

Sécheresses et crises climatiques

Yves Tardy et Jean-Luc Probst

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, pluviosité, écoulement, déficit d'écoulement, etc. Les valeurs de ces paramètres sont caractéristiques, d'une part, de l'espace dans lequel ils ont été mesurés, d'autre part, 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 subdésertiques. Le résultat dépend aussi de la taille du bassin versant représentatif : plus grande est la variabilité dans l'espace et plus grande devrait être la taille

du bassin versant que l'on choisit pour caractériser le climat. Dans le temps, les paramètres climatiques présentent habituellement d'importantes fluctuations ; à toutes les échelles, l'amplitude des oscillations est variable d'une région à l'autre : faible en domaine équatorial, plus grande en domaine méditerranéen ou tropical à saisons contrastées, très importante en domaine sahélien ou désertique.

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 polycyclique, c'est-à-dire résultant de la superposition de plusieurs cycles de périodes différentes.

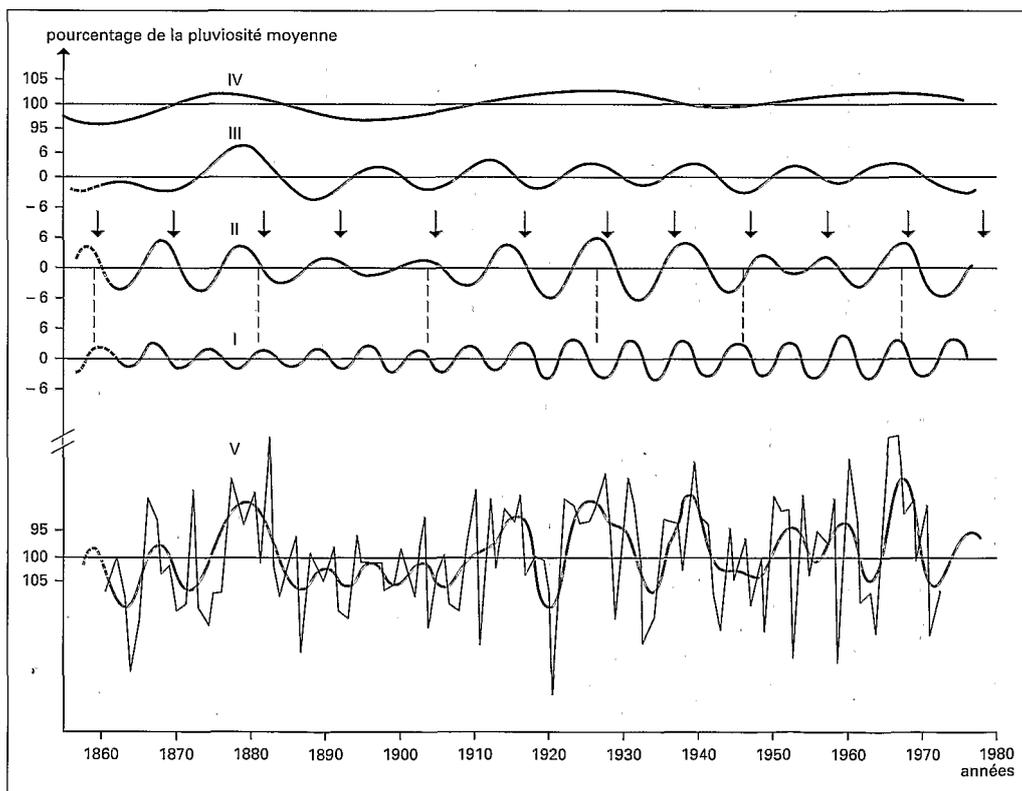


fig. 1 - Fluctuations de la pluviosité en Europe (V) et filtrage des différents cycles à 7 ans (I), 11 ans (II), 16 ans (III) et 22 ans (IV) [d'après R. G. Vines, 1985].

R. G. Vines, A. I. Tomlinson, R. Bradzil, F. Samaj et S. Valovic (R. G. Vines, 1980, 1982, 1985, 1986 ; R. G. Vines & A. I. Tomlinson, 1980 ; R. Bradzil et al., 1985) l'ont démontré en de nombreuses stations d'Australie, de Nouvelle-Zélande, d'Afrique du Sud, d'Amérique du Nord, d'Inde et d'Europe (fig. 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 chaque bassin versant. On prendra ici tout d'abord les exemples de la Garonne en France et du Niger au Mali.

Fluctuations du débit de la Garonne

La Garonne prend sa source dans les Pyrénées. Son régime est sous l'influence atlantique et méditerranéenne. Les fluctuations du débit de ce fleuve 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 quatre-vingt, plutôt bas, annoncent la sécheresse des années 1989-1990. L'année 1930 est la plus humide du siècle et 1949 est l'année la plus sèche. Les années 1915 et 1972, très sèches pour le Sahel d'Afrique du Nord, sont très humides ou normales pour l'Europe de l'Ouest.

Périodes sèches et humides en Europe

Pour l'ensemble de l'Europe, J.-L. Probst (1989) a mis en évidence une période sèche au début du siècle, une période humide de 1910 à 1940, un épisode sec à la fin des années quarante, et une période sèche après 1980.

La figure 2 montre cependant que, du nord au sud, d'importants décalages apparaissent. Le début de l'épisode sec des années quarante apparaît plus tôt au nord (vers 1935) qu'au sud (vers 1945). De plus, la fin de ce même épisode 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 quarante 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 au Mali

Le Niger prend sa source en Guinée sur le versant nord du Fouta-Djalou, puis coule dans le Sahel de l'Afrique de l'Ouest. Les fluctuations du débit du Niger à Koulikoro font apparaître une période sèche autour des années 1913-1914, suivie d'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. Les années soixante-dix et quatre-vingt sont des années très sèches pour le Sahel d'Afrique. Les débits mesurés depuis le début du siècle font apparaître des fluctuations décalées entre la Garonne et le Sénégal, c'est-à-dire entre l'Europe et l'extrême ouest de l'Afrique (J.-L. Probst & Y. Tardy, 1985).

