

CRISES CLIMATIQUES

SECHERESSES ET INONDATIONS

RESUME

Les crises climatiques, avec notamment la sécheresse, constituent un phénomène auquel certains pays, comme le Mali, apparaissent de nos jours particulièrement sensibles. D'importantes fluctuations climatiques, plus ou moins cycliques, ont pu être mises en évidence à la suite d'analyses réalisées en de nombreuses zones du globe et à différentes échelles de temps ; ainsi, depuis ses débuts, la Terre a connu plusieurs grands épisodes glaciaires ; même sur les périodes historiques, le climat peut présenter des variations notables. La prévision des crises, comme la sécheresse, dans les temps à venir, nécessiterait la mise en place d'un réseau de mesures à l'échelle du globe permettant un suivi sérieux des paramètres hydroclimatiques ; les déséquilibres, induits consécutivement à l'activité humaine sur le cycle de l'eau ou sur l'activité biologique, ne doivent pas être négligés, mais ont certainement été exagérés.

INTRODUCTION

La sécheresse ! En sommes-nous responsables ?

Cette interrogation est délibérément provocatrice. - Pour le Mali, d'ailleurs, la sécheresse n'est-elle pas en elle-même une provocation ?

D'un dieu en courroux, de la nature ou de l'homme lui-même ?

La sécheresse est-elle une fatalité ?

Peut-on la prévoir ? Peut-on s'y préparer ? Que faire ?

D'entrée de jeu il faut dire que la science, c'est-à-dire les scientifiques - qui ne sont après tout que des hommes comme tous les autres - n'a pas une réponse à donner à chacune de ces questions. IL y a souvent plusieurs réponses à la même question et quelquefois, lorsque l'on veut rester sincère et honnête, il n'y a pas de réponse du tout.

La sécheresse c'est au fond une crise de la nature. Pour répondre aux questions, il faut comprendre et pour comprendre la nature, il faut d'abord l'observer.

1/- NECESSITE D'UN REGARD GLOBAL ET D'UNE DEMARCHE HISTORIQUE.

Pour comprendre la Terre, il faut prendre du recul. Il faut l'observer dans son ensemble, à l'échelle de sa dimension, c'est-à-dire à l'échelle globale. Là on va montrer que tout à la surface de la Terre est lié et que tout vit et évolue de manière solidaire : l'atmosphère, les océans, les sols et la couverture d'altération (les latérites du Mali), les forêts vivantes et fossiles, les animaux (y compris les termites par exemple) et aussi bien sûr les hommes. Tout interagit et fait partie du même être vivant : la Terre comme la termitière de Maeterlinck considérée comme un individu unique composé d'un squelette externe et de milliers de termites aux fonctions diverses, chaque termite abritant en lui-même d'autres individus ; bactéries, parasites, etc... C'est l'hypothèse Gaïa de LOVELOCK qui sert un peu de fondement théorique à l'écologie globale actuelle.

Pour comprendre il faut prendre du recul et observer également les événements dans leur perspective historique. Les phénomènes du temps présent sont presque toujours éclairés par les événements des temps passés. Comprendre le passé, éclairer le présent c'est se mettre en bonne voie pour prévoir l'avenir. Plus modestement, en tout cas, cela peut aider à s'y préparer.

Pour la sécheresse qui visite épisodiquement le Mali, c'est pareil. Pour comprendre la sécheresse du présent et pour se préparer aux sécheresses de l'avenir, il faut analyser les sécheresses du passé. Il faut analyser les fluctuations paléoclimatiques c'est-à-dire les oscillations des vieux climats. Il n'est point nécessaire de s'étendre

pour démontrer, au Mali, pétri d'histoire, d'histoire ancienne et de préhistoire, que la démarche historique est l'un des piliers de la culture et donc de l'intelligence des gens, mais aussi des animaux, des plantes, des choses et donc de la nature.

Nous suivons donc deux itinéraires, deux cheminements imbriqués, deux façons d'élargir notre sphère d'intérêt en la dilatant dans le temps tout d'abord et en l'élargissant dans l'espace ensuite.

Pour comprendre nous suivons ensemble une approche historique et une démarche globale.

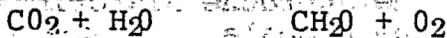
2/- NAISSANCE DE L'UNIVERS ET L'APPARITION DE LA VIE

Le premier signal que l'Univers nous adresse date de 15 milliards d'années. Deux astronomes WILSON et PENZIAS ont entendu au radiotélescope l'écho du "Grand-Boum !", du Big Bang sous forme d'une onde radio audible, flottant dans l'espace intersidéral et vestige de l'intense éclair lumineux qui présida à la création de l'Univers. Depuis 15 milliards d'années, l'Univers est en expansion et la lumière originelle s'est lentement dénaturée et s'est transformée en bruit.

La Terre s'est formée en même temps que le système solaire, voici 4,5 milliards d'années. Dès les premières étapes du refroidissement de notre planète, une atmosphère se met en place, un océan primitif se forme. Le Cycle de l'Eau se met en route. L'énergie transmise par les rayons du soleil entretient l'évaporation, la condensation, la circulation de l'eau dans les différents réservoirs de l'hydrosphère et les échanges incessants entre l'océan, les conti-

nents et l'atmosphère. Au cycle de l'eau correspondent les cycles climatiques et les cycles d'altération, transport et sédimentation des matériaux de surface.

L'atmosphère primitive et l'océan primitif étaient réducteurs et acides. Les gaz dominants étaient le gaz carbonique CO_2 , le méthane CH_4 , l'hydrogène sulfuré H_2S , etc... L'oxygène n'avait pas encore fait son apparition. Petit à petit par altération des continents, l'acidité de la pluie, de l'océan est neutralisée. C'est alors que la vie apparaît, voici 3,8 milliards d'années, en même temps que les premiers dépôts sédimentaires. La synthèse de matière organique à partir du gaz carbonique de l'atmosphère produit de l'oxygène :



Pendant deux milliards d'années l'oxygène produit est utilisé entièrement pour oxyder les substances réductrices. Puis à partir de 1,8 milliards d'années environ, l'oxygène libre fait son apparition dans l'atmosphère. L'oxygène de l'atmosphère, l'oxygène des sulfates de l'océan, l'oxygène des latérites rouges d'Afrique et du Brésil est le résultat du développement de la vie sur Terre. Supprimons brutalement les forêts, brûlons la biomasse vivante et fossile et nous reviendrons en 1 million d'années à la case départ c'est-à-dire à l'atmosphère réductrice et acide des tous premiers jours.

Depuis 1.800 millions d'années, les conditions à la surface de la Terre n'ont en moyenne guère changé. Cependant, autour de cet état moyen, d'importantes fluctuations n'ont cessé d'animer la scène terrestre.

Des continents se sont rassemblés, puis séparés. Des chaînes de montagnes ont surgi puis ont été érodées. Des volcans se sont réveillés puis se sont éteints. Le niveau des mers a fluctué. De gigantesques glaciations sont venues, sept fois de suite, ponctuer les équilibres climatiques. Le niveau des mers a fluctué en même temps que les pulsations et que la dérive des plaques continentales. Plusieurs fois depuis deux milliards d'années, la Terre a subi des conditions semblables à celles que nous connaissons aujourd'hui. Plusieurs fois la masse des roches sédimentaires a été recyclée. Plutôt qu'une lente dérive des conditions qui conduirait à l'homme, finalité de l'Univers, on aboutit au contraire, à un mouvement incessant de flux et de reflux à toutes les échelles de temps.

La lecture de la succession des climats au cours des cent dernières années, ou des paléoclimats au cours des cent derniers millions d'années ou du dernier milliard d'années montre le retour fréquent de crises climatiques semblables mais quelquefois pires, par leur nature et leur ampleur, que celles d'aujourd'hui. S'agit-il d'une succession d'événements catastrophiques imprévisibles ou d'une évolution cyclique et donc prévisible du climat global?

