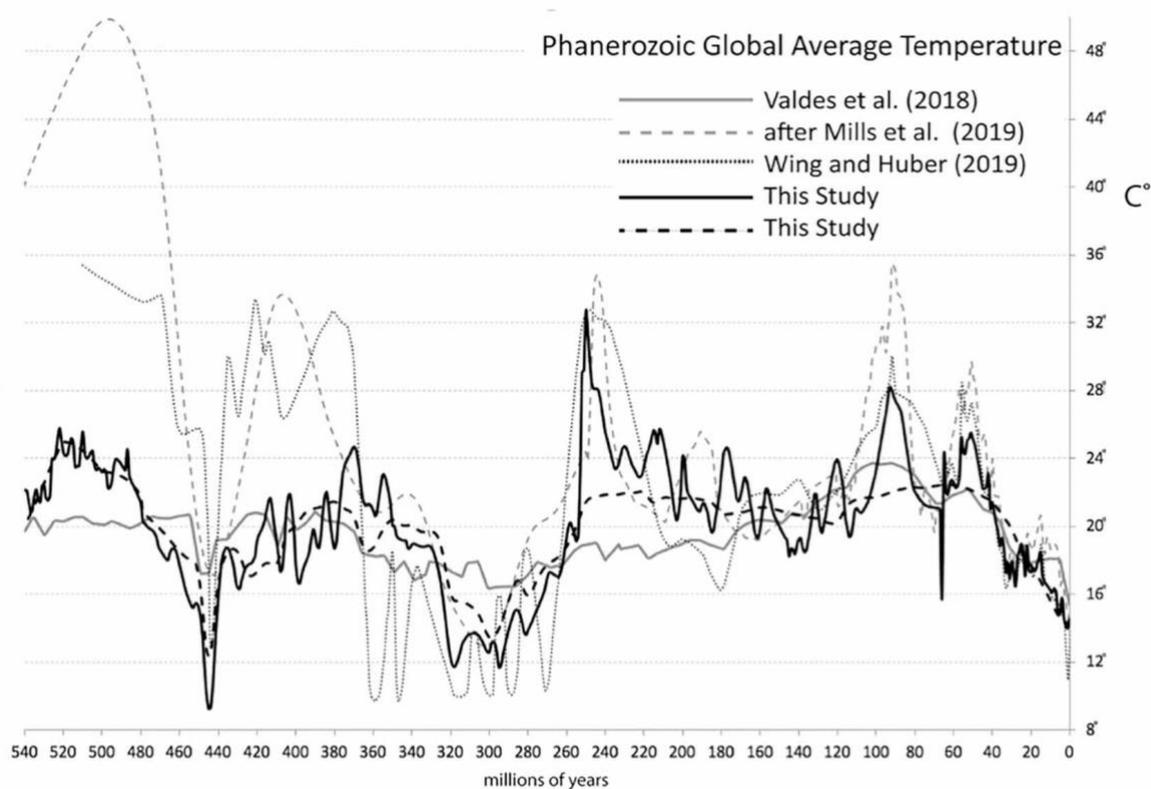


Figure 2 : Estimation de la température moyenne globale ('GAT'), d'après Wing et Huber (2019), Valdes et al., (2018), Mills et al., 2019, Scotese et al., 2021. Liens web donnés dans Scotese et al., (2021). La courbe en tirets noirs ('This Study') donne l'évolution de la GAT sur le long terme, suivant un pas de 5 Ma, et les pics de fluctuations suivant le court terme (pas d'environ 1 Ma). A comparer avec la Figure 3.

La courbe de Scotese et al. (2021) est en bon accord avec celles de Davis (2017) et de la plupart des autres auteurs, excepté pour le Paléozoïque inférieur avec des valeurs de 'GAT' plus faibles que celles généralement déduites des isotopes de l'oxygène (Figure 3 et bibliographie). Les pics maximaux de température ('GAT', Figure 2) s'observent à 245 et 90 Ma. Les températures durant la période glaciaire permo-carbonifère (de 390 à 290 Ma) ont une valeur moyenne d'environ 14°C et fluctuent de 6°C suivant des périodes de 10 Ma. Notons la très forte diminution de la température dans toutes les courbes, lors de la période glaciaire hirnantienne (Silurien, 445 Ma). Finalement Scotese et al. (2021) reconnaissent 24 paires d'intervalles ou 'binômes' de température chaud/froid regroupés en 8 modes climatiques distincts (cf. leurs figures 19, 20 et 21).

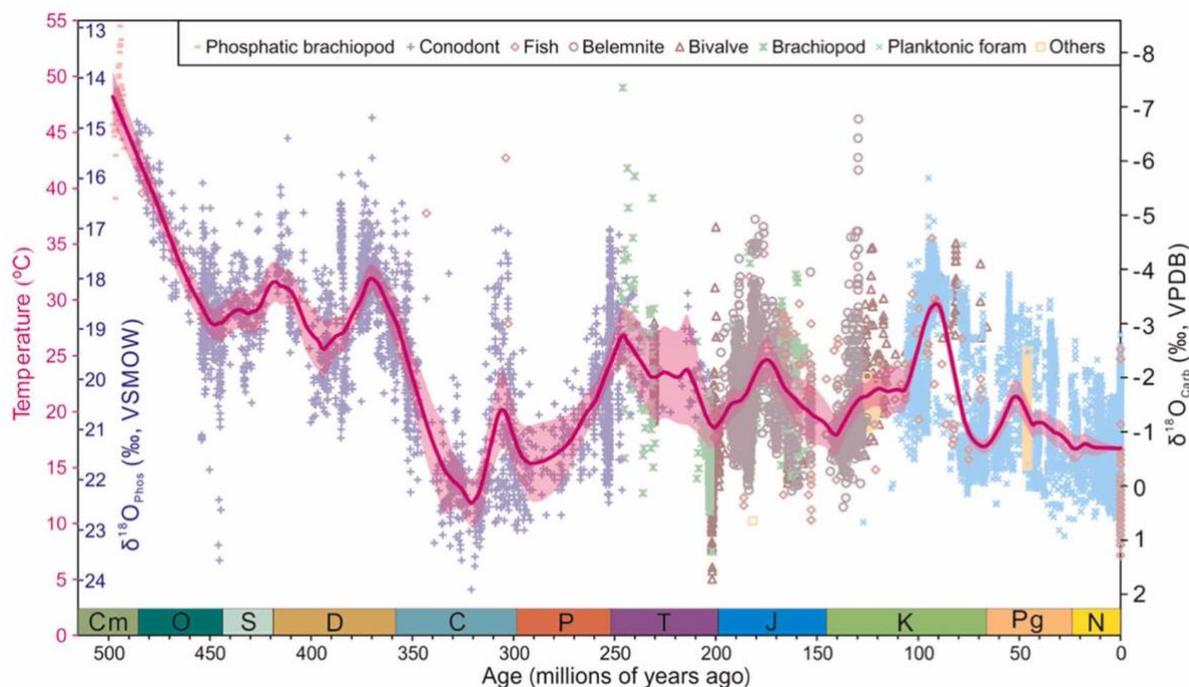


Figure 3 : Valeurs brutes et lissées des isotopes de l'oxygène à partir de fossiles phosphatés et carbonatés permettant d'établir les températures de surface des mers tropicales au cours des 500 derniers millions d'années (modifié d'après Song et al., 2019). L'échelle de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Phos}}$  est utilisée pour les fossiles phosphatés (brachiopodes, conodontes et poissons). L'échelle de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Carb}}$  est utilisée pour les fossiles carbonatés (bélemnites, bivalves, brachiopodes, foraminifères planctoniques et autres). La courbe magenta représente les valeurs moyennes des températures de surface de la mer (regroupées par Ma). La zone ombrée représente les intervalles de confiance à 95 %. La courbe est établie à partir de 22000 analyses isotopiques avec une résolution d'environ 1 Ma (pour la partie 500-60 Ma) et d'environ 100000 ans pour la partie récente commençant il y a 0 Ma. Les courbes des températures 'géologique' (Figure 2) et 'isotopique' (Figure 3) sont donc assez semblables. La courbe dérivée des deux précédentes (Figure 4) montre cependant quelques différences par rapport à la courbe des données isotopiques (Fig. 3) : (i) le Paléogène est plus froid d'environ 1,5°C avec les données isotopiques ; (ii) la période cénomanienne-turonienne (base du Crétacé supérieur) est légèrement plus chaude (courbe isotopique) ; (iii) les périodes fini-carbonifère /triasique, fini-jurassique/début du Crétacé sont plus chaudes de 1,5°C (courbe isotopique), (iv) la période Ordovicien moyen à Dévonien est significativement plus chaude de 6 à 8°C (courbe isotopique), et (v) le Cambrien et Silurien inférieur présentent des températures deux fois plus élevées (env. 50°C vs env. 25°C) dans la courbe isotopique par rapport à la courbe géologique.

Bien que les tendances générales d'évolution de la température soient les mêmes au cours du Phanérozoïque, les divergences notées ci-dessus montrent la difficulté de l'exercice de reconstruction des températures basé sur l'utilisation de différents proxies. Il n'y a rien d'étonnant ici, au contraire on peut se réjouir de l'avancée des connaissances (comparer avec une des premières synthèses et modélisation récentes datant de 2006 (ici).

Notons enfin que des calottes glaciaires sont présentes pour des températures moyennes globales inférieures à 18°C (Figure 4). Rappelons au passage que la température moyenne globale actuelle est de 14,5°C, bien en deçà du seuil de 18°C, ce qui laisse peu de doute sur leur persistance dans le court terme (à l'échelle géologique des temps), ce qui, à son tour, va à l'encontre de messages alarmistes inondant les médias depuis quelques années.

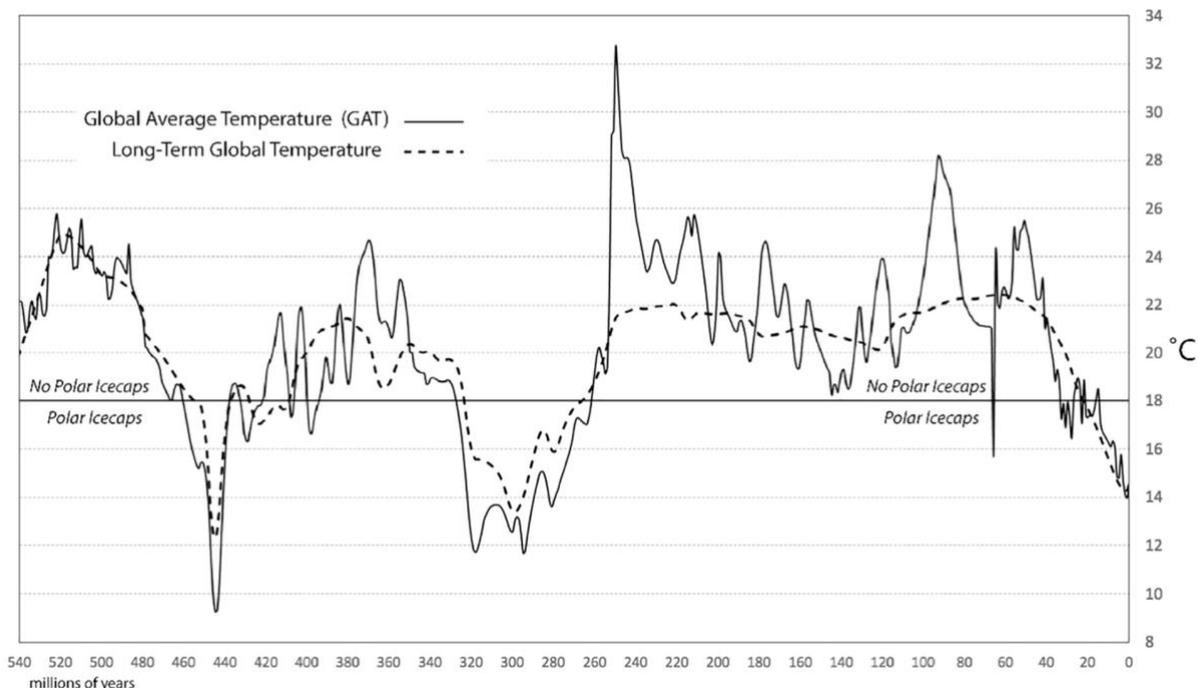


Figure 4 : Température moyenne globale du Phanérozoïque, ligne noire = température moyenne globale, ligne pointillée = changement de température à long terme dérivé des changements du gradient de température pôle-équateur calculé à partir de l'évolution de la superficie des ceintures climatiques de Köppen. Lorsque la température moyenne globale est inférieure à 18°C, de grandes calottes polaires peuvent se former. Lorsque la température moyenne globale est supérieure à 18°C, il est peu probable que de grandes calottes polaires se forment.

**8.3.2. La concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours du Phanérozoïque montre un léger déclin, centré sur une ligne de base de 1000 ppmv avec des fluctuations assez faibles excepté de larges pics de 6000 ppmv vers 200 Ma (Figure 5).**

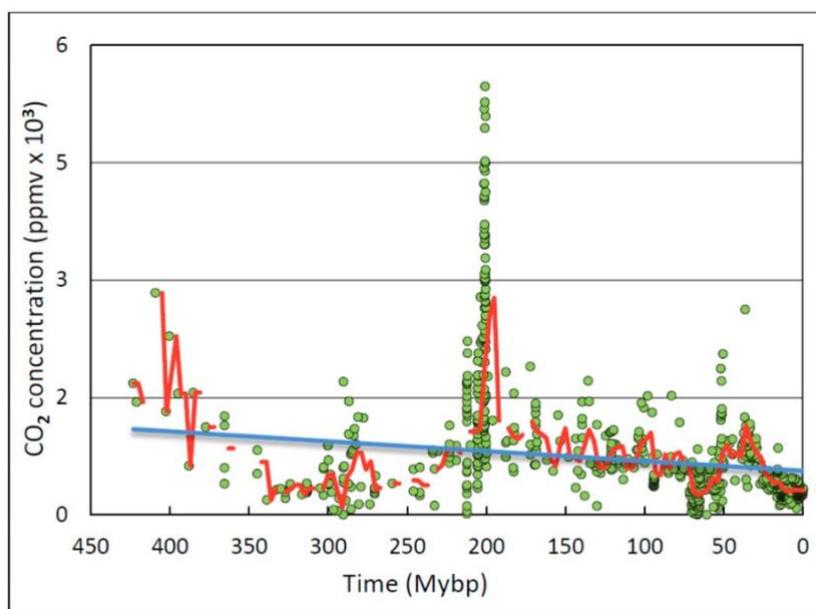


Figure 5 : Concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours du Phanérozoïque. Les données brutes originales (points de données verts, n = 831) proviennent de la base de données compilée par Royer, 2014. La courbe rouge ajustée représente la moyenne mobile 3-6 Ma.

Notons que de nombreuses courbes du CO<sub>2</sub> sont présentes dans la littérature géologique. Elles diffèrent souvent dans le détail, suite aux résolutions temporelles et aux types de proxies utilisés. Elles s'accordent cependant presque toutes sur l'allure générale de la composition atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours du Phanérozoïque avec des concentrations atmosphériques atteignant plusieurs milliers de ppmv (jusqu'à 7000) au Cambrien, et 2000 à 3000 ppm au cours du Mésozoïque (cf. [modèle GEOCARB III](#)).

Pour revenir à l'article de Scotese et al. (2021) repris ci-dessus pour les paléotempératures, il faut noter que cet article ne traite pas particulièrement de la relation entre température et composition atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours du Phanérozoïque. Il se contente de renvoyer à d'autres articles et estime que les *'Long-term changes in temperature (>50 million years) are due to global changes in the rates of volcanic CO<sub>2</sub> degassing associated with seafloor spreading and subduction, as well as long-term changes in the weathering of continents'*. De même pour les évolutions de la température à moyen terme (10-20 Ma), ici les auteurs concluent que *'the causes of medium-term fluctuations in temperature are many and complex'* et donnent toute une série d'événements tectoniques, géologiques, biologiques (notamment les plantes) à prendre en considération. Pour les fluctuations à court terme (quelques Ma), les auteurs montrent que les intervalles chauds sont liés à l'apparition de grandes provinces magmatiques (avec notamment dégazage de CO<sub>2</sub>), et les intervalles froids correspondant à de grands impacts extraterrestres ('bolides' et aérosols sulfatés). Il ressort de l'étude des Scotese et al. (2021) que les mécanismes prépondérants de fluctuations de la température au cours du Phanérozoïque sont principalement liés à la tectonique des plaques à travers la formation et fragmentation de supercontinents (le Gondwanaland ou 'Pannotia' à la fin du Précambrien et ensuite la Pangée permo-triasique, voir [ici](#)).

