

LES VARIATIONS CLIMATIQUES AU SAHARA :
DU PASSÉ AU FUTUR

Climatic variation of the end of the Quaternary in the Sahara, based on geological and geomorphological evidence. A synthesis

N. PETIT-MAIRE *

ABSTRACT

(1) During the last global climatic cycle, the tropical arid belt in the North of Africa and its southern margins (Sahel) successively underwent wide changes in their latitudinal range :

- *Isotopic stage 5 e (max ca 125 ky) : extensive lakes in present Sahara.*
- *Isotopic stage 2 (max ca 21 ky) : hyperarid saharan environments down to 14° N.*
- *Isotopic stage 1 (max ca 9 - 7 ky) : lakes and sahelian environments up to 22 - 23° N.*

These continental processes fit the orbital forcings and the global climatic changes.

(2) Since ca 6 000 B.P. another expansion of the Sahara has taken place and the Sahel's northern limit is now at 17° N. These data corroborate a trend towards the arid scenario and fit the insolation curve for the past 6 ky and the future trend towards a new glacial era which should be once again associated with drops in temperatures and sea-level.

The evidence for climatic changes in this arid belt thus confirms G. Kukla's predictive model and does not imply any human responsibility, although deforestation and erosion locally strengthen the trend.

RÉSUMÉ

(1) Au cours du dernier cycle climatique global, la zone tropicale aride dans le nord de l'Afrique ainsi que sa bordure méridionale (Sahel) ont subi de larges modifications dans leur position en latitude :

- *Stade isotopique n  5 e (max. vers 125 ka) : lacs étendus dans le Sahara actuel,*
- *Stade isotopique n  2 (max. vers 21 ka) : environnement saharien hyperaride jusqu'à la latitude de 14° N,*
- *Stade isotopique n  1 (max. vers 9-7 ka) lacs et environnement sahélien jusqu'à 22-23° N*

* IGCP 252 de l'UNESCO-IUGS. Laboratoire de Géologie du Quaternaire - CNRS - Case 907 - Luminy - 13288 Marseille - Cédex 9

Ces processus continentaux sont conformes au forçage astronomique et aux changements globaux de climat.

(2) Depuis 6 000 B.P. une nouvelle extension du Sahara s'est produite et la limite nord du Sahel est actuellement à 17° N. Ces données corroborent le scénario d'une tendance vers l'aride et concorde avec la courbe d'insolation depuis 6 ka et la tendance vers un nouveau glaciaire qui serait associée à une baisse des températures et du niveau de la mer.

Ce témoignage en faveur de changements climatiques dans cette zone aride confirme donc le modèle prédictif de G. KUKLA et met hors de cause la responsabilité de l'Homme, encore que déforestation et érosion accentuent la tendance.

Depuis une dizaine d'années, nos connaissances sur les changements climatiques globaux du Quaternaire récent ont beaucoup progressé et leur schéma général est établi pour des paramètres relatifs à l'océan, la cryosphère et l'atmosphère qui se révèlent covarier approximativement avec des forçages qui modulent l'insolation terrestre : la

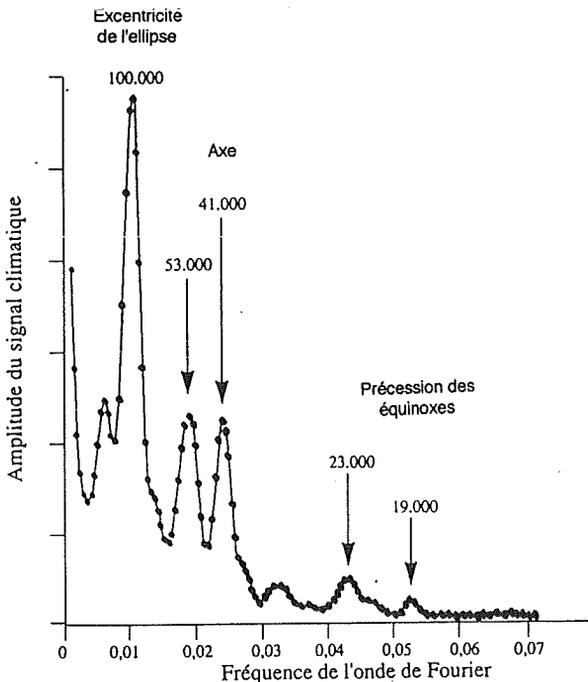


Fig. 1 : Analyse par la méthode de Fourier des variations climatiques du dernier million d'années, enregistrées dans l'Atlantique Nord d'après les mesures de L. LABEYRIE à Gif-sur-Yvette (Carotte D.S.D.P. 609). La plus grande amplitude du signal climatique correspond aux variations dont les fréquences sont égales à celles des principales composantes (ondes de 100.000, 53.000, 41.000, 22.000 et 19.000 ans) de l'insolation (D'après J.C. DUPLESSY, 1990).

