Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 123 (2000)

Artikel: L'environnement : une perspective géologique
Autor: Föllmi, Karl B.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89535

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'ENVIRONNEMENT, UNE PERSPECTIVE GÉOLOGIQUE [1]

KARL B. FÖLLMI

Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, CH-2000 Neuchâtel, Suisse.

1. INTRODUCTION

Le terme "Géologie" évoque généralement des images englobant roches, chaînes de montagnes, catastrophes naturelles telles que les tremblements de terre, les éruptions volcaniques ou encore les problèmes géotechniques rencontrés lors du percement des tunnels. Par contre, l'aspect environnemental de la géologie est nettement moins bien connu du grand public; c'est pourtant dans ce domaine appliqué que la plupart des géologues suisses trouvent actuellement des emplois, travaillant pour la gestion des ressources d'eaux souterraines, l'assainissement d'anciennes décharges et la gestion des déchets radioactifs, etc. Aux niveaux des problèmes environnementaux qui touchent actuellement la planète toute entière, on ignore souvent par contre qu'un bon nombre d'arguments scientifiques sont fournis par les géologues.

A ce niveau, l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel occupe une position tout à fait exceptionnelle, marquée par une tradition qui remonte au temps de la Première Académie. Elle était illustrée alors par les remarquables études environnementales et paléoenvironnementales de Louis Agassiz et de Armand Gressly. Ce type de préoccupations était également au centre des intérêts de mon prédécesseur, le professeur Bernard Kübler à qui l'on doit, entre autre chose, la création à l'Université de Neuchâtel de deux laboratoires de recherche dans le domaine de l'environnement: celui de diffraction de rayons X que dirige actuellement Thierry Adatte et celui d'analyse chimique par voies humides que dirigeait Carlos Beck et qui se trouve actuellement sous la responsabilité de Philipp Steinmann.

Dans la recherche fondamentale, la géologie assure une importante contribution pour une meilleure compréhension du développement et du fonctionnement de notre environnement, et cela à plusieurs niveaux, en lui donnant une perspective complémentaire à celle des autres sciences naturelles (p.ex. MERRITTS *et al.*, 1997).

2. COUPLAGE LITHOSPHÈRE-BIOSPHÈRE

L'un des aspects les plus fondamentaux des changements environnementaux de l'histoire terrestre se situe aux niveaux des échanges entre la lithosphère, c'est-à-dire la partie rocheuse, abiotique, de la planète et la biosphère, qui forme l'enveloppe vivante de la terre. Le couplage étroit entre la lithosphère et la biosphère constitue la meilleure garantie de la stabilité climatique et environnementale de la planète (p.ex. KUMP *et al.*, 1999). Une bonne illustration nous en est donnée par le cycle global du carbone (fig. 1). La teneur en

[1] Texte légèrement adapté de la leçon inaugurale présentée le 12 décembre 1997 à l'Université de Neuchâtel.

CO_2 de l'atmosphère, cet important gaz à effet de serre, se trouve réglée par le cycle global du carbone. Une importante source de carbone juvénile (on qualifie de juvénile des éléments qui proviennent des zones profondes de la terre) se trouve associée au volcanisme surtout basique. De là, il peut être piégé dans deux compartiments majeurs par les actions de la photosynthèse qui est active dans les environnements continentaux et marins, ou par l'action de l'altération biochimique (= érosion et décomposition biochimiques des roches) active sur les continents. Il s'agit de deux processus qui se trouvent totalement (photosynthèse) et partiellement (altération) contrôlés par les organismes (BERNER & LASAGA, 1989).

Dans les échanges entre biosphère et lithosphère, il est important de déterminer les variables et de situer les interfaces les plus importantes. En d'autres mots: où se situent les phénomènes naturels qui interviennent d'une façon profonde et efficace dans l'évolution de la biosphère et la lithosphère ?

La photosynthèse est un processus important pour la transformation du carbone inorganique en carbone organique. Ce processus est également important en tant que mécanisme régulateur du cycle global de l'oxygène, comme il l'est pour des autres éléments biophiles (p.ex. SCHLESINGER, 1997). Au niveau global, le taux de la photosynthèse est un paramètre variable. Il peut par exemple changer si le taux de l'altération biochimique varie de façon globale puisque celui-ci délivre les éléments nutritifs et vitaux pour les plantes que sont le calcium, le silicium et le phosphore, entre autres. La variation de l'altération globale est fortement dépendante du climat et des processus tectoniques qui résultent, en particulier, de la formation des chaînes de montagnes. De son côté, les changements de l'intensité du volca-

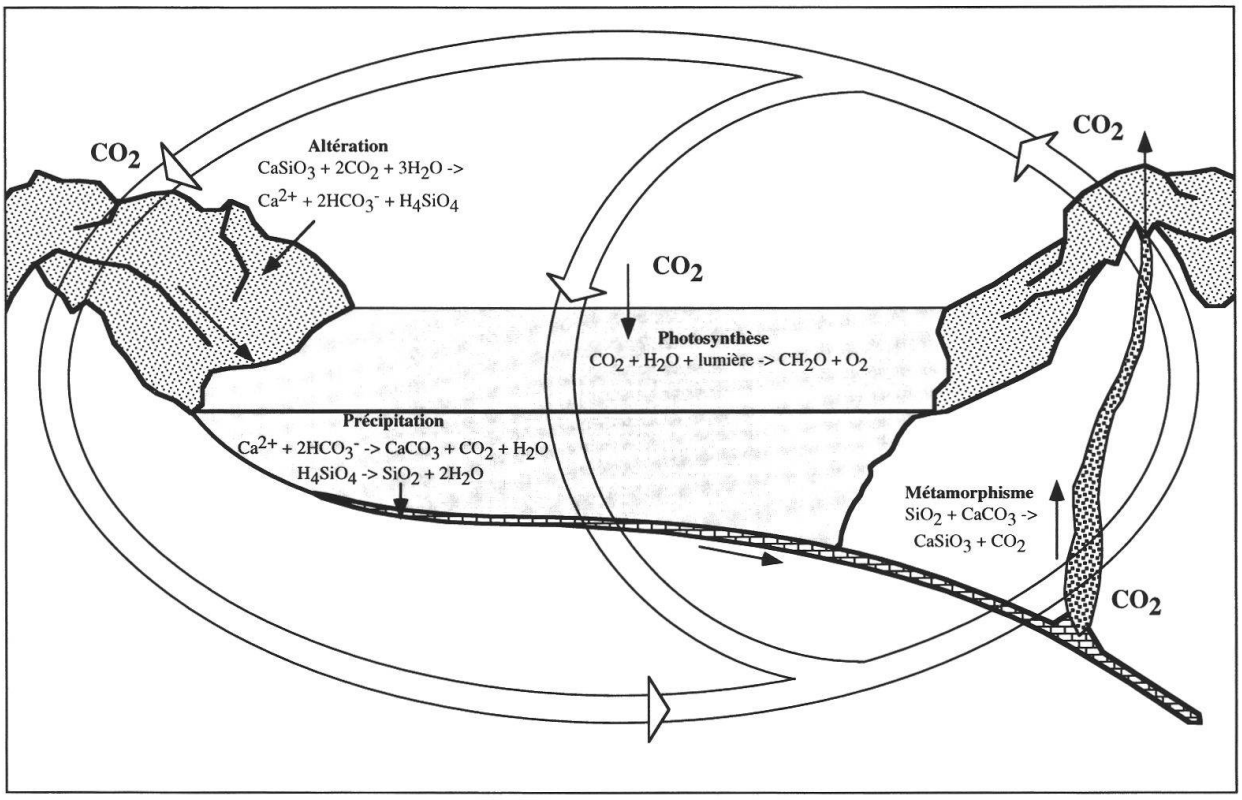

Figure 1: Diagramme schématique du cycle du carbone (d'après BERNER & LASAGA, 1989).

nisme (comme source de CO_2) observés durant les temps géologiques peuvent influencer l'effet de serre, donc influencer la biosphère.

Tous ces paramètres et ces processus forment d'importantes interfaces entre la biosphère et la lithosphère. Ils sont pratiquement tous variables dans le temps comme cela apparaît dans l'histoire terrestre (p.ex. STANLEY, 1999).