### **8.3.3. Les courbes température et CO<sub>2</sub> reportées à la même échelle temporelle montrent une apparente dissociation, et même une relation anti-phasique (évolution opposée) (Figure 6).**

On observe par exemple un pic de CO<sub>2</sub> vers 415 Ma et une diminution de la température dans l'intervalle correspondant. La concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique s'est ensuite élevée avec une succession de pics vers 285 Ma associés à une diminution de la température dans le même intervalle (transition permo-carbonifère marquée '2' dans la Figure 6). Mêmes constats pour les périodes plus récentes avec une meilleure résolution, le CO<sub>2</sub> est élevé vers 200 Ma pendant un refroidissement climatique, tout comme à 37 Ma avec aussi une diminution de la température. **Les périodes plus courtes de refroidissement (notées 1 à 10, Figure 6) ne montrent pas, au moins qualitativement, de relation avec des fluctuations de CO<sub>2</sub>.** Les variations de 1000 à 2000 ppmv de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours du Phanérozoïque sont communes et oscillent suivant des cycles relativement réguliers de plusieurs centaines de ppmv d'amplitude suivant des périodes de 10-20 Ma et 60-70 Ma. Des périodes de plus grandes fluctuations du CO<sub>2</sub> sont aussi présentes, (ndt : ces modulations d'amplitude et de fréquence constituent une signature légèrement chaotique du système climatique, une caractéristique qui complique singulièrement l'extrapolation des mesures).

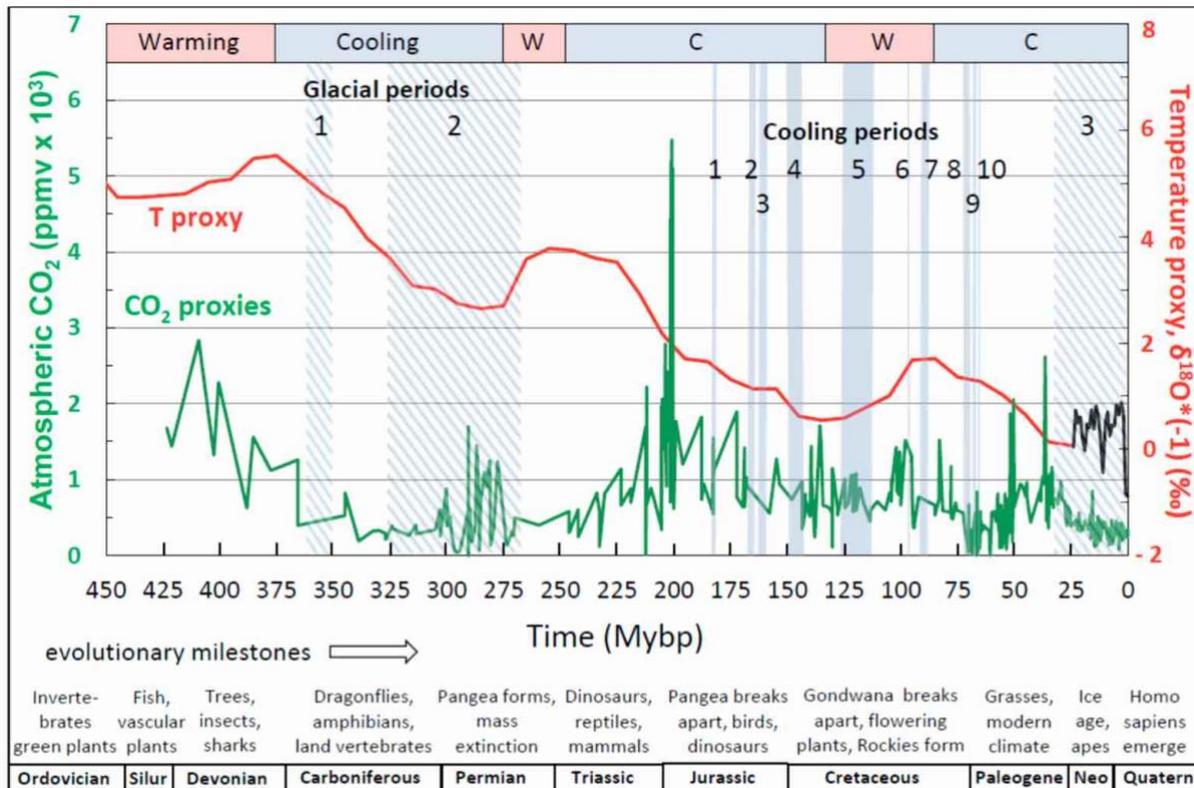


Figure 6 : Mesures de température et de concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère au cours du Phanérozoïque. Les séries temporelles de la température globale (proxy  $\delta^{18}O^*(-1)$ , courbe rouge,  $n = 6680$  de Prokoph et al. (2008) et les proxies de de CO<sub>2</sub> atmosphérique (courbe verte,  $n = 831$ ) proviennent de Royer (2014). La courbe rouge représente les moyennes mobiles de températures brutes, moyennées dans des fenêtres de 50 Ma incrémentées par pas de 10 Ma (la moyenne mobile 10-50 Ma de la courbe verte, Figure 1b). La courbe verte montre les valeurs moyennes de CO<sub>2</sub> dans des fenêtres de 1 Ma, moyennées sur des parties à haute résolution pour le Phanérozoïque le plus récent, et interpolées linéairement sur des portions à basse résolution pour le Phanérozoïque le plus ancien. Les glaciations basées sur des preuves sédimentaires indépendantes sont représentées par des zones hachurées verticales bleues, tandis que les périodes froides supposées sont représentées par des barres verticales bleues. Les principaux cycles de refroidissement et de réchauffement sont indiqués par les barres colorées au sommet, les intervalles géologiques et principaux événements évolutifs sont repris en bas du graphique. **Abréviations** : Silu = Silurien, Néo = Néogène, Quatern = Quaternaire. Pour les périodes glaciaires (en bleu). 1 Dévonien final/début du Carbonifère, 2. Permo-Carbonifère, 3. Fin du Cénozoïque. Pour les périodes de refroidissement : 1. Pliensbachien supérieur, 2. Bathonien, 3. Callovien supérieur à Oxfordien moyen, 4. Tithonique à Berriasien inférieur, 5. Aptien, 6. Cénomaniens moyen, 7. Turonien moyen, 8. Limite Campanien-Maastrichtien, 9. Maastrichtien moyen et 10. Maastrichtien supérieur. Nb : pour l'échelle des temps géologiques, se reporter *ici*.

La régression linéaire des proxies de températures, après filtrage linéaire confrontée à la concentration de CO<sub>2</sub> (Figure 1b, courbe rouge du bas) plaide en faveur d'une faible corrélation négative entre température et CO<sub>2</sub> (Figure 7).

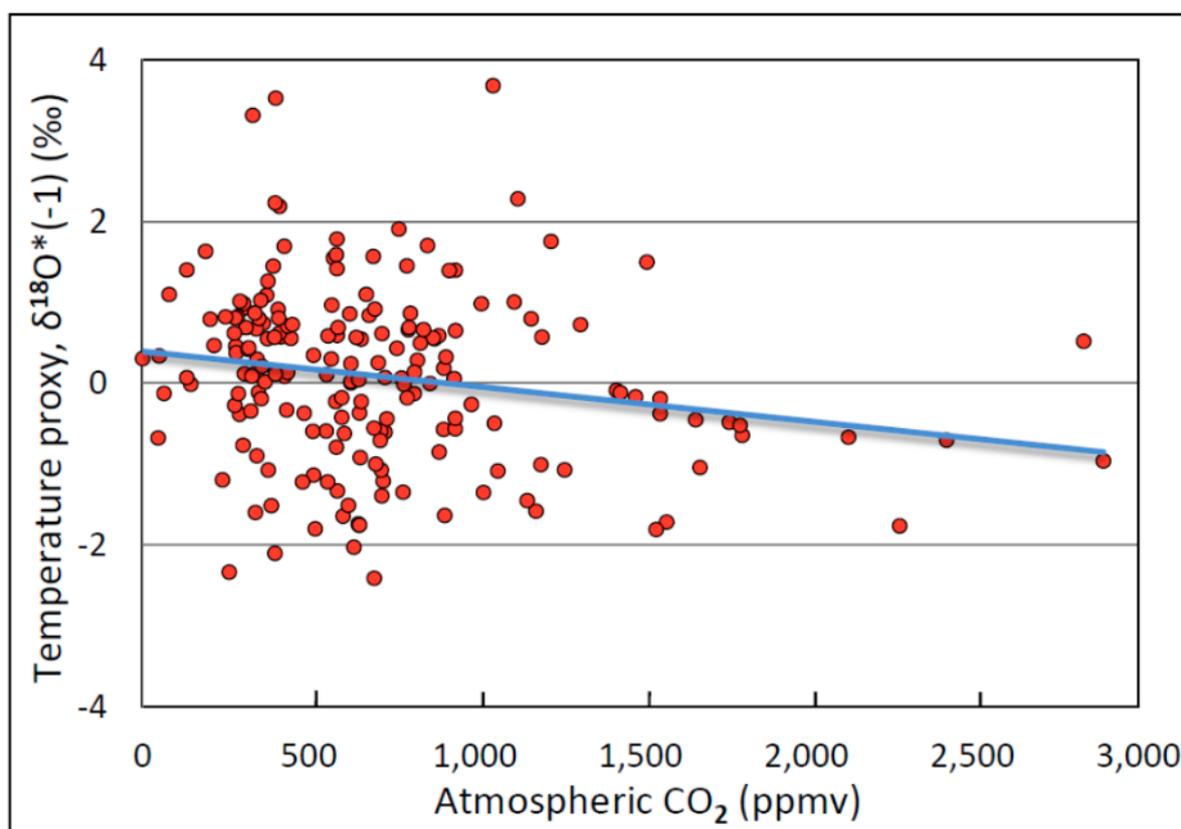


Figure 7 Proxies de température, après filtrage linéaire et moyennés dans des intervalles de 1Ma, de 425 à 0 Ma (Figure 1b), en fonction de la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique. Le coefficient de corrélation négatif ( $R = -0,19$ ,  $n = 206$ ) est discernablement différent de zéro ( $p = 0,006$ ) mais faible et statistiquement non significatif ( $R^2 = 0,036$ ). La ligne de tendance a été ajustée par la méthode des moindres carrés (ndt : on remarquera l'hétérogénéité de la distribution des points le long de l'axe des temps. Par ailleurs, les 5 points les plus anciens prennent un poids considérable dans la détermination de la droite de régression, alors que leur petit nombre rend leur représentativité des conditions prévalant aux temps les plus anciens, questionnable. Il en va de même, par conséquent, pour la pente de la droite de régression).

**8.3.4.** Les coefficients de corrélation entre concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et température ont ensuite été calculés pour 15 intervalles temporels plus courts du Phanérozoïque (intervalles 424-285Ma, 285-135 ..... 80-40, 34-0 in Tableaux 1 et 2, Davis, 2017), comprenant les trois principales périodes glaciaires, les dix périodes de refroidissement globaux (identifiées sur base stratigraphique) et les périodes de transitions réchauffement/refroidissement (Figure 6). La résolution temporelle est de 1 Ma, parfois 59 Ka dans le cas des périodes plus récentes, mieux contraintes stratigraphiquement. Les données brutes et filtrées linéairement ont été analysées par coefficients de corrélation de Kendall et Fisher (non paramétrique ; pour évaluer la légitimité de s'affranchir des hypothèses sous-jacentes au calcul des coefficients de corrélation de Kendall). Des analyses globales et sur des fenêtres temporelles réduites et plus homogènes ont été effectuées. Le résultat est repris sous forme de deux tableaux (Tableaux 1 and 2 de l'auteur, non figurés ici).

**Il en résulte que l'ensemble des données montre que la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et la température sont largement découplées dans la majorité des climats phanérozoïques.**

**8.3.5. Analyse harmonique :** lorsqu'une relation de cause à effet (linéaire) existe entre deux variables, on doit s'attendre à ce que leur spectre de puissance fasse apparaître les mêmes fréquences dominantes. L'analyse spectrale, représentée sous forme de périodogramme (l'axe horizontal étant la période des composantes périodiques et pas leur fréquence) donne des résultats différents pour le CO<sub>2</sub> et la température avec des pics à 2,6 ; 3,7 ; 5,3, 6,5 et 9,4 Ma pour le CO<sub>2</sub>, et

pour la température des pics de plus faible amplitude et de périodes correspondant à 2,6 ; 3,9 et 5,2 Ma, assez proches de certains pics de CO<sub>2</sub>, mais pas de tous, et d'autres pics ayant des périodes plus longues (6,0 ; 6,8 ; 7,8 ; 11,3 et 14,6 Ma) et qui ne correspondent à aucun pic de CO<sub>2</sub>. **Le fait que les périodogrammes entre proxys CO<sub>2</sub> et proxys température présentent des fréquences différentes au cours du Phanérozoïque montre que la plupart des cycles respectifs sont dissociés (Figure 8).** Pour trois des pics, le doute est permis.

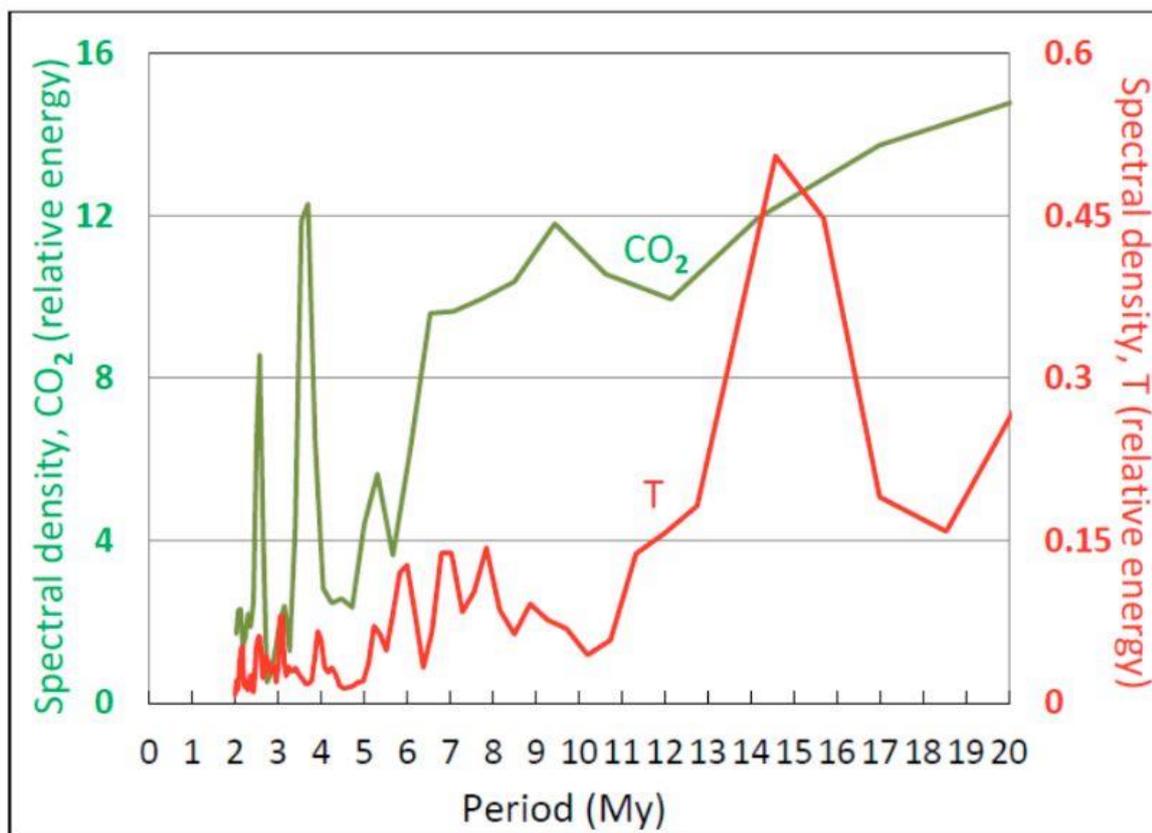


Figure 8 : Périodogrammes de puissance spectrale du CO<sub>2</sub> atmosphérique et de la température au cours du Phanérozoïque. Les courbes verte et rouge donnent les profils de densité spectrale du CO<sub>2</sub> et de la température, respectivement. Le périodogramme de température est établi à l'aide de données de proxys de température filtrées linéairement (ndt : l'allure du périodogramme de CO<sub>2</sub> révèle la non stationnarité de ces données). Le test de Fisher permet de juger si les pics observés sont significativement différents du corrélogramme obtenu avec un bruit blanc. Le test est basé sur l'estimation d'un coefficient kappa, mesurant le rapport du plus grand pic sur l'amplitude moyenne du signal. Un seuil de signification statistique est associé à kappa. Les résultats des tests montrent que pour la période 85 Ma à 0 Ma : kappa = 12.57 et la probabilité que les données soient indiscernables d'un bruit blanc est de  $1.96 \cdot 10^{-5}$ . Pour la période s'étendant de 522 à 0 Ma, les valeurs respectives sont de 28.98 et  $2.0 \cdot 10^{-13}$ .

