Séance du 10 février 2020

Le climat. Entre incertitudes et probabilités

Guy PUECH, Jean-Louis CUQ, Louis COT, Bernard AUBERT
Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS CLES
Réchauffement climatique, historique, évolution, rôle du CO_2

RESUME
Aujourd'hui les médias ne cessent de générer des peurs quant au réchauffement climatique et de culpabiliser les humains qui y contribueraient par la production de CO_2. Dans cette réflexion, les auteurs procèdent à une analyse scientifique des principaux facteurs qui conditionnent le climat (soleil d'abord et avant tout, l'albédo, les nuages, l'effet de serre, les effets anthropiques) et discutent de l'effet attribué au CO_2. Un court historique de l'évolution du passé de notre climat, les prévisions actuelles de son évolution, les principales mesures à adopter sont décrites.

Introduction

Notre Secrétaire Perpétuel nous a demandé de vous parler de l'avenir du climat. C'est un sujet d'actualité brûlant et passionnant (il nous concerne tous), mais sujet délicat et piégé : les études sont souvent contradictoires et évoluent rapidement, les incertitudes vont de pair avec les peurs millénaristes et les contre-vérités répétées en boucle. C'est notre rôle d'essayer d'apporter une information désintéressée sur de tels sujets, avec le maximum de réalisme.

Je vous présente donc le résumé des cogitations de notre petit groupe avec lequel j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler.

Analyse des facteurs qui conditionnent le climat

Pour éclairer le problème nous devons, en préambule, vous parler des principaux facteurs qui déterminent le climat.

Notre planète Terre est une petite boule qui gravite autour du soleil dans l'immensité des espaces interstellaires quasiment vides, obscurs, et terriblement froids. Un petit cocon protecteur, l'atmosphère, tempère les variations de température et a permis l'éclosion de la vie.

Nous sommes sous la dépendance quasi-totale du **soleil :**

- d'une part les variations des positions respectives Terre-Soleil conditionnent les saisons et l'alternance jour-nuit ; la mécanique astronomique est heureusement parfaitement réglée,
- d'autre part les variations de l'activité solaire (c'est l'essentiel) nous sont connues par les taches solaires. Des mathématiciens, en Angleterre (Newcastle) et en Belgique (Louvain), ont modélisé ces variations sur les 400 dernières années (figure 1). Ils ont

constaté que le minimum des taches solaires de Maunden correspond au début du récent petit âge glaciaire (XVII^{ème} – XVIII^{ème} siècle). Le minimum de Dalton correspond à une petite période froide de 33 ans au début du XIX^{ème} siècle. Ils ont constaté également qu'après une période d'activité solaire élevée pendant le XXème siècle (le réchauffement actuel), on s'acheminait vers une période de plus basse activité solaire, donc vers une période de refroidissement. Pourquoi pas ? Tout est possible, mais à quelle échéance ?

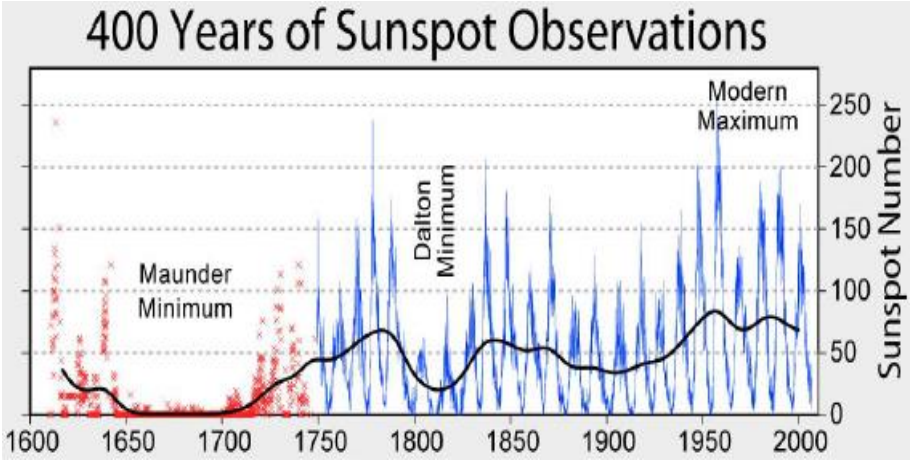


Figure 1 : Variations des taches solaires depuis 1600 (Bernard Tremillon)