Comment est-il possible de tracer les variations de ces paramètres au cours des temps géologiques ? Et si nous parvenons à établir les degrés de variabilité, cette découverte a-t-elle une réelle importance pour notre civilisation ?

3. DE L'IMPORTANCE DES CHANGEMENTS NATURELS

L'un des succès les plus étonnants de la reconstitution des climats du passé se situe au niveau de l'utilisation des isotopes stables de l'oxygène en tant que traceurs des variations climatiques du passé. Les isotopes stables de l'oxygène sont utilisés comme indicateurs du volume des eaux soustraits à la mer sous forme de glace; ils deviennent donc un indicateur du climat global de la terre. Les variations très détaillées des isotopes de l'oxygène obtenues à partir des glaces et des sédiments nous permettent actuellement de proposer une reconstitution très précise du climat du passé. La figure 2 montre une telle reconstitution climatique basée sur les mesures de forages de glace dans la calotte glaciaire du Groenland (GRIP = "Greenland Ice Coring Project"). Elle s'étend de la période récente et chaude à l'avant-dernière période froide. Vous y observez que la période chaude actuelle est caractérisée par une stabilité de la température, stabilité qui paraît exceptionnelle si nous la comparons avec l'évolution des températures de la dernière période glaciaire; durant celle-

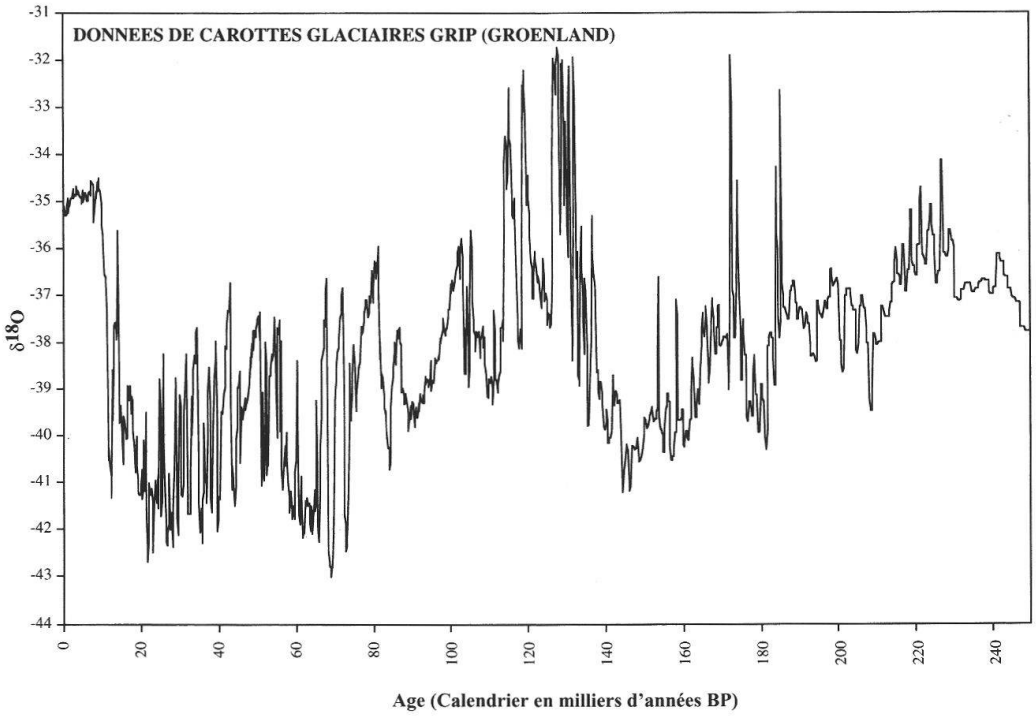

Figure 2: Données isotopiques de l'oxygène mesurées dans la glace d'un forage glaciaire au Groenland (GRIP) durant les 240'000 dernières années.
(d'après http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.ICE/.CORE/.GRIP.cdf/.o18/)

ci, une instabilité permanente évolue vers des basses températures; au-delà, on observe des phases courtes mais rapides de réchauffement.

Cette courbe isotopique est devenue une importante référence qui nous permet non seulement d'établir l'importance de la variabilité du climat, mais également de situer la rapidité des changements climatiques au cours des derniers 250'000 ans.

Un deuxième exemple illustre la nécessité de l'approche historique. Il s'agit de l'événement El Niño de 1997 et 1998. Les événements El Niño sont le résultat, entre autres facteurs, de la faiblesse des vents alizés et des changements associés de la distribution des masses d'eaux chaudes dans le Pacifique. Ce déplacement des masses d'eaux chaudes du Pacifique occidental vers le Pacifique oriental a conduit à des changements climatiques marqués, comme la sécheresse en Indonésie et en Australie, ainsi qu'à une augmentation des précipitations sur les côtes ouest de l'Amérique du Sud, de l'Amérique Centrale et des Etats Unis.

Grâce à la mise en place d'un remarquable système de mesures *in situ* des températures et des courants associés à l'utilisation des données des satellites, il est actuellement possible d'obtenir une image du développement des événements El Niño très proche de leur évolution en temps réel. Mais c'est uniquement l'approche historique, la comparaison avec des événements anciens, qui nous permet de faire des prédictions. L'approche historique nous enseigne que l'événement El Niño de 1997 et 1998 s'annonçait comme le plus important de ceux qui ont été enregistrés durant ce siècle; des voix se font entendre pour dire que son amplitude et sa rapidité étaient liées aux effets anthropiques. Pour soutenir une telle affirmation, il serait nécessaire cependant de disposer de l'enregistrement des événements El Niño jusque dans la période préindustrielle. Dans cette optique, des géologues s'efforcent de mettre sur pied des enregistrements quantitatifs continus qui permettent de suivre les changements écologiques dans le temps en fonction des événements El Niño. Pour ce faire, ils examinent quantitativement les changements temporaires de la composition des populations récifales dans le Pacifique: la détermination des isotopes stables de l'oxygène des coraux devrait ainsi permettre de suivre l'évolution des températures des eaux de surface (fig. 3; p.ex. COLE *et al.*, 2000). Par ces données, il sera alors possible de mettre en évidence, de façon plus précise, la possibilité d'un impact humain dans les événements El Niño, actuels et futurs.

Ces exemples devraient montrer que l'évaluation des changements environnementaux actuels et futurs n'est pas possible sans un recours aux données historiques dont la reconstitution relève de la compétence des géologues. Ainsi, il devient possible de comparer l'amplitude et les effets possibles de ces événements.

4. DE L'IMPORTANCE DU COUPLAGE

Comparer les changements environnementaux actuels par rapport à ceux du passé géologique offre l'avantage de saisir l'ensemble des processus dans une échelle de temps et d'espace qui dépasse nos possibilités d'enregistrement actuelles.

Ainsi de nos jours, pour un groupe important de scientifiques, les corrélations entre les changements des teneurs en CO_2 de l'atmosphère et l'élévation de la température terrestre ne sont pas la preuve d'une relation directe. Ils estiment, par exemple, que les changements de l'activité solaire mesurée par la grandeur et la distribution des taches solaires sont la principale source du réchauffement actuel. Le danger d'une telle dispute ne touche pas, par lui-

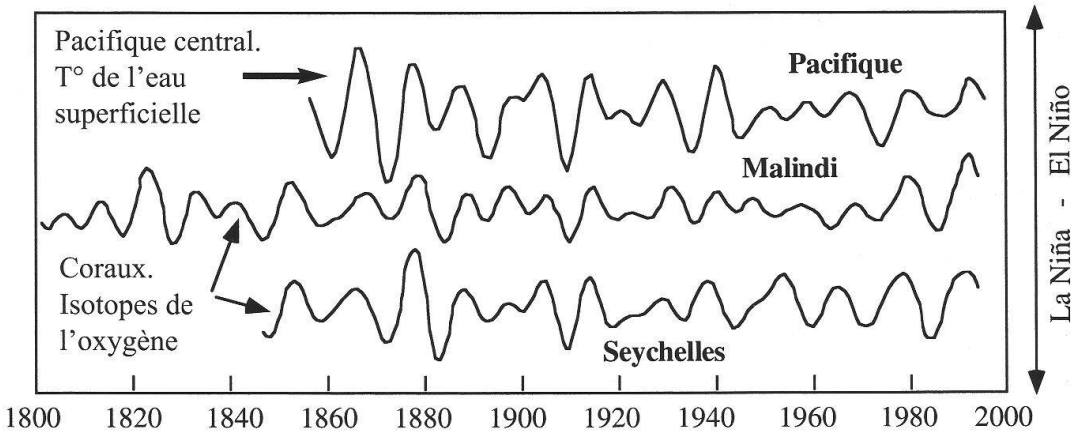

Figure 3: Les événements d'El Niño: comparaison des données océanographiques (température d'eau superficielle) et les signatures isotopiques des coraux de Malindi et des Seychelles (d'après COLE *et al.*, 2000).

même, aux principes scientifiques; mais il nous rend attentifs au fait que plus d'un mécanisme peuvent expliquer la tendance actuelle au réchauffement. Si danger il y a, il réside beaucoup plus dans les possibilités d'abus politiques dans l'utilisation de ces informations.

