

Numéro 1

L'Homme et le Climat, 30 années de recul

Editorial

Pour la renaissance de la revue du M.U.R.S.

Fondé en 1974, le Mouvement Universel de la Responsabilité Scientifique (MURS) reste convaincu de la pertinence du projet qui animait ses membres fondateurs: contribuer au débat sur la responsabilité scientifique au sein de sociétés qui s'interrogent légitimement sur la démarche scientifique, et sur ses conséquences. C'est ce que rappelle le manifeste des Madères du MURS, publié dans ce nouveau numéro de notre revue, « Sciences & Devenir de l'Homme ».

Après plusieurs années d'interruption, cette nouvelle publication constitue une renaissance. Nous sommes convaincus de l'utilité pour le débat public d'un lieu d'échange privilégiant l'écrit, s'inscrivant dans la durée, en prise avec les enjeux du moment mais dégagé des contraintes de l'immédiateté. Les nouveaux auteurs motivés par notre approche seront les bienvenus.

Riche de son passé, la revue revisitera également des articles précédemment publiés. Nous pensons en effet qu'un tel travail de mise en perspective de réflexions et de travaux prospectifs antérieurs est riche d'enseignements, qu'il s'agisse de réfléchir aux problèmes du moment ou d'interroger la pertinence des prévisions actuelles.

Ce nouveau numéro s'articule autour des relations entre les hommes et leur environnement. Il fait écho à un numéro spécial de la revue du MURS intitulé « L'environnement atmosphérique à la merci de l'homme ». Publié en 1991, ce numéro était le fruit du travail des conférenciers du groupe de réflexion « Environnement atmosphérique et devenir de l'Homme » constitué au sein du MURS sous l'impulsion de Jean Dausset.

Aujourd'hui Jean Jouzel apporte son témoignage sur la responsabilité de sa communauté scientifique face à l'évolution en cours du climat, en complément d'un article de Jean-Claude Duplessy sur la variabilité et l'histoire à long terme du climat, publié en 1991 dans le numéro spécial de la revue du MURS.

Pour leur part, Laurent Degos et François Ravetta interrogent la relation entre les hommes et leur planète, sous l'angle de la santé de la Terre, une approche retenue par André Berger dans un article publié en 1990 dans la « Revue des Questions Scientifiques », puis repris en 1991 dans la revue du MURS.

Bonne lecture !

Au sommaire :

Editorial

Page 01

Manifeste des Madères

Page 02

Evolution du climat : un témoignage sur la responsabilité de notre communauté scientifique

par Jean Jouzel

Page 03

Variabilité et histoire à long terme du climat

par Jean-Claude Duplessy (ré-édition)

Page 13

Une Terre malade de ses hommes ?

par Laurent Degos & François Ravetta

Page 31

La santé de la Terre, un défi aux Universités

par André Berger (ré-édition)

Page 36

Manifeste des Madères

Ré-édition 2018

Avec l'accélération et la multiplication des activités de recherche depuis le XX^e et le XXI^e siècle, la société s'interroge sur la démarche scientifique. En effet, les sources et les méthodes du savoir scientifique ont varié, sont devenues plus complexes en théorie comme en expérimentation. En même temps, elles se mêlent davantage aux préoccupations économiques et politiques des sociétés modernes. Il apparaît aussi évident que la science peut avoir des effets délétères sur l'Homme et son environnement.

Plus que jamais la responsabilité scientifique est mise en question et nécessite qu'on s'en préoccupe. Le débat est indispensable ! C'est la vocation du MURS depuis la démarche initiée en 1974 par le Recteur Mallet, que de contribuer à ce débat en mobilisant les scientifiques.

La progression des connaissances dans l'Histoire et la culture doit être reconnue mais aussi mise en perspective à travers une réflexion concernant les prises de décision sociétales sur la science et ses applications. Le droit à l'éducation et à l'information scientifique doit se traduire par une meilleure communication entre les scientifiques, les responsables des politiques publiques, les médias et les différents groupes composant la société.

D'un côté, la pensée citoyenne sur la science fluctue au gré des mouvements d'opinion. De l'autre, les affirmations des scientifiques se fondent sur l'épreuve, toujours provisoire, de la vérification expérimentale et de la validation par les pairs. Il en résulte une confrontation entre deux logiques, la logique de l'opinion publique et la logique des scientifiques, qui doivent dialoguer pour surmonter leurs différents. Ce dialogue ne saurait se construire ni sur l'exclusion de l'une ou de l'autre, ni leur amalgame indifférencié. Plus largement, l'articulation de la Science, de la Société et du devenir de l'Homme ne se fera pas sans le dialogue, le partage des savoirs, la réflexion philosophique, les apports des Sciences humaines et sociales. Une route commune doit conduire à une harmonie sur les choix du futur.

Le MURS se donne ainsi pour but de renforcer l'ancrage de la science dans la société à travers un dialogue entre scientifiques d'horizons différents selon une approche résolument démocratique et humaniste.

Il engage des réflexions éthiques sur la science et le devenir de l'Homme en se fondant sur des valeurs universelles.

Il souhaite une science qui progresse et dialogue avec ses partenaires en société.

Mouvement Universel de la Responsabilité Scientifique
 Responsables, nous le sommes tous individuellement : scientifiques
 et non scientifiques, décideurs et citoyens.

Evolution du climat : un témoignage sur la responsabilité de notre communauté scientifique

Jean Jouzel, Directeur émérite de recherche au CEA, chercheur au LSCE/IPSL

Le réchauffement climatique lié aux activités humaines est une réalité. Si rien n'était fait pour diminuer rapidement nos émissions de gaz à effet de serre, il serait difficile aux jeunes d'aujourd'hui de s'adapter aux conditions climatiques auxquelles ils auraient à faire face dans la seconde partie de notre siècle, voire impossible dans certaines régions particulièrement vulnérables. Ce constat est basé sur les travaux d'une communauté scientifique qui s'est mobilisée depuis les années 80 de façon à mieux appréhender les causes de ce réchauffement, ses conséquences et les solutions qui pourraient être mises en œuvre pour le limiter et s'y adapter, au moins pour l'essentiel. Consciente de sa responsabilité vis-à-vis des décideurs politiques et de l'ensemble des populations de notre Planète, cette communauté s'est organisée au sein du GIEC, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du climat. Climatologue, impliqué depuis les années 70 dans la reconstitution des climats passés à partir de l'analyse des glaces de l'Antarctique et du Groenland, j'ai rapidement perçu cette responsabilité que nous avons, collectivement, de porter les résultats de nos travaux à la connaissance du plus grand nombre, bien au-delà de cette communauté « climat », et de fournir aux « décideurs politiques » les arguments pour qu'ils puissent prendre des décisions.

Cette prise de conscience de notre responsabilité collective s'est, pour moi, largement construite autour des travaux de paléoclimatologie dans lesquels je me suis impliqué et de leur pertinence vis-à-vis de l'évolution future de notre climat. L'article de Jean-Claude Duplessy intitulé « Variabilité et histoire à long terme du climat » paru dans les cahiers du MURS en 1991, est un excellent point de départ qui permet déjà d'illustrer cet apport des données du passé et de mettre en valeur les aspects sur lesquels il s'est considérablement enrichi depuis le milieu des années 80. La connaissance que nous avons des grands cycles glaciaires- interglaciaires qui ont ponctué le quaternaire – période qui couvre les deux derniers millions d'années – repose alors essentiellement sur l'étude des sédiments marins. Grâce à eux, la théorie astronomique, qui stipule l'existence d'un lien entre les variations de l'insolation liées à l'évolution lente de l'orbite terrestre

et ces grands cycles climatiques, est très largement acceptée. Dans son article, Jean – Claude Duplessy nous décrit comment les données publiées au cours des décennies 70 et 80 mettent en pleine lumière l'apport de ces sédiments marins à la connaissance des climats passés grâce, en particulier, au programme CLIMAP (Climate/Long Range Investigation Mappings and Predictions Project). Visant à cartographier les conditions climatiques qui régnaient sur l'ensemble des océans au Dernier Maximum Glaciaire, il y 20 000 ans, ces travaux montrent qu'entre cette période et aujourd'hui le réchauffement moyen de notre Planète n'aurait pas excédé 4°C.

Les décennies 70 et 80 sont aussi celles de la prise de conscience du risque que font peser les activités humaines sur notre climat à travers l'augmentation de l'effet de serre liée, en premier lieu, aux émissions de dioxyde de carbone qui résultent de l'utilisation croissante des combustibles fossiles et de la déforestation. Certes dès la fin du 19e siècle, le suédois Svante Arrhenius attirait l'attention sur le réchauffement qui pourrait résulter de l'utilisation du charbon, et la montée rapide de la concentration atmosphérique en CO₂ est confirmée grâce aux mesures initiées en 1958 par Charles Keeling dans une station située près du sommet du Mauna Loa dans la grande île d'Hawaï. Mais ce n'est qu'à partir des années 70 que les climatologues bénéficient de l'apparition des premiers super calculateurs et s'intéressent à la capacité des modèles climatiques à simuler des climats différents de celui dans lequel nous vivons actuellement. Ces modèles confirment qu'une fois l'équilibre climatique atteint, un doublement de la teneur en CO₂ se traduirait par un réchauffement important. Un rapport de l'Académie des sciences américaine, rédigé en 1979 sous la direction de Jules Charney, estime que ce réchauffement, qui définit la sensibilité du climat, serait compris entre 1,5 et 4,5°C. Ces valeurs sont significativement plus élevées que celle, proche de 1,2°C, attendue en l'absence de rétroactions dans le système climatique ce qui témoigne de l'existence de mécanismes d'amplification au sein de la machine climatique.

Fort des résultats du projet CLIMAP, Jean-Claude Duplessy nous fait part de ses craintes en notant qu'un réchauffement de 4°C, envisageable d'ici la fin du 21^{ème} siècle, serait aussi grand que celui qui a permis à la Terre de passer d'une période glaciaire à l'époque actuelle. Se basant sur le rapport Charney, André Berger est sur ce même registre de l'alerte dans un autre article « La santé de la Terre, un défi aux universités » paru dans ces mêmes cahiers du MURS. Nous sommes en 1991 et l'un et l'autre sont très attentifs aux conclusions du GIEC, créé en 1988 et dont le premier rapport vient d'être publié en 1990.

Chercheur, depuis le début des années 70, dans le domaine de l'évolution passée de notre climat, je m'intéresse – comme Jean-Claude Duplessy, André Berger et beaucoup de nos collègues climatologues – aussi à son avenir. Une première raison est que je suis impliqué avec Claude Lorius et son équipe du LGGE Grenoble dans l'analyse des glaces du forage réalisé par des équipes soviétiques à Vostok au cœur de l'Antarctique ; à Saclay nous analysons la composition isotopique de la glace qui nous permet de reconstituer l'évolution de la température tandis qu'à Grenoble Dominique Raynaud, Jean-Marc Barnola et Jérôme Chappellaz reconstruisent les variations de la composition de l'atmosphère à partir des bulles d'air qui y sont piégées. Et en 1987, une série de publications montre que concentration en CO₂ et climat ont varié de concert sur l'ensemble du dernier cycle glaciaire – interglaciaire ; s'y ajoute le fait que les concentrations observées en 1990 n'ont jamais été aussi élevées depuis 160 000 ans. Ces travaux – mentionnés dans l'article de Jean-Claude Duplessy – ont indéniablement contribué à la prise de conscience de l'influence des activités humaines sur l'évolution récente et future de notre climat, y compris dans la sphère politique. J'y suis alors d'autant plus sensible que dans les années 80, j'ai séjourné aux Etats-Unis et travaillé à New-York au GISS

alors dirigé par Jim Hansen dont les auditions devant le congrès américain ont marqué cette décennie (en juin 1988, année de canicule, il affirme que le réchauffement est avéré à plus de 99 chances sur cent et clame l'urgence des mesures à prendre) et à Columbia University avec Wally Broecker un des premiers scientifiques à avoir tiré la sonnette d'alarme à partir d'un article « Are we on the brink of a pronounced global warming » paru en 1975.

C'est donc tout naturellement qu'à partir des années 90, je me suis impliqué dans les travaux du GIEC comme auteur principal des 2^{ème} et 3^{ème} rapports publiés en 1995 et 2001, puis membre de son bureau et vice-président du groupe 1, dédié aux aspects scientifiques, jusqu'en 2015. Une de mes motivations était de mettre en avant le fait que les climats passés nous apportent toute une série d'informations pertinentes vis-à-vis de son évolution future. Le lien entre climat et effet de serre, déjà évoqué, en fournit un premier exemple mais les recherches conduites depuis les années 90 nous en offrent d'autres. Dans le prolongement de l'article de Jean-Claude Duplessy, j'évoquerai dans la première partie de cet article, cet apport des données du passé.

A travers ma participation au GIEC, j'ai rapidement pris conscience de la responsabilité de notre communauté scientifique vis-à-vis des citoyens tant les décisions en matière de lutte contre le réchauffement climatique et d'adaptation sont de nature à modifier notre mode de vie et les trajectoires de développement de nos civilisations. Je me suis également intéressé aux prises de décision des politiques, en particulier à travers une participation, au titre de la délégation française, aux conférences climat – les COP – successives de 2001 à 2019. J'aborderai, cette dualité entre communauté scientifique et décision politique dans une deuxième partie de cet article que je conclurai en mentionnant certains de mes engagements largement motivés par cette idée de la responsabilité du scientifique.

1- Que nous ont appris les données du passé vis-à-vis de l'évolution future de notre climat?

Depuis que notre Planète s'est formée il y a environ quatre milliards et demi d'années, son climat s'est constamment modifié et en reconstituer l'histoire est intéressant à beaucoup de titres. Le dernier million d'années marqué par la succession de périodes glaciaires et interglaciaires aux caractéristiques très différentes est particulièrement riche d'informations qui peuvent être extraites d'archives océaniques,

continentales ou glaciaires et de leur inter comparaison, et être confrontées à celles fournies par les modèles climatiques. C'est cet aspect que Jean-Claude Duplessy évoque lorsqu'il met en parallèle les 4°C de réchauffement estimés depuis le Dernier Maximum Glaciaire à ceux envisageables d'ici la fin du siècle. Le développement, important au cours des trente dernières années, de modèles climatiques permettant de simuler

les climats passés a enrichi cette comparaison d'autant que ce sont les mêmes modèles que ceux utilisés pour les projections vers le futur et pour simuler le climat de planètes comme Vénus ou Mars aux conditions différentes de celles de la Terre en terme de composition de l'atmosphère et de distance par rapport au soleil. Cette approche permet d'évaluer la capacité de ces modèles à rendre compte de conditions climatiques différentes de celles d'aujourd'hui et fournit une estimation de la sensibilité du climat, c'est à dire de sa réaction vis-à-vis d'une modification de l'effet de serre. Elle nous fournit donc un second exemple de pertinence des données du passé vis-à-vis de l'évolution future de notre climat après celui déjà mentionné du lien entre climat et effet de serre dans le passé. Je reviens sur ce lien car les données se sont depuis considérablement enrichies et j'évoque trois autres aspects qui n'étaient pas appréhendés au début des années 90, l'existence de variations climatiques rapides, l'observation de niveaux de la mer élevés au moment du dernier interglaciaire, il y a 125 000 ans, et le climat des derniers millénaires dont une meilleure connaissance permet de mettre en perspective le réchauffement récent et contribue à son attribution aux activités humaines.

1.1- Evolution conjointe du climat et de l'effet de serre au cours des 800 000 dernières années

Nous avons déjà dit l'importance des résultats publiés en 1987 à partir de l'analyse des glaces antarctiques de Vostok concrétisés par une série de trois articles dans la revue Nature et leur retentissement. En témoigne le commentaire, publié dans ce même numéro, traitant cette carotte Vostok de corne d'abondance et l'intérêt de la presse étrangère ; j'ai été surpris et fier d'être interviewé dans notre laboratoire par Walter Sullivan, célèbre journaliste scientifique du New-York Times. Ces résultats vont s'enrichir dans différentes directions.

1. Après le CO₂, l'équipe de Grenoble emmenée par Dominique Raynaud va s'intéresser au méthane, CH₄, autre gaz à effet de serre dont la concentration dans l'atmosphère est aujourd'hui affectée par les activités humaines, pour partie par les activités agricoles. L'enregistrement couvrant le dernier cycle climatique obtenu par Jérôme Chappellaz fait également état de valeurs plus faibles en période froide qu'en période chaude et des valeurs actuelles environ deux fois plus élevées que ces dernières.
2. Tenir compte de ces deux gaz à effet de serre, CO₂ et CH₄, conduit à estimer que l'augmentation du forçage radiatif a été de 2,4 Watts/m² entre le Dernier Maximum Glaciaire et la période préindustrielle. Cette valeur est significative et du même ordre que celle résultant des activités humaines depuis 1750 (celle correspondant au doublement de la concentration en CO₂, précédemment cité, est de 4 Watts/m²).
3. L'interprétation des données obtenues sur le forage de Vostok qui sont clairement influencées par les variations de ce forçage radiatif en découle. Comme cela a été démontré par les sédiments marins, c'est bien la position de la Terre sur son orbite qui est le métronome des grandes glaciations du Quaternaire mais l'effet de serre intervient comme l'un des amplificateurs des changements d'insolation. Son rôle est loin d'être négligeable puisque dans un article publié par Claude Lorius et co-auteurs en 1990, il est estimé que la variation de l'effet de serre a contribué pour environ moitié au réchauffement associé au passage du Dernier Maximum Glaciaire à la période actuelle. Ces auteurs en déduisent une sensibilité du climat de 3 à 4° C, ce qui suggère, tout comme les modèles, que le système climatique agit comme un amplificateur vis-à-vis de l'augmentation de l'effet de serre.
4. Enfin ces enregistrements vont remonter beaucoup plus loin dans le temps. Le forage Vostok se

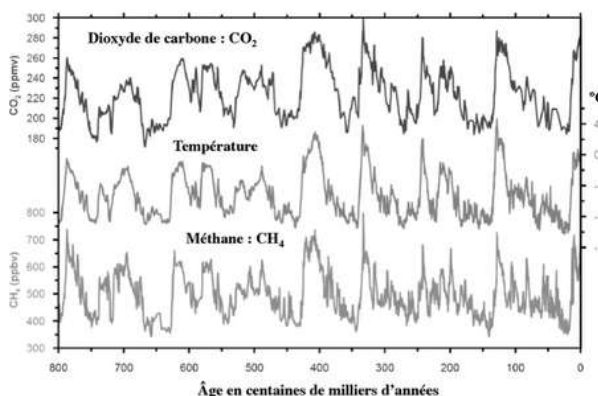


Figure 1 :

Entre 1987 et 2008, les enregistrements de la variation de la température en Antarctique (Jouzel et al., 2007) et de la composition en CO₂ (Luthi et al., 2008) et en CH₄ (Loulergue et al., 2008) ont progressivement été étendus aux 800 000 dernières années grâce aux analyses réalisées sur les forages de Vostok et d'EPICA Dome C (l'année temps 0 correspond à 1950).

poursuit, malgré les difficultés auxquelles font face les foreurs russes dans les années 90, ce qui permet d'étendre les enregistrements aux 420 000 dernières années. Et le forage européen réalisé au Dome C, un autre site de l'Antarctique de l'Est, permet de doubler la mise et d'atteindre 800 000 ans. Sur l'ensemble de cette période qui couvre 8 cycles climatiques, la corrélation très étroite entre climat et effet de serre est pleinement confirmée (Figure 1) avec un changement de rythme il y a environ 400 000 ans et depuis des variations plus marquées entre périodes glaciaires et interglaciaires. Ceci vaut aussi bien pour la température en Antarctique déduite de l'analyse des forages que pour la teneur en CO₂ et pour l'élévation du niveau de la mer, deux paramètres à caractère global.

