SECHERESSE

Synthèse
Sécheresse 1992 ; 3 : 25-36

Sécheresses, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis cent ans

Les crises climatiques, dont les sécheresses sont l'une des illustrations, se répètent de façon polycyclique. Les oscillations du climat sont en effet le résultat de la superposition de plusieurs cycles. La périodicité de ces oscillations suit celle des cycles solaires. Cependant, loin d'apparaître comme synchrones dans toutes les régions du monde, les oscillations climatiques apparaissent comme déphasées. Leur rythme est identique mais leur distribution change. On assiste en fait, à budget radiatif constant, à une distribution oscillante des précipitations et des températures, tantôt sur l'ensemble des continents, tantôt sur un continent particulier, tantôt sur un océan, tantôt sur un autre.

YVES TARDY

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), Instituto Astronomico e Geofisico (IAG), CP 30 627, 01051 Sao Paulo, SP Brasil.

JEAN-LUC PROBST

Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface, UPR CNRS 6251, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex, France.

Le climat d'une région ou d'un bassin-versant est généralement défini par les valeurs moyennes d'un ensemble de paramètres hydroclimatiques : température, humidité relative de l'air, pression atmosphérique, vitesse des vents, pluviosité, écoulement, déficit d'écoulement, etc. Les valeurs de ces paramètres sont caractéristiques de l'espace dans lequel ils ont été mesurés, de la fréquence et de la durée des observations. Dans l'espace, chacun des paramètres climatiques montre généralement une grande hétérogénéité de distribution due aux différences d'altitude, d'exposition aux vents dominants, de la distance à la mer, etc. De plus, l'hétérogénéité régionale du climat va souvent de pair avec les contrastes saisonniers et les contrastes interannuels qui changent avec la latitude : distribution homogène et climat peu contrasté en régions équatoriales ; distribution hétérogène et climat contrasté en régions tropicales ; distribution chaotique ou erratique en régions sub-désertiques.

Fluctuations des précipitations et des débits des fleuves

Pour peu que la superficie d'un bassin soit suffisamment grande et que soient ainsi intégrés les écarts locaux de distribution, la quantité d'eau qui tombe sous forme de pluie dans une région donnée n'est pas un phénomène purement erratique mais, au contraire, quasi cyclique ou multicyclique, c'est-à-dire résultant de la superposition de plusieurs cycles de périodicités différentes. Vines [1-4] ainsi que Vines et Tomlinson [5], Bradzil *et al.* [6] et Tyson *et al.* [7] l'ont démontré en de nombreuses stations d'Australie, de Nouvelle Zélande, d'Afrique du Sud, d'Amérique du Sud, d'Amérique du Nord, d'Inde et d'Europe *(figure 1)*. Partout dans le monde, le schéma est le même. Naturellement, les fluctuations du débit des fleuves reflètent celles de la pluviosité intégrée sur l'ensemble de leur bassin-versant.

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 37.288 ex1
Cote : B P24 M
26 MARS 1993

On prendra ici tout d'abord les exemples de la Garonne en France et du Niger au Mali dont les superficies des bassins-versants sont respectivement de 52 000 km² (à la station du Mas d'Agenais) et de 120 000 km² (à la station de Koulikoro).

Fluctuations du débit de la Garonne au Mas d'Agenais

La Garonne prend sa source dans les Pyrénées. Son régime est sous l'influence atlantique et méditerranéenne. Les fluctuations du débit de la Garonne depuis près d'un siècle révèlent la succession de trois périodes : une période humide entre 1910 et 1941, une période sèche entre 1942 et 1958, et une période moyenne ou normale séculaire entre 1952 et 1980. Les débits des années 80, plutôt bas, préfigurent la sécheresse des années 1989-1990. L'année 1930 est la plus humide du siècle et 1949 est l'année la plus sèche *(figure 2)* [8]. Les années 1915 et 1972, très sèches pour la zone sahélienne, sont très humides ou normales pour l'Europe de l'Ouest. Le débit d'un fleuve n'est certes pas assujetti aux seules pluies d'une année considérée. Cependant, regardé sur plusieurs années, il reflète directement l'intensité des précipitations.

Périodes sèches et humides en Europe

Pour l'ensemble de l'Europe, Probst [9] met en évidence une période sèche au début du siècle, une période humide de 1910 à 1940, un épisode sec à la fin des années 40, et une période sèche après 1980. Les limites dans le temps de ces épisodes secs ou humides varient d'une région à l'autre. Le schéma de la *figure 3* montre en effet que du Nord au Sud, d'importants décalages apparaissent. Le début de l'épisode sec des années 40 apparaît plus tôt au Nord (vers 1935) qu'au Sud (vers 1945). De plus, la fin de ce même épisode sec apparaît plus tard (1970) au Centre ou à l'Ouest qu'il ne survient au Nord ou au Sud (1960). Au total, l'épisode sec des années 40 est plus long au Centre et à l'Ouest de l'Europe tandis qu'il est plus court et plus précoce au Nord, plus court et plus tardif au Sud.

Fluctuations des débits du fleuve Niger à Koulikoro

Le Niger prend sa source en Sierra Leone dans les Tingi hills, puis coule dans le Sahel de l'Afrique de l'Ouest. Les courbes de la *figure 4* [10] font apparaître

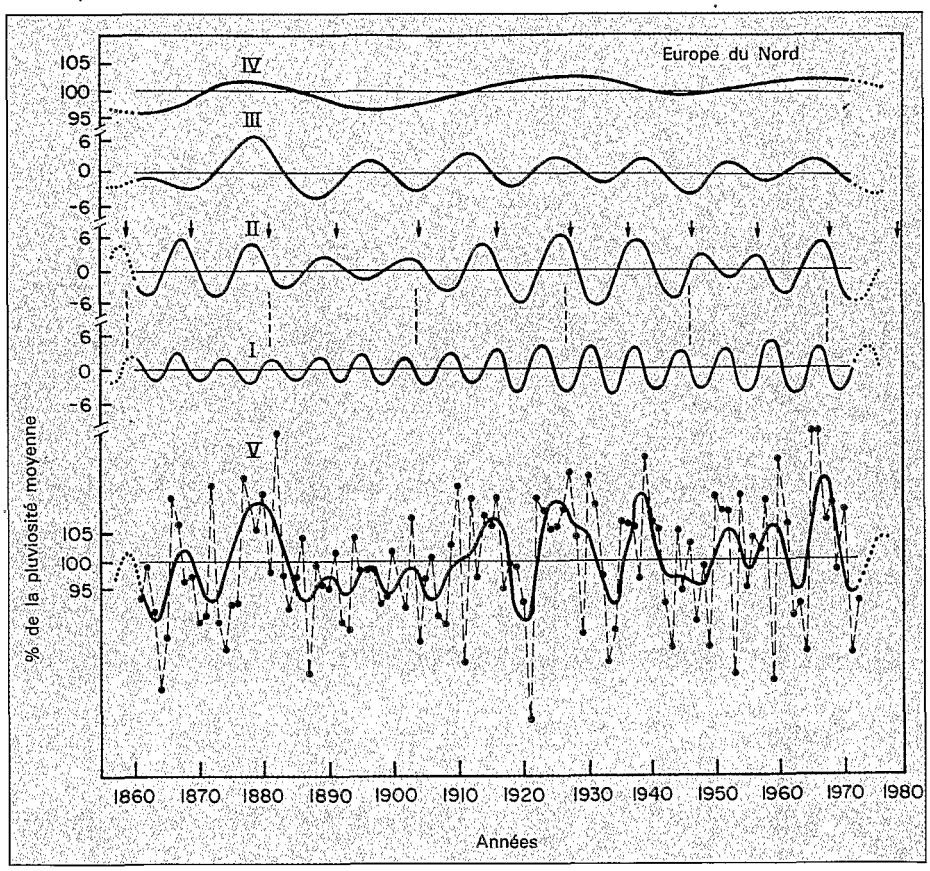


Figure 1. *Fluctuations de la pluviosité en Europe du Nord (V) et filtration des différents cycles à 7 ans (I), 11 ans (II), 16 ans (III) et 22 ans (IV), d'après Vines [3].*

Références

1. Vines RG. Analyses of South African rainfall. *South African Journal of Science* 1980 ; 76 : 404-9.

2. Vines RG. Rainfall patterns in the Western United States. *Journal Geophys Res* 1982 ; 87, C9 : 7303-11.

3. Vines RG. European rainfall patterns. *Journal of Climatology* 1985 ; 5 : 607-16.

4. Vines RG. Rainfall patterns in India. *Journal of Climatology* 1986 ; 6 : 135-48.

5. Vines RG, Tomlinson AI. An analysis of New Zealand's rainfall. *New Zealand Journal of Science* 1980 ; 23 : 205-16.

6. Bradzil R, Samaj F, Valovic S. Variation of spatial annual precipitation sums in central Europe in the period 1881-1980. *Journal of Climatology* 1985 ; 5 : 617-31.

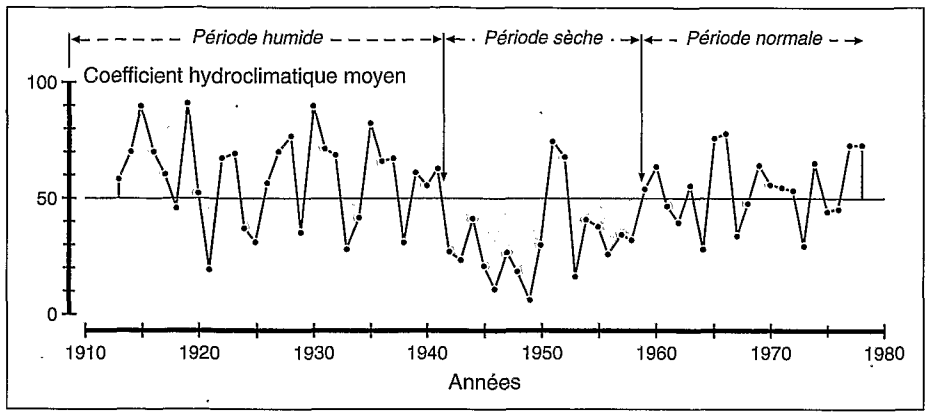
7. Tyson PD, Dyer TG, Mametse MN. Secular changes in South African rainfall : 1880 to 1972. *Quart Journal Roy Meteor Soc* 1975 ; 101 : 817-33.