**Les relevés de température et de CO<sub>2</sub> présentent donc une signature et des fluctuations d'amplitude discernables d'un bruit blanc.**

**8.3.6.** L'absence de corrélation entre la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique et la température durant le Phanérozoïque va à l'encontre du rôle généralement admis du CO<sub>2</sub> sur la température, par l'intermédiaire du forcing radiatif. **Les résultats précédents mettent ainsi en doute qu'un forcing radiatif ait pu jouer sur la température, contrairement à ce que la littérature affirme notamment pour les cycles glaciaires s'étendant durant une partie du Pléistocène de 800 à 400 Ka (Petit et al., 1999 ; Jouzel et al., 2007).** Cet apparent paradoxe peut-être appréhendé en évaluant une mesure fonctionnelle plus directe de l'effet de réchauffement de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la température, par le truchement d'un forçage radiatif (RF), quantifié à l'aide de la relation

logarithmique bien connue entre le RF induit par le CO<sub>2</sub> atmosphérique (RF<sub>CO2</sub>) et sa concentration atmosphérique (Arrhénius, 1896). **La courbe logarithmique RF<sub>CO2</sub>, établie il y a plus d'un siècle implique qu'un effet de saturation, ou de rendements décroissants, affecte le pouvoir marginal de forçage du CO<sub>2</sub> atmosphérique, qui diminue à mesure que la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente.**

L'auteur émet l'hypothèse que la baisse consécutive du forçage absolu et marginal à des concentrations élevées de CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours du climat phanérozoïque pourrait expliquer l'absence de corrélation discernable entre la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et la température, car de grandes fluctuations de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> auraient alors peu d'effet sur le forçage marginal. Pour évaluer cette possibilité, la courbe de forçage RF<sub>CO2</sub> a d'abord été établie en utilisant le code d'absorption/transmittance atmosphérique MODTRAN (Figure 8a in Davis 2017). Si  $\Delta\text{RF}_{\text{CO}_2}$  est un indicateur plus direct de l'impact du CO<sub>2</sub> sur la température que la concentration atmosphérique, comme le suppose l'hypothèse, alors on pourrait s'attendre à ce que la corrélation entre  $\Delta\text{RF}_{\text{CO}_2}$  et la température au cours du phanérozoïque soit positive et statistiquement validée (Figure 9 in Davis 2017), (ndt : sans que cela permette de juger d'un lien de causalité, la corrélation étant une condition nécessaire mais pas suffisante de causalité).

Des tests de causalité linéaire existent, comme les tests de Granger, mais n'ont pas été utilisés par Davis). Cette analyse a consisté à calculer la moyenne de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> dans des intervalles de 1 Ma portant sur le Phanérozoïque récent et à calculer la moyenne ou à interpoler les valeurs de CO<sub>2</sub> au Phanérozoïque plus ancien. En raison de la taille relativement importante de l'échantillon, le coefficient de corrélation de Pearson est statistiquement positivement discernable mais faible ( $R = 0,16$ ,  $n = 199$ ), avec pour conséquence que seule une petite fraction (2,56 %) de la variance de la température peut être expliquée par celle de  $\Delta\text{RF}_{\text{CO}_2}$  (Figure 9 in Davis, 2017). Statistiquement au niveau de confiance 95%, l'effet de  $\Delta\text{RF}_{\text{CO}_2}$  sur la température est non significatif. Le coefficient de corrélation peut donc être considéré comme négligeable ( l'intervalle de confiance à 95% est statistiquement « significatif » ; à 99% il est « très significatif », par convention dans le jargon des statisticiens).

**8.3.7. L'approche classique pour détecter des composantes cycliques périodiques dans les séries temporelles est l'analyse spectrale comme présentée et illustrée ci-dessus (Figure 8). Alternativement, une analyse qualitative des séries chronologiques basée sur le calcul des fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée peut être utilisée pour identifier des périodicités significatives (non aléatoires) et de plus, d'identifier les relations de phase entre variables cycliques, relations qui sont plus difficiles à mettre en évidence à partir de l'analyse spectrale.**

Un contrôle qualitatif des séries temporelles de  $\delta^{18}\text{O}^*(-1)$ , de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et de  $\Delta\text{RF}_{\text{CO}_2}$ , en particulier pendant la période à haute résolution et relativement 'horizontale' de 175 à 80 Ma (Figure 9) montre une oscillation apparente non aléatoire des trois variables climatiques au fil du temps. Le proxy de fluctuation de T ( $\delta^{18}\text{O}^*(-1)$ , courbe rouge sur les Figures 1 et 9 est étroitement couplé avec des pics de fluctuation du rapport isotopique du strontium <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (flèches violettes sur la Figure 9) tel que rapporté par Prokoph et al., 2008 et estimé ici visuellement. Les rapports isotopiques du strontium sont généralement interprétés comme un bon indicateur de l'afflux fluvial dans l'océan, lié à l'érosion continentale, donc au changement climatique (Parrish, 1998) et finalement à la température (Figure 9).

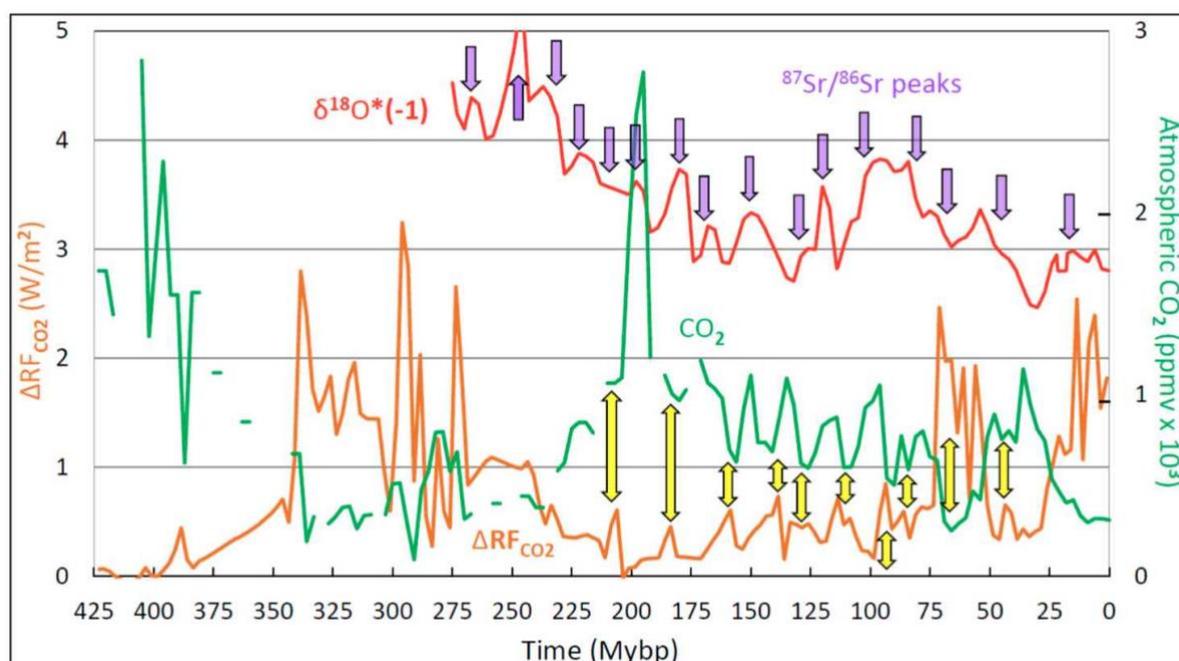


Figure 9 : Séries temporelles d'indicateurs de température, de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et de  $\Delta RF_{CO_2}$  pour le Phanérozoïque. Les flèches violettes correspondent aux pics du rapport isotopique du strontium déterminés indépendamment à partir de l'analyse visuelle des séries temporelles (Prokoph et al., 2008). Les proxies de température (courbe rouge) proviennent de Prokoph et al. (2008) et celles de CO<sub>2</sub> (courbe verte) de Royer (2014) sont présentées suivant un pas de 3 à 6 Ma. Les flèches jaunes à double tête mettent en évidence la relation anti-phasique attendue entre la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et le forçage marginal calculés pour les latitudes tropicales par ciel clair. L'échelle de proxies de température est modifiée, pour des raisons de lisibilité, par un décalage vertical constant l'échelle verticale étant autrement conservée (se reporter à la Figure 6 pour l'échelle correcte des proxies de température). Dans ce graphique les variables climatiques sont codées par couleur : le rouge représente le l'indicateur de température,  $\delta^{18}O^*(-1)$ , le '-1' indiquant une inversion de signe du proxy pour que les variations correspondent à celles de la température ; le vert les proxies de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique, convertis en proxies de température,  $\delta^{18}O^*(-1)$  ; le vert représente les proxies de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique (ppmv) et l'orange le forçage marginal calculé pour chaque ppmv de CO<sub>2</sub> atmosphérique en chaque point de données de concentration de CO<sub>2</sub> à partir de l'équation exponentiel la mieux ajustée pour les régions tropicales par temps clair (cf. Figure 8b in Davis, 2017,. (ndt : afin d'uniformiser la variance des données en fonction du temps, on a classiquement recours à une transformée lambda : soit une transformation logarithmique, soit une relation exponentielle, le choix étant optimisé en minimisant les résidus de l'ajustement, par une méthode dérivée des moindres carrés, ou par recherche du maximum de vraisemblance [AIC, AICc, BIC]). Nb Les références de la légende sont reprises sous forme de liens dans le texte.

L'autocorrélation sur la période de 174 à 0 Ma met en évidence une périodicité non aléatoire pour les trois principales variables évaluées ici (Figure 9) comme suggéré à partir de la série temporelle correspondante (Figure 10). Le profil de corrélation suivant l'ordre croissant de décalage pour  $\delta O^*(-1)$  (Figure 10a) est qualitativement (Figure 10b) différent du profil de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique (Figure 10b) et de  $\Delta RF_{CO_2}$  (Figure 10c). Les profils de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et de  $\Delta RF_{CO_2}$  sont similaires, en accord avec la dérivation (transformation logarithmique) du second à partir du premier. Dans les profils de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et de  $\Delta RF_{CO_2}$ , les cycles courts et longs peuvent être détectés qualitativement par la modulation des coefficients de corrélation correspondants, délimités par des flèches à double tête (Figures 12-16 in Davis, 2017).

Pour l'autocorrélation sur une plus longue période de temps, les cycles courts et longs de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique sont en moyenne de 16,9 Ma et 66,8 Ma respectivement, semblables à ceux des  $\Delta RF_{CO_2}$  (17,2 et 66,2 Ma). La variation cyclique des coefficients d'autocorrélation de valeurs négatives à positives, à mesure que le pas de décalage s'accroît, révèle une périodicité non aléatoire pour chacune de ces trois variables. Les cycles dominants du forçage et de la température sont de périodes d'environ 15 Ma, une périodicité déjà identifiée dans les périodogrammes (Figure 8).

Cette première analyse des fonctions d'autocorrélation conforte les résultats obtenus par l'analyse harmonique : il n'y a pas de lien de causalité évident entre température (après filtrage linéaire), CO<sub>2</sub> ou le logarithme du CO<sub>2</sub> (indicateur de forcing). Et par ailleurs, de façon évidente, de par l'existence de la relation semi-empirique entre le CO<sub>2</sub> atmosphérique et le forçage radiatif, les deux fonctions d'autocorrélation correspondantes présentent une grande similitude tant dans la distribution des amplitudes que dans leur décalage (les pics et les creux sont synchrones dans l'un et l'autre autocorrélogramme).

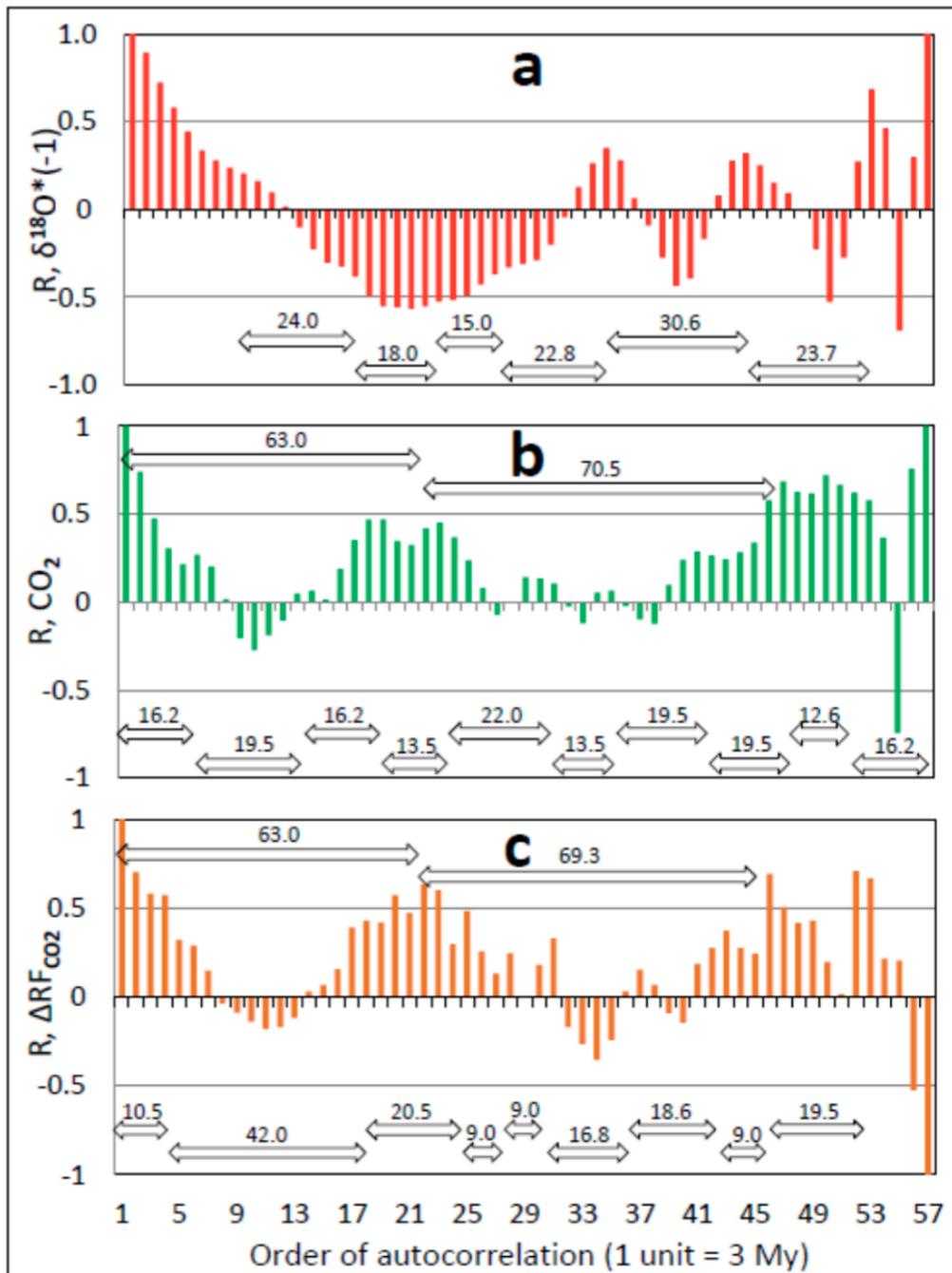


Figure 10 : Coefficient d'autocorrélation R des variables climatiques des séries temporelles du Phanérozoïque s'étendant de 174 Ma à aujourd'hui. Les profils d'autocorrélation révèlent une périodicité non aléatoire de chacune des variables ; (a)  $\delta^{18}O*(-1)$ . Moyenne de la durée d'un cycle, soit 22,4 Ma ; (b) Concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>, soit 16,9 Ma pour le cycle court et 66,8 Ma pour le cycle long ; (c)

$\Delta RF_{CO_2}$  (17,2 et 66,2 Ma pour les cycles court et long). Les doubles flèches horizontales donnent les durées approximatives des cycles et sous-cycles identifiés visuellement.