Fluctuations de niveau du lac Tchad depuis cent ans et décalages entre l'Europe et l'Afrique de l'Ouest

Les variations de niveau du lac Tchad reflètent les oscillations du climat du centre de l'Afrique. La synthèse présentée par D. Jäckel (1984) montre que l'humidité de la région a fluctué, la plupart du temps, en sens inverse de ce que l'on observe en Europe (fig. 3). Entre 1870 et 1900, le niveau du lac est haut alors que les pluies sont rares en Europe. Entre 1905 et 1950, le niveau est en position moyenne. À partir de 1955, le niveau est assez haut alors que les étés sont encore sévères en Europe.

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. Alors que l'Afrique connaît une période d'aridité drastique, l'Europe est relativement bien arrosée. À la fin des années quatre-vingt, alors que l'humidité revient en

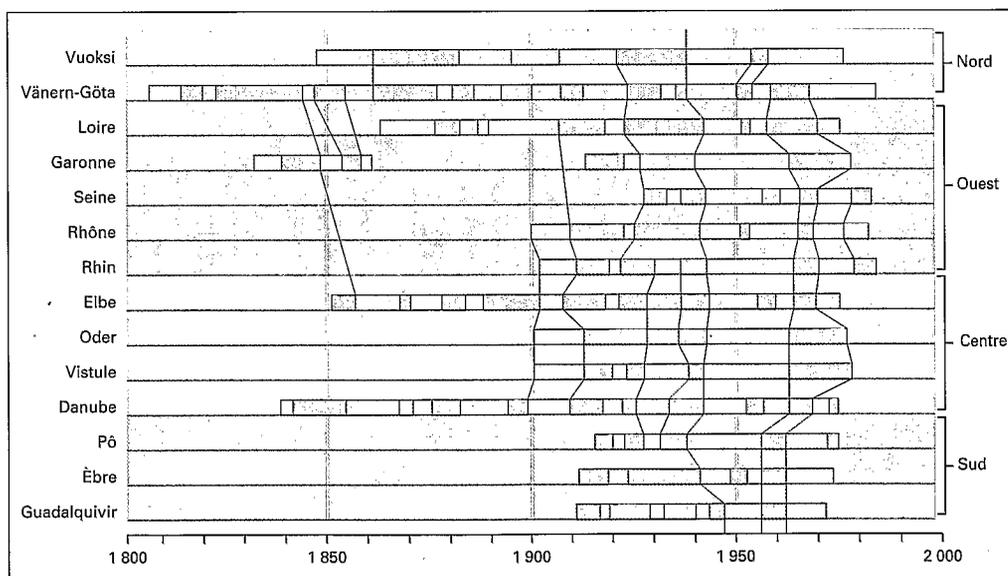


fig. 2 - Périodes hydroclimatiques moyennes (en noir, périodes humides ; en blanc, périodes sèches) pour l'ensemble des fleuves d'Europe depuis 1800. (d'après J.-L. Probst, 1989).

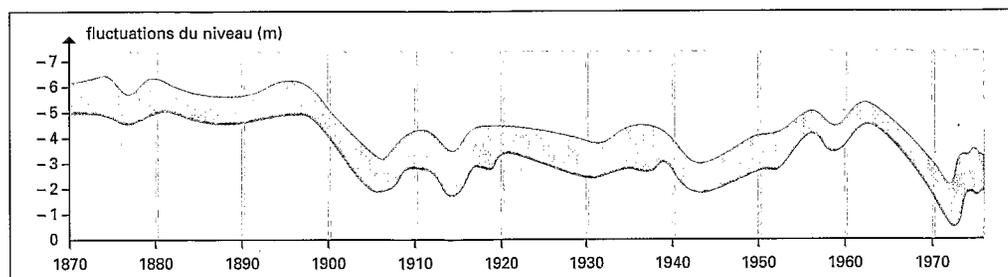


fig. 3 - Reconstitution des fluctuations du niveau du lac Tchad (d'après D. Jäckel, 1984).