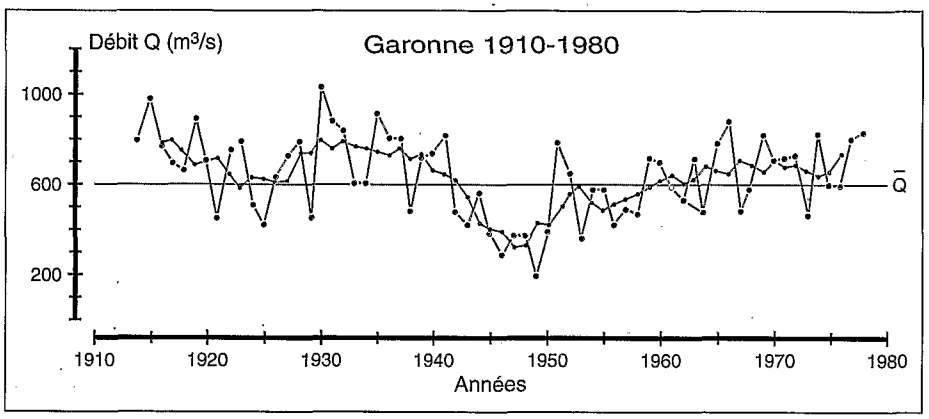
8. Probst JL, Tardy Y. Fluctuations hydroclimatiques du Bassin d'Aquitaine au cours des 70 dernières années. *Rev Géol Dyn et Géogr Phys* 1985 ; 26 : 59-76.

9. Probst JL. Hydroclimatic fluctuations of some european large rivers since 1800. In : G. Petts ed. *Historical changes of large alluvial rivers in western Europe.* Chichester : John Wiley & Sons 1989 : 41-55.

10. Bœglin J. *Communication personnelle* 1991.

11. Touchebeuf de Lusigny P. Note hydrologique sur l'El Beïd et la Komadougou-Yobé. Paris : ORSTOM, 1969.





◄ Figure 2. *Fluctuations du coefficient hydroclimatique moyen annuel du Bassin d'Aquitaine (courbe du haut) au cours des 80 dernières années et du débit moyen annuel de la Garonne au Mas d'Agenais (courbe du bas : en rouge les débits et en vert la moyenne mobile sur 5 ans), d'après Probst et Tardy [8].*

une période sèche autour des années 1913-1914, une période humide autour des années 1924-1930, suivie à son tour d'une période moyenne autour de 1940 et d'une nouvelle période humide entre 1949 et 1969. Après 1970, les années 70 et 80 sont des années très sèches pour le Sahel d'Afrique. Les courbes de la *figure 5* font apparaître des fluctuations décalées entre l'Europe et l'extrême Ouest de l'Afrique.

Fluctuations de niveau du lac Tchad depuis 100 ans

Les variations de niveau du lac Tchad reflètent les oscillations du climat du Centre de l'Afrique. Ces variations ont été reconstituées par différents auteurs [11-14]. La synthèse présentée par Jäckel [13] montre que l'humidité de la région a fluctué, la plupart du temps, en sens inverse de ce que l'on observe en Europe. Entre 1850 et 1900, le niveau du lac est haut alors qu'en Europe les pluies sont rares. Entre 1905 et 1950, le niveau du lac est en position moyenne. A partir de 1955, le niveau est assez haut alors que les étiages sont encore sévères en Europe. Après 1970, la sècheresse s'installe en Afrique alors que l'humidité revient en Europe.

Décalages entre l'Europe et l'Afrique de l'Ouest

Entre 1970 et 1988, tandis que le débit des fleuves tend à augmenter en Europe, les pluies diminuent fortement dans le bassin amont du lac Tchad qui s'assèche [14] ; alors que l'Afrique connaît une période d'aridité drastique, l'Europe est relativement bien arrosée. A la fin des années 80, alors qu'une humidité toute relative revient en Afrique, l'Europe, et particulièrement la France, est victime d'une très forte sécheresse.

Il apparaît *figure 5* que les fluctuations de débit du fleuve Sénégal et de la Garonne sont, sinon en opposition de phase, du moins fortement décalées les unes par rapport aux autres. Le décalage des périodes humides et sèches est ici perceptible du Nord au Sud sur un même méridien.

Années sèches et années humides en Afrique

Le climat en Afrique suit la position du FIT (Front Intertropical) ou ITCZ (Intertropical Convergence Zone).

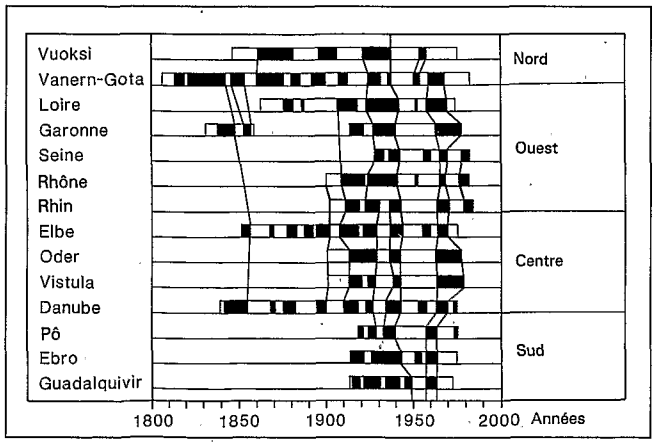


Figure 3. *Périodes hydroclimatiques moyennes (en noir, périodes humides et en blanc, périodes sèches) pour l'ensemble des fleuves d'Europe depuis 1800, d'après Probst [9].*

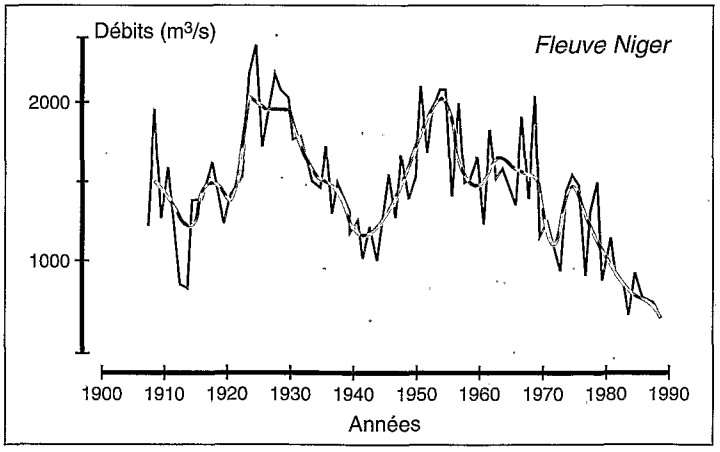


Figure 4. *Fluctuations du débit du Niger à Koulikoro au Mali — Débits moyens annuels (vert) et moyennes mobiles sur 3 ans (rouge), d'après Bœglin [10].*

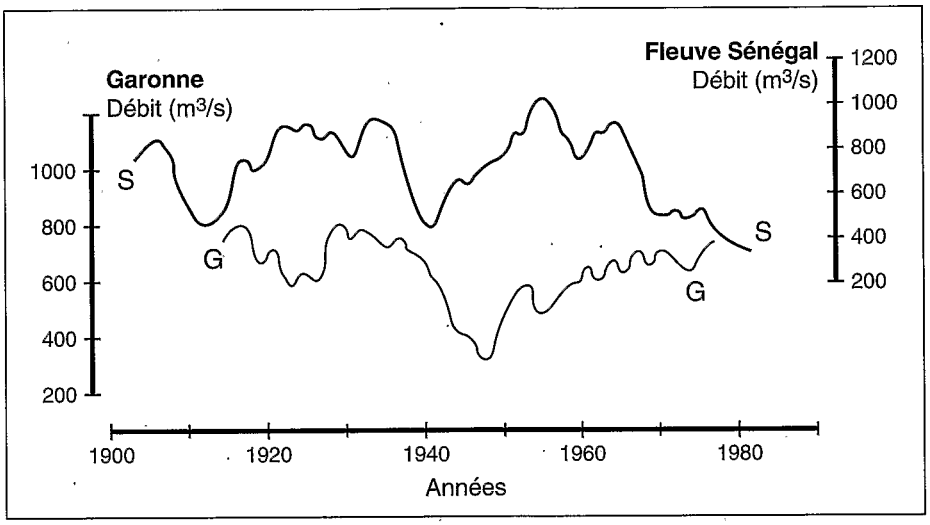


Figure 5. *Fluctuations décalées des débits (m³/s) de la Garonne et du fleuve Sénégal (moyennes mobiles sur 5 ans) depuis le début du siècle, d'après Probst et Tardy [8].*