Parlons de l'**albedo** dont parlent peu les médias. C'est le pouvoir réfléchissant d'une surface ; on le caractérise par le rapport de 0 à 1 de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente. Quelques ordres de grandeur : glace 0,60 à 0,80 ; océans 0,10 à 0,15 ; forêts et cultures 0,05 à 0,25 ; moyenne de la Terre 0,30. Un exemple de l'importance de l'albedo : la fonte des banquises provoque le passage de l'albedo de 0,6 – 0,8 à 0,10 – 0,15 ; le rayonnement solaire, au lieu d'être renvoyé par la glace, pénètre les océans ; il y a donc réchauffement.

L'évolution des **nuages**, dont dépendent l'albédo et l'effet de serre, est primordiale pour le climat, mais ignorée ou marginalisée à cause de toutes les incertitudes qui règnent dans ce domaine. Selon Hervé Le Treut, l'action des nuages est « le plus important des facteurs d'incertitude sur l'évolution future des climats ».

Abordons l'**effet de serre,** l'enfant chéri des médias.

Observons d'abord que ce terme est très mal choisi : l'atmosphère n'a pas de « chapeau » comme les vitres d'une serre et les phénomènes y sont très différents.

L'énergie solaire nous arrive sous la forme de rayonnements électromagnétiques, dans une large gamme de longueurs d'onde, des ultra-violets aux infra-rouges. La Terre se réchauffe et, de ce fait, réémet un rayonnement thermique infra-rouge, invisible à nos yeux. Ce rayonnement est, dans l'atmosphère absorbé par certains gaz ; cette énergie absorbée se partage, une partie vers l'espace (de l'ordre de 60 %), une partie vers la Terre (de l'ordre de 40%) qu'elle réchauffe. C'est l'effet de serre.

L'effet de serre est très bénéfique ; sans lui la température moyenne de la Terre, qui est actuellement de + 15° Celsius, serait de l'ordre de - 18° C, avec d'énormes variations entre le jour et la nuit. La vie serait impossible, du moins sous la forme que nous connaissons.

L'azote et l'oxygène sont neutres pour l'effet de serre (les gaz ne sont à effet de serre que si leurs molécules comportent au moins trois atomes, et leur action est d'autant

plus forte que leur formule développée est compliquée, donc apte à « vibrer »). La figure n° 2, tirée d'un rapport du G. I. E. C. (Groupement Intergouvernemental pour l'Évolution du Climat) nous montre, dans les trois bandes horizontales, l'importance relative de l'absorption des rayons infrarouges terrestres par la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone CO_2 et le méthane (absorption très variable selon les longueurs d'onde pour chacun des gaz). Leurs actions sont proportionnelles aux surfaces engendrées par les courbes.