LE CYCLE GLOBAL DE L'EAU

L'énergie solaire irradiée et l'activité tectonique globale sont, par ordre d'importance, les deux moteurs du cycle de l'eau à la surface de la Terre. Une part de l'énergie apportée est transformée en chaleur et en énergie mécanique. La chaleur reçue contribue à maintenir en surface une température moyenne globale relativement élevée.

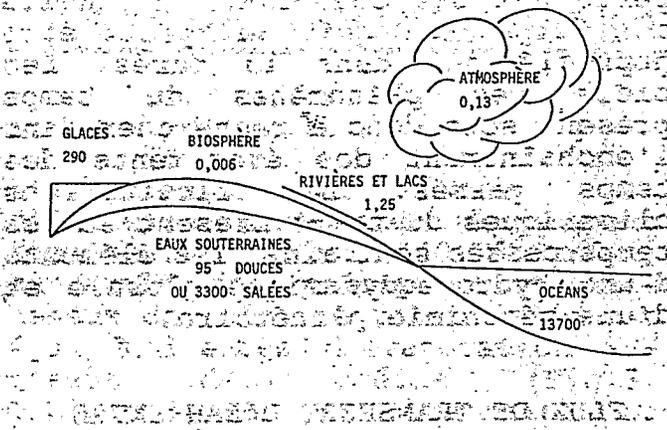


Fig. 1 - Taille des différents réservoirs de l'hydrosphère (10⁶km³)

Réservoirs	Volume 10 ⁶ km ³	Pourcentage du total
Océans	1.370	97,25
Calottes glaciaires	29	2,05
Eaux souterraines profondes	5,3	0,38
Eaux souterraines de surface	4,2	0,30
Lacs	0,125	0,01
Sols humides	0,065	0,005
Atmosphère	0,013	0,001
Rivières	0,0017	0,0001
Biosphère	0,0006	0,00004
Total	1408,7	100,00

D'après Berner et Berner (1987)

Tableau 1 - Volume des différents réservoirs d'eau à la surface de la Terre

(15^e) tandis que l'énergie mécanique anime les transferts d'eau entre les cinq grands réservoirs qui sont l'atmosphère où l'eau se trouve essentiellement à l'état de vapeur, la biosphère composée en grande majorité de carbone et d'eau (CH₂O), la cryosphère faite d'eau à l'état de glace, l'hydrosphère qui comprend l'océan ainsi que les lacs et les rivières qui coulent sur les continents et enfin la lithosphère qui englobe l'eau d'hydratation des minéraux ainsi que l'eau prise dans les pores des roches (Tableau 1, Fig.1). L'océan est le réservoir le plus vaste. En surface, de l'eau s'évapore, se condense en fines gouttelettes et forme des nuages.

Les nuages sont transformés par le vent et distribués au-dessus des continents et des océans. Dans les zones où se forment des courants ascendants, les masses d'air humide se refroidissent, la vapeur se condense. L'eau, sous forme de pluie ou de neige fondue, ou bien retourne directement à l'océan, ou bien se répand sur les continents et arrose plus particulièrement les zones d'altitude et les chaînes de montagnes. L'eau s'écoule par gravité des régions les plus hautes vers les régions les plus basses en altitude et finalement vers les mers, les océans et les cuvettes continentales fermées. Dans les deux derniers cas, l'eau s'évapore à nouveau pour alimenter ailleurs les précipitations.

Une partie des masses d'eau qui tombent sur les continents sous forme de pluie ruisselle à la surface du sol et gagne indirectement le lit des ruisseaux, une autre partie s'infiltré, alimente les nappes ou les réservoirs souterrains, circule lentement vers les exutoires, grossit à son tour les rivières ou les fleuves et rejoint les océans

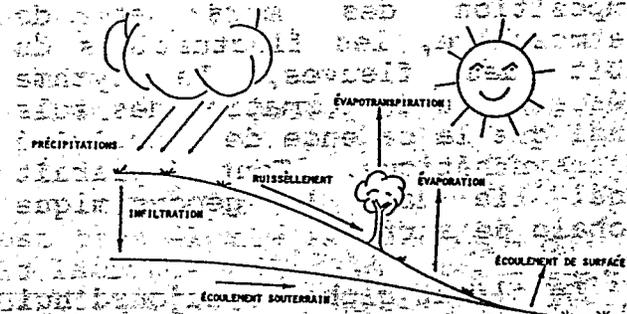


Fig. 2 - Le cycle hydrologique continental : précipitations, ruissellement de surface, infiltration, écoulement souterrain, écoulement souterrain, évapotranspiration

pour constituer au total ce que l'on appelle l'écoulement continental (Fig.2)

En altitude, au-dessus des chaînes de montagnes bien arrosées, des glaciers se forment. Autour des pôles, des calottes glaciaires très

épaisses immobilisent d'importantes quantités d'eau. Suivant les époques, l'eau mise en banque dans la cryosphère augmente si la température aux pôles baisse, ou diminue si la température globale augmente.

Tout provient de l'Océan pour finalement y retourner par un chemin ou par un autre. Ceci constitue le Cycle Global de l'Eau.

L'eau en circulation entraîne en solution ou en suspension des matériaux de l'écorce terrestre. L'eau est l'agent des transferts de matière dont dépend aussi par un itinéraire détourné le climat. En observant la Terre dans sa globalité ainsi qu'au fil de sa longue histoire on est surpris d'apprendre que le Climat Global est essentiellement déterminé par le relief, l'étendue, la morphologie ou la position des aires continentales et donc in fine, déterminé par l'activité tectonique globale. Dans le Cycle de l'Eau entrent ainsi en jeu à la fois la tectonique des plaques, les variations de configuration des continents, les changements d'étendue et de position des océans, les oscillations de composition des mers et de l'atmosphère, les fluctuations du débit des fleuves, le rythme d'érosion ou de formation des sols ainsi que la cadence de l'activité photosynthétique. Tout apparaît ainsi lié dans la géodynamique globale de surface.

Le climat global d'aujourd'hui apparaît à la fois comme le reflet pondéré des diversités climatiques locales et comme le résultat combiné des différentes fluctuations saisonnières, annuelles, séculaires, millénaires, des conditions météorologiques. Le climat est donc un objet terrestre en entier, et qui intègre en fait un ensemble de particularités régionales et locales complexes. C'est aussi l'enveloppe d'oscillations se produisant autour

d'un état moyen qui ne peut être perçu que par changement d'échelle de temps et qui ne peut être apprécié que dans la durée. Les clefs des phénomènes du temps présent sont donc à rechercher dans l'enchaînement des événements des temps passés. Les fluctuations climatiques du temps présent et des temps passés sont ainsi les éléments d'une hydrogéodynamique globale et d'une géochimie planétaire.

FLUX DE TRANSFERT D'EAU ENTRE RESERVOIRS

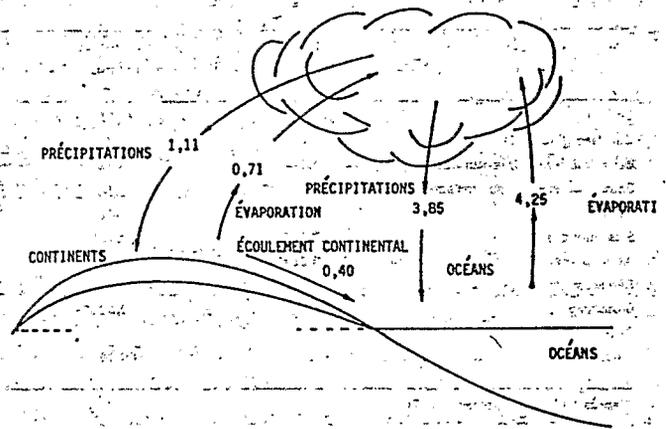


Fig. 3 - Le Cycle global de l'eau : flux annuels ($10^6 \text{ km}^3/\text{an}$) de transferts entre les principaux réservoirs : l'atmosphère, l'océan et les eaux continentales