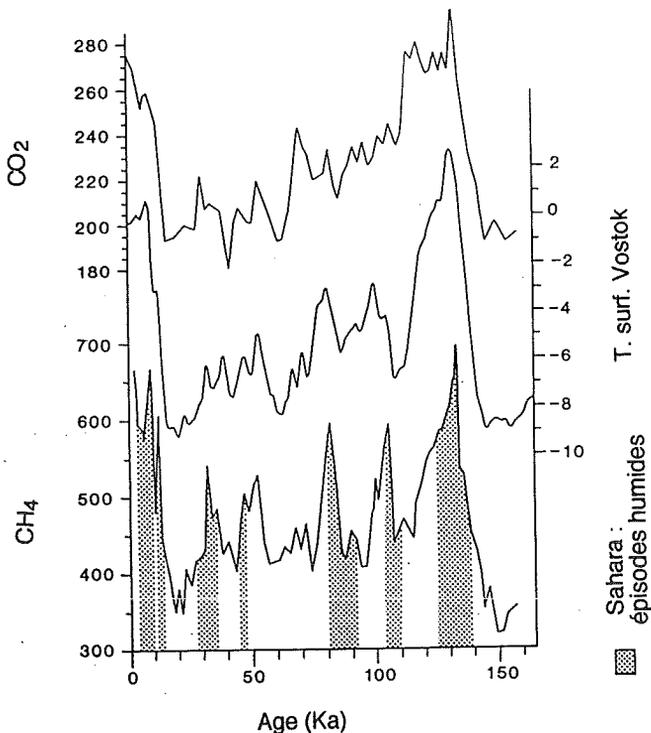


Fig. 2 : Evolution depuis 160 ka B.P. de certaines données évaluées d'après les sondages dans la glace effectués à Vostok : a) le CO₂ en p.p.m., b) la température isotopique de surface, évaluée par rapport à la température actuelle, c) le CH₄ en p.p.b. (d'après CHAPPELLAZ *et al.*, 1990).

précession des équinoxes, l'obliquité de l'axe et l'excentricité de l'ellipse décrite par notre planète autour du soleil. Ces rythmes se combinent et leur constance est reconnue depuis au moins un demi-million d'années (Fig. 1).

Ainsi, les variations du volume de la cryosphère, liées aux températures de la surface océanique, comme celles des températures de la surface de l'Antarctique, montrent-elles une alternance de phases de réchauffement et de refroidissement dont les taux du dioxyde de carbone et du méthane atmosphérique épousent également la succession (Fig. 2).

Le problème des grands changements climatiques continentaux liés à ces processus globaux ne peut être traité de la même façon générale, en raison de l'énorme diversité géologique et géographique régionale et même locale. Afin d'atteindre à une compréhension cependant assez large des grands scénarios climatiques du passé, il faut s'attacher à considérer des zones qui, dans un cadre spatial aussi vaste que possible et dans un cadre géologique aussi stable que possible, appartiennent actuellement à un

même régime climatique et à une même unité géographique. Il était donc important de considérer, en même temps que les régions polaires, une autre zone tout aussi vaste et tout aussi sensible aux oscillations climatiques globales : la ceinture désertique qui entoure le Tropique du Cancer, de l'Atlantique à la Chine. C'est le sujet que le PIGG 252 de l'UNESCO-IUGS s'est employé à traiter.

Nous n'évoquons ici qu'une partie des résultats de ces recherches, celle qui porte sur le plus grand désert du globe, le Sahara, qui couvre actuellement près de 9.5 millions de km². Ses marges sont caractérisées par une grande variabilité des précipitations liées vers le Nord aux dépressions atlantiques et, vers le Sud, à la pénétration de la Mousson d'été. Son coeur hyperaride, entre les deux isohyètes 100 mm, s'étend sur environ 1 000 km en latitude (Fig. 3).

L'avenir des bordures du Sahara est d'un intérêt capital pour la survie de l'humanité, la crise démographique se conjuguant là de façon dramatique avec la sensibilité climatique, ajoutant la désertification à l'aridité naturelle. Il était donc également judicieux de considérer ce Sahara et son "rivage", le Sahel, comme une priorité scientifique et de chercher à en comprendre l'évolution naturelle pendant les derniers 150 000 ans couvrant un cycle climatique bien connu globalement.

Nous considérons des points extrêmes du temps et de l'espace, pour la clarté de nos interprétations :

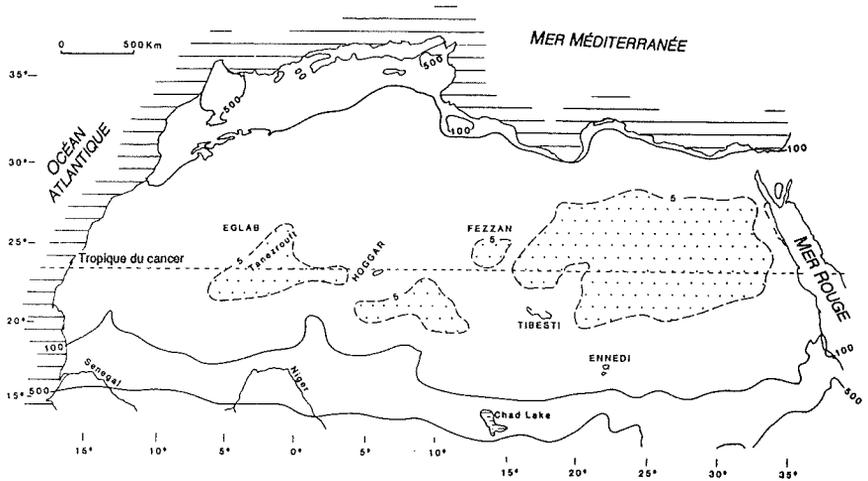


Fig. 3 : Extension des régions hyperarides (précipitations annuelles inférieures à 5 mm). En pointillé : les zones hyperarides.

- Dans l'espace, les grands bassins hyperarides très continentaux où les équipes du PIGG 252 ont contribué de façon majeure aux travaux de terrain (Fig. 3).

- Dans le temps, les extrêmes des courbes globales de la figure 2, qui seront les plus significatifs pour connaître les limites dans lesquelles a oscillé la variabilité naturelle au Quaternaire récent (c'est-à-dire dans l'état actuel du globe en ce qui concerne la position des continents et des mers par rapport aux pôles, ainsi que l'existence des massifs montagneux).