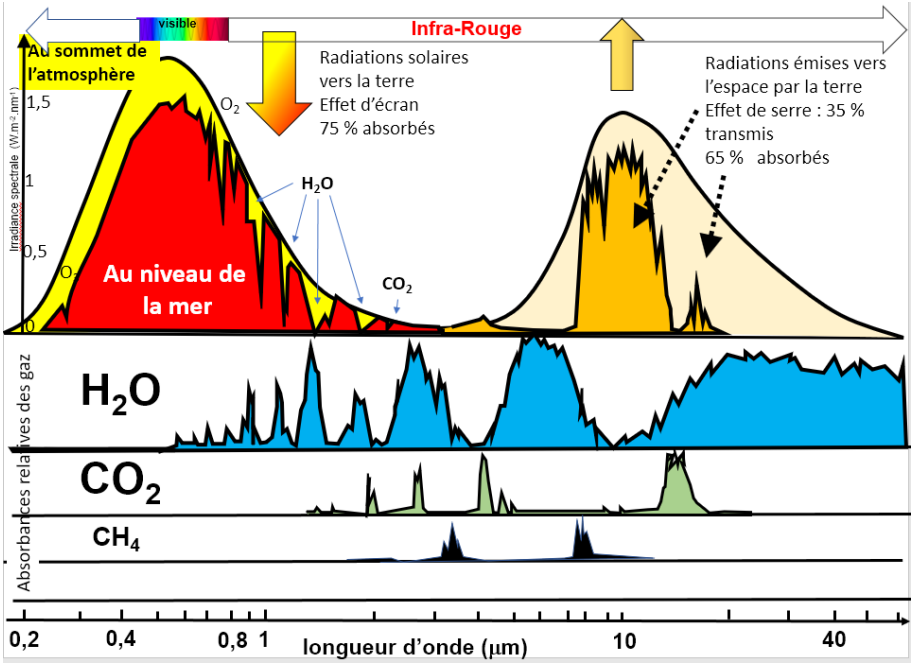


Figure 2 : Énergies radiatives : émise par le soleil, reçue par la terre et réémise dans l'espace. Effets du CO_2, du méthane et de la vapeur d'eau

Il apparait d'une part qu'aux longueurs d'onde considérées l'absorption du rayonnement infra-rouge réémis par la Terre est totale pour ces trois gaz, d'autre part que la vapeur d'eau est, de loin, le principal gaz à effet de serre ; elle y contribuerait pour plus de 60% et pour une valeur de l'ordre de 90% si on considère aussi les nuages ; la masse globale de cette vapeur d'eau est sensiblement constante dans le temps, à température donnée.

De ces constatations découle une relative constance dans le temps de l'effet de serre.

L'action du CO_2 est en fait très discutée. Je ne citerai que deux auteurs. Le spécialiste des rayonnements électromagnétiques, Directeur de Recherches au CNRS, François Gervais proclame en 2013 « l'innocence du carbone » ; l'action du CO_2 serait saturée. L'X-Ponts Jean-Marc Bellamy arrive en 2018 aux mêmes conclusions par l'étude des courbes de Planck des rayonnements infra-rouges. La saturation du CO_2 signifie que les masses de CO_2 actuellement présentes dans l'atmosphère suffisent à absorber la totalité des rayons infra-rouges de la Terre aux longueurs d'onde auxquelles il intervient ; une augmentation de CO_2 serait donc sans effet. Rappelons que cette concentration a augmenté de 40% depuis le milieu du XIX^{ème} siècle ; aujourd'hui de 400 ppm (partie par million), elle augmente de 3 ppm par an entre 2015 et 2017. Dans les années 1970 à 2000 les deux courbes d'augmentation du CO_2 et de la température en

fonction du temps étaient quasiment parallèles. Le GIEC concluait à une corrélation (CO_2 – température). Mais corrélation ne signifie pas causalité ; d'autres facteurs peuvent intervenir ; et les deux courbes ont largement divergé avant ou après ces trois décennies. À l'époque des Dinosaures il y avait de 5 à 10 fois plus de CO_2 dans l'atmosphère qu'aujourd'hui sans qu'il y ait eu un emballement apparent des températures.