Le message est clair, les variations de l'effet de serre ont contribué aux variations passées de notre climat. Et, au vu de la sensibilité estimée à partir de l'ensemble de ces données du passé, on doit effectivement s'attendre à un réchauffement lié aux activités humaines dont l'amplitude sera, en fonction du scénario d'émissions, cohérente avec celle actuellement envisagée à partir des modèles climatiques.

1.2- La découverte de variations climatiques rapides

Le début des années 90 a été marquée par une découverte majeure, celle de l'existence de variations climatiques rapides. Une confirmation plutôt car, dès les années 1930, l'étude de séries polliniques et de sédiments lacustres avait montré que la dernière déglaciation était marquée par des fluctuations rapides ; Jean-Claude Duplessy nous dit que cette rapidité est confirmée par l'étude des sédiments marins « des conditions chaudes s'installent, elles sont suivies d'un

refroidissement brutal, de l'ordre du siècle, et cette nouvelle période très froide se prolonge sur un bon millénaire et est d'un nouveau réchauffement rapide ». Ces variations rapides survenant durant la dernière déglaciation, Bolling Allerod puis Younger-Dryas, sont donc déjà bien documentées.

Et les forages glaciaires réalisés au Groenland – Camp Century dans les années 1960, Dye 3 au début des années 1980 – laissent clairement entrevoir que la dernière période glaciaire, aussi, était loin d'être stable. Les sédiments marins le suggéraient également mais la confirmation est fournie par l'étude des forages européen GRIP et américain GISP 2 qui ont atteint le socle rocheux en 1992 et 1993, puis North GRIP, au centre du Groenland. Ils révèlent que l'ensemble de la dernière période glaciaire est ponctuée par une succession de variations rapides d'abord identifiées dans le profil de composition isotopique de la glace. On y recense pas moins de 25 sursauts climatiques (Figure 2). Sur quelques décennies, parfois moins, l'atmosphère s'est fortement réchauffée, la distribution des vents et des précipitations s'est trouvée modifiée.

Un refroidissement, qui s'étalait plus lentement sur quelques centaines d'années et se terminait plus rapidement, venait alors clore ce sursaut climatique. De tels épisodes, appelés « événements de Dansgaard-Oeschger » sont particulièrement marqués dans l'Atlantique Nord. Au Groenland, le réchauffement a parfois atteint 16°C en quelques décennies, peut-être moins dans certains cas ! Les habitants de l'Europe de l'Ouest ont sans doute été les plus éprouvés par ces bouleversements climatiques, dont on retrouve la trace dans les sédiments marins de l'Atlantique Nord mais aussi sur le continent adjacent, aussi bien dans des concrétions calcaires que dans des sédiments lacustres. Ils ont en fait laissé des traces sur une large partie de la

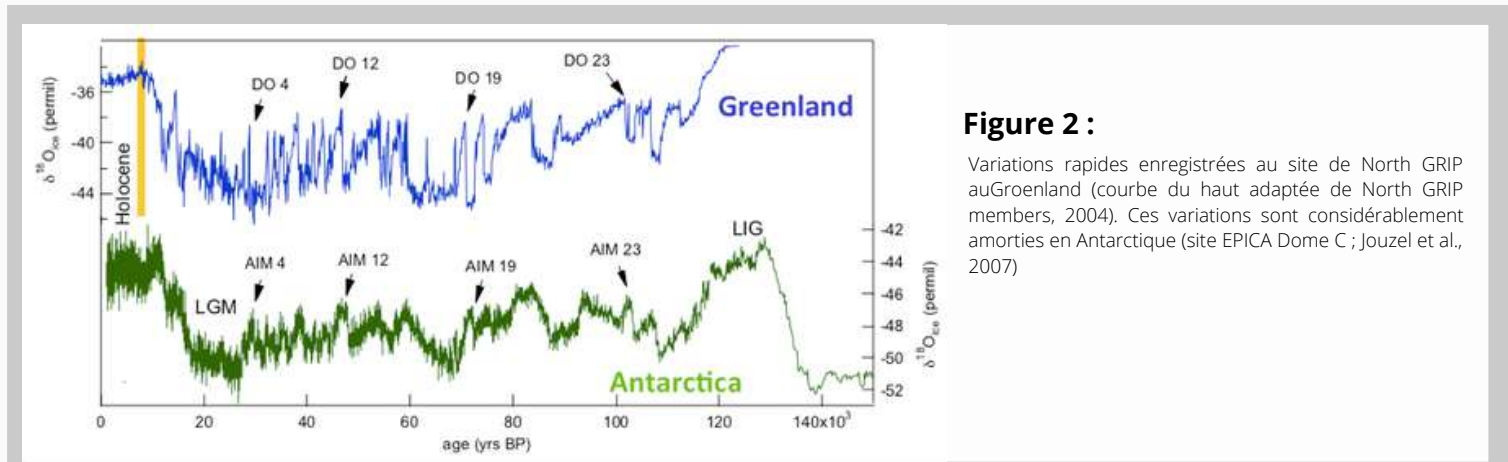


Figure 2 :

Variations rapides enregistrées au site de North GRIP au Groenland (courbe du haut adaptée de North GRIP members, 2004). Ces variations sont considérablement amorties en Antarctique (site EPICA Dome C ; Jouzel et al., 2007)

planète, dans le rythme des moussons comme en témoignent des stalagmites chinoises et jusque dans l'hémisphère Sud où elles apparaissent néanmoins très amorties ainsi que l'illustre la comparaison des enregistrements isotopiques des glaces du Groenland et de celles de l'Antarctique (Figure 2).

Près de trente ans se sont écoulés au cours desquels l'intérêt pour ces variations rapides découvertes dans le grand Nord – leur extension géographique, les mécanismes qui en sont à l'origine, la possibilité qu'elles surviennent au cours des prochains siècles – est allé en s'amplifiant. Dès leur mise en évidence, ces changements ont été attribués à des modifications de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord en réponse à des décharges massives d'icebergs dont la fonte injecte en surface de grandes quantités d'eau douce et légère, modifiant ainsi la formation des eaux profondes. On parle alors d'arrêt puis de remise en route du Gulf Stream, un peu abusivement car il s'agit d'une modification de ce courant de surface. Mais l'atmosphère n'est pas en reste comme en témoigne les variations extrêmement rapides des retombées de poussière associées aux événements Dansgaard/Oeschger. Ces derniers ont donné naissance à la notion de « surprise climatique » avec en arrière-plan la question de la stabilité de la circulation océanique dans un contexte de réchauffement climatique. Une modification importante du Gulf Stream, peu probable d'ici 2100, ne peut pas être exclue à échéance de quelques siècles. Mais contrairement à une idée assez répandue et popularisée par le film « Le jour d'après », cette modification ne se traduirait pas par une plongée dans une nouvelle ère glaciaire mais plutôt par un retour rapide vers des conditions proches de celles qui règnent aujourd'hui sur l'Atlantique Nord et les continents adjacents.

La pertinence de ces variations climatiques rapides par rapport à l'évolution future de notre climat tient à l'échelle de temps de ces événements, celle d'une vie humaine voire beaucoup moins. Mais elle nous donne aussi l'idée d'un climat plus fragile que, généralement, nous ne l'imaginons.

1.3- Un niveau de la mer plus élevé qu'aujourd'hui au dernier interglaciaire

Au cours des trois dernières décennies, notre connaissance de la dernière période interglaciaire, autour de – 125 000 ans, a énormément progressé. Pendant cette période, le maximum du niveau moyen de la mer a été, durant plusieurs millénaires, supérieur au niveau actuel d'au moins 5 m du fait de la contribution importante des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Cette variation du niveau de la mer s'est produite dans un contexte caractérisé par des températures de surface aux hautes latitudes, moyennées sur plusieurs milliers d'années, supérieures d'au moins 2 °C aux températures actuelles ; la contribution la plus importante était due à une diminution du volume de la calotte du Groenland et, à un degré moindre, à celle de l'Antarctique. Le réchauffement était moins important à l'échelle globale ce qui indique qu'un réchauffement même limité peut conduire, s'il est maintenu dans la durée, à des élévations du niveau de la mer élevées et aux conséquences très importantes.

Ces données du passé illustrent donc les risques liés, à long terme, à l'élévation du niveau de la mer. En fait, à partir d'un certain seuil compris entre 2 et 4°C – de l'ordre donc des valeurs envisageables en réponse à nos activités – le réchauffement de la planète entraînerait une disparition quasi-complète de la calotte du Groenland en l'espace d'un millénaire ou plus, ce qui provoquerait une élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe d'environ 7 m.

1.4- Un réchauffement sans précédent

Augmentation de l'effet de serre liée aux activités humaines et réchauffement sont désormais l'une et l'autre bien documentés. Cependant, établir une relation de cause à effet et donc attribuer aux activités humaines le réchauffement récent est loin d'être évident. Il est pour cela indispensable de situer ce réchauffement, un peu moins de 1°C depuis les années 50, dans un contexte historique plus long, de l'ordre de un à deux millénaires. Cette reconstruction de l'évolution de notre climat à l'échelle millénaire a été au cœur d'une polémique autour de ce qui reste dans les annales comme le débat sur la « crosse de hockey » porté, du côté des scientifiques, par le chercheur américain Michaël Mann.

Le climat du dernier millénaire, période popularisée en France par les chroniques historiques d'Emmanuel Le Roy-Ladurie, est bien documentée dans de nombreux pays européens mais aussi en Chine et en Egypte. Même si elles sont souvent à caractère local et largement discontinues, les données historiques - englacement des canaux aux Pays-Bas, nombre de jours de gel ou de neige, inondations et sécheresses, force des vents et tempêtes sur les continents et les océans, date de la migration des oiseaux, de la floraison des arbres et des vendanges, volume des récoltes - ont, dans nos régions, fourni une part de la connaissance que nous avons du climat de cette période. Elles ont permis d'identifier l'optimum médiéval, aux 11ème et 12ème siècles et le petit âge glaciaire qui, en Europe de l'Ouest, a prévalu entre les 16ème et 19ème siècles, néanmoins interrompu de périodes plus clémentes.

Michael Mann utilise ces données historiques mais il

s'appuie également sur les reconstructions climatiques basées sur l'étude des cernes d'arbre, des glaces polaires et des coraux (Figure3). Résultat : la « crosse de hockey » revoit à la baisse l'importance donnée par les historiens à l'optimum médiéval et au petit âge glaciaire. Cela ne remet pas du tout en cause leur approche plus qualitative et essentiellement limitée à l'Europe de l'Ouest, mais tend à montrer le caractère exceptionnel de la période récente, lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble de notre hémisphère. Les conclusions du GIEC selon lesquelles « le réchauffement observé au 20ème siècle a été le plus important des 1000 dernières années et, dans l'hémisphère Nord, les années 90 ont été la décennie la plus chaude », qualifiées l'une et l'autre de probables, ont déchainé en 2001 des passions qui restent vives. Car on en pressent l'importance dans le débat sur la responsabilité des activités humaines dans ce réchauffement récent.

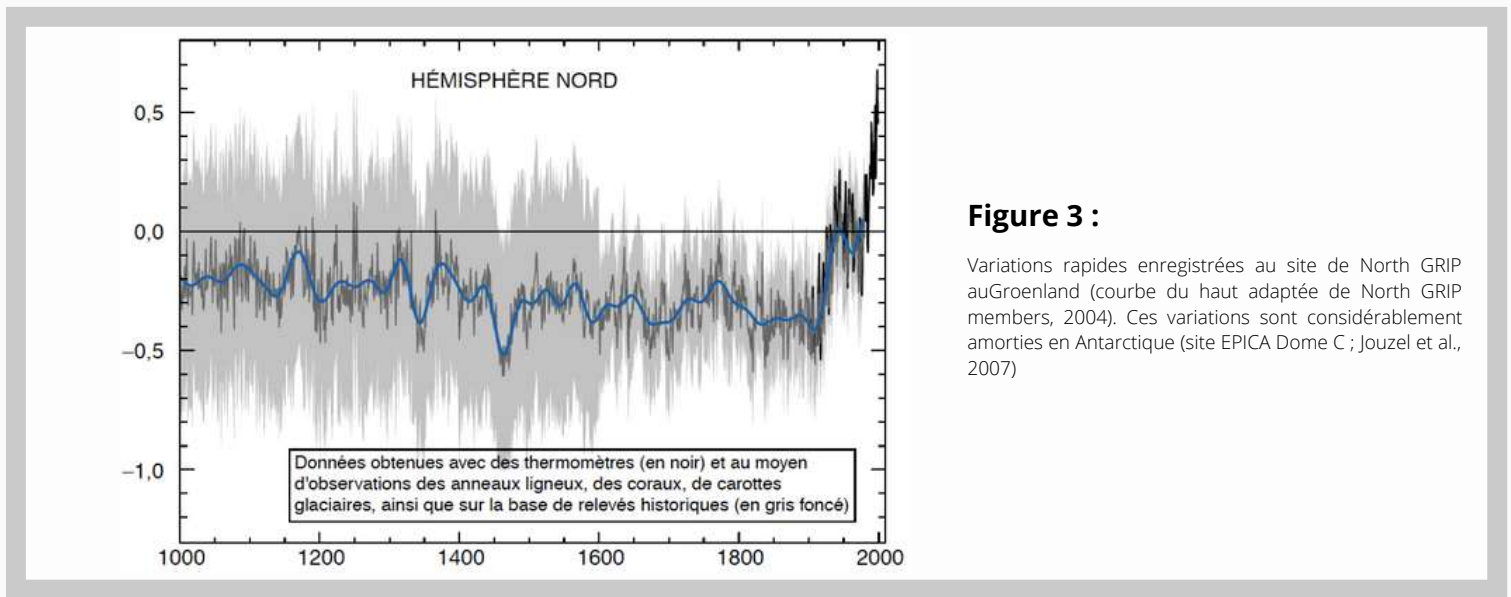


Figure 3 :

Variations rapides enregistrées au site de North GRIP au Groenland (courbe du haut adaptée de North GRIP members, 2004). Ces variations sont considérablement amorties en Antarctique (site EPICA Dome C ; Jouzel et al., 2007)

Les deux derniers rapports ont confirmé, pour l'essentiel, les conclusions des travaux de Michaël Mann et de ses collègues en les précisant. Ainsi des périodes de plusieurs décennies au cours desquels la température était aussi élevée qu'à la fin du 20ème siècle ont effectivement été identifiés dans certaines régions. Mais alors que le réchauffement affecte l'ensemble de la Planète, ces intervalles chauds ne se sont pas produits de manière aussi cohérente dans les différentes régions. Ceci explique que, « considérée sur l'ensemble de l'hémisphère Nord, aucune période de 30 ans appartenant à l'optimum médiéval n'ait été aussi chaude que les années 1983 à 2012 ».

Qui plus est, la prise en compte du forçage orbital, dont la variation est faible mais non négligeable à ces échelles de temps, des forçages solaire et volcanique et de la variabilité interne permet d'apporter une explication au refroidissement observé entre optimum médiéval et petit âge glaciaire ainsi qu'à sa répartition géographique. Ces fluctuations du dernier millénaire peuvent donc être associées à des causes naturelles de variation du climat tout au moins jusque dans la première partie du siècle dernier. Mais ce n'est plus le cas pour la période plus récente de nature visiblement différente (Figure 3). Cette conclusion doit beaucoup aux modélisateurs du climat qui ont réalisé deux types de simulations couvrant le 20ème siècle.

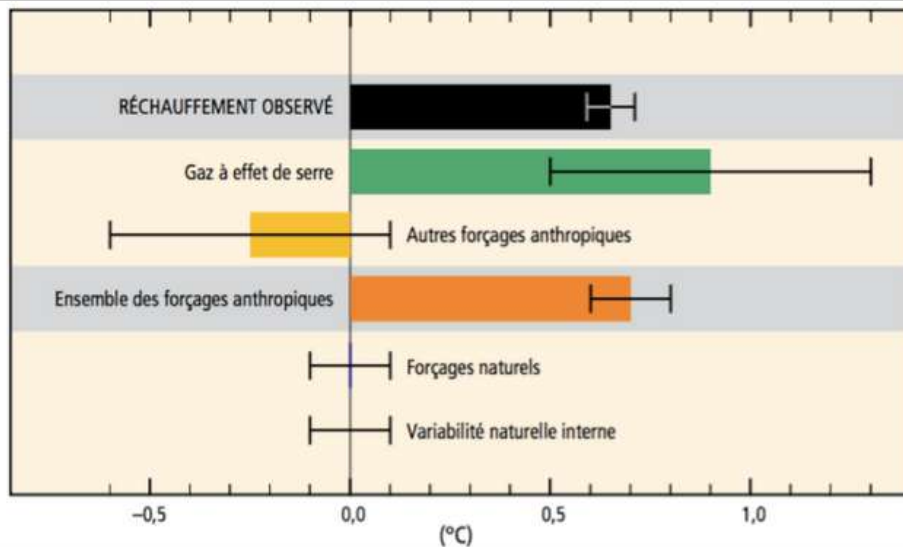


Figure 4 :

Réchauffement observé sur la période 1951-2010 et estimations des contributions des activités humaines, des forçages naturels et de la variabilité interne naturelle à ce réchauffement avec indication des incertitudes (Source : GIEC, 2014)

Les premières ne prennent en compte que l'évolution des forçages naturels, variabilité solaire et volcans, tandis que les secondes incluent également les forçages anthropiques, gaz à effet de serre et particules d'aérosols. Il est impossible de reproduire le réchauffement observé si l'on ne prend pas en compte l'évolution des gaz à effet de serre, ce qui implique que nous sommes, de façon quasi-certaine dans un monde dont nous modifions le climat. Sur la période 1950-2010, la contribution naturelle est estimée à moins de 0,1°C tandis que celle liée aux activités humaines est estimée

à 0,7°C et est donc de l'ordre du réchauffement observé de 0,6°C (Figure 4). L'influence des activités humaines est également détectée dans le réchauffement de l'océan, dans les changements du cycle global de l'eau, dans le recul des neiges et des glaces, dans l'élévation du niveau moyen mondial des mers et dans la modification de certains extrêmes climatiques. En 2014, l'ensemble de ces éléments conduit le GIEC à conclure que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du 20ème siècle, à plus de 95 chances sur 100.

2- La prise de conscience de ma responsabilité de scientifique

Fils d'agriculteurs bretons, j'ai un souvenir émerveillé du bocage tel qu'il existait encore dans les années 50. Gamin, c'était une de mes joies d'emmener les vaches au pré en suivant un magnifique chemin creux que le remembrement a depuis largement supprimé. Nul doute, j'ai apprécié la qualité de l'environnement dans lequel j'ai grandi mais je ne crois pas que cette jeunesse à la campagne aurait suffi à me faire prendre conscience des dangers que les activités humaines font courir à notre environnement.