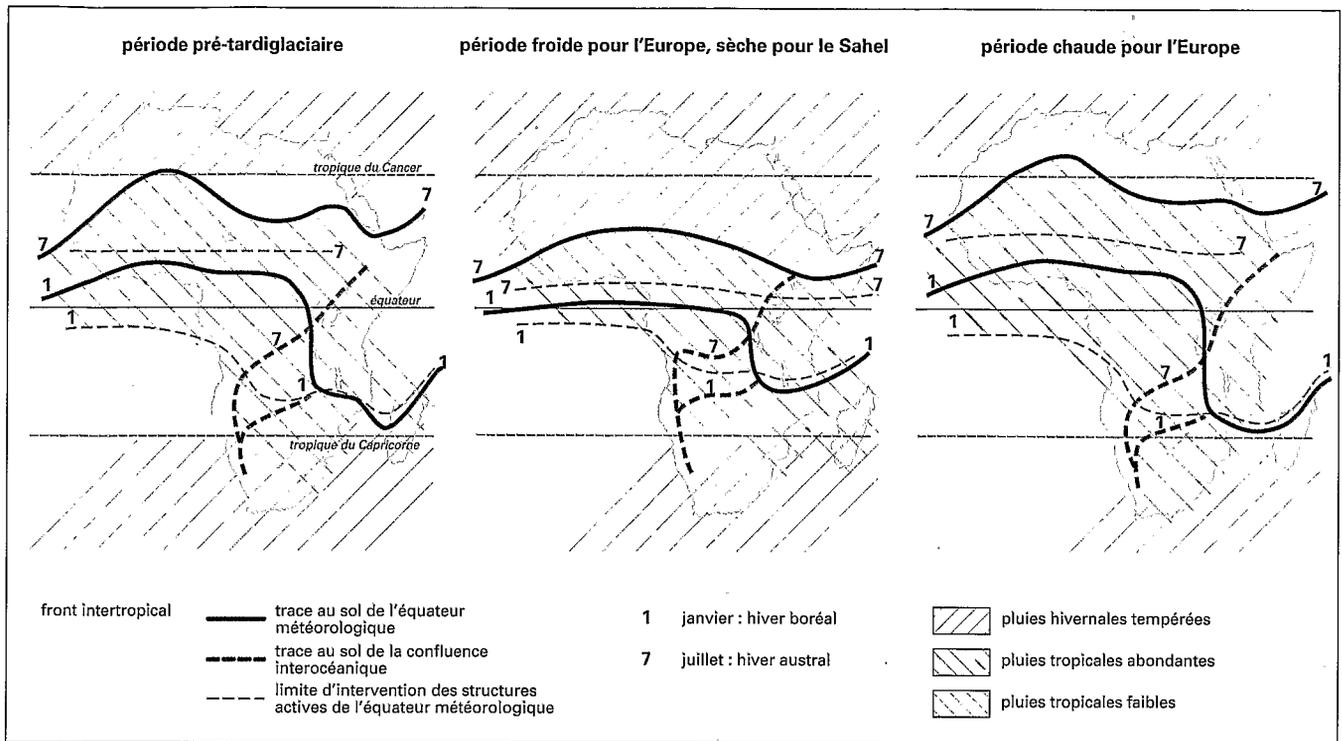


fig. 4 - Position du front intertropical et scénarios climatiques pour l'Afrique (d'après M. Leroux, 1970, 1983 et 1988).

Afrique, l'Europe, et particulièrement la France, est victime d'une très forte sécheresse.

Il semble bien que les fluctuations de débit des fleuves d'Afrique et d'Europe soient 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 est régi par la position du front intertropical. Quatre scénarios ont été proposés par M. Leroux (1970, 1983, 1988) [fig. 4] :

- Lorsque le front intertropical 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 est généralisé sur le Sahel d'Afrique de l'Ouest. Seul le sud de l'Afrique occidentale, 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 (J.-L. Probst & Y. Tardy, 1987). Pour le Congo, situé plus au sud, la période 1940-1950 est plutôt déficitaire, alors que la période 1970-1980 est moyenne.

- Lorsque le front intertropical 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 du Sénégal, du Niger et du Chari sont comprises entre 1951 et 1957. Pour le Congo, cette période est au contraire plutôt sèche (J.-L. Probst & Y. Tardy, 1987).

- 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.

- 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, les mouvements du front intertropical, qui sont sous l'influence de la montée vers le nord ou de la descente vers le sud des masses d'air polaire, permettent de saisir aisément la relation qui peut exister entre les fluctuations de la température et celles de l'humidité. On perçoit également l'effet de compétition entre hémisphère Nord et hémisphère Sud. Les fluctuations du climat suivent donc un jeu complexe.

Fluctuations de débit du Congo et de l'Amazone

Les fluctuations de débit des fleuves d'Amérique du Sud et d'Afrique ont augmenté en moyenne au cours des cent dernières années (fig. 5). À l'échelle du siècle, les variations de débit du Congo et de l'Amazone présentent en moyenne la même tendance à l'augmentation. Cependant, examinées à l'échelle de la décennie, les fluctuations de débit sont déphasées et paraissent en opposition. En fait, le déphasage est de 60° pour la période de onze ans (N. Kayser et al., 1990).

Tout se passe donc comme si pendant un certain temps, de 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. Il s'agit ici d'un effet de compensation pluviométrique.

Compensation pluviométrique au-dessus des océans

Le même phénomène de compensation pluviométrique se remarque également au-dessus des océans ; il est fonction de la latitude. Au cours du siècle écoulé, par exemple, l'indice de précipitation a augmenté dans les hautes latitudes mais a diminué dans les basses latitudes de l'hémisphère Nord (P. D. Jones, 1990). Une augmentation de la pluviosité globale sur les continents peut se traduire par une diminution de la pluviosité sur les océans. Sur les océans comme sur les continents, une diminution à un endroit est toujours compensée par une augmentation ailleurs.

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.

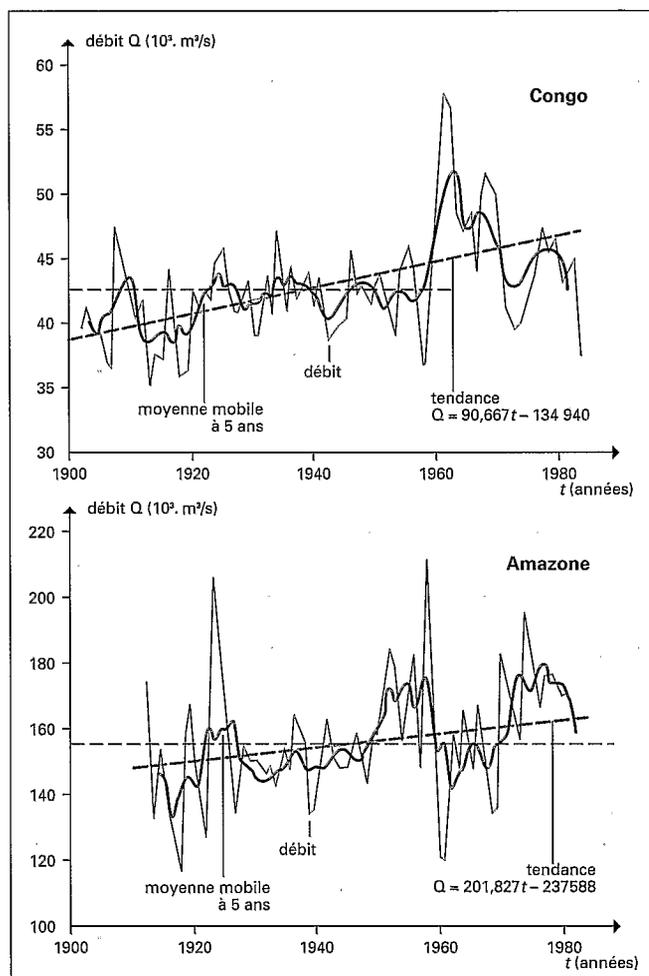


fig. 5 - Fluctuations des débits des fleuves Congo et Amazone depuis le début du siècle (d'après R. R. Nkounkou, 1989).