Flux	ϕ $10^6 \text{ km}^3/\text{an}$	P mm/an
Evaporation au-dessus des océans	4,25	1176
Précipitations au-dessus des océans	3,85	1066
Déficit de pluviosité au-dessus des océans	0,40	110
Evaporation au-dessus des continents	0,71	480
Précipitation au-dessus des continents	1,11	746
Écoulement continental	0,40	266

D'après Baumgartner et Reichel (1975)

Tableau 3 - Flux de circulation d'eau à la surface de la Terre ($10^6 \text{ km}^3/\text{an}$)

Au-dessus des océans, l'évaporation ($425 \cdot 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$) l'emporte sur les précipitations ($385 \cdot 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$). La différence est l'excès d'évaporation ($40 \cdot 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$). Au-dessus des continents, en revanche, les précipitations ($111 \cdot 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$) l'emportent sur

l'évaporation ($71 \cdot 10^3 \text{ Km}^3/\text{an}$). La différence représente l'écoulement continental global ($40 \cdot 10^3 \text{ Km}^3/\text{an}$) ou excès des précipitations au-dessus des continents, précisément égal à l'excès d'évaporation au-dessus des océans (Fig.3, Tableau 3). Si pour une raison ou pour une autre, l'évaporation au-dessus des océans venait à augmenter, deux scénarios simples pourraient être envisagés : ou bien la pluviosité au-dessus de l'océan augmenterait d'autant et l'écoulement continental resterait le même, ou bien la pluviosité au-dessus de l'océan resterait la même et c'est alors l'écoulement continental qui augmenterait d'autant le bilan hydrologique des continents.

Au total, l'activité du cycle hydrologique global est estimée par la somme des volumes d'eau qui chaque année sont évaporés (E) ou précipités (P) sur les continents et sur les océans ($385 + 111 = 71 + 425 = 496 \cdot 10^3 \text{ Km}^3/\text{an}$).

En raisonnant en hauteur d'eau et non plus en volume, l'évaporation (E) au-dessus des océans est en moyenne de 1.176 mm/an tandis que la pluviosité (P) est de 1.066 mm/an. Sur les continents les hauteurs d'eau correspondantes sont plus faibles : 480 mm/an pour l'évaporation (E) et 746 mm/an pour les précipitations (P). L'écoulement continental (D) représente 269 mm/an.

Le coefficient d'écoulement continental global (Kd), qui est le rapport entre la quantité d'eau écoulée ou drainage continental (D) à la quantité d'eau tombée sous forme de pluie (P)

$Kd = D/P = 0.36$ est assez élevé mais reste, bien entendu, inférieur au coefficient d'évaporation continentale globale : $Ke = E/P = 0.64$.

Au total, pour l'ensemble du globe, c'est-à-dire des océans et des continents réunis, la hauteur d'eau évaporée ou précipitée annuellement est la même (973 mm, soit près d'un mètre), de sorte que l'écoulement $D=P-E$ est nul.

DÉCOMPOSITION DU BILAN HYDROLOGIQUE GLOBAL PAR TRANCHE DE LATITUDE

Les deux hémisphères Nord et Sud, ici considérés ensemble, sont découpés en neuf tranches de 10 de latitude. On retrouve dans les Tableaux 4 et 5, découpés par tranches de latitude, les valeurs des aires des continents et des océans déjà présentés dans le Tableau 2 ainsi que les bilans hydrologiques des océans et des continents nettement distincts les uns des autres.

BILAN HYDROLOGIQUE DES OCEANS (Fig.4)

Sur les océans, l'évaporation est très élevée entre l'équateur et la latitude 40 ; elle représente 83% du volume total évaporé sur mer. Le maximum est enregistré à la latitude des tropiques, le minimum l'est aux latitudes polaires. Les précipitations sur l'océan sont les plus élevées aux latitudes équatoriales (0 - 10) et au latitudes moyennes (40 - 60) où elles l'emportent sur l'évaporation ; en revanche les précipitations sont les plus faibles aux latitudes tropicales entre 20 et 40 ainsi qu'aux latitudes polaires.

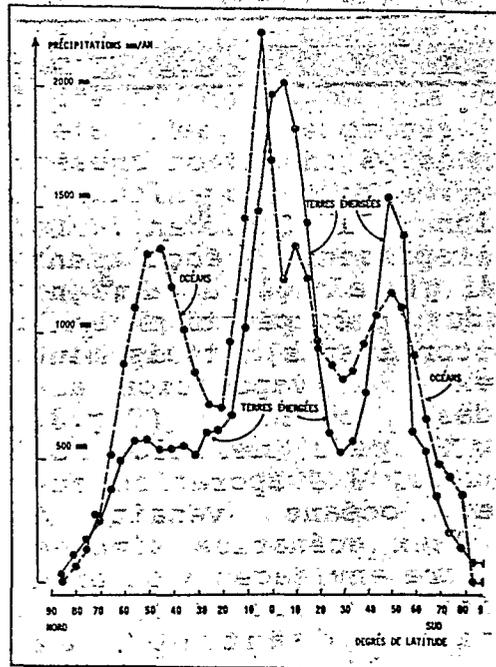
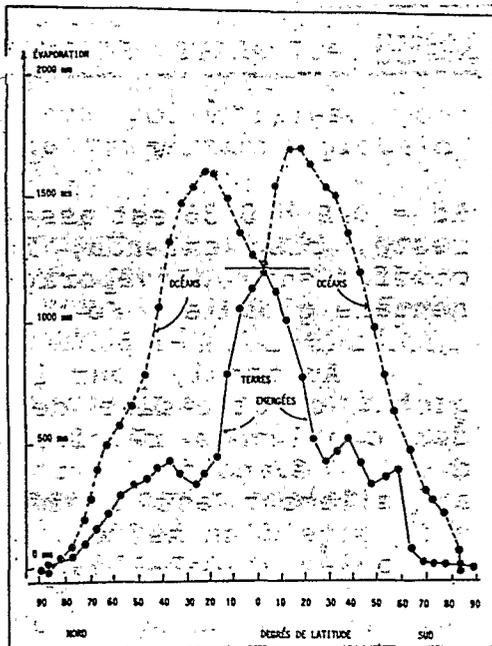


Fig. 4 - Répartition par tranche de latitude des précipitations et de l'évaporation au-dessus des océans et des terres émergées

Au total, l'évaporation sur les continents suit la pluviosité tout en restant partout inférieure, puisqu'une terre ne peut chaque année évaporer plus d'eau qu'elle n'en reçoit. C'est ainsi que le maximum d'évaporation est observé dans le domaine occupé par la grande forêt équatoriale qui se

comporte en fait comme un océan ou une nappe d'eau libre. Ainsi autour de l'équateur, précipitations et évaporation sont semblables sur terre et sur mer. L'excès de pluviosité par rapport à l'évaporation est également important et du même ordre de grandeur dans un cas comme dans l'autre. Un minimum relatif d'évaporation est enregistré sur terre à la latitude des tropiques, où la pluviosité également faiblit. Le minimum des précipitations, de l'évaporation et de l'écoulement est marqué aux alentours des pôles. L'écoulement continental important surtout aux basses latitudes (zone équatoriale) et aux latitudes moyennes (zone tempérée) provient, rappelons-le, essentiellement de l'excès d'évaporation au-dessus de l'océan, enregistré aux latitudes tropicales. Le climat du globe dépend ainsi d'importants transferts d'eau qui se produisent suivant la direction des vents dominants vers l'Est, l'Ouest, le Nord ou le Sud

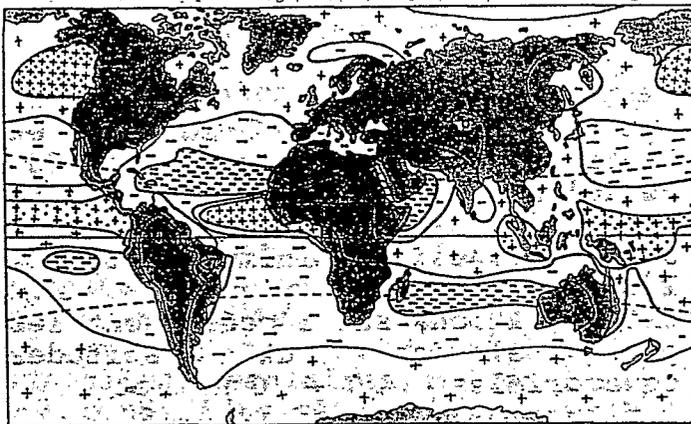


Fig. 5 - Excédents et déficits pluviométriques à la surface du Globe. En ++, les excédents supérieurs à 1000 mm/an. En tiretés, les déficits supérieurs à 1000 mm/an, d'après LISITZIN (1971)

selon la latitude et en fonction de la position des anticyclones et des dépressions (Fig.5). C'est autour des tropiques que l'excès d'évaporation sur les précipitations qui caractérise le bilan hydrologique de l'océan est le plus marqué. Finalement, l'écoulement continental, créé sur Terre par l'excès des précipitations, provient en fait de l'excès d'évaporation dans la zone tropicale océanique (Fig.5).