C'est à travers mon activité de recherche que je m'y suis intéressé. Ce n'était d'ailleurs probablement pas le cas en tout début de carrière même si ma thèse, commencée en 1968, portait sur l'étude de la formation de la grêle, phénomène naturel aux conséquences potentiellement dévastatrices pour les cultures et, encore plus, pour les vignobles. Le déclic s'est produit plus tardivement, grâce à Claude Lorius qui dans les années 70 m'a entraîné vers l'étude des glaces polaires. Dans les années 80, j'ai eu la chance d'être impliqué

dans la découverte d'un lien entre effet de serre et climat dans le passé grâce aux résultats obtenus à partir de l'analyse du forage Antarctique de Vostok (cf 1.1), et, au début des années 90, dans la confirmation de l'existence de variations climatiques rapides au cours de la dernière période glaciaire, apportée par l'étude des glaces prélevées au centre du Groenland (cf 1.2).

Ces travaux ont indéniablement joué un rôle dans ma propre prise de conscience des conséquences potentielles des activités humaines sur l'évolution de notre climat. Ils ont eu un large écho au sein de la communauté scientifique qui en a reconnu l'importance. Ainsi les résultats obtenus sur les 420 000 années couvertes par les carottes de glace extraites sur le site de Vostok, nous ont valu à Claude Lorius et à moi-même de recevoir la médaille d'or du CNRS en 2002. Et en 2012, m'a été décerné – conjointement avec Susan Solomon, chimiste de l'atmosphère – le prix Vetlesen, considéré comme le « Nobel des sciences de la Terre et de l'Univers », pour l'extension de l'enregistrement de

température aux 800 000 dernières années (cf 1.1). Mais au-delà de la reconnaissance, par le jury de ce prix, de ces résultats dont je souligne qu'ils sont le fruit d'un travail d'équipe « In the longest climate reconstruction yet from ice cores, Jouzel in a 2007 study in the journal Science charted temperatures in Antarctica for the last 800,000 years, over eight consecutive ice ages », j'ai été tout aussi sensible à la seconde partie de la citation de ce prix Vetlesen, plus personnelle « He has also been a leader in bringing human-caused climate change to the public's attention ».

Rétrospectivement, ce rôle de « lanceur d'alerte » doit beaucoup aux résultats obtenus sur les glaces de l'Antarctique et du Groenland à la fin des années 80 et au début des années 90. Mais il résulte tout autant de l'intérêt que leur ont alors porté les médias. Dès la sortie des articles mettant en évidence le lien entre climat et effet de serre, je reçois à Saclay, en octobre 1987, la visite de Walter Sullivan, reporter au New-York Times et l'un des plus célèbres journalistes scientifiques, considéré comme le « dean of science writers ». Cette interview a marqué le début de plus de trente ans d'interactions très riches avec les médias. Et j'ai pu vérifier que, dès 1989, les points de vue que j'y exprimais incluaient déjà, au-delà des enseignements apportés par l'étude du passé de notre climat, un message d'alerte par rapport à son avenir en réponse aux activités humaines.

Ce volet « avenir de notre climat » prendra progressivement de plus en plus de place dans mes interventions au point que la plupart d'entre elles y sont désormais largement, voire entièrement, consacrées. Ma participation aux travaux du GIEC, de 1994 à 2015 y a largement contribué. J'ai de façon récurrente, par exemple dans un article « Réchauffement du climat : ce que la science dit » paru dans les Cahiers du MURS en 2005, dit mon attachement à la mission du GIEC qui ne consiste pas à faire des

recommandations aux décideurs politiques mais à leur donner les éléments pour qu'ils puissent prendre leurs décisions. La qualité indéniable de ces rapports doit beaucoup à la force de l'expertise collective et à la prise en compte la plus large possible des nombreux commentaires externes qui, d'horizons très divers, y sont apportés tout au long du processus de rédaction. Les projections réalisées à l'aide de modèles climatiques, en fonction de différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre, tiennent une place très importante dans ces rapports du GIEC. Dans notre pays, ces projections climatiques sont réalisées par les chercheurs de Météo France et par ceux de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) ; j'ai dirigé l'IPSL de 2001 à 2008 et mon intérêt pour l'évolution future de notre climat a donc aussi largement bénéficié de mes interactions avec les équipes de modélisation du climat de cet institut.

Chaque rapport du GIEC se concrétise par un résumé rédigé à l'attention des décideurs politiques et adopté ligne à ligne par les représentants des gouvernements. J'adhère pleinement à cette procédure. D'une part, le contenu de ces rapports reste sous le contrôle des scientifiques car toute proposition de modification au niveau de ce résumé doit s'appuyer sur le rapport complet rédigé par cette communauté scientifique. D'autre part, et au prix de séances plénières marathon – j'en ai vécu une vingtaine avec énormément d'intérêt – elle permet une véritable appropriation de ces rapports par les décideurs politiques et assure aux rapports du GIEC une visibilité qui ne se dément pas depuis 1990. L'avantage de ce processus d'adoption est qu'il crée une synergie entre la communauté scientifique qui s'implique fortement dans la rédaction des rapports du GIEC et les décideurs politiques. Chaque année depuis 1995, ces décideurs se réunissent au sein des COP, Conference Of Parties de la Convention Climat mise sur pied lors du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992.

3- Conclusion : des engagements plus « politiques »

Le début des années 2000 va marquer un tournant au niveau de mes engagements. Lors d'une émission télévisée à laquelle je participe aux côtés de Dominique Voynet, alors Ministre de l'Environnement, je lui dis mon regret que notre communauté scientifique ne soit pas associée aux négociations « climat ».

Cette remarque est prise au sérieux puisque fin 2001, je suis invité à participer à la COP 7 qui s'est déroulée à Marrakech, au titre d'expert scientifique au sein la délégation française. D'une certaine façon, je franchis alors le pas entre notre communauté scientifique et celle des décideurs politiques.

J'assume alors pleinement ce choix car je pense que nous, scientifiques, ne devons pas rester dans notre « tour d'ivoire » mais nous ouvrir très largement vers l'extérieur, répondre aux sollicitations des médias – ce que j'avais fait jusque là – mais aussi à celles des politiques avec cet objectif de mettre l'expertise acquise à leur disposition. Je ne le regrette pas non plus car c'est passionnant de participer à ces conférences « climat » en étant immergé au sein d'une délégation nationale et donc en ayant des interactions très riches avec l'équipe des négociateurs. J'ai été heureux de répondre à cette invitation chaque année depuis 2001 et d'avoir jusqu'ici participé à 19 COP, avec des déceptions comme à Copenhague et des satisfactions comme celles que nous ont apportées l'accord de Paris, dont néanmoins l'ambition doit impérativement être rehaussée. Et je suis partant pour la COP 26 qui se tiendra fin 2021 à Glasgow.

Mon expertise dans le domaine de l'évolution du climat, mon implication dans le bureau du GIEC, m'ont amené à m'investir aussi au niveau national. Sous le mandat de Jacques Chirac, j'ai participé au groupe d'experts réuni pour préparer la loi qui en 2005 fixe la stratégie française et les objectifs à atteindre en matière d'énergie, puis à la Mission Interparlementaire pour l'Effet de Serre. En 2007, le mandat de Nicolas Sarkozy s'ouvre par le lancement du Grenelle de l'environnement dans lequel j'ai été, avec l'économiste anglais Nicholas Stern, invité à prendre en charge la coprésidence du groupe dédié à l'énergie et au climat ; m'est également confiée la présidence d'un des groupes de travail mis en place en vue de préparer le plan national d'adaptation au changement climatique. Sous François Hollande, c'est à un comité chargé de préparer la loi sur la transition énergétique que j'ai participé puis à celui réuni autour de Laurent Fabius en amont de la conférence de Paris. Et je reste sollicité par Emmanuel Macron sur les aspects liés au réchauffement climatique si bien que l'occasion m'a été donnée d'échanger avec les quatre plus récents présidents de notre pays. Sur ces aspects « climat » c'est en premier lieu avec le ministère de l'environnement et ses responsables successifs que j'ai interagi mais je me suis également investi du côté de la recherche, à travers, en particulier, le Haut Conseil pour la Science et la Technologie que j'ai présidé de 2009 à 2013. Et c'est à l'invitation de la Ministre Frédérique Vidal que je préside un groupe de travail sur l'intégration des enjeux de la transition écologique dans l'enseignement supérieur.

Là aussi, j'ai la conviction que la transmission vers les jeunes – enseignement supérieur mais aussi lycéens, collégiens, écoliers – relève de notre responsabilité. Au-delà d'échanges directs dans des classes ou à l'université, dans lesquels je m'investis avec plaisir, nous devons de faciliter l'accès des connaissances acquises dans ce domaine de la transition écologique aux enseignants.

Tous mes engagements auprès des décideurs politiques se sont appuyés sur l'expertise que j'ai acquise comme climatologue ou plus généralement, c'est le cas du HCST, comme chercheur. A partir de 2010, ceux-ci vont devenir plus « politiques » et correspondent plus – je l'admets – à une démarche citoyenne qu'à un engagement d'expert. Suite au Grenelle de l'environnement, le Conseil Economique et Social est transformé en Conseil Economique, Social et Environnemental et c'est à ce titre, qu'en 2010 et pour un second mandat en 2015, j'y suis nommé comme personnalité qualifiée ; mon activité y est centrée sur des aspects liés au climat et à l'énergie mais aussi à l'adaptation et à la « justice climatique », notion qui nous renvoie au risque d'accroissement des inégalités liées au réchauffement climatique. Et c'est un pas supplémentaire que j'ai plus récemment franchi en m'impliquant dans la campagne électorale de Benoit Hamon, en 2017, comme conseiller climat, et dans celle d'Anne Hidalgo dont, en 2020, j'ai présidé le comité de soutien dans la cadre de sa candidature à la mairie de Paris. Aucun de ces décideurs politiques n'a, me semble-t-il, acquis des connaissances sérieuses sur les problèmes environnementaux dans le cadre de ses études, mais j'ai généralement perçu chez eux une véritable envie d'interagir avec la communauté scientifique sur ces thèmes dont ils savent l'importance croissante pour le monde de demain ; j'aime citer l'exemple de Delphine Batho qui lorsqu'elle est, en 2012, devenue ministre (écologie, développement durable et énergie), prenait, dans cet esprit d'interaction, le temps d'assister aux réunions du petit comité qu'elle avait mis en place pour préparer le débat préalable à la préparation de la loi sur la transition énergétique. Tous ces échanges que j'ai eus, depuis une vingtaine d'années, renforcent ma conviction qu'il est de notre rôle de répondre aux questions que se posent légitimement les décideurs politiques lorsqu'ils nous sollicitent.

« Le droit à l'éducation et à l'information scientifique doit se traduire par une meilleure communication entre les scientifiques, les responsables des politiques publiques, les médias et les différents groupes composant la société. »

Manifeste des Madères, 2018

Depuis 2005, je suis membre du MURS, le Mouvement Universel de Responsabilité Scientifique, créé par le Recteur Mallet en 1974 et présidé successivement par nos regrettés collègues Jean Dausset et Gérard Mégie, auxquels j'ai succédé. Je suis pleinement en phase avec le Manifeste de notre mouvement qui met en avant le fait que « le débat est indispensable » mais il est une phrase de ce Manifeste à laquelle je suis particulièrement sensible : « Le droit à l'éducation et à

l'information scientifique doit se traduire par une meilleure communication entre les scientifiques, les responsables des politiques publiques, les médias et les différents groupes composant la société ». Cette nécessité d'éduquer, d'informer, de communiquer vaut bien entendu pour l'ensemble des disciplines mais elle doit être au cœur des domaines où il y a urgence à agir. Et c'est le cas pour ce qui touche à l'évolution de notre climat.

Références

1. André Berger, La santé de la Terre, un défi aux Universités, Cahiers du MURS, 23/24, 1991
2. Jean-Claude Duplessy, Variabilité et histoire à long terme du climat, Cahiers du MURS, 23/24, 1991
3. Jean Jouzel, Réchauffement du climat : ce que la science dit. Cahiers du MURS, 4ème trimestre 2005
4. Jean Jouzel et al., Orbital and millennial antarctic climate variability over the last 800 000 years, Science, 317, 793, 2007
5. Laetitia Louergue et al., Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800 000 years, Nature, 453, 383–386,
6. Dieter Luthi et al., Low carbon dioxide in Dome C ice 650,000 – 800,000 years before present. Nature, 453, 7193, 379 – 382, 2008.
7. North GRIP ice core project members., High resolution climate record of the Northern Hemisphere reaching into the last Interglacial period. Nature, 431, 147 – 151, 2004.
8. Rapports du GIEC : disponibles sur IPCC.ch (résumés pour décideurs et résumés techniques en français)

Variabilité et histoire à long terme du climat

Jean-Claude Duplessy, Directeur de recherche émérite au CNRS et membre de l'Académie des sciences

Reproduction d'un article paru dans les Cahiers du MURS en 1991 (numéro 23/24)

Variabilité et histoire à long terme du climat

Jean-Claude DUPLESSY

Un changement climatique est pour un scientifique un phénomène passionnant, rendu plus passionnant encore par l'imminence du changement climatique qui semble se préparer.

Un regard en arrière permet de s'en convaincre. Un tableau de Bruegel peint peu après l'hiver extrêmement rigoureux de 1564 est le premier témoignage connu d'un changement climatique susceptible de perturber profondément le mode de vie de ses contemporains.

Cet hiver rigoureux a marqué le début d'une succession de périodes globalement froides si durement perçues à l'époque qu'on a par la suite parlé à leur propos de «petit âge glaciaire». Celui-ci a duré près de trois siècles et les Alpes en ont conservé des traces bien identifiées. Peintures et dessins d'époque confrontés aux vues d'aujourd'hui montrent par exemple le spectaculaire recul du

J.C. DUPLESSY

glacier qui donne naissance au Rhône. Un siècle de réchauffement, conséquence d'un changement climatique, en somme modeste, a suffi pour entraîner la disparition de nombreux petits glaciers des Alpes.

Les changements climatiques passés, objets de l'analyse qui va suivre sont de beaucoup plus grande ampleur. Celui que présente la **figure 1** ne se limite pas à une petite avancée de glacier de montagne, il s'agit du développement d'une calotte glaciaire, c'est-à-dire, d'une montagne de glace (4.000m d'altitude dans la partie la plus haute à l'ouest et de l'autre côté de l'Atlantique environ 3.000 m).

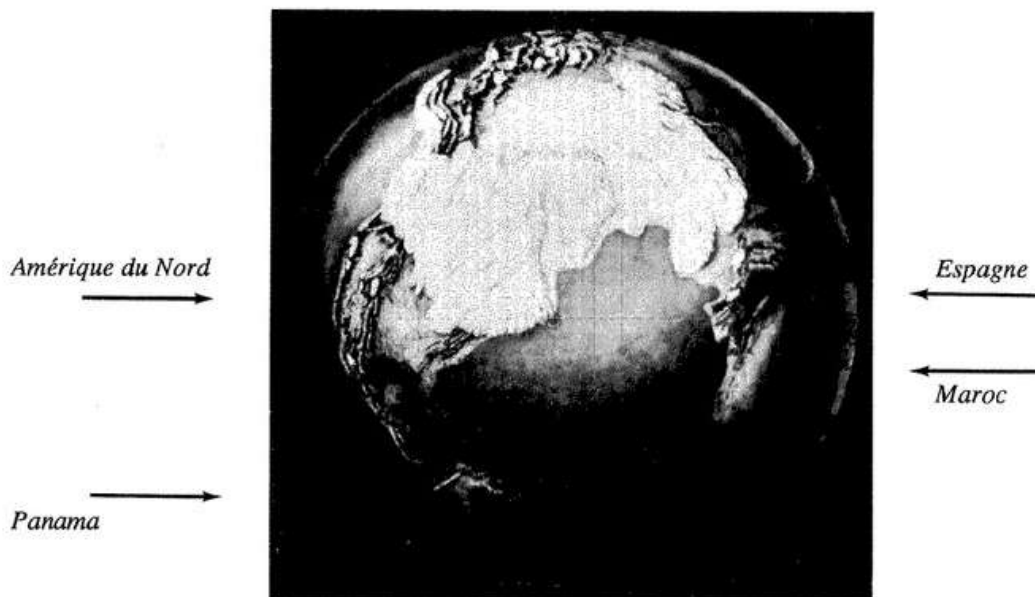


Figure 1

*Représentation des conditions géographiques
lors du dernier maximum glaciaire datant de 18.000 ans*

Si on se reporte à la géographie actuelle pour délimiter le domaine de cette calotte on reconnaît l'Océan Atlantique, le continent nord américain, l'Europe et l'Afrique. De celle-ci, ce qui apparaît le plus distinctement, c'est l'Espagne. Par contre les contours de la Bretagne ont quasiment disparu. Cela n'a rien de surprenant car pour accumuler cette énorme masse de glace sur les continents, il fallait bien

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

puiser de l'eau quelque part : en fait dans l'océan. Ainsi le niveau de la mer avait baissé de 120m (ce dont on est sûr aujourd'hui) et par conséquent la géographie des terres émergées s'en était trouvée considérablement modifiée. Il était devenu possible de se rendre à pied sec en Angleterre... On s'aperçoit que nombre des rivières et des fleuves de l'Europe occidentale tels que le Rhin et la Seine, se déversaient directement dans l'Atlantique comme la Loire. Le détroit de Gibraltar, lui, existait toujours car il comporte des fonds de 300 à 400 m. On a pu déterminer les limites de cette calotte glaciaire : d'un côté elles passent par New-York, les grands Lacs, de l'autre elles mordent sur l'Irlande, la Grande Bretagne et englobent au-delà toutes les plaines d'Allemagne, de Pologne et de Russie jusqu'à l'Oural.

Comment se livrer à une étude plus approfondie ? Essentiellement grâce à ces êtres minuscules, qu'on appelle les foraminifères. Voici comment.

Si on traîne derrière un bateau une sorte de grand filet à papillons, qu'on appelle filet à plancton, on ramène une moisson de ces minuscules foraminifères actuellement vivants. Ces animaux possèdent une coquille calcaire. Elle mesure environ 2 mm et tous les festons qui apparaissent autour sont de la matière vivante maintenue par de longs rayons de matière organique. En paix l'animal sort ses rayons et sa matière organique s'étale ; un peu d'agitation fait rentrer le tout dans la coquille.