Variations de la température de l'air

Le climat de l'Europe du Nord depuis cent ans

Le climat moyen de l'Europe du Nord au cours du siècle dernier a été reconstitué par E. W. Peterson et S. E. Larsen (1984). On remarque que, au cours de la période 1890-1970, les variations de température et de précipitations ont présenté globalement la même tendance moyenne à l'augmentation, évoluant donc ensemble sur le mode climatique normal d'Y. Tardy (1986). Tardy distingue en effet deux modes du climat global : un mode normal, avec des périodes chaudes et humides ou froides et sèches, et un mode anormal, avec des périodes chaudes et sèches ou froides et humides. Probst et Tardy ont montré que, à l'échelle globale au cours des cent dernières années, le mode normal était vérifié dans 75 p. 100 des cas, contre 25 p. 100 pour le mode anormal.

Évolution de la température et compensation thermique aux États-Unis depuis cent ans

Depuis cent ans, la température de l'air aux États-Unis a évolué en fluctuant en même temps que l'activité géomagnétique. Cependant, comme l'a montré V. Bucha (1984), la température de l'air du mois de janvier diminue sur la côte est 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. Il apparaît donc qu'un phénomène de compensation régit l'évolution de la température d'hiver, sur les deux côtes du continent américain, tant à l'échelle annuelle qu'à l'échelle séculaire. 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 que les fluctuations de l'activité solaire, mais non en phase avec celles-ci. Les fluctuations de la température ne sont pas homogènes sur l'ensemble du globe. N. A. Mörner a mis l'accent sur le phénomène de compensation thermique entre hémisphères (N. A. Mörner, 1984). Lorsqu'ici la température augmente puis diminue, là elle diminue puis augmente. Si les régions considérées sont suffisamment éloignées, les fluctuations sont en opposition de phase (fig. 6).

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

Les années 1972-1975 furent pour le Sahel d'Afrique une période de sécheresse sévère. En même temps, en Europe et dans tout l'hémisphère Nord, le froid s'installa (G. J. Kukla, 1978). On vérifiera plus loin à d'autres échelles de temps que le mode le plus fréquent est le mode normal d'Y. Tardy (1986), où les périodes climatiques froides et sèches s'opposent aux périodes chaudes et humides (fig. 7). Le mode le moins fréquent, ou anormal, correspond à une montée de la température quand un épisode aride s'installe et à une baisse de la température lorsqu'un épisode humide survient.

Évolution du climat global depuis cent 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 (J.-L. Probst & Y. Tardy, 1987 et 1989) permet de faire plusieurs remarques (on ne tient compte ici que de l'écoulement continental, fonction des précipitations qui tombent seulement sur les continents, et non du surplus qui se déverse sur les océans) :
 - le vingtième siècle est divisé en deux parties de part et d'autre de l'année 1940 ;
 - la première moitié du siècle est plutôt humide pour l'Europe ou pour l'Asie et plutôt sèche pour l'Afrique, l'Amérique et l'ensemble des continents ;
 - à l'inverse, la seconde moitié du siècle est plutôt sèche pour l'Europe ou l'Asie et plutôt humide pour l'Afrique, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud et l'ensemble des continents.

Il semble bien, tout d'abord, qu'un phénomène de compensation s'établisse entre continents. Lorsque l'un d'entre eux reçoit plus d'eau, un autre en reçoit 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.

Si cela était vrai, il n'y aurait pas crise globale du climat mais décalage de crises régionales qui affecteraient tantôt un continent, tantôt un autre, tantôt les terres émergées, tantôt les océans. Le climat global ne doit donc pas être considéré seulement à l'échelle des continents.

Évolution de la température moyenne globale au cours du siècle écoulé

La température moyenne globale (C. K. Folland et al., 1984 ; G. Paltridge & S. Woodruff, 1981 ; P. D. Jones et al., 1986 a, b, c) est la moyenne pondérée des températures moyennes des océans et des continents de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud. L'étude des fluctuations de la température moyenne globale de l'air 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 apparaissent : 3, 4 et 8 ans.

Relation entre débit et 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 global, a été calculée pour l'ensemble des soixante-dix dernières années (J.-L. Probst & Y. Tardy, 1987 et 1989) et portée (fig. 8) en regard des variations de la température globale (P. D. Jones, 1990). Le débit continental global et la température moyenne globale augmentent ensemble. On peut trouver une relation linéaire entre débit et température :

$$D_T = D_{T_0} + \alpha(T - T_0).$$

Cette relation est telle que si D_{T_0} est le débit global actuel (0,396 10^{20} cm³/an, soit 39 600 kilomètres cubes par an) et T_0 la température moyenne globale actuelle (15 °C), on a :

$$D_T = 0,396 + 0,0367 (T - 15).$$

On prévoit ainsi que l'écoulement continental global double en cas d'augmentation de 10 °C de la température moyenne 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 avec le débit (J.-L. Probst, 1990) : les années sont chaudes et humides, ou froides et sèches (mode normal) ; 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, 1986).

Ainsi, 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 surimposent 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 : trois ans et cinq ans. Pour le débit global s'y ajoute un cycle de douze ans.

Oscillations quasi périodiques et polycycliques

Cinquante fleuves parmi les plus importants ont été choisis pour montrer comment se propageaient les ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. Une analyse spectrale (N. Kayser et al., 1990) montre pour tous ces fleuves une superposition de fluctuations dont les périodes sont comprises entre deux et quatre ans, entre quatre et six ans, entre dix et vingt ans. Les périodicités des oscillations climatiques sont les mêmes que celles de l'activité solaire.

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 durées d'observation de ces oscillations sont trop courtes et les observations ne sont pas suffisamment anciennes pour permettre la séparation de cycles de longue période, donc la prédiction du climat à long terme.