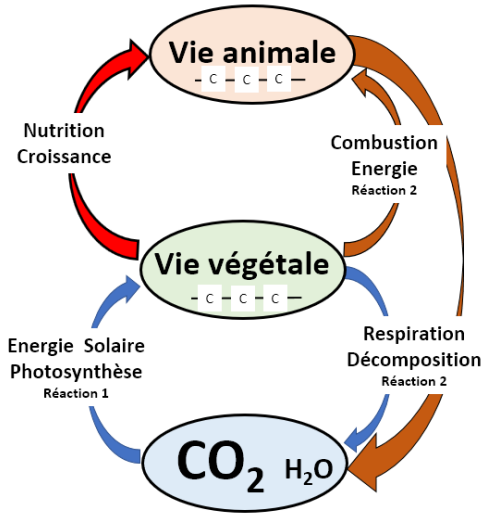
On constate d'autre part que pour une température donnée il y a équilibre entre les énormes masses de CO_2 dissoutes dans les océans et le CO_2 contenu dans l'atmosphère. Lorsqu'il y a (pour des causes à priori naturelles) augmentation des températures moyennes, il y a un dégazage correspondant du CO_2 des océans ; un nouvel équilibre se recrée. Parallèlement s'il y a diminution des températures, il y a stockage dans les océans du CO_2 de l'atmosphère jusqu'à obtention d'un nouvel équilibre. Il y a en fait régulation par les océans de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère en fonction de la température et ce sont les variations de température qui déterminent cette régulation. On constate également que dans la profondeur des océans il y a des réactions d'équilibre entre carbonates et CO_2. Les variations de concentration du CO_2 dans l'atmosphère dépendent donc au moins de deux facteurs : la régulation du CO_2 par les océans, et la production de CO_2 par toutes les combustions et dégradations de matières organiques, y compris évidemment celles produites par l'homme.

Ces différents éléments nous amènent à penser que l'action du CO_2 serait largement surestimée.

Pour en terminer avec le CO_2 permettez-nous de vous rappeler (notre communication avec Jean-Louis Cuq d'avril 2017) que le CO2 et la vapeur d'eau sont, par la photosynthèse, à la base des vies végétale et animale. Il s'agit d'une suite d'opérations très complexes, résumées par la réaction chimique très simple :

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \xrightarrow{E = h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

C'est la création et l'entretien de la vie. Le carbone provenant du CO_2 représente près de 50 % de la biomasse végétale (masse sèche) ; il est de l'ordre de 25 % de la biomasse animale, de notre biomasse ! Le carbone apporté par le CO_2 c'est la vie, n'en déplaise aux médias.



Et l'énergie solaire est stockée dans les sucres dont une partie deviendra nos énergies fossiles. Elles alimentent notre civilisation industrielle depuis deux siècles.

La figure ci-dessus schématise le cycle du carbone qui est aussi le cycle de la vie.

Ajoutons que le CO_2 est un facteur limitant de la photosynthèse. Son augmentation de concentration dans l'atmosphère, de 40 à 45 % depuis la moitié du XIX^{ème} siècle, permet, s'il n'y a pas d'autres facteurs limitants (pluviométrie, sols, …), une augmentation de production du même ordre de grandeur de toute la biomasse végétale, et donc des productions agricoles, ce qui est essentiel pour la survie de l'humanité.

L'effet additionnel de l'homme sur le climat, que certains estiment marginal, serait dû à la prolifération des gaz à effet de serre. On ne parle à tort que du CO_2 ; mais il existe d'autres gaz à effet de serre, beaucoup moins abondants que la vapeur d'eau et le CO_2, qui peuvent jouer, malheureusement, un rôle relativement important dans l'effet additionnel anthropique, dans la mesure où leurs bandes d'absorption diffèrent de celles de l'eau et du CO_2. Il s'agit du méthane CH_4, du protoxyde d'azote N_2O, de l'ozone O_3, des CFC (chlorofluorocarbures), des HFC (hydrofluorocarbures), de l'hexafluorure de soufre SF_6, et probablement d'autres gaz plus ou moins bien connus. Pour éviter leur action sur la couche d'ozone, les CFC, qui étaient les fluides de tous nos systèmes de réfrigération, ont été remplacés par les HFC qui ont une action extrêmement forte sur l'effet de serre, et leur rejet dans l'atmosphère aurait une très forte croissance, de l'ordre de 10 à 15% par an (rapport de l'OAK Ridge National Laboratory du Département de l'Énergie Américaine). Par molécule, le méthane a un effet de serre 56 fois supérieur à celui du CO_2, l'ozone 1200 fois et les HFC entre 4000 et 8000 fois supérieur.