Les méthodes ont consisté à rechercher, dans les séries géologiques, les témoins continus les plus significatifs, les plus nombreux et les mieux datés possibles des variables paléoclimatiques (précipitations, température, vent), et des environnements associés. Les témoins d'aridité (formations éoliennes et évaporites), les témoins d'humidité (eaux de surface en particulier), ainsi que les témoins indirects constitués par les anciens biotopes (faunes, flores et occupation humaine) ont été privilégiés dans la mesure de leurs possibilités de datation précise, radiométrique en particulier. Les formations non datables, pour intéressantes qu'elles soient, n'ont pas été considérées.

I. LE DERNIER INTERGLACIAIRE PLÉISTOCÈNE

En 1977, au cours d'une prospection du Fezzan, nous avons pu observer, sur les deux lèvres de la dépression du Wahi Shati, par 27°30'N, d'importants dépôts de coquilles de *Cerastoderma glaucum* (cardiums), espèce vivant actuellement dans les étangs saumâtres de bordures méditerranéennes. Cette région de Libye est actuellement créditée de 30 mm de précipitations annuelles moyennes. Le fond de la dépression, qui s'étale sur 125 km E-W, est occupée par une sebkha à grands polygones d'argile rouge mêlée de halite. Les amas coquilliers, d'une incroyable richesse (Fig. 4 a, b, c) témoignaient de l'existence d'un paléolac beaucoup trop important pour être attribué à l'Holocène. En effet, les premières datations (PETIT-MAIRE *et al.*, 1978) indiquèrent deux périodes, l'une autour de 125 ka, l'autre vers 40 ka. Une étude multidisciplinaire, menée de 1978 à 1980 (PETIT-MAIRE *et al.*, 1979, 1980; GRAVEN *et al.*, 1981) a montré qu'il s'agissait bien de la première preuve de l'existence d'une phase humide majeure, en plein coeur du Sahara, pendant le dernier interglaciaire du Pléistocène. En fait, il s'agissait d'un lac de 2000 km² dont la profondeur et la salinité avaient respectivement varié de 40 à 50 m et de 10 à 80 ‰ pendant tout le stade 5, 22 âges U/Th s'étalant sur environ 70 000 ans autour d'un pic très net vers 125 - 130 000 ans BP (Fig. 5). Il était peuplé d'une faune très dense de Mollusques, d'Ostracodes et de Forammifères (PETIT-MAIRE, 1982). la température des eaux devait avoisiner les 20° C, chiffre requis pour la

reproduction des cardiums qui dominant nettement la faune. L'alimentation du lac était mixte; les apports de l'aquifère du Continental intercalaire ont dû être importants, puisqu'ils alimentent encore aujourd'hui les quelque 400 puits et sources artésiens sur le flanc méridional de l'anticlinal du Qarqaf, mais la contribution d'un ruissellement local important est certaine : des arrivées d'oueds actifs, venant du nord et de l'est, sont attestées par des apports alluviaux associés à des faunes d'eau douce (*Bulinus* sp., *Lymnea natalensis*, *Caelatura lacoini*, *Corbicula africana*, *Melania tuberculata*) à l'endroit des arrivées d'eau. L'existence de sites archéologiques importants dans ces zones (Acheuléen terminal) confirme la présence d'eau douce.

Depuis lors, divers auteurs ont également observé des dépôts de type lacustre, palustre ou archéologique aussi bien dans le Sud du désert égyptien, à l'Ouest du Nil (PACHUR *et al.*, 1987; WENDORF *et al.*, 1987; MC HUGH *et al.*, 1989; SZABO *et al.*, 1989) que sur la bordure nord du Grand Erg Occidental (FONTES *et al.*, 1985) et en Tunisie (BALLAIS & BEN OUEZDOU, 1987; FONTES *et al.*, 1987; CAUSSE *et al.*, 1988) dont les âges s'étalent largement au stade 7 et au stade 5.

Au coeur du Sahara malien, sur le tropique du Cancer, l'une de nos missions de terrain observa également, dès 1982, l'existence de calcaires lacustres à *Melania tuberculata*, en position stratigraphique et faciès général similaire à ceux du paléolac Shati, à 25 m au-dessus du fond actuel des deux vastes dépressions de Sbeita et de Telig, respectivement au NW et au SE de Taoudenni (FABRE, 1983; FABRE & PETIT-MAIRE, 1983; PETIT-MAIRE, 1986). Nous n'avons pas, à ce jour, pu obtenir communication des datations U/Th confiées à C. Gaven-Causse sur 10 échantillons en 1983 et 1985, mais ce chercheur, ainsi que le regretté C. Goetz nous ont confirmé oralement qu'il s'agissait bien de paléolacs du Pléistocène supérieur. Le contexte archéologique ne laisse d'ailleurs aucun doute sur cette appartenance.

Le paléolac Shati reste donc, à ce jour, le seul témoin important homogène et bien daté de l'humide saharien associé au dernier interglaciaire pléistocène. Si l'on considère que depuis 100 000 ans, les érosions et dépositions successives n'ont guère changé la profondeur originelle de la dépression, la présence de quelque 100 km³ d'eau permanente à cette latitude de 27°30'N implique des précipitations à la fois de mousson en été et méditerranéennes, en hiver, ainsi qu'une évaporation fortement réduite par rapport à l'actuelle. Des oscillations importantes de la salinité et du niveau du lac traduisent cependant des variations de grande amplitude, tant dans l'espace (arrivées d'oueds à l'est et au nord) que dans le temps. Une étude fine du paléolac Shati, avec carottage dans la sebkha, s'impose maintenant et nous espérons qu'elle pourra être entreprise bientôt, en collaboration entre notre équipe et d'autres groupes européens.



Fig. 4 : Dépôt coquillier induré de l'ancien lac du Shati.
a) mode de gisement
b) détail de la stratification

Les autres observations, plus dispersées, confirment l'hypothèse logique d'un humide saharien général pendant le stade 5. Les paléolacs ont une superficie et une profondeur bien supérieure à celles des lacs holocènes qui occupent souvent le fond des mêmes dépressions topographiques.