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

Certains fleuves montrent des fluctuations de débit synchrones : c'est le cas du Mékong dans le Sud-Est asiatique et de l'Ienisseï en Sibérie. En revanche, certains autres présentent 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 et du Congo et de l'Amazonie.

En fait, le déphasage progressif et la propagation des ondes de sécheresse et d'humidité apparaissent clairement sur les courbes de la figure 9 (d'après N. Kayser et al., 1990) pour les oscillations dont les périodes sont comprises entre dix et quinze 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 Kamtchatka, s'ils sont en phase, fluctuent en revanche en totale opposition de phase avec le Rhône.

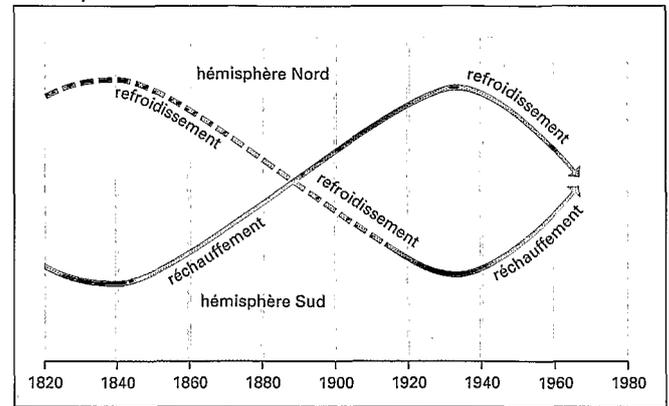


fig. 6 - Compensation thermique entre hémisphères à l'échelle du siècle (d'après N. A. Möner, 1984).

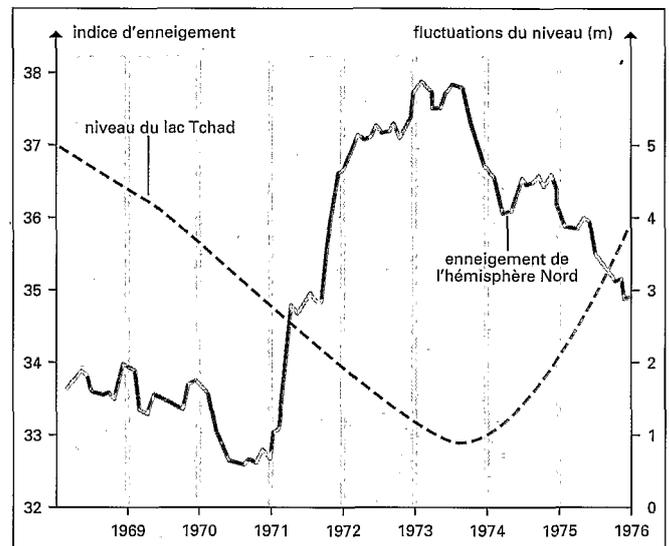
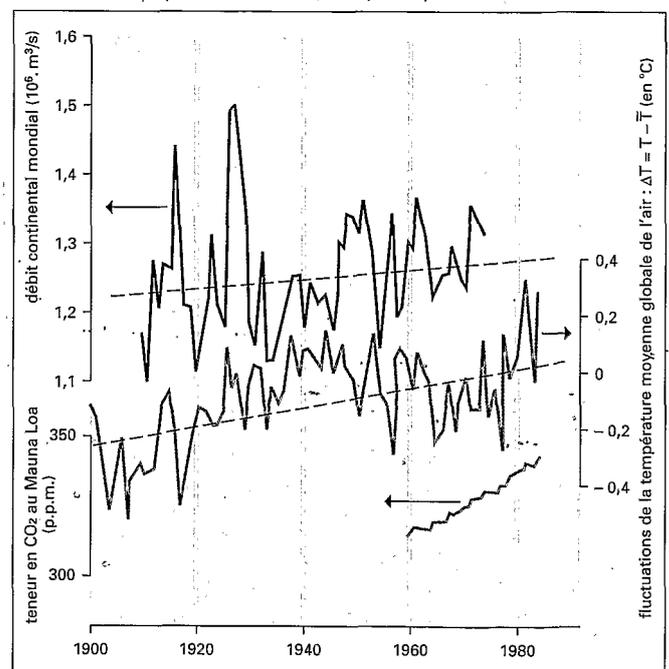


fig. 7 - Relation, à l'échelle de la décennie, entre la température moyenne de l'hémisphère Nord mesurée par l'enneigement (d'après G. J. Kukla, 1978) et le niveau du lac Tchad (donné par D. Jäckel, 1984).

fig. 8 - Fluctuations de la température moyenne globale, du débit total des fleuves du monde et augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ au cours des quatre-vingts dernières années (d'après J.-L. Probst & Y. Tardy, 1989).



Les fluctuations de débit des fleuves ne sont synchrones que sur une ligne isophasse. Sur un trajet qui recoupe les lignes isophasse, les fluctuations sont décalées ou déphasées : on constate 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, 1951 sur l'Oural, et 1955 en Sibérie. La sécheresse se propage ainsi d'ouest en est, tout comme elle se propage du sud au nord en Amérique.

Sur le globe terrestre, les fluctuations qui se produisent avec une périodicité, identique à celle de l'activité solaire, ne sont donc 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'augmentation des débits dans certaines autres régions de la Terre. Les fluctuations de l'activité solaire donnent peut-être partout dans le monde un rythme identique mais ne déterminent pas partout un synchronisme des fluctuations des différents paramètres climatiques. Ainsi, les ondes de sécheresse et d'humidité, mises en évidence pour des périodicités comprises entre dix et quinze ans, sont téléconnectées et se propagent d'ouest en est et du sud au nord. 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 celle du phénomène de quasi-périodicité des fluctuations enregistrées. Une recherche dans ce domaine donnerait sûrement des résultats fort intéressants.

El Niño et les oscillations australes

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 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 (fig. 10).

Avec une périodicité de trois 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 est inversée (fig. 10). 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 – particulièrement celle des anchois – se fait rare, des pluies diluviennes s'abattent sur les côtes. Il s'agit d'une crise climatique.