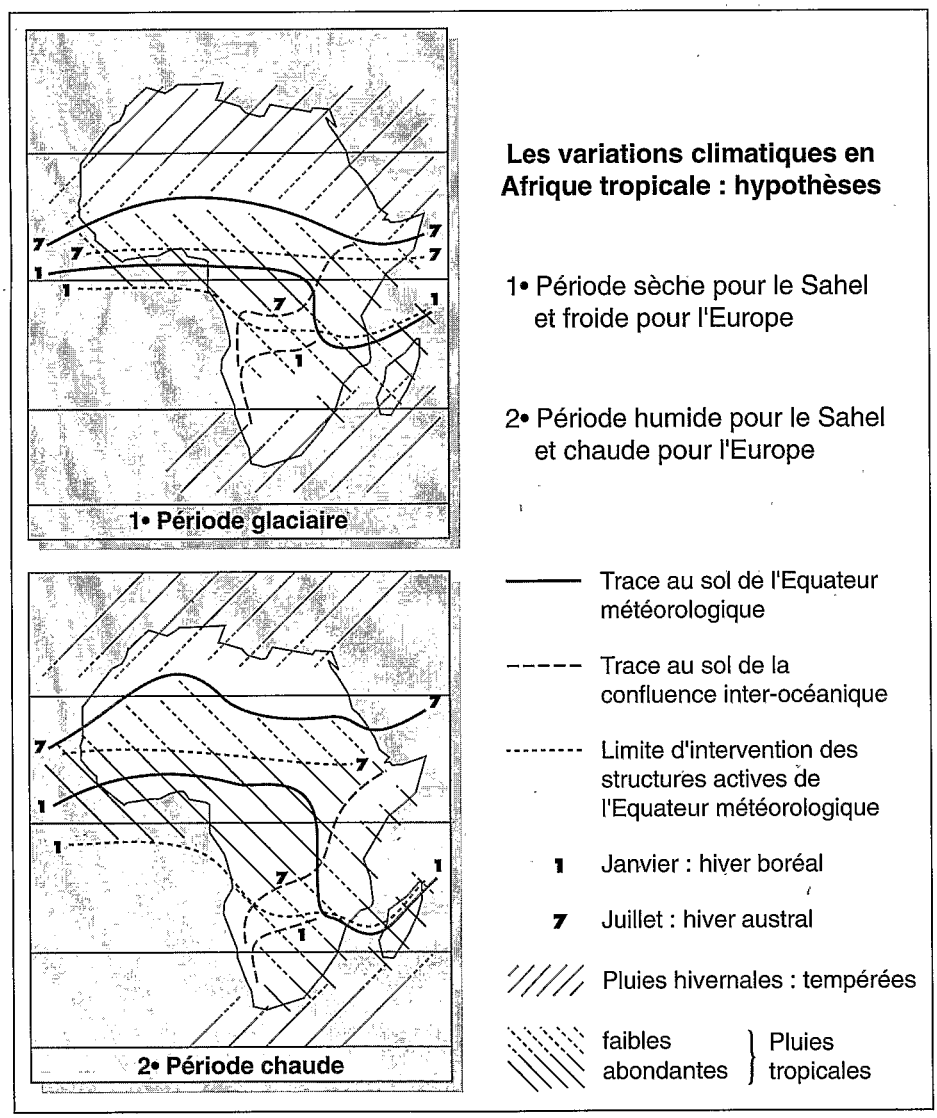


Figure 6. *Position du FIT et scénarios climatiques pour l'Afrique, d'après Leroux [15-17].*

D'après Leroux [15-17], on peut distinguer deux scénarios *(figure 6)* :

1. Lorsque le FIT est maintenu en position méridionale, soit parce que les anticyclones polaires mobiles, originaires du Pôle Sud, sont moins actifs que de coutume, soit parce que leurs homologues septentrionaux venus du Pôle Nord sont au contraire plus longtemps et plus fortement actifs, le déficit pluviométrique est généralisé sur le Sahel d'Afrique de l'Ouest. Seule la Côte d'Ivoire où la saison estivale (petite saison sèche) peu pluvieuse est écourtée peut recevoir ainsi plus d'eau que de coutume. C'est le cas des années 1942, 1944, 1948, 1970, 1971, 1972 et 1973. Cette situation se lit très bien sur la courbe des fluctuations de débit des fleuves Sénégal et Niger. Les périodes 1942-1950 et 1970-1975 apparaissent nettement comme des périodes sèches [14]. Pour le Congo, situé plus au Sud, la période 1940-1950 est plutôt déficitaire alors que la période 1970-1980 est moyenne *(figure 7)*.

Les années 1947, 1949, 1966, 1968, 1977 et 1979 présentent un déficit au Nord de 10° N et un excédent au Sud de cette latitude. Ces années sont moyennes pour le Sénégal, le Niger et le Congo. Ce dernier, cependant, montre un fort débit en 1966, 1967 et 1968.

2. Lorsque le FIT remonte haut vers le Nord sous la forte poussée des anticyclones mobiles, originaires du Pôle Sud, on enregistre un excédent pluviométrique sur l'Afrique Sahélienne de l'Ouest. Les années humides pour le bassin des fleuves Sénégal *(figure 5)*, Niger *(figure 4)* et Chari sont comprises entre 1951 et 1957. Pour le Congo, situé plus au Sud, cette période est au contraire plutôt sèche [18]. Les années 1943, 1945, 1950, 1954 et 1958 illustrent, en revanche, le scénario opposé avec excédent de pluviosité au Nord et déficit au Sud. Toutes ces années sont en effet humides pour le Sénégal et les années 1943 à 1958 sont relativement sèches pour le Congo.

Ainsi, avec les mouvements du FIT qui sont sous l'influence de la montée vers le Nord des masses d'air polaire venant du Pôle Sud ou de la descente vers le Sud des masses d'air polaire venant du Pôle Nord, on saisit aisément la relation qui peut exister entre les fluctuations de température et celles de l'humidité, ainsi que l'effet de compétition entre Hémisphère Nord et Hémisphère Sud. Le jeu est complexe.

Fluctuations de débit du Congo et de l'Amazone et compensation pluviométrique globale

Les fluctuations de débit des fleuves d'Amérique du Sud et d'Afrique ont augmenté en moyenne au cours des 100 dernières années *(figure 12)*. A l'échelle du

siècle, les variations de débit du Congo et de l'Amazone présentent en moyenne la même tendance à l'augmentation [19]. Cependant, examinées à l'échelle de la décennie, les fluctuations de débit sont déphasées et paraissent en opposition *(figure 7)* [20]. En fait, le déphasage calculé par Kayser *et al.* [21] est de 60° pour la périodicité de 11 ans (10-20 ans). Tout se passe donc comme si pendant un certain temps, cinq à six ans par exemple, l'eau évaporée au-dessus de l'océan Atlantique retombait sous forme de pluie, en plus grande abondance, tantôt sur l'Afrique équatoriale, tantôt sur l'Amazonie. Lorsque l'excès est distribué sur l'Afrique, l'Amérique du Sud est déficitaire. Lorsqu'au contraire le surplus se déverse sur l'Amazonie, la cuvette congolaise se retrouve privée d'eau.
Finalement, tout se passe comme s'il s'agissait d'un effet de compensation pluviométrique : la masse d'eau à distribuer est constante mais se répartit inégalement selon les années sur chacune des régions considérées.

Compensation pluviométrique au-dessus des océans

Le même phénomène de compensation pluviométrique se remarque au-dessus des océans en fonction de la latitude. Au cours du siècle écoulé par exemple *(figure 8)*, l'indice de précipitations calculé à partir de 1 487 stations pluviométriques a augmenté dans les hautes latitudes mais a diminué dans les basses latitudes de l'hémisphère Nord [22 d'après 23]. Une augmentation de la pluviosité globale sur les continents peut se traduire par une diminution de la pluviosité sur les océans. Il est très probable que sur les océans comme sur les continents, une diminution ici est toujours compensée par une augmentation là.
Au fond, on est généralement trop pressé de conclure à une amélioration ou à une détérioration du climat global à partir d'indications qui n'ont de valeur que dans les limites régionales où elles ont été acquises.

Variations de la température de l'air

Le climat de l'Europe du Nord depuis 100 ans

Le climat moyen de l'Europe, au cours du siècle dernier, est reconstitué par Peterson et Larsen [24]. Les variations de la température de l'air et des précipitations sont reportées sur la *figure 9*. On remarque qu'au cours de la période 1890-1970 les variations des température-

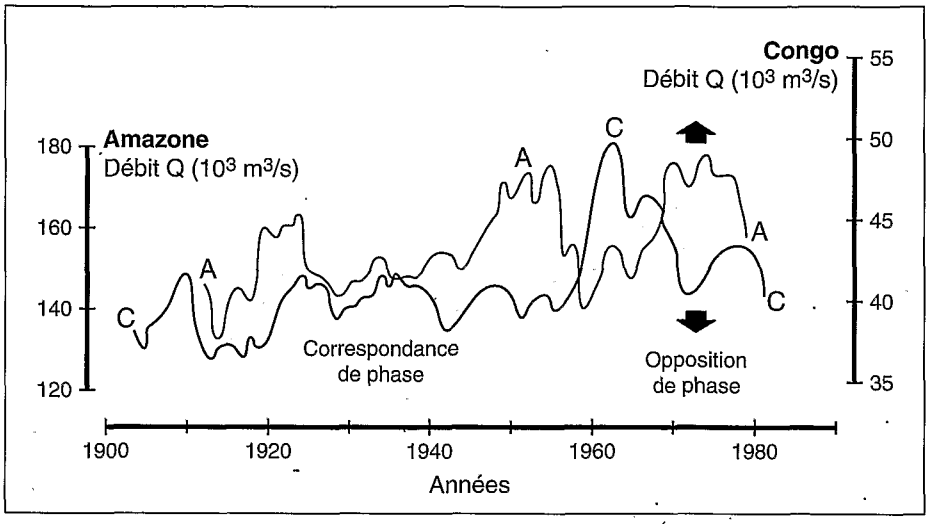
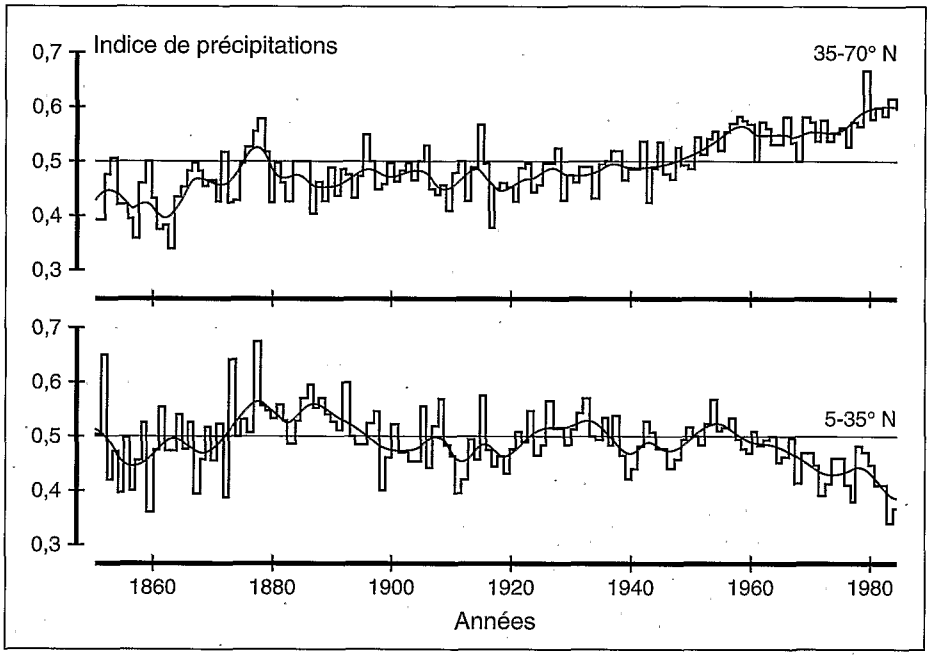
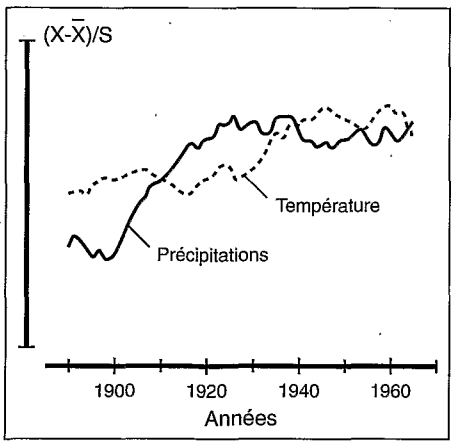