La figure 4 montre les courbes des changements de l'activité solaire, du CO_2 atmosphérique et de la température moyenne de l'hémisphère nord depuis 1600. On voit effectivement qu'une corrélation de la température globale et de l'activité solaire pourrait être établie. D'un autre côté, l'évolution à long terme de la teneur en CO_2 atmosphérique est également reflétée par l'évolution globale de la température.

Dans de tels cas, les données paléoclimatologiques peuvent clarifier les relations causales, par exemple entre les teneurs atmosphériques de CO_2 et le réchauffement global. Les célèbres carottes de glace du forage de Vostock en Antarctique, analysées par des scientifiques russes et français, nous donnent, sur la base des isotopes stables de l'oxygène, non seulement un enregistrement détaillé des températures durant les derniers 130'000 ans, bien similaires à celles du forage GRIP au Groenland, mais également l'enregistrement de l'évolution précise de la teneur en CO_2 des bulles d'air fossiles emprisonnées dans la glace (fig. 5). L'étroite corrélation entre paléotempérature et teneur en CO_2 est particulièrement frappante; elle constitue une bonne indication pour proposer une relation causale entre ces deux paramètres.

Cette relation est également présente dans les données à plus long terme des teneurs atmosphériques du CO_2 obtenues à partir d'un modèle numérique publié par Bob Berner de l'Université de Yale (BERNER, 1994). L'évolution du CO_2 atmosphérique reconstitué par Berner se trouve parfaitement ajustée aux données climatiques de cet intervalle de temps, montrant une bonne corrélation entre les périodes glaciaires et les périodes de faible teneur en CO_2. Il y a aussi corrélation entre les périodes chaudes comme celles du Dévonien, du Trias et du Jurassique, marquées par des teneurs élevées en CO_2 (fig. 6).

Ici, on constate que l'approche historique et la reconstitution quantitative des changements globaux du passé peut apporter des données utiles à une meilleure conduite du débat politique.

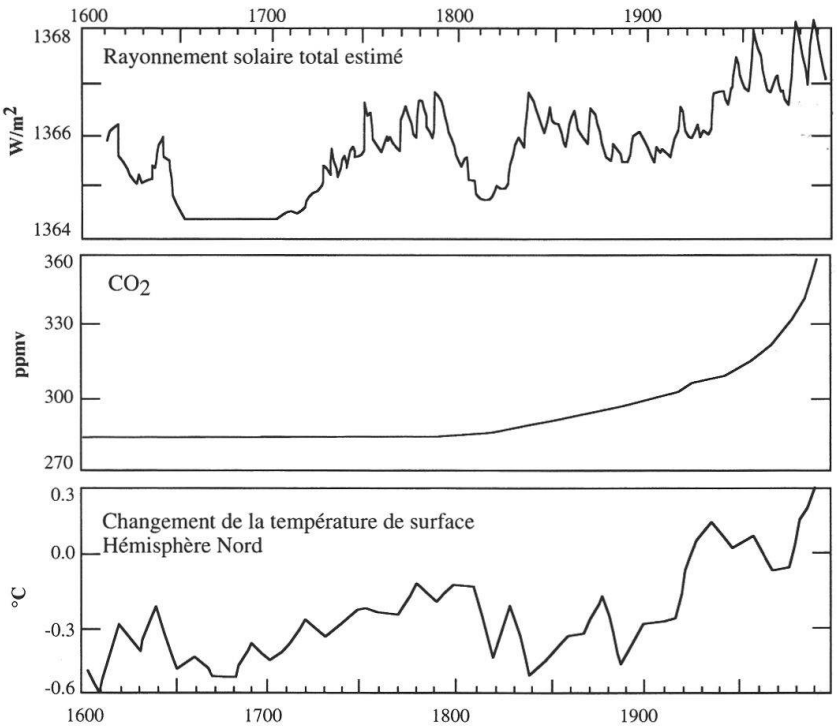

Figure 4: Activité solaire durant les derniers quatre cents ans, teneurs en CO_2 atmosphérique et température moyenne de l'hémisphère nord.

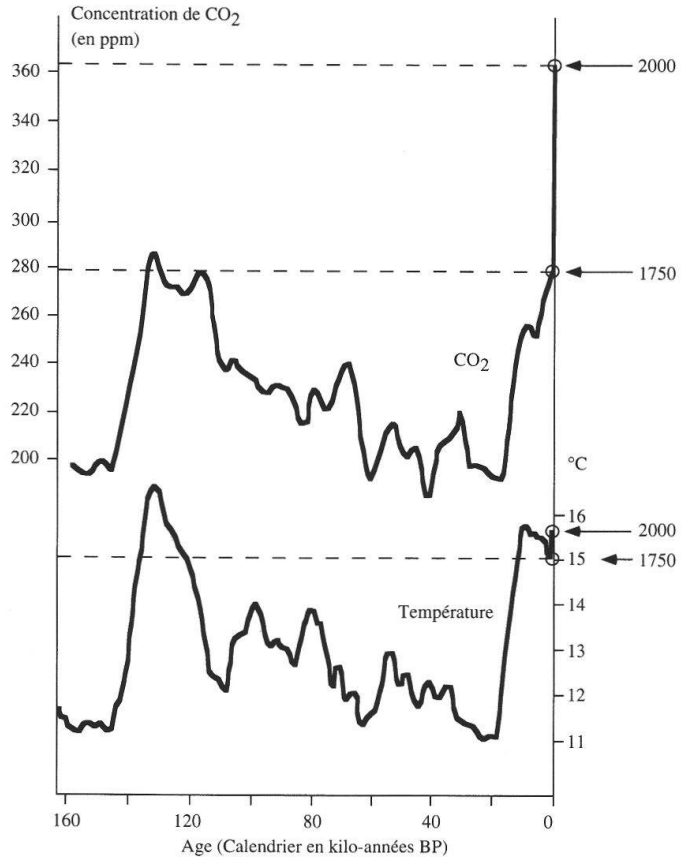

Figure 5: Corrélation entre les teneurs de l'atmosphère en CO_2 et évolution des températures durant les derniers 130'000 ans (d'après BERNER & BERNER, 1996)