Les oscillations australes se résument schématiquement en un mouvement périodique d'allées et venues des anticyclones et des dépressions en relais les uns par rapport aux autres, au-dessus des océans Indien et Pacifique (T. N. Krishnamurti et al., 1986). Les conséquences climatiques sont importantes. Lorsque, comme en 1968, l'anticyclone est localisé dans la région du Cap, la dépression est installée en Australie au-dessus de Darwin (fig. 10). Il fait sec au sud de l'Afrique et au Pérou, il pleut en Australie. En revanche, lorsqu'une dépression s'installe dans l'océan Indien ou sur l'Afrique australe, 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 et comme la conséquence du ballet des cellules convectives d'air atmosphérique à la surface du globe terrestre, comme l'ont montré T. N. Krishnamurti et ses collaborateurs (1986). Les aller et retour d'El Niño dans le Pacifique sud s'apprécient par des variations du paramètre S.O.I. (Southern Oscillation Index, ou indice des 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 du Sahel d'Afrique et du nord-est du Brésil n'échappent pas à la règle. Des relations existent entre les sécheresses périatlantiques, les oscillations australes (E.N.S.O., pour El Niño southern oscillation) et les oscillations de l'Atlantique nord (N.A.O.) [S. Hastenrath, 1987 ; S. Hastenrath et al., 1984, 1987 ; P. Acetunio, 1988 ; K. Wolter, 1989].

Le ballet des dépressions et des anticyclones est un phénomène global et n'est pas limité à la seule région du Pacifique, mais à l'ensemble du monde. En chaque point de la surface du globe terrestre surviennent quasi périodiquement des crises climatiques apparentées au type El Niño.

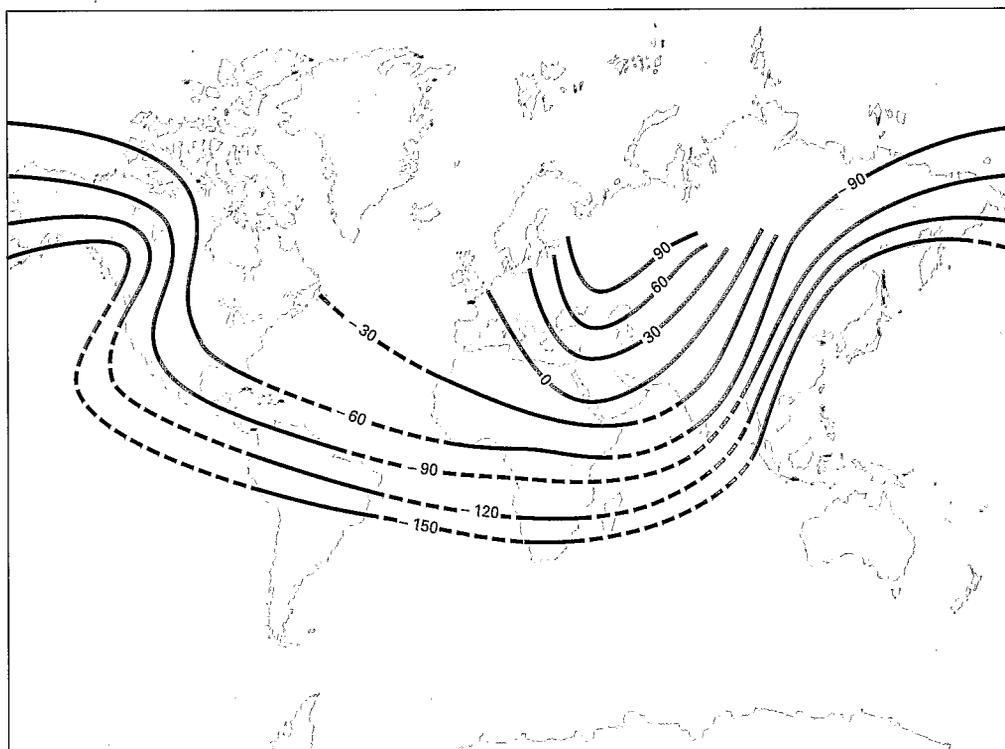


fig. 9 - Déphasages (en degrés) des ondes de sécheresse et d'humidité calculés par spectres croisés par rapport au Rhône pour une période de 10 à 15 ans (d'après N. Kayzer et al., 1990).