Figure 7. *Fluctuations décalées du débit du Congo et de l'Amazone (données filtrées), d'après Probst [20].*



▲ Figure 8. *Fluctuations des indices de précipitation pour les hautes latitudes et les basses latitudes de l'hémisphère Nord au cours du siècle écoulé, Jones [22] d'après Bradley et al. [23].*



◀ Figure 9. *Fluctuations de la température et des précipitations entre 1890 et 1970 à Fand au Danemark — Moyennes mobiles sur 30 ans, d'après Peterson et Larsen (24). X est la variable (température ou précipitations). X̄ est la moyenne du siècle et S l'écart type de chacune des variables.*

res et des précipitations présentent globalement la même tendance moyenne à l'augmentation, évoluant donc ensemble sur le mode climatique normal. Tardy [25] distingue en effet deux modes du climat global : un mode normal, chaud et humide contre froid et sec, et un mode anormal, chaud et sec contre froid et humide. Probst [20] et Probst et Tardy [26] ont montré qu'à l'échelle globale au cours des 100 dernières années, le mode normal était vérifié dans 75 % des cas contre 25 % pour le mode anormal.

Évolution de la température et compensation thermique aux USA depuis 100 ans

Comme l'a montré Bucha [27] *(figure 10)*, la température de l'air du mois de janvier diminue sur la Côte-Est des USA jusqu'en 1960 pour augmenter ensuite, tandis que les années les plus froides sont 1916, 1937 et 1949. En revanche, sur la côte Ouest, la température va en augmentant jusqu'en 1960, puis elle diminue, tandis que les années 1916, 1937 et 1950 sont les plus chaudes. Ceci suggère à nouveau qu'un phénomène de compensation régle l'évolution de la température d'hiver, tant à l'échelle annuelle que séculaire sur les deux côtes du continent américain. Tout se passe d'ailleurs comme si les vagues de froid, qui au mois de janvier descendent du pôle Nord vers les basses latitudes, visitaient alternativement la côte Ouest et la côte Est des États-Unis.
Ce qu'une région gagne en chaleur est perdu pour l'autre et vice-versa. Chacune des vagues de froid déferle au même rythme — mais non en phase — que les fluctuations de l'activité solaire. Les fluctuations de la température ne sont pas homogènes sur l'ensemble du globe. Mörner [28] a déjà mis l'accent sur le phénomène de compensation thermique entre hémisphères. Lorsqu'ici la température augmente puis diminue, là elle diminue puis augmente. Les fluctuations sont en opposition de phase.

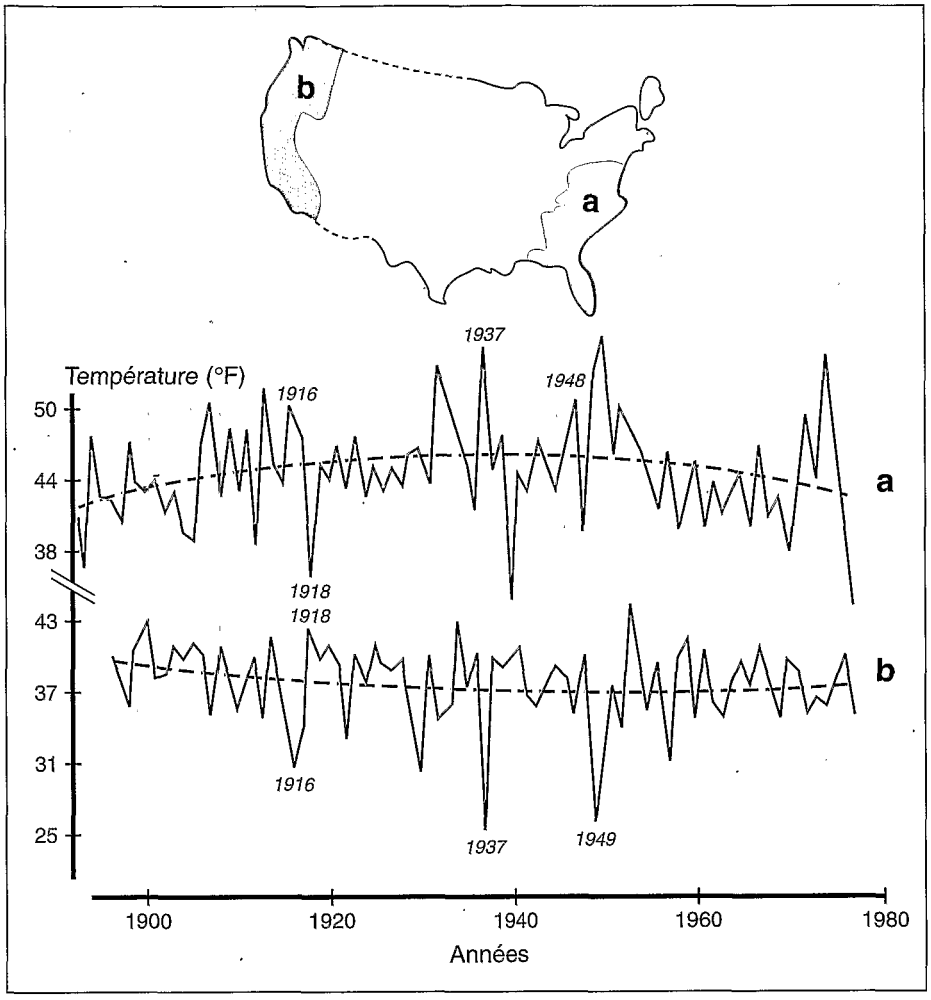
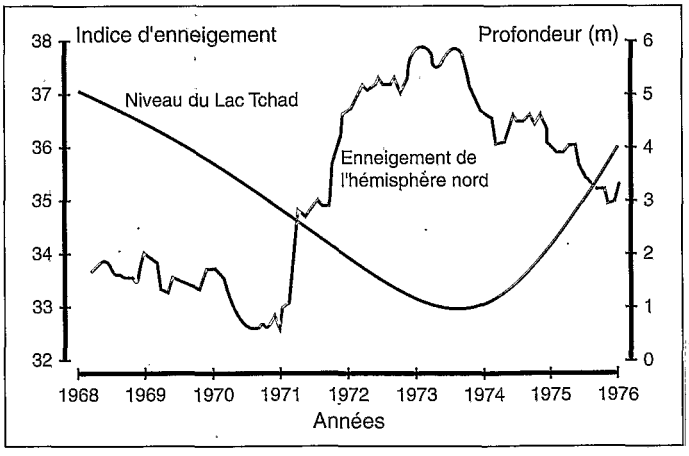


Figure 10. *Évolution de la température de l'air sur les côtes Est (a) et Ouest (b) des Etats-Unis depuis 100 ans, d'après Bucha [27].*

Relations entre température et humidité à l'échelle de la décennie dans l'hémisphère Nord

Les années 1972-1975 furent entre autres pour le Sahel d'Afrique une période de sécheresse sévère. En même temps, en Europe et dans tout l'hémisphère Nord, les températures moyennes annuelles diminuent. On vérifiera plus loin à d'autres échelles de temps que le mode le plus fréquent est le mode normal de Tardy [25] où les périodes climatiques froides et sèches alternent avec des périodes chaudes et humides *(figure 11)* [29]. Le mode le moins fréquent ou anormal correspond à une montée du chaud quand un aride s'installe et à une baisse de température lorqu'un humide survient.