BILAN HYDROLOGIQUE DES CONTINENTS (Fig.4)

Sur les continents, les précipitations sont les plus marquées aux latitudes équatoriales, vont en décroissant vers les latitudes tropicales puis en augmentant légèrement vers les latitudes moyennes, pour diminuer à nouveau vers les pôles. A la différence de ce que l'on observe sur les océans, l'écoulement sur les continents (D) est égal à l'excédent des précipitations (P) sur l'évaporation (E), rapporté à la superficie (S) : $D \times S = (P - E) \times S$. Pour l'ensemble des superficies continentales du globe terrestre, l'écoulement global moyen établi sur les données des trente dernières années est de : $0.40 \cdot 10^{21} \text{ cm}^3/\text{an}$ soit encore $40 \cdot 10^6 \text{ km}^3/\text{an}$ soit encore de $1.27 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'écoulement continental global est la somme des débits de chacun des ruisseaux, rivières et fleuves qui cheminent à la surface des continents et qui se jettent dans la mer. D'une année sur l'autre le débit de chacun des cours d'eau fluctue et l'addition de ces débits fluctuants, par région, par continent ou pour l'ensemble du globe terrestre, donne également un écoulement lui aussi oscillant

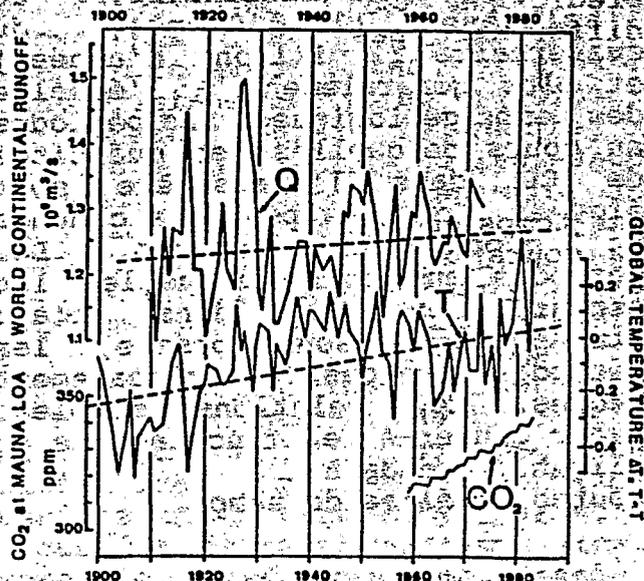


Fig. 6 - Fluctuations de l'écoulement continental global, de la température et de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère au cours du siècle dernier d'après PROBST et TARDY (1989).

A l'échelle du globe terrestre en entier et depuis 80 ans environ, l'écoulement continental global n'a cessé d'osciller mais d'augmenter corrélativement à un accroissement de la température moyenne globale. Cette augmentation de la température est classiquement attribuée à une augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère. Cependant, les fluctuations enregistrées montrent que certaines années sont plus chaudes, d'autres plus fraîches ; certaines sont plus humides, d'autres plus sèches.

L'analyse statistique des données montre alors que, dans les trois quarts des cas, à l'échelle de l'année, les deux modes principaux du climat global sont : chaud et humide (1915, 1926, 1960 et 1972) s'opposant à froid et sec (1920, 1930, 1954 et 1964). Dans le quart des cas restant, le mode chaud et sec (1940) s'oppose au mode frais et humide (1950).

Cette observation sert de

base à l'élaboration de modèles de prédiction du climat global à différents pas de temps : à l'échelle de la décennie, du siècle, du millénaire, de l'holocène (12.000 ans), du quaternaire (2 millions d'années) et plus généralement à l'échelle des temps géologiques. Les périodes au cours desquelles les quantités de CO₂ dans l'atmosphère sont élevées, sont les périodes chaudes et globalement humides. Les périodes au cours desquelles les teneurs en CO₂ dans l'air atmosphérique sont basses, les périodes froides et globalement sèches. Ces relations semblent avoir gouverné les fluctuations du climat du monde à toutes échelles de temps.

DECALAGES ET OPPOSITIONS DES CYCLES CLIMATIQUES

Les oscillations de l'écoulement global sont faites de la somme des fluctuations du débit des fleuves par région. Lorsque l'on examine les fluctuations de débit d'un fleuve, comme la Garonne par exemple, depuis le début du siècle (Fig.7), on remarque que certaines époques ont été humides (1915, 1930, 1935, 1965) et d'autres beaucoup plus sèches (les années 1942, 1946 et surtout 1949). En comparant ces fluctuations à celles du fleuve Sénégal, on constate un déphasage très net. L'année 1949, très sèche pour l'ensemble de la France et pour une partie de l'Europe est une année relativement humide pour le fleuve Sénégal et une partie du Sahel d'Afrique. Les années 1970-1975 et particulièrement 1972, très sèches dans le Sahel sont des années relativement humides dans le bassin de la Garonne et en Europe de l'Ouest (Fig.7). De chaque côté de l'Atlantique et lorsque l'on compare, par exemple, les fluctuations de débit du Sénégal et du Río Sao Francisco au Brésil

(Fig.7) ou celles du Congo et de l'Amazonie (Fig.8), on constate que les fluctuations des débits annuels sont dans la plupart des cas opposées. C'est dire que, d'une façon générale, les années plutôt sèches en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale sont plutôt humides au Brésil et que les sécheresses du Nord-Est du Brésil correspondent à des périodes plutôt humides en Afrique.

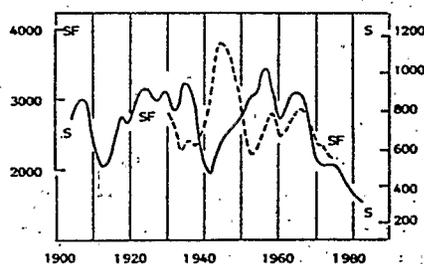
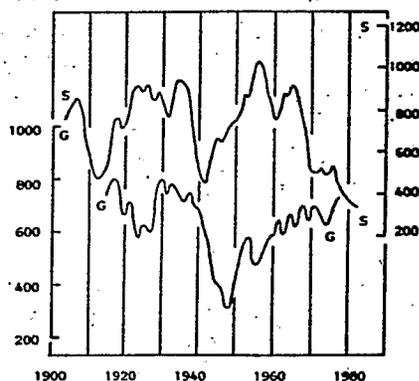


Fig.7- Fluctuations de débit, décalées pour la Garonne (G) et le Sénégal (S), entre l'Europe et l'Afrique, et en opposition de phase pour le Sénégal (S) et le Sao Francisco (SF), entre l'Afrique et le Brésil.

De telles oppositions se remarquent également à l'échelle de continents entiers, encore que les moyennes établies pour de vastes régions soient moins significatives. On remarque ainsi (Fig.9) qu'au cours du siècle dernier, alors que le débit global augmentait sensiblement, l'écoulement sur l'Afrique, l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud augmentait également, mais diminuait sur l'Europe et l'Asie.