De façon plus générale toutes les activités humaines produisent de l'énergie, de la chaleur. Cette chaleur a-t-elle une influence significative sur le climat général ? Les spécialistes de l'énergie estiment que la totalité des énergies actuellement produites par nos civilisations ne représentent qu'un à deux millièmes de l'énergie reçue du soleil. Ce n'est donc pas significatif !

La pollution de l'atmosphère due aux activités humaines est omniprésente. Son influence sur les nuages et sur l'albédo de la Terre est très mal connue. Les poussières, comme celles dues aux éruptions volcaniques, peuvent faire baisser localement les températures. La diminution des surfaces agricoles et forestières a par ailleurs de multiples conséquences mal connues, ne serait-ce que par les modifications de l'albédo de la Terre.

Conclusions de ce chapitre sur les facteurs qui conditionnent le climat : beaucoup d'incertitudes, action du CO_2 surestimée, régulation par les océans de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère, urgence de remplacer les HFC par d'autres fluides frigorifiques et d'intensifier les études sur l'ensemble des gaz à effet de serre pour que les règlementations actuelles, très coûteuses, soient plus sélectives et mieux adaptées.

Évolution du passé de notre climat.

Notre Terre n'est plus, depuis bien longtemps, ni boule de neige ni boule de feu.

Quatre cycles climatiques se sont succédés au cours des derniers 400 000 ans : cycles glaciaires-interglaciaires de période 100 000 ans avec une variation de température moyenne de l'ordre de 6 à 8° Celsius, ce qui est considérable. Nous serions actuellement dans une période interglaciaire chaude et notre Terre devrait se retrouver en période de glaciation dans quelques…7 000 ans ! (sous toute réserve).

Au cours du dernier millénaire, ce qui nous intéresse le plus (troisième graphique de la figure 3), on note une température moyenne sans grand changement avec cependant deux épisodes importants à signaler : « **l'optimum climatique médiéval** ». Ainsi

rapportées dans un journal anglais, le *Ampshire Advertiser from Southampton*, le 17 juillet 1852, on pouvait lire les informations suivantes :

> « En 1132 en Alsace les sources se tarirent et les ruisseaux s'asséchèrent. Le Rhin pouvait être traversé à pied. En 1152 la chaleur était si intense que l'on pouvait faire cuire des œufs dans le sable. En 1160, à la bataille de Béla (en Hongrie), un grand nombre de soldats moururent en raison de la chaleur excessive. En 1276 et 1277, en France, la récolte d'avoine et de seigle fut totalement détruite par la chaleur. En 1303 et 1304 la Seine, la Loire, le Rhin et le Danube pouvaient être traversés à pied. En 1393 et 1394 un grand nombre d'animaux tombèrent morts et les récoltes anéanties en raison de la chaleur ».

À l'âge d'or des Vikings, le Groenland était alors la « terre verte », l'Angleterre se couvrait de vignobles. Et, tout proche, un **petit âge glaciaire** très contrasté, de la fin du XVI^{ème} siècle (minimum des taches solaires de Maunden) à la moitié du XIX^{ème} siècle. Rappelez-vous les tableaux des Bruegel, leurs scènes villageoises sur les canaux gelés des Pays-Bas. Le vin gelait dans les carafes à Versailles. Il n'était pas question d'effets anthropiques.