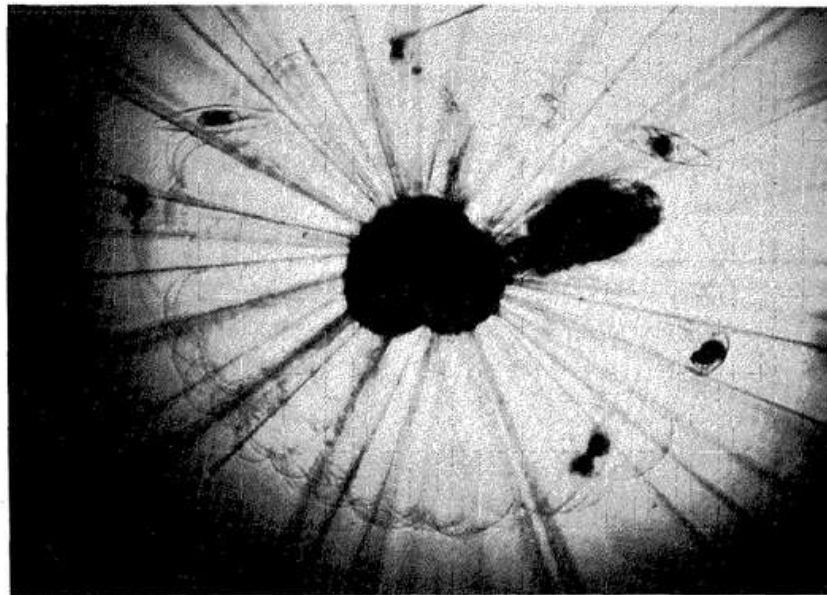


Figure 2

Un foraminifère photographié vivant ; remarquez la coquille calcaire au centre et la proie qu'il dévore (sur le côté)

J.C. DUPLESSY

Sur la **figure 2** on distingue, comme faisant partie temporairement de l'animal, une espèce de puce d'eau qu'il vient de capturer pour s'en nourrir. En 3-4 heures il aura complètement sucé la totalité de ce qui est comestible. Au foraminifère sont associées des algues qui vivent en parfaite entente avec lui ; on dit qu'il s'agit d'une symbiose. Cette symbiose entre les algues et le foraminifère contribue au bon équilibre de son existence et à la prolifération de son espèce au sein des eaux superficielles de l'océan.

La durée de vie d'un foraminifère est brève et au bout de 3 semaines environ il meurt. Sa coquille tombe alors au fond de l'océan où elle va constituer l'un des éléments du sédiment. On peut en mer prélever avec une sonde appropriée un peu de sédiment superficiel et le ramener en surface. On constate alors qu'il est constitué de couches bien parallèles, de plus en plus anciennes au fur et à mesure qu'on s'enfonce. Si nous sommes capables d'analyser finement ces couches successives on va disposer d'un enregistrement des conditions qui ont donné naissance à ce sédiment. A partir de là, on peut en tirer informations, explications et conclusions.

Si on tamise une petite quantité du sédiment recueilli, on trouve en surface tout un tas de coquilles. Elles ont appartenu à des foraminifères. Elles ne sont ni partout, ni toujours les mêmes. Certaines formes sont très caractéristiques par exemple, d'eau chaude (**figure 3**). Leur présence dans un échantillon prouve que l'eau à un moment ou à un autre de la saison dépasse les 25° ou au moins les 20°. Par contre les formes qui apparaissent dans un autre échantillon appartiennent à une espèce qui vit exclusivement dans de l'eau dont la température est inférieure à 8-10° et même, en général, à 6° (**figure 4**). Elle est la seule à résister dans ces conditions. Jamais l'ensemble de ces formes n'est représenté dans un seul échantillon naturel. Pour les réunir, il faudra récupérer des sédiments de diverses provenances. Par contre, une analyse méticuleuse, offre la possibilité de mettre en évidence que les différentes formes ont chacune une répartition géographique très marquée qui reflète de très près la température de l'eau où elles vivent.

Sur la **figure 5**, on a défini ce qu'on a appelé des assemblages, c'est-à-dire des groupes de ces petits animaux qui vivent de la même façon. Le grisé correspond à un assemblage qui ne comporte en tout et pour tout qu'une seule espèce dont il a été question plus haut. On est alors dans la limite des eaux inférieures à 6°. On passe progressivement à des assemblages plus différenciés qui délimitent les domaines de groupes différents caractérisés pour nous de façon

Les Cahiers du MURS n° 23/24 - 1er/ 2ème trimestres 1991

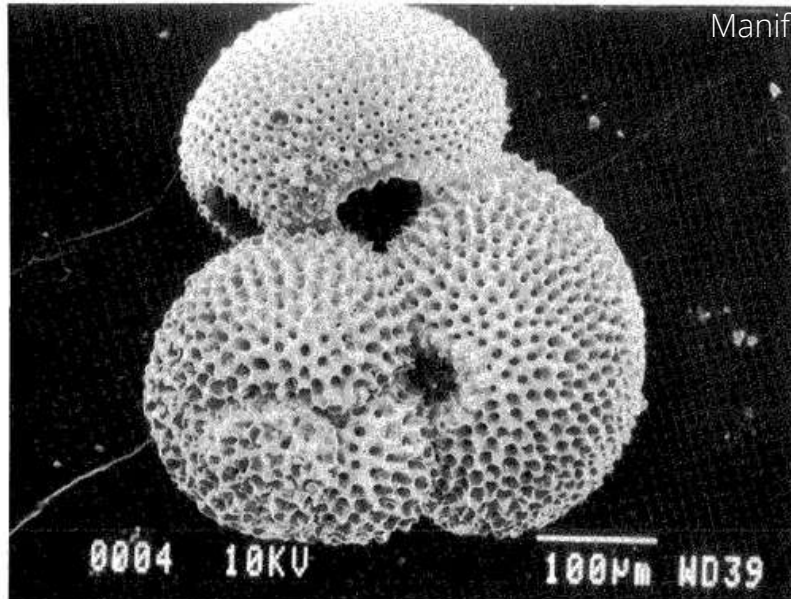


Figure 3
Globigerinoides ruber, foraminifère d'eau chaude

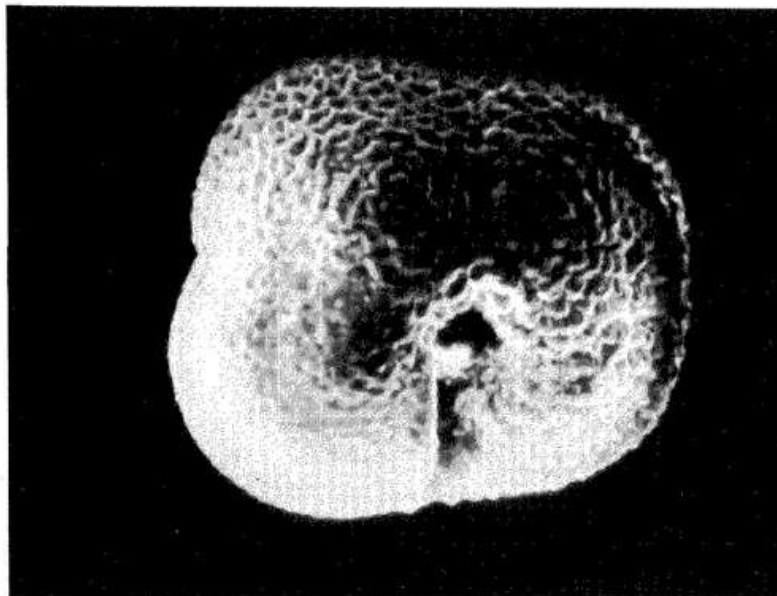


Figure 4
Neogloboquadrina pachyderma, foraminifère d'eau froide

J.C. DUPLESSY

très prosaïque par des coquilles différentes. Les eaux les plus chaudes (qu'on rencontre au voisinage de l'Indonésie) sont celles où l'on rencontre aussi les assemblages les plus chauds, très caractéristiques. On s'aperçoit ainsi, en faisant de la science naturelle sous la forme la plus élémentaire, que la répartition des foraminifères dans l'océan est directement liée à la température de l'eau de surface.

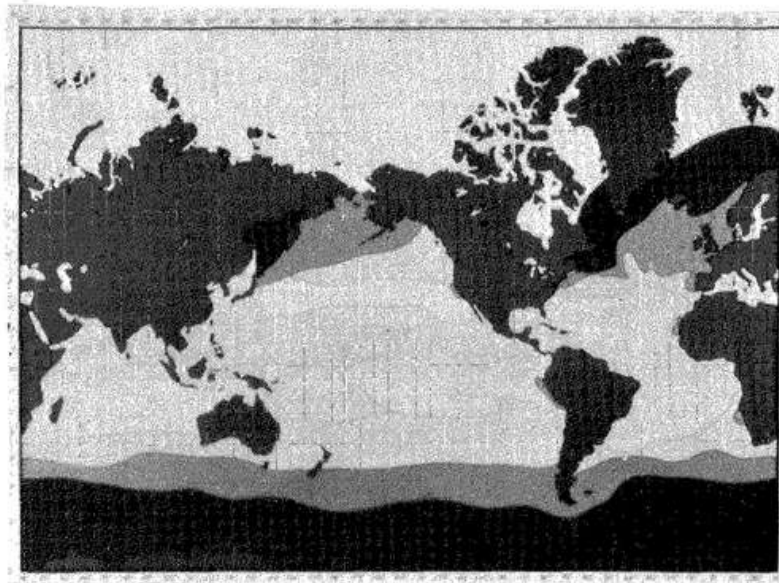


Figure 5

Répartition géographique des divers assemblages de foraminifères

grisé : eaux froides blanc : autres zones

C'est un premier point. Des investigations plus poussées consistent à prélever au moyen d'un carottier de très longues carottes dans le sédiment. Le tube du carottier (qui fonctionne comme un emporte-pièce) peut opérer aujourd'hui sur une profondeur allant jusqu'à 50m. A partir de ce matériel de base on tente de reconstituer l'évolution du climat. Pour aboutir à une reconstitution climatique la première condition est de disposer d'un indicateur aussi astucieux que possible, et qui soit très caractéristique de l'époque du dépôt, c'est ce qu'il est convenu d'appeler de la stratigraphie. Il nous faut une stratigraphie globale : elle nous est fournie par le climat lui-même.

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

La **figure 6** montre en gros ce qui se passe. En replaçant d'abord dans les **conditions actuelles** on est en présence d'une période de climat chaud. Le niveau de la mer est ce qu'il est, il existe de petites calottes glaciaires sur les continents et le seul vestige de l'énorme masse accumulée au moment de la glaciation est le Groënland. Ces glaces sont extrêmement pauvres en oxygène lourd, ^{18}O , isotope de l'oxygène. La raison en est que pour apporter cette neige qui se transforme ensuite en glace il y a transfert de l'eau par évaporation. Au cours des processus d'évaporation et de condensation fractionnée, c'est toujours l'isotope léger qui va rester préférentiellement, l'isotope lourd précipitant plus facilement. Résultat : les neiges qui tombent aujourd'hui au Groënland ou en Antarctique sont extrêmement pauvres en isotope lourd dans la molécule H_2O . Celle-ci est donc très riche en isotope H_2^{16}O et relativement pauvre en H_2^{18}O .

Que se passe-t-il en période glaciaire ? le phénomène se renforce. Il y a baisse du niveau de la mer conséquence de la formation des grosses calottes glaciaires. Celles-ci emmagasinent une quantité de molécules d'eau extrêmement pauvre en H_2^{18}O mais essentiellement constituée de H_2^{16}O . L'eau de mer voit sa teneur en H_2^{18}O augmenter : donc elle s'enrichit en ^{18}O quand le niveau baisse au profit de la calotte glaciaire. On a donc là un indicateur physique intéressant, susceptible de mesure. Dans le passé, le phénomène est encore plus intéressant parce que les foraminifères qui fabriquent leur coquille de calcaire l'enregistrent exactement. L'analyse du rapport Oxygène 18 sur Oxygène 16 des séquences de carbonate incluses dans le sédiment, fournit un indicateur de glaciation.

L'analyse d'une carotte de 15m de long (ce qui est loin de constituer un record) prise pour exemple permet de déterminer la teneur en Oxygène 18 en fonction de la profondeur. Au sommet de la carotte ce sont les conditions actuelles puis en s'enfonçant on constate que les concentrations en Oxygène 18 dans les coquilles augmentent et passent par un maximum. Ensuite il y a des oscillations qui aboutissent à des valeurs quasi-comparables à celles d'aujourd'hui. On repart ensuite à nouveau dans une glaciation. On aboutit ainsi à une première reconstitution du dernier cycle glaciaire/interglaciaire.

A partir de cette information il devenait possible de tenter une reconstitution des conditions climatiques dans l'océan. Pour y parvenir il fallait faire deux choses :

- a) prendre des carottes sédimentaires partout dans l'océan,

J.C. DUPLESSY

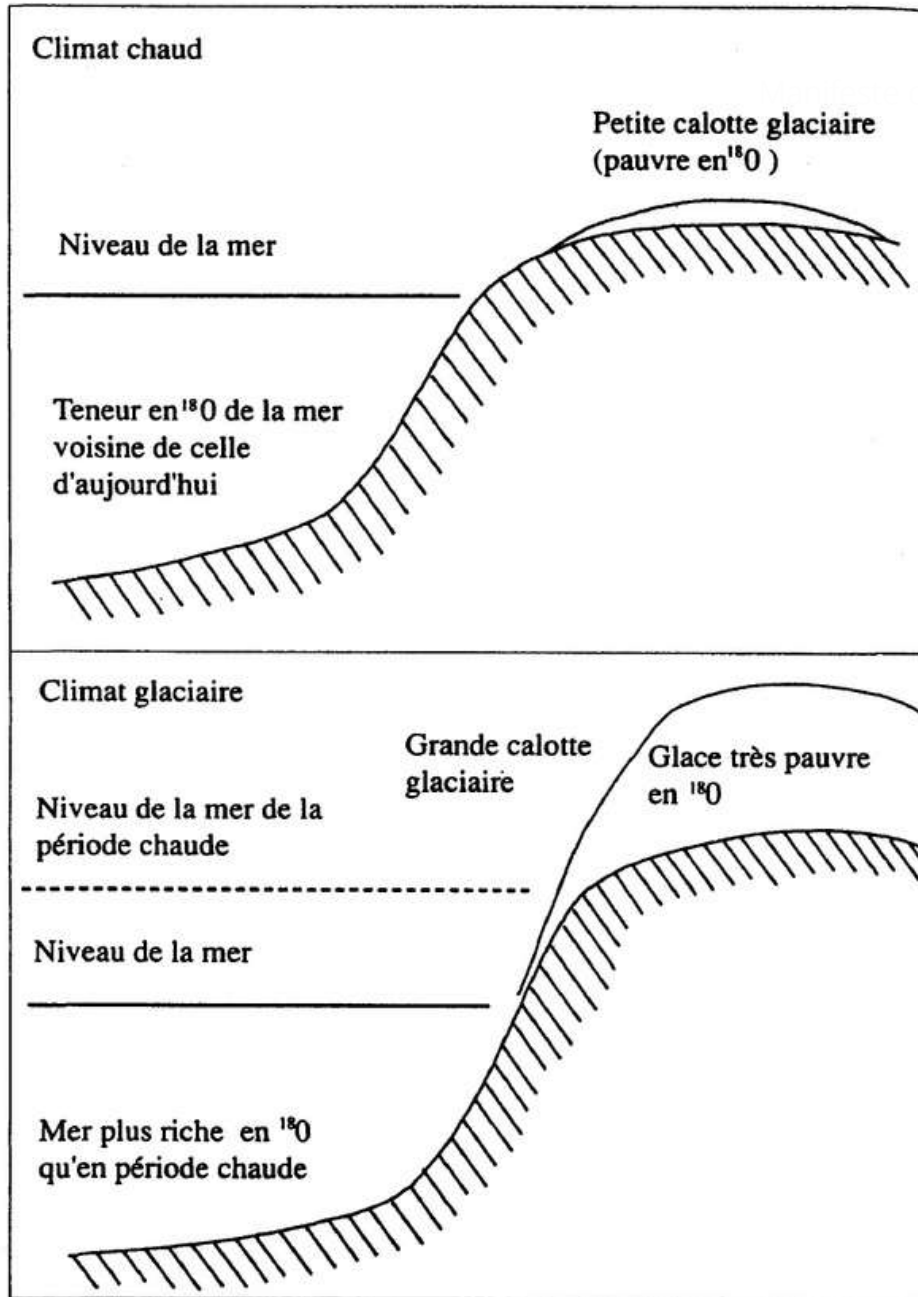


Figure 6

*Schéma montrant la relation entre le volume des glaces continentales, le niveau de la mer et la composition isotopique moyenne de l'oxygène de l'eau de mer. Les glaces étant très pauvres en ^{18}O , plus les glaciers sont développés, plus la teneur en ^{18}O de l'eau de mer augmente. **

** (voir Duplessy et Morel, "Gros temps sur la planète" pages 51-56)*

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

b) procéder dans ces carottes à une stratigraphie isotopique, c'est-à-dire mesurer les variations de composition isotopique des foraminifères et reconnaître le premier maximum correspondant au maximum de glaciation. Cela permettait d'identifier les sédiments déposés pendant la période où il y avait le plus de glace gelée sur les continents,

c) une troisième étape consistait alors à analyser les coquillages qui se trouvaient là, à caractériser les diverses faunes, en faire une analyse statistique un peu complexe.

A partir de tout cela, il devenait possible d'estimer ce qu'était la température d'été et d'hiver des eaux océaniques en prenant comme référence les conditions actuelles. Ce fut l'objet du programme international CLIMAP (**figure 7**). On s'aperçoit ainsi qu'un climat glaciaire ne signifie pas qu'il fait froid partout : il y a des zones très froides dans les hautes latitudes et des zones toujours aussi chaudes dans les Tropiques. Quand le climat change il ne change pas de la même façon partout. Il y a des zones où cela ne change pas beaucoup et des zones où cela change beaucoup. C'est une caractéristique tout à fait curieuse des changements climatiques. Cela dépend de la façon dont la circulation océanique joue. Qui dit changement de l'océan peut dire changement de température. Un refroidissement global ne signifie pas un refroidissement partout.

On peut aussi procéder par analyses de pollen (**figure 8**) et reconstituer grâce aux résultats obtenus, les variations de la végétation continentale. On en déduit celles de la température de l'air et des précipitations à l'endroit où s'est formée une tourbière. Ce type d'étude a été effectué dans un site des environs de Lyon. On s'aperçoit qu'au maximum de la glaciation qui date de 18.000 ans, les températures avaient baissé d'à peu près 12°C et que les précipitations étaient réduites d'à peu près 60 cm. Ces chiffres traduisent une moyenne de 0° dans la région considérée avec seulement 20 à 30 cm de précipitations annuelles (pluies et neiges). Il s'agit bien sûr de changements majeurs. Si, à partir d'études identiques effectuées sur les différents continents, on calcule la totalité du refroidissement sur les continents tout en faisant de même pour l'océan, on arrive à la conclusion que l'énorme changement climatique en cause correspond à une baisse de température moyenne de 4°C seulement.

J.C. DUPLESSY

Entendre dire que la conséquence d'un réchauffement dû à un doublement du CO_2 provoquera un changement de température moyenne de la planète de 4° , ne signifie en soi pas grand chose. Mais si l'on a connaissance de ce qui s'est passé au cours du dernier maximum glaciaire on peut sans tarder tirer le signal d'alarme. Le changement climatique estimé serait aussi grand que celui qui a permis à la Terre de passer d'une période glaciaire à l'époque actuelle.