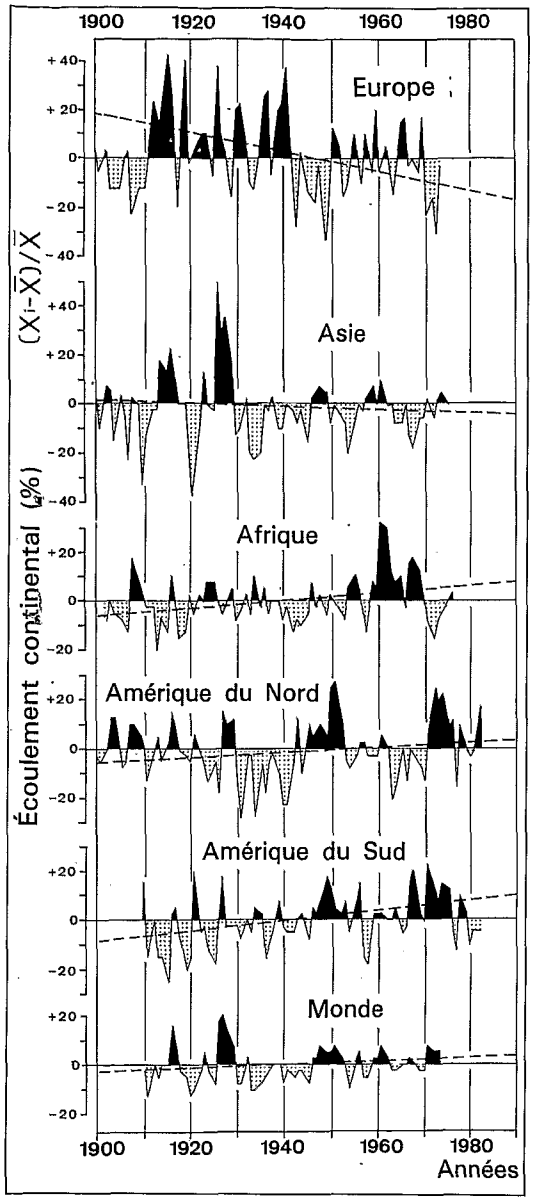


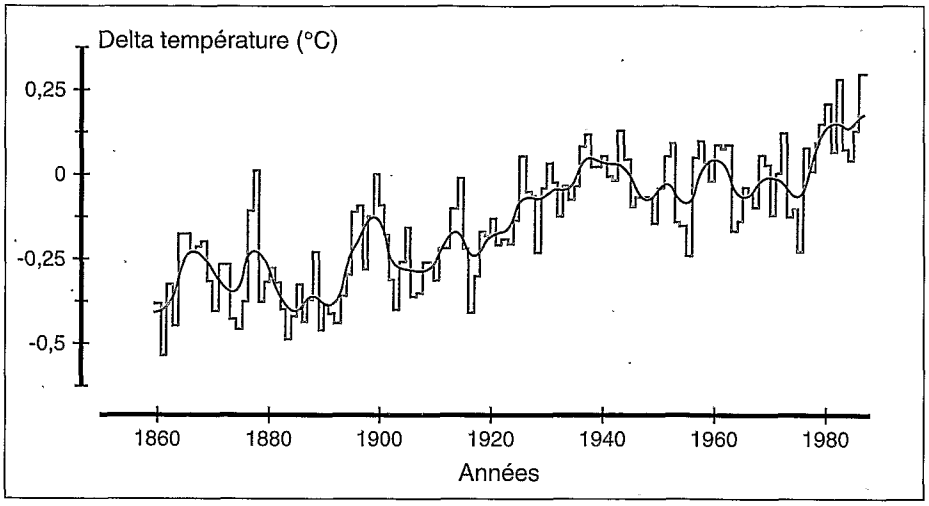
◄ Figure 11. *Relation, à l'échelle de la décennie, entre la température moyenne de l'hémisphère Nord mesurée par l'enneigement, d'après Kukla [29], et le niveau du lac Tchad donné par Jäckel [13].*

Évolution du climat global depuis 100 ans

Périodes sèches et périodes humides sur les grands continents et sur l'ensemble du monde

L'examen des fluctuations du débit total des rivières drainant respectivement l'Europe, l'Asie, l'Afrique, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud et l'ensemble des surfaces continentales du globe terrestre [18, 26], *(figure 12)* montre que





▲ Figure 13. *Fluctuations de la température moyenne globale de l'air (T_G), établie d'après la formule suivante en additionnant les températures moyennes de l'air sur les océans (T_O) et sur les continents (T_C) des hemisphères Nord (HN) et Sud (HS) :*

$$T_G = 0{,}25\ T_C HN + 0{,}2\ T_C HS + 0{,}25\ T_O HN + 0{,}3\ T_O HS$$

Delta température (°C) est calculé par différence par rapport à la moyenne des températures des années 1930-1940, d'après Jones [22].

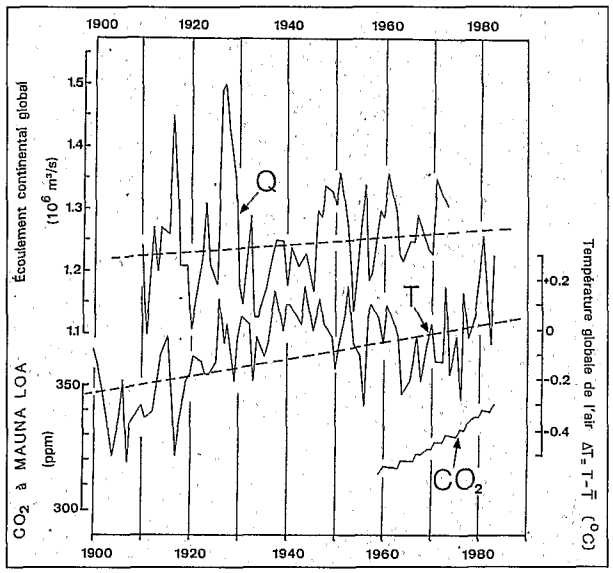


Figure 14. *Fluctuations annuelles de la température moyenne globale et du débit total des fleuves du monde, et augmentation des teneurs en CO_2 de l'atmosphère, au cours des quatre vingts dernières années d'après Probst et Tardy [26].* ▶

◀ Figure 12. *Fluctuations de l'écoulement continental global sur chacun des différents continents et sur la totalité des terres émergées au cours du siècle écoulé, d'après Probst et Tardy [26].*

le XXe siècle est divisé en deux périodes de part et d'autre de l'année 1940 :

— la première moitié du siècle est en moyenne plutôt humide pour l'Europe et l'Asie et plutôt sèche pour l'Afrique et l'Amérique donc plutôt sèche pour le monde ;

— à l'inverse, la seconde moitié du siècle est en moyenne plutôt sèche pour l'Europe et l'Asie et plutôt humide pour l'Afrique et l'Amérique et donc plutôt humide pour le monde.

On ne considère ici que l'écoulement continental, lui-même fonction des précipitations qui tombent seulement sur les continents et non pas le surplus océanique pluviométrique qui se déverse sur les océans.

Il semble bien tout d'abord qu'un phénomène de compensation s'établisse entre continents. On peut ici faire l'hypothèse que lorsque l'un d'entre eux reçoit plus d'eau, un autre en reçoit forcément moins. Il est également possible qu'une compensation s'établisse entre océans et continents. Lorsque les continents récoltent plus d'eau, les océans en reçoivent moins et le bilan est constant à l'échelle de la Terre entière.

Dans ce cas, il n'y aurait donc pas crise globale du climat mais décalage de crises régionales qui affectent tantôt un continent, tantôt un autre, tantôt les terres émergées, tantôt les océans.

Évolution de la température globale au cours du siècle écoulé

La température moyenne globale, établie par Folland *et al.* [30], Paltridge et Woodruff [31], Jones *et al.* [32-34], est la moyenne pondérée des températures moyennes des océans et des continents de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud. La *figure 13* montre que le globe terrestre s'est réchauffé de près de 0,75° C en un siècle. Les fluctuations sont cependant importantes et, comme pour les débits, plusieurs périodicités (3 ans et 4,8 ans) apparaissent [21].

Relation débit-température à l'échelle globale

La somme du débit des fleuves de l'ensemble du monde, égale à ce que l'on appelle l'écoulement continental, a été calculée pour l'ensemble des 70 dernières années [18, 26] et portée sur la *figure 14* en regard des variations de la température globale [34]. Comme on peut le voir sur cette figure, les fluctuations du drainage continental global et de la température moyenne globale de l'air

présentent au cours des 100 dernières années une tendance à l'augmentation. On peut d'ailleurs calculer une relation linéaire entre débit global et température globale. Cette relation est la suivante :

$$D_{(T)} = 0{,}396 + 0{,}0367\ (T - 15)$$

avec $D_{(T)}$, le débit global (en 10^{20} cm³/an) correspondant à une température globale T (en °C), le débit global actuel et la température moyenne globale actuelle étant respectivement de $0{,}396.10^{20}$ cm³/an et 15° C.
On prévoit ainsi que l'écoulement continental global double en cas d'augmentation de 10 °C de la température globale.
L'augmentation moyenne de l'écoulement continental et de la température au cours du siècle dernier s'accompagne de fluctuations annuelles secondaires telles que, pour trois années sur quatre, la température augmente ou diminue en même temps que le débit. Ainsi d'après Probst [20], les années sont chaudes et humides ou froides et sèches (mode normal de Tardy [25]) et, pour le quart du temps restant, la température diminue quand le débit augmente et vice versa : les années exceptionnelles sont froides et humides ou chaudes et sèches (mode anormal de Tardy [25]).
Pour le climat continental global, la tendance générale du siècle et les tendances révélées par les fluctuations annuelles sont les mêmes. Le climat global est devenu de plus en plus chaud et de plus en plus humide. Les fluctuations qui se superposent à la tendance moyenne sont la plupart du temps des poussées de climat chaud et humide qui alternent avec des retours d'un climat global froid et sec. L'analyse spectrale des fluctuations de la température globale et de l'écoulement global fait apparaître des périodicités semblables [21] : 3 ans et 5 ans. Pour le débit global s'y ajoute une périodicité à 12,5 ans.

Tableau 1. Caractéristiques des paramètres hydroclimatiques et périodicités (en années) déterminées par analyse spectrale en trois classes (2-4 ans, 4-6 ans et 10-20 ans), d'après Probst et Tardy [18, 26] et Kayser *et al.* [21].