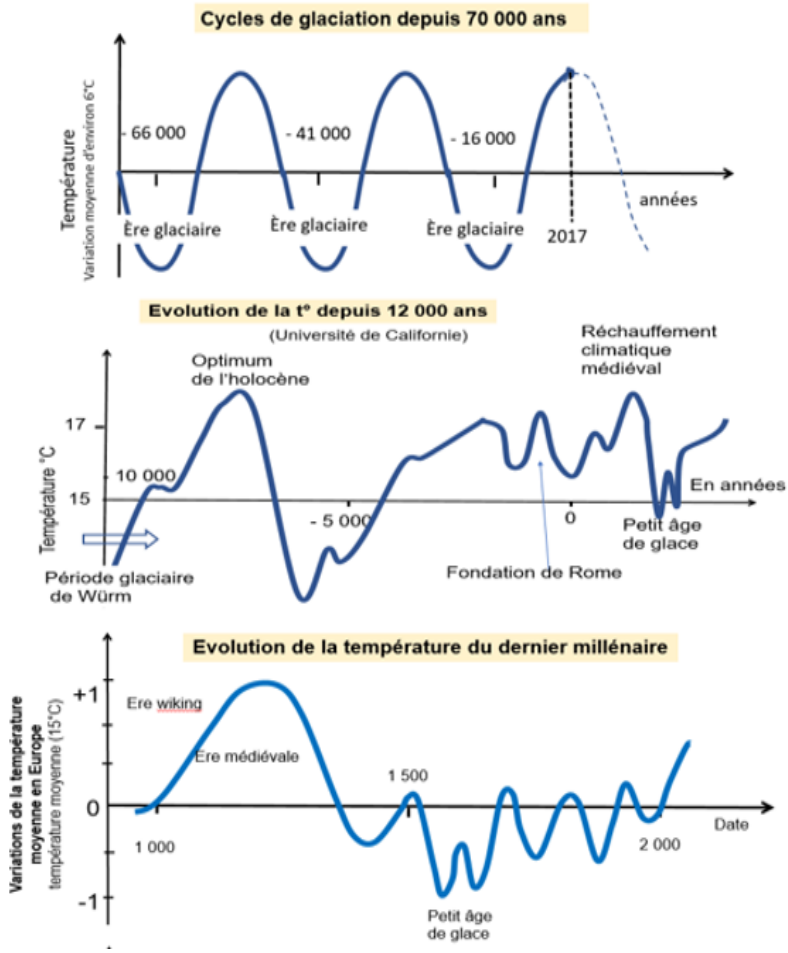


Figure 3 : Évolution de la température moyenne de notre planète.

En 1966 E. Le Roy Ladurie publia son « Histoire du climat depuis l'an mil », somme incontestée de plus de 600 pages, extrêmement documentée, rééditée pour la troisième fois en janvier 2020. Il s'intéresse particulièrement aux glaciers car il constate que leur évolution est un miroir grossissant de l'évolution des températures. Une faible variation de la température peut provoquer leur avancée ou leur recul de quelques dizaines de mètres, voire plus. Les glaciers alpins se sont largement étendus pendant le petit âge glaciaire, écrasant quelques hameaux, et se sont maintenus jusque vers 1850. Leur fonte, au cours du réchauffement du XX^{ème} siècle, les aurait à peu près ramenés à leur situation vers la fin de l'optimum climatique médiéval.

Un mot sur l'Antarctique. C'est un continent très plat de 14 à 15 millions de km^2, 25 fois la France, bien plus que l'Europe. Ce vaste continent est entièrement recouvert d'un gigantesque glacier fossile qui culmine à près de 5000 mètres d'altitude. Son épaisseur moyenne est de 1600 mètres, ce qui donne au glacier un volume de quelques 20 millions de km^3 de glace. Le pôle Sud a une énorme inertie glaciaire. On carotte actuellement les profondeurs de ces vielles glaces pour essayer de faire ressurgir notre passé.