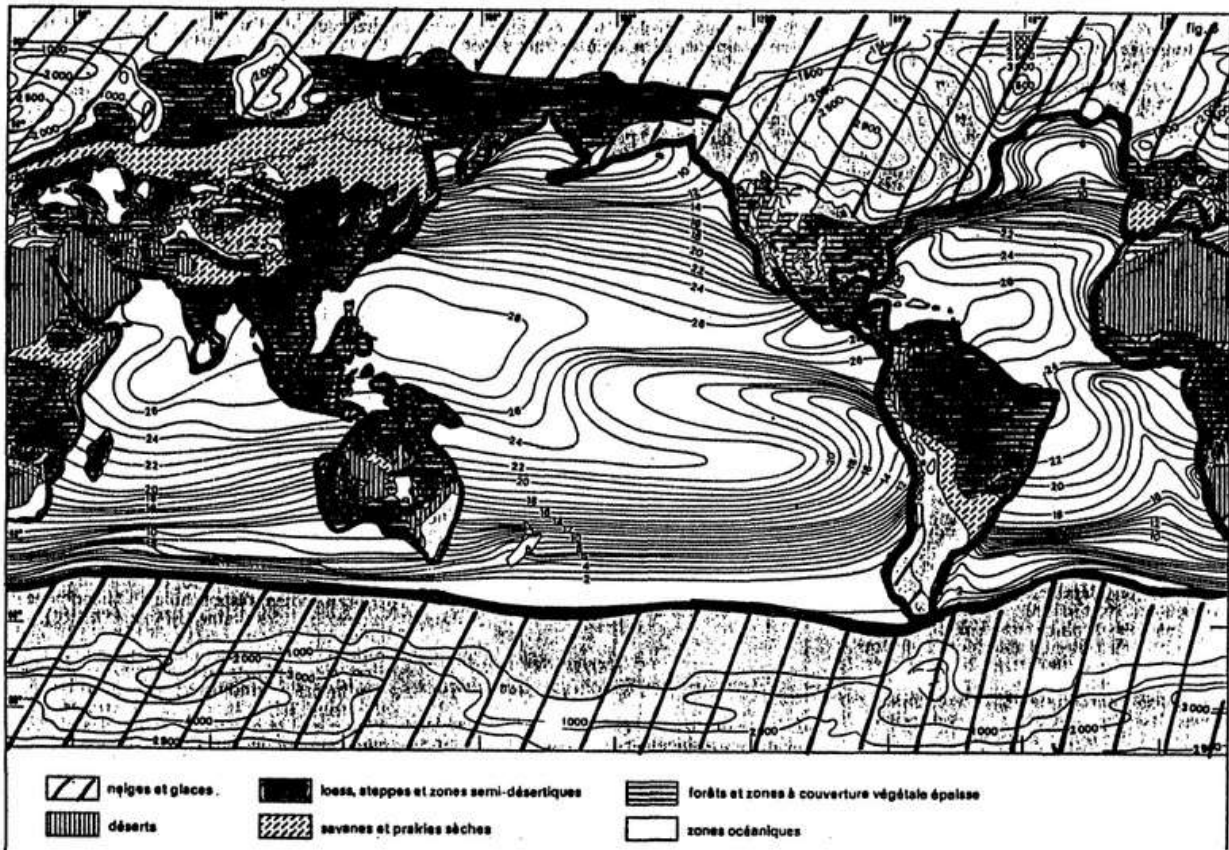


Figure 7

Le monde glaciaire

Reconstitution de la surface du globe il y a 18.000 ans, en août. Les contours des continents sont représentés pour une baisse du niveau des mers de 85 m par rapport au niveau actuel. Les isothermes de surface (en $^\circ\text{C}$) sont portés sur les zones océaniques ; les altitudes des calottes glaciaires (en mètres) sont également indiquées

(d'après CLIMAP Project Members, 1976)

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

Un changement de 4° de la température moyenne constitue bien un phénomène énorme générateur de conséquences encore difficiles à évaluer avec précision mais qui seront, à coup sûr, majeures.

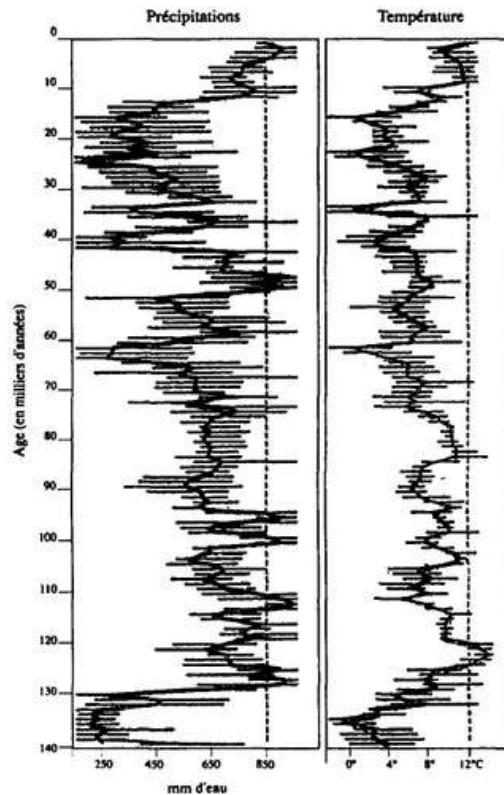


Figure 8

Reconstitution des variations de température et de précipitation dans la région de Lyon à partir des données polliniques (Guit et al. 1988). Les lignes pointillées correspondent aux conditions actuelles (température moyenne annuelle 12°C, précipitations 850 mm)

Un autre phénomène intéressant lié au changement de climat est le fait que la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère a subi elle aussi des variations majeures. Les résultats d'un sondage étudié par une équipe de Grenoble grâce à une carotte recueillie par les Russes sur leur base de Vostok en Antarctique et ramenée en France sont matérialisés sur la **figure 9**. L'une des courbes représente les

J.C. DUPLESSY

variations de la température de l'air sur 150.000 ans. Il fait chaud -c'est une façon de parler-, -55° à Vostok à l'époque actuelle mais il faisait -65° il y a 20.000 ans ou il y a 150.000 ans et l'on retrouve la période inter-glaciaire donc le même genre de scénario que celui intervenu pour l'océan. L'autre courbe retrace la concentration en gaz carbonique de l'air au cours de la période en partant de l'analyse des petites bulles d'air microscopiques piégées dans la glace. Cela nous apprend -et c'est d'un grand intérêt- qu'en période pré-industrielle, il y a presque 270 à 280 parties par million * de gaz carbonique et en période glaciaire il n'y en a que tout juste 200. On constate des oscillations et quand il fait chaud on retrouve les 280 parties par million de gaz carbonique. C'est une illustration de plus du fait que l'effet de serre constitue un des phénomènes majeurs de notre climat.

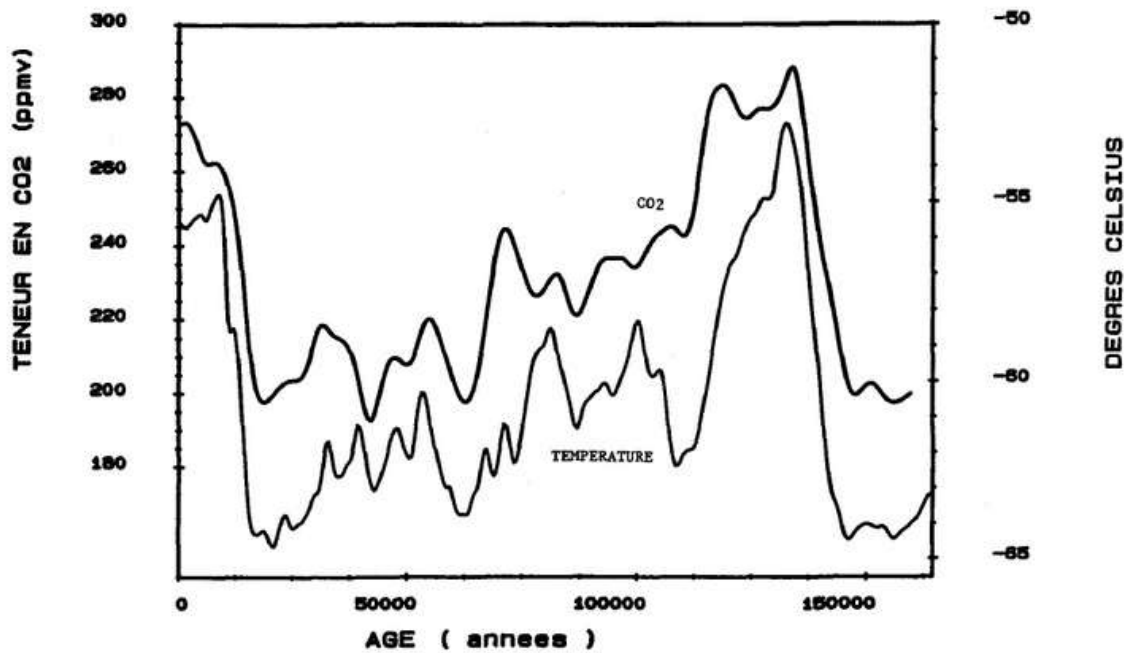


Figure 9
CO₂ atmosphérique et température à Vostok
(sur 160.000 ans)

Evidemment le CO₂ n'est pas seul responsable du changement climatique. D'autres facteurs interviennent car il n'y a aucune raison que le CO₂ change tout

* ppm : partie par million ppmv : partie par million en volume

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

seul. La circulation océanique est un autre responsable. En gros, elle est actuellement caractérisée par le fait que des eaux de surface finalement ramenées du côté de la mer de Norvège et de l'Atlantique nord plongent dans ces zones d'où elles repartent en profondeur en sens inverse. Elles vont alors jusque dans l'océan Indien et dans l'océan Pacifique Nord où elles sont bien obligées de remonter avant de repartir. On se trouve en présence d'une sorte de gigantesque "tapis roulant" qui ramène de l'eau chaude et relativement peu salée appelée à se saler en surface au fur et à mesure qu'elle circule pour revenir dans l'Atlantique Nord.

Le cycle a pu être suivi grâce au tritium lâché dans les années 60 avec les explosions nucléaires. Les traces de cet élément permettent d'assister au départ du tapis roulant dans l'Atlantique Nord puis de suivre jusqu'aux environs de 40° Nord sa plongée par 4 à 5 km de profondeur. Au delà de 40° Nord s'étendent des eaux non encore polluées.

Il existe au demeurant d'autres traceurs pour reconstituer ce tapis roulant, par exemple un isotope de carbone. Les eaux dans l'océan sont au moment où elles amorcent leur plongée, relativement riches en carbone 13. Par la suite, en circulant, leur teneur en carbone 13 diminue. Cela se produit pour une raison simple : depuis la surface des matières organiques tombent au fond de l'océan et sont attaquées par des bactéries qui oxydent cette matière organique et relâchent du gaz carbonique dans le milieu. Les matières organiques vivantes contiennent moins de carbone 13 que le reste. En conséquence, on constate au fur et à mesure de l'avancement du «tapis roulant» une diminution de la teneur en carbone 13 de l'Atlantique Nord à l'Océan Austral puis dans le Pacifique. Quel était le processus au moment de la glaciation ? Toujours grâce aux foraminifères et à leur coquille en carbonate de calcium on peut en reconstituer le schéma. Au lieu de l'oxygène 18 on peut, pour y parvenir, exploiter le carbone 13 de la molécule CaCO_3 . La teneur en carbone 13 des foraminifères nous renseigne sur la teneur en carbone 13 de l'eau de mer. Il faut alors savoir qu'il existe des foraminifères vivant en profondeur à 2.000, 3.000, 4.000 m ; en les analysant spécifiquement on peut donc procéder à une reconstitution semblable à celle que l'on fait actuellement en analysant des échantillons d'eau. Les indices de cette circulation Qu'on a pu recueillir témoignent d'un changement majeur. Par ailleurs la température de l'eau profonde a varié dans le passé, et sa courbe de variation en fonction du temps ressemble comme «deux gouttes d'eau» à la courbe de gaz carbonique. Sans que nous soyons capables de l'expliquer, cela laisse à entendre que la circulation océanique est le phénomène

J.C. DUPLESSY

qui gouverne le gaz carbonique. Dans quelques années peut-être en serons nous capables : on peut l'espérer.

Il est intéressant d'étudier un changement climatique en régime transitoire c'est-à-dire de regarder comment fonctionne le système quand on passe d'un climat glaciaire à un climat de type actuel. On y est parvenu là aussi par des analyses de sédiments en recherchant des zones où la multiplicité des dépôts permette de faire le plein de renseignements comme ce serait le cas avec un enregistreur défilant vite. Une carotte prélevée au large du Portugal a répondu à cette exigence et a permis d'établir qu'un réchauffement dépassant la dizaine de degrés s'est produit en moins de 4 siècles et peut-être même beaucoup moins, c'est-à-dire de façon extrêmement brutale.

Le processus du changement entre le point de départ (le temps dans le passé) et le point d'arrivée (le temps dans le présent) peut se décrire de la façon suivante : depuis 30.000 ans quelque chose changeait : la quantité de soleil tombant sur l'hémisphère Nord. Suivant le minimum d'insolation se produisait le développement majeur des eaux froides dans l'Atlantique Nord - c'est-à-dire la glaciation. Puis on s'aperçoit que l'insolation augmente beaucoup sans avoir aucun effet direct au début : au contraire, cette augmentation va correspondre à un maximum de glaciation du moins jusqu'à ce que le phénomène se déroulant, le système se mette à répondre. Il le fait alors d'un seul coup et des conditions chaudes s'installent au large du Portugal. Cependant, fait curieux, à peine arrivées ces eaux chaudes ne s'y maintiennent pas. Un refroidissement extrêmement brutal, lui aussi, -de l'ordre du siècle- démarre et cette nouvelle période très froide se prolonge un bon millénaire. Un nouveau réchauffement lui succède puis, enfin, le climat se stabilise. De la même façon le volume des glaces présente une phase de fonte. Un coup de froid survient et la fonte ralentit, bientôt suivie d'une deuxième phase de dégel global au moment de la deuxième avancée des eaux chaudes.

En résumé une transition climatique est un phénomène que les physiciens qualifient de hautement non linéaire. Le facteur de forçage est l'insolation mais le système qu'il trouve en face de lui répond comme il peut et comme il veut avec une inertie, avec des «flip-flop» extrêmement brutaux et des phénomènes abrupts dont nous ne maîtrisons absolument pas l'explication qu'il faut tenter de trouver.

On pense actuellement pour parvenir à cette explication à un système mo-

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

dulant le «tapis roulant» qui ramène des eaux chaudes vers le Nord, pour ensuite les faire plonger quand elles se refroidissent. Pour obtenir cette modulation, il suffit pense-t-on, de moduler un petit peu le régime des pluies sur l'océan Atlantique Nord. Dans cette hypothèse, plus il pleuvra sur l'Atlantique Nord moins les eaux seront salées, moins elles seront denses et moins elles auront tendance à plonger. Un phénomène modulateur de ce genre, extraordinairement modeste, va moduler un phénomène de bien plus grande dimension à savoir la circulation océanique, exactement de la même façon qu'en appuyant sur la pédale de votre accélérateur, vous faites avancer plus ou moins votre voiture. Ce même courant chaud est responsable du contraste thermique que nous connaissons tous entre le Canada et la France (il fait plus chaud en France qu'au Canada). Si le fonctionnement du «tapis roulant» est perturbé, le contraste va l'être à son tour et une période froide s'installera. Cette influence de multiples phénomènes météorologiques et climatiques relativement modestes (en l'occurrence un peu plus de pluie) peut induire une perturbation relativement importante du système. Ce sont ces idées que l'on creuse actuellement et sur lesquelles on travaille.

Au terme d'une conférence sur les climats une question est toujours posée: pourquoi le climat change-t-il ? Il faut essayer de donner la réponse à cette interrogation sans attendre que l'auditoire la renouvelle.

La projection d'un enregistrement climatique isotopique -donc moyennement l'évolution des glaciations au cours des âges. Sur 600.000 ans, on constate, précédant l'actuel climat chaud, une glaciation puis des oscillations, à nouveau une glaciation, une autre encore etc... Autrement dit, on s'aperçoit que l'évolution climatique sur quelques 600.000 ans présente une succession de périodes alternativement chaudes et froides, en gros à intervalles de 100.000 ans. Si on remonte plus loin dans le passé, on assiste au même scénario jusqu'à 2 ou 3 millions d'années en arrière avec une périodicité du même ordre de 100.000 ans .

L'évolution du climat se traduit donc par une succession de périodes alternativement chaudes et froides. La cause de cette variation ? C'est la façon dont le globe terrestre intercepte le rayonnement du soleil. Il importe qu'il soit bien clair que , dans cette théorie à laquelle on accorde actuellement beaucoup de crédit parce qu'on a pu la tester, le soleil n'est pour rien. Il envoie toujours la même quantité de chaleur par unité de temps et son rayonnement n'est pas capricieux. Le changement vient de la Terre. Notre planète tourne autour du soleil en décrivant

J.C. DUPLESSY

une ellipse. Il y a donc des moments où la Terre est proche du soleil, d'autres où elle en est loin. Mais d'autres éléments sont à prendre en compte dans le mouvement de la Terre autour du soleil. En janvier (donc hiver boréal) la Terre est tout près du soleil et en juillet (été boréal) à l'autre bout de l'ellipse, loin du soleil. Il en résulte qu'en ce moment (en hiver) l'hémisphère nord reçoit malgré tout plus de chaleur qu'il n'en recevrait si la Terre était dans une autre portion de l'ellipse, c'est-à-dire moins près du soleil. Il n'en a pas toujours été ainsi. La position de la terre sur l'orbite se déplace. Il y a 11.000 ans c'était le contraire et la terre se trouvait loin du soleil en janvier. On est en présence d'un phénomène complexe dépendant de nombreux facteurs d'où son caractère purement pseudo-périodique. Globalement on perçoit deux périodicités majeures dans ce déplacement, l'une de 19.000 ans, l'autre de 23.000 ans. La situation, qui existait il y a 11.000 ans, correspond au moment de la fin de la glaciation. Nous ne jouons plus sur le bilan thermique annuel, nous jouons sur la «saisonnalité» de l'insolation.

A cela s'ajoute -et c'est un élément de complexité accrue- la variation, l'excentricité de cette ellipse, variation affectée d'une périodicité de l'ordre de 100.000 ans. De temps en temps l'orbite est quasi-circulaire ; de temps en temps, elle présente une excentricité qui peut atteindre 6%. Cette variation d'une périodicité de 100.000 ans va évidemment affecter à son tour la répartition saisonnière de l'insolation. Celle-ci sera encore perturbée par un dernier facteur : l'inclinaison (en anglais tilt) du globe terrestre sur le plan de l'écliptique. Actuellement l'inclinaison est de $23^{\circ}27'$ et la conséquence en est que l'hémisphère d'hiver ne reçoit pas d'énergie du tout aux pôles et que l'hémisphère d'été au contraire en reçoit une quantité significative. Si l'inclinaison était nulle, il n'arriverait évidemment aucune énergie aux pôles quelle que soit la saison. Par contre, si on amplifie l'inclinaison, pendant l'été, les zones polaires vont recevoir davantage d'énergie et pendant l'hiver elles en recevront encore moins. Voici donc un mécanisme de plus susceptible de moduler le changement climatique. La périodicité dans ce dernier cas (variation de l'inclinaison sur l'écliptique) est de l'ordre de 41.000 ans (**figure 10 a**).