Nom du fleuve	Station de jaugeage	Centre de gravité du bassin lat (°.')	long	Classes de périodicités (ans) 2-4	4-6	10-20
Garonne	Mas d'Agenais	44.02	001.06		4.4	
Loire	Montjean	47.46	002.22		4.5	
Seine	Paris	48.52	002.20		4.0	11.1
Rhône	Lyon	45.46	004.40		4.2	12.5
Ebre	Tortosa	42.04	−001.37			
Guadalquivir	Alcala del Rio	38.02	−004.23			
Po	Pontelagoscuro	43.05	009.41	2.9		
Vanern	Vanesborg	58.23	012.19	3.3		13.3
Vuoksa	Imatra	60.58	029.07			
Elbe	Decin	51.34	013.01		4.5	15.3
Vistule	Tczew	52.15	021.00	3.7		13.3
Oder	Gozdowice	51.40	016.06		4.0	12.5
Danube	Orsova	44.40	022.30		4.1	18.1
Dvina	Ust Pinega	55.31	028.11		5.7	
Don	Razdorskaia	49.39	041.45		5.0	14.2
Volga	Volgograd	54.19	048.22		4.5	15.3
Neman	Smalininkai	54.00	023.58			11.7
Oural	Kushum	51.38	054.11		5.7	
Kolyma	Srednekoymsk	65.42	150.49	3.4		14.8
Amour	Komsomolsk	49.15	129.39	2.8	4.8	16.6
Ob	Salekhard	61.13	073.20		4.8	15.3
Yenissei	Igarka	55.06	032.43		5.4	
Lena	Kusur	62.10	129.50	3.2		
Mekong	Mukdahan	19.53	102.10			
Godavari	Dowlaishawaran	18.44	080.04		4.0	15.3
Nil	Aswan	15.37	032.29	2.8		
Sénégal	Bakel	14.54	−012.26	3.0	5.1	
Niger	Koulikoro	16.19	−000.09	3.1		
Chari	N'Djamena	10.32	016.45	3.8		
Congo	Kinshasa	02.08	021.37	2.9	5.7	
Zambeze	Matundo Cais	−17.55	026.29	3.2	5.2	
Limpopo	Chokule	−22.10	029.59	2.8		11.7
Orange	Dimo III	−29.04	023.38			10.5
St Laurent	Ogdensburg	44.42	−075.31	3.0	5.2	
Red River	Emerson	47.57	−097.05	3.0	5.2	
Assiniboine	Headingly	49.56	−100.49	3.3	6.0	
N.Saskatchewan	Prince Albert	53.36	−109.36		4.6	14.2
S.Saskatchewan	Saskatoon	50.50	−107.02	2.9	4.6	16.6
Susquehanna	Harrisburg	41.03	−076.12	2.8	4.5	12.5
Niagara	Queenston	43.05	−079.06	3.1	5.8	15.3
Colorado	Lees Ferry	31.06	−098.32	2.8	4.7	
Mississipi	Alton III	39.41	−091.20			
Missouri	Herman	39.02	−095.41		5.5	16.6
Ohio	Metropolis III	32.42	−083.38			
Columbia	The Dalles	46.40	−119.28		4.8	
Snake	Clarkston	47.37	−116.55		5.7	
Parana	Cuaira	−26.28	−054.43	3.1		
Sao Francisco	Juazeiro	−13.16	−043.23	3.0	4.8	
Amazone	Obidos	−04.03	−062.52		5.8	
Paramètres hydroclimatiques globaux				2-4	4-6	10-20
Écoulement continental global				3.0	5.1	12.5
SOI (Southern Oscillation Index)				3.6	6.0	
Activité solaire				3.3	5.4	10.5
Température moyenne globale de l'air				3.0	4.8	

Oscillations quasi périodiques et polycycliques

Cinquante parmi les plus grands fleuves du monde ont été choisis pour montrer comment se propageaient les ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. Une analyse spectrale des variations du débit [21] montre pour tous ces fleuves une superposition de fluctuations dont les périodicités sont comprises entre 2 et 4 ans (3 ans), entre 4 et 6 ans (5 ans), entre 10 et 20 ans (11 ans). Les périodicités des oscillations climatiques sont ainsi les mêmes que celles de l'activité solaire mesurées par le paramètre SUN *(Tableau I)*. Cependant comme l'ont montré Bhalme et Mooley [35], il n'y a pas de relation directe de cause à effet entre sécheresses et cycles solaires. Seul le rythme compte et une période d'intense activité solaire peut se marquer ici par une sécheresse et là par des pluies diluviennes.
Les oscillations des paramètres climatiques, comme la température ou la pluviosité, apparaissent toutes de nature quasi périodique mais sont en fait polycycliques, c'est-à-dire constituées de l'addition de plusieurs cycles de périodicité et d'amplitude différentes. Les temps d'observation de ces oscillations sont trop courts et les observations n'ont pas été initiées suffisamment tôt pour permettre la séparation de cycles de longue période et donc la prédiction du climat à long terme.

Références

12. Maley J. Etudes palynologiques dans le bassin du lac Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique Nord-tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle. Trav et Doc ORSTOM Paris, 1981 ; 129 : 586 p.

13. Jäckel D. Rainfall patterns and lake level variation at Lake Chad. In : NA Möner and W Karlen eds. *Climatic changes on a yearly to millenial basis.* Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1984 : 191-200.

14. Pouyaud B, Colombani J. Les variations extrêmes du Tchad. *Ann Géogr* 1989 ; 545 : 1-23.

15. Leroux M. La dynamique des précipitations en Afrique occidentale. *ASECNA PDEM* 23, Dakar, 1970.

16. Leroux M. *Le climat de l'Afrique tropicale.* Paris : Editions Champion, 1983.

17. Leroux M. The key contribution of satellite pictures to a new understanding of meteorological concepts relating to the middle latitudes : identification of the polar mobile anticyclone (PMA). *7th Meteosat Users Meeting* 1988, Madrid EUMETSAT : 1-327.

18. Probst JL, Tardy Y. Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *Journal of Hydrology* 1987 ; 94 : 289-311.

19. Nkounkou RR. *Hydrogéodynamique actuelle du Congo et de l'Amazone. Cycle global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques (derniers 600 millions d'années).* Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1989.

20. Probst JL. *Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années.* Thèse de Doctorat es Sciences, Strasbourg, 1990.

21. Kayser N, Probst JL, Cadet D, Tardy Y. Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. *CR Acad Sc* Paris 1990 ; 310 : 757-63.

22. Jones PD. Climat des mille dernières années. *La Recherche* 1990 ; 219 (21) : 304-12.

23. Bradley RS, Diaz HF, Eischeid JK, Jones PD, Kelly PM, Goodess CM. Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century. *Science* 1987 ; 237 : 171-5.

Téléconnections et propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde

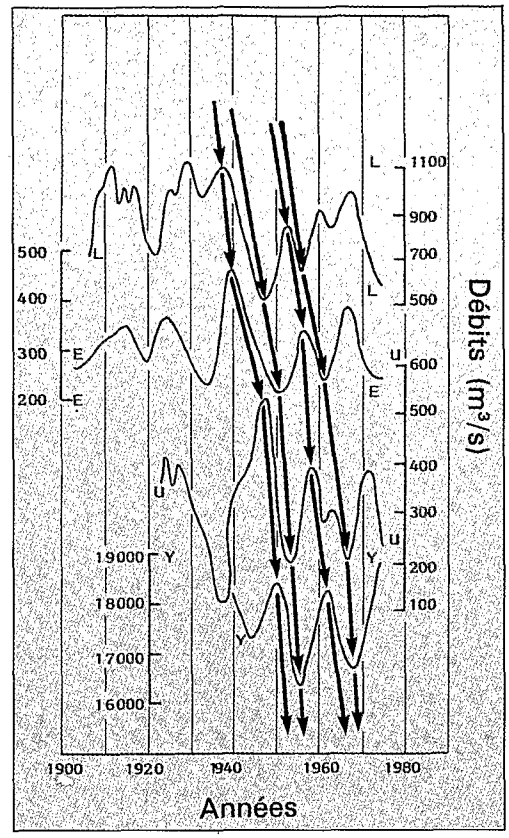
Certains fleuves montrent des fluctuations de débits synchrones : c'est le cas du Mékong (391 000 km² à la station de Mukdahan) dans le Sud-Est asiatique et du Yenissei (2,44.10⁶ km² à la station de Igarka) en Sibérie. En revanche, certains autres fleuves montrent des fluctuations déphasées les unes par rapport aux autres, à tel point qu'elles paraissent parfois en opposition. C'est le cas de la Garonne et du Sénégal (déjà décrits *figure 5*) et du Congo et de l'Amazone (déjà décrits *figure 7*).

Les fluctuations de débit des fleuves ne sont synchrones que sur une ligne isophase. Entre une ligne isophase et une autre, les fluctuations ne sont pas synchrones mais déphasées. Ainsi, par exemple, les débits du Rhône (50 200 km² à Lyon) en France et du Nil (1,5.10⁶ km² à Aswan) en Egypte sont en phase ; les débits Rio Sao Francisco (490 800 km² à Juazeiro) au Brésil, des rivières d'Afrique du Sud et du Mékong (391 000 km² à Mukdahan) au Cambodge sont également en phase, mais apparaissent en opposition de phase par rapport au premier groupe.

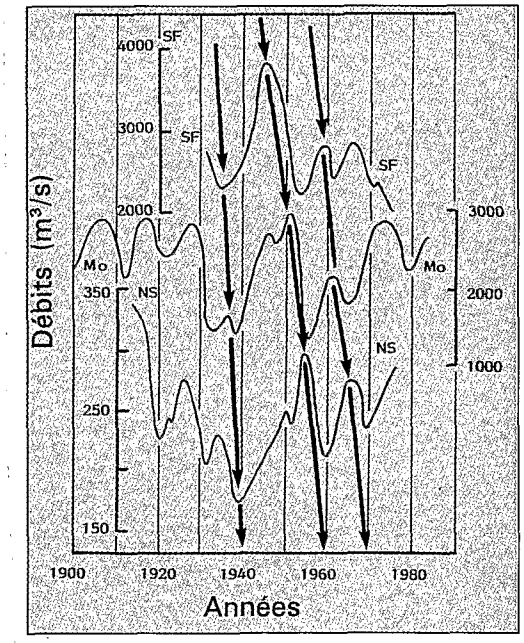
Sur un trajet qui recoupe les lignes isophases, les fluctuations sont décalées ou déphasées. L'observation la plus intéressante apparaît sur les *figures 15 et 16* où il est aisé d'observer que les périodes sèches et les périodes humides sont progressivement décalées les unes par rapport aux autres, lorsqu'on se déplace d'Ouest en Est, de l'Europe à la Sibérie, et du Sud au Nord, du Brésil au Canada. L'année de la grande sécheresse séculaire en France est 1949. L'année la plus sèche se trouve être 1950, sur le bassin de l'Elbe (51 000 km² à la station de Decin), 1951 sur l'Oural (190 000 km² à la station de Kushum), et 1955 sur le bassin du Yenissei (2,44.10⁶ km² à la station de Igarka) en Sibérie. La sécheresse se propage ainsi d'Ouest en Est, tout comme elle se propage du Sud au Nord en Amérique.

