

La dépression de Taoudenni (Sahara malien) à l'Holocène*

N. PETIT-MAIRE ⁽¹⁾, J. FABRE ⁽²⁾, P. CARBONEL ⁽³⁾