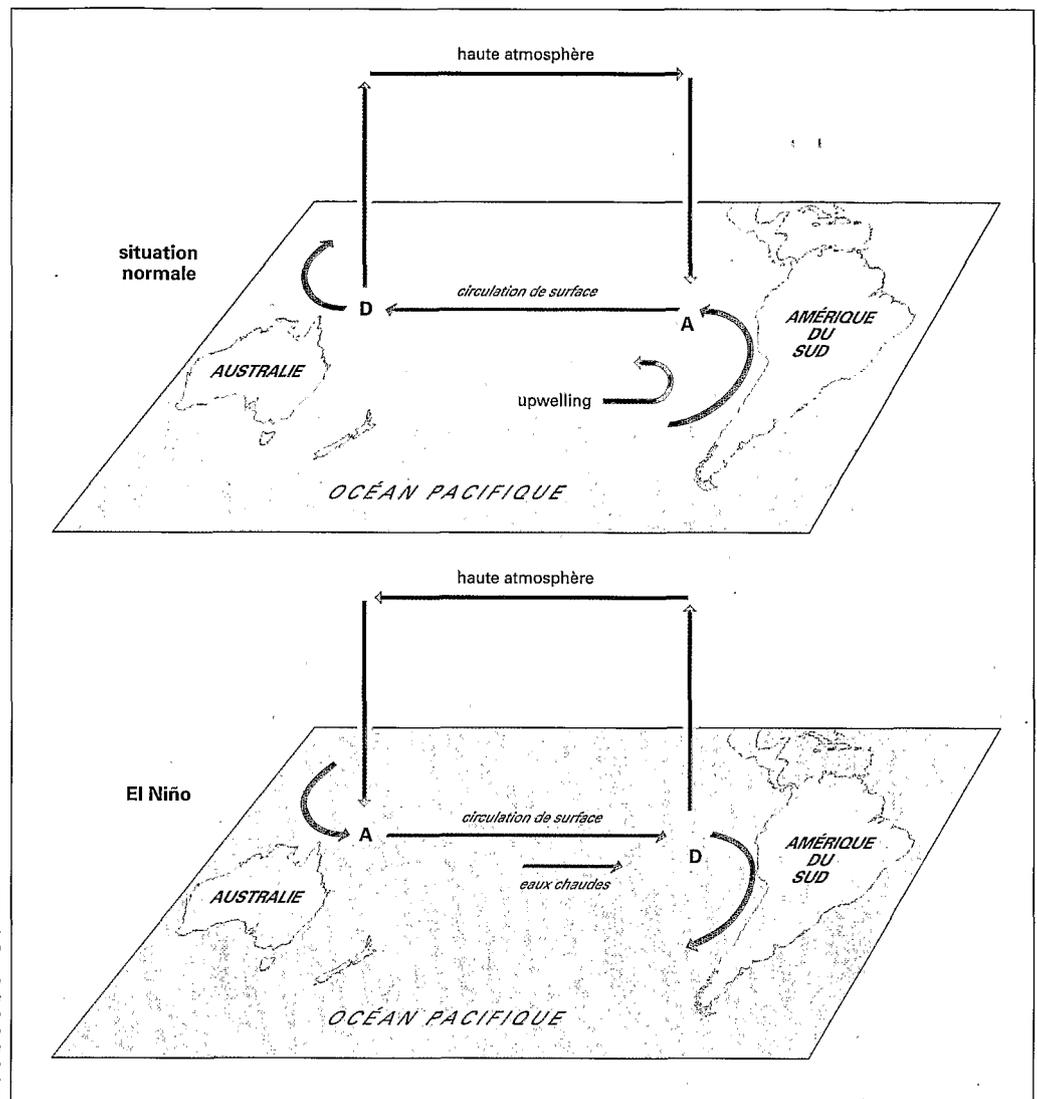


fig. 10 -
Le phénomène El Niño
et les oscillations australes.
La dérive de position
des anticyclones et des dépressions
au-dessus de l'Océan Pacifique
provoque une alternance
de périodes sèches ou humides
sur les côtes du Pérou ou en Australie
(d'après A. Henderson-Sellers
& P. J. Robinson, 1985).

C'est ainsi qu'il ne faut 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 et déphasées, 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 balayent périodiquement l'ensemble de la planète, sans entraîner partout à la fois les mêmes résultats.

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 sont quasi périodiques et polycycliques ; leurs périodicités sont semblables à celles de l'activité solaire. D'autres composantes cycliques qui ne sont pas encore analysées entrent certainement en jeu.

Les crises climatiques sont téléconnectées, c'est-à-dire solidaires les unes des autres dans le temps et dans l'espace à l'échelle de la Terre entière. Mais une période de sécheresse sur un continent ne correspond pas nécessairement à une période de sécheresse sur un autre continent. 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 n'est pas pareil.

À l'échelle du siècle, les oscillations climatiques correspondent plutôt à des perturbations quasi cycliques dans la distribution d'une même quantité d'énergie reçue par la Terre qu'à des fluctuations de l'énergie globale reçue. L'énergie reçue, qui peut être constante, est 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.

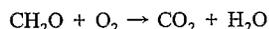
Enfin, les crises climatiques sont des événements qui n'intéressent pas seulement les oscillations de la température, de la pluviosité ou de l'écoulement continental, mais qui impliquent des pulsations de l'érosion continentale, de la composition chimique de l'océan ou de l'atmosphère ainsi que des fluctuations de la biomasse continentale ou marine.

Les crises climatiques sont des éléments de biogéodynamique globale. On ne peut pas encore prévoir la venue des sécheresses avec précision. On peut seulement indiquer aux pouvoirs quelles sont les périodes à risques. On ne peut sans doute pas combattre les crises climatiques mais on peut s'y préparer. Elles reviennent et disparaissent quasi périodiquement.

Fluctuations et crises du climat global

Les fluctuations du climat global au cours des cent dernières années apparaissent bien dans l'étude de l'évolution de la température de l'air sur les côtes est et ouest des États-Unis. En 1980, la concentration moyenne en dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère est de 340 ppmV (partie par million en volume) 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 · 10⁶ m³/s. Au cours du siècle dernier, la concentration en CO₂ 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 (2 000 km³ environ). La production croissante de dioxyde de carbone, 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 est 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'accroît et au total la pluviosité sur les continents s'accroît. Ainsi, l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère pourrait être aussi responsable de l'augmentation de la température à la surface de la Terre, 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.

On peut donc aujourd'hui raisonnablement penser que ce sont des oscillations de même nature qui, alliées à des fluctuations de position des continents, ont déterminé, au cours des temps géologiques, les fluctuations des paléoclimats que l'on a reconstitués. Cependant, à cause du rôle joué par les variations des teneurs en dioxyde de carbone de l'atmosphère sur les changements du climat global, on doit 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 biogéochimie globale où est impliqué le carbone.

Bibliographie

P. ACETUNO, « On the functioning of the southern oscillation in the south american sector. Part. I : surface climate », in *Monthly Weather Review*, vol. CXVI, n° 3, pp. 505-524, 1988 / R. BRAZDIL, F. SAMAJ & S. VALOVIC, « Variation of spatial annual precipitation sums in central Europe in the period 1881-1980 », in *Jour. of Climatology*, n° 5, pp. 617-631, 1985 / V. BUCHA, « Mechanism for linking solar activity to weather-scale effects, climatic changes and glaciations in the northern hemisphere », in N. A. MÖRNER et W. KARLEN dir., *Climatic Change on a Yearly to a Millennial Basis*, pp. 415-448, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1984 / C. K. FOLLAND, D. E. PARKER & F. E. KATES, « Worldwide Marine Temperature Fluctuations 1856-1981 », in *Nature*, n° 310, pp. 670-673, 1984 / S. HASTENRATH, *Climate and Circulation of the Tropics*, D. Reidel Publ. Co., 1987 / S. HASTENRATH, L. C. DE CASTRO & P. ACETUNO, « The Southern Oscillation in the tropical atlantic sector », in *Beitr. Phys. Atmosph.*, vol. LX, n° 4, pp. 447-464, 1987 / S. HASTENRATH, MING-CHU WU & PAO-SHIN CHU, « Towards the monitoring and prediction of the North-East Brazil drought », in *Quatr. Journ. Res. Meteorological Society*, n° 110, pp. 411-425, 1984 / A. HENDERSON-SELLERS & P. J. ROBINSON, *Contemporary Climatology*, Longman Scientific and Technical, John Wiley & Sons Inc., New York, 1985 / D. JÄCKEL, « Rainfall Patterns and lake level variation at Lake Chad », in N. A. Mörner et W. Karlen dir.,

Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis, pp. 191-200, D. Reidel Publ. Co., 1984 / P. D. JONES, « Le Climat des mille dernières années », in *La Recherche*, vol. CCXIX, n° 21, pp. 304-312, 1990 / P. D. JONES, S. C. B. RAPER, R. S. BRADLEY, H. F. DIAZ, P. M. KELLY & T. M. L. WIGLEY, « Northern Hemisphere Surface air temperature variations : 1851-1984 », in *Journ. of Climate and Applied Meteorology*, n° 25, pp. 161-179, 1986 (a) / P. D. JONES, S. C. B. RAPER & T. M. L. WIGLEY, « Southern Hemisphere Surface air temperature variations : 1851-1984 », *ibid.*, n° 25, pp. 1213-1230, 1986 (b) / P. D. JONES, T. M. L. WIGLEY & P. B. WRIGHT, « Global Temperature Variations between 1861 and 1984 », in *Nature*, vol. CCCXXII, pp. 430-434, 1986 (c) / N. KAYSER, J.-L. PROBST, D. CADET & Y. TARDY, « Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde », in *C.R. Acad. Sci.*, n° 310, pp. 757-763, Paris, 1990 / T. N. KRISHNAMURTI, SHAO-HANG CHU & W. IGLESIAS, « On the sea-level pressure of the southern oscillation », in *Arch. Meteo. Geoph. Biocl.*, série A 34, pp. 385-425, 1986 / G. J. KUKLA, « Recent Changes in snow and ice », in J. Gribbin dir., *Climatic Change*, n° 6, pp. 114-129, Cambridge Univ. Press, 1978 / M. LEROUX, *La Dynamique des précipitations en Afrique occidentale*, Asecone, P.D.E.M., vol. XXIII, Dakar, 1970 ; *Le Climat de l'Afrique tropicale*, Champion, Paris, 1983 ; « The Key Contribution of satellite pictures to a new understanding of meteorological concepts relating to the middle latitudes : identification of the polar mobile anticyclone (P.M.A.) » in *C.R. du 7th Meteosat Users Meeting*, pp. 1-327, Eumetsat, Madrid, 1988 / N. A. MÖRNER, « Concluding Remarks », in N. A. Mörner & W. Karlen dir., *Climatic Change on a Yearly to a Millennial Basis*, pp. 637-651, D. Reidel Publ. Co., 1984 / R. R. NKOUNKOU, *Hydrogéodynamique actuelle du Congo et de l'Amazonie. Cycle global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques (derniers 600 millions d'années)*, thèse de doctorat, 183 p., univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, 1989 / G. PALTRIDGE & S. WOODRUFF, « Changes in global surface temperature from 1880 to 1977 derived from historical records of sea surface temperature », in *Monthly Weather Review*, n° 109, pp. 2427-2434, 1981 / E. W. PETERSON & S. E. LARSEN, « Climate Variation in northern Europe during the past century », in N. A. Mörner & W. Karlen dir., *Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis*, pp. 371-379, D. Reidel Publ. Co., 1984 / J.-L. PROBST, « Hydroclimatic Fluctuations of some european large rivers since 1800 », in G. Petts dir., *Historical Changes of Large Alluvial Rivers in Western Europe*, pp. 41-55, John Wiley & Sons, Chichester, 1989 ; *Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années*, thèse de doctorat ès sciences, vol. I, 185 p. et vol. II, 393 p., univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, 1990 / J.-L. PROBST & Y. TARDY, « Fluctuations hydroclimatiques du bassin d'Aquitaine au cours des 70 dernières années », in *Rev. Géol. dyn. et Géogr. phys.*, n° 26, pp. 59-76, 1985 ; « Long Range Streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century », in *Journ. of Hydrology*, n° 94, pp. 289-311, 1987 ; « Global Runoff Fluctuations during the last 80 years in relation to world temperature change », in *American Journ. Sci.*, n° 289, pp. 267-285, 1989 / Y. TARDY, *Le Cycle de l'eau ; climats, paléoclimats et géochimie globale*, Masson, Paris, 1986 / R. G. VINES, « Analyses of South African rainfall », in *South African Journ. of Science*, n° 76, pp. 404-409, 1980 ; « Rainfall Patterns in the Western United States », in *Journ. Geophys. Res.*, n° 87, C9, pp. 7303-7311, 1982 ; « European Rainfall Patterns », in *Journ. of Climatology*, n° 5, pp. 607-616, 1985 ; « Rainfall Patterns in India », *Ibid.*, n° 6, pp. 135-148, 1986 / R. G. VINES & A. I. TOMLINSON, « An analysis of New Zealand's Rainfall », in *New Zealand Journ. of Science*, n° 23, pp. 205-216, 1980 / K. WOLTER, « Modes of tropical circulations, southern oscillation and Sahel rainfall anomalies », in *Journ. of Climate*, vol. II, n° 2, pp. 149-172, 1989.