Cette phase humide a permis au Sahara la transition culturelle entre l'Acheuléen ancien sur bifaces et l'Acheuléen final sur éclats, ce qui montre bien l'interdépendance hommes/climat dans ces régions du globe très sensibles où les changements du rapport précipitation/évaporation peuvent induire l'apparition ou la disparition de biotopes habitables (PETIT-MAIRE, 1991).

II. LE DERNIER MAXIMUM GLACIAIRE

Le minimum d'insolation estivale atteint vers 23 ka B.P. (Fig. 2) se traduit globalement par un maximum glaciaire daté de 20-21 ka B.P. (BARD *et al.*, 1990). C'est surtout la télédétection qui nous permet maintenant d'apprécier l'ampleur de l'extension saharienne consécutive, décrite par SARNTHEIN (1978), MAINGUET (1980), ROGNON (1980), TALBOT (1980, 1984), DURAND (1983) et ALIMEN (1987), des dunes longitudinales, aujourd'hui consolidées et colonisées par la végétation sahélienne, s'étendant jusqu'aux 13^e ou 14^e parallèles. La construction de tels ergs n'est possible que sous un régime climatique de vents alizés violents et de précipitations moyennes inférieures à 100 - 150 mm annuels. Ceux observés au Sahel prolongent sur des centaines de kilomètres, et dans la même direction, les formations similaires, rubéfiées, que l'on peut suivre au Sahara, couvertes par de nouveaux sables vifs. Au Sahara malien, par 21° N, ces dunes sont datées par thermoluminescence de la fin du Pléistocène (SMITH *et al.*, 1990) : c'est l'Ogolien de Mauritanie et le Kanémien du Niger.

Ainsi, au scénario global froid a correspondu dans le passé une extension du désert vers l'équateur. La diminution des températures de la surface océanique a considérablement réduit la force des moussons, tandis que la violence accrue des alizés (SARNTHEIN, 1978) en limitait également la portée. Ces vents dominants du NE avaient d'ailleurs alors la même direction que celle mesurée actuellement : 215°.

III. L'OPTIMUM CLIMATIQUE HOLOCÈNE

L'insolation estivale sur l'hémisphère nord à hautes latitudes culmine à 11 ka B.P. (Fig. 2). Sur les bordures atlantiques du Sahara, des coupes continues dans la

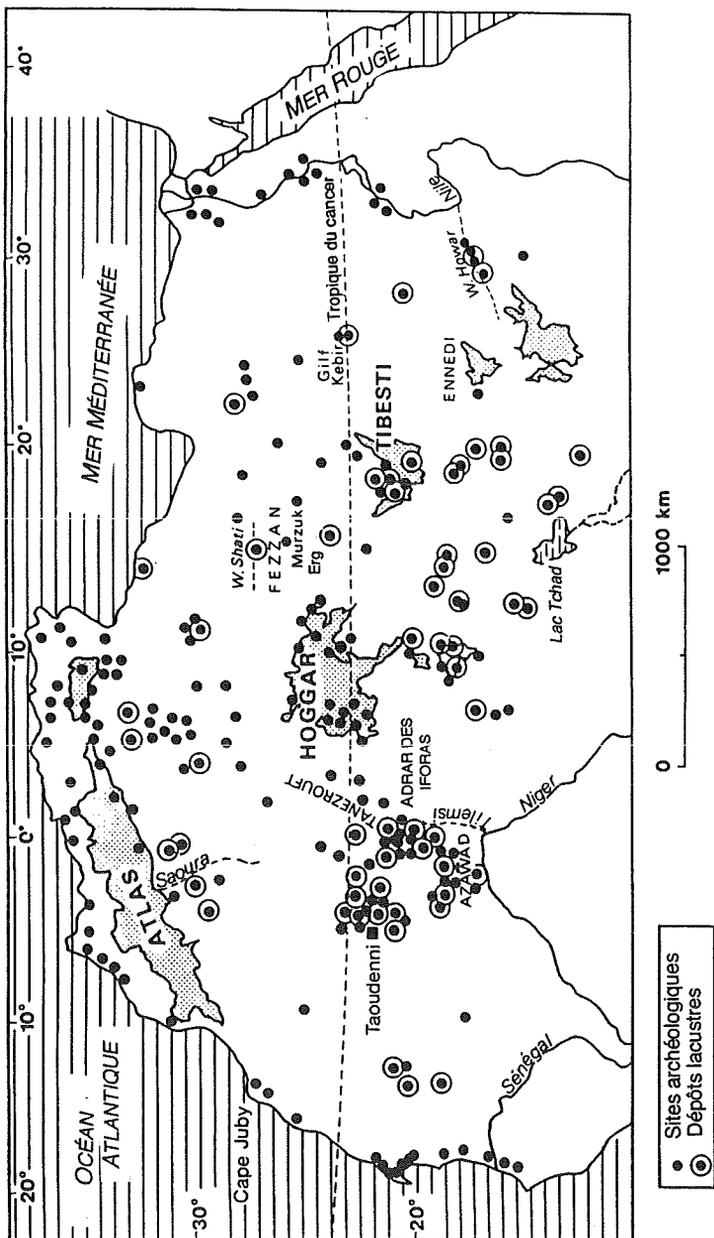


Fig. 5 : Sites archéologiques et dépôts lacustres sahariens vers 8.000 B.P. (d'après N. PETIT-MAIRE, 1991).

région de Tarfaya (Maroc) et dans l'île canarienne de Fuerteventura montrent une longue phase dunaire du Pléistocène supérieur qui, à la différence des grands bassins continentaux, est coupée par des paléosols peu évolués interrompant la sédimentation éolienne. Ceux correspondant au Pléistocène final sont datés sur coquilles de mollusques terrestres de 15 ka B.P. à Tarfaya et 12.5 à 13.5 ka à Fuerteventura (PETIT-MAIRE *et al.*, 1987). Si l'on considère les "sauts" irréguliers de la déglaciation enregistrés vers ces mêmes dates par les isotopes de l'oxygène et les niveaux marins (DUPLESSY *et al.*, 1986; BARD *et al.*, 1990), la co-variation des changements océaniques globaux et des climats régionaux sur les continents est une fois encore frappante.