Une analyse similaire d'autocorrélation sur des périodes de meilleure résolution temporelle (exemple de 174 à 87 Ma, Figure 13 in Davis, 2017), conduit aux mêmes conclusions : les trois variables climatiques présentent une cyclicité non aléatoire, les fluctuations de température ne correspondent pas à celles du CO<sub>2</sub> ni du forçage radiatif, les cyclicités de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et de  $\Delta RF_{CO_2}$  sont qualitativement semblables. Les cyclicités, pour cet intervalle à haute résolution, sont ainsi respectivement de 16,8 Ma ( $\delta^{18}O^*(-1)$ ), 18,0 Ma (concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>) et 19,0 Ma ( $\Delta RF_{CO_2}$ ). Les trois fonctions de corrélation croisée entre proxys de température, CO<sub>2</sub>, et forcing radiatif sont représentées aux figures 14, 15 et 16 de Davis 2017, [ndt : malheureusement sans les intervalles de confiance correspondant à un bruit blanc gaussien, ni utilisation du test statistique 'porte-manteau' correspondant de Ljung-Box.

Ce qui empêche de se prononcer sur la signification des pics observés. Il aurait également été utile d'avoir la partie symétrique des fonctions de corrélation croisée, en particulier pour les fonctions de corrélation croisée impliquant la température ; en effet si le CO<sub>2</sub> ou le forcing étaient une cause (même partielle) du changement de température, la fonction de corrélation croisée devrait présenter un pic du côté négatif, la cause devant toujours précéder l'effet, ou à tout le moins être synchrone, une situation que l'on attend du 3ème corrélogramme, la transformation logarithmique étant instantanée et ne produisant donc aucun délai). Enfin les pics observés pour les décalages les plus importants pourraient être imputables à un effet de bord. La bonne pratique réclamant que la période la plus longue qui soit détectable sans « effet de bord » ne doive pas dépasser un sixième de la longueur de la fenêtre de mesure.]]

#### 8.4. Discussion

##### **8.4.1. Les principales conclusions de cette étude sont que ni la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> ni le $\Delta RF_{CO_2}$ ne sont corrélés avec la température durant la majeure partie du Phanérozoïque.**

Un ensemble de 136 coefficients de corrélation ont été calculés entre la température et la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>, et entre la température et  $\Delta RF_{CO_2}$  lors des transitions majeures du climat phanérozoïque. Les corrélations ne sont pas significatives pour près de moitié, et négatives pour l'autre moitié. La corrélation (linéaire) est une condition nécessaire mais pas suffisante de causalité (linéaire). Elle n'implique pas forcément la causalité, mais son absence implique l'absence de causalité (Tufte, 2006). **La constatation que la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique et  $\Delta RF_{CO_2}$  ne sont généralement pas corrélés avec la température, implique donc soit que ni l'une ni l'autre des variables n'a exercé d'influence causale significative sur la température au cours du Phanérozoïque, soit que les proxys utilisés ne reflètent pas assez précisément les variables évaluées et que leur valeur ne peut se distinguer d'un bruit blanc.**

Ces résultats appuient une conclusion publiée antérieurement, et basée sur l'étude du climat paléozoïque à savoir que « le climat global peut être indépendant des variations de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone » (Came et al., 2007). La présente étude montre cependant en outre que la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique passée oscille sur un cycle de 15-20 Ma avec une amplitude de quelques centaines à plusieurs centaines de ppmv. Un second cycle plus long oscille de 60-70 Ma. Comme discuté plus loin dans l'article de Davis, mais non repris ici, les pics des cycles d'environ 15 Ma s'alignent étroitement avec les périodes d'extinctions massives identifiées au cours du phanérozoïque, invitant à des recherches plus approfondies sur la relation entre la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et l'impact de l'activité humaine sur la biodiversité. Nous renvoyons au récent

article de Hannisdal et Peters (2021) qui montrent que la biodiversité phanérozoïque est fortement liée aux variations des conditions rédox (par exemple à la fin du Dévonien, Cao et al., 2021) de l'océan et aux fluctuations à long terme du niveau marin, impliquant les cycles du soufre et du carbone, et finalement à la tectonique des plaques *sensu lato* (Cermeno et al., 2017, Roberts et Mannion, 2019).

**8.4.2.** Six coefficients de corrélation entre la température et  $\Delta RF_{CO_2}$  ont été calculés dans l'intervalle 34 à 0 Ma caractérisés par les meilleures résolutions temporelles possibles (Phanérozoïque le plus récent). Les coefficients de corrélation entre la température et  $\Delta RF_{CO_2}$  sont positifs (modérés à moyens de 0,26 à 0,63) alors que ceux entre la température et la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique pour ce même intervalle sont négatifs (modérés à élevés de -0,26 à -0,73). La température et la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique étant plus faibles au cours du Phanérozoïque récent suggèrent un plus important forçage par le CO<sub>2</sub> qui exerce ainsi une influence plus forte sur la température et le climat. **Cette influence de CO<sub>2</sub> sur la température est donc possible lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique est faible.**

Dans ce contexte il semble que les cycles glaciaires récents (41 Ka) fonctionnent comme ceux du Phanérozoïque récent.

Cette conclusion ne peut être validée actuellement pour des séries plus anciennes faute de résolution temporelle suffisante (cycles en moyenne de  $\pm 83$  Ka pour l'ensemble du Phanérozoïque, à comparer aux cycles de  $\pm 50$  Ka du Phanérozoïque récent) bien que l'analyse d'une dizaine de cycles de plus grande étendue (59-199 ka) semblent aller dans ce sens (Davis, 2017).

**8.4.3.** Trois récentes études (*in* Davis, 2017) portant sur le Phanérozoïque récent, à savoir le Cénozoïque (pour la période de 50 à 34 Ma, soit < 3% du Phanérozoïque) ont conclu que la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique pilotait la température. D'après Davis (2017) ces études sont à écarter car elles ne s'appuient que sur un seul proxy (isotopes du bore) obtenu à partir d'une seule source (foraminifères planctoniques) et d'un seul endroit (sud de la Tanzanie). Ce résultat n'est pas confirmé par l'analyse à partir de la data base de Davis (2017) pour la même période (50 à 34 Ma), et donne un coefficient de corrélation négatif ( $R = -0,32$ ) entre les deux grandeurs. **Ceci montre à quel point une étude locale ou régionale ne peut suffire pour traiter des relations à l'échelle globale.**

**8.4.4.** Finalement les faibles ou absences de corrélations entre la température, la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et  $\Delta RF_{CO_2}$  suggèrent que d'autres variables ou processus non identifiés sont à l'origine de l'essentiel (> 95%) de la fluctuation de la température au cours du Phanérozoïque. **Les cycles de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique étant indépendants de ceux de la température, les processus à leur origine doivent être différents.** Dans ce contexte des émissions périodiques de CO<sub>2</sub> peuvent être liées à l'activité volcanique et à l'ouverture des dorsales océaniques à partir du manteau terrestre (Vérard et al., 2015). Les données présentées par Davis (2017) rejettent ces hypothèses pour le contrôle de la température, car les quantités de CO<sub>2</sub> émises dans l'atmosphère par ces processus devraient être beaucoup plus faibles pour permettre un forçage significatif de la température par  $\Delta RF_{CO_2}$ . L'auteur encourage la recherche d'autres mécanismes pouvant rendre compte de fluctuations de la température d'environ 4°C sur une période de 135-150 Ma. Au niveau des facteurs pouvant jouer le rôle de facteur causal, la littérature « alternative au GIEC » cite des fluctuations d'activité solaire, résultant partiellement de la position du soleil par rapport au centre de masse du système solaire (et donc des positions respectives des planètes, en particulier des plus massives), ce qui influe son moment angulaire et son champ magnétique contrôlant le flux de rayons cosmiques incidents sur Terre (et qui seraient à l'origine de la nucléation des nuages), la couverture nuageuse jouant à la fois un rôle de persienne le jour et de couverture la nuit, la présence d'aérosols

résultant d'éruptions volcaniques ou de chutes occasionnelles de météorites, etc.. **Notons que les fluctuations du CO<sub>2</sub> peuvent effectivement être liées à l'activité volcanique et à l'ouverture des dorsales océaniques, mais cela n'a aucun impact sur la température globale.**

**8.4.5.** La diminution graduelle de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et de la température au cours du Phanérozoïque peut en principe s'expliquer par l'augmentation de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans une eau de mer plus froide (Weiss, 1974, également (cf. loi de Henry et vant'Hoff). Notons cependant que l'effet de la solubilité du CO<sub>2</sub> sur la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours des âges glaciaires récents est faible (variations de 30 ppmv) par rapport à ce qu'elle est au Phanérozoïque (variations de quelques centaines de ppmv) malgré des changements comparables de température. D'autres processus (altération des silicates, soulèvement tectonique, ralentissement de la tectonique des plaques...) peuvent aussi participer à cette baisse de CO<sub>2</sub> atmosphérique dans les périodes récentes, mais il n'en reste pas moins vrai que la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique est au plus bas pour les temps récents (voir notamment GEOCARB III mentionné précédemment). **Selon Davis (2017), aux concentrations atmosphériques élevées de CO<sub>2</sub> du Phanérozoïque plus ancien le forçage marginal du CO<sub>2</sub> devient négligeable (Figure 8b de l'auteur) et de fortes variations du CO<sub>2</sub> n'ont que peu d'effet sur la température.** Il en résulte un découplage entre la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et la température, également mis en évidence par Caldeira et Kasting (1993).

A nouveau ceci explique que les fortes variations de température globale des cycles glaciaires sont associées à de faibles fluctuations de la solubilité du CO<sub>2</sub> atmosphérique, estimées à 30 ppmv (Sigman et al., 2010). Le CO<sub>2</sub> et la température sont donc découplés au cours du Phanérozoïque. Lors des maxima glaciaires, avec une concentration (naturelle) atmosphérique de CO<sub>2</sub> très basse de 180 ppmv (Petit et al., 1999 ; Jouzel et al., 2007), le forçage marginal de la température par le CO<sub>2</sub> était de 94% de son maximum (modélisation MODTRAN), et diminuait drastiquement avec l'augmentation de la teneur de CO<sub>2</sub> avec 54,5% de son maximum pour une teneur de 300 ppmv lors de l'interstade post-glaciaire. La température durant les différents interstades qui se sont succédés était nettement plus élevée que celle d'aujourd'hui, qui présente pourtant un taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique bien plus élevé (> 415 ppmv). Ainsi selon Marsh (2014) *'Carbon dioxide appears to play a very limited role in setting interglacial temperature'*.

**8.4.6.** Sans entrer dans les détails (cf. premier point, pp.29-30 de Davis, 2017), **une des conséquences de cette diminution exponentielle du forçage marginal de la température par le CO<sub>2</sub> atmosphérique est que l'augmentation des émissions actuelles de CO<sub>2</sub> anthropiques auront un faible impact sur la température globale.** Ce point fait l'objet de nombreuses discussions aujourd'hui car il est d'importance pour ceux qui tentent de prévoir l'évolution future de la température sur la Terre. Selon Witteman (in Le Pair, 2021) un doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> (TCR) provoquera une augmentation de presque 0,2°C ou même moins (ici). D'autres auteurs estiment cette augmentation à 4°C. Cette sensibilité climatique transitoire (TCR) est cependant estimée inférieure à 1°C par la plupart des auteurs (ici). **Dans cette optique si le réchauffement se poursuit et que le CO<sub>2</sub> ait un rôle, à raison d'une augmentation d'environ 2 ppmv par an, la teneur actuelle (417 ppmv en 2021) sera doublée en 2190 et accompagnée d'une augmentation d'environ 0,8°C.**

Si le CO<sub>2</sub> n'a aucun rôle important ou aucun rôle du tout (par exemple ici), comme le suggère la géologie, les fluctuations de températures sont à rechercher dans les processus naturels. Une abondante littérature en fait état et ne peut être développée ici au risque de s'écarter du sujet de départ (se reporter par exemple ici et ici, et aussi les nombreux articles de SCE, voir ici).

**8.4.7.** Comme indiqué d'entrée de jeu dans cet article avec la présentation des deux principaux résultats, nous ne discuterons pas du deuxième résultat concernant la biodiversité (=deuxième résultat plutôt inattendu : *'limiter les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> n'est d'aucune utilité pour limiter le réchauffement actuel, mais serait essentiel pour préserver la biodiversité'*). Notons simplement que selon l'auteur (p.30) mentionne de **'Possible links between past mass extinction and the carbon cycle therefore an urgent future research direction (is suggested)'**. Autrement dit, rien n'est établi, et effectivement cela demande une recherche qui prendra sans doute du temps, même si des pistes sérieuses existent déjà (Courtilot et Renne, 2003). Quelques références pertinentes sont données ci-dessus dans la section 4a. N'allons pas trop vite pour conclure, comme ce fut le cas avec le CO<sub>2</sub> (ici).

## 8.5. Conclusion

Cette étude montre que les données issues de la géologie sont extrêmement précieuses pour comprendre le fonctionnement de notre planète et particulièrement son évolution climatique. Les données géologiques sont multiples, leur analyse fait appel à de nombreuses disciplines (chimie, physique, géographie, biologie, statistique, traitement de données ...) et les moyens mis en œuvre sont de plus en plus sophistiqués (géochimie isotopique, susceptibilité magnétique biomarqueurs, télédétection, statistique, etc). Cette géologie 'multidisciplinaire' a fait de très grands progrès lors des dernières décennies et nous offre une ébauche de plus en plus détaillée et convaincante de l'histoire de notre planète. En ce qui concerne le thème développé dans le présent article on peut d'ores et déjà affirmer que le climat a sans cesse fluctué engendrant des 'paysages' (déserts, glaciers etc.) se superposant à ceux résultant de la tectonique des plaques.

**La situation actuelle n'est donc qu'une configuration particulière parmi tant d'autres et n'a donc rien d'exceptionnel. Les températures actuelles n'ont rien de 'dramatique' par rapport à d'autres, beaucoup plus élevées ou plus basses qui eurent cours lors de l'histoire géologique, de même pour la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> qui a été le plus souvent bien plus élevée qu'actuellement.** Dans le fameux débat climatique actuel, on passe trop souvent sous silence que le CO<sub>2</sub> suit les variations de température, et que le réchauffement actuel se mesure en dixièmes de degré par décennies, alors qu'en un point donné, la température peut varier de plus de 20 degrés entre le jour et la nuit, et que que la planète a souvent connu des variations de température 10 à 20 fois plus élevées pour un intervalle de temps équivalent, comme durant le Pléistocène (Rousseau et al., 2021 et ici), sans que la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> ne présente un lien avec la variation de température. L'analyse de Davis (2017) montre que cela n'est pas étonnant et est même attendu.