La comparaison des fluctuations du débit des rivières

examinées de proche en proche soit d'Ouest en Est, et par exemple, de la Loire en France, à l'Elbe en Pologne, à l'Oural en Russie et à l'Ienisseï en Sibérie, soit du Sud au Nord, et par exemple du Rio Sao Francisco au Brésil, jusqu'au fleuve Missouri aux Etats-Unis et à la rivière North Saskatchewan au Canada, montre un phénomène de téléconnexion quasi cyclique (Fig.10). Ainsi, la grande sécheresse qui se produit en Europe

basses pressions. On a coutume de représenter la position des anticyclones, des dépressions et des cellules convectives de l'air atmosphérique comme fixes (Fig.11). En fait, leurs dispositions oscillent et à travers le monde, se déplacent, téléconnectées d'Est en Ouest, du Sud au Nord puis du Nord au Sud et reviennent à la même place tous les 3 à 5 ans de façon quasi périodique (Fig.12).

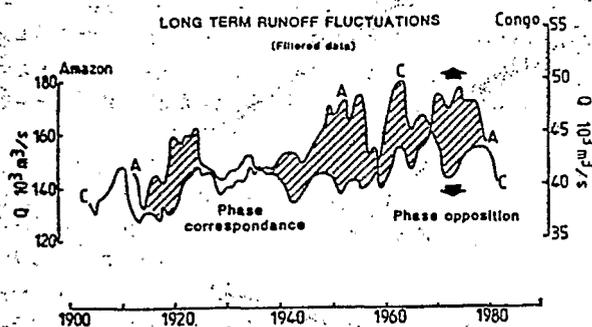


Fig. 8 - Fluctuations en opposition des débits du Congo et de l'Amazonie ou de l'Afrique et de l'Amérique du Sud

de l'Ouest en 1949 se propage vers l'Est et apparaît en Pologne en 1951, en Russie en 1954 et en Sibérie en 1956. Lui succède une période humide en Europe de l'Ouest qui se déplace vers l'Est à la même vitesse. De même, la période humide de 1945 au Brésil, se propage vers le Nord, apparaît en 1950 aux Etats-Unis et 1955 au Nord du Canada, en même temps qu'un nouvel épisode sec s'installe en Amérique du Sud (Fig.10).

On continue sans aléas si, la distance augmentant, le décalage s'amplifie, les débits fluctuent en opposition de phase et reviennent à nouveau en phase pour des distances plus grandes encore. Ce phénomène oscillant ressemble fort à celui que décrit Krishnamurti pour les changements de position des domaines de hautes pressions et

Les fluctuations des débits sont donc rattachées aux mouvements quasi périodiques qui affectent la position des domaines de basses pressions et de hautes pressions. Lorsque les dépressions sont, dans l'ensemble, situées plutôt au-dessus des continents, on obtient une année humide à écoulement continental élevé même si certaines régions, défavorisées parce qu'occupées par des anticyclones, restent sèches. Lorsqu'en revanche les anticyclones sont, dans l'ensemble, plus volontiers ancrés sur les continents, on constate que le climat global, s'il est seulement perçu sur les continents, apparaît plutôt sec alors qu'au contraire le climat des océans plutôt visités par des dépressions devrait apparaître comme plus humide.

On doit d'abord réaliser que le climat d'une région de la Terre, quelle qu'en soit la taille, n'est jamais le reflet fidèle du climat global. On doit ensuite percevoir que les océans par excès d'évaporation fournissent un excès de pluviosité sur les continents, qui se traduit par l'écoulement des fleuves. Lorsque deux continents bordent le même océan, tout se passe comme si l'excès d'eau évaporé au-dessus de la mer était distribué tantôt ici et tantôt là, sur Terre, alors que la quantité totale disponible peut rester constante. En d'autres termes, ce n'est pas parce que le climat de tout un continent évolue

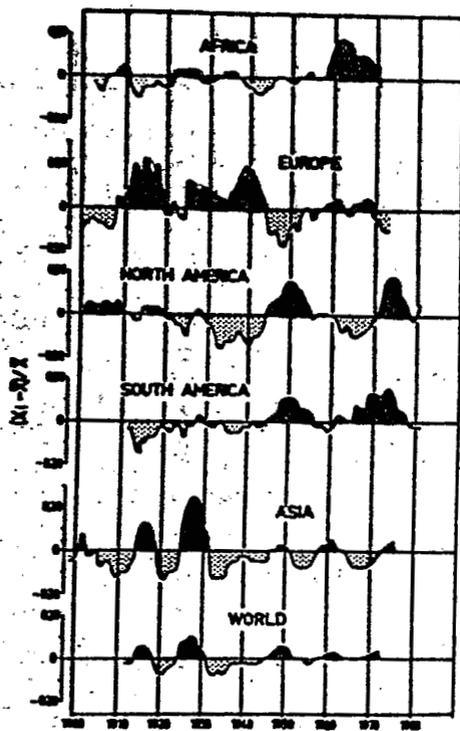


Fig. 9 - Fluctuations des débits sur les différents continents, depuis le début du siècle. Le débit continental augmente sur l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Amérique du Nord et l'ensemble du globe, mais décroît sur l'Europe et sur l'Asie (d'après PROBST et TARDY, 1989).

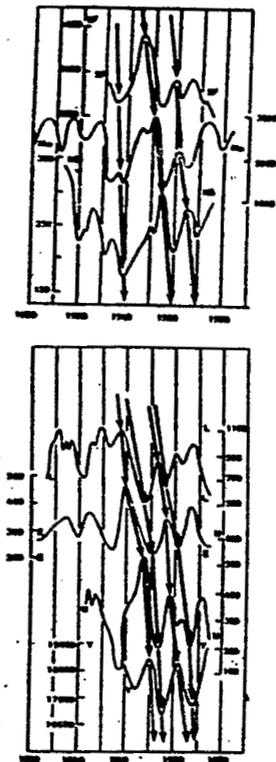


Fig. 10 - Téléconnection, décalages, opposition de phase et fluctuations du débit des rivières d'Ouest en Est, de l'Europe à la Sibérie et du Sud au Nord du Brésil à l'Alaska.

Les fluctuations du débit des rivières sont progressivement décalées d'Ouest en Est et du Nord au Sud. Lorsque la distance est grande on observe même des fluctuations en contraste de phase. Les années sèches d'un côté correspondent aux années humides de l'autre (PROBST et TARDY, 1987, 1989) (SF, Sao Francisco ; Mo, Missouri ; NS, North Saskatchewan ; L, Loire ; E, Elbe ; U, Oural ; Y, Yenisseï)

dans un sens que le climat global change dans le même sens et que le climat du continent voisin évolue également dans le même sens. Bien au contraire, car une compensation se produit ailleurs sur d'autres continents. On doit comprendre enfin que ce que l'on appelle climat est une somme de paramètres avant tout ressentis ou mesurés sur Terre. Ainsi, lorsque le climat sur l'ensemble des continents devient plus humide, il se peut que sur les océans le climat devienne plus sec. On ne peut tirer de conclusion sur le climat global qu'en prenant aussi en compte l'évolution du climat sur les océans. Là encore, il se peut très bien que l'augmentation de la pluviosité et du débit enregistrés sur les continents au siècle dernier soit compensée par une diminution de pluviosité ou une augmentation de l'évaporation sur les océans sans pour autant que les conditions climatiques globales aient beaucoup changé. Les fluctuations quasi cycliques du climat se produisent sans doute sous l'effet de changements externes à la Terre (flux de chaleur reçu) ou internes à la Terre (flux de gaz carbonique émis). Les fluctuations perçues ne sont peut-être que des changements dans la façon de distribuer les excédents ou les déficits d'une région à l'autre, d'un continent à l'autre, d'un océan à l'autre ou de l'ensemble des océans vers l'ensemble des continents. A l'échelle des temps géologiques, les fluctuations quasi périodiques de courte période s'estompent. Ne sont perceptibles que les longues oscillations dues au déplacement en latitudes des continents et aux pulsions de la tectonique globale des plaques de lithosphère.

LE CYCLE GLOBAL DE L'EAU AU COURS DES TEMPS PHANEROZOIQUES ET DES DERNIERS 570 MILLIONS D'ANNEES

Depuis 1.000 millions d'années les continents se rassemblent, se

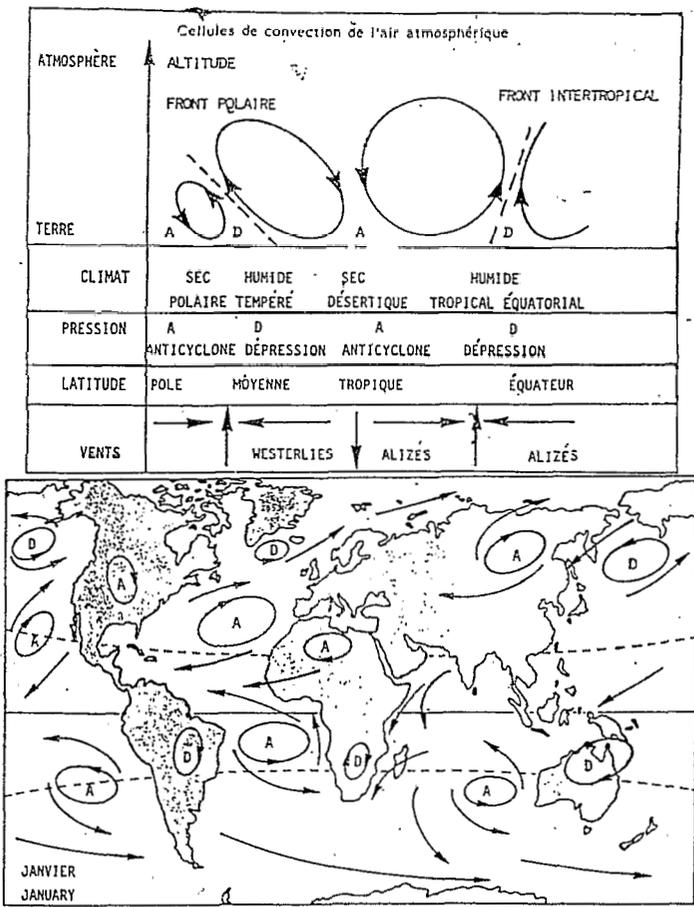


Fig. 11 - Cellules convectives de l'air atmosphérique et Position moyenne des anticyclones et des dépressions au mois de Janvier.

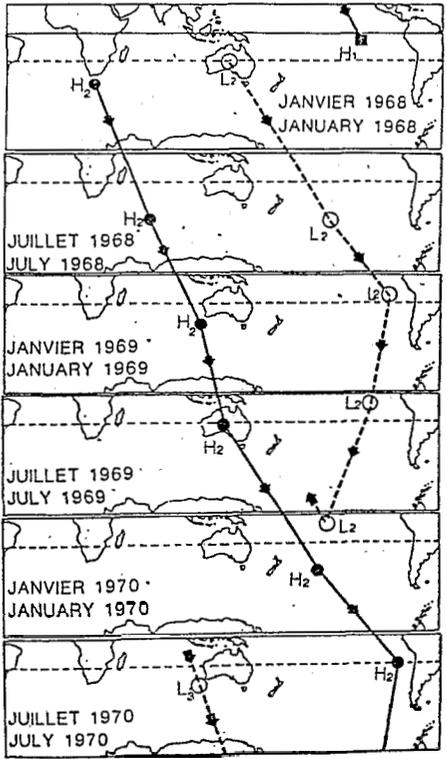


Fig. 12- Téléconnexions et décalages semi-périodiques de la position des anticyclones et des dépressions au-dessus de l'Océan Indien et de l'Océan Pacifique (d'après KRISHNAMURTI et al., 1986)

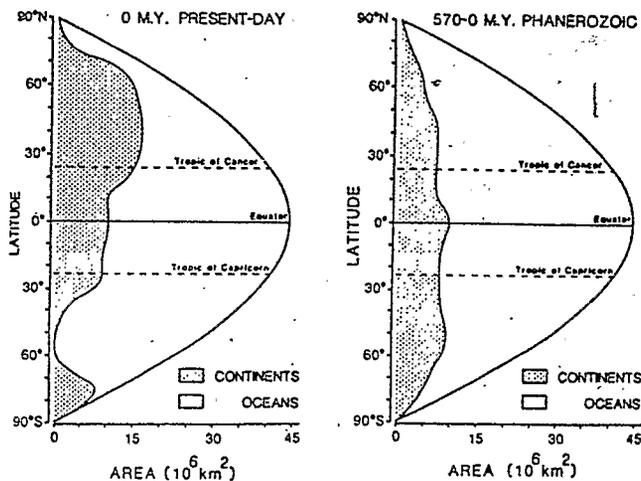
morcellent, dérivent et s'assemblent à nouveau. La paléogéographie qui, d'une part, décrit l'étendue ou la position relative des continents et des océans les uns par rapport aux autres et qui, d'autre part, les situe en latitude par rapport à l'équateur, aux tropiques et aux pôles, a pu être reconstituée avec une relative précision, depuis le début des temps phanérozoïques, c'est-à-dire depuis environ 600 millions d'années (Fig.13). Le climat global dépend, bien sûr, de la paléogéographie. Au Cambrien (550 Ma) par exemple, les continents sont morcelés et dispersés à l'intérieur de la ceinture intertropicale. Le climat continental y fut très probablement chaud et humide.

Au Permien (250 Ma), ils sont en revanche agglomérés et forment un grand continent appelé Pangée montrant de vastes superficies regroupées autour du pôle Sud. Le climat continental est alors froid et sec. Au Crétacé (100 Ma), les continents sont divisés à nouveau et tendent à se déplacer vers le Nord. Le climat est à nouveau chaud et humide. A l'époque actuelle, mis à part l'Antarctique centré sur le pôle Sud, les continents sont plutôt regroupés vers les hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Le climat global d'aujourd'hui est froid et sec (Fig.13). Il est relativement aisé de reconstituer les éléments du climat continental global en appliquant aux continents anciens, tranche de latitude par tranche de latitude, les données de la pluviométrie (P), de l'évaporation (E) et du drainage ou écoulement de surface (D) qui caractérisent la Terre d'aujourd'hui. On traduit alors en chiffres ce que suggère l'examen des cartes paléogéographiques. L'évaluation du débit total des rivières, c'est-à-dire de l'écoulement continental global depuis

600 millions d'années (Fig.14), appelle plusieurs commentaires. On ne remarque tout d'abord ni de lente évolution ni de lente dégradation pas plus qu'une lente amélioration du climat, mais tout simplement des fluctuations autour d'un état moyen qui n'est pas nécessairement semblable à l'état actuel. Les fluctuations marquent le retour, plusieurs fois répété, de conditions semblables : ère glaciaire au Carbonifère supérieur, au Permien ainsi qu'au Quaternaire ; période chaude et humide au Dévonien et au Crétacé ; climat global probablement tempéré au Silurien, au Carbonifère inférieur et au Miocène, etc... On remarque également que l'amplitude des fluctuations est du même ordre de grandeur que celle que nous avons enregistrée au cours du dernier siècle. Pour un écoulement global moyen de $48 \cdot 10^{20}$ g/an, le maximum pourrait être situé au Cambrien avec $63 \cdot 10^{20}$ g/an et le minimum au Jurassique inférieur avec $38 \cdot 10^{20}$ g/an. D'une manière analogue, lors du dernier siècle le débit global a fluctué autour d'une moyenne de $40 \cdot 10^{20}$ cm³/an entre $34 \cdot 10^{20}$ cm³/an en 1911 et un maximum de $47 \cdot 10^{20}$ cm³/an en 1926 et 1927.