Depuis le milieu du XIX^{ème} siècle nous assistons donc à une remontée des températures, ce qui est logique après le petit âge glaciaire ; elle serait de l'ordre de 1°C.

La courbe récente des variations de température (figure 4) ressemblerait à une sinusoïde très aplatie de période 60 ans qui s'inscrirait dans le cadre de la légère remontée des températures. Les variations sinusoïdales seraient corrélées aux variations d'intensité des taches solaires.

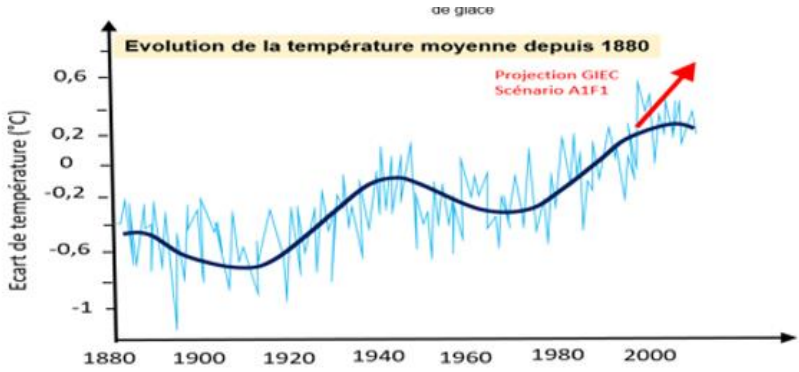


Figure 4 : Évolution de la température moyenne de notre planète depuis 1880.

Prévisions d'évolution du climat

Pour mieux comprendre les problèmes et prévoir leurs évolutions, les chercheurs ont toujours créé des **modèles mathématiques.** En climatologie les modèles successifs sont extraordinairement complexes car les données sont très nombreuses (on peut en oublier), leurs actions, réactions, et souvent rétroactions sont mal connues (nuages par exemple). Selon Roger Temam « le système climatique est un système non linéaire ; les équations obtenues sont d'une infinie complexité ». Résultat : pour l'instant ces modèles sont contredits par les faits, donc non fiables.

Notre climat a donc toujours varié. Il est normal que le climat continue à varier. Puisque les modèles mathématiques ne sont pas fiables, il nous parait logique (avec de nombreux climatologues tels William Gray, James Lovellock) de prévoir l'évolution du climat à court terme en la déduisant de son évolution passée. La stabilité du système

solaire, dont on connait les mécanismes, nous garantit une certaine continuité du climat, continuité qui peut être perturbée par l'évolution des taches solaires, par de puissantes éruptions volcaniques, et probablement aujourd'hui par l'action de l'homme. Les variations locales constatées sont importantes ; le réchauffement est plus marqué dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud. Ce n'est pas un hasard : c'est dans l'hémisphère Nord que se trouvent la majorité des terres émergées et de la population du globe. Ces disparités sont extrêmes aux pôles.

Le niveau des océans a toujours varié, c'est un des grands marqueurs de l'évolution du climat. Le niveau des océans serait remonté de 125 mètres depuis la dernière ère glaciaire. C'est la fonte des glaciers et la dilatation des océans sous l'effet de la chaleur qui font remonter leur niveau. Mais n'oublions pas les phénomènes inverses et beaucoup plus limités du tassement progressif des sédiments dans les deltas alluvionnaires récents. Un exemple local : les ruines de l'avant-port romain d'Arles se trouvent à 3 mètres sous les eaux au large des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Au cours du XX^{ème} siècle le niveau moyen des océans se serait élevé de 18 cm selon l'OISM (Oregon Institute of Science and Medicine), soit près de 2 mm par an. La remontée serait aujourd'hui de 3 mm par an.