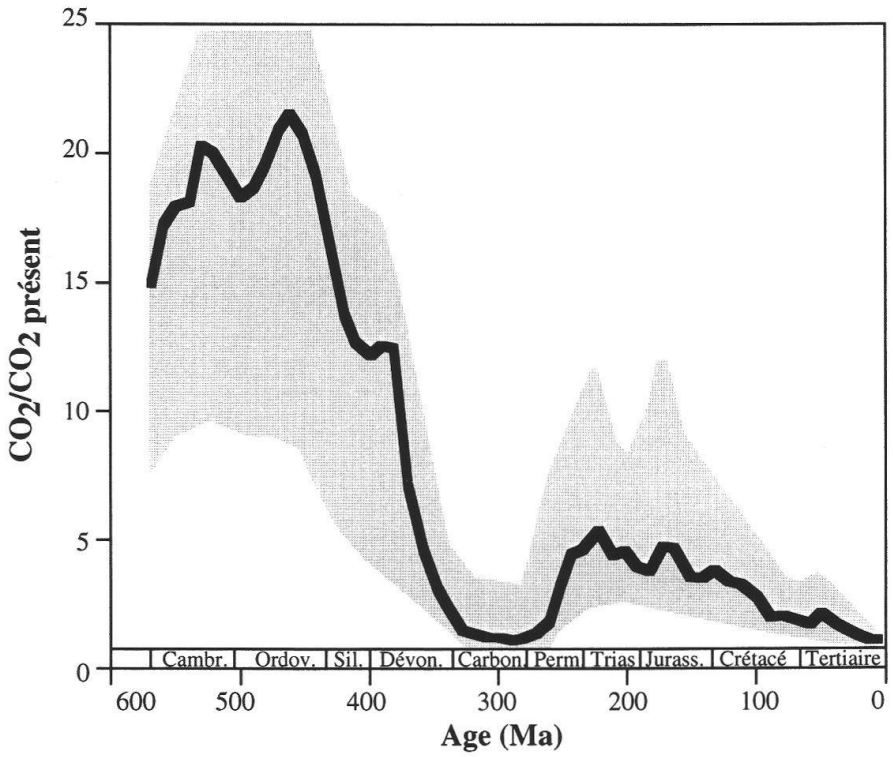

Figure 6: Changements modélisés de teneur en CO_2 atmosphérique jusqu'à aujourd'hui. Les marges d'erreur sont indiquées par l'enveloppe (d'après BERNER, 1994)

5. AUTORÉGULATION ?

Les exemples précédents montrent clairement que la variabilité des paramètres et processus naturels est nettement supérieure à celle que nous connaissons aujourd'hui. Cette constatation a conduit un groupe de scientifiques, et avec eux de politiciens, à souligner que les changements actuels sont très faibles en comparaison de ceux du passé; le changement d'un mètre du niveau marin que l'on peut craindre au cours du prochain siècle est en effet insignifiant par rapport aux 120 mètres qui se sont produits dans le passé entre 18'000 et 10'000 ans. Le changement de teneur en CO_2 de l'atmosphère provoqué actuellement par l'Humanité n'est-il pas comparable aux changements naturels des derniers 130'000 ans et n'est-il pas d'une amplitude bien plus faible que ceux qui ont existé dans l'atmosphère il y a 500 millions d'années, durant les temps paléozoïques ?

Là, je suis convaincu qu'on ne pourrait pas négliger les changements actuels, parce que les actions et rétroactions de la biosphère restent largement inconnues et surprenantes, comme nous le montre l'exemple suivant.

L'annonce qu'une compensation naturelle de l'augmentation du CO_2 atmosphérique va se faire par les récifs coralliens constitue un exemple de cette approche philosophique. Un groupe de spécialistes des carbonates estime, en effet, que l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère sera compensée par une accélération de la croissance et de la progradation des récifs de coraux dans lesquels le CO_2 atmosphérique est transféré et donc extrait

de l'atmosphère. Ici aussi, une approche historico-géologique peut aider à tester cette idée. Notre groupe, en collaboration avec l'Institut de géologie de Zürich, s'attache à reconstituer l'histoire de la plateforme carbonatée du Crétacé inférieur qui a évolué entre 170 et 110 millions d'années et qui se trouve actuellement affleurante dans les environs de Neuchâtel, ainsi que dans les Alpes septentrionales. Nous sommes particulièrement intéressés à reconstruire les conditions environnementales qui ont conduit à des changements dans les communautés d'organismes producteurs de carbonates, de situer dans le temps et de comprendre les phases de détériorations épisodiques de la plateforme (FÖLLMI *et al.*, 1994).

Dans la vie de la plateforme, il est essentiellement possible de discerner trois situations de développement: celle de production de carbonates par l'action d'organismes associés au récif, celle de production de carbonates sans action d'organismes associés au récif et celle qui s'accompagne d'une très forte diminution de la production carbonatée, d'érosion et de destruction de la plateforme et de production de couches très minces riches en phosphate.

A l'aide de critères paléoécologiques et de l'analyse des isotopes stables du carbone, il est possible de montrer que les étapes de la détérioration et de la destruction de la plateforme sont causées par des périodes de réchauffement, en relation avec une activité volcanique intense cause de l'augmentation des rejets de CO_2, accélération du cycle de l'eau, intensification de la vitesse d'altération biochimique, augmentation des apports nutritifs et augmentation de la productivité. Ces changements étaient défavorables au développement des biocénoses productrices des carbonates oligo- et mésotrophiques, comme ceux qui participent à la construction des plateformes évoquées ici.

Ces exemples suggèrent qu'un réchauffement global est souvent accompagné par une accélération de l'altération biologique et de la mobilisation d'éléments nutritifs, ce qui est défavorable à la croissance des récifs calcaires. De nos jours de même, l'augmentation anthropogénique de la teneur en CO_2 de l'atmosphère s'accompagne d'une augmentation substantielle du flux des éléments nutritifs. Le flux global de phosphore, par exemple, est doublé et l'effet combiné de réchauffement et d'eutrophisation s'observe déjà dans la détérioration des systèmes récifaux actuels.

Notre approche historique nous aide donc à prédire le comportement des changements écologiques, particulièrement dans les écosystèmes sensibles aux changements environnementaux.

6. L'IMPORTANCE DE LA RÉTROACTION

Par la reconstitution des changements de l'environnement du passé, il devient évident que les processus n'agissent jamais seuls; un réseau en filigrane d'actions interdépendantes agit pour accélérer ou pour freiner les changements. Ce type de couplage peut être présenté de façon satisfaisante par les mécanismes de rétroaction; ceux-ci peuvent être positifs, accélérant les changements ou négatifs, freinant les changements et très souvent même, conduisant à une stabilisation.

Les rétroactions agissent à différentes échelles spatiales et temporelles. Deux exemples différents, qui agissent en fonction de deux échelles de temps totalement différentes, vont en donner une illustration.

Grâce aux carottes forées récemment dans les glaces du Groenland par des consortiums européens et américains, on dispose actuellement de reconstitutions climatiques avec un degré de résolution

annuelle à sub-annuelle. Dans ce matériel, nous allons focaliser notre attention sur l'évolution climatique allant de la dernière période glaciaire jusqu'à la période interglaciaire actuelle.

L'accumulation de neige dépend fortement de la température; avec une température élevée, l'évaporation est forte, elle entraîne donc de plus fortes précipitations. On constate que durant deux très courtes périodes - pas plus de cinq ans - pendant la phase de transition entre les époques glaciaires et l'Holocène, il s'est produit un saut de température de près de 7°C. Durant cette même période de réchauffement rapide, les foraminifères benthiques et planctoniques des sédiments de Santa Barbara en Californie présentent tous deux un rapport isotopique du carbone qui ne peut s'expliquer que par une augmentation de méthane dissous dans la colonne d'eau (KENNETT *et al.*, 2000).

On sait que d'importantes quantités de méthane s'accumulent sous forme solide, appelées clathrates. Ces produits se logent au-dessous du fond marin dans les régions du plateau continental externe, sur le talus continental de même que sous le permafrost continental. Lors de réchauffements, on pense que d'importantes quantités de méthane sont libérées et entrent sous forme de gaz dans l'atmosphère. Le méthane est connu pour être un gaz à effet de serre particulièrement efficace; son action pourrait alors contribuer à l'accélération du réchauffement déjà amorcé (p. ex. SUESS *et al.* 1999).

La forte augmentation de température enregistrée alors en quelques années seulement, nous conduit à admettre que la rétroaction positive, liée à la libération du méthane dans l'atmosphère, agit extrêmement rapidement et est particulièrement puissant. Pour cette raison, ce phénomène devrait être inclus dans nos modèles numériques en tant que mécanisme potentiel.

Certaines rétroactions sont beaucoup plus difficiles à saisir dans l'espace d'une vie; l'interaction entre l'altération et la photosynthèse représente l'un de ces cas. Ici aussi, l'approche historico-géologique est particulièrement édifiante.