Il est donc très vraisemblable que la vigueur du cycle global de l'eau et que les conditions du climat ou de l'environnement à la surface de la Terre aient depuis plus d'un milliard d'années fluctué autour d'un état moyen globalement plus chaud (19° au lieu de 15° aujourd'hui) et plus humide ($48 \cdot 10^{20}$ cm³/an au lieu de $40 \cdot 10^{20}$ cm³/an) que celui que nous connaissons aujourd'hui. La Terre, au cours du dernier millions d'années, a été soumise à un climat qui est peut-être le plus froid et le plus sec jamais enregistré au cours de son histoire. Le cycle de l'eau est sans doute aujourd'hui très ralenti par rapport à ce qu'il fut au cours de la longue histoire de notre planète.

Fig. 13 - Position des continents et distribution des aires continentales par tranche de latitude au Cambrien (550 Ma), au Permien (250 Ma), au Crétacé (100 Ma) et au Vindobonien (15 Ma)



Pour conclure, on peut ainsi concevoir que les excès de pluviosité ou d'évaporation sur les continents ou sur les océans, ou que les pulsations du climat global à l'échelle d'une année, d'une décennie, d'un siècle, d'un millénaire, etc..., c'est-à-dire à l'échelle de $1, 10, 10^2, 10^3, 10^4$,

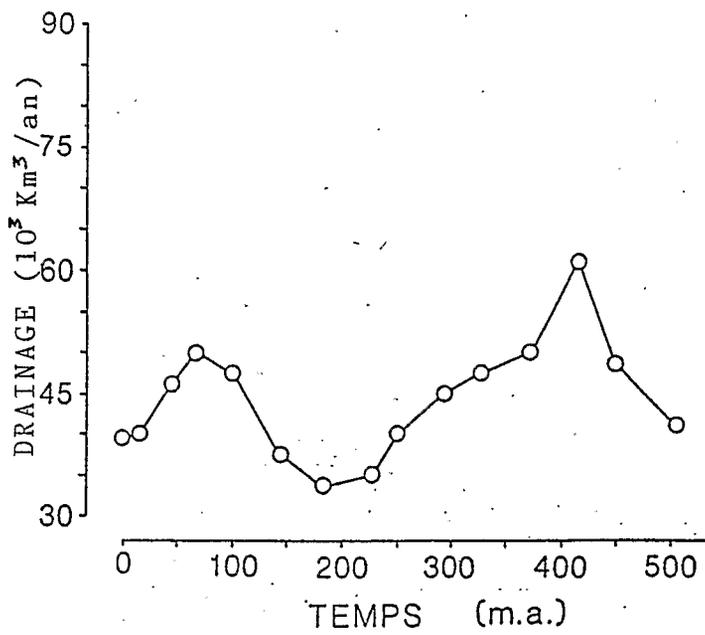
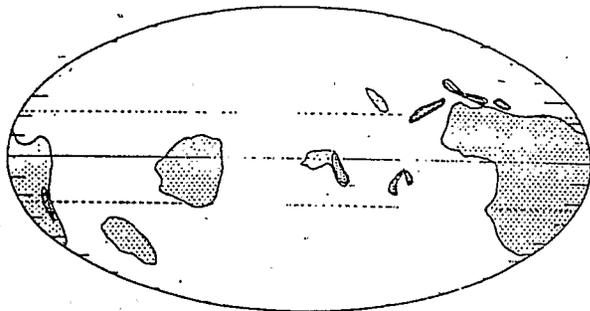
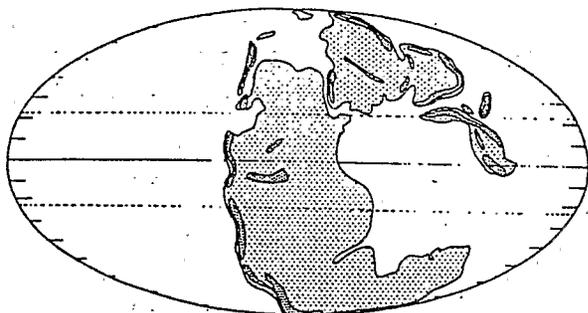
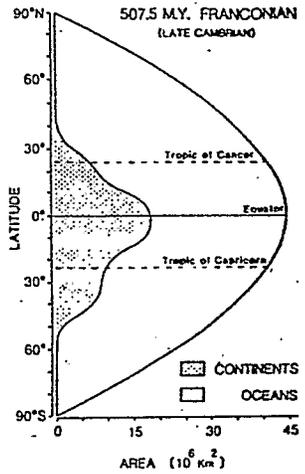


Fig. 14 - Fluctuations de l'écoulement continental global au cours des temps Phanérozoïques, c'est-à-dire depuis près de 600 millions d'années (d'après TARDY, N'KOUNKOU et PROBST, 1989)



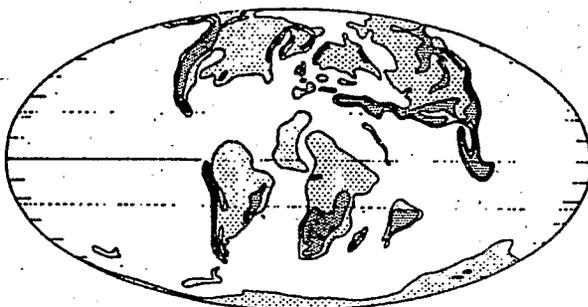
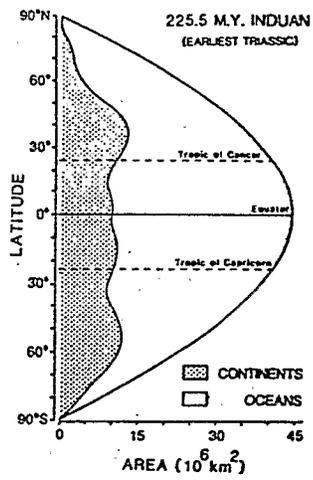
507.5 M.A. FRANCONIEN
(CAMBRIEN SUPERIEUR)

BASSES TERRES
 HAUTES TERRES



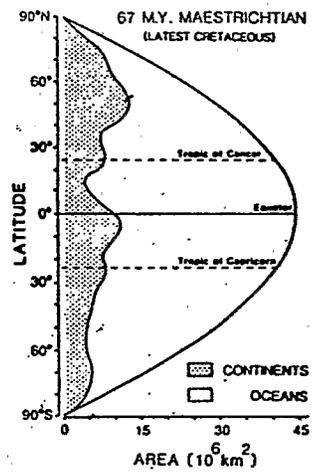
225.5 M.Y. INDIAN
(EARLIEST TRIASSIC)

LOWLANDS
 HIGHLANDS



67 M.Y. MAESTRICHTIAN
(LATEST CRETACEOUS)

LOWLANDS
 HIGHLANDS



10^5 , 10^6 , etc... sont réglés par les mouvements oscillants des hautes et des basses pressions au travers d'une grille fixe de continents et d'océans figés sur place. Les fluctuations du cycle global de l'eau peuvent apparaître en première approximation comme différentes possibilités oscillantes des répartitions des masses d'eau sur Terre, toutes choses restant égales par ailleurs. On peut également retenir que les oscillations du cycle global de l'eau, au cours des temps géologiques, sont réglées par le mouvement des continents au travers d'une grille climatique zonale où les anticyclones et les dépressions, les zones de divergence ou de convergence de l'air et les zones d'humidité ou de sécheresse avaient chacun gardé une position déterminée, figée dans le temps. Les fluctuations du climat global apparaissent alors comme essentiellement réglées, toutes choses égales par ailleurs, par les mouvements des masses continentales et les pulsions de la tectonique des plaques.

Finalement, le cycle de l'eau qui tour à tour règle ou reflète les conditions de vie sur Terre, apparaît non pas en lente évolution depuis les temps géologiques les plus reculés, mais au contraire animé d'incessantes fluctuations qui ont sans doute autorisé la diversification et donc l'évolution des êtres vivants.

C O N C L U S I O N

* La sécheresse est une crise climatique.