Toutes les prévisions d'évolution des températures sont très risquées. À moyen terme elles devraient continuer à évoluer comme nous l'observons depuis le milieu du XIX^{ème} siècle : augmentation modérée (logique après le récent petit âge glaciaire) avec de légères oscillations sinusoïdales. Mais on constate actuellement une accélération de ce réchauffement attestée par la fonte continue de nos glaciers. Quelle est la part des causes naturelles et des effets anthropiques ? On ignore presque tout des influences de l'homme sur cette accélération. Les récentes canicules sont-elles un simple élément météorologique ? Distinguons bien météorologie et climat ; la météorologie est l'observation des phénomènes (température, vent, humidité) en un moment et un lieu donné ; le climat correspond aux conditions météorologiques moyennes durant une période suffisamment longue, d'au moins 30 ans pour l'Organisation Météorologique Mondiale. Autant de questions sans réponses.

Le calcul d'une augmentation de température basée sur une corrélation linéaire (CO_2-températures) est contestable. Le rattrapage des températures après le petit âge glaciaire devrait s'amortir, mais les températures augmentent ; l'incertitude est totale. Nous nous garderons bien de vous indiquer quelle sera la température moyenne en 2050 ou 2100, ni quelles seront les conséquences qui en résulteront. Le climatologue John Christy estime que « notre compréhension du changement climatique n'est pas assez solide, assez mature, pour soutenir des politiques de régulation ou de contrôle ».

Les mesures à prendre. Pour nous résumer, le CO_2 arbitre de la vie n'est pas l'arbitre du climat. Il faut donc pousser les études sur les gaz « rares » à effet de serre et trouver un remplaçant aux HFC. Il faudrait aussi mieux connaitre les équilibres profonds qui régissent les principaux constituants de notre planète. Il est en effet urgent que l'indispensable transition énergétique soit basée sur des données indiscutables.

Aujourd'hui les médias nous harcèlent : la lutte contre le CO_2 serait la panacée ; mais lutter contre le CO_2, n'est-ce pas une aberration ? Oui, puisque le CO2 c'est la vie, et Non, car il y aura toujours du CO_2 qui est l'un des constituants de base de notre univers. Et lutter contre le CO_2, c'est aussi lutter contre l'utilisation effrénée des énergies fossiles, c'est donc lutter contre leur épuisement, et, en même temps, c'est lutter contre la production des gaz à effet de serre nocifs.

Il faut également rechercher et innover. C'est la clef du développement. Créer des produits nouveaux, de nouveaux combustibles à partir de biomasses renouvelables sous-utilisées ou mal utilisées.

Notre conclusion sera brève :

- modestie, les problèmes sont complexes et encore mal maitrisés,
- détermination, il faut diminuer nos pollutions et nos consommations des richesses fossiles qui ont mis des millénaires à se former,
- mais aussi espérance, notre Terre en a vu d'autres.

BIBLIOGRAPHIE

Bonnamy Jean-Marc, *Réchauffement climatique*, L'Harmattan, 2018.

Gervais François, *L'innocence du carbone*, Albin Michel, 2013.

Le Roy Ladurie Emmanuel, *Histoire du climat depuis l'an mil*, Flammarion, 1966-2020.

Le Treut Hervé et Jancovici Jean-Marie, *L'effet de serre*, Flammarion, 2004.

Duyrkin Martin, *Le réchauffement climatique*, une escroquerie. https : //www. youtube. com/watch ? v=r4ZPETbKeNY

CO2 : *L'arnaque du réchauffement climatique* : https : //www. youtube. com/watch ? v=y_pVgooQf0U

D'Apollonia Lionel Scotto, *Ce que parler des controverses climatiques veut dire*, CNRS Éditions, 2015, n°3, pages 129-136.

Dagorn Gary, *Réchauffement climatique : comment la réalité a pris de vitesse la science*, https : //www. lemonde. fr/les-decodeurs/article/2019/10/23/rechauffement-climatique-comment-la-realite-a-pris-la-science-de-vitesse_6016624_4355770. html ? xtor=EPR-33280931-[alert]-20191023-