En fait, le déphasage progressif et la propagation des ondes de sécheresse et d'humidité apparaissent clairement sur les courbes de la *figure 17* tracées par Kayser *et al.* [21] pour les oscillations dont les périodicités sont comprises entre 10 et 15 ans. Le Rhône apparaît en phase avec le Nil. Les fleuves du Sud du Brésil, du Sud de l'Afrique, de l'Indochine et du Kamchatka, s'ils sont en phase, fluctuent en revanche en totale opposition de phase avec le Rhône.

En tous points du globe terrestre, les fluctuations de mêmes périodicités, identiques à celles du paramètre SUN qui mesure



▲ Figure 15. *Propagation vers l'Est des périodes sèches et humides. Fluctuations décalées des débits de quelques fleuves d'Europe et d'Asie (L : la Loire en France ; E : l'Elbe en Tchécoslovaquie ; U : l'Oural au Kazakhstan ; Y : l'Yenissei en Sibérie), d'après Probst et Tardy [26].*



▲ Figure 16. *Propagation vers le Nord des périodes sèches et humides. Fluctuations décalées des débits des trois rivières d'Amérique (SF : Sao Francisco au Brésil ; MO : Missouri aux USA ; NS : North Saskatchewan au Canada), d'après Probst et Tardy [26].*

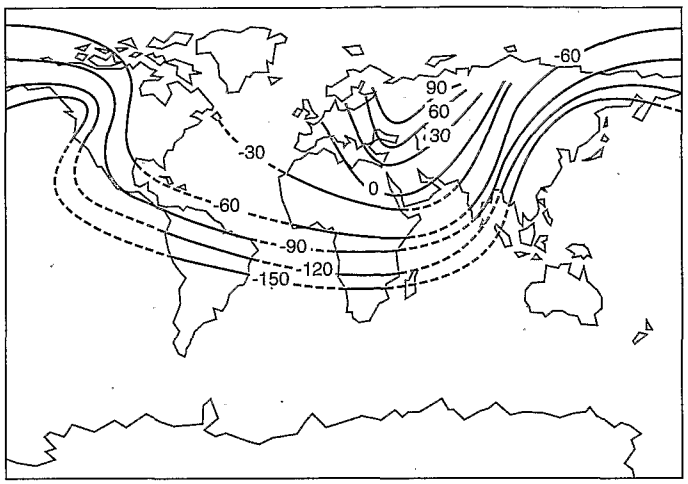


Figure 17. *Déphasages en degrés des ondes de sécheresse et d'humidité calculés par spectres croisés par rapport au Rhône pour une périodicité de 10-15 ans, d'après Kayser et al. [21].*

l'intensité de l'activité solaire, ne sont cependant pas synchrones.
Ainsi, une année d'intense activité solaire peut être accompagnée d'une sécheresse et d'une diminution des débits dans certaines parties du globe et d'une phase humide et d'une augmentation des débits dans certaines autres régions de la Terre.
Les ondes de sécheresse et d'humidité sont téléconnectées et se propagent d'Ouest en Est et du Sud au Nord. Mises en évidence pour des périodicités comprises entre 10 et 15 ans, rien ne dit que le déphasage se produit de la même manière, c'est-à-dire par exemple dans le même sens ou la même direction pour chacun des cycles qui se superposent.
C'est sans doute là que se trouve la cause de l'irrégularité, et donc du phénomène que les auteurs américains appellent la quasi-périodicité des fluctuations enregistrées. Une recherche dans ce domaine donnerait sûrement des résultats fort intéressants.

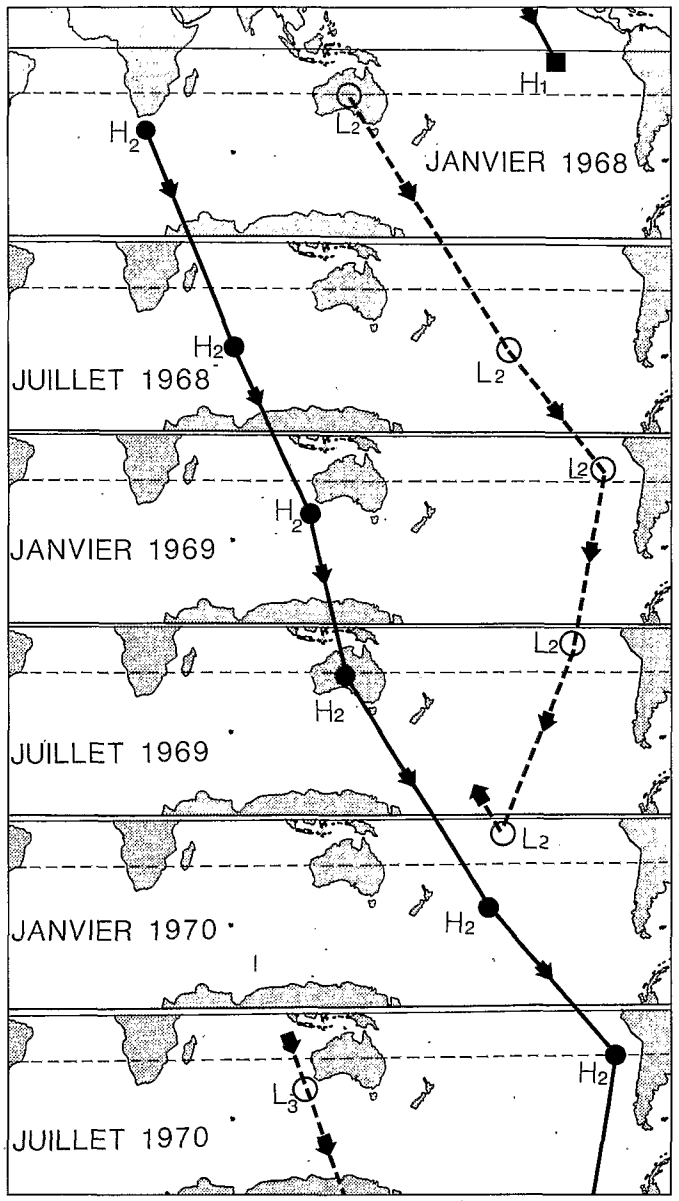


Figure 18. *Oscillations et déplacements cycliques en relais des anticyclones (H_1 et H_2) et des dépressions (L_2 et L_3) au-dessus de l'Océan Indien et de l'Océan Pacifique, entre les côtes d'Afrique, d'Australie et d'Amérique du Sud, Probst et Tardy [26] d'après Krishnamurti et al. [36].*

El Niño et les oscillations australes (ENSO : El Niño Southern Oscillation)

Dans l'Océan Pacifique, des phénomènes climatiques curieux se produisent régulièrement. Deux situations opposées peuvent être en effet détectées. En situation normale, le long des côtes du Pérou, le vent souffle en basse altitude vers l'Ouest, provoque une remontée d'eau froide ou upwelling et un abaissement de la température de surface de l'Océan Pacifique qui devient 5° C plus basse à l'Est qu'à l'Ouest. Un anticyclone est localisé sur le Golfe du Pérou ; une dépression est située au Nord de l'Australie *(figure 18)* [36].
Avec une périodicité de 3 ans (entre 2 et 7 ans) se produit le phénomène El Niño qui signifie l'Enfant Jésus parce qu'il est très marqué aux environs de Noël. La circulation en basse altitude est inversée. Au contraire de la situation précédente, un anticyclone est localisé au-dessus de l'Australie et une dépression s'installe au-dessus du Golfe du Pérou. Dans cette région, la température de surface augmente, les mouvements d'upwelling cessent, la pêche et particulièrement celle des anchois se fait rare, des pluies diluviennes s'abattent sur les côtes. Mais c'est une crise climatique globale [37, 38].
Les oscillations australes se résument schématiquement en un mouvement périodique d'allers et venues des anticyclones et des dépressions en relais les uns par rapport aux autres, au-dessus des océans Indien et Pacifique [36]. Les conséquences climatiques sont importantes.
Lorsqu'en 1968, l'anticyclone (H2) est localisé dans la région du Cap, la dépression (L2) est installée en Australie au-dessus de Darwin *(figure 18)*. Il fait sec au Sud de l'Afrique et au Pérou, il pleut en Australie. En revanche, lorsqu'une zone de dépressions s'installe dans l'Océan Indien ou sur l'Afrique Australe (Tyson *et al.* [7]), il y pleut abondamment tandis qu'il fait sec en Australie et que les côtes du Pérou sont relativement bien arrosées.
Les décalages et oppositions de phases peuvent être compris comme le résultat de la propagation d'ondes de sécheresse et d'humidité qui suivent le déplacement des anticyclones et des dépressions. Ce phénomène est la conséquence du ballet des cellules convectives d'air atmosphérique à la surface du globe terrestre, tel que l'ont montré Krishnamurti *et al.* [36].

Les allers et retours d'El Niño dans le Sud-Pacifique s'apprécient par des variations du paramètre SOI (Southern Oscillation Index ou oscillations australes) calculées par les différences de pression entre Tahiti et Darwin en Australie.
Le caractère global des crises climatiques est un fait aujourd'hui admis. Les sécheresses de l'Afrique Occidentale et du Nord-Est du Brésil n'échappent pas à la règle. Hastenrath [39], Hastenrath *et al.* [40, 41], Acetunio [42] et Wolter [43] ont montré les relations qui existaient entre les sécheresses périatlantiques et les oscillations australes (SOI) et les oscillations de l'Atlantique Nord (NAO).
Le ballet des dépressions et des anticyclones est un phénomène global. Aussi, l'oscillation australe El Niño n'est pas limitée à la seule région du Pacifique, mais à l'ensemble du monde. En chaque point de la surface du globe terrestre surviennent périodiquement des crises climatiques apparentées au type El Niño.
Il ne faut donc pas considérer les fluctuations du climat qui affectent une région comme représentatives de celles qui affectent le monde entier. Par essence, les fluctuations sont contrastées, d'une région à l'autre, de l'Ouest vers l'Est et du Sud au Nord. Les crises climatiques, parfois sévères pour une région du monde, sont en fait le résultat d'oscillations qui balaient périodiquement l'ensemble de la planète, sans entraîner partout à la fois les mêmes résultats.

Conclusions : crises régionales et évolution du climat global

Sécheresses et crises climatiques

— Les sécheresses ou les années trop humides sont des crises climatiques. Les périodes froides ou les années trop chaudes sont aussi des crises climatiques.
— Ces phénomènes polycycliques montrent des périodicités semblables à celles de l'activité solaire. D'autres composantes cycliques qui ne sont pas encore analysées entrent certainement en jeu. On dit alors que ces phénomènes sont quasi cycliques.
— Une période de sécheresse sur un continent ne correspond pas nécessairement à une période de sécheresse sur un autre continent mais peut au contraire correspondre à une période humide. On ne peut pas dire qu'une année de forte activité solaire soit, par exemple, une année de sécheresse partout à la fois dans le monde. On peut seulement dire que partout dans le monde la fréquence des crises climatiques est la même que celle de l'activité solaire. Ce qui est différent.
— Les crises climatiques, les épisodes secs et les épisodes humides sont téléconnectés, c'est-à-dire interdépendants les uns des autres dans le temps et dans l'espace à l'échelle de la Terre entière.
— A l'échelle du siècle, les oscillations climatiques correspondent plutôt à des fluctuations polycycliques dans la distribution d'une même quantité d'énergie reçue par la Terre qu'à des oscillations de l'énergie globale reçue. L'énergie du rayonnement solaire, globalement constante, paraît ainsi distribuée tantôt plus ici que là, tantôt plus sur un hémisphère que sur l'autre, tantôt plus sur un continent que sur un autre, tantôt plus sur terre que sur mer, etc.
— Les crises climatiques sont enfin des évènements qui n'intéressent pas seulement les oscillations de la température, de la pluviosité ou de l'écoulement continental, mais impliquent des pulsations de l'érosion continentale, de la composition chimique de l'océan ou de l'atmosphère ainsi que des fluctuations de la biomasse continentale ou marine.
— Les crises climatiques sont des éléments de biogéodynamique globale. On n'est pas aujourd'hui en mesure de prévoir les crises climatiques avec précision. Cependant il ne serait pas déraisonnable de commencer à déterminer les périodes à risque. On ne peut sans doute pas combattre les crises climatiques mais on peut s'y préparer.

Fluctuations et crises du climat global

Les fluctuations du climat global au cours des 100 dernières années se lisent sur les courbes de la *figure 13*. En 1980, la concentration moyenne en CO_2 de l'atmosphère est de 340 ppmV et sa pression partielle est de $10^{-3,47}$ atmosphère. La température moyenne du globe terrestre est de 15° C et l'écoulement global des rivières est de 40 000 km³/an, c'est-à-dire de $1,27.10^6$ m³/s. Au cours du siècle dernier, la concentration en CO_2 de l'atmosphère a augmenté de plusieurs dizaines de ppmV et la température de plusieurs dixièmes de degrés, le débit total des rivières a également augmenté significativement. La production croissante de gaz carbonique, liée à l'augmentation de l'activité industrielle, par la réaction d'oxydation des composés organiques est peut-être responsable de cette situation. Le schéma simplifié pourrait être finalement le suivant : l'effet de serre est plus efficace, la température augmente, le cycle de l'eau est activé, l'évaporation est plus grande, la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère est plus élevée, l'effet d'écran de l'atmosphère s'accentue et au total la pluviosité sur les continents

Références

24. Peterson EW, Larsen SE. Climate variation in northern Europe during the past century. In : NA Möner and W Karlen eds. *Climatic changes on a yearly to millenial basis.* Dordrecht : D. Reidel Publishing Company 1984 : 371-9.

25. Tardy Y. *Le cycle de l'eau ; climats, paléoclimats et géochimie globale.* Paris : Masson, 1986.

26. Probst JL, Tardy Y. Global runoff fluctuations during the last 80 years in relation to world temperature change. *American Journal of Science* 1989 ; 289 : 267-85.

27. Bucha V. Mechanism for linking solar activity to weather-scale effects, climatic changes and glaciations in the northern hemisphere. In : NA Morner et W Karlen, eds. *Climatic change on a yearly to a millenial basis.* D. Reidel Publishing Company 1984 : 415-48.

28. Mörner NA. Concluding remarks. In : NA Morner et W Karlen eds. *Climatic change on a yearly to a millenial basis.* D. Reidel Publishing Company, 1984 : 637-51.

29. Kukla GJ. Recent changes in snow and ice. In : J Gribbin ed. *Climatic change.* Cambridge University Press 1978 ; 6 : 114-29.

30. Folland CK, Parker DE, Kates FE. Worldwide marine temperature fluctuations 1856-1981. *Nature* 1984 ; 310 : 670-3.

31. Paltridge G, Woodruff S. Changes in global surface temperature from 1880 to 1977 derived from historical records of sea surface temperature. *Monthly Weather Review* 1981 ; 109 : 2427-34.

32. Jones PD, Raper SCB, Bradley RS, Diaz HF, Kelly PM, Wigley TML. Northern hemisphere surface air temperature variations : 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 1986 ; 25 : 161-79.

s'accroît. Ainsi, l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère pourrait être aussi responsable de l'augmentation de la température à la surface de la Terre et donc aussi de l'augmentation de l'écoulement global à la surface des continents.

Cependant, les oscillations de position des cellules de convection de l'air atmosphérique provoquent d'importants contrastes régionaux. La propagation des zones anticycloniques et des périodes sèches ou des zones dépressionnaires et des périodes humides balaye le monde et privilégie parfois les continents, parfois les océans. Les années sont, tour à tour, froides et sèches ou chaudes et humides. Parfois aussi, mais plus rarement, elles sont froides et humides ou chaudes et sèches.

Cependant, à cause du rôle joué par les variations de teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère sur les changements du climat global, doit-on aujourd'hui lier les fluctuations qui affectent le cycle global de l'eau aux oscillations qui concernent la cadence photosynthétique, le rythme d'érosion mécanique et chimique et l'ensemble des réactions de géochimie globale où est impliqué le carbone ?

Résumé

Les oscillations du climat sont définies à partir des fluctuations de différents paramètres comme les précipitations, le drainage continental ou le débit des fleuves, la température et l'humidité relative de l'air, le niveau des lacs, l'enneigement, l'avancée ou le recul des glaciers, etc. Les oscillations du climat au cours des cent dernières années sont étudiées ici à différentes échelles : grands bassins fluviaux, continents ainsi qu'à celle plus générale du globe terrestre. Ces fluctuations sont comparées aux variations de la circulation atmosphérique caractérisée elle aussi par différents paramètres tels que l'ENSO (El Niño Southern Oscillation) ou SOI (Southern Oscillation Index) et la position du FIT (Front Intertropical) ou ITCZ (Intertropical Convergence Zone). Cette analyse montre que les crises du climat, sécheresses ou déluges, périodes sèches ou humides, sont des phénomènes quasi périodiques, multi-périodiques et donc polycycliques. Les ondes de sécheresse correspondant à de hautes pressions et les ondes d'humidité à de basses pressions parcourent les continents, se propagent à travers le monde et apparaissent ainsi comme téléconnectées. A l'échelle du siècle écoulé, les oscillations du climat apparaissent être l'effet d'une distribution régionale variable mais quasi cyclique de la pluie et de la température, à bilan radiatif global constant, plutôt que comme l'effet d'une distribution régionale constante, à bilan radiatif global variable.

Summary

Climatic oscillations are defined according to fluctuations of various parameters such as precipitation, continental runoff or stream flow, air temperature and relative humidity, lake level, and advance or regression of snow and glaciers, etc. Climatic oscillations over the past 100 years are studied on the scale of large river basins, continents, or even on the planetery level. These fluctuations are compared to variations in atmospheric circulation as characterised by parameters such as the SOI (Southern Oscillation Index) and ITCZ (Intertropical Convergence Zone) position. The present analysis demonstrates that climatic crisis, droughts and floods, wet and dry periods are quasi-and multi-periodic phenomena, and hence polycyclic. Waves of drought and humidity, corresponding to high and low pressures respectively, are propagated across the world giving the appearance of being teleconnected. Seen on the time scale of the past century, climatic oscillations appear to be due to a variable, but quasi-cyclic, regional distribution of rain and temperature of constant net global radiation rather than the effect of a constant regional distribution of variable net global radiative.

Références

33. Jones PD, Raper SCB, Wigley TML. Southern hemisphere surface air temperature variations : 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 1986 ; 25 : 1213-30.

34. Jones PD, Wigley TML, Wright PB. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature* 1986 ; 322 : 430-4.

35. Bhalme MN, Mooley DA. Cyclic fluctuations in the flood area and relationship with the double sunspot cycle. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 1981 ; 20 : 1041-8.

36. Krishnamurti TN, Shao-Hang Chu, Iglesias W. On the sea-level pressure of the southern oscillation. *Arch Meteo Geoph Biocl* 1986 ; A 34 : 385-425.

37. Ropelewski CF. Seasonal climate summary. The climate of summer 1983 — a season of contrasts and extremes. *Monthly Weather Review* 1984 ; 112 : 591-609.

38. Ropelewski CF. Seasonal climate summary. The global climate June-August 1984. A return to « normal » in the tropics. *Monthly Weather Review* 1988 ; 113 : 664-79.

39. Hastenrath S. *Climate and circulation of the tropics.* Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1987.

40. Hastenrath S, Ming-Chu Wu, Pao-Shin Chu. Towards the monitoring and prediction of the North-East Brazil drought. *Quart Journal Roy Meteor Soc* 1984 ; 110 : 411-25.

41. Hastenrath S, De Castro LC, Acetunio P. The Southern Oscillation in the tropical atlantic sector. *Beitr Phys Atmosph* 1987 ; 60 (4) : 447-64.

42. Acetunio P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I : surface climate. *Monthly Weather Review* 1988 ; 116 (3) : 505-24.

43. Wolter K. Modes of tropical circulations, Southern Oscillation and Sahel Rainfall Anomalies. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 1989 ; 2 (2) : 149-72.