La recherche ne s'arrêtant jamais, d'autres proxies viendront compléter ce tableau qui ne modifieront en rien le fait que nous vivons un réchauffement banal et très modéré. La limite fondamentale de l'analyse – et donc de l'interprétation – géologique restera toujours le niveau de résolution temporelle des séries et événements partiellement ou totalement enregistrés (ou également effacés). Dans l'espace géographique des affleurements (et forages) des séries géologiques, ce problème clé de la résolution stratigraphique ou temporelle se résume surtout à celui des corrélations temporelles. Le choix de proxies est donc important et l'outil statistique doit valider leur pertinence et la précision de leur calibrage. Un choix erroné de proxies, de même qu'une mauvaise utilisation de l'outil statistique, peuvent conduire à des interprétations tout à fait discutables de la température et de son évolution, comme par exemple, tout près de nous la fameuse courbe en hockey de Mann et al. (1998) pour le dernier millénaire. Cette courbe fait encore couler beaucoup d'encre (ici, ici et figure 8 in SCE) malgré sa réfutation (notamment ici et ici

## 9 L'Odyssée climatique d'Homo sapiens

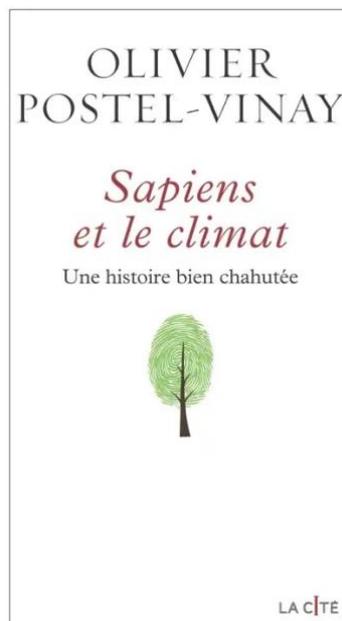
Mis en ligne SCE : 04.11.2022

### 9.1. Introduction

A l'heure du changement (ou dérèglement pour certains) climatique actuel, il est grand temps de lire l'excellent livre d'Olivier Postel-Vinay, *Sapiens et le climat, une histoire bien chahutée*, consacré aux changements climatiques qu'a connus notre espèce depuis qu'*Homo* est devenu *sapiens*, c'est-à-dire depuis près de 233 000 ans ou 233 ka. Que nous apporte ce livre?

**Il nous montre que notre espèce fut confrontée tout au long de son histoire et de son évolution à des changements climatiques brutaux de durées et intensités sans commune mesure avec ceux de notre époque.**

Cet essai, d'une minutie rare, est argumenté de récits et faits historiques bien documentés et complétés chaque fois que cela est possible de données scientifiques empruntant pour l'essentiel à l'archéologie, la biologie, la chimie, la physique, la géographie et la géologie. Cette mise en perspective dresse un tableau détaillé des changements climatiques auxquels ont été confrontés les premiers hommes (chasseurs-cueilleurs), ensuite les premières civilisations et enfin nos sociétés modernes.



L'auteur parcourt l'espace temporel et le monde avec une précision de métronome, et 'cerise sur le gâteau' tente une synthèse (dernier chapitre) des faits historiques à la lumière des données scientifiques les plus récentes. **Même s'il s'agit parfois d'hypothèses, il s'en dégage une puissante vision montrant à quel point les changements climatiques furent et sont la règle dans l'histoire récente de notre espèce, comme ils le furent tout au long de l'histoire géologique de notre planète.** L'auteur est d'une extrême prudence en démêlant au mieux ce qui est lié à l'activité même

de l'homme (par exemple pratiques agricoles, gestions forestières, politiques environnementales ...) par rapport aux processus climatiques. **Il ne s'agit donc pas d'un essai avec un *a priori* climatique... susceptible de tout expliquer.**

Il n'est pas possible de reprendre les faits historiques concernant toutes les civilisations (asiatiques, australiennes, américaines nord et sud, africaines ...) abordées par l'auteur, et je me concentrerai pour l'essentiel sur l'Europe *sensu lato*, et régions proches, dont l'histoire, parfois le climat, nous sont familiers.

## 9.2. Les datations historiques : un casse-tête

Mais avant d'analyser ces périodes, une précision s'impose concernant les différentes manières de 'compter' le temps par rapport à aujourd'hui, c'est-à-dire sur le mode de fonctionnement de la chronologie récente, mode assez confus car basé sur des conventions suivies différemment par les chercheurs. Ce point est un vrai casse-tête pour ceux qui s'occupent des périodes récentes. On mentionne souvent le temps passé avec les initiales 'BP', exemple 25 000 ans BP ou 25 ka BP ). BP, c'est-à-dire 'avant le présent' (AP est aussi utilisé, mais plus rarement, = 'Avant le Présent' et aussi pour 'Après le Présent, ce qui entretient la confusion! ...), est l'année considérée comme le présent et est fixée au premier janvier de l'année 1950 de notre calendrier. Cette année fut choisie comme année de référence, car elle est antérieure aux essais nucléaires qui ont perturbé la répartition d'isotopes utilisés en **radiochronologie**. **Cela n'est pas gênant pour les périodes lointaines mais pose des problèmes pour l'étude des périodes récentes pour lesquelles il est nécessaire de fixer plus précisément une origine des temps.** Les anglophones, en particulier, utilisent AD (= **Anno Domini** » pour caractériser les années postérieures à la naissance de Jésus-Christ dans le calendrier julien puis grégorien. AD donne en français : '*après J.-C.*'

Les anglophones utilisent également **BC** pour (*Before Christus*) pour les années 'avant Jésus-Christ' (= *avant J.-C* pour les francophones). D'autres conventions existent, mais elles sont moins employées. Finalement l'« année du Seigneur » décrétée 'an 1' inaugure l'ère chrétienne, également appelée 'ère commune' ou 'ère conventionnelle', elle est abrégée en 'EC' (francophone) ou 'CE' (anglophone). Pour les années précédant celles de l'ère commune, les anglophones utilisent BCE (*Before Commune Era* ou *Before Christian Era*). **BCE/CE** sont de plus en plus utilisés dans la communauté internationale, scientifique ou non. Le 'casse-tête' chronologique est donc un vrai problème, surtout comme ici dans cet article qui a demandé de consulter de nombreuses références, chacune avec ses conventions. S'agissant du livre de Olivier Postel-Vinay, le 'casse-tête' est encore plus aigu, car l'auteur a pris, pour des raisons de meilleure perception des durées, 2400 ans comme unité de référence, soit 400 av. J.C. ou un an avant l'exécution du philosophe Socrate (= 2400 av. S., avec S pour Socrate). Cette un unité de référence étant inhabituelle, l'auteur a été obligé de mêler ou d'utiliser les autres unités de la littérature. Sans vouloir rejeter l'unité de 2400 av.S., le présent article tiré de l'ouvrage de Olivier Postel-Vinay utilisera les conventions BP, BC et AD. Pour les datations au radiocarbone <sup>14</sup>C, non utilisées dans l'ouvrage analysé, une nomenclature adaptée est nécessaire (**Nomade, 2017**).

Le livre d'Olivier Postel-Vinay n'est pas accompagné d'illustrations ou de graphiques. En vue de rendre plus facile le 'déroulé du temps climatique', cinq figures (Figs. 1 à 5) choisies parmi celles de la littérature sont présentées ci-dessous. Elles embrassent la période liée à l'évolution du Genre *Homo* (vers 2,8 Ma, Fig. 1) et celle de l'espèce *Homo sapiens* (vers 250 ka, Figs. 2 à 5) :

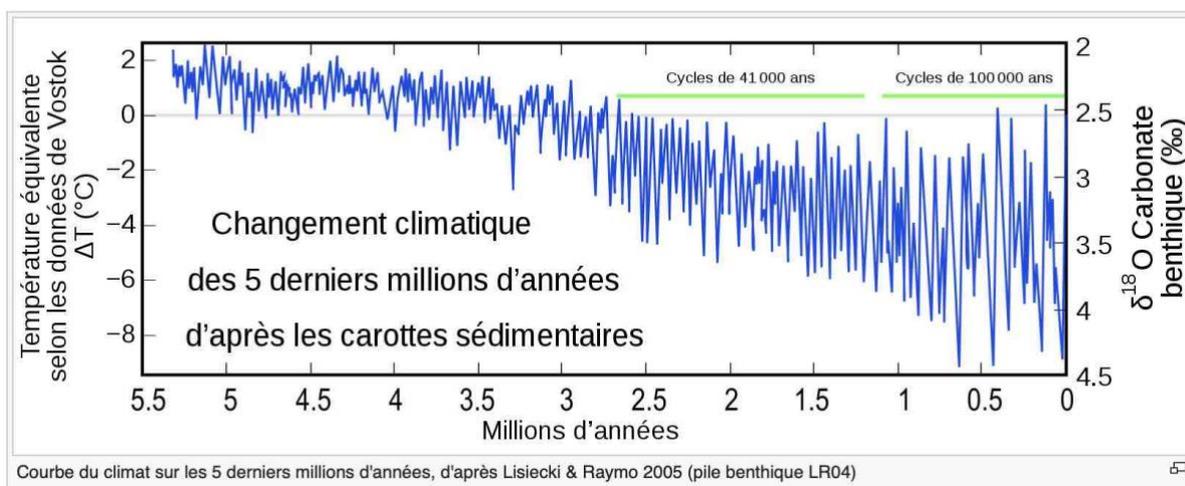


Figure 1. Variations climatiques liées aux paramètres orbitaux de la Terre depuis 5,5 millions d'années (fin du Miocène). Passage d'une cyclicité de 41 000 ans à une cyclicité de 100 000 ans vers 1 Ma (Pléistocène Inférieur). En ordonnée variations des températures à partir des données (isotopes de l'oxygène) de Vostok. **D'après Lisiecki & Raymo, 2005. Les fortes fluctuations de température sont liées aux cycles de « Dansgaard-Oeschger » (ici et ici), avec un épisode chaud ou interstade et un épisode froid ou stade. Chaque cycle débute par une augmentation abrupte de température de 9 à 15°C en quelques décennies seulement, suivie d'un refroidissement d'abord progressif, puis abrupt à la fin, jusqu'à atteindre les valeurs caractéristiques d'un épisode stadiaire. Egalement voir SCE.**

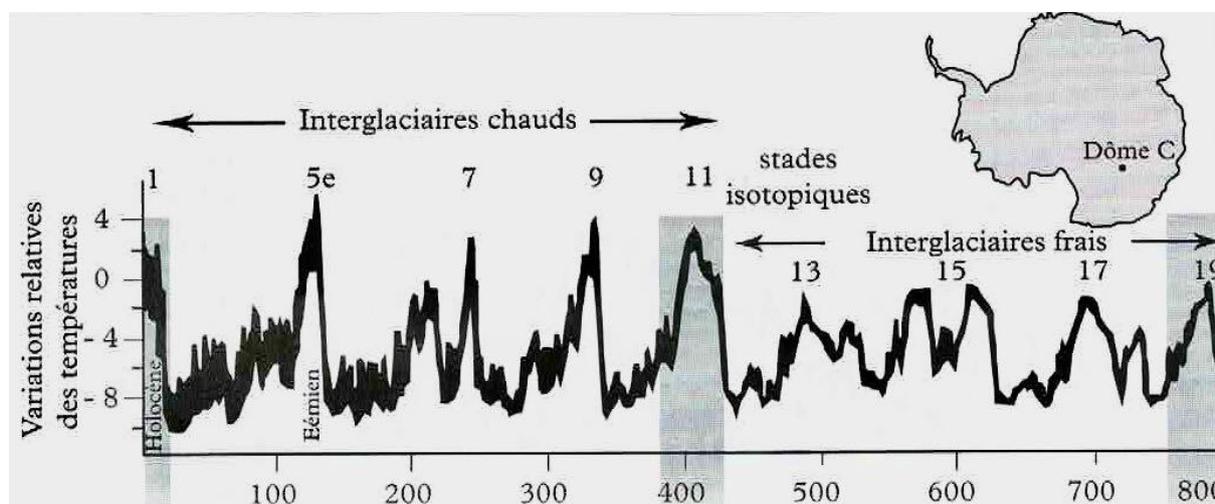


Figure 2 : Variations relatives des températures enregistrées au Dôme C (Antarctique) dans les glaces forées dans le cadre du programme EPICA (in [Deconinck, 2014](#)). Les **stades isotopiques** (cf. 19 à 1) repris sur la figure ne sont pas discutés ici. Éventuellement se reporter à la figure 2 in [SCE](#) pour une discussion des stades isotopiques. Âge en milliers d'années (800 000 ans à droite, fin du Pléistocène Inférieur). L'histoire d'Homo sapiens se déroule à partir de 230 000 ans au cours du Pléistocène Moyen (cf. Olivier Postel-Vinay).

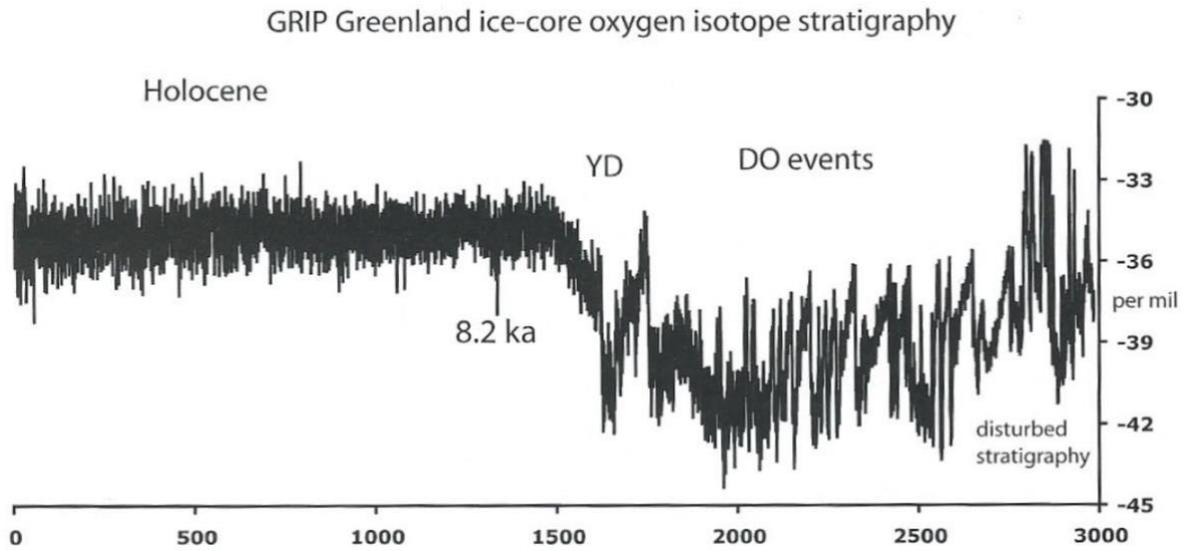


Figure 3. Stratigraphie isotopique de l'oxygène à partir des glaces du forage GRIP (Groenland). En ordonnée valeurs du  $\delta^{18}\text{O}$  en ‰ et en abscisse profondeur en mètres du forage (Cronin, 2010). Les compositions isotopiques de l'oxygène sont un indicateur de la température. La figure montre de manière claire que l'interglaciaire actuel (Holocène, moitié gauche du graphique) est caractérisé par des fluctuations thermiques de faible amplitude (si l'on excepte un épisode plus froid vers 8,2 ka BP) alors que le Dernier Glaciaire (moitié droite du graphique) montre des changements climatiques fréquents, rapides et de grandes amplitudes (de 8°C à 16°C suivant les  $\delta^{18}\text{O}$ ) enregistrés pas les événements ou 'cycles' D-O ('Dansgaard-Oeschger events'). Nb: YD pour Younger Dryas, correspondant à un refroidissement il y a 12800 ans BP. Références bibliographiques in SCE.

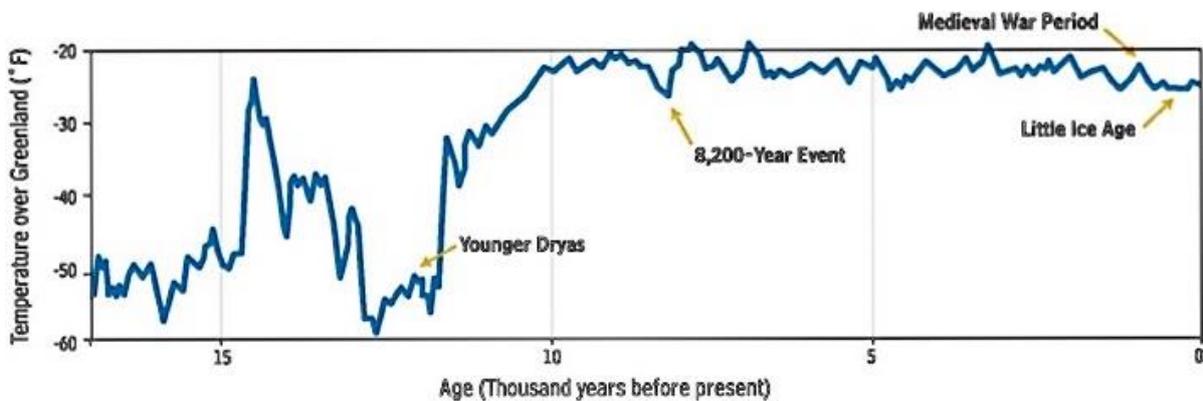


Figure 4 : Variations de la température (°F) au Groenland dans le cadre temporel de la fin du **Dernier Âge Glaciaire** (fortes fluctuations, à gauche) et de l'**Holocène**(faibles fluctuations, à droite) d'après Schartz & Randall, 2003. Nb -60°F = -51°C et -20°F = -29°C. 'War' correspond à 'Warming'.