En résumé, si on procède à une analyse spectrale des variations du climat sur 5 ou 600.000 ans, on obtient les courbes de la **figure 10 b** qui présentent des oscillations (auxquelles on est toujours tenté de trouver une périodicité). En faisant un spectre de Fourier de façon à voir quelles sont les périodicités dominantes on voit apparaître dans les enregistrements 100, 43, 24, 19

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

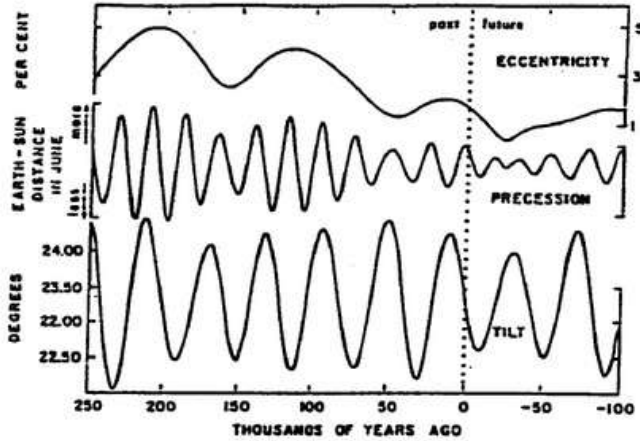


Figure 10 a

Changes in eccentricity, tilt, and precession. Planetary movements give rise to variations in the gravitational field, which in turn cause changes in the geometry of the earth's orbit. These changes can be calculated for past and future times. (Data from A. Berger.)

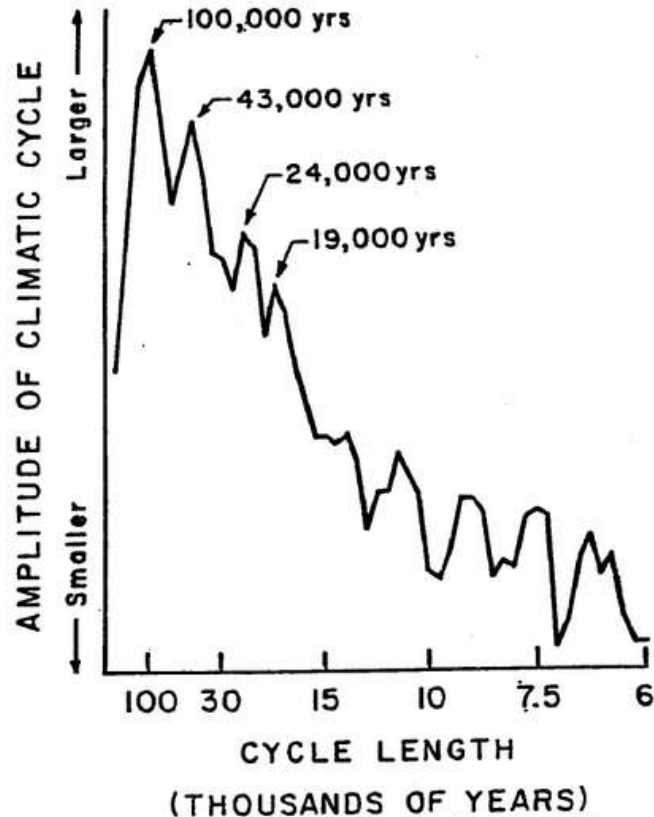


Figure 10 b

Spectrum of climatic variation over the past half-million years. This graph—showing the relative importance of different climatic cycles in the isotopic record of two Indian Ocean cores—confirmed many predictions of the Milankovich theory. (Data from J.D. Hays et al. 1976.)

J.C. DUPLESSY

milliers d'années. C'est un véritable miracle : ce sont exactement les chiffres que les astronomes sont susceptibles de calculer pour les variations d'insolation sur la Terre.

En conclusion : la Terre est susceptible de changer de climat. Ces variations sont importantes. Elles sont modulées par les facteurs absolument infimes que sont les variations d'insolation et la façon dont la Terre va intercepter le rayonnement que le Soleil nous envoie. A leur suite interviennent toute une série de mécanismes amplificateurs qu'on ne contrôle pas encore. On en connaît quelques-uns dont le CO₂, les précipitations, la circulation océanique. L'ensemble est susceptible de s'en-granger dans une espèce d'enchaînement cohérent dont le résultat s'inscrira en modifications majeures. Je dois dire que lorsqu'on a commencé à travailler dans ce domaine, on ignorait que le CO₂ était susceptible de changer, on ne savait pas ce qu'était un changement climatique. Aujourd'hui nous devons à cet effort qui est très largement international, la compréhension de ce qu'est un changement de climat. Cela ne donne-t-il pas envie à l'occasion du changement de climat qui semble actuellement s'amorcer, de progresser vers une compréhension encore plus poussée du phénomène ?

Jean-Claude DUPLESSY
Centre des Faibles Radioactivités
Laboratoire mixte CNRS-CEA

Une Terre malade de ses hommes ?

Laurent Degos, Professeur émérite d'hématologie à l'Université de Paris

François Ravetta, Professeur de physique de l'atmosphère à Sorbonne Université, directeur du LATMOS

André Berger prononça il y a maintenant trente ans une conférence publiée en 1991 dans les cahiers du MURS sous le titre : « La santé de la Terre, un défi aux universités ». Après avoir dressé un état des lieux, il considérait les mesures à mettre en œuvre pour éviter la dégradation de la santé de la planète. Il questionnait la responsabilité des hommes dans le changement climatique et concluait sur le rôle central que devraient jouer l'enseignement de l'éthique et l'université pour faire face à ce défi majeur.

La question de la réalité du changement climatique était alors fortement débattue. André Berger détaillait donc les points sur lesquels existait un consensus scientifique et discutait les preuves de ce changement. Tout en insistant sur la nécessaire « prudence des scientifiques » dès lors qu'il s'agit de prévoir, il prit toutefois le risque d'anticiper « un réchauffement inévitable non-uniforme ». Spécialiste du domaine, André Berger a vu juste. Mettant en avant l'inertie du système climatique, il anticipe la question très actuelle de la vitesse du changement climatique en cours, par là-même celle de notre capacité à nous adapter à un nouvel environnement.

1- La recherche a tranché

De nos jours, la réalité du changement climatique ne fait plus débat au sein de la communauté scientifique. Les rapports du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) se succédant, les preuves se sont accumulées. Les incertitudes sur les observations se sont réduites. S'il n'est pas possible de relier directement un événement isolé au changement global, nul ne conteste sérieusement les tendances observées. De ce point de vue, la preuve scientifique d'un réchauffement est solide. A cela, rien de mystérieux. Le temps faisant son œuvre, le signal climatique est sorti du bruit météorologique.

La question plus épineuse de l'origine anthropique du changement climatique a également fortement évolué. A tel point que la charge de la preuve est aujourd'hui renversée. Il est toujours légitime d'interroger cette

relation de causalité, l'esprit critique étant au cœur de la démarche scientifique. Il convient, cependant, dans le même temps, de proposer une explication rationnelle aux changements observés. Trois décennies de recherche, et de controverse, n'ont pas fait émerger une théorie alternative crédible. Dès lors la sagesse commande d'attribuer à l'homme le changement climatique à l'œuvre pour fonder nos actions.

2- Retard à l'action

Au-delà d'une analyse scientifique robuste, le texte d'André Berger explorait des pistes d'actions pour limiter le réchauffement de la planète. Celles-ci sont encore d'actualité, qu'il s'agisse de conforter « l'observation et la recherche », de « limiter les émissions de CO₂ » en développant une « industrie verte », ou de faire évoluer la gouvernance au travers d'une « politique à environnement intégré » et d'un « protocole international pour la protection du climat ».

En termes de réalisations, le bilan des trois décennies passées est mitigé. La recherche en climatologie a conforté et produit de nombreux résultats : les observations sont solides, les modèles climatiques, en s'appuyant fortement sur des approches pluridisciplinaires, ont démontré leur capacité à reproduire les climats passés, donc à anticiper les climats futurs. De ce point de vue, le travail du GIEC, qui rend accessibles aux décideurs et au plus grand nombre les connaissances les plus robustes en matière de changement climatique, est une réussite. Ce n'est pas le cas pour le contrôle des émissions de gaz carbonique, aucune inflexion n'ayant été observée, sauf au moment de l'effondrement du bloc soviétique. La révolution verte tarde à se concrétiser, et les négociations climatiques, qui rythment l'agenda international, produisent des textes estimables, mais peu contraignants pour être efficaces.

Soulevant à de nombreuses reprises la question de la responsabilité des scientifiques, au cœur des préoccupations du MURS, mais aussi des décideurs ou des Etats, André Berger concluait son article par des

propositions d'actions allant bien au-delà de la gestion du changement climatique en cours, cette « grande expérience géophysique involontaire jamais déclenchée par l'Homme ». Il posait en effet la question des conséquences de « l'explosion démographique du Tiers-Monde », proposait l'adoption d'une « charte des devoirs des hommes » et la création d'un « cours d'éthique de l'environnement », et promouvait le « rôle central de l'Université » comme institution devant se saisir de la question des enjeux climatiques.

Toutes ces pistes mériteraient d'être explorées.

3- Qui est le malade ?

Nous faisons ici le choix de ne reconsidérer que l'angle retenu par André Berger pour traiter du changement climatique, son approche en termes de « santé de la Terre », qui nous paraît originale et féconde. Comparant la Terre à un malade, André Berger affirmait : « Prévenir ou guérir demeure donc bien la question fondamentale ». Cela le conduisit à faire la promotion de la « pluridisciplinarité de la recherche pour la santé de la planète », à insister sur la nécessaire « collaboration des biologistes », à attirer notre attention sur le besoin de voir émerger une « médecine préventive de la géosphère avant que ne s'impose la médecine curative ».

Mais s'agit-il bien de soigner la Terre ? Le danger qui nous guette est-il le résultat d'une planète malade, ou celui du comportement pathologique des hommes qui l'habitent ? Est-ce la planète ou l'humanité qui est malade ? La pathologie ne vient-elle pas de l'insatiabilité des hommes, oublieux des limites, qui dévorent des ressources non renouvelables et accumulent les déchets ?

Il est difficile d'agir sur la planète comme il est difficile, voire impossible, de maîtriser la Nature. Mais on peut changer le comportement des hommes, comme nous le faisons pour qu'une bactérie ne nous détruise pas. En respectant des règles d'hygiène, grâce à une meilleure alimentation, en facilitant l'accès à l'eau potable, en vaccinant, on a su en un siècle passer de 25% à 0.2% de mortalité infantile dans les pays développés. On ne changera pas facilement les grands équilibres climatiques de la planète, mais on peut modifier notre comportement afin de prévenir, d'atténuer ou de ralentir des déséquilibres climatiques capables de détruire des populations humaines.

Plusieurs questions soulevées en climatologie par André Berger sont également pertinentes dans le domaine médical, qu'il s'agisse du niveau de confiance requis pour décider, du questionnement sur la responsabilité, ou de la vitesse de développement de la maladie.

4- Du normal au pathologique : agir avant qu'il ne soit trop tard

« En climatologie la confiance en une observation ou en une prédiction dépend du pouvoir de détecter le signal au milieu du bruit de la variabilité naturelle ». Le problème est similaire en médecine. Comment reconnaître un signe anormal dévoilant une maladie au milieu des comportements variables dans la population et des petits maux sans gravité : fièvre passagère virale ou septicémie ? Douleur de l'épaule anodine ou début d'infarctus du myocarde ? Défaut de mémoire sans suite ou maladie d'Alzheimer ? C'est le contexte, l'ampleur, la durée, et la nouveauté par rapport à l'existant qui orientent le médecin et lui font prendre la décision d'explorer et de traiter.

André Berger souligne à juste titre la nécessaire prudence des scientifiques, conscients des limites de leurs connaissances. Cela doit-il pour autant entraver toute action, toute prise de décision ?

Comme la multiplication cellulaire, qui est inhérente à la vie, le CO₂, le méthane, le SO₂, l'ozone font partie de la vie planétaire. Mais une multiplication rapide provoque une tumeur d'abord bénigne, et à un stade ultérieur un cancer pour lequel parfois plus rien n'est possible. La vitesse de la transformation est dangereuse alors que le phénomène est naturel.

Se pose ainsi la question d'une vitesse d'évolution anormale. La transition entre le normal et le pathologique est parfois difficile à déceler. Une toux qui persiste alerte le médecin. Un simple mal de tête peut trahir le début d'une tumeur du cerveau. Le médecin se doit d'être vigilant. Il s'aide d'investigations biologiques et d'analyses par imagerie pour prendre des décisions, pour ne pas laisser le mal s'envenimer. Quand bien même le diagnostic est incertain, le médecin ne se confine pas dans une attitude attentiste, ou de précaution, il agit. Mais il ne décide pas seul.

5- Médecin et patient, scientifique et citoyen : tous responsables

Dans un parcours de patient, tous les intervenants ont un rôle de décision et de responsabilité. Le patient lui-même est acteur de sa santé, lorsqu'il abuse du tabac, de l'alcool, du sucre, du sel, des graisses, ou lorsqu'il prend des risques sur la route. La multiplicité des acteurs et la question de leurs responsabilités respectives se posent tout autant dans le domaine du changement climatique que dans celui de la santé humaine.

La proposition d'un enseignement d'éthique de l'environnement entre également en résonance avec les actions conduites en médecine et promues par des institutions comme le Comité Consultatif National d'Éthique pour les sciences de la vie et de la santé, le comité d'éthique des grands instituts de sciences de la vie, les comités consultatifs de protection des personnes dans la recherche biomédicale. L'homme face à la planète devrait avoir la même attitude que le médecin : « primum non nocere » devrait être la règle. Il existe un code de conduite, une déontologie très réglementée pour les professionnels de santé, basée sur un serment, inspiré d'Hippocrate. Sa transposition à tous les scientifiques, à ceux du climat en particulier, soulignerait la dimension éthique de toute activité scientifique, accroissant ainsi la confiance de la population dans leur discours. Au-delà des seuls scientifiques, l'adoption d'« une charte des devoirs des hommes », pensée comme un code de bonne conduite de chacun et de l'humanité dans son ensemble vis-à-vis de la planète et des êtres vivants qu'elle abrite constituerait un progrès dans notre prise de conscience de notre responsabilité dans le changement climatique à l'œuvre.

L'analogie entre santé humaine et santé de la Terre proposée par André Berger est donc féconde. Mais le contexte a évolué depuis trente ans, renouvelant les questions, ou leur formulation. L'irruption des outils numériques a transformé la médecine. La collecte des données a affiné les prévisions. Avec l'appui de l'intelligence artificielle, les analyses plurifactorielles se sont renforcées, la complexité de la maladie, entendue comme un état anormal, est mieux prise en compte. La médecine, comme les sciences du climat, est une science de la complexité : chaque composant du système agit sur les autres pour aggraver (ou camoufler) une maladie. Les interconnexions sont multiples.

Elles modulent la prédiction que ce soit par des facteurs innés (gènes de susceptibilité) ou acquis avec le rôle des comorbidités, de l'environnement et des comportements.

6- Mieux vaut prévenir que guérir

La climatologie comme la médecine sont des disciplines qui prédisent l'avenir (de la planète ou du malade). Toutes deux ont vu leur pouvoir de prédiction s'affiner.

Prédire est un pouvoir. Les scientifiques doivent être les garants de son bon usage. La prédiction est fascinante. Il peut être tentant de céder aux oracles, d'honorer de nouvelles pythies. La prédiction est effrayante. Qui ne serait saisi d'effroi devant l'annonce du diagnostic prédictif d'une démence précoce d'Huntington ? La tentation est alors grande de refuser de savoir. Bien comprise, la prédiction, qu'il s'agisse de diagnostic anténatal, de susceptibilité génétique, de risque d'épidémie, est toutefois utile. Lorsque la maladie est déclarée, la prédiction devient pronostic, parfois vital. Loin d'être tout puissant, le médecin est alors présent pour aider le malade à ouvrir les yeux, pour l'accompagner dans le choix du traitement qui lui permettra d'améliorer sa condition. De la même façon, les simulations climatiques ne prédisent pas un avenir impitoyable. Elles explorent les possibles. Elles nous éclairent et nous aident à penser les conséquences de nos actions sur l'avenir de la planète, notre maison commune.

Face au changement climatique, une médecine curative est envisageable. Ce pourrait être le rôle de la géo-ingénierie, à condition de l'utiliser en ultime recours, en vue de répondre à une menace imminente et insupportable pour l'humanité. De ce point de vue, il s'agirait de gérer une situation de crise, comme savent le faire les médecins urgentistes. Le terme de géo-ingénierie est d'ailleurs riche de malentendus. Il fait la part trop belle à une approche technique, à une médecine curative dédouanant l'humanité de toute responsabilité. Mieux vaudrait parler d'intervention climatique d'urgence, et garder à l'esprit le risque d'installer une nouvelle dépendance, cette fois au traitement administré.

Comme le rappelait André Berger, la meilleure approche reste celle de la prévention. Mais il convient de bien identifier le malade à soigner, à savoir l'humanité. L'humanité est malade de son rapport à la planète. Nous souffrons des maux que nous lui infligeons.

Et pourtant nous persistons dans nos erreurs, comme si nous étions détachés de notre environnement. La maison brûle et nous détournons le regard, en oubliant que nous n'avons pas d'autre maison. D'un point de vue médical, notre comportement est proche de celui d'un toxicomane, incapable de renoncer à sa consommation, mais conscient des maux qu'il s'inflige à long terme ainsi que des conséquences néfastes de ses actes pour l'ensemble de la communauté.

Notre insatiabilité ressemble en effet à une addiction, un désir qu'on ne peut contenir. Tout ce qui est possible serait permis. La richesse de la Terre serait là pour nous servir. Substituant les moyens aux fins, l'augmentation de la productivité, la croissance de la production de richesses seraient des buts en soi, avec pour argument de faire disparaître la pauvreté et les inégalités. On confond quantité et résultat. Le but est d'accroître le volume des produits et non de mieux les répartir et de s'en servir à bon escient. En médecine le même dévoiement s'est produit avec une tarification au volume d'activité des professionnels et non au résultat pour le malade. Ceci a provoqué une inflation d'activité (parfois sans pertinence), une restriction des moyens (pour plus de « performance »), un épuisement des professionnels et des résultats dégradés du point de vue de la qualité, notamment en termes de relations humaines.

7- Soin individuel et santé publique

En santé, le soin individuel, et la santé publique (prévention collective, économie, pollution, hygiène, urbanisme...), cheminent de concert. Des progrès ont été réalisés dans la responsabilité collective, mais les résultats sont encore perfectibles, par exemple en matière de taux de vaccination face à un danger d'épidémie (H1N1, Covid) ou de suivi des campagnes contre le tabac. C'est qu'il existe une tension entre la préservation de la liberté individuelle d'une part, et les mesures collectives coercitives d'autre part. La limite de la consommation de tabac dans l'espace public ou de la vitesse sur la route en sont deux illustrations. Des forces économiques (pour le tabac) et des désirs personnels (« égoïstes ») contrecarrent l'évidence scientifique et mettent en danger la population. Cependant il ne faut pas désespérer ou baisser les bras: la consommation de tabac et le cancer du poumon chez les hommes diminuent, les accidents de route sont moins fréquents qu'il y a trente ans. Cela prend du temps. Cela nécessite une réelle volonté d'agir de la part des décideurs.