La libération du phosphore dans la biosphère nous en donne un bon exemple. Les phosphates sont des éléments nutritifs essentiels avec des propriétés souvent biolimitantes dans le domaine continental, de même qu'en zone marine peu profonde. Dans les écosystèmes planctoniques marins, une molécule de phosphate est suffisante pour permettre la transformation de 106 molécules de carbone d'un état inorganique à un état organique. En domaine continental, cette relation est encore supérieure, puisqu'une seule molécule de phosphate peut permettre jusqu'à la transformation de 500 à 800 molécules de carbone.

Pour ces raisons, les cycles du phosphore et du carbone sont étroitement liés et l'étude des changements de flux des phosphates à l'échelle globale devrait nous permettre une meilleure compréhension de ces relations.

Le cycle du phosphate est relativement simple par le fait qu'il n'y a pas de phase phosphatée dans l'atmosphère et que les actions tectoniques comme le volcanisme entraînent peu d'apports de phosphate. Cela signifie que la plupart des phosphates présents dans l'océan proviennent du continent; ils sont liés aux actions d'altération biochimiques continentales qui en constituent la source principale.

Dès le moment où, dans le domaine continental, les phosphates sont mobi-

lisés, ils sont transportés vers la mer par le vent et surtout les eaux. Là, la plupart seront directement sédimentés et ne participeront pas à la productivité par les actions de photosynthèse. Seule une faible proportion, voisine de 25%, sera utilisée par la biosphère. Après une phase de réoxydation et d'entraînement du phosphate vers le fond des océans, une partie en sera transportée vers le plateau continental à la faveur des courants d'origine profonde; elle entre alors dans un cycle qui est caractérisé par des transformations entre la photosynthèse et la réoxydation (fig. 7). Dans une situation de stabilité, ce cycle est équilibré par la valeur des apports continentaux et celle de la sédimentation. Cela signifie que si nous étions capables de reconstituer le taux de la sédimentation des phosphates par unité de temps dans le passé géologique, il nous serait possible de déterminer le taux des apports de phosphates dans l'océan, et par là, le taux de la photosynthèse et de l'altération biochimique sur les continents.

Durant ces dernières années, j'ai travaillé à une telle compilation (FÖLLMI, 1995). En utilisant plus de 5600 mesures, j'ai établi une courbe représentant l'enfouissement moyen des phosphates en fonction du temps (fig. 8). La courbe présentée ici est comparée avec celle des variations du niveau marin qui peut être prise comme une approximation des variations globales du climat. La comparaison entre les deux courbes montrent qu'entre 160 et 30 millions d'années, alors que la terre était presque libre de glace, il existe une corrélation positive entre l'enfouissement des phosphates et le niveau marin; cela montre que lors des réchauffements, il y a accentuation du taux de l'altération continentale; plus de phosphates sont alors mobilisés et le taux de la photosynthèse augmente, conduisant à une baisse de la concentration du CO_2 atmosphérique. Ainsi, sous l'effet de la photosynthèse et de l'altération, la planète tend à se refroidir; on est en présence d'une rétroaction négative (fig. 9).

Au cours des derniers 30 millions d'années, des calottes glaciaires et des glaciers de montagne furent présents. Durant cette période, nous constatons un couplage inverse entre le niveau marin et l'enfouissement des phosphates. Cela devrait signifier que lorsqu'il fait plus froid, le taux de l'altération augmente; le taux de la photosynthèse augmente par l'action positive d'un feed-back: l'accentuation de la baisse de la teneur en CO_2 de l'atmosphère conduit à une augmentation du froid (fig. 9).

A première vue, ce résultat va contre notre intuition; il prend cependant toute sa signification lorsqu'on est attentif au fait que les glaciers sont de puissants agents d'érosion, qui emportent à partir des roches sur lesquelles ils s'appuient de la farine de roche, un matériel minéral où, du fait de la grande surface réactive, l'altération biochimique est très efficace.

Cette reconstitution suggère qu'à l'échelle globale, les mécanismes de rétroaction agissant à long terme ne sont pas nécessairement persistants à l'échelle des temps géologiques; ainsi, lorsque l'évolution climatique entraîne des modifications importantes, ils peuvent être même renversés.

A Neuchâtel, dans le but d'analyser ce mécanisme, nous avons commencé une recherche dans laquelle nous explorons, durant le dernier cycle interglaciaire-glaciaire, les changements de la mobilisation des éléments nutritifs et de la productivité, que nous comparons à l'évolution du flux de l'altération continentale.

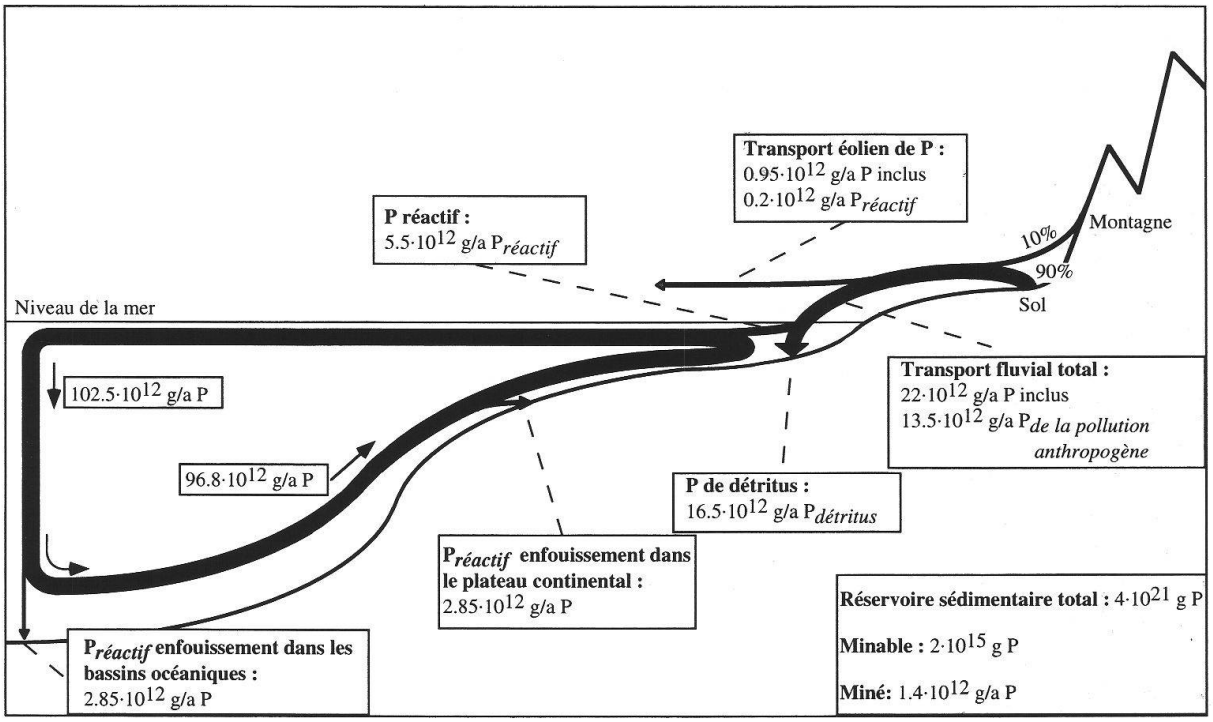

Figure 7: Diagramme schématique du cycle du phosphore (FÖLLMI, 1996).

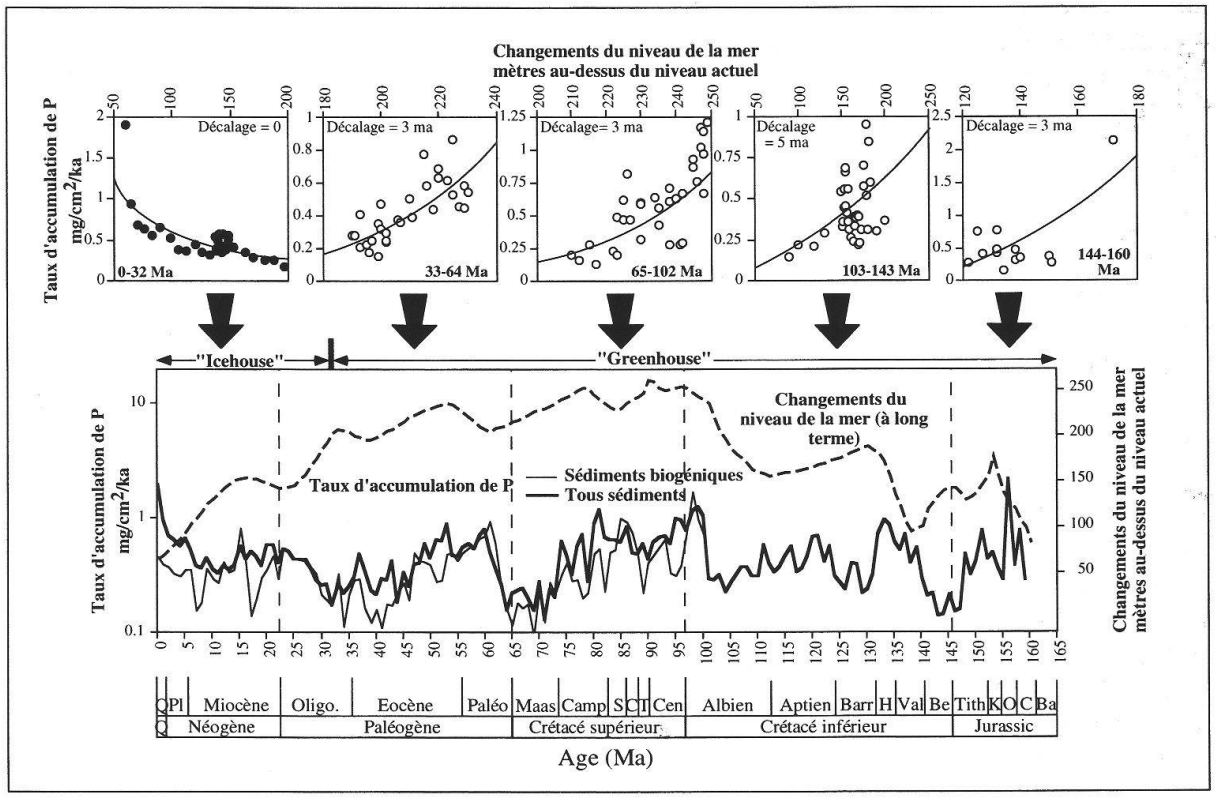

Figure 8: Courbe de l'enfouissement du P comparée à celle des variations du niveau marin (FÖLLMI, 1995).

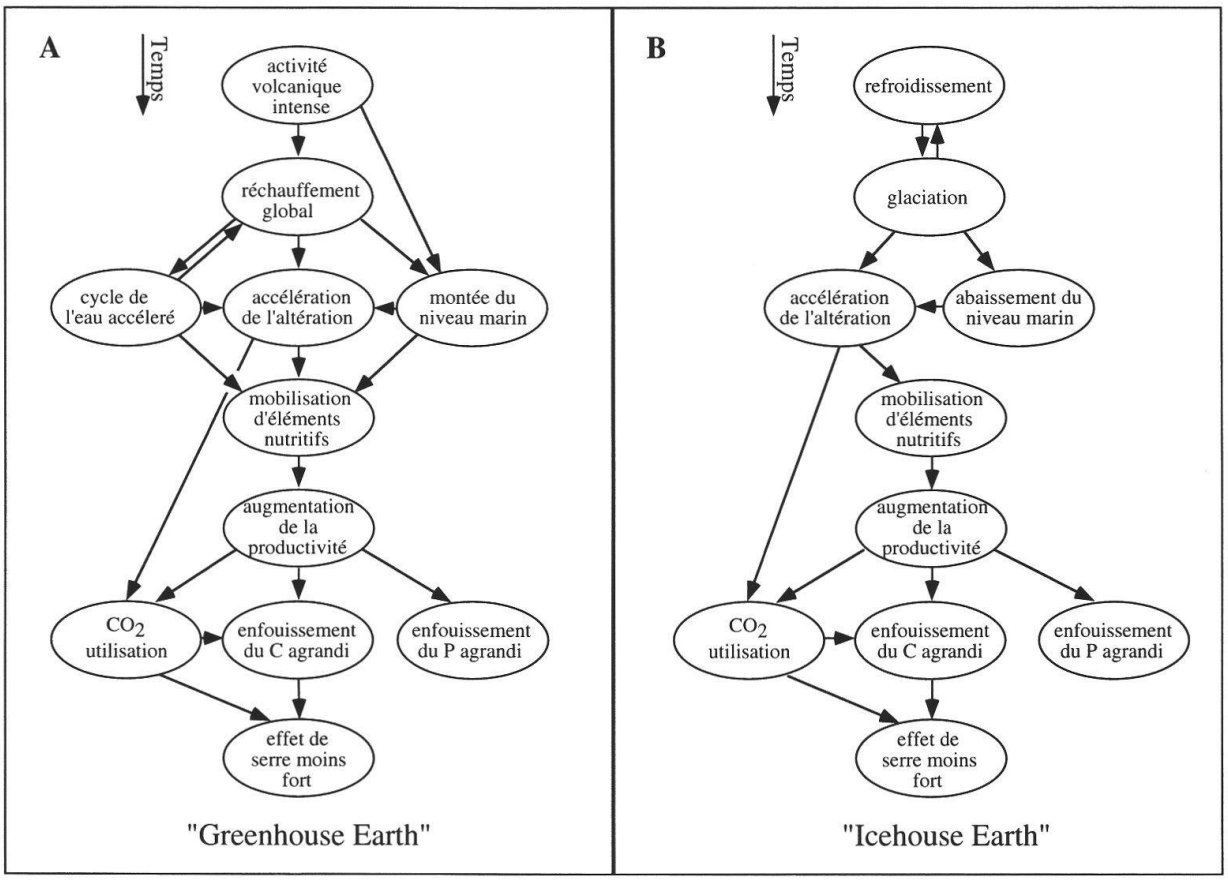

Figure 9: Rétroactions proposées pour la Terre sans calottes glaciaires ("greenhouse earth") et avec calottes glaciaires ("icehouse earth") (FÖLLMI, 1996).

7. NOTRE COMPRÉHENSION DU PASSÉ EST-ELLE UNE CLEF POUR PRÉDIRE LES DÉVELOPPEMENTS FUTURS ?

Le développement climatique, comme le développement du temps, est caractérisé par des mécanismes de rétroaction qui en déterminent le caractère non-linéaire, comme démontré ici. On connaît plusieurs niveaux de stabilité climatique et les transferts d'un état à l'autre peuvent être très rapides, ce qui en fait un phénomène très peu prévisible. Pour cette raison, je suis conduit à estimer que la valeur prévisible de nos scénarios et modèles est relativement basse et tout au plus plutôt qualitative que quantitative. Mais ici aussi existent des exceptions; l'une de celle-ci, dont notre expérience nous offre un bon pressentiment, se trouve illustrée par ce qui suit.

Nos reconstitutions géohistoriques montrent que les époques globalement chaudes se caractérisent par de faibles gradients de températures en fonctions des latitudes (fig. 10). Durant le Crétacé, cette donnée se trouve confirmée par les reconstitutions climatiques basées sur les analyses isotopiques de l'oxygène, par la distribution des organismes sensibles à la température ainsi que par la localisation des plantes à feuilles persistantes. Une comparaison entre les courbes de température du Crétacé et d'aujourd'hui suggère que lors des situations de réchauffements globaux, ils sont particulièrement marqués dans les hautes lati-

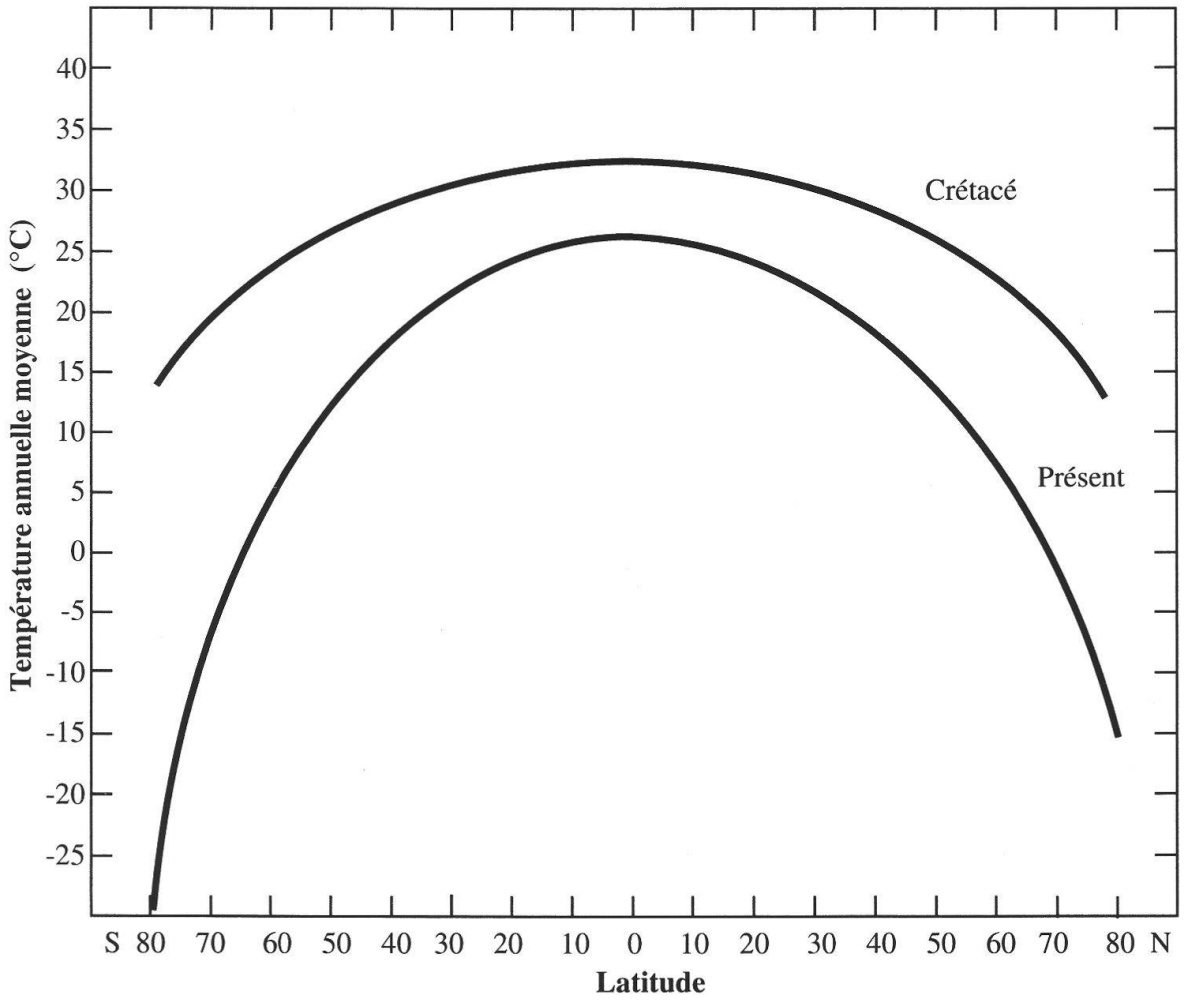

Figure 10: Distribution des températures en fonction des latitudes durant le Crétacé moyen et le présent (d'après BARRON, 1982).

tudes. Contrairement à de nombreuses visions du monde politique, cette évolution ne conduira pas seulement à des effets bénéfiques. Une bonne illustration en est fournie par l'Alaska, où une élévation de température d'environ 2°C depuis 1960 conduit à une chaîne de changements environnementaux tels que la fusion de glaciers, la formation de nouveaux lacs, la disparition du permafrost avec pour conséquences le développement des marais et le dépérissement des forêts de bouleaux, etc ...

8. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MÉTHODES DE LA GÉOLOGIE

La combinaison de l'approche historique dont j'ai essayé de donner quelques exemples, associée à l'apport des méthodes quantitatives transforme la géologie moderne en un puissant outil permettant l'analyse des changements globaux du passé et contribuant à une meilleure compréhension des changements actuels. Il paraît donc souhaitable de poursuivre nos méthodes d'analyses plus en profondeur. Il

paraît aussi nécessaire de les examiner d'un point de vue philosophique, afin d'avoir une meilleure appréciation de leur force et de leurs défauts, ce qui est probablement encore plus important. Mon appréciation est ici basée sur un article de Robert Frodemann publié en 1995 (fig.11).

En examinant les arguments souvent utilisés dans la philosophie des sciences exactes, on est parfois conduit à déclarer: "la géologie n'est pas une science indépendante, par le fait qu'elle manque d'une méthodologie qui lui est propre". D'autres arguments sont plus sérieux; ils soulignent que nos banques de données sont incomplètes, que nos résultats manquent de contrôles expérimentaux, que dans de nombreux cas, nous n'avons pas la possibilité d'observer directement et que nous ne pouvons pas produire des assertions prédictives et déductives.

Même s'il ne m'est pas possible de souscrire à certaines de ces affirmations, j'aimerais dire que nous - en tant que scientifiques de la géologie - devons réaliser que nos observations et déductions contiennent des imperfections qui doivent nous conduire à être très prudents dans nos interprétations.

D'un autre côté, nous savons que la géologie est une science "synthétique". Elle présente une certaine combinaison entre les sciences exactes et les sciences humaines. Elle utilise des méthodes exactes enracinées dans la chimie, la physique et les mathématiques. Cette situation peut être illustrée par notre usage des iso-

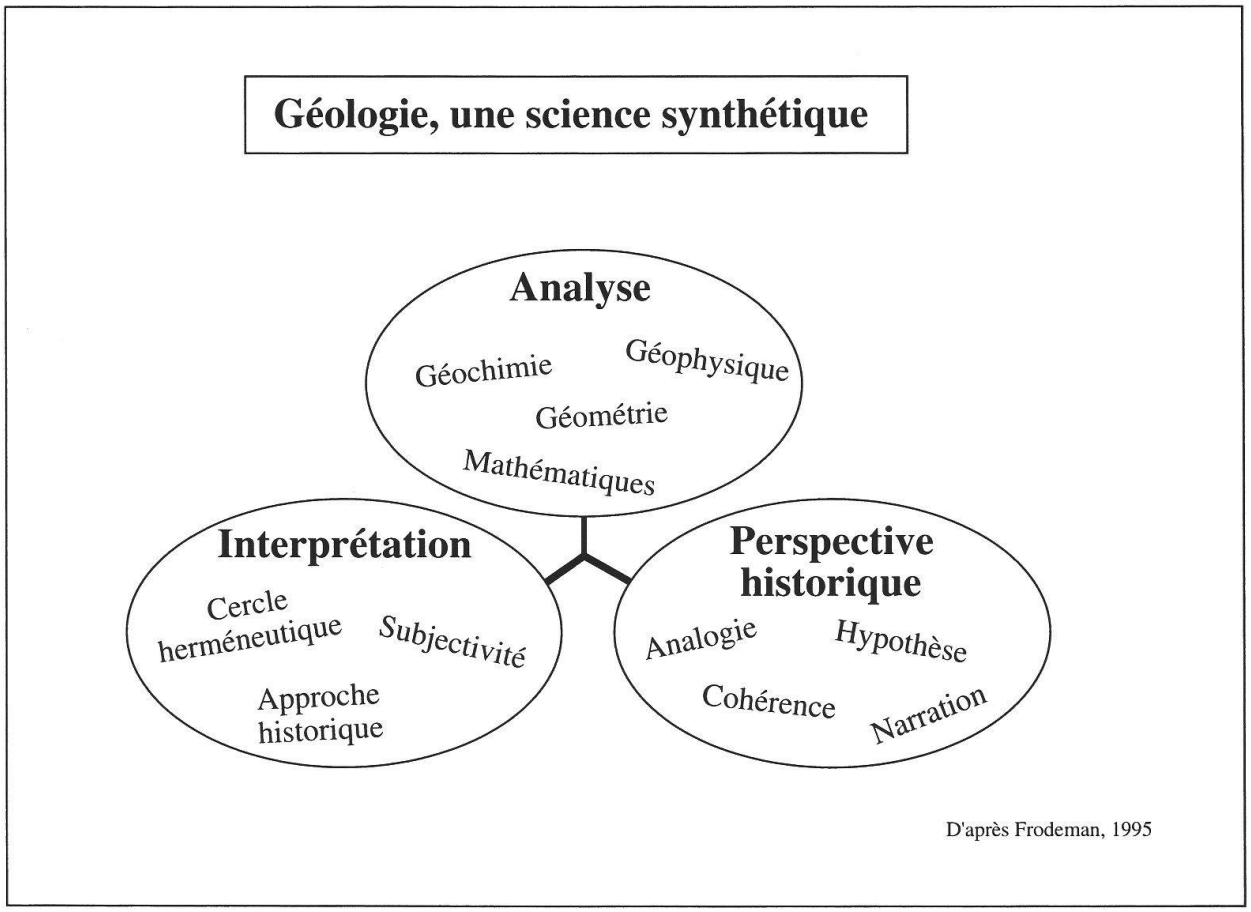

Figure 11: Géologie, une science synthétique (d'après FRODEMAN, 1995).

topes stables en tant que système chimique d'interprétation, par notre connaissance des forces physiques qui nous permettent d'expliquer les motifs de la stratification et par notre utilisation de modèles mathématiques, etc ...

En construisant nos modèles, nous savons que nous utilisons également une approche interprétative et historique et par cet aspect, il s'agit de valeurs qui trouvent leurs racines dans les sciences humaines. Ainsi, dans la globalité de notre interprétation, nous utilisons une approche que l'on peut qualifier d'herméneutique.

L'herméneutique est la science de l'interprétation des textes; originellement - durant le siècle passé - elle se limitait à l'interprétation biblique afin de savoir quelle partie de la Bible devait être interprétée littéralement et quelle partie devait être prise dans un sens métaphorique. Dans notre siècle, le champ s'est ouvert avec, par exemple, Martin Heidegger qui dit "Tout aperçu humain est fondamentalement interprétatif" ou "l'ensemble du monde est un texte qui peut être interprété".

De nos jours, le philosophe herméneutique affirmerait "le mélange entre observation et concept est fondamental dans la compréhension humaine". En géologie, par exemple, nous utilisons un cercle herméneutique pour nos raisonnements; dans ce type de raisonnement cyclique, nous partons souvent des détails pour comprendre les plus grands ensembles et lorsque ceux-ci sont identifiés, nous retournons aux détails pour les interpréter à leur tour. Ainsi, dans l'exemple d'une turbidite (= sédiment déposé par un écoulement gravitaire): nous observons d'abord un ensemble de strates; nous constatons à la base d'une de celles-ci un contact tranché ... cela pourrait être une turbidite; en conséquence, un granoclassement devrait être présent. Celui-ci est effectivement présent; il doit donc s'agir d'une turbidite. Donc si c'est bien cela, on devrait y constater la présence de composants remaniés et transportés, etc ...

Nous devrions donc être conscients que la structure même de notre compréhension est toujours subjective et jamais neutre. Elle se fait par exemple en fonction du type d'instruments qui sont disponibles dans nos laboratoires, des concepts que nous utilisons, des maîtres qui nous ont formés, des idées qui fleurissent au moment de notre recherche.

Dans ma présentation j'ai aussi montré que notre science utilise une importante composante historique. Nous nous demandons souvent: "quelle est la raison de cet événement et quelles en sont les conséquences ?". Les géologues sont souvent des archivistes et chronologistes. De ce fait, beaucoup de nos hypothèses sont historiques et par ce fait ne peuvent être testées. Dans ce cas, quelles sont les méthodes qui doivent être utilisées ? Nous utilisons souvent les analogies. Par exemple, nous utilisons les mécanismes actuels pour expliquer les observations géohistoriques. "Le présent est la clef du passé" comme Charles Lyell nous l'a dit au siècle passé. Nous utilisons des hypothèses qui ont été dérivées de façon dialectique: thèse, antithèse, synthèse.

Dans notre approche historique, nous utilisons également le principe de cohérence et de narration. Les résultats d'une recherche doivent être cohérents avec des résultats antérieurs ou indépendants. Par exemple, dans le cas où sur la foi des analyses, nous affirmons qu'une certaine période de l'histoire de la terre devait être chaude, ce résultat doit être cohérent avec les données obtenues par les analyses paléoécologiques. La narration implique la nécessité de pouvoir placer notre scénario

dans le continu de l'histoire géologique, ainsi que dans un contexte plus général. Par exemple, la découverte d'un enrichissement en iridium dans certains niveaux proches de la limite Crétacé-Tertiaire peut être liée à l'impact d'un corps extraterrestre et cette interprétation devrait être reliée à l'extinction de la faune et de la flore caractéristiques de cette époque, etc ...

Ce spectre de méthodes exactes, interprétatives, historiques, conduit à donner aux Sciences de la Terre leur caractère de sciences synthétiques. Pour moi, et ceci est très important, notre science est ouverte à l'intuition, elle-même souvent enracinée dans l'expérience. Tout ceci doit conduire à une certaine robustesse scientifique - qui n'est pas égale à la certitude - mais qui est une des clés essentielles pour une profonde connaissance environnementale.

REMERCIEMENTS

Je remercie cordialement le Prof. J.-P. Schaer et Mme Sabine Erb pour leur aide dans la traduction et la correction du texte français de ma leçon inaugurale.

BIBLIOGRAPHIE

BARRON, E. 1982. A warm, equable Cretaceous: the nature of the problem. *Earth-Science Reviews*, v. 19, p. 305-338.

BERNER, R. A 1994. 3 Geocarb II: A revised model of atmospheric CO_2 over Phanerozoic time. *American Journal of Science* 294: 56-91.

BERNER, E. K. & BERNER R. A. 1996. Global environment: Water, air, and geochemical cycles. *Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.*

BERNER, R. A. & LASAGA, A. C. 1989. Modeling the geochemical carbon cycle. *Scientific American*, 260: 74-81.

COLE, J. E., DUNBAR, R. B., McCLANAHAN, T. R. & MUTHIGA, N. A. 2000. Tropical Pacific forcing of decadal SST variability in the western Indian Ocean over the past two centuries. *Science*, 287: 617-619.

FÖLLMI, K. B. 1995. 160 m.y. record of marine sedimentary phosphorus burial: Coupling of climate and continental weathering under greenhouse and icehouse conditions. *Geology*, 23: 859-862.

FÖLLMI, K. B. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis, and marine phosphate-rich deposits. *Earth-Science Reviews*, 40 : 55-124.

FÖLLMI, K. B., WEISSERT, H., BISPING, M. & FUNK, H. 1994. Phosphogenesis, carbon-isotope stratigraphy, and carbonate-platform evolution along the Lower Cretaceous northern tethyan margin. *Geological Society of America, Bulletin*, 106: 729-746.

FRODEMAN, R. 1995. Geological reasoning: Geology as an interpretative and historical science. *Geological Society of America Bulletin*, 107: 960-968.

KENNETT, J. P., CANNARIATO, K. G., HENDY, I. L. & BEHL, R. J. 2000. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials. *Science* 288: 128-133.

KUMP, L.R., KASTING, J.F. & CRANE, R.G. 1999. The Earth System. *Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.*

MERRITTS, D., DE WET, A. & MENKING, K. 1997. Environmental geology: An Earth system science approach. *Freeman & Co. New York.*

SCHLESINGER, W. H. 1997. Biogeochemistry (2ème édition). *Academic Press. San Diego.*

STANLEY, S.M. 1999. Earth system history. *Freeman & Co. New York.*

SUESS, E., BOHRMANN, G., GREINERT, J. & LAUSCH, E. 1999. Flammable ice. *Scientific American*, 281: 52-59.