Figure 5 : Fluctuations des températures holocènes (en °C, axe des ordonnées) déduites des rapports isotopiques de l'oxygène de la glace du

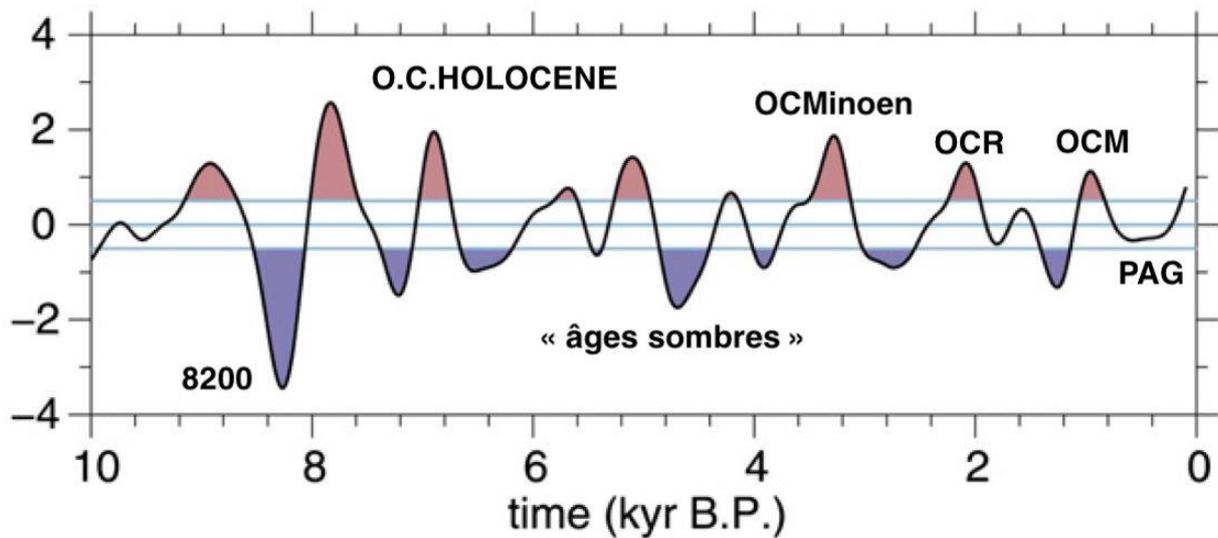


Figure 5 : Fluctuations des températures holocènes (en °C, axe des ordonnées) déduites des rapports isotopiques de l'oxygène de la glace du forage GISP2 in [Wanner et al. 2011](#). OCR : Optimum Climatique Romain, OCM : Optimum Climatique Médiéval, PAG : Petit Âge Glaciaire. OC : Optimum Climatique. Voir également [Spencer, 2022](#).

### 9.3. Les sécheresses provoquent la sortie d'*Homo sapiens* d'Afrique

Mais commençons par le commencement, avec la présence d'*Homo sapiens*. Celle-ci résulte d'un changement climatique majeur, bien documenté dans la littérature, avec la sortie d'Afrique d'*Homo habilis* et *Homo erectus* lors de périodes interglaciaires du **Pléistocène**. Ces périodes marquent un changement de régime climatique vers 1,7 Ma (millions d'années) au Pléistocène Inférieur avec des cycles glaciaires brutaux de durée plus grande (on passe 41 000 (41 ka) à 100 000 ans (100 ka), voir Fig. 1, et [Nie and Fang, 2008](#)) induisant en Afrique orientale des sécheresses menant *in fine* à l'isolation de populations avec goulots d'étranglement. Cela a favorisé un isolement génétique, qui conduira à l'apparition d'*Homo sapiens* vers 233 ka. La modification orbitale de la planète est à ces périodes le processus majeur réglant le climat global (17 grands cycles glaciaires-interglaciaires ont été mis en évidence à partir de 1,7 Ma, une partie d'entre eux est reportée à la Fig. 2). **La durée des phases interglaciaires variait de 10 000 à 20 000 ans, les passages d'une période glaciaire à l'interglaciaire étaient assez abrupts comme le montrent les forts pics de températures (Fig. 2).** Les réchauffements sont de l'ordre de 10 °C en l'espace de quelques dizaines d'années avec des changements tout aussi brusques dans le régime des précipitations et des circulations atmosphériques qui les accompagnaient. Le retour à des conditions froides était plus progressif dans ses débuts, suivi d'une rapide accélération ([Nahon, 2022](#)).

L'histoire se déroule en Afrique, plus précisément le long de la faille du rift Est-africain (rivière Omo) qui s'étend sur des milliers de kilomètres entre l'Ethiopie et le Mozambique. Rappelons que tous les humains actuels descendent d'ancêtres archaïques qui vivaient en Afrique orientale vers 200-250 ka lors d'une période interglaciaire (Fig. 2). Bien que la grande faille du Rift fut initiée il y a 30 Ma, l'essentiel de la surrection (= 'bombement du Rift') et de l'aridification s'est déroulé au cours des 3 à 4 derniers millions d'années. Le climat est alors très variable oscillant entre une forte aridité et des conditions plus humides au rythme de l'oscillation cyclique de l'axe terrestre, responsable de la précession des équinoxes ([Dartnell, 2020](#)).

Quelques dizaines de millénaires après son apparition, *Homo sapiens* va affronter au moins deux grandes périodes de sécheresse (à 168 ka et 143 ka), lors de l'avant-dernière glaciation (in Wainer, 2007), marquées par l'assèchement du Lac Tanganyika et du Lac Malawi, la première période pendant plusieurs milliers d'années, la seconde pendant 20 000 ans. Ces deux lacs (respectivement de 1500 et 700 mètres de profondeur maximale, qui renferment aujourd'hui plus de 80% de l'eau douce du continent africain) furent ainsi asséchés à deux reprises à plus de 95%. Ces 'méga-sécheresses' concernaient l'Afrique tropicale de l'océan Indien jusqu'à la côte atlantique et obligèrent *Homo sapiens* à migrer vers les grottes le long de la côte sud-africaine (grotte de Pinnacle Point, il y a 160 ka). Voici donc ici 'les premiers réfugiés climatiques de notre histoire'. Le niveau marin était plus bas d'environ 100 mètres. Notons que deux épisodes de sécheresse, s'étalant sur plusieurs millénaires suivront à partir de 133 ka, ensuite à partir de 110 ka jusqu'à 75 ka (Scholz et al., 2007). Les Grands Lacs sont alors asséchés et de nouvelles populations de chasseurs-cueilleurs migrent vers la grotte de Pinnacle Point et se sédentarisent sur le littoral sud-africain. Selon ces auteurs l'aridité en Afrique tropicale était plus sévère que celle du Dernier Maximum Glaciaire et une des plus prononcées du Quaternaire.

Après cette première confrontation à des événements climatologiques extrêmes de longue durée, succède l'avant-dernier interglaciaire, l'Eémien de 130 ka à 115 ka BP. Cet interglaciaire est chaud, surtout au début (+4 à 5°C, Jouzel et al. 2007), et instable, il ne sera pas un long fleuve tranquille d'un point de vue climatique : il connaîtra des températures moyennes des océans supérieures à 2°C par rapport à aujourd'hui, supposant des températures bien plus élevées sur les terres (plus de 10°C dans le sud de la France par rapport à la température actuelle, in l'Eémien). Le volume des calottes de glace était réduit surtout au début de l'Eémien. Le niveau marin est alors de 4-5 m au-dessus de l'actuel. A cette époque, les calottes ont un volume un peu inférieur à l'actuel, la malacologie des côtes actuelles du Portugal remonte jusqu'au nord du Danemark dans les zones aujourd'hui occupées par la toundra (Van Vliet-Lanoë, 2013). Olivier Postel-Vinay rappelle que des hippopotames colonisaient la Tamise, que dans les Alpes suisses la température était de 4°C et supérieure à l'actuelle pendant quatre millénaires et augmenta encore de 2°C les dix millénaires suivants entraînant sans doute la fonte des glaciers alpins. Le Sahara s'est humidifié, présentant des lacs et rivières notamment occupés par des hippopotames (squelettes retrouvés dans l'Aïr). Des pans entiers des calottes glaciaires du Groenland et de la partie ouest de l'Antarctique se sont effondrés. Ce début d'Eémien correspond à un pic de chaleur avec des hivers plus chauds et humides qu'aujourd'hui dans l'hémisphère Nord. Le Sahara verdoyant est facilement franchi, de même que le désert du Sinaï ou le delta du Nil. *Homo sapiens* s'installe sur les côtes de la Mer Rouge vers 125 ka et « dévore des palourdes géantes entraînant la première dégradation anthropique d'un massif corallien ».

#### 9.4. *Homo sapiens* face à de nombreux changements climatiques très brutaux

Vient ensuite le Glaciaire de 115 ka à 11,7 ka BP (Figs. 3 et 4) qui démarre par à-coups successifs (= glaciation Würm dans la nomenclature alpine), d'abord très tôt sur la côte ouest de l'Atlantique nord, et plus tardivement (110 ka BP) sur la Fennoscandie, en relation avec la circulation thermohaline (Van Vliet-Lanoë, 2013). Le maximum glaciaire est atteint vers 21 ka BP et le niveau de la mer est à -120/-130 mètres par rapport à l'actuel. De nombreux interstades (au moins sept) d'une durée de un à quelques millénaires sont à l'origine de radoucissements. Au maximum des paroxysmes glaciaires du Würm, les glaces (calottes et glaciers de montagne) recouvraient près de 35 % des terres émergées contre 15 à 20 % lors des interstades et moins de 10 % des terres aujourd'hui (Nahon, 2022). La glaciation würmienne n'est pas ressentie dans les zones tropicales comme dans le reste de l'Asie.

**Une période d'humidité d'une durée d'environ 25 millénaires (103 ka BP-78 ka BP) s'installe sur le nord de l'Afrique et le Proche-Orient favorisant d'autres sorties d'*Homo sapiens* de l'Afrique.** On retrouve ainsi *Homo sapiens* en Israël (grotte de Qafzeh), dans la Péninsule arabique (désert du Nefoud) où ont été exhumés des restes squelettiques humains dans un lac d'eau douce où sont également retrouvés des hippopotames et buffles. Cette période humide est également enregistrée en Asie, en Inde et en Indonésie.

Une nouvelle période de sécheresse marquée par un renforcement d'un épisode glaciaire remplace dès 71 ka BP la précédente et s'étendra jusqu'à la fin du Glaciaire (11,7 ka BP). Comme pour l'interglaciaire Eémien, cette période est caractérisée par de nombreux changements climatiques avec particulièrement une période de sécheresse intense. **Au cours de cette période (63 ka BP-47 ka BP) le Sahara connaît une forte expansion à l'origine d'une désertification du nord de l'Afrique suite au climat devenu aride provoquant la seconde sortie importante d'Afrique d'*Homo sapiens*. Nous sommes d'ailleurs, nous européens, pour l'essentiel issus de cette migration.** Notons aussi que cet épisode glaciaire est précédé (74 ka BP) par l'éruption du **super-volcan Toba**, en Indonésie qui aurait plongé la Terre dans un 'hiver volcanique' pendant plusieurs années (Osipov et al., 2018 in Nature) avec une diminution des populations humaines. Cette éruption a émis un volume gigantesque de cendres qui ont recouvert 1 % de la surface de la planète et ont peut-être assombri le ciel pour entraîner un refroidissement mondial pendant plusieurs décennies (Dartnell, 2020). Certains auteurs (Le Guyader, 2018) y voient même la disparition de cousins de notre espèce. Les populations d'*Homo sapiens* furent réduites, mais pas anéanties. *Homo sapiens* put à nouveau s'étendre en Afrique (de l'Afrique australe à l'Afrique tropicale), lors d'une période humide suivant de quelques millénaires l'éruption de Toba, période au cours de laquelle le niveau des lacs est-africains avait bien remonté.

***Homo sapiens* va ensuite 'subir' un chaos climatique sans précédent jusqu'à l'arrivée de notre interglaciaire actuel. De nombreuses périodes de réchauffement extrême avec des hausses de plus de 8°C , parfois 16°C en 40-50 ans se sont produites.** Au moins une dizaine de ces événements de réchauffement extrême ont lieu au cours de cette période du Paléolithique supérieur, et on en compte 25 pour la dernière période glaciaire (voir SCE, également Capron et al. 2021). Ces événements dits de **Dansgaard-Oeschger** (D-O) ont des durées comprises entre 500 et 2500 ans (pouvant parfois aller jusqu'à 4500 ans) et un profil de température asymétrique avec un réchauffement rapide ou brutal et un refroidissement lent. Ils sont attribués à de nombreux affaiblissements de la force du courant atlantique (AMOC) et pourraient aussi être liés aux activités volcaniques (Lohmann and Svenson, 2020).

***Homo sapiens* a ainsi survécu aux changements climatiques les plus brutaux que la planète ait connus au cours des deux derniers millions d'années.** Lors des épisodes froids les arbres sont remplacés par une toundra sèche propice à la chasse aux grands mammifères. Les vallées d'Europe méridionale dans lesquelles *Homo sapiens* se réfugie présentent des 'températures moyennes' en hiver d'environ 10°C inférieures à celles actuelles. Des froids extrêmes ont cours entre 23 ka BP et 16 ka BP, lors de la crise du **solutréen**, nos contrées ressemblent alors à l'actuelle Sibérie avec permafrost et blizzard. Les populations animales s'effondrent et *Homo sapiens* connaît à nouveau un goulot d'étranglement démographique. Vers 19 ka BP, la calotte glaciaire atteignait jusqu'à 3 km d'épaisseur et recouvrait outre la Scandinavie, les trois-quarts de la Grande-Bretagne. La Manche est une steppe irriguée par un fleuve, le niveau de la mer est à moins 130 m par rapport à l'actuel. Notons que les grands froids ont moins affecté le Proche-Orient que l'Europe. *Homo sapiens* y évolue dans une steppe arbustive et non une toundra. Ceci démontre une fois de plus (cf. articles de SCE, notamment ici) que la notion d'une 'température moyenne globale' n'est pas fondée.

Deux changements climatiques brutaux vont marquer la fin du Glaciaire (= 'tardiglaciaire'). **D'abord, en Europe, un réchauffement marqué, aux effets planétaires, est accompagné d'une déglaciation importante. Une partie des glaciers arctiques fond brutalement. Il s'agit du réchauffement du Bølling (de 14,6 ka à 14 ka BP) opérant durant un interstade, sur près de 340 ans : on passe sans transition d'un climat très froid à un climat tiède, soit en quelques décennies de -15°C à -25°C à + 20°C en hiver, et de +10°C à +20°C en été en Europe du Nord.** Selon **Toth et al.(2022)** la température atteinte durant cette période était légèrement supérieure à l'actuelle (env. +0,5°C) et le saut de température par rapport à la période froide précédente était de 5°C. L'humidité revient après une très longue période de froid et de sécheresse et les précipitations augmentent drastiquement( 30 à 40%) par rapport à la période précédente, permettant une reprise de la formation des argiles du sol (**Nahon, 2022**), condition favorable pour une agriculture. La population croît rapidement et, au lieu de se déplacer en fonction des saisons, elle commence à se sédentariser. Le phénomène touche également l'Afrique et le Proche-Orient. **La mer monte de 14 à 18 m en 340 ans, soit dix fois le rythme actuel**, ce qui n'empêchera pas *Homo sapiens* de revenir s'installer en Angleterre après 10 000 ans d'absence. Les premiers petits villages naissent à la lisière entre le forêt dense à l'ouest et la steppe arborée à l'est.

Un retour en quelques décennies aux conditions glaciaires extrêmes en Europe (froid et sec), et moins rigoureuses au Proche-Orient a lieu vers 10,4 ka BC, il va durer environ 1000 ans. **Cette période nommée le Dryas récent voit la disparition des forêts remplacées par la toundra. Des glaciers se forment en Ecosse, la neige peut tomber de septembre à mai et la température descend en hiver sous les -20°C dans nos régions.** *Homo sapiens* abandonne à nouveau nos régions et est menacé d'extinction. Les villages du Bølling sont abandonnés. **La fin du Dryas récent est caractérisée par une hausse brutale de la température annuelle moyenne de l'hémisphère Nord d'environ 7 °C en 50 à 60 ans, cette hausse atteignant 10 à 12 °C en des durées encore inférieures localement (notamment au Groenland).** Le Dryas correspond ainsi à un dernier refroidissement du climat (**Pisano, 2018**), avant le réchauffement rapide qui a mis fin à la **dernière période glaciaire** et a ouvert la période tempérée de l'**Holocène**.