Au contraire, dans les zones très continentalisées du Sahara et à l'exception des autres marges et des massifs où le réchauffement global a également induit une augmentation des précipitations dès ca 15 ka B.P., il faut attendre la fin du Younger Dryas pour que le climat accuse de réels changements. Dans les bassins hyperarides de l'Est comme de l'Ouest, les couches supérieures des dépôts éoliens amassés dans les dépressions montrent des remaniements dus à de faibles actions hydrologiques, puis on observe peu à peu dans les coupes l'installation de nappes d'eau temporaires peu profondes, coupées par de fines couches de calcite, puis de marécage (travertins) et enfin de lacs couronnés d'évaporites ou de thanatocoenoses de mollusques d'eau douce. Une fois encore, la télédétection comme les travaux de terrain nous apportent une image frappante du développement de l'eau de surface pendant cette phase majeure (PETIT-MAIRE & RISER, 1983; PETIT-MAIRE, 1991, Fig. 5, Fig. 6).

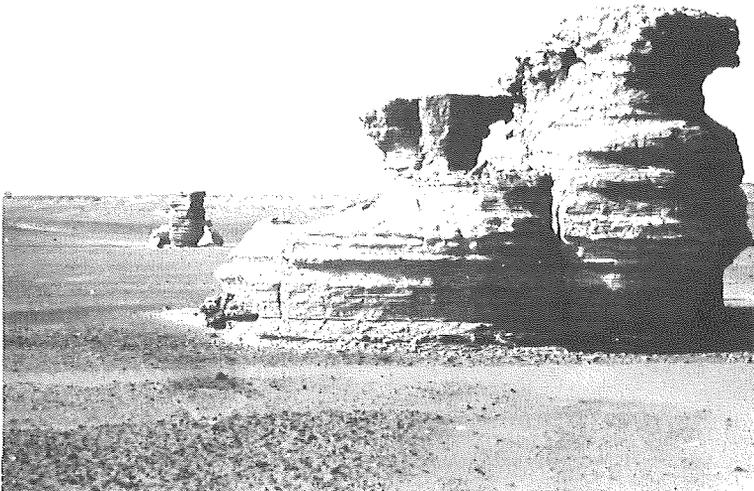
Cette séquence climatique du stade isotopique 1 a été particulièrement bien étudiée dans deux régions extrêmes du Sahara : le désert égyptien à l'ouest du Nil (PACHUR & HOELZMAN 1991) et la région de Taoudenni, au Mali (PETIT-MAIRE, 1991), actuellement créditées de précipitations annuelles moyennes très faibles, de l'ordre de 20 à 5 mm. Ces deux zones sont isolées de tout apport allochtone d'eau de surface ou souterraine et les variations hydrologiques ou biologiques enregistrées dans les coupes géologiques peuvent donc être attribuées à des modifications du rapport précipitation/évaporation, soit à des changements climatiques régionaux significatifs.

Les résultats, d'est en ouest peuvent être résumés ainsi pour la zone autour du tropique :

- 10 - 8,7 ka B.P. : changement climatique majeur, installation progressive de nappes d'eau de surface saisonnières;
- 8,7 - 6,7 ka B.P. : optimum hydrologique, taux de sédimentation élevé, réduction de la saisonnalité, salinité faible;



Fig. 6 : Buttes-témoins de dépôts lacustres (hauteur 10 m) dans la région de Telig (N. Mali).
A. Vue d'ensemble;
B. Stratifications soulignées par l'érosion éolienne.



- 6,7 - 4,5 ka B.P. : détérioration irrégulière du rapport P/E, baisse du taux de sédimentation, saisonnalité plus forte, salinité variable augmentant irrégulièrement, eutrophisation des lacs, ruissellement plus brutal, évaporation rapide de l'eau de surface (thanatocoenoses);
- 4,5 - 3,5 B.P. : reprise éolienne, émigration animale puis humaine vers des zones refuges (Adrar, Niger, côte atlantique);
- 3,5 - actuel : nouvelle extension progressive du Sahara vers le nord et le sud.

Ces résultats concordent avec ceux des climatologues et modélistes qui décrivent, pendant l'Holocène ancien, un renforcement des moussons dû à l'accroissement du contraste thermique entre l'océan et le continent, les températures et les précipitations sur le Sahel actuel étant donné respectivement comme 1,5° C plus basses et 2 à 4 fois plus fortes qu'actuellement (SADOURNY, 1992). A des latitudes aujourd'hui sahariennes, l'estimation des paléoprécipitations, faites à partir du contexte hydrologique et biologique donne des chiffres plus élevés : au Mali, par 22° - 23° N, 250 mm contre 5 actuellement; par 29° N, 400 mm contre 63 mm actuellement; par 17°N, > 500 mm contre 200 actuellement (PETIT-MAIRE & RISER, 1988; PETIT-MAIRE, 1989, 1991). Il semble donc qu'un fort gradient caractérise ces différences : cela est logique si l'on considère que la mousson d'été et les dépressions tropicales occasionnelles ne touchent plus (ou plus guère, selon la latitude considérée) le nord du Mali, tandis qu'elles intéressent toujours le Sahel.

IV. LE FUTUR

Ces données concordent une fois encore avec celles du "forçage" astronomique, l'insolation estivale diminuant beaucoup dès ca 6 ka B.P. (Fig. 2). La nature nous emporte donc vers un scénario froid avec baisse de la température globale d'environ 0,01° C par siècle qui nous amènera dans les environs 5000 ans, à 26 % de la situation glaciaire à 20 ka B.P. (BERGER, 1989). Ceci semble minime mais il faut cependant considérer que, depuis 6000 ans, le Sahara s'est déjà étendu de ca 500 km vers le sud (Fig. 7) sans que l'on puisse attribuer à l'homme, avant ces dernières décennies, la responsabilité d'un phénomène d'une telle ampleur qui, d'ailleurs, a connu la même évolution dans la péninsule Arabique (SANLAVILLE, 1992), le nord de l'Inde (SINGHVI *et al.*, 1992) et la Chine (AN *et al.*, 1989) (Fig. 8).

Le réchauffement global qui sera peut-être la conséquence de la pollution atmosphérique, par accroissement de l'effet de serre naturel, va-t-il annuler (et pour combien de temps ?) la tendance astronomique ? Il est bien difficile de le dire. Nous ne

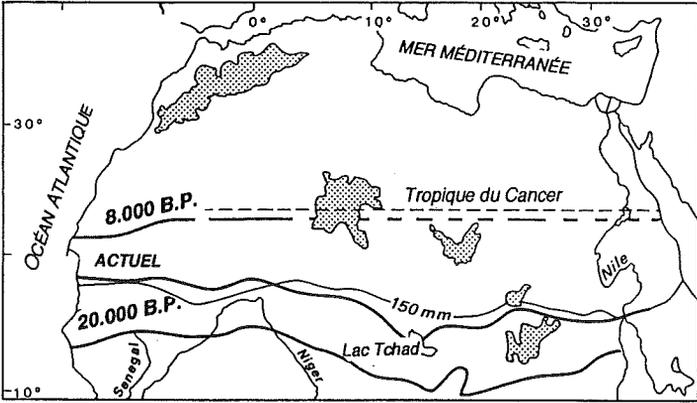


Fig. 7 : Déplacements de la limite Sahara-Sahel dans des situations paléoclimatiques extrêmes.

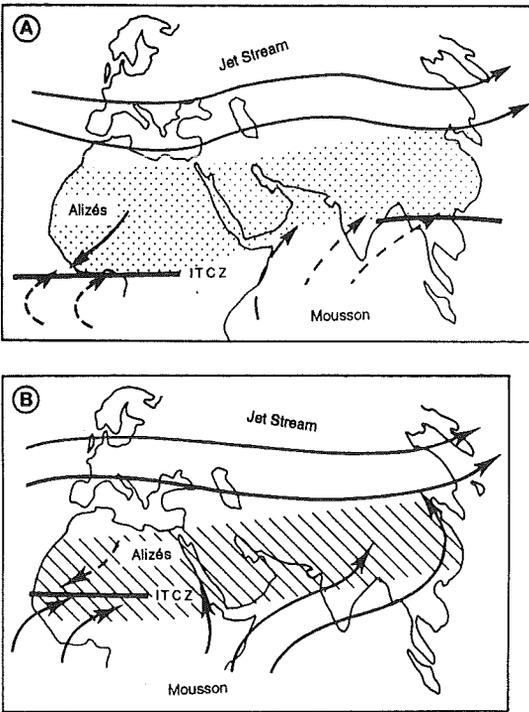
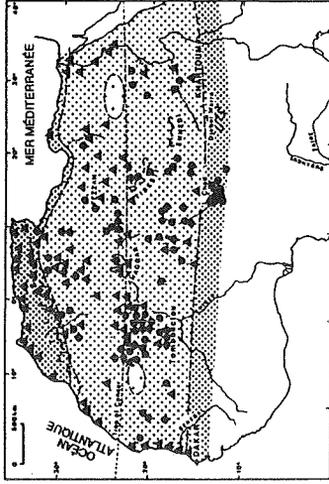


Fig. 8 : Circulation présumée pendant des situations paléoclimatiques extrêmes. A. Zone sèche pendant une période glaciaire; B. Zone humide pendant un interglaciaire.

savons même pas encore si l'augmentation moyenne de + 0,6° C de la température terrestre, enregistrée depuis un siècle, et accompagnée d'une montée du niveau marin de + 0,15 m est bien un effet de cette pollution ou simplement un petit épisode de la variabilité climatique à court terme, tel celui que le Moyen Age a connu et qui a permis aux Vikings de vivre sur les côtes du Groenland. En effet, le climat de notre planète, outre ces grands cycles à l'échelle de plusieurs millénaires, subit à bien plus court terme d'autres influences externes ou internes qui sous-tendent les grandes courbes considérées précédemment.

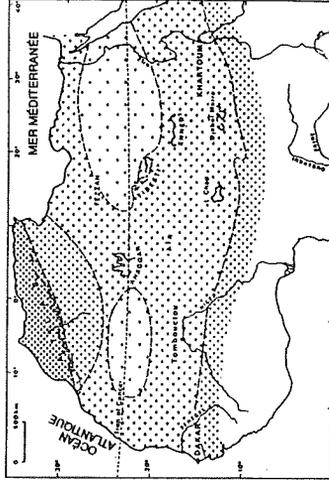
Des travaux récents et d'autres en cours s'attachent aujourd'hui à rechercher, au cours des derniers millénaires, des processus de cause à effet entre l'activité solaire, le volcanisme, la néotectonique et les variations climatiques à court terme. Les archives historiques européennes et chinoises permettent de découvrir, dater et quantifier de tels phénomènes. Nous ne pouvons pas nous étendre ici sur ce sujet, disons seulement qu'il semble de plus en plus que le climat varie plus ou moins en phase avec ces facteurs naturels non maîtrisables par l'homme, mais que ce dernier contribue à en aggraver les effets nocifs.

Dans tous les cas de figure, que nous continuions à nous engager vers un scénario froid et donc vers la poursuite de l'extension des grands déserts tropicaux, ou bien qu'au contraire nous "forcions" la planète vers un "hyper-interglaciaire" artificiel, il est capital de considérer les enregistrements géologiques régionaux des paléosituations continentales, en couplage avec les modélisations mathématiques théoriques. Ces archives naturelles constituent l'une des clefs réalistes de multiples et complexes effets passés des forçages climatiques et peuvent donc contribuer à anticiper de notre avenir (Fig. 9). Ainsi, on a pu montrer et interpréter récemment les liens existant entre l'évolution de l'atmosphère et l'extension/régression des désert tropicaux, par comparaison de la courbe du méthane (LORIOUS *et al.*, 1990) avec celle des énormes variations d'environnement dans les immenses zones tropicales (PETIT-MAIRE *et al.*, 1991) (Fig. 2, Ch. 4).



OPTIMUM HOLOCÈNE (INTERGLACIAIRE)

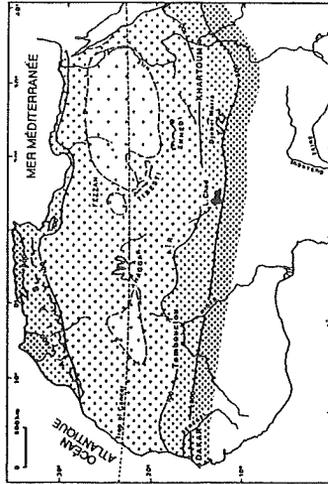
20.000 B.P. (MAXIMUM DU GLACIAIRE)



Futur avec effet de serre
Invention de l'homme

Futur sans effet de serre
Forçage astronomique

SITUATION ACTUELLE



Précipitations moyennes annuelles

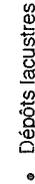
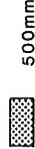
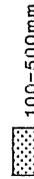
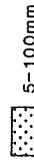
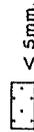


Fig. 9 - Situations climatiques du passé pour comprendre une évolution future.

BIBLIOGRAPHIE

- ALIMEN, A., 1987. Evolution du climat et des civilisations depuis 40 000 ans du Nord au Sud du Sahara occidental (premières conceptions confrontées aux données récentes). *Bull. AFEQ*, 4, 215-227.
- AN, Z. *et al.*, 1989. Paleoenvironmental changes in China during the last 18 000 years. In : Abstracts, 28th IGC, Washington DC. 1, 38-39.
- BALLAIS, J.L., & BEN OUEZDOU, H., 1987. Formes et dépôts du Quaternaire continental de la bordure présaharienne du Magreb oriental. Essai de synthèse provisoire. Conférence PIGG 210, 18-19.
- BARD, E., HAMELIN, B., FAIRBANKS, R.G. & ZINDLER, A., 1990. Calibration of the ¹⁴C timescale over the last 30 000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals. *Nature*, 345, 4^o5-410.
- BARD, E., HAMELIN, B. & FAIRBANKS, R.G., 1990. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados : sea level during the past 130 000 years. *Nature*, 346, 456-458.
- BERGER, A., 1989. Astronomical forcing of Quaternary climates. A problem of global changes. Acta Int. Symposium on Global Changes in South America during the Quaternary, Sao-Paulo (Brésil), 9-11.
- BERGER, A., GALLÉE, H., FICHEFET, T., MARSIAI, I. & TRICOT, C., 1990. Testing the astronomical theory with a coupled climate-ice-sheet model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89, 125-141.
- CAUSSE, C., CONRAD, G., FONTES, J.C., GASSE, F., GIBERT, E. & KASSIR, A., 1988. Le dernier "humide" pléistocène du Sahara Nord Occidental daterait de 80 - 100 000 ans. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 306, II, 1459-1464.
- CHAPELLAZ, J., BARNOLA, J.M., RAYNAUD, D., KOROTKEVICH, Y.S. & LORIUS, C., 1990. Ice-core record of atmosphere methane over the last 160.000 years. *Nature*, 345, 6271, 127-131.
- DUPLESSY, J.C., ARNOLD, M., MAURICE, P., BARD, E., DUPRAT, J. & MOYES, J., 1986. Direct dating of the Oxygen-Isotope record of the last deglaciation by ¹⁴C accelerator mass spectrometry. *Nature*, 320, 350-352.
- DURAND, A., LANG, J., MOREL, A. & ROSET, J.P., 1983. Evolution géomorphologique stratigraphique et paléoclimatique au Pléistocène et à l'Holocène de l'Air oriental (Sahara méridional, Niger). *Revue Géologie dynamique et Géographie physique*, 24, 47-59.
- FABRE, J. & PETIT-MAIRE, N., 1983. Lacs pléistocènes de la région de Taoudenni (Sahara malien). In : Bassins sédimentaires en Afrique. Séance spécialisée. Société géologique de France, Marseille, mars 1983. Résumés des communications, 99-100. Laboratoires des Sciences de la Terre, Marseilles, France (Travaux A15).
- FABRE, J. & PETIT-MAIRE, N., 1988. Holocène climatic evolution at 22-23°N from two paleolakes in the Taoudenni area (northern Mali). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 65, 133-148.

- FABRE, J., 1983. Esquisse stratigraphique préliminaire des dépôts lacustres quaternaires. In : N. Petit-Maire, J. Riser (Eds.) *Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du Bassin de Taoudenni*, Laboratoire de Géologie du Quaternaire, CNRS, Marseille, France, pp. 421-441.
- GAVEN, C., HILLAIRE-MARCEL, C. & PETIT-MAIRE, N., 1981. A Pleistocene lacustrine episode in southeastern Libya, *Nature*, 290, 131-133.
- MAINGUET, M & CHEMIN, M.C., 1980. Le Sahara : géomorphologie et paléogéomorphologie éoliennes. In : M.A.J. WILLIAMS & H. FAURE (Eds.), *The Sahara and the Nile*, Balkema, Rotterdam, pp. 17-35.
- MC HUGH W.P., SCHABET, G.G., BREEDS, C.S. & MC CAULEY, J.F., 1989. Neolithic adaptation and the Holocene functioning of Tertiary palaeodrainage in Southern Egypt and Northern Sudan. *Antiquity*, 63, 320-336.
- PACHUR H.J. & KROPELIN, S., 1987. Wadi Howar : paleoclimatic evidence from an extinct river system in the south eastern Sahara. *Science*, 237, 298-300.
- PACHUR, H.J., & HOELZMANN, P., 1991. Paleoclimatic implications of Late Quaternary lacustrine sediments in Western Nubia, Sudan. *Quaternary research*, 36, 257-276.
- PETIT-MAIRE, N., 1978. Paléoclimatologie quaternaire : premières prospections du Fezzan central (10-16°E/25-31°N). Marseille (Fr), Laboratoire de Géologie du Quaternaire - CNRS, 11 p. (ronéo).
- PETIT-MAIRE, N., (Ed.), 1982. *Le Shati, lac pléistocène du Fezzan (Libye)*, CNRS, Marseille, Paris, 118 p.
- PETIT-MAIRE, N., 1986. Paleoclimates in the Sahara of Mali. A multidisciplinary study. *Episodes*, 9, 1, 7-16.
- PETIT-MAIRE, N., 1989. Interglacial environments in presently hyperarid Sahara : paleoclimatic implications. In : M. LEINEN, M. SARTNTHEIN (Eds.), *Paleoclimatology and paleometeorology : modern and past patterns of global atmospheric transport*, Dordrecht (NL), Kluwer, pp. 637-661.
- PETIT-MAIRE, N., 1991. Les derniers 130 000 ans : changements climatiques intertropicaux et variations du taux de méthane atmosphérique. *Compte rendu Académie des Sciences*, Paris, 2, 312, 1235-1241.
- PETIT-MAIRE, N., 1991 (Ed.). *Paléoenvironnements du Sahara. Lacs holocènes à Taoudenni (Mali)*. Ed. CNRS, Marseille, Paris, 239 p.
- PETIT-MAIRE, N., 1991. Recent Quaternary climatic change and man in the Sahara. *Journal of African Earth Sciences*, 12, 1-2, 125-132.
- PETIT-MAIRE, N., CASTA, L., DELIBRAIS, G. & GAVEN, C., 1980. Preliminary Data on Quaternary palaeolacustrine deposits in the Wadi ash Shati area, Libya. In : *The Geology of Libya*, III, 797-807.
- PETIT-MAIRE, N., DELIBRIAS, G. & GAVEN, C., 1980. Pleistocene lakes in the Shati area, Fezzan (27° - 30° N). In : M. SARTNTHEIN M., E. SEIBOLD., P. ROGNON (Eds.), *Sahara and the surrounding seas . Palaeoecology of Africa*, 12, pp. 289-295 .

- PETIT-MAIRE, N. & RISER, J. (Eds), 1983. *Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du bassin de Taoudenni (Mali)*. Laboratoire de Géologie du Quaternaire, CNRS, Marseille, France, 473 p.
- PETIT-MAIRE, N., ROSSO, J.C., DELIBRAIS, G., MECO, J. & POMEL, R., 1987. Paléoclimats de l'île de Fuerteventura (archipel canarien). *Palaeoecology of Africa*, 18, 351-356.
- PETIT-MAIRE, N., RISER, J., et coll., 1988. Le Sahara à l'Holocène : Mali. Une carte au 1/1 000 000, CCGM, Paris.
- ROGNON, P., 1980. Une extension des déserts au cours du Tardiglaciaire (18 000 - 10 000 ans B.P.). *Revue Géographie physique et Géologie dynamique*, 22, 313-328.
- SADOURNY, R., 1992. La modélisation du climat. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 3-11.
- SANLAVILLE, P., 1992. Palaeoenvironments in the Arabian Peninsula during the Upper Pleistocene and the Holocene. PICG 252, International Symposium on Evolution of Deserts, Ahmedabad, India, 1-7.
- SARNTHEIN, M., 1978. Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. *Nature*, 272, 43-46.
- SMITH, B.W., RHODES, E.J., STOKES, S., SPOONER, N.A.Z. & AITKEN, M.J., 1990. Optical dating of sediments : initial quartz results from Oxford. *Archaeometry*, 32, 19-31.
- SZABO, B.J., MC HUGH, W.P., SCHABER, G.C., HAYNES, C.V. & BREEDS, C.S., 1989. Uranium series dated authigenic carbonates and Acheulian sites in Southern Egypt. *Science*, 243, 1053-1056.
- TALBOT, M., 1980. Environmental response to climatic change in the West African Sahel over the past 20 000 years. In : M.A.J. WILLIAMS & H. FAURE (Eds.), *The Sahara and the Nile*, pp. 37-62.
- TALBOT, M., 1984. Late pleistocene rainfall and dune building in the Sahel. *Palaeoecology of Africa*, 16, 203-214.
- WENDORF, F., CLOSE, A. & SCHILD, R., 1987. Recent work on the Middle Pameolithic of the eastern Sahara. *African Archeological Review*, 5, 49-63.