Changer de comportement est en effet un problème redoutable. Prendre des mesures techniques en santé, comme l'approvisionnement en eau potable, est relativement facile à mettre en œuvre si les décideurs sont éclairés et si les moyens sont présents. Dans le domaine des sciences de l'atmosphère, ce fut le cas pour lutter contre la destruction de la couche d'ozone stratosphérique. Des produits de substitution permirent d'assurer les services assurés auparavant par les produits nocifs pour la couche d'ozone, sans impact notable pour les consommateurs. En matière de changement climatique, des changements de comportement sont nécessaires, ce qui est beaucoup plus difficile à obtenir. En santé, la discussion, le dialogue en face à face entre le médecin et le patient, la force de conviction de l'environnement familial (et socio-professionnel) et la pression financière (augmentation du prix) ont fait diminuer la consommation de tabac. La contrainte légale et le procès-verbal ont obligé les citoyens à porter une ceinture de sécurité en voiture. Mais il faut bien le dire: ce travail de changement de comportement doit s'inscrire dans la durée et n'est efficace que s'il est abordé en tenant compte de ses multiples implications.

8- Le pari de l'action éclairée

Qu'il s'agisse de santé publique ou de changement climatique, il convient donc de convaincre la société, et non pas seulement la communauté scientifique ou les décideurs politiques. De ce point de vue l'université a certainement un rôle majeur à jouer, au-delà de la formation de cadres scientifiques. Elle a vocation à être le lieu privilégié du débat rationnel, un lieu de rencontre entre les disciplines, un lieu ouvert à tous ceux qui souhaitent s'informer et débattre. Dans des sociétés démocratiques, l'enjeu majeur demeure d'accroître le niveau de connaissance des citoyens, de promouvoir les humanités scientifiques, la « scientific literacy » de la population. L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), qui fait la promotion d'indicateurs de santé, estime ainsi que la proportion de citoyens « lettrés en santé » est un déterminant central du degré de développement d'un pays en matière de santé publique.

Ceux qui croient que l'homme s'adaptera comme il l'a fait par le passé, depuis un million d'années, se trompent. D'une part le temps de l'homme est la génération, plus de trente ans aujourd'hui, un temps qui donne la mesure du temps d'adaptation d'une société.

Or ce temps d'adaptation ne suit pas le temps d'évolution de notre environnement terrestre, qui se contracte. D'autre part et surtout, l'homme n'évolue plus sous la pression de la sélection naturelle. En effet celle-ci n'a que deux moyens d'action : la taille des familles et la mortalité avant l'âge de procréation. Nous entrons dans une ère où les familles ont deux enfants, avec une très faible variance. Et, fort heureusement, la mortalité précoce est désormais négligeable. Nos conditions de vie et notre niveau de santé sont tels que la nature n'a plus d'emprise forte sur l'espèce humaine. Notre avenir sur Terre dépend donc de notre attitude vis à vis de la planète.

La question de notre adaptation au changement climatique est posée. Celui-ci est inéluctable. Pour autant, l'avenir n'est pas écrit. L'exemple de l'épidémie du Covid 19 nous montre qu'une maîtrise du confinement retarde et amortit le « pic » de l'épidémie.

Notre système de santé aurait sinon été débordé, nous obligeant alors à « trier » les malades, voire paralysé, nous empêchant de soigner les malades quand les soignants sont eux-mêmes malades. Lors de l'épidémie de la grande peste on n'enterrait plus les morts, la population était sidérée face à la catastrophe.

Mais si une épidémie a toujours une fin, il est illusoire d'attendre un retour « à la normale » du système climatique à l'échelle du temps de vie de nos sociétés. Nous savons que le coup est parti. Seules sont incertaines l'ampleur et la vitesse du changement en cours. Allons-nous le subir sans réagir ? C'est un choix possible, à condition qu'il soit éclairé, et d'en mesurer toutes les conséquences, vraisemblablement dramatiques. Allons-nous vivre détachés de l'évolution de la Terre, dans un environnement confiné et artificiel ? Nous préférons faire le pari de l'action éclairée, guidé par la conviction qu'il n'est jamais trop tard pour bien faire et progresser en humanité.

La santé de la Terre, un défi aux Universités

André Berger, Professeur émérite à l'université catholique de Louvain la Neuve (Belgique) et membre de l'Académie des sciences

Reproduction d'un article paru dans les Cahiers du MURS en 1991 (numéro 23/24)

*La santé de la Terre, un défi aux Universités **

André BERGER

Les universités interpellées

Le problème des interactions de l'homme avec la géosphère et la biosphère interpelle les Universités en cette fin de 20ème siècle, sur deux points au moins : la remise en question des programmes d'enseignement et de l'organisation de la recherche, remise en question qui concerne principalement la collaboration entre disciplines et la formation à long terme des chercheurs.

La pluridisciplinarité de la recherche pour la santé de la planète est une nécessité urgente. La structure du système climatique et les problèmes multiples que soulève la compréhension des mécanismes qui régissent son comportement, requièrent une collaboration étroite entre physiciens, chimistes et biologistes pour écrire les équations qui gouvernent la dynamique de l'environnement global, et du climat en

* *Leçon donnée sur invitation à l'Université d'Aix-Marseille III le 27 avril 1990 et publiée dans la Revue des Questions Scientifiques (161-2, 1990, p.129-149)*

A. BERGER

particulier ; mathématiciens, informaticiens et ingénieurs pour résoudre ces équations; géologues, palynologues, géochimistes, océanographes, géophysiciens et climatologistes pour acquérir les mesures indispensables à la compréhension des mécanismes qui régissent l'évolution du système, mesures qui concernent aussi bien l'état actuel que celui du passé ; économistes, sociologues, écologistes et médecins pour étudier l'impact de cette évolution sur la Société. Ce problème est malheureusement peu perçu au sein de nos universités où une structure classique reste définie par les politiques - conservatrices et individualistes la plupart du temps - des facultés, départements et autres unités.

D'autre part, la formation à long terme assurerait une préparation efficace aux chercheurs appelés à résoudre les problèmes que nous commençons seulement à entrevoir, mais dont nous avons la certitude qu'ils s'amplifieront au cours du temps, du fait de l'inertie du système et du temps caractéristique des phénomènes mis en jeu. Cette formation à long terme devrait être un des objectifs majeurs de nos universités, car il représente le meilleur investissement que l'on puisse faire pour l'avenir des jeunes et le développement de la Société. Nous devrions être soucieux de mettre en place une médecine préventive de la géosphère avant que ne s'impose la médecine curative, traditionnellement usitée pour la santé de l'homme.

La pollution globale

Il y a 200 ans, nous étions 1 milliard d'habitants sur Terre ; en 1930, nous sommes passés à 2 milliards ; en 1950, à 2,5 milliards et en 1988, nous avons officiellement franchi la barre des 5 milliards. En fait, le problème soulevé par cette augmentation du nombre d'habitants n'est pas l'explosion démographique en soi, mais le fait que la politique de développement de cette population ignore l'environnement et n'est pas adaptée à la rapidité de son accroissement. C'est la vitesse à laquelle la civilisation agresse l'environnement, plus que l'intensité, qui constitue le coeur du problème.

Cette agression, commencée dès le début de la Révolution Industrielle, a

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

créé une série de bombes à retardement que sont les pluies acides, le trou d'ozone et autre intensification de l'effet de serre. Bombes, car leurs effets risquent d'être importants pour les générations du 21ème siècle, si une tentative de désamorçage n'est pas entreprise à bref délai. A retardement, car ces effets ne seront visibles que lorsqu'il sera trop tard pour pouvoir les éviter.

Les exemples les plus connus de cette pollution sont certes les déchets, les pluies acides et le trou d'ozone. Chaque habitant dans nos pays est, en moyenne, responsable de l'émission d'une centaine de grammes de soufre par jour sous la forme de dioxyde de soufre. C'est ce SO_2 qui est à l'origine de l'acidité accrue des précipitations dans les régions industrialisées, lesquelles contribuent à détruire notre patrimoine artistique et les forêts. Celles-ci, en effet, soumises à un stress climatique et à une gestion basée sur le rendement immédiat plus que sur la protection à long terme, résistent mal à cette agression supplémentaire. Quant aux ordures ménagères, chacun d'entre nous en produit environ 1 kg par jour, sans prendre grand soin d'aucune récupération ni autre traitement. De plus, les fréons, créés exclusivement par l'homme, contribuent à détruire la couche d'ozone stratosphérique, principalement dans les régions polaires de l'Antarctique. Si ce phénomène, en soi, n'est pas particulièrement grave car au moment du minimum, en octobre, le rayonnement solaire est encore relativement faible, il nous donne toutefois la certitude de l'impact de l'homme sur son environnement. Il est donc révélateur que, tôt ou tard, si rien ne change, nous pourrions assister à une diminution de l'ozone stratosphérique global, bien en dehors des zones polaires. Cela pourrait conduire à une plus grande pénétration du rayonnement ultraviolet partout sur la Terre, à un accroissement des cancers de la peau et des affections oculaires, voire même à un affaiblissement du système immunitaire face aux maladies infectieuses.

Mais ces dernières années, c'est le réchauffement mondial imputable à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui a retenu toute notre attention. Cette hypothèse est, en effet, devenue plus crédible, tant pour les scientifiques que pour le grand public. La tendance générale des températures en surface au cours des années 1980 à 1990 a amené plusieurs chercheurs à déclarer que

A. BERGER

le réchauffement mondial et l'élévation connexe du niveau de la mer avaient déjà commencé. D'autres, toutefois, continuent de mettre en doute la qualité et la distribution des données sur lesquelles l'hypothèse en question se fonde.

Mobilisation au plus haut niveau

Qu'en est-il au juste ? Peu de questions scientifiques ont autant retenu l'attention de tous ces dernières années. En particulier, l'examen des problèmes liés à l'atmosphère et au climat a été plus que jamais au centre des rencontres qui ont réuni, en 1989, des responsables politiques du monde entier. Cette prise de conscience accrue s'explique sans doute, en partie, par le succès de la Conférence de Toronto, organisée en juin 1988. La déclaration, publiée à l'issue de cette conférence, concluait en ces termes :

«L'atmosphère terrestre se modifie à un rythme sans précédent sous l'effet des polluants provenant des activités humaines. Ces modifications constituent une grave menace pour la sécurité internationale et ont déjà des conséquences néfastes dans de nombreuses parties du monde».

A la fin de 1988, l'Assemblée Générale des Nations Unies adoptait la Résolution sur la Protection du Climat Mondial pour les Générations Présentes et Futures. En mars 1989, le Premier Ministre britannique donnait le signal des rencontres au plus haut niveau consacrées au climat et à l'atmosphère, en convoquant une conférence intitulée «Sauver la Couche d'Ozone». Une semaine plus tard, se tenait à La Haye une réunion où 24 chefs d'Etat se sont penchés sur les problèmes que soulève la protection de l'atmosphère terrestre. Le 5 juin, dans le cadre de la Journée Mondiale de l'Environnement, une réunion internationale, lançait un appel à plus de recherche et d'éducation, à l'économie d'énergie et aux produits propres. Une semaine plus tard, un colloque sur la Planète Terre à l'invitation du Président de la République Française, réclamait la mise en oeuvre d'un réseau d'observation climatique permanent du globe et une coopération nord-sud plus équitable pour défendre

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

l'environnement. Au début du mois de juillet, les chefs d'Etat ou de gouvernement des sept pays les plus riches du monde adoptaient une déclaration appuyant vigoureusement les travaux du Panel Intergouvernemental sur les Changements de Climat et le lancement du nouveau projet de l'Organisation Météorologique Mondiale sur la détection des changements climatiques.

La communauté des climatologues voit ses efforts portés à l'attention des hommes d'état les plus puissants de la planète. Il lui appartient donc de veiller à ce que ses activités de surveillance et de recherche soient conduites avec toute la rigueur scientifique voulue, et que les résultats en soient exposés de telle manière qu'ils puissent servir de base à l'élaboration de politiques internationales et nationales dans ce domaine.

Les climats du passé et de l'avenir.

Quand on s'intéresse à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre et à leurs conséquences éventuelles sur le climat de notre Terre, il ne faut pas oublier que, fait essentiel, le climat est un régime dynamique plutôt que statique, soumis à des variations naturelles à toutes les échelles temporelles, de quelques années aux millénaires, et à de possibles altérations d'origine anthropique. Ainsi, l'étude des paléoclimats met en évidence une série de variations quasi-périodiques et de périodes glaciaires à intervalles d'environ 100.000 ans pendant tout le Quaternaire. Ces variations sont liées à des modifications des paramètres orbitaux, induisant les différences dans l'intensité du rayonnement solaire reçu par la Terre. A une échelle temporelle plus petite et plus récente, les relevés de température superficielle moyenne du globe (terres et océans compris) indiquent, tout au long du siècle passé, un réchauffement sensible au cours de cette période, mais aussi des fluctuations continues d'amplitude comparable, qui sont attribuées à la variabilité naturelle du système atmosphère-océan-glace. La prévision d'un futur changement climatique d'origine anthropique ne peut donc être séparée de la compréhension et de la prévision de ces variations naturelles.

A. BERGER

C'est pourquoi une activité scientifique importante a vu le jour il y a plus de 10 ans, placée sous l'égide du Programme Climatique Mondial. De toutes les conférences internationales organisées au cours des 5 dernières années, il ressort clairement que les gaz à effet de serre jouent un rôle fondamental et qu'ils pourraient provoquer, dès les premières décennies du 21ème siècle, un réchauffement global majeur, plus important que tous ceux enregistrés dans l'histoire de l'homme. Quelques «dissidents» se font entendre, mais aucun d'entre eux n'a participé à l'effort soutenu de recherche que la plupart des équipes vivent depuis quelque 20 ans. Alléchés par le succès médiatique que connaît la question ou éternellement opposés à la communauté scientifique, ils se distinguent par des déclarations foudroyantes qui se départissent du consensus et qui sont la plupart du temps sans fondement scientifique. Ils doivent toutefois savoir que leur responsabilité est engagée, car ils risquent de faire retarder la mise en application de mesures qu'auraient décidé de prendre les hommes politiques et les industriels.

Les points sur lesquels il y a accord

Quel est donc le consensus ? Sept points peuvent être relevés sur lesquels tous les scientifiques avertis sont d'accord.

1. Depuis la Révolution Industrielle, la concentration de certains gaz rares, mais radiativement actifs, dans la troposphère est en augmentation ; il s'agit notamment du gaz carbonique, du N_2O , du méthane, des chlorofluorocarbones et de l'ozone troposphérique. Grâce à l'analyse des bulles d'air enchassées dans la glace des calottes polaires, on a pu estimer à quelque 280 ppmv la concentration en CO_2 dans l'air au 18ème siècle. En 1989, les mesures précises montrent qu'elle a dépassé 350 ppmv, ce qui représente une augmentation de 25% en 200 ans environ, dont 10 ont été réalisés au cours des 20 dernières années seulement ! L'augmentation actuelle de plus de 0,5% par an résulte, en fait, du rejet de quelque 5 à 6 milliards de tonnes de carbones provenant de l'utilisation des combustibles fossiles et de 0.5 à 2 milliards de tonnes provenant de la manipulation des sols et du déboisement intensif

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

de la forêt tropicale. Les estimations in-situ et satellitaires montrent, en effet, que celle-ci disparaît à la vitesse d'environ 20 hectares par minute. Les rejets globaux sont donc de quelque 7 GtC par an, ce qui représente un rejet journalier de 3,5 kg de C par chaque habitant de la Terre.

Le méthane qui résulte de la décomposition de substances organiques produites par les êtres vivants augmente à la vitesse de 1% par an ; le N₂O lié à la production d'engrais azotés pour l'agriculture, à la vitesse de 0.3% par an ; l'ozone troposphérique qui résulte de réactions photochimiques en présence d'autres polluants comme le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote, à la vitesse de 1,5% par an et finalement, les fréons qui font marcher nos frigidaires et nos bombes aérosols, à la vitesse de 5% par an.

Ce sont d'ailleurs ces mêmes fréons qui sont responsables du trou d'ozone dans l'Antarctique et l'application du Protocole de Montréal permettrait dès lors de faire d'une pierre, deux coups.

2. Ces molécules polyatomiques absorbent le rayonnement infrarouge de la Terre et contribuent à l'effet de serre de l'atmosphère en piégeant le rayonnement émis par la surface. Voilà pourquoi, de telles substances ont fini par être appelées «gaz à effet de serre».

Mais l'effet de serre n'est pas une nouveauté, pas plus d'ailleurs que ses bases scientifiques ne sont contestées. L'effet de serre est responsable d'une température sur Vénus bien supérieure à celle qui règne dans nos fourneaux domestiques. Si ces gaz n'existaient pas sur Terre, la température en surface y serait de -18°C, au lieu des 15°C confortables que nous connaissons actuellement. C'est l'effet de serre qui rend notre Terre habitable. Il est donc plus correct de parler d'une perturbation, en réalité d'une intensification de l'effet serre, lorsqu'on se réfère à l'augmentation de la concentration de ces gaz.

3. Le rôle des gaz à effet de serre autres que le CO₂ dans les changements

A. BERGER

climatiques est, en 1989, déjà aussi important que celui du seul CO₂. Si les tendances actuelles se poursuivent, les concentrations combinées du CO₂ et des autres gaz à effet de serre équivaldraient, du point de vue radiatif, à un doublement du CO₂ par rapport à l'époque pré-industrielle dès les années 2030.

4. Les modèles de circulation générale du système climatique concluent que, pour un doublement de la concentration en CO₂, (ou son équivalent en gaz à effet de serre), l'augmentation de la température moyenne globale en surface, à l'équilibre, serait située entre 1,5 et 4,5°C. Bien que l'inertie de l'océan retarde l'apparition de tels effets climatiques, il semble acquis que ceux-ci se produisent malgré tout, durant la première partie du 21^{ème} siècle. Cette fourchette, reflétant l'incertitude de nos connaissances, est interprétée à tort par les médias comme signe d'un désaccord entre scientifiques et utilisée par les décideurs pour justifier leur hésitation à mettre en place une politique volontariste de protection du climat et de l'environnement.

5. En ce qui concerne les précipitations, le problème est plus complexe encore, mais une intensification du cycle hydrologique à l'échelle globale, estimée à quelque 10-15%, peut être prévue avec confiance.

6. Bien que les caractéristiques régionales associées à un tel changement climatique ne puissent pas encore être modélisées, il semble acquis, à une échelle plus globale, que (1) le réchauffement soit maximum dans les hautes latitudes et survienne principalement fin automne et en hiver, (2) que le ruissellement annuel moyen augmente aux hautes latitudes, (3) que la sécheresse estivale devienne plus fréquente sur les continents des latitudes moyennes de l'hémisphère nord, (4) que, dans les régions tropicales, les précipitations convectives et l'évapotranspiration potentielle augmentent. En ce qui concerne l'Europe, les modèles prévoient un réchauffement de 2 à 4° C en été et de 3 à 7°C en hiver. Pour le bassin méditerranéen, la majorité des modèles montrent malheureusement une intensification de la sécheresse dans le futur.

7. Sur la base des changements observés depuis le début de ce siècle, le

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

réchauffement mondial estimé aurait pour résultat une hausse du niveau moyen des mers de 10 à 30 cm. Une hausse située dans la gamme supérieure de cette estimation aurait des conséquences directes importantes sur les zones côtières, les estuaires et leurs habitats. Bien qu'un effondrement de la calotte ouest Antarctique, conduisant à une hausse du niveau des mers de plusieurs mètres, reste possible, il ne pourrait se faire que progressivement et mettrait plusieurs siècles avant d'atteindre son effet maximal.

Avons-nous les preuves ?

Bien que l'observation de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre constitue une preuve de l'action de l'homme sur le système climatique, a-t-on déjà observé leurs effets ?