### 9.5. *Homo sapiens* et les bienfaits du Grand Optimum Holocène

**Avec l'Holocène, nous entamons une situation proche de l'actuelle. Pourtant l'Holocène n'est pas non plus une long fleuve tranquille, mais globalement il fait bien moins froid qu'auparavant et surtout le réchauffement est appelé à durer.** Le réchauffement est aussi rapide et plus prononcé qu'au cours de l'interstade du Bølling, de l'ordre de 20°C dans l'hiver européen et de 7°C au Proche-Orient. Le climat méditerranéen se met en place avec ses étés chauds et ses hivers pluvieux. Le berceau de la civilisation occidentale va naître de la richesse du Croissant fertile qui s'étend du Néguev aux Monts Zagros (Iran, Irak) avec un développement sans précédent de l'agriculture dès 8,6 ka BP. Le Sahara oriental devient 'semi-humide', et sa partie nord 'semi-aride'.

L'agriculture s'est ainsi imposée lors d'un optimum climatique majeur avec la mise en place de l' interglaciaire actuel qui comprend plusieurs optimas ('Holocène' ou 'Grand Optimum Holocène', Minoen, Romain, Médiéval, Actuel), séparés de périodes froides, souvent appelées périodes sombres, qui vont se suivre jusqu'au Petit Âge Glaciaire précédant l'Optimum Actuel (Fig. 5 et voir plus loin). On peut considérer que ce **Grand Optimum Holocène (sensu stricto)**, qui va de 9000 à 5000 BP (avec l'intermède froid de 8200 BP, voir ci-dessous) est la période fondatrice de l'histoire de l'humanité (= 'révolution néolithique') caractérisée par un climat relativement stable. L'agriculture et l'élevage (avec la roue, la charrue, la traction animale ...), la métallurgie, la naissance des villes...

résultent de cette période chaude et humide, d'abord dans les plaines alluviales du Moyen-Orient et de Chine.

Un premier grand coup de froid et de sécheresse a lieu vers 8,2 ka BP (Figs.3 à 5), il est moins violent que celui du Dryas, mais suffisant pour faire disparaître les populations de nombreuses zones d'occupation. Le lac d'Adrar, au centre du Sahara, s'assèche complètement pendant mille ans. Cet événement est connu sous le nom de **Événement climatique de 8200 BP** et va durer 200 à 400 ans. L'estimation de l'ampleur du refroidissement varie selon les méthodes de mesure, il est de 1 à 5 °C. Les baisses de températures les plus fortes se sont produites dans les régions du nord de l'Atlantique, alors qu'en Europe elles ont atteint environ 0,5-1 °C et moins de 0,5 °C dans les régions subtropicales du nord de l'Atlantique. Le refroidissement a débuté autour de 8175 BP et, en moins de 20 ans, les 'températures moyennes' ont baissé de 3,3 °C. **La période la plus froide a duré environ 60 ans et est liée à la vidange quasi-complète du Lac Agassiz dans la baie d'Hudson, au niveau de la calotte glaciaire du nord-est du continent américain (calotte laurentide) (Bauer et al. 2004 , Holmes et al. 2016).** Cet événement a de multiples conséquences : forte élévation du niveau marin (2 m/siècle), rétrécissement des terres émergées (10 km/an, soit 200 m/semaine) et déclenchement d'un tsunami au large de la Norvège (vague de 3 m de haut) et dans les îles Shetland (vague de 20 m de haut). Le Lac Agassiz s'est ainsi étendu jusqu'à couvrir plus de 500 000 km<sup>2</sup> du Canada et du nord des Etats-Unis. Les populations d'*Homo sapiens* connaissent aussi un déclin lors de cette période froide et des vagues de migration vers l'est et le sud.

Après cet intermède froid, le Grand Optimum Holocène reprend ses droits pendant plus de mille ans, et une nouvelle période froide et sèche, de durée plus limitée que la précédente a lieu de 3,54 ka BC à 3,4 ka BC. A nouveau la population des Cités (devenues des 'Etats') diminue.

### 9.6. *Homo sapiens* et les Optimas Climatiques récents (Fig. 5)

Notre histoire récente est directement accessible dans les documents écrits des civilisations minoennes, romaines, médiévales, modernes (Petit Age Glaciaire et actuelles).

**Le climat de cet interglaciaire qui a débuté à la fin du Glaciaire (voir ci-dessus) a connu des fluctuations marquées avec des périodes plus chaudes ou Optimas et des périodes plus froides ou 'périodes sombres'. Les variations 'moyennes' de température ne sont que de quelques degrés (< 2 °C) sur plusieurs siècles chaque fois, la situation climatique n'a donc pas grand-chose à voir avec les événements Dansgaard-Oeschger montrant des variations de température importantes et abruptes en des temps courts (décennies) ou celles du Bølling et du Dryas.** Les variations climatiques récentes ont cependant des conséquences drastiques sur les populations ou civilisations de la planète, et c'est un grand défi qu'a réalisé Olivier Postel-Vinay que d'avoir confronté Histoire et Climat à une échelle décennale et pluridécennale. Avant d'en mentionner l'essentiel, il est important de noter que les dates encadrant les Optimas et 'périodes sombres' sont à prendre avec des pincettes : les fluctuations climatiques n'étant pas abruptes vu les faibles amplitudes thermiques, les limites entre périodes peuvent varier suivant les auteurs, mais il y a unanimité sur leur déroulé. La succession des périodes se présente ainsi comme suit :

- Période Intermédiaire : ~ 3000 BC – ~2000 BC
- Optimum Minoen : ~2000 BC – ~1350 BC

- 'Siècles Obscurs' ou période sombre (ou Greek Dark Ages) : ~ ?1350 BC – ?250BC
- Optimum Romain : 250/200 BC-400 AD
- LALIA ou Minimum Homérique ou 'Dark Ages Cold Period' : ~400-800 AD/900 AD
- Optimum Médiéval : 900-1200 AD/1300 AD
- Petit Age Glaciaire : 1300 AD -1850 AD
- Moderne : post-1850 AD

Easterbrook (2016) subdivise la période actuelle comme suit: *1880–1915 Cold Period; 1915–1945 Warm Period; 1945–1977 Cold Period; and 1978–2000 Warm Period.*

Pour 'compliquer' ces subdivisions, les périodes ci-dessus sont regroupées dans deux ensembles ou périodes plus larges 'le Néoglaciare' (de 4,5 ka BP à aujourd'hui) faisant suite à l'Optimum Climatique Holocène au sens strict (initié à 11,7 ka BP).

Le livre d'Olivier Postel-Vinay reprend de manière détaillée les événements historiques ayant eu cours dans toutes les parties du monde lors de ces optimas et de périodes plus froides. Ces événements sont repris ci-dessus de manière très résumée.

- Au cours de la **Période Intermédiaire**, au moment de l'apogée d'Ur, le climat s'assèche et un vent persistant du nord allonge les hivers et contribue à asphyxier les sols. Les précipitations diminuent drastiquement provoquant des migrations de populations vers des régions où la nourriture était encore disponible. Sumer voit ainsi sa population doubler sous l'afflux des réfugiés. Les eaux se saturent en sel et les fruitiers sèchent au pied. On peut traverser le Nil à pied. Le Sahara cesse d'être vert. La famine sévit pendant des décennies. La crise affecte presque entièrement la planète (Égypte, Amérique du Sud, Inde, Chine, etc.) et certains auteurs (Weiss, 2000, Wiener, 2014, Wiener, 2018) voient **'la première méga-sécheresse de la période historique' touchant les premières civilisations complexes (exemple de l'Empire Akkadien) qui s'effondrent surtout durant la période 2300-2000 BC.**

- **L'Optimum Minoen** est une période climatique fort chaude à partir de 1,6 ka BC, pendant au moins un millénaire. Les Hittites voient leurs villes et leur capitale désertées. Les Étrusques, originaires de l'est de l'Anatolie, fuient avec leur bétail. En Syrie, à Chypre, dans le delta du Nil, **l'analyse des pollens témoigne d'une grave sécheresse qui a duré 300 ans**, avec des famines durant le règne de Ramsès II et le délitement de l'Empire égyptien. La diminution de la mousson sur les hauteurs de l'Éthiopie entraîne une réduction importante des crues du Nil. Les populations avaient auparavant été affectées par la gigantesque éruption de **Santorin** vers 1645 ans BC et par de nombreux séismes sur le pourtour méditerranéen. C'est la période du mythe de l'Atlantide... et aussi du déclin en 150 ans de la civilisation minoenne, dont les premières traces dataient de 3,0-2,7 ka BC pendant l'Age du Bronze.

- **Les Siècles obscurs** (aussi **Greek Dark Ages**) sont assez peu documentés. Cline (2014), repris par Olivier Postel-Vinay, leur a consacré un livre focalisé sur l'intervalle de temps autour de 1177 BC. Ils sont dits 'obscurs' car les conditions climatiques étaient devenues fort sévères suite à un

refroidissement et une sécheresse très marquée au Moyen-Orient (Babylone). Famines, séismes et migrations de populations ont ainsi limité les témoignages archéologiques et les sources écrites. En vingt ans, toute la civilisation du Bronze, en Méditerranée (Egypte, Grèce...) s'est effondrée (l'Âge de Fer' suivra). Sur base des isotopes de l'oxygène et du carbone dans des spéléothèmes, des **alcénonnes** des algues et de la répartition des espèces de foraminifères, **Drake (2012)** a montré que la température des eaux de surface de la Méditerranée a rapidement baissé limitant le flux d'eau douce dans l'atmosphère et entraînant un épisode de sécheresse plus important que lors de l'Âge du Bronze, il persistera jusqu'à l'Optimum Romain.

- **L'Optimum Romain** est marqué par un climat d'une stabilité exceptionnelle avec des siècles chauds bien arrosés et des pluies de printemps abondantes, favorisant l'essor de Carthage et de Rome, sur le pourtour méditerranéen. Reprenons un court extrait de **SCE** sur le sujet (les références sont dans l'article cité) : **« C'est au cours de cet Optimum qu'Hannibal traversa (en 218 av. J.-C) les Alpes avec ses éléphants, situation impensable aujourd'hui. Cet Optimum Climatique Romain (OCR) connu depuis assez longtemps (au moins depuis 1999 avec la première mention dans un article de Nature) est resté assez discret dans la littérature, cette dernière se portant plus volontiers sur l'Optimum Climatique Médiéval (autour de l'an mil), plus proche de nous. Pourtant de nombreux articles suggéraient que l'OCR est l'Optimum le plus chaud de la période récente, du moins pour les deux ou trois derniers millénaires. Un article récent de Maragritelli et al. (2020), en Open Access dans Nature, a montré que c'est bien le cas, à savoir que l'OCR fut la période la plus chaude de ses 2000 dernières années (de plus 2°C, en moyenne par rapport à aujourd'hui dans la région étudiée de la Sicile et de la Méditerranée occidentale) et que l'augmentation de température fut principalement le fait de l'activité solaire (Margaritelli et al., 2016) ».**

Selon Olivier Postel-Vinay, **« les années 21-50 AD représentent les trente années les plus chaudes de notre ère jusqu'aux années 2000, avec des températures de juillet d'au moins 2°C supérieures à celles du milieu du XXe siècle. Une détérioration du climat a lieu vers 150 AD et le climat devient plus instable à partir de 250 AD avec refroidissement et sécheresse. Le grand glacier d'Aletsch, en Suisse recommence à grossir. Il existe une coïncidence entre 'la crise climatique' du IIIe siècle et la première chute de Rome. Cette crise du climat en Méditerranée et en Europe de l'Ouest a aussi affecté l'Europe Centrale, et une terrible sécheresse entre 338 et 377 AD dans les steppes d'Asie centrale sera à l'origine d'une migration des Huns vers l'Europe. Notons également, sur d'autres continents, « une sécheresse centenaire, par exemple dans le bassin de Mexico vers 550 AD, à l'origine de migrations de populations à la recherche de meilleurs pâturages, suivie par trois siècles de méga-sécheresse qui verront l'abandon des populations mexicaines de Monte Alban ».**

- L'épisode **LALIA** (ou **Petit Age glaciaire de l'Antiquité tardive**) marque un refroidissement avec multiplication des famines. La température de la Méditerranée baisse, deux énormes éruptions volcaniques dans l'hémisphère Nord font des années 536 AD et 540 AD des années 'sans été'. **Les cernes des arbres des Alpes autrichiennes et de l'Altaï suggèrent que la décennie 540 AD est dans cette région du monde la plus froide de tout l'Holocène.** Une synthèse est proposée par **Büntgen et al. (2016)** pour la période 536 AD à 660 AD.

- **L'Optimum Médiéval** est la dernière période la plus chaude proche du XXe siècle. Le premier Viking arrive accidentellement en Islande en 860 AD à la faveur d'une tempête au large des Hébrides, au nord-ouest de l'Ecosse. Ensuite Erik le Rouge découvrira le Groenland en 982 AD. Lors de cet Optimum il faisait un peu plus chaud qu'aujourd'hui et aussi chaud, (si pas plus?), que lors de la première partie de l'Optimum Romain, de 230 BC à 40 AD. Vers 1100 un chroniqueur de Liège note que les fraises sont mûres à Noël... Tous les hivers ne sont pas aussi doux, ils furent par exemple plus

froids qu'aujourd'hui entre 1070 AD et 1179 AD. La Meuse gèle à Waulsort (près de Dinant) en 1143 AD. **La tendance générale pendant deux siècles au moins, jusqu'en 1300 AD, est qu'il faisait aussi chaud qu'aujourd'hui.** Comme pour l'Optimum Romain, reprenons un court extrait de SCE consacré à cet Optimum Médiéval (les références sont dans l'article cité) : « *En se basant sur les différents types de cultures, les dates de moissons et vendanges, etc. les historiens ont accumulé de nombreuses données paléoclimatiques et par exemple montré que le vignoble européen s'étendait à l'époque de 500 km au-delà de sa limite septentrionale actuelle (Lamb, 1964, Le Roy Ladurie, 1967, Deconinck, 2009). La vigne était cultivée dans des régions où elle était absente auparavant, comme la Belgique, l'Angleterre, l'Allemagne dès le 9<sup>ème</sup> siècle. Elle disparaîtra de ces régions vers l'an 1350. Durant l'Optimum Climatique Médiéval on note aussi la faible extension des glaciers alpins bien en-dessous des valeurs actuelles (ici et Le Roy Ladurie, 1967). Une des premières études détaillées de cet épisode est celle de Lamb (1964) de l'Office Météorologique d'Angleterre. Il estima à partir de données historiques, faunistiques, botaniques, glaciologiques et météorologiques que la température en Angleterre fut de 1,2-1,4°C supérieure à 'la température moyenne globale' actuelle et que les précipitations étaient de 10% supérieures. A l'échelle mondiale des températures plus élevées d'environ 1-2°C étaient la règle, et localement jusqu'à 4°C de plus le long de la côte du Groenland.*

*La vigne est remontée vers le nord, à la suite de la petite période chaude de Charlemagne en 800, ensuite le climat se refroidit jusqu'en 1200 avec des tempêtes monstrueuses (Van Vliet-Lanoë et al. 2014) en relation avec une forte instabilité des jet streams (contraste thermique entre Arctique froid et tropiques chauds, comme actuellement). Ensuite la vigne remontait jusqu'au sud du Danemark. Le glacier du Théodull à côté du Cervin dans les Alpes n'existait plus et le col qu'il recouvrait servait de passage pour les échanges commerciaux avec l'Italie.*

*Le Groenland connaissait des 'températures moyennes annuelles' de 2-4°C supérieures à l'actuelle. Je ne reprends pas la discussion sur la signification 'erronée' de la 'température moyenne globale', déjà discutée dans SCE (ici et ici), mais il faut simplement retenir que l'OCM était caractérisé par des températures élevées, au moins égales aux actuelles, probablement supérieures. **De nombreux indicateurs historiques montrent clairement que l'OCM était en effet une période particulièrement chaude mais instable** (voir la figure 4 in SCE) ».*

Terminons cet Optimum Médiéval avec la question très discutée des températures. Selon Olivier Postel-Vinay (p.207) « *Après des décennies de débats parfois houleux, les paléoclimatologues confirment que les étés entre 1100 AD et 1320 AD étaient chauds et secs, avec des températures de 1°C à 2°C supérieures à celles de la période de référence des années 1961-1990* ».

- **Le Petit Age Glaciaire** met un terme à l'Optimum Climatique Médiéval avec l'apparition d'une période de plus en plus froide illustrée dans les tableaux de Brueghel et caractérisée par une forte poussée des glaciers alpins. Emmanuel Le Roy Ladurie (1967, 2009) en a donné une excellente description synthétique reprise par SCE (les références sont dans l'article cité) : « *les premières manifestations apparaissent à la fin de 16<sup>ème</sup> siècle, précisément en 1588 dans les Alpes suisses où le glacier de Grindelwald défonce sa moraine terminale. Dès lors la fin de la décennie et les trois siècles suivants verront les glaciers descendre de plus en plus bas dans les vallées avec tous les dégâts que cela suppose. Une chronologie des poussées glaciaires 'agressives' est établie à partir de nombreux documents historiques (dates des vendanges, datation des arbres fossiles pris sous les moraines, avancées morainiques et modifications des topographies).*

*Les maxima historiques des glaciers alpins se situent en 1599-1600 et entre 1640 et 1650. **Dès 1660 un reflux modéré a lieu dans les Alpes témoignant d'une variabilité du climat à l'échelle décennale.** Ces périodes d'avancées ('crues glaciaires') et de reflux sont la règle tout au long de ces siècles de période globalement plus froide. Ces reflux sont également moindres que les reflux de notre époque plus chaude : par exemple le retrait alpin à la fin du 17<sup>ème</sup> siècle et à l'extrême début du 18<sup>ème</sup> siècle est limité à 500 m au plus au lieu de 1 à 2 km au 20<sup>ème</sup> siècle'. **Il faut noter que ces oscillations présentent un caractère local à l'échelle pluri-décennale (entre 25 et 50 ans) comme le montrent notamment les positions des langues glaciaires terminales** (Lliboutry, 1964). Pour cet auteur, ce décalage serait plus le fait de facteurs météorologiques (locaux) que des caractéristiques intrinsèques des glaciers (temps de réaction, dimension, débit). Au final les phases paroxysmales des glaciers alpins du Petit Age Glaciaire se sont individualisées en 1660-1610, 1628, 1640-1650, 1676-1680 et 1716-1720 avec la plupart du temps des glaciers nettement plus importants qu'au 20<sup>ème</sup> siècle. Des périodes de décrue secondaire ont parfois lieu avec par exemple 200 à 300 m de retrait horizontal à Chamonix en 1784-1790. La période paroxysmale des glaciers est autour de 1740-1750 pour l'hémisphère Nord.*

**Le reflux commencera ensuite dès les années 1860-1870 et concerne tous les glaciers alpins** : *l'ampleur du recul est considérable, et pour la première fois depuis trois siècles un point de non-retour est assez rapidement atteint'. La mer de Glace (Chamonix) recule de 150 m en un an (1867-1868) et de 757 m en dix ans (4 nov. 1868 – 27 sept. 1878), soit 76 m par an. La phase multiséculaire de crue glaciaire est donc terminée et inaugure la période actuelle. Le réchauffement se marquera par des premières neiges plus tardives et des dernières neiges plus précoces, traduisant le raccourcissement de la saison froide. Pour visualiser ces oscillations, se reporter à la Figure 3 in SCE reprise dans Emmanuel Le Roy Ladurie (2007) retraçant l'histoire complexe des grands glaciers alpins du 16<sup>ème</sup> au 20<sup>ème</sup> siècle ».*

Ces événements sont également documentés par Olivier Postel-Vinay qui en élargit la géographie hors Europe : *« famines, pandémies, tempêtes de sable et neige récurrentes (1368, 1587, 1618) en Chine à Pékin et dans le delta du Yangtsé. En 1587 la population du fleuve Jaune se nourrit d'herbes et de plantes sauvages... Dans le Guangxi les gens se mangent les uns les autres et les cadavres jonchent le sol ... le froid s'accroît en décembre 1633 et le cours moyen du Fleuve Jaune est pris par les glaces... les affamés mangent jusqu'aux graines trouvées dans les excréments des oies.. ».* Une éruption volcanique aux Philippines accentue les effets du Petit Âge Glaciaire. **En Europe « le vin gèle dans les caves, il faut le casser à la hache... l'encre gèle dans les encriers... le Rhin et le Rhône gèlent jusqu'au fond de leur lit... le port de Marseille gèle... il pleut des grêlons de 600 grammes... ».** L'éruption en 1815 du **Tambora** en Indonésie injectant des aérosols soufrés dans l'atmosphère, est ressentie dans de nombreuses régions : *« année sans été appelée année du mendiant en Allemagne... famine et épidémie en Irlande... destruction des récoltes aux Etats-Unis... sécheresse dramatique en Afrique du Sud... famine dans le Yunnan ... ».*

Hors Europe où il fut défini, le Petit Âge Glaciaire a connu aux 14<sup>ème</sup> et 15<sup>ème</sup> siècles **une série de méga-sécheresses, sans équivalent actuel, pendant plusieurs années et décennies (presque un siècle) en Asie, dans le nord de Chine, l'Inde centrale et le Vietnam Sud.** Elles étaient liées à un régime des moussons particulièrement actif (Sinha et al. 2010).

- La **Période Moderne** connaît aussi de nombreux aléas climatiques. Citons quelques événements repris par Olivier Postel-Vinay : *« dans les années 1930, le **Dust Bowl**, dans les plaines centrales des Etats-Unis, représente la plus grande catastrophe climatique de ce pays. L'arrivée de tsunamis de particules de terre et de sables hauts comme un gratte-ciel ou davantage ensevelirent*

*tout... Les cultures étaient anéanties par la couche de poussière, ou 'blizzards noirs', jusqu'à 6 m par endroits, et le bétail mourrait... ». L'événement est lié à plusieurs années de sécheresse de grande étendue accompagnée par une forte augmentation des températures. « **D'autres sécheresses encore plus sévères étalées sur des décennies avaient déjà affecté ce territoire, et par exemple avaient conduit à la disparition de la civilisation des Pueblos à la fin du 13ème siècle** ». L'URSS « connaît dans les années 1930 une série de sécheresses catastrophiques de l'Ukraine à l'Oural'. Un refroidissement « est sensible dans tout l'hémisphère Nord, de l'Europe à la Chine... En 1956, la lagune gèle à Venise et en France les ceps gèlent.... En Angleterre, c'est l'hiver le plus froid depuis 1740... ».*

**Les alertes à un mini retour du Petit Âge Glaciaire ou d'un 'global cooling' font la 'Une' des médias** (*Newsweek, New York Times, Time*). Citons l'exemple du 'The Coming Ice Age' annoncé par **Stephen Schneider, 1978**. Olivier Postel-Vinay mentionne un rapport de la **NASA (1971)** montrant que la densité d'aérosols dans l'atmosphère l'emporte de beaucoup sur le réchauffement de l'augmentation du gaz carbonique : « *ce rapport conclut qu'un accroissement seulement d'un facteur 4 de la concentration moyenne d'aérosols peut suffire à entraîner une baisse de température de 3,5 degrés* ».

**Les températures étant redevenues clémentes, la thèse du refroidissement global passe aux oubliettes et est remplacée à partir de 1988 par la thèse du réchauffement climatique sans précédent d'origine anthropique** (**Hansen, 1988**). Depuis lors le réchauffement est entièrement expliqué par le 'bouton CO<sub>2</sub>', toute autre explication reçoit une fin de non-recevoir. SCE est né pour s'insurger de ce 'diktat' et prône une analyse critique de la climatologie actuelle. Pour SCE ce sont les phénomènes naturels qui règlent les fluctuations climatiques, la contribution anthropique dans le réchauffement actuel si elle est réelle est très faible (voir la liste des auteurs [ici](#) )

## 9.7. L'Odyssée d'Homo sapiens

Ayant parcouru l'histoire d'*Homo sapiens* sur près de 233 000 ans, que pouvons-nous conclure de cette formidable odyssée rapportée par Olivier Postel-Vinay? Certainement que les fluctuations climatiques n'ont eu cesse d'accompagner le parcours d'*Homo sapiens* à tout moment sur la Planète entière. **Mais surtout que ces fluctuations furent d'intensités et durées sans commune mesure avec la situation actuelle, cette dernière n'ayant vraiment rien d'exceptionnel en regard de ce qu'*Homo sapiens* a régulièrement enduré.** L'analyse détaillée montre qu'aucune période n'est homogène en termes de climat au niveau de la Planète, des différences régionales ou locales sont toujours présentes à tout moment. Ceci suffit à rejeter la notion d'une 'température moyenne globale' qui occupe la 'Une' de nos préoccupations médiatiques.

**La période actuelle est banale, s'inscrivant dans une fluctuation pluriséculaire de faible amplitude thermique qui ne peut se comparer avec les fluctuations du passé, notamment avec celles des événements D-O et leurs augmentations abruptes de température (> 10°C) en quelques décennies seulement.** Ces événements abrupts viennent d'être mis en évidence dans le Jurassique Supérieur (Kimméridgien, il y a environ 155 Ma), période non glaciaire (*in Boulila et al. 2022*) avec, tout comme pour les cycles D-O pléistocènes, des augmentations de température de 15°C en quelques dizaines d'années. Au vu de ces événements thermiques brusques, le réchauffement actuel apparaît très modéré, et s'intègre simplement ou banalement dans les oscillations pluriséculaires de faible amplitude thermique de l'Holocène, ce qui se traduit par la succession des optimas et périodes plus froides discutées ci-dessus (Fig. 5). Ces périodes sont elles-mêmes sujettes à de faibles fluctuations (**Le Roy Ladurie, 1967**).

Olivier Postel-Vinay, soulignant qu'il n'est pas scientifique, avance quelques hypothèses rendant compte des fluctuations climatiques encourues par *Homo sapiens*. Il n'est pas question de les discuter ici, certaines l'ont déjà été dans SCE, mais citons-les pêle-mêle : les rayons cosmiques issus de l'explosion d'étoiles agissant sur la couverture nuageuse (Henrik Svensmark), les paramètres astronomiques ou orbitaux de la Terre (cycles de Milankovic), les fluctuations de la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC), les oscillations océaniques, par exemple oscillations multi-décennales Atlantique Nord (AMO), également Oscillation décennale du Pacifique (ODP), Oscillation antarctique ... Oscillation arctique... Dipôle océan Indien ..., les cycles El Nino, l'irradiation solaire (notamment les taches solaires), les jet streams, le volcanisme. D'autres processus naturels sont également connus dans la littérature, mais non repris dans l'ouvrage.

Certains événements subis par *Homo sapiens* sont interprétés à la lumière des processus naturels rapportés ci-dessus par l'auteur. Citons comme unique exemple Campbell (2016) « les périodes de températures globales réduites coïncident avec une irradiation solaire diminuée et peu ou pas de taches solaires, ce fut le cas lors du minimum d'Oort [vers 1010-1050], le minimum de Wolf [vers 1292-1342], le minimum de Spörer [vers 1416-1534], le minimum de Maunder [vers 1654-1714] et le minimum de Dalton [vers 1790-1830]. Inversement, les périodes d'irradiation plus forte et de forte activité des taches solaires sont associées à un 'réchauffement global' ». Les changements climatiques rapportés par Olivier Postel-Vinay s'expriment de différentes façons tout au long de l'Odyssée d'*Homo sapiens*, ce qui suggère que les processus naturels à l'œuvre sont variés, interagissent et qu'il n'y a pas un seul mécanisme pour expliquer ces différents types de climat et leurs fluctuations.

## 9.8. Conclusion

Le livre d'Olivier Postel-Vinay nous démontre que les fluctuations climatiques sont déjà la règle aux petites échelles temporelles. Les décennies sont 'notre quotidien' et les changements seront ancrés dans chaque génération, les changements au niveau des siècles seront transmis à travers les générations, soit dans les traditions orales, soit dans les écrits. Les changements climatiques au-delà des siècles (millénaires ou plus) seront mis en évidence par les historiens, mais surtout par les scientifiques.

**Au terme de cet article, force est de constater que la période actuelle ne présente rien de particulier par rapport à celles du passé qui furent bien plus violentes et lourdes de conséquences sur les écosystèmes marins et terrestres.** Pourtant ce n'est pas le ressenti actuel, l'alarmisme climatique (et la peur) qu'il engendre 'trompe' nos sociétés. Rappelons quand même que depuis le début des mesures thermométriques directes, les 4 principales séries de température que nous possédons (thermomètres terrestres et satellites) nous montrent que la température globale de la basse troposphère a augmenté de  $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$  en 138 ans (entre 1880 et 2018), Cela correspond **actuellement environ  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{an}$  pour les 30 dernières années** (avec  $0,11^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  sur les océans et  $0,18^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  sur les terres (Scafetta 2021, Spencer 2022)). Pour le GIEC (2019), l'augmentation de température depuis l'ère industrielle est comprise entre  $0,8^{\circ}\text{C}$  et  $1,2^{\circ}\text{C}$ . Les médias nous rappellent chaque jour que cette hausse est exceptionnelle et de plus, que le  $\text{CO}_2$  anthropique en est à l'origine, c'est-à-dire est le grand coupable suivant la terminologie consacrée.

**L'Histoire que nous venons de parcourir nous a appris qu'*Homo Sapiens* en a vu bien d'autres que ce soit en termes de températures, de tempêtes, de méga-sécheresses, d'inondations, de variations du niveau marin, de leurs durées, etc... liés à des processus naturels.** Aujourd'hui le climat est très souvent confondu avec la pollution (suivez notamment les marches des jeunes pour le climat,

sujet déjà abordé par [SCE](#)), avec une mauvaise gestion de nos pratiques urbanistiques, agricoles, forestières, littorales, etc.

**Notre vulnérabilité face aux événements climatiques n'est pas liée au climat mais bien à notre très mauvaise gestion des écosystèmes marins et terrestres, imputable à notre action aveugle. Nous nous sommes mis en position de grande faiblesse par rapport aux événements climatiques qui pourtant ne sont pas aujourd'hui les plus extrêmes, et n'ont rien à envier à ceux du passé récent.**

Citons également [Easterbrook \(2016\)](#) : *“Greenland ice cores have generated a huge amount of climatic data. Ancient temperatures, measured using [oxygen isotopes](#) in the ice, can be accurately dated from annual dust layers in the ice dating back 100,000 years. The  $\delta^{18}\text{O}$  data clearly show remarkable swings in climate. In the past 500 years, Greenland temperatures have fluctuated back and forth between warming and cooling about 40 times, with changes every 25–30 years. **Comparisons of the intensity and magnitude of past warming and cooling climate changes show that the global warming experience during the past century pales into insignificance when compared to the magnitude of profound climate reversals over the past 25,000 years.** At least three warming events were 20–24 times the magnitude of warming over the past century, and four were 6–9 times the magnitude of warming over the past century. The magnitude of the only modern warming that might possibly have been caused by  $\text{CO}_2$  (1978–2000) is insignificant compared to the earlier periods of warming”.*

En conclusion, les successions et interactions des phénomènes naturels rapportées pour une courte période seulement (233 ka) dans le livre d'Olivier Postel-Vinay montrent que la climatologie est une science encore jeune et fort complexe. Olivier Postel-Vinay a traité ce sujet de *'manière passionnante et dépassionnée'* ([Rittaud, 2022](#)). Il reste encore beaucoup à connaître en vue d'une compréhension plus complète des événements rapportés. Vouloir, envers et contre tout, les réduire au seul  $\text{CO}_2$  n'a pas de sens (voir [SCE](#)), ce dernier ayant probablement un rôle très minime (*in SCE et SCE, van Wijngaarden and Happer, 2020, Clark et al. 2021*). La géologie, depuis 4,567 milliards d'années montre que les processus naturels sont complexes suite à leurs interactions à différentes échelles temporelles, et que l'alarmisme actuel n'a aucune raison d'être ([Clintel, 2022](#)). Espérons *qu'Homo sapiens* finisse par le reconnaître et prenne les bonnes décisions au lieu de se lancer tête perdue dans une décarbonation insensée... et extrêmement coûteuse ([Homewood, 2022](#)). Il y a d'autres urgences sur la Planète !