* Les crises climatiques sont des phénomènes quasi cycliques et polycycliques, c'est-à-dire faits de la surimposition de plusieurs cycles de périodes différentes. C'est la raison pour laquelle ils sont souvent d'apparence cahotique : leur périodicité n'est pas régulière.

* Parce que l'on ne dispose pas de mesures depuis un temps suffisamment long, on ne peut prévoir la date d'arrivée des sécheresses. Cependant, leur retour est inéluctable. Si l'on ne peut les prévoir, on peut s'y préparer.

* L'analyse historique des crises précède nécessairement la capacité que l'on aura de prévoir. C'est la raison pour laquelle il est urgent de promouvoir des observatoires permanents de l'environnement climatique et de mettre en place des suivis continus des paramètres hydroclimatiques.

* Les crises climatiques sont enfin des événements de bio-géo-dynamique qui n'intéressent pas seulement la pluie ou l'évaporation mais encore la composition de l'atmosphère, la composition de l'océan. Le suivi des paramètres doit être hydro-bio-géochimique.

* Les sécheresses sont des crises climatiques téléconnectées, c'est-à-dire reliées les unes aux autres dans l'espace et dans le temps sur l'ensemble de la Terre.

* Les sécheresses sont des phénomènes globaux qui se produisent à l'échelle de la Terre entière. Le monde entier est

concerné.

* La sécheresse est pour le Mali une crise très grave qui inéluctablement reviendra. Personne ne peut dire aujourd'hui quand, personne ne peut dire si ce sera plus dur ou moins dur que les fois précédentes. La note pessimiste est que la sécheresse reviendra, comme d'ailleurs d'autres crises climatiques et par exemple les inondations. La note optimiste si l'on peut dire est que, dans le passé, le Mali, comme les autres parties du monde a subi des crises climatiques et des sécheresses beaucoup plus dures que celles de ces dernières années. Les dégâts ont pu être importants. Se souvient-on de la grande sécheresse d'il y a 18 000 ans, comme les Hébreux dans la Bible se sont souvenus du déluge d'il y a 7 000 ans ? Ne passons peut-être pas trop de temps à chercher le coupable ("à qui la faute?"), mais préparons-nous plutôt aux éventualités par des mesures concrètes de protection et cherchons à en savoir plus de manière à fournir chaque année une information plus complète, seule capable dans l'avenir d'assurer la maîtrise de ces crises, si dures à supporter pour les populations.

Pour finir je vous propose une

belle page écrite par Jacques ROBIN dans son livre "Changer d'ère" paru aux Editions du Seuil en 1989.

"Au cours de ces dernières années, c'est un véritable séisme qui secoue les fondements de la connaissance scientifique, considérés depuis des siècles - depuis Descartes - comme inébranlables. Voici à peine une génération, l'Univers nous était présenté comme irrévocablement condamné. Son énergie calorifique initiale ne pouvait que se dégrader jusqu'à un maximum d'entropie qui permettrait, si nous étions encore de ce monde dans quelques milliards d'années, de mesurer l'état de totale désorganisation de la matière."

Dans cette course à la mort, l'intervention de l'homme ne pouvait qu'aggraver les choses et LEVI-STRAUSS en faisait le constat :

"L'homme apparaît comme une machine un peu plus perfectionnée que les autres, travaillant à la dégradation d'un ordre originel et précipitant une matière puissamment organisée vers une inertie encore plus grande qui sera un jour définitive."

En 1970, Jacques MONOD allait plus loin encore dans le pessimisme : en projetant l'homme hors de l'Univers, il ne lui trouvait plus d'autres rapports avec celui-ci qu'une position d'observateur absolu, idéale soit dit en passant, ce qui permet au scientifique de manipuler le monde à sa guise. Dans un passage aussi célèbre que ceux où Sartre présentait l'homme comme une passion inutile et où FOUCAULT le voyait déjà mort, MONOD proclamait l'homme en marge de l'Univers.

Or, à peine quinze ans plus tard, Hubert REEVES propose à un large public une vision inverse. Se fondant en particulier sur la découverte d'un rayonnement fossile, témoin de l'acte de naissance de l'Univers, il montre que, tout comme

l'homme qui en fait intégralement partie, cet Univers a une histoire et nous sommes loin d'être des étrangers dans une aventure qui se poursuit sur des distances d'années-lumière.

Il y a PRIGOGINE et ISABELLE STENGERS qui ne s'en tiennent pas là. Ils expliquent pourquoi rien dans l'évolution créatrice, comme le disait BERGSON, n'a les accents d'une marche funèbre. S'arrachant par bonds successifs aux situations d'équilibre, multipliant les poches d'entropie négative, à toutes les bifurcations de son buissonnement, l'évolution, si elle consomme bien de l'énergie, c'est pour enrichir son trésor d'informations donc sa puissance d'organisation, du plus simple atome d'hydrogène à la complexité infinie du cerveau humain. Et si par la pensée, il nous arrive de transcender la nature, c'est dans la dynamique de celle-ci dont il nous faut l'assentiment pour comprendre, pour convivre, pour copiloter l'évolution avec elle et non pour la manipuler à notre gré. Nous ne sommes pas les enfants du hasard voués à notre caprice, et PRIGOGINE répond ainsi à MONOD : la nature n'est pas livrée à notre volonté.

Ainsi ceux qui, pour tenter d'y voir clair dans le tohu-bohu du siècle se tiennent informés des derniers développements de nos sciences ont enregistré en très peu d'années un renversement complet de perspectives sur la situation de l'homme dans le monde.

Plus confondante encore est l'opération, trop souvent ignorée des intéressés eux-mêmes - c'est-à-dire des scientifiques - entre science pour comprendre et science pour manipuler. Les rares serviteurs de celle-là, fidèles à la grande tradition grecque, vivent dans l'émerveillement de ce que la nature leur donne à découvrir. Les praticiens de celle-ci, vecteurs du développement dans tous les pays avancés n'ont pas l'ombre d'une

hésitation, d'un trouble de conscience : l'avenir du monde et de l'homme est dans l'état de bits. Les premiers nous annoncent une nouvelle alliance entre l'homme et la nature : ce sont Prigogine et Stengers ; une levée des bannières entre sciences naturelles et humaines : ici c'est Michel SERRE et enfin la science nouvelle de l'aléatoire, du complexe et du contradictoire jusque dans la nature : là c'est Edgar MORIN."

" Une science à la fois modeste et ouverte qui, dans sa docte ignorance, nourrit sa conscience et tout ce qu'elle ne sait pas. "

Bamako, le 16 Juin 1989.

Mr. Yves TARDY
Professeur à l'Université
Louis Pasteur de Strasbourg.
Directeur de Recherches à l'ORSTOM.

Pour aller plus loin

CARON J.M., GAUTHIER A., SCHAAF A.,
ULYSSE J., WOZNIAK J. (1989) -
La planète Terre.-Ed. Ophrys.

PETIT-MAIRE N. (1984) .- Le Sahara,
de la steppe au désert. La
Recherche, 160, pp.1372-1382

REEVES H. (1988) .-Patience dans
l'azur. L'évolution cosmique .-Ed.
du Seuil.

TARDY Y. (1986) .-Le Cycle de l'Eau.
Climats, paléoclimats et géochimie
globale.-Ed.Masson

ROBIN J. (1989) .-Changer d'ère.-Ed.
du Seuil.

LOVELOCK J.E., MARGULIS L. (1974) .-
Atmospheric homeostasis by and for
the biosphere : the Gaia hypothesis.
Tellus, 1-2, pp.1-10.

CAHIERS

FORMATION
A LA RECHERCHE

DES SEMINAIRES DU CENTRE DJOLIBA

AVRIL 1991

1^{er} numero: 300 F

01



REFLEXION - FORMATION - DOCUMENTATION

SPECIAL
CYCLE DE L'EAU

**CRISES CLIMATIQUES
SECHERESSES ET INONDATIONS**

E.N.I. - E.N.Sup - O.R.S.T.O.M.
Centre DJOLIBA B.P. 298 BATAKO (Mali) - Tél. 220352

B 34 995 Ex 1