En réalité, que nous disent les modèles : 1) ils nous enseignent d'abord qu'au cours des 200 dernières années, la température aurait dû augmenter de 1°C environ à cause de l'augmentation des gaz à effet de serre. Or, on observe que depuis 100 ans, la température a augmenté de 0,5 à 1°C et que la décennie 80 a battu tous les records, 1990 étant l'année la plus chaude depuis qu'on possède des observations météorologiques (une bonne centaine d'années). L'augmentation subséquente du niveau moyen des mers, de 10 à 20 cm, est elle aussi compatible avec les résultats des modèles ; 2) les modèles prévoient une diminution de la température de la stratosphère. Or, les mesures (effectuées depuis une vingtaine d'années) montrent que la stratosphère se refroidit ; 3) selon les modèles, l'amplitude de la variation diurne de la température devrait diminuer. Depuis peu de temps, c'est ce que montrent les observations météorologiques, aux Etats Unis du moins ; 4) les modèles disent encore que l'évaporation devrait aller croissant à cause de l'effet de serre. Les mesures montrent qu'il y a de plus en plus de vapeur d'eau dans l'air au dessus de l'Océan Pacifique équatorial ; 5) quant aux événements extrêmes, des études sur la thermodynamique des ouragans montrent que dans un monde plus chaud, leur fréquence et leur intensité devraient augmenter. De plus, un des modèles les plus

A. BERGER

développés de la communauté scientifique indique que dans un climat plus chaud, on devrait s'attendre à des sécheresses plus intenses au coeur des continents des latitudes tempérées. Des études théoriques concluent aussi qu'un changement dans la moyenne s'accompagne d'un changement dans la fréquence des extrêmes. Quelques statistiques, trop rares malheureusement, montrent une telle augmentation de la fréquence des inondations, tempêtes et sécheresses au cours des 3 dernières décennies. Personne ne prétend toutefois que les sécheresses enregistrées au cours des derniers étés dans les plaines centrales des USA, ni les hivers doux et autres tempêtes récentes en Europe, soient le résultat des perturbations de l'effet de serre liées aux activités humaines. Il est cependant intéressant de remarquer que les résultats des modèles simulant l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre sur le climat ne sont pas en contradiction, voire même sont du même ordre de grandeur que les observations. Ajoutons que ces mêmes modèles ont permis de reproduire avec une bonne fiabilité les climats anciens.

La prudence des scientifiques

Le dilemme de la communauté scientifique réside, en fait, bien plus dans la confiance que dans la compréhension scientifique. La question qui est également posée est : «Quand serons-nous capables de dire avec certitude que l'effet de serre est là ?». En réalité, étant donné la remarque déjà faite à propos de l'effet de serre, ce que les hommes politiques, les décideurs ou les citoyens désirent savoir est "Quand serons-nous certains que la pollution due aux activités humaines peut significativement perturber le climat global de la Terre ?". Mais cette question est elle-même insidieuse, parce qu'imprécise, et la réponse est difficile pour deux raisons. La première concerne le «nous» qui est non-défini et la seconde est liée à la notion de «certain» qui est un jugement de valeur, pas une quantité relevant de la science.

En ce qui concerne le «nous», une enquête auprès de la population a révélé que la réponse à la question était largement différente selon que l'on s'adressait aux spécialistes ou non. La plupart des gens estiment, en effet, qu'une action politique

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

devrait être prise pour réduire le risque d'une intensification de l'effet de serre à partir du moment où le degré de confiance de la communauté scientifique atteint 50%, alors que cette dernière veut être sûre à 90% et plus. L'hésitation bien connue des scientifiques à parler haut de l'effet de serre et de ses impacts est donc bien liée à cette notion de certitude.

La statistique est un sujet perfide. Disraéli n'a-t-il pas dit : «Il y a des mensonges, des mensonges odieux et des statistiques !». En climatologie, la confiance en une observation ou en une prédiction dépend du pouvoir de détecter le signal au milieu du bruit de la variabilité naturelle. Le problème qui se pose aux climatologues est compliqué, car bien qu'on assiste au cours de ce siècle à une augmentation progressive de la température, celle-ci est loin d'être systématique et régulière. De plus, certaines années parmi les plus chaudes, spécialement au cours de cette décennie, sont associées à des phénomènes naturels tels que le El Nino et l'activité solaire, phénomènes qui sont loin d'être connus parfaitement. L'augmentation de température, l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre et les lois de la physique ont convaincu plus d'un spécialiste que l'intensification de l'effet de serre va se produire. Tout autre chose est de décider quand on est suffisamment sûr pour affirmer que la perturbation est déjà en train de se produire. Savoir quand vous allez décider de ne plus attendre un bus qui est en retard dépend cruciallement de circonstances personnelles ; c'est un jugement de valeur, tout comme l'est le problème de la perturbation de l'effet de serre. Bien que nous ayons suffisamment d'arguments pour croire au réchauffement global, aucun pris séparément ne peut fournir la certitude que les preuves observationnelles ne reflètent peut-être rien d'autre que des fluctuations aléatoires du système climatique. Le problème des climatologues est qu'ils savent que le système climatique ne peut pas rester indifférent aux perturbations induites par l'activité humaine, mais qu'ils sont aussi convaincus de la difficulté de détecter la réponse du système à ces perturbations au milieu du bruit de fond résiduel. Le problème est, en fait, similaire à celui du réchauffement inévitable d'une pièce si le radiateur fonctionne, même si l'inertie retarde l'apparition de la chaleur et que vous n'avez aucune possibilité de vérifier si l'interrupteur est allumé.

A. BERGER

Beaucoup croient que d'ici la fin du siècle nos doutes devraient avoir disparu grâce à l'accroissement du nombre d'observations et de leur diversification, mais aussi grâce à l'augmentation de la précision de nos calculs. Il n'en demeure pas moins que les conservateurs continueront à s'interroger sur le degré de certitude et que certains continueront à prétendre qu'aucune déclaration ne peut être faite sans que nous soyons «absolument certains». La question est alors de savoir si les gens comprennent bien que lorsque nous, scientifiques, serons certains, il sera bien trop tard pour prévenir et contrecarrer les changements que l'humanité est en train de préparer dans sa vie courante et sans en prendre conscience.

Prévenir ou guérir demeure donc bien la question fondamentale, dont le choix appartiendra à la Société tout entière, mais où l'Université est appelée à jouer un rôle fondamental pour que ce choix soit le plus judicieux possible.

On peut donc se demander quand le souci personnel de chaque scientifique pour l'environnement planétaire l'emportera-t-il sur sa formation scientifique et, en particulier, sur la prudence naturelle basée sur son degré de compréhension des phénomènes naturels et des statistiques. Certains dont l'auteur, ont déjà franchi le pas, en soutenant par exemple que la lutte contre le gaspillage énergétique et la réduction des émissions de CO₂ et autres CFCs constituent une sorte d'assurance qui mérite largement l'investissement, étant donné les intérêts à long terme pour le bien être futur.

Un réchauffement inévitable non-uniforme.

Il ne sera probablement jamais possible de parler avec une certitude totale de l'avenir du climat, car il se produira toujours des fluctuations climatiques naturelles, des changements climatiques à long terme et des phénomènes de caractère soudain, tels que l'analyse du passé nous permet de le supposer.

Etant donné l'inertie du système climatique et le temps considérable que

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

requiert l'implantation d'une politique nouvelle dans les structures socio-économiques actuelles, sans parler du peu d'enthousiasme des décideurs à prendre les mesures de changement préconisées par les scientifiques, il apparaît comme certain, à présent, que la concentration des gaz à effet de serre continuera à augmenter dans les décennies à venir, dès lors, que le **réchauffement** prévu sera **inévitabile**. Il n'en demeure pas moins vrai que les décisions politiques futures, à prendre le plus rapidement possible, pourraient ralentir la vitesse d'accroissement. Ceci donnerait à la Société plus de temps pour s'adapter aux changements et permettrait aux scientifiques d'affiner et de mettre à jour leur scénarios, au fur et à mesure de l'implantation des politiques sociales et économiques.

Très probablement, l'action inconsidérée des activités humaines donnera-t-elle au climat et à l'environnement un aspect qu'on ne leur a jamais connu. Les informations du passé montrent, en effet, qu'un doublement du CO₂ atmosphérique pourrait avoir des impacts profonds sur l'écosystème global, l'agriculture, les ressources en eau et la sécurité alimentaire. Bien que ces effets puissent aggraver les tensions internationales et ébranler tout le système économique, on doit admettre que les changements climatiques ne seront pas néfastes pour tous. Incontestablement, le réchauffement redistribuera les ressources climatiques, rendant la situation meilleure à certains endroits, pire à d'autres. De toute façon, la connaissance partielle et incertaine des phénomènes ne nous aidera guère à nous adapter à la nouvelle situation, ni à limiter les dégâts lors de la transition. C'est, en effet, lors du passage progressif vers un nouvel équilibre climatique que les difficultés risquent d'être les plus grandes. Ceci est particulièrement vrai dans un monde de 5 milliards d'habitants, étroitement liés économiquement et politiquement. Vu le degré de sophistication des technologies, dont le développement dépend de plus en plus impérativement, et l'interdépendance de toutes les structures, la Société est d'autant plus sensible, voire fragilisée face aux contre-réactions qui caractérisent tout système hautement non linéaire, tel celui qui gouverne son comportement global.

A. BERGER

Que faire ?

Le risque de déséquilibre, transitoire au mieux, que le développement industriel et économique de la seconde moitié du 20^{ème} siècle fait courir aux générations futures, a atteint, de l'avis des spécialistes, un seuil dont la gravité exige que tous les phénomènes décrits ici puissent être étudiés avec beaucoup plus de moyens et d'attention.

L'observation et la recherche

Il faut pour cela encourager les chercheurs à étudier la Terre et intensifier leur formation grâce à un enseignement universitaire de qualité. Il faut aussi que les moyens continuent à leur être donnés, à l'échelle nationale (pour la recherche et la diffusion de l'information) et internationale (pour la collaboration), pour déceler le plus rapidement possible le signal du réchauffement au sein de la variabilité naturelle du climat et limiter le degré de nos incertitudes. Il faut donc, d'une part, multiplier et diversifier les observations et les informations sur le climat présent et passé. D'autre part, il faut mettre au moins des modèles performants en vue d'estimer l'amplitude, la chronologie et la distribution géographique régionale des impacts attendus. Tout doit être fait pour limiter la grandeur de ces impacts ; il est, pour cela, impératif de pouvoir les reconnaître à temps, afin de mieux s'en prévenir.

Sauver nos ressources naturelles non renouvelables

Parallèlement à la recherche et à la formation des enseignants, des actions concrètes peuvent être engagées de manière à diminuer les risques que ces activités humaines font courir à l'environnement et réduire leurs effets. Avant qu'une stratégie internationale soit mise sur pied (ce qui prendra sûrement du temps si on regarde ce qui s'est passé avec la pollution transfrontière et l'ozone), les nations devraient pouvoir prendre une série de mesures qui, de toute façon, seraient bénéfiques à

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

l'environnement, que l'effet de serre s'avère être catastrophique ou non, sans pour autant qu'elles mettent en péril leur compétitivité économique ni leur bien-être. Une lutte urgente contre le gaspillage énergétique, le développement d'une politique volontaire d'utilisation rationnelle de l'énergie, la mise en oeuvre immédiate d'une politique économique qui favorise l'usage domestique de produits propres et la reconnaissance d'une valeur juridique au principe du pollueur-payeur inscrit dans l'acte unique européen, une réduction considérable de la déforestation, et une diversification des sources énergétiques aideraient à sauver nos ressources naturelles non renouvelables dont on sait qu'elles sont limitées et appelées à disparaître avant la fin du 21ème siècle si nous continuons à les galvauder comme à présent.

Limiter les émissions de CO₂

Nous serons aussi amenés à définir rapidement des stratégies de développement qui devraient permettre de stabiliser la concentration en CO₂-équivalent bien en dessous d'un seuil critique. Comment pourrions-nous réaliser un tel objectif alors que les scénarios montrent que les besoins annuels en énergie primaire seront très vraisemblablement d'au moins 20 TWan, d'ici 30 à 40 ans. En fait, ce chiffre correspond à une croissance de 1,7% par an, similaire à celle du post-choc pétrolier des années 1973. Il serait toutefois prudent d'également prévoir un scénario de quelque 30 TWan correspondant à une croissance énergétique de 4%, typique des «golden sixties», pour les pays en voie de développement et de 2% pour les pays riches. Face à de telles projections en besoin énergétique d'ici une cinquantaine d'années et à la nécessité de réduire les émissions de CO₂ de 20% par rapport à 1988 d'ici l'an 2005, voire de plus de 50% si on veut stabiliser la concentration en CO₂ et limiter le réchauffement global à 0,1°C par décennie, bon nombre d'organismes s'accordent pour reconnaître qu'en plus des économies d'énergie et de l'utilisation rationnelle de l'énergie, l'exploitation énergétique de la biomasse, les énergies douces (hydroélectrique, solaire, éolienne et géothermique) et l'énergie nucléaire sont à la base d'un espoir de solution. Si on admet qu'une politique résolue

A. BERGER

d'utilisation rationnelle de l'énergie nous permettra d'économiser une dizaine de TWan, une quinzaine de TWan pourrait être raisonnablement fournie à raison de 5 TWan par les combustibles fossiles, 3 par les énergies douces renouvelables, 3 par la biomasse et 4 par le nucléaire. Le non-respect de ces chiffres, ou toute croissance supérieure à ces 25 TWan, requiert donc un développement énergétique nouveau et nécessitent le renforcement de la recherche dans les sources d'énergie propres à fort potentiel.

Une politique à environnement intégré

La Ligue des Droits de l'Homme a permis d'améliorer les conditions de vie de la Société au début du 20ème siècle. Mais il apparaît, à présent, qu'en même temps la Révolution Industrielle, avec sa pollution globale de l'environnement, progressivement créé une situation qui pourrait sérieusement entraver le développement du siècle prochain. Nous avons, en effet, oublié de prévoir l'impact à long terme d'un développement anarchique visant d'abord le profit immédiat. La prise en compte du coût réel du développement, y compris le maintien ou la restauration d'un environnement sain, nous aurait mis à l'abri de ces bombes à retardement que sont les pluies acides, le trou d'ozone, le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, la pollution des eaux et des sols, la déforestation, les accidents et les déchets industriels, tant chimiques que nucléaires, et autres ordures ménagères. En particulier, les modifications inévitables et quasi-irréversibles du climat, liées à l'utilisation inefficace des combustibles fossiles par une population mondiale en explosion sans précédent dans l'Histoire, requièrent un effort particulier de contre-mesures. De manière à éviter les erreurs du passé, il faudra dorénavant s'assurer que la protection de l'environnement fasse partie intégrante de toutes les politiques, comme reconnu dans une Déclaration du sommet Européen de Rhodes, en décembre 1988. Pour cela, il est urgent que chaque pays mette sur pied une commission interministérielle de l'environnement. Celles-ci, libres de toute contrainte politique nationale et en étroite concertation avec les autres pays, devraient veiller non seulement à ce que les directives internationales soient effectivement prises en compte et implantées rapi-

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

dement dans les structures sociales et économiques, mais surtout à ce que les décisions futures liées au développement soient prises en tenant compte de leur impact éventuel sur l'environnement.

Le 21ème siècle appartiendra à ceux qui ont, dès à présent, le courage de reconnaître la vitesse effrénée de notre développement par rapport à l'évolution naturelle et l'absolue nécessité de transmettre aux générations futures notre héritage naturel par l'utilisation d'une médecine préventive plutôt que curative. Cette politique à **environnement intégré** ne pourra être stabilisée à long terme que par un changement radical des mentalités, c'est-à-dire une attitude où l'environnement ferait partie de décisions au même titre que l'économie, la justice et le droit des hommes.

L'industrie verte, un souffle économique nouveau

Etant donné les problèmes d'environnement d'ampleur croissante auxquels le monde d'aujourd'hui doit faire face, le respect des règles strictes de protection de l'environnement apparaît à présent comme une condition impérative pour permettre d'assurer une croissance soutenue par une meilleure qualité de la vie à tous les peuples de la Terre. Le Siècle de l'effet de serre devra être celui de l'industrie verte. Une telle politique volontariste relancerait notre économie en lui donnant un sens et un souffle nouveau, en lui permettant de se renouveler dans la perspective d'un développement harmonieux de la Société en symbiose avec l'environnement pour le bénéfice de tous.

Un protocole international pour la protection du climat

Résoudre le problème demande une organisation extraordinairement complexe qui ne peut s'improviser. De plus, plus tard seront prises les mesures en vue de prévenir les impacts ou du moins de les atténuer, plus chers les remèdes coûteront-

A. BERGER

ils à la Société. Par conséquent, des mécanismes de gestion doivent être installés pour encourager, examiner et approuver les nouveaux projets. A l'instar du Protocole de Montréal sur la préservation de la couche d'ozone, un Protocole International pour la Protection de notre Atmosphère Globale, et en particulier du Climat de la Terre doit être négocié et son implantation dans les structures politiques et sociales préparée.

L'explosion démographique du Tiers-Monde

Etant donné l'augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre et de la déforestation, la responsabilité des pays en voie de développement sera de plus en plus engagée. Des programmes devront donc être développés pour les rendre conscients de l'importance du problème et les amener à prendre eux-mêmes les mesures qui s'imposent (par exemple en matière de démographie). De plus, une politique internationale devrait rapidement leur permettre de sauver leurs ressources forestières et leur procurer des technologies propres en vue de produire l'énergie requise par un développement rapide et une expansion économique à la mesure de leurs besoins. Tel serait d'ailleurs un des buts du Fond International pour l'Environnement réclamé par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

Une charte des devoirs des hommes

Comme le temps nous manque, la solution ne pourra pas venir des seules organisations gouvernementales ou internationales. Chacun de nous, en particulier dans les pays industrialisés, doit reconnaître la part de responsabilité qu'il prend, jour après jour, dans la pollution globale. Il est dès lors temps qu'une Charte des Devoirs des Hommes soit créée pour susciter une prise de conscience collective, afin que nous nous sentions plus solidaires dans un développement en meilleure harmonie avec l'environnement et plus concernés par la responsabilité que nous avons de léguer notre héritage naturel aux générations à venir.

Les Cahiers du MURS n°23/24 - 1er/2ème trimestres 1991

Un cours d'éthique de l'environnement

Cette prise de conscience ne peut se réaliser que par un enseignement approprié dès le bas âge et poursuivi jusqu'à l'Université. Il s'agirait d'un enseignement conduisant à une éthique de l'environnement, au même titre que les cours qui enseignent la morale, le droit et la justice. C'est l'Université qui devrait prendre en charge sa création, ce qui ne pourra se faire que grâce à l'acquisition d'une information solide basée sur une recherche de qualité.

Le rôle central de l'Université

Quelque soit le bout par lequel on approche le problème de l'impact des activités humaines sur le climat, l'Université se retrouve inmanquablement interpellée ; c'est à elle et à ses membres de saisir l'occasion de se retrouver au centre de ce débat universel. Il est à espérer que l'Université décide d'accepter ce rôle en intensifiant sa recherche et son enseignement sur le climat dans un cadre pluridisciplinaire et, ainsi, d'investir dans ce qui représente la plus grande expérience géophysique involontaire jamais déclenchée par l'Homme.

André BERGER
Université Catholique de Louvain
Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaitre