

**OSCILLATION CLIMATIQUES ET EVOLUTION DU  
MILIEU AMBIANT DEPUIS QUATRE MILLIARDS  
D'ANNEES**

Y. Tardy

Institut de Géologie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France

PALESTRA

## INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO CURSO DE GEOQUÍMICA GLOBAL

*A história geoquímica do ambiente planetário ressoa ao ritmo das oscilações climáticas que, em todas as escalas do espaço e do tempo, afetaram a atmosfera, a hidrosfera, a biosfera e a parte superficial da litosfera. Devemos considerar que, no decorrer de aproximadamente quatro bilhões de anos, a quantidade total de carbono, enxofre, nitrogênio, hidrogênio, cloro e oxigênio, bem como a quantidade de sódio, potássio, cálcio, magnésio e silício permaneceram constantes no seio do conjunto de reservatórios próximos da superfície da Terra.*

*O que mudou, de uma maneira cíclica ou policíclica, são os fluxos de transferência entre reservatórios e também o tamanho dos diferentes compartimentos. No decorrer do tempo, a massa de cada um dos elementos ficou constante, mas distribuiu-se de modo desigual entre os diversos reservatórios geoquímicos, que são verdadeiros arquivos paleoclimáticos:*

*C: Carbono orgânico ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) - Carbono inorgânico ( $\text{Ca}$ ,  $\text{MgCO}_3$ )*

*S: Sulfatos ( $\text{CaSO}_4$ ) - Sulfetos ( $\text{FeS}_2$ )*

*Si: Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) - Silicatos ( $\text{Ca}$ ,  $\text{MgSiO}_3$ )*

*Fe: Óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) - Sulfetos ( $\text{FeS}_2$ ) - Carbonatos ( $\text{FeCO}_3$ )*

*Todos os reservatórios geoquímicos são ligados entre si e cada flutuação de massa dentro de um reservatório acarreta, necessariamente, flutuações dentro de todos os outros reservatórios adjacentes.*

*Assim, por causa do acerto necessário no fechamento do balanço geoquímico global, as fácies sedimentares características não são marcadores independentes do clima. Não são diretamente as quantidades de depósitos de carvão, calcários, radiolaritos, evaporitos, mas, ao invés disso, são as distribuições em função das latitudes que caracterizam os climas regionais ou o clima global de um dado período geológico.*

*A distribuição dos elementos entre os diferentes reservatórios sedimentares depende das oscilações climáticas, caracterizadas pela temperatura, evaporação (E), pluviosidade (P) e drenagem ( $D = P - E$ ). O escoamento continental (D) representa o vetor da erosão química e mecânica e condiciona a sedimentação química e detrítica. As flutuações de temperatura no sentido do frio ou do aquecimento ou da umidade, no sentido crescente e decrescente, condicionam a distribuição dos elementos no seio dos reservatórios sedimentares, assim como a proporção dos depósitos químicos/detríticos e oxidados/reduzidos.*

*Essa distribuição depende, também, da intensidade do metamorfismo, ou seja, da transformação das rochas carbonatadas antigas em rochas silicatadas recentes. Ela depende, também, da erosão química e do depósito das séries de rochas carbonatadas recentes. Os fluxos oscilantes do  $\text{CO}_2$  da litosfera na direção da atmosfera, e da atmosfera em direção da biosfera e da litosfera renovada dependem da atividade tectônica que controla o efeito estufa, da temperatura e, portanto, do clima. A atividade tectônica pode ser medida pelo nível do mar, a intensidade do vulcanismo e a velocidade de deposição das rochas carbonatadas.*

*Assim, as oscilações climáticas e a redistribuição dos elementos dentro dos compartimentos do ecossistema global são controladas por parâmetros orbitais: obliquidade, excentricidade, precessão dos equinócios, órbita da lua, atividade solar, etc., mas também por pulsações da atividade tectônica. Na escala do tempo geológico, a tectônica de placas controla a paleogeografia e a distribuição dos climas zonais e, também, o efeito estufa e, conseqüentemente, o clima global.*

*Finalmente, propõe-se: (1) mostrar como a geoquímica dos paleoambientes pode iluminar as pesquisas sobre a evolução do ambiente atual, (2) propor uma estratégia científica baseada na medida dos fluxos de transferência dos elementos sensíveis registrados graças às oscilações atuais do clima, e (3) reconstruir os ciclos geoquímicos que animaram a terra durante 4 bilhões de anos.*

### INTRODUCTION L'HISTOIRE DU MONDE COMMENCE AVANT LE BIG BANG

Au radio-télescope,

Penzias et Wilson ont capté un rayonnement froid ( $2,7^\circ\text{K}$ ) d'ondes millimétriques dans l'espace intersidéral. Ce rayonnement est considéré comme l'écho d'une formidable explosion de matière,

appelée Big Bang, survenue voici 15 milliards d'années. Cette découverte vint, à point nommé, confirmer une théorie de l'origine de l'Univers, déjà formulée au début du siècle par Gamow. Extrêmement con-

densé, au commencement, puis en dispersion dès cet instant primordial, l'Univers est encore aujourd'hui, en expansion (Reeves, 1981, 1990).

### LE BIG BANG N'EST QU'UNE THÉORIE

Le Big Bang n'est qu'une théorie supportée par une série de faits d'observation. Mais, comme toutes les théories scientifiques, toutes destinées à être remise en question ou même à mourir, celle du Big Bang est aujourd'hui critiquée. Il faudra peut-être même, un jour, l'abandonner. Cependant, si certaines interprétations des faits devaient être laissées de côté, ce serait une grave erreur que de la vouloir rejetée tout en bloc. Des idées fortes en ont surgi, qui méritent qu'on s'y attache avec plus grande attention.

### L'ORIGINE EST REPOUSSÉ. L'UNIVERS OSCILLE

Il nous faut, sans doute, nous résigner à abandonner le concept d'un instant primordial et l'idée trop simple d'une expansion généralisée.

L'instant initial, l'instant de l'origine du Monde, s'il n'a jamais existé, devrait être repoussé plus avant dans le temps. D'autres théories, peut-être plus anciennes que celle du Big Bang, disent en effet qu'avant la phase de dilatation que nous vivons depuis 15 milliards d'années, venait une phase de contraction qui précédait la première. Il n'est pas interdit d'imaginer que depuis toujours, l'Univers oscille, se contracte ou se dilate. Selon une théorie formulée avant celle du Big Bang, la périodicité de ces mouvements

serait de 80 milliards d'années: pendant 40 milliards d'années, à la suite d'un big bang, l'Univers se dilate; pendant les 40 milliards d'années suivantes, il se contracte et se condense. La dilatation qui suit prend naissance après un nouveau big bang et se poursuit pendant 40 milliards d'années; etc.

### DILATATION ET CONTRACTIONS

S'il nous fallait considérer le Monde comme aujourd'hui en expansion mais autrefois en contraction, il faudrait aussi le regarder comme ici en dilatation mais là en condensation. L'expansion de l'Univers est relative car, dans un contexte général en dilatation, se forment des planètes, des étoiles, des galaxies et des amas de matière en condensation. Deux ans seulement après la découverte de Penzias et Wilson, deux autres astrophysiciens: Bell et Hewish découvrent l'existence de pulsars, étoiles constituées de neutrons, extrêmement denses et très chaudes. A côté, dans l'espace intersidéral, très dilaté et très froid, le vide est très poussé; n'y flotte que quelques molécules.

Le Monde est fait de grumeaux qui se forment ou se détruisent à toutes échelles de temps et d'espace. Le Monde oscille, se dilate et se contracte, se fait ici et se défait là! Tout se passe finalement comme si ce qui se faisait ici était compensé par ce qui se produisait là et comme si tout ce qui se faisait aujourd'hui compensait ce qui se produisait hier. Tout se passe enfin comme si tout ce qui se fait maintenant devrait être compensé par ce qui se produirait plus tard. Le Monde est un système oscillant,

contrasté, toujours et partout en compensation. Tout est question d'échelle d'observation, de temps mais aussi d'espace.

### ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE: OSCILLATIONS ET COMPENSATIONS

Il nous faut enfin garder l'idée qu'au travers des contractions et des dilatations, une part nouvelle de matière est enfantée; une part ancienne est détruite. Des particules: quarks, bosons, électrons, neutrons..., des atomes: hydrogène, carbone, fer..., des molécules simples: eau, gaz carbonique, méthane..., des molécules complexes: acides aminés, protéines..., sont fabriqués ou détruits, se développent ou se réduisent, se diversifient ou se simplifient et tout simplement naissent ou meurent. Avec la théorie du Big Bang, naît l'idée que l'Évolution des espèces vivantes, complexes, est enracinée, loin en amont, dans l'évolution des particules, des atomes et des molécules minérales et organiques. Avec l'émergence de théories qui voient encore plus loin dans l'espace et dans le temps, l'Évolution du Vivant apparaît, peut-être aussi, comme celle de la matière, diversifiée et contrastée mais aussi oscillante, à la fois progressive et régressive. Mais revenons sur Terre!

### LES PREMIERS PAS DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

Le système solaire, le Soleil, la Terre et les autres planètes, apparaissent il y a 4,5 milliards d'années. Autour de la Terre, encore chaude, l'at-

mosphère est constituée de vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), d'acide chlorhydrique (ClH), de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>), d'hydrogène (H<sub>2</sub>), d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et d'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S). L'atmosphère est acide et réductrice. L'oxygène libre est absent. L'atmosphère terrestre n'est pas respirable!

#### PREMIERS CYCLES DE L'EAU. ALTÉRATION, HYDROLYSE ET FORMATION DES PREMIERS SOLS. NEUTRALISATION DE L'ATMOSPHÈRE

La Terre se refroidit; la vapeur d'eau se condense; le premier océan se forme; le cycle de l'eau se met en route: évaporation, transport, condensation, pluie, écoulement de surface vers l'océan et à nouveau, évaporation.

La Terre s'anime; les choses se répètent. Avec le cycle de l'eau se mettent également en route les cycles géochimiques (mais pas encore biogéochimiques) de surface: altération et formation des premiers sols; érosion, transport, dépôts marins et lacustres et formation des premiers sédiments. La Terre s'anime tandis que se mettent en place les cycles géodynamiques. Sous leur aspect physique, les choses semblent se reproduire. Sous leur aspect chimique elles changent.

Avec la condensation de la vapeur d'eau, se forme l'hydrosphère. L'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère interagissent. Des transferts chimiques se produisent. En même temps qu'une véritable redistribution de matière, se différencient les cycles géochimiques des éléments: car-

bone, soufre, phosphore, silice, calcium, magnésium, sodium, potassium, aluminium, fer, etc. Les processus géochimiques dominants sont la dissolution et l'altération.

La dissolution dans l'eau des gaz atmosphériques conduit à la formation d'acide chlorhydrique (HCl), sulfhydrique (H<sub>2</sub>S) et carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

L'altération, résultat de l'interaction entre atmosphère, hydrosphère et lithosphère est avant tout chimique. Progressivement, l'océan et l'atmosphère voient leur composition se modifier. Les acides chlorhydrique, sulfhydrique et carbonique sont neutralisés. L'acide chlorhydrique se transforme en chlorure de sodium (NaCl), accumulé en solution dans l'océan (Cl vient de l'atmosphère; Na vient de la lithosphère):

l'acide sulfhydrique (hydrogène sulfuré) est fixé dans les sols ou les sédiments, sous la forme de sulfure de fer (FeS) (S vient de l'atmosphère et Fe de la lithosphère); le gaz carbonique est lui aussi fixé sous la forme de carbonate de calcium ou de magnésium (CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>) (C vient de l'atmosphère ou de l'océan; Ca et Mg viennent de la lithosphère).

L'altération des silicates de la croûte terrestre fournit de la silice et des cations basiques qui, en solution, gagnent l'océan. Elle fournit aussi des argiles qui demeurent temporairement dans les sols (Tableau 1). Les matériaux argileux, formés dans les sols, sont plus tard érodés, puis transportés dans l'eau des fleuves, vers les océans, pour y former les sédiments.

Le résultat de l'altération est double: neutralisation de l'océan et de l'atmosphère, et

formation d'argiles dans les sols et les sédiments (Tableau 1).

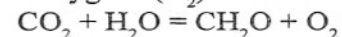
#### LES TÉMOINS DE NAISSANCE DE LA VIE

L'océan et l'atmosphère sont neutres ou peu acides. La température à la surface de la Terre s'est adoucie. L'oxygène est toujours absent de l'air atmosphérique. On ne sait si ces facteurs furent déterminants mais il est intéressant de souligner que c'est à peu près au moment où se forment les premiers sédiments que les premières traces de Vie apparaissent et que naissent les toutes premières bactéries et plus tard, sans doute, les premiers virus. Les argiles, les sulfures de fer, les carbonates de calcium et de magnésium, s'ils ne sont pas les nids de la Vie en sont les premiers témoins de naissance!

#### DÉVELOPPEMENT DE LA VIE ET PREMIÈRE RÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

Il y a 3,5 milliards d'années, les premières bactéries photosynthétiques font leur apparition.

La réaction de photosynthèse d'une molécule de matière organique simple (CH<sub>2</sub>O) consomme du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et libère de l'oxygène (O<sub>2</sub>):

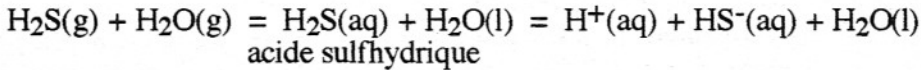
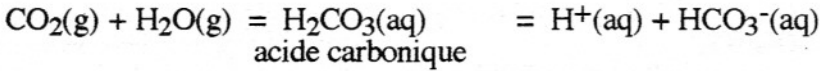
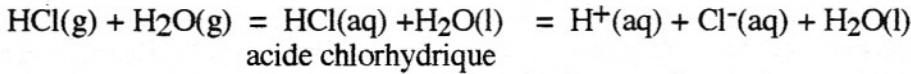


Chaque fois qu'une molécule de matière organique, une fois formée, est conservée dans les sols, chaque fois que, par érosion et par enfouissement dans les sédiments, une molécule de matière organique, préservée de l'oxydation, se conserve sous forme de charbon, une molécule de gaz

**Tableau 1** - Réactions chimiques d'interaction entre la lithosphère, l'atmosphère et l'océan primitifs.

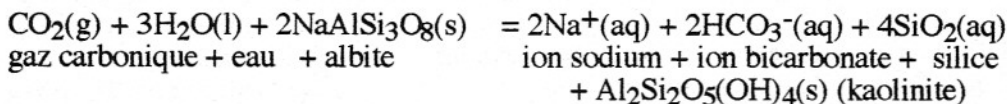
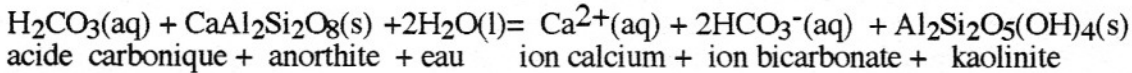
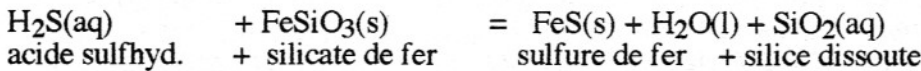
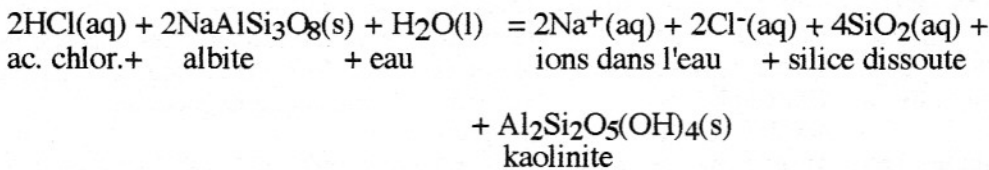
**CONDENSATION DE L'EAU ET DISSOLUTION DES GAZ ACIDES**

Gaz de l'atmosphère    aqueux, dissous    dissociées dans l'eau liquide



**ALTERATION DE LA LITHOSPHERE, NEUTRALISATION DES ACIDES ET FORMATION DES ARGILES**

Pluie acide(aq) + lithosphère(s) = dissous dans les rivières ou l'océan (aq)  
+ argiles des sols(s)



carbonique est prélevée dans l'atmosphère, tandis qu'une molécule d'oxygène est libérée vers l'atmosphère. De l'oxygène est ainsi produit par photosynthèse. Mais, il n'est pas encore libre: car, à peine libéré, il est immédiatement consommé par l'oxydation des composés réducteurs comme le méthane, l'ammoniac, l'hydrogène sulfureux de l'atmosphère et les sulfures de fer ferreux de

la lithosphère, exposés à l'altération. Le méthane de l'atmosphère s'oxyde en gaz carbonique. L'hydrogène s'oxyde en eau. Les sulfures de la lithosphère, exposés à l'altération, et l'anhydride sulfureux de l'atmosphère s'oxydent en sulfates. Le fer ferreux s'oxyde en fer ferrique. Tous les composés réducteurs de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la lithosphère primitives, capteurs

d'oxygène, progressivement s'oxydent (Tableau 2). L'oxygène capté est présent, en réserve, dans les composés oxydés (Garrels & Mackenzie, 1971).

**LES PREMIERS  
SULFATES  
SÉDIMENTAIRES**

Les premiers sulfates sédimentaires apparaissent en même temps que les premiers

organismes. Ils sont les preuves géochimiques de l'apparition, sur Terre, de la vie bactérienne photosynthétique. L'oxygène des sulfates de l'océan, gypse ou anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), de l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) des sols latéritiques et des *reds beds* ainsi qu'une partie de l'oxygène lié au fer ferrique des granites de la croûte terrestre recyclée, provient du développement de la Vie (Tableau 3). L'oxygène est le fruit de la Vie et, dit autrement, le résidu (l'excrément) naturel de la vie photosynthétique, tandis que le gaz carbonique en est son aliment.

### L'OXYGÈNE LIBRE

Il y a 2 milliards d'an-

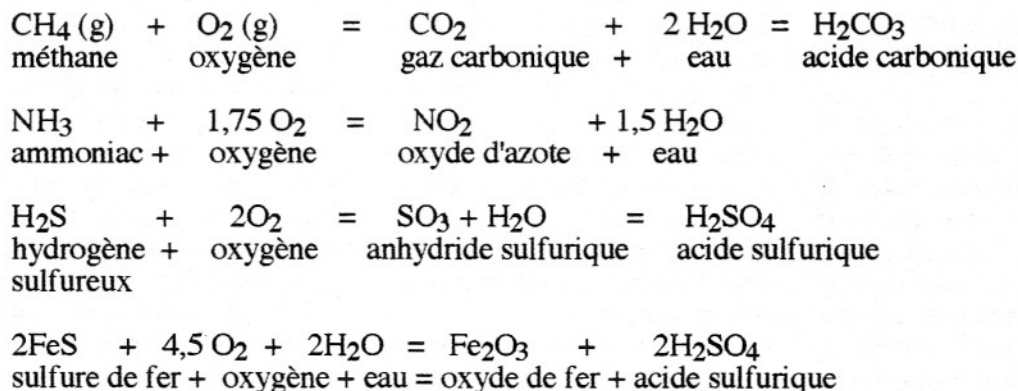
nées, soit 1,5 milliards d'années après l'initiation de la photosynthèse, quand le taux de production a pu équilibrer le taux de consommation, toujours réglé par le rythme d'érosion, l'oxygène libre fait son apparition dans l'atmosphère. C'est, pour l'environnement, la première révolution car les organismes photosynthétiques sont maintenant dans l'obligation de vivre au milieu de leur "excrément", l'oxygène, qui donc se mélange avec leur nourriture qu'est le gaz carbonique. L'oxygène envahit et pollue l'atmosphère. En excès, l'oxygène devient le poison de la Vie. Nous verrons plus loin que cette révolution, véritable

pollution du milieu global, fut peut-être à l'origine de deux inventions biologiques qui ont fondamentalement marqué l'Evolution des espèces vivantes.

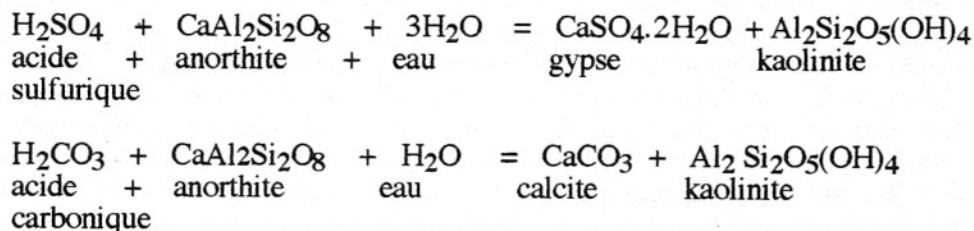
## DÉRIVE DES PLAQUES CONTINENTALES ET OSCILLATIONS DE L'ACTIVITÉ TECTONIQUE GLOBALE

On ne connaît pas grand chose de la tectonique de l'Archéen et des temps plus anciens que 2 milliards d'années. En revanche, au Protérozoïque et surtout à partir d'1

**Tableau 2** - Réactions d'oxydation, par l'oxygène produit de la photosynthèse, des matière réductrices, présentes dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.



**Tableau 3** - Réactions de neutralisation des acides carbonique et sulfurique par précipitation du gypse et du carbonate de calcium. Dans le gypse, l'oxygène est le produit de la photosynthèse tandis que le soufre vient de la lithosphère ( $\text{FeS}$ ) ou de l'atmosphère ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Dans la calcite, le carbone vient de l'atmosphère.



milliard d'années, les choses deviennent plus claires. La tectonique des plaques entre en jeu: cassures continentales et formation de *rifts* (*rifting*), expansion océanique, dérive des plaques continentales, collision et formation de chaînes de montagne, subduction et métamorphisme. Au droit des dorsales océaniques, la croûte s'étire et se déroule. Dans les cassures et les failles transformantes, se mettent en place des circulations convectives hydrothermales ou s'accroissent les échanges entre l'eau de mer et la croûte basaltique sous-marine. Au droit des zones de subduction, où séismes et volcans actifs témoignent d'un gigantesque enfouissement du plancher océanique, la croûte et les sédiments sont puissamment échauffés, transformés et métamorphisés.

#### TEMPS DE SUBMERSION ET TEMPS D'ÉMERSION

Lorsque la tectonique est active, les plaques se séparent, les continents se morcellent, le volcanisme est vigoureux, la subduction est forte, le métamorphisme est intense, le plancher de l'océan est bombé, le niveau des mers est élevé, l'altitude des continents tend à baisser et la superficie des terres émergées diminue. Ce sont les temps de transgression et de submersion de Sloss (Mackenzie & Pigott, 1981).

Lorsqu'après les collisions et la formation des chaînes de montagnes, les plaques sont soudées, la tectonique est calme, la subduction est ralentie, le volcanisme et le métamorphisme faiblissent en intensité, le fond des océans s'affaisse tandis que l'altitude des continents s'élève et que la superficie des terres émergées

s'accroît. Le niveau des mers est bas; ce sont les temps de régression et d'émergence de Sloss.

Les rythmes de transgression et de régression, de submersion ou d'émergence sont soumis aux mouvements cycliques de convection du manteau, activés par les pulsions cycliques des flux de chaleur.

#### PALÉOCLIMATS OU CLIMATS DES VIEUX CONTINENTS

A l'échelle des temps géologiques, le climat des continents oscille au gré des fluctuations de la tectonique globale pour plusieurs raisons: - Il y a d'abord des raisons de position. Quand les continents sont regroupés autour des pôles, s'installent naturellement des épisodes glaciaires, froids et secs. Lorsqu'au contraire, de vastes aires océaniques entourent les pôles, les conditions s'adoucissent. Quand les continents sont localisés autour des tropiques et de l'équateur, s'installent des climats chauds. Dans le premier cas, la tendance est à l'humide; dans le second elle est au sec.

- Viennent ensuite des raisons de configuration. Quand les continents sont morcelés, les façades maritimes sont longues et les climats sont humides (surtout aux basses latitudes et sur les côtes orientales); quand les continents sont regroupés, le climat tend, au contraire, vers le sec, parce-que les distances à la côte augmentent. Ceci est surtout remarquable le long des façades occidentales et aux latitudes tropicales, où sont volontiers localisés les déserts. - Viennent, enfin, des raisons qui tiennent à la composition chimique de l'atmosphère et

particulièrement à sa teneur en gaz carbonique. CO<sub>2</sub> est un gaz de serre; son abondance dans l'atmosphère provoque un échauffement, une augmentation de l'évaporation sur les zones océaniques tropicales. Par voie de conséquence, l'évaporation sur les océans entraîne un accroissement de l'humidité sur les continents, particulièrement dans les zones équatoriales et sous les latitudes moyennes, tempérées. Une baisse de teneur, en revanche, entraîne une baisse de température et une diminution de l'humidité globale.

La production du gaz carbonique est assurée de deux manières: (1) par le métamorphisme des séries carbonatées anciennes et leur transformation en roches silicatées nouvelles, (2) par l'altération sous-marine des basaltes de la croûte océaniques (échange entre Ca de la croûte contre Mg de l'océan) et (3) par l'oxydation (érosion chimique) des matières organiques fossiles. La consommation de gaz carbonique est assurée (1) par l'altération des roches silicatées anciennes et leur transformation en roches carbonatées nouvelles et (2) par érosion de matières organiques récentes, enfouies dans les sédiments pour aller rejoindre le réservoir sédimentaire du carbone organique fossiles Garrels & Mackenzie (1971) (voir prochain paragraphe).

Les taux de production et les teneurs en gaz carbonique dans l'atmosphère sont fortes, lorsque la subduction et le métamorphisme, d'une part ainsi que l'expansion océanique et la circulation hydrothermale, d'autre part, sont tous trois vigoureux (Figs. 1 et 2). Pour cette raison le climat des temps de submersion est généralement

chaud et humide; celui des temps d'émersion est plus volontiers froid et sec.

### VIEUX CYCLES GÉODYNAMIQUES

Depuis 1 milliard d'années et avec une périodicité de 250 millions d'années environ, se sont succédés sur Terre de grandes époques chaudes et probablement humides, lorsque les continents furent divisés et la tectonique globale active; 850 Ma, 700 Ma (Protérozoïque supérieur), 380 Ma (Dévonien) et 100 Ma (Crétacé) ou froides et sèches lorsque les continents furent, au contraire, soudés et formaient des pangées, à la fin

des grandes orogénèses. C'est ce qui se produit autour de 300Ma (Permo-Carbonifère) ainsi qu'entre 20 et 0 Ma (Néogène, Quaternaire).

Depuis la formation des premiers dépôts marins et la mise en route des grands cycles tectoniques, on estime que la masse des sédiments a été, en moyenne, recyclée 6 fois. Cependant, la durée des cycles n'est pas égale et il semble bien que le rythme des recy-clages successifs se soit accéléré et particulièrement au cours du Protérozoïque Supérieur et du Phanérozoïque (Fig. 3)

Les fluctuations de la tectonique globale apparaissent donc comme un ensemble de facteurs qui ont déterminé, à

l'échelle des temps géologiques, les amples oscillations du climat.

### MESSAGE SÉDIMENTAIRE ET BILAN GÉOCHIMIQUE GLOBAL

Les fluctuations de la tectonique globale sont répercutées sur le bilan de l'érosion et de la sédimentation, sur la composition de l'océan et de l'atmosphère ainsi que sur la distribution géochimique des éléments entre les différents réservoirs de surface. A l'échelle des temps géologiques, on considère avec beaucoup d'intérêt les oscillations de composition de l'océan et de l'atmosphère, bien

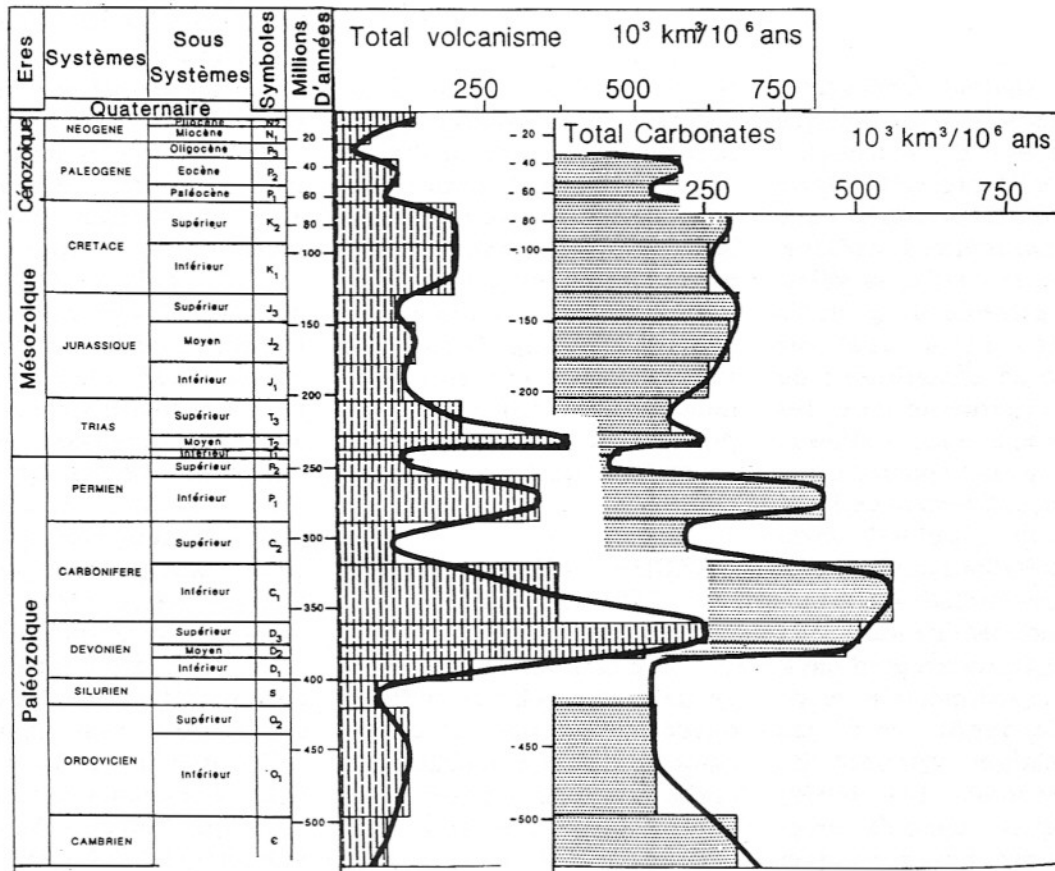


Figure 1 - Fluctuations d'intensité du volcanisme total et du taux de survivance ( $10^3 \text{ km}^3 / 10^6 \text{ ans}$ ) au cours des temps phanérozoïques, d'après Tardy (1986).



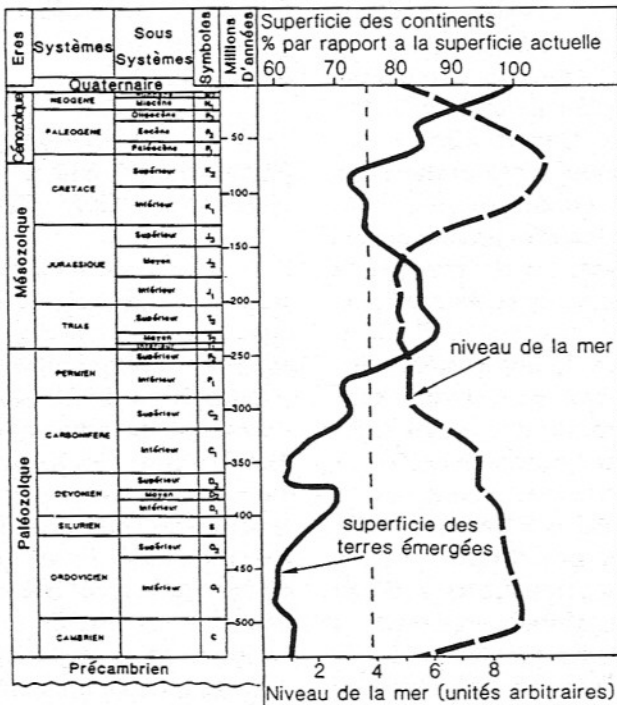


Figure 2 - Fluctuations du niveau eustatique des mers et superficies des terres émergées, d'après Tardy (1986).

que les variations enregistrées n'interviennent en général que peu sur le bilan de distribution globale. A l'échelle de la Terre entière, on peut considérer que les éléments comme le carbone, l'oxygène, le soufre, la silice, etc. sont présents en quantités constantes mais que ces éléments se distribuent de manière fluctuante dans les différents réservoirs sédimentaires de la lithosphère. Cette hypothèse, solidement vérifiée, est aujourd'hui la clef de voûte des interprétations modernes de la géochimie globale. Le regard sur le monde sédimentaire s'est renouvelé. Les concepts d'environnement sédimentaire et de milieu de dépôt des faciès paléoclimatique représentatifs ont été renoués. Les dépôts évaporitiques, supposés caractéristiques des climats chauds et secs et les dépôts carbonatés, supposés caractéristiques des mers chaudes et peu profondes,

pour ne prendre que les deux exemples les plus notoires, sont non seulement sous la dépendance du climat planétaire mais aussi sous la contrainte du bilan géochimique global. Il arrive même que la contrainte du bilan l'emporte sur la contrainte du milieu de telle sorte que l'abondance d'un faciès sédimentaire particulier n'est pas directement caractéristique du paléoclimat qui lui est pourtant favorable.

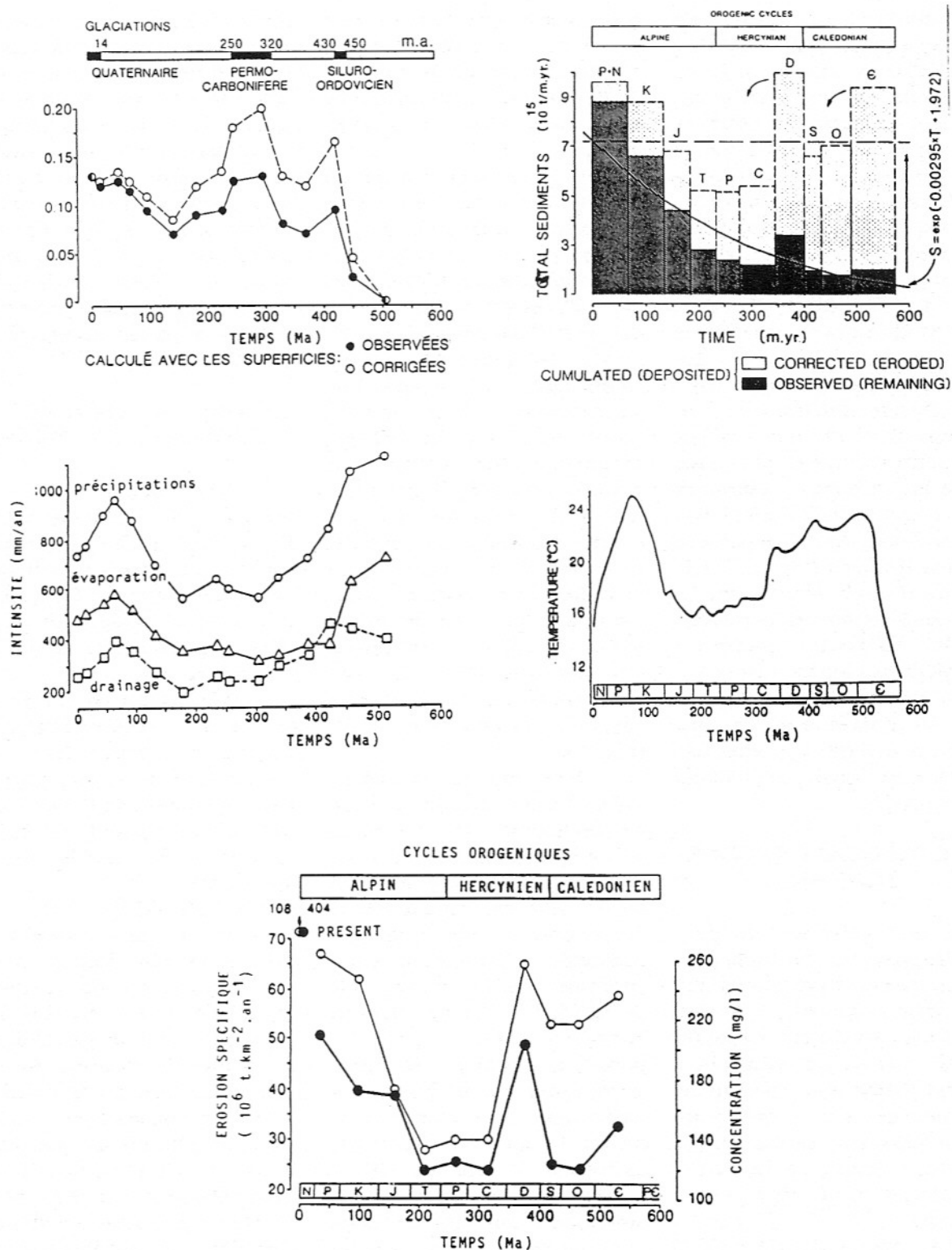
### RÉSERVOIRS ET FLUX DE SURFACE

Le carbone fluctue entre les deux réservoirs de carbone oxydé (carbone minéral: carbonates de calcium, calcaires et carbonates de magnésium, dolomies) et le réservoir de carbone réduit (organique: charbons, bitumes, kérogène, pétroles, gaz). Le soufre se distribue entre le réservoir du

soufre oxydé (sulfates: gypse, anhydrite des évaporites et sulfates dissous dans l'océan) et le réservoir du soufre réduit (sulfures: pyrite des sédiments réducteurs). La silice est avec le magnésium incorporée dans la croûte océanique, avec le calcium dans les silicates du métamorphisme ou avec le fer et l'aluminium dans les argiles des sols et des sédiments détritiques. Le fer est distribué entre un réservoir oxydé (hématite, argiles) et un réservoir réduit (pyrite). L'oxygène des réservoirs oxydés, enfin, se distribue donc entre les carbonates, les sulfates et les argiles ou les oxydes de fer ferrique. Dans l'ensemble, la quantité de chacun de ces éléments reste constante; seule change la distribution d'un réservoir à l'autre. La taille de chacun des réservoirs fluctue en même temps que les conditions déterminées par les fluctuations de la tectonique globale. Ainsi, les flux de transfert de matière entre les différents réservoirs oscillent dans le temps.

La théorie des causes actuelles est sans doute toujours respectée, mais c'est celle des conditions actuelles qui ne l'est plus. Les facteurs et les causes actuelles des phénomènes sont toujours les mêmes. Cependant, les conditions actuelles ne sont généralement pas celles du passé, sauf pour des périodes bien précises, comme l'époque glaciaire de la fin du Carbonifère et du début du Permien, par exemple. Cette époque fut semblable en bien des points à celle du Temps Présent, c'est-à-dire à celle du Quaternaire et de ce que l'on appelle, un peu vulgairement, l'Actuel.

Les modèles de géochimie globale sont basés sur la connaissance des taux de



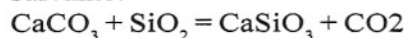
**Figure 3** - Evolution cyclique des paramètres de l'environnement et du climat global, au cours des temps phanérozoïques. (1). Paléogéographie et position des continents en latitude (superficies continentales polaires/superficies océaniques équatoriales). (2) Taux de survivance des sédiments, taux de sédimentation et taux d'érosion au cours du Phanérozoïque, d'après Tardy et al. (1989). (3) Oscillations des paramètres du bilan hydrologique global: précipitations, évaporations, drainage ou écoulement continental global, d'après Probst (1992). (4) Oscillation de la Température globale calculée sur le niveau général des mers (Tardy, 1994). (5) Taux d'érosion spécifique et charge moyenne calculée des rivières du globe, d'après Tardy et al. (1989).

sédimentation ou plutôt de conservation (de survie, *survival rate*, comme on dit en Anglais), des masses sédimentaires de tous âges ainsi que sur les variations conjointes de composition isotopique du carbone, du soufre ou de l'oxygène des carbonates, des matières organiques, des sulfates et des sulfures.

Les découvertes suscitées par les modèles de géochimie globale sont saisissantes. Le résultat, sans doute le plus intéressant, est d'avoir non seulement vérifié que les flux de transfert d'un élément donné entre les différents réservoirs qui le contiennent étaient liés (ce que sous-tend l'hypothèse de base, de façon évidente) mais encore d'avoir trouvé que le flux des différents éléments entre les différents réservoirs n'étaient pas indépendants (ce qui n'était pas évident a priori ou, dit autrement, ce qui découle aussi de l'hypothèse de base mais de façon peu évidente cette fois-ci).

## LE CYCLE DU CARBONE MINÉRAL

Les cycles tectoniques, volcaniques et métamorphiques déterminent les pulsations des flux de gaz carbonique émises vers l'atmosphère et l'océan. Ils règlent, par là, les rythmes de sédimentation du carbonate de calcium des séries sédimentaires calcaires. On peut écrire, en simplifiant, la réaction chimique, à double sens, suivante:



De la gauche vers la droite, la réaction est celle du métamorphisme de séries calcaires anciennes. De la droite vers la gauche, la réaction de compensation est celle de l'altération des roches silicatées

anciennes et de la formation de séries calcaires récentes. Un accroissement de la cadence tectonique et métamorphique détruit une partie des calcaires anciens. Le  $\text{CO}_2$  émis est aussitôt (au sens géologique du terme) consommé en même temps que l'altération et réincorporé dans de nouvelles séries sédimentaires carbonatées qui se développent d'autant plus que le métamorphisme source de gaz carbonique est puissant. Cependant, dans le réservoir de l'atmosphère "le niveau est haut", la teneur en  $\text{CO}_2$  est élevée et le climat est chaud et humide. Ce n'est probablement pas parce-qu'à une époque donnée les mers sont chaudes que l'on dépose de grandes quantités de carbonates. Mais c'est parce-que l'on détruit de grandes quantités de carbonates anciens que l'on crée, en compensation, de puissantes séries carbonatées récentes (Fig. 1).

Il est donc juste de croire qu'en période chaude, le seuil de précipitation des carbonates soit abaissé, mais il n'est pas juste de croire qu'une augmentation de température soit le mécanisme moteur de la sédimentation carbonatée. Pour précipiter  $\text{CaCO}_3$ , le carbonate de calcium, il faut en effet une source de  $\text{CO}_2$ , le gaz carbonique, fourni par le métamorphisme des séries carbonatées anciennes et une source de Ca, le calcium, fourni par altération des roches affleurantes, exposées aux agents atmosphériques. Il ne faut donc pas confondre les causes et les effets. Les mécanismes physico-chimiques qui contrôlent le sens des réactions de transfert sont une chose. La nécessité de boucler le bilan global de matière transférée en est une autre.

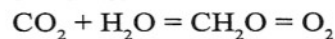
Les cycles tectoniques

déterminent les pulsations du relief et agissent directement sur le rythme d'exposition des sédiments anciens soumis aux agents du climat de l'époque. Le climat, par la pluviosité et la température, intervient aussi directement sur l'érosion (Tardy et al., 1989). L'érosion est chimique et mécanique; mais, à l'échelle globale, l'érosion mécanique comporte des composantes chimiques de grande importance.

## L'ÉROSION MÉCANIQUE, SOURCE D'OXYGÈNE

Si comme on vient de le voir, l'érosion chimique, par l'oxydation des sulfures et des roches carbonatées de la lithosphère, consomme de l'oxygène, l'érosion mécanique des matières organiques, au contraire, en produit.

L'érosion mécanique exerce, par exemple, le contrôle du flux d'oxygène émis (ou consommé) vers (ou à partir) de l'atmosphère et de l'océan. On peut écrire, en simplifiant, la réaction, à double sens, suivante:

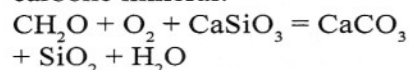


De la gauche vers la droite, la réaction de photosynthèse produit de la matière organique et de l'oxygène. De la droite vers la gauche, la réaction d'oxydation ou de minéralisation de la matière organique consomme de l'oxygène et produit du gaz carbonique. Généralement les deux réactions s'équilibrent et la biomasse reste constante. Cependant, chaque fois que, par érosion mécanique, on prélève dans un sol une mole de matière organique et que dans un lac ou un océan on place cette mole en réserve, enfouie dans un sédiment (kérogène, bitume, tourbe, charbon, de formation

récente), on a irréversiblement (ou pour longtemps) consommé une mole de gaz carbonique et donc produit une mole d'oxygène. De la gauche vers la droite, en revanche, la réaction est celle de l'oxydation de matière organique fossile, anciennement déposée. Par érosion chimique naturelle ou par combustion industrielle, le résultat est le même: on détruit de la matière organique, on consomme de l'oxygène et on produit du  $\text{CO}_2$ . C'est cette réaction qui est rendue responsable des changements du climat actuel par modification de l'effet de serre.

### CYCLE CARBONE ORGANIQUE

Cependant, le carbone peut être impliqué dans une réaction de compétition entre matière organique, source ou piège de carbone organique et carbonate de calcium, source ou piège de carbone minéral. Intervient alors nécessairement, pour assurer le relai, un silicate de la lithosphère, source du calcium qui, libéré par altération sur les continents, est le fixateur, dans l'océan, du carbone minéral:

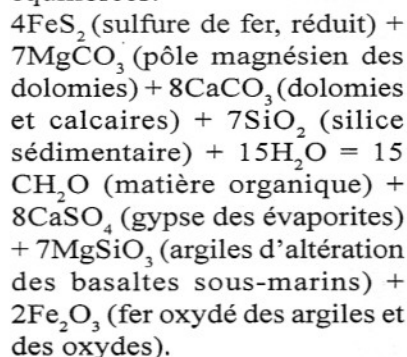


De la gauche vers la droite, l'oxydation de la matière organique, l'altération des silicates de calcium, sous l'effet de l'érosion chimique, entraîne la formation de carbonates de calcium et le dépôt de silice sédimentaire. De la droite vers la gauche, le gaz carbonique libéré par le métamorphisme des séries calcaires anciennes est utilisé non pas comme précédemment à la formation de calcaire nouveau mais au développement de matière organique nouvelle.

Lors de la synthèse organique, se produit un fractionnement des isotopes du carbone et l'isotope léger ( $\text{C}^{12}$ ) est préféré à l'isotope lourd ( $\text{C}^{13}$ ). Ainsi, les fluctuations des quantités relatives de carbone organique et de carbone minéral se traduisent-elles par des variations de composition isotopique du carbone dans chacun des deux réservoirs sédimentaires organique et minéral. Lorsque le réservoir organique s'accroît fortement (c'est le cas bien connu du Carbonifère et du Permien), les carbonates du même âge, déposés en quantités moindres, s'enrichissent en isotope lourd ( $\text{C}^{13}$ ).

### COUPLAGE DES CYCLES DU CARBONE ET DU SOUFRE PAR L'OXYGÈNE

En fait, lorsque l'on cherche à coupler les cycles des différents éléments, on s'aperçoit qu'il faut les considérer ensemble car tous sont liés. Les réactions chimiques de transfert doivent être, comme on dit, équilibrées:



De gauche à droite, le fer ferreux, et le soufre réduits des sulfures de fer sont oxydés et transformés en oxydes et en sulfates, tandis que le carbone oxydé des carbonates est transformé en carbone organique réduit. De droite à gauche, les réactions contraires sont observées; dans les deux cas, le

carbone, le soufre, la silice, le calcium, le magnésium mais aussi l'oxygène sont conservés. La formation, au cours d'une époque donnée, d'une grande quantité de matière organique s'accompagne nécessairement, pour consommer les énormes quantités d'oxygène produit, d'une importante oxydation des sulfures et d'une forte augmentation des sulfates ou des oxydes de fer ferrique. C'est typiquement le cas du Permien, que l'on choisit, entre autres exemples (Figs. 4 et 5).

### BILAN GÉOCHIMIQUE ET MILIEU DE DÉPÔT

Ainsi, faudrait-il être prudent, lorsque l'on tente de reconstituer les paléoclimats en fonction de l'abondance des facies sédimentaires caractéristiques. Aux caractères propres aux milieux de dépôt, s'ajoutent les contraintes du bilan global. Un exemple simple peut illustrer cette proposition. Si l'on constate aujourd'hui un fort dépôt de gypse évaporitique dans le Golfe Persique, on peut penser que l'intense évaporation, caractéristique du climat chaud et sec qui règne dans la région est la cause de cette précipitation saline. Cependant, ce dépôt ne peut être abondant que si le Golfe est alimenté en sulfate pour compenser la partie perdue. Faute d'alimentation, toute précipitation cesserait. Il faut croire que le reste de l'océan qui fournit cette compensation est lui même alimenté par une source qui ne peut être autre que continentale. Dans ce cas, il faut rechercher quelles sont les causes géodynamiques responsables d'une oxydation des sulfures de fer aussi importante et donc aussi responsables de la synthèse d'une aussi grande quantité de matière orga-

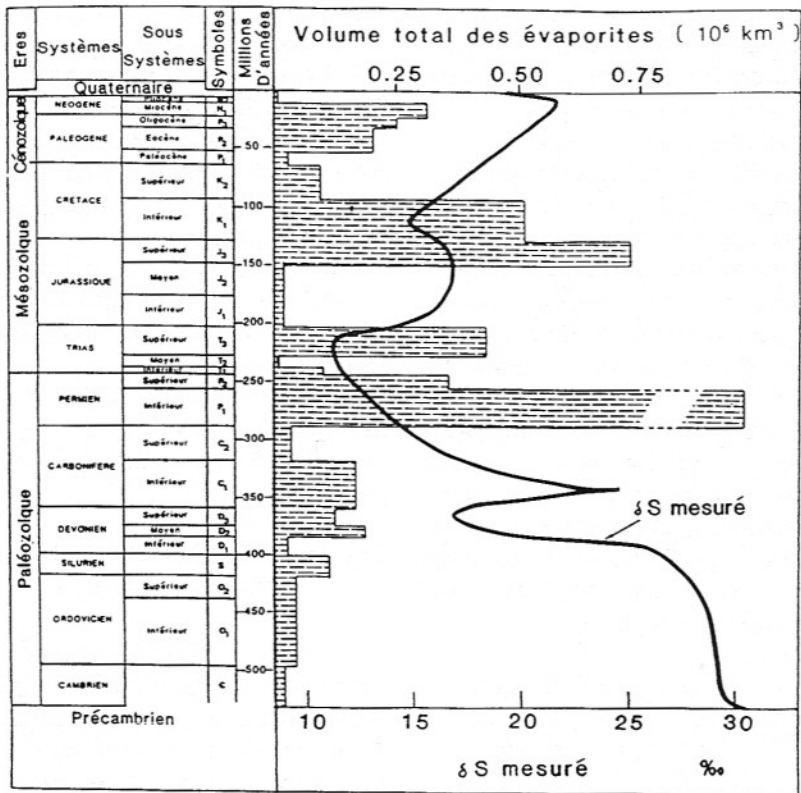


Figure 4 - Fluctuations de la valeur  $\delta^{34}\text{S}$  (%) des dépôts sulfatés et de la taille du réservoir des évaporites, d'après Tardy (1986).

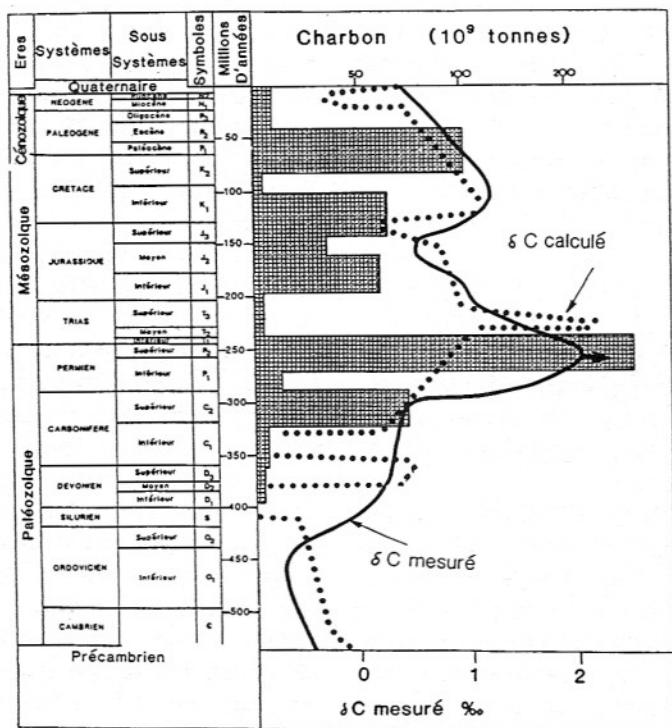


Figure 5 - Fluctuations de la valeur  $\delta^{13}\text{C}$  (%) des dépôts carbonatés et de la taille du réservoir des charbons, d'après Tardy (1986).

nique, seule capable de fournir l'oxygène nécessaire à cette oxydation, etc. Le Crétacé fut considéré comme une période chaude et sèche à cause de l'abondance des dépôts évaporitiques. On sait aujourd'hui que cette période fut chaude mais humide. L'abondance de dépôts évaporitiques au Permien aurait pu faire croire que cette époque fut chaude et sèche, alors que l'abondance des charbons laisserait penser qu'elle fut chaude et humide. En fait, le Permien fut globalement froid et sec. Evaporites et charbons s'y sont formés en même temps: les évaporites aux latitudes des tropiques, les charbons aux latitudes périglaciaires, en régions humides malgré la sécheresse du climat global. Une interprétation, pas trop classique, aurait abouti à considérer le Permien comme à la fois chaud et froid, sec et humide. Notons que le globe terrestre offre aujourd'hui et a toujours offert dans le passé, une large variété de zones climatiques et ceci quelles qu'aient été les tendances du climat global. En fait, la Terre a toujours été en mesure, par la diversité de ses climats, de répondre aux nécessités du bilan géochimique global dont les pulsions sont commandées par l'activité tectonique elle aussi globale.

Ceci est valable à l'échelle des temps géologiques et, disons aussi, à l'échelle des fluctuations perçues sur une durée de l'ordre d'1 million d'années. A des échelles de durées plus courtes, il faut considérer d'autres causes de fluctuations liées à la dynamique céleste et aux cycles de Milankovitch, par exemple. On prend ici l'exemple des oscillations du climat qui ont animé le Quaternaire, ainsi que

le siècle écoulé.

## LES OSCILLATIONS CLIMATIQUES SUR LE MODE NORMAL

### AU TERTIAIRE ET AU QUATERNAIRE

Au Permien, les continents sont regroupés autour du pôle sud; l'activité tectonique est ralentie; le niveau des mers est bas; le climat global (toutes zones climatiques, sur terre et sur mer confondues) est froid et sec; les steppes et les déserts sont étendus; le pôle sud est le centre d'une vaste glaciation. L'écoulement continental est modeste; l'érosion mécanique et l'érosion chimique sont faibles; la pédogenèse est ralentie; la couverture végétale est peu étendue.

Au Crétacé et au

Paléocène, les continents sont divisés; leur centre de gravité est proche de l'Equateur; la tectonique globale est vive; la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère est 30 fois plus forte que celle que l'on connaît aujourd'hui; l'effet de serre est fort; la température globale est de 25°C soit 10°C de plus que les 15°C d'aujourd'hui. Le climat global est chaud et humide; les déserts sont peu étendus; les glaciers sont absents. L'écoulement continental est élevé (50% plus fort qu'aujourd'hui); les érosions mécanique et chimique sont vigoureuses; le taux de sédimentation est élevé; la pédogenèse est active et les latérites se développent sur de grandes étendues; la couverture végétale est dense et couvre de vastes superficies en domaine tempéré et équatorial.

Au cours du Tertiaire et du Quaternaire, les continents se sont soudés à nouveau; cette

fois-ci autour du pôle nord, tandis que le continent Antarctique, d'altitude élevée occupe le pôle sud. La tectonique globale - à part un sursaut vers 40 Ma - ralentit progressivement. Une grande régression du niveau des mers s'est développée. Les glaciations se succèdent depuis la fin de l'Eocène et culminent à la fin du Quaternaire. La glaciation du Würm fut la plus rude. Les déserts et particulièrement le Sahara se sont étendu, vers le Nord et le Sud; l'extension du Sahara, par exemple, est maximale vers 20.000 ans. La teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère a baissé; la température globale aussi. L'écoulement continental a diminué; l'érosion chimique a considérablement faibli quoique l'érosion mécanique ait augmenté comme conséquence de l'orogénèse alpine. La forêt a régressé (Fig. 6).

Des oscillations de deu-

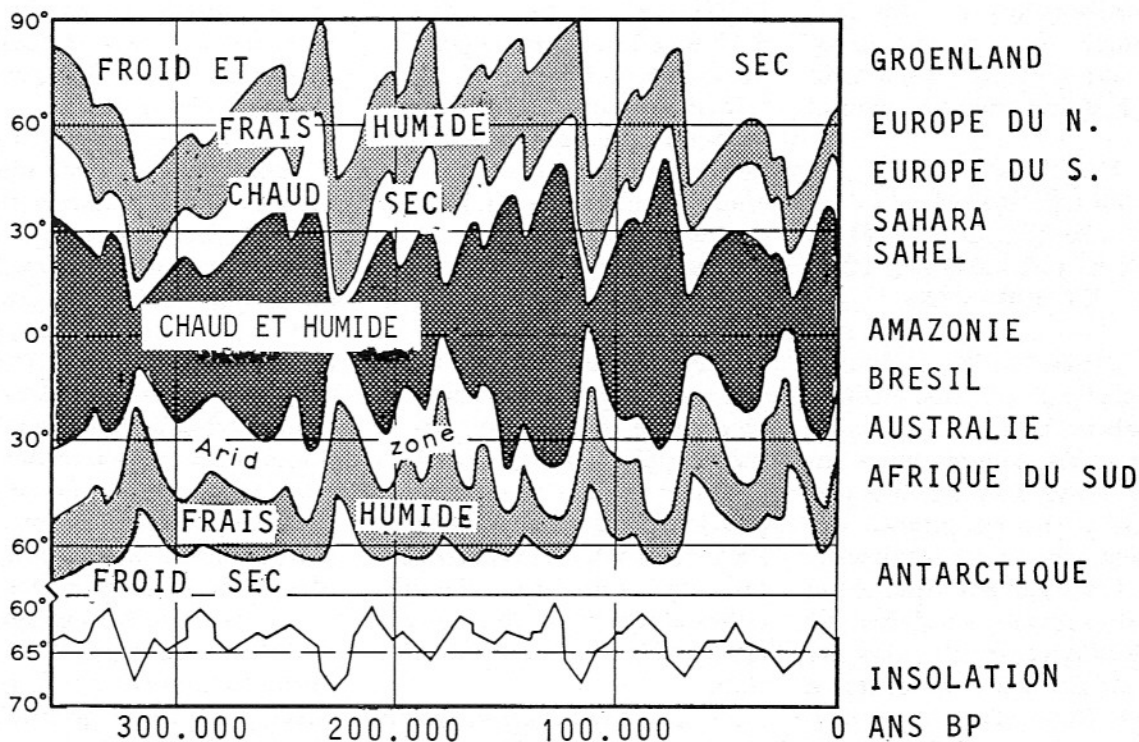


Figure 6 - Fluctuations des zones climatiques sèches et humides, chaudes et froides au cours des trois derniers cycles glaciaires du Quaternaire récent, d'après Harris & Fairbridge (1967).

xième et troisième ordre sont venues se surimposer à la tendance générale du climat qui de chaud et humide est passé au froid et sec. Ces oscillations se sont elles aussi produites sur le mode normal, associant des stades glaciaires très froids et très secs alternant avec des interstades plus doux et plus humides. Il est très intéressant de souligner que les fluctuations des teneurs en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère ont, aux différentes échelles de temps considérées, accompagné les oscillations de la température. Généralement considéré comme spécifiquement responsable ou comme variable explicative de l'effet de serre, le gaz carbonique pourrait n'être regardé que comme une variable expliquée, dont les fluctuations ne seraient que les conséquences et non pas les causes des fluctuations de température. Les réactions au sein du cycle du carbone, lié aux autres cycles élémentaires, sont si nombreuses et tant imbriquées qu'on ne peut prétendre en faire simplement le tour. Il faut chercher encore!

#### OSCILLATIONS MILLÉNAIRES ET SÉCULAIRES DU CLIMAT AUX ÉCHELLES DE 100 ET 1000 ANS

L'examen des fluctuations, depuis 100 ans, du débit annuel des rivières du monde entier et des températures annuelles sur l'ensemble des océans et des continents, autorise la mise au point suivante.

L'écoulement continental global (somme des débits de tous les fleuves et ruisseaux qui coulent sur les continents) a grossi. Cependant, dans certaines régions du Globe, le débit a augmenté pendant la première moitié du siècle et a diminué

pendant la seconde moitié. Dans d'autres régions, en revanche, le débit a diminué pendant la première mais a augmenté pendant la seconde moitié. Les oscillations séculaires de la pluviosité sont, compensées d'une région à l'autre. Enfin, l'augmentation ne concerne que les continents et pas les océans, de sorte que rien ne permet de penser que la Terre entière soit devenue plus humide. Il est possible, en effet, qu'un excès de pluviosité sur les continents soit compensé par un déficit sur les océans. L'échelle continentale, considérant l'ensemble des continents ne doit pas être confondue avec l'échelle globale, c'est-à-dire l'échelle du Globe Terrestre en entier.

En 100 ans, à l'échelle annuelle, les oscillations du débit ont été très fortes (+ ou - 50%, d'une année sur l'autre). Cependant d'une région à l'autre, les oscillations ne sont pas synchrones mais déphasées. D'Est en Ouest ou du Nord au Sud, en effet, se propagent des ondes de sécheresse et d'humidité qui constituent l'explication du mécanisme de compensation, perçue à l'échelle continentale ou planétaire. Les ondes déphasées qui apparaissent comme quasi-cycliques sont en fait polycycliques et réglées sur les fréquences d'émission des taches solaires. Comme sur une mer démontée, le rythme des vagues est le même mais, au port, la position des bateaux qui flottent n'est pas identique d'un point à l'autre: les uns s'élèvent quand les autres s'abaissent; les uns culminent sur les crêtes quand les autres sont au creux des flots.

La température moyenne globale a augmenté. Cependant, comme pour le débit (fortement lié à la pluviosité) les oscil-

lations séculaires sont compensées à l'échelle régionale et à l'échelle locale. Pour l'ensemble de la Terre, d'une année à l'autre, par exemple, les fluctuations se font pour 75% sur le mode normal (chaud et humide contre froid et sec) et pour 25% sur le mode anormal (chaud et sec contre froid et humide) (Figs. 7, 8, 9 et 10).

Les fluctuations de température et d'humidité sont en fait déterminées par la position des anticyclones et des dépressions sur les océans et sur les continents qui d'un mois à l'autre, d'une année à l'autre, d'un siècle à l'autre ou même d'un millénaire à l'autre oscillent en position, sur le rythme et à la manière du SOI (southern oscillation index, messenger d'El Niño). Cette danse des hautes et basses pressions est déterminée par les "bulles" d'air polaire qui, en provenance alternée du pôle nord ou du pôle sud, sont émises plus ou moins loin vers le Nord ou vers le Sud en direction de l'Equateur (Leroux, 1994).

L'étude du bassin de l'Amazone au Brésil montre qu'avec les oscillations climatiques qui, on vient de le dire, sont fortes, varient les rythmes de consommation du gaz carbonique, de minéralisation de la matière organique, de l'érosion chimique et de l'érosion chimique. A l'échelle d'une saison, d'une année et d'un millénaire, oscillations des facteurs du climat et fluctuations des paramètres qui définissent l'environnement sont interconnectées.

Ce modèle est applicable aux fluctuations du climat des derniers 20.000 ans qui ont suivi la dernière grande glaciation du Würm. Autour de 18.000 ans pour l'Europe du Nord et de 16.000 ans pour

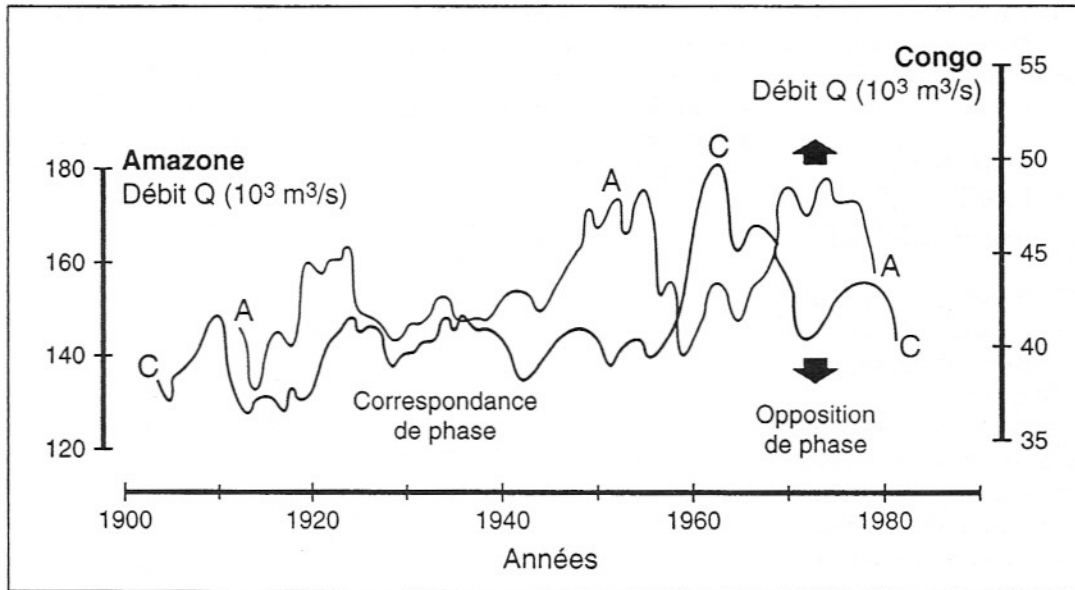
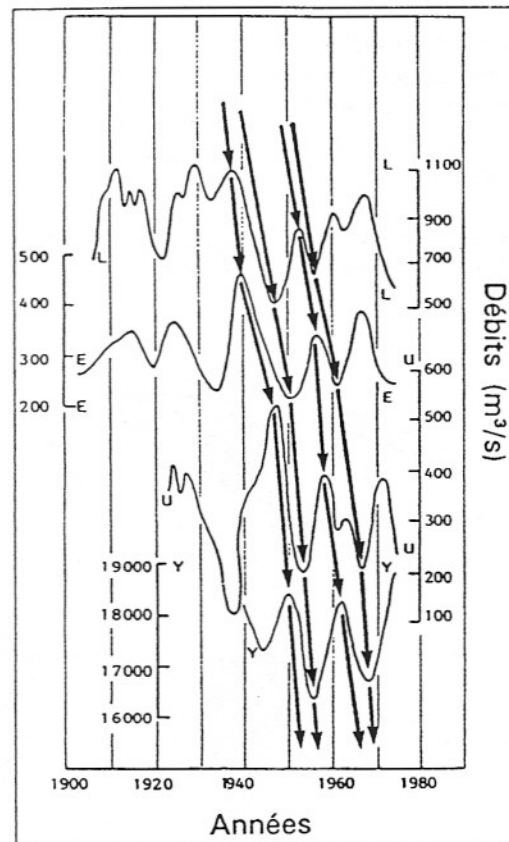


Figure 7 - Oscillations de débit du Congo et de l'Amazone au cours du siècle écoulé, d'après Tardy & Probst (1992).

l'Amérique du Sud, s'installe un épisode froid et sec, tandis que le Sahara est très étendu entre 20.000 et 15.000 ans. En même temps que la déglaciation, s'instaure dans les régions autrefois englacées, un climat doux et pluvieux. Vers 8.000 ans, le Sahara est vert. C'est l'époque du Paradis Terrestre où abondent l'eau, le lait, les fruits, la chasse, les beaux guerriers et les belles amazones, partout représentés par les fresques rupestres peintes sur les murs des grottes préhistoriques. Vers 6.000 ans, le climat se détériore; l'eau vient à manquer; la désertification gagne; la vie devient dure et le travail nécessaire. La suite est dans la Bible et la notion de péché originel est peut-être à rechercher dans une sévère crise climatique.

On peut croire ou ne pas croire! Mais il faut savoir que nos interprétations et notre vision scientifique du Monde, entachées de nos vieilles croyances, sont issues de notre vieux fond culturel, tout entier



L: la Loire en France; E: l'Elbe en Tchécoslovaquie; U: l'Oural au Kazakhstan; Y: l'Yenissei en Sibérie

Figure 8 - Propagation vers l'Est des périodes sèches et humides. Fluctuations décalées des débits de quelques fleuves d'Europe et d'Asie, d'après Probst & Tardy (1989) et Tardy & Probst (1992).



élaboré au cours des alternances entre nos heures de facilité et nos déboires paléoclimatiques.

## ÉVOLUTION, OSCILLATIONS ET CRISES DE L'ENVIRONNEMENT

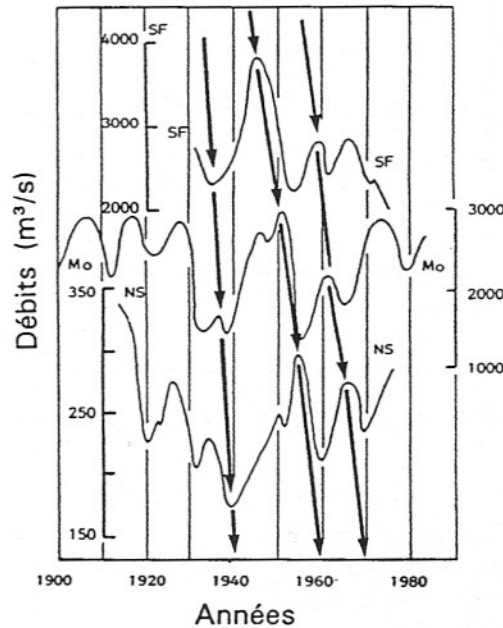
L'Homme est-il en train de détruire la Terre qui, nous dit la Bible, a été créée pour lui, pour qu'il la domine?

Depuis 3,5 milliards d'années la Terre vit, sans cesse soumise à des crises du climat et de l'environnement; transgressions, régressions, volcanismes, glaciations, fournaises, désertifications, déluges, forêts denses, pénurie ou abondance d'oxygène, d'ozone ou de gaz carbonique, etc., pires que celles dont nous croyons être responsables aujourd'hui. La vie a traversé tout cela! Et si Evolution est synonyme de diversification, se pourrait-il même que l'Evolution n'ait été possible que grâce aux secousses et aux oscillations du climat et de l'environnement.

La Vie aurait saisi ou utilisé ces crises pour se diversifier et évoluer. Mais la Vie a modifié et continue de modifier l'environnement et donc aussi le climat. La Terre est donc un

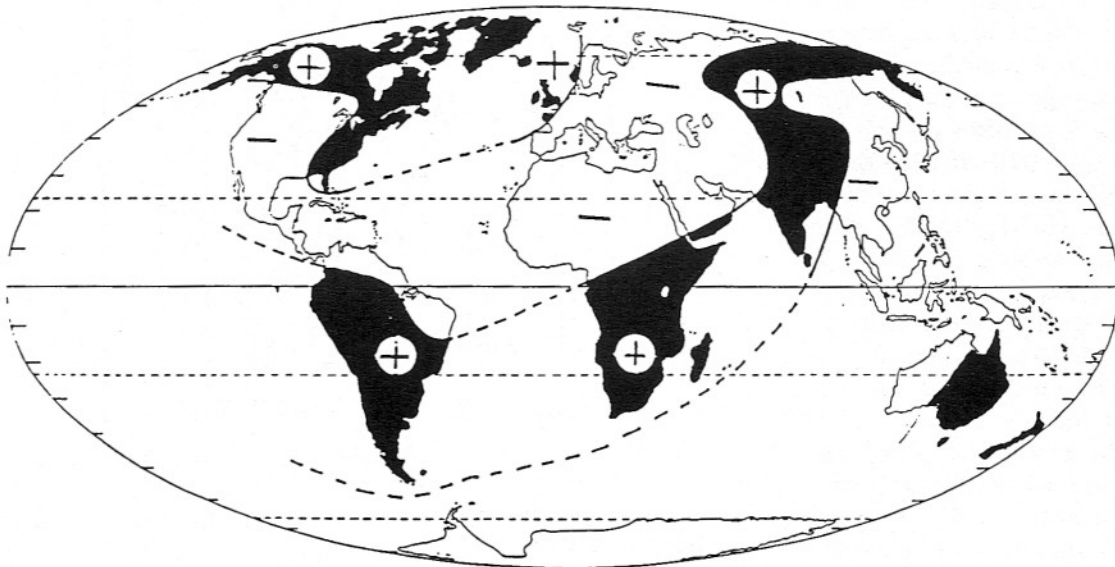
systeme. La Terre est un être vivant supérieur, nous dit Lovelock (1984).

Tout développement, si équilibré soit-il, entraîne une pollution. Environnement et



SF: São Francisco au Brésil; MO: Missouri aux USA; NS: North Saskatchewan au Canada

**Figure 9** - Propagation vers le Nord des périodes sèches et humides. Fluctuations décalées des débits des trois rivières d'Amérique, d'après Probst & Tardy (1989) et Tardy & Probst (1992).



**Figure 10** - Répartition spatiale à travers le monde des tendances séculaires vers l'humidité (+) ou vers l'aridité (-) du climat, d'après Tardy et al. (1994).

développement sont à considérer ensemble! La première pollution de taille fut, sans doute, celle de l'arrivée de l'oxygène libre dans l'atmosphère, fruit du développement de la biomasse bactérienne et algale procaryotiques qui, pratiquement sans évolution, s'est accumulée pendant 2 milliards d'années, conservée dans les sédiments primitifs ou dans les roches métamorphiques. La réaction fut grandiose et le noyau des eucaryotes est le résultat d'une symbiose de bactéries, nous explique Lynn Margulis (1989).

On peut imaginer que certaines de ces bactéries soient venues s'abriter de l'oxygène qu'elles avaient engendré et se soient protégées de leur déchets (excréments) en s'introduisant dans un hôte plus tolérant vis à vis du monde extérieur. A cet instant précis de l'évolution, la grande révolution biologique est accomplie. Le développement des organismes eucaryotes dont nous faisons partie résulte donc sans doute d'une pollution de l'atmosphère par l'oxygène.

A partir des organismes primitifs à noyau mais encore à reproduction asexué, se développent, les organismes sexués monocellulaires, pluricellulaires, puis les animaux à squelette externe, à squelette interne, à système nerveux, les poissons, les reptiles, les oiseaux, les mammifères, Lucy et le "Cavalier Polonais" de Rembrandt, considéré comme l'être le plus évolué de la Création. Cette évolution semble s'être épanouie et accélérée à partir d'1 milliard d'années, lorsque les cycles de tectonique globale se mettent pleinement en route. A l'échelle des temps géologiques de l'existence de la Terre, la

biodynamique et la géodynamique interfèrent. Le Vivant et le Minéral: de la lithosphère à l'atmosphère et de l'hydrosphère à la biosphère, sont les organes de la Terre que Lovelock (1984) considère comme un seul être vivant.

## CONCLUSION REGARD CRITIQUE SUR LES RELATIONS DE CAUSES À EFFETS. ÉLOGE DES CHANGEMENTS D'ÉCHELLES DE TEMPS ET D'ESPACE

Ainsi vont les interprétations, lorsqu'il s'agit des relations entre les oscillations des facteurs climatiques et les fluctuations des paramètres du milieu ambiant qui leur sont associées. On peut se tromper d'échelles et croire trop rapidement que les oscillations du climat se font toujours sur le mode normal: chaud et humide contre froid et sec; ce serait oublier que les transitions entre ces deux régimes se font la plupart du temps sur le mode que j'ai défini (Tardy, 1986) comme anormal: froid et humide contre chaud et sec. On peut croire - sans trop de certitude cependant - que les fluctuations des teneurs en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère ne font qu'accompagner les oscillations de température et d'humidité du climat, ou n'être que leurs conséquences et non pas leurs causes. On peut aussi croire - ce ne serait pas déraisonnable - que l'énorme taux de production de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, conséquence de l'actuel développement industriel, n'est pas la cause profonde de l'augmentation de température, de l'élévation du niveau de la

mer et de l'augmentation de pluviosité sur les continents. Cependant, il est probable - et c'est déjà plus sur de le dire ainsi - que l'accroissement de teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique par combustion, encourage une augmentation de température et d'humidité qui pourrait bien n'être que naturelle. Il serait enfin tout à fait correct de dire que pour les 100 ans écoulés, ces trois paramètres ont augmenté ensemble. On a vu, d'autre part que cette constatation vérifiable à l'échelle du siècle, n'était pas recevable à l'échelle de l'année. La prudence devrait donc s'imposer.

En Science de la Terre, comme dans les autres sciences de la Nature, il faut toujours garder à l'esprit que l'on est, en général, trop pressé de trouver une cause à chacun des phénomènes observés et que l'on se passionne beaucoup trop pour celle que l'on a cru découvrir. Il faut aussi garder à l'esprit qu'à partir du moment où l'on trouve que deux variables sont entre elles bien corrélées, on a toujours tendance à croire que l'une est explicative de l'autre. C'est quelquefois le contraire mais c'est souvent une troisième variable qui est explicative des deux premières. On devrait également s'attacher à mener de front l'étude des mécanismes et des causes, l'étude des processus, c'est-à-dire des chemins suivis et enfin l'étude des bilans, c'est-à-dire des quantités mises en jeu. Ces trois démarches devraient être menées à plusieurs échelles. La Nature ne s'appréhende bien qu'à plusieurs échelles, de temps et d'espace! La nature est un système complexe (Morin, 1982; Morin & Kern, 1993).

On doit en effet savoir qu'une loi établie à une échelle

donnée, peut ne plus se révéler valable à une autre échelle de temps ou d'espace. L'échelle du temps jalonne l'histoire et les fluctuations ne peuvent être perçues que par l'analyse de séries historiques. Le physicien se donne les conditions de l'expérience qu'il conduit pour guider ses interprétations. Le naturaliste ne peut lui non plus se passer d'expériences mais doit pour cela attendre que la Nature lui fournisse les conditions, les variations et les covariations qu'il espère interpréter. Pour bien comprendre la Terre et son environnement de surface, il serait urgent de créer des observatoires permanents de l'Environnement.

Pour bien comprendre l'environnement planétaire, on devrait mieux se garder des interprétations anthropocentriques et ne pas croire que le

vagabond que l'on rencontre à la croisée de chemins suit nécessairement la même route que celle que l'on a l'intention d'emprunter. Le climat d'une région fusse-t-elle chère à notre cœur, n'évolue pas nécessairement comme celui des autres régions ni comme celui du Monde entier. La branche montante d'une oscillation ne doit pas être regardée avec partialité comme une tendance extrapolable pour longtemps; car après le flux, vient souvent le reflux. L'évolution lorsqu'elle est constatée ne doit pas être comprise comme un progrès ou comme une régression mais comme un simple changement à long terme. Le concept de progrès attaché à celui d'évolution ne devrait pas entrer dans une démarche scientifique.

L'évolution, si elle existe vraiment, conduit-elle et s'ar-

rêtera-t-elle à l'Homme? Si l'Homme craint de ne pouvoir dominer la Terre et s'il se comporte comme s'il avait l'intention de la détruire, pourquoi donc finirait-elle avec lui? Le destin de la Terre dépasse peut-être celui de l'Homme comme il a dépassé plus de quatre milliards d'espèces nées puis disparues au cours des temps géologiques. Cherchons à connaître la Terre pour elle-même. Observons et mesurons sans cesse! Attendons en décryptant les changements cycliques, dans tout l'espace et au fil de tous les temps. Le lointain révèle le proche, le passé éclaire le présent et le présent peut préfigurer l'avenir. Observons et attendons, en mesurant, que la Terre nous livre les ressorts secrets de ses oscillations compensées.

## BIBLIOGRAPHIE

- GARRELS, R.M. & MACKENZIE, F.T. (1971) *Evolution of Sedimentary Rocks*. W.W. Norton & Co, Inc., 397p.
- HARRIS, S.A. & FAIRBRIDGE, R.W. (1967) Ice-age meteorology. In: R.W. Fairbridge (Ed.) Reinhold Publ. Co. *Encyclopedia of Atmospheric Science and Astrogeology*. p.454-461.
- LEROUX, M. (1994) Interprétation météorologique des changements climatiques observés en Afrique depuis 8000 ans. *Climatic change and geomorphology in tropical environments*. Roy. Acad. Overseas Sciences, Bruxelles, Belgique, *Geo-Eco-Trop.*, **16**(1/4):207-258.
- LOVELOCK, J. (1984) *La Terre est un être vivant. L'hypothèse Gaïa*. Le Rocher, Paris. 90p.
- MACKENZIE, F.T. & PIGOTT, J.D. (1981) Tectonic controls of Phanerozoic sedimentary rock cycling. *J. Geol. Soc. London.*, **138**:183-196.
- MARGULIS, L. (1989) *L'Univers bactériel*. Albin Michel, Paris, 333p.
- MORIN, E. (1982) *Science avec conscience*. Fayard, Paris, 328p.
- MORIN, E. & KERN, B. (1993) *Terre-Patrie*. Seuil, Paris. 217p.
- N'KOUNKOU, R.R. (1989) *Hydrogéodynamique actuelle du Congo et de l'Amazonie. Cycle global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques*. Thèse de doctorat, Université Loius Pasteur, Strasbourg, France. 192p.
- PROBST, J.L. (1992) Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. *Sci. Géol. Mém.*, **94**:161p.
- PROBST, J.L. & TARDY, Y. (1989) Global runoff fluctuations during the last 80 years in relation to world temperature change. *American Journal of Science.*, **289**:267-285.
- REEVES, H. (1981) *Patience dans l'azur*. Seuil, Paris., 241p.
- REEVES, H. (1990) *Malicorne. Réflexions d'un observateur de la nature*. Seuil, Paris., 216p.
- TARDY, Y. (1990) *Erosion*. Encyclopédia Universalis., **8**:615-627.
- TARDY, Y. (1994) *PIRAT: programme interdisciplinaire de recherche de biogéodynamique intertropicale périalantique*. *Sci. Géol. Mém.*, **96**:100p.

- TARDY, Y. & PROBST, J.L. (1992) Sècheresse, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis 100 ans., **3**:25-36.
- TARDY, Y. & PROBST, J.L. (1992) Sècheresse et crises climatiques. Encyclopédia Universalis, Universalis 1992., p:167-174.
- TARDY, Y.; N'KOUNKOU, R.; PROBST, J.L. (1989) The global water cycle and continental erosion during phanerozoic time. American Journal of Science, **289**(4):455-483.
- TARDY, Y.; FURLAN, J.; MORTATTI, J.; PROBST, J.L. (1995) Distribution des oscillations du climat au cours du siècle écoulé. Fluctuations de débit de cinquante grands fleuves du Monde. C.R. Acad. Sci. Paris., **320**(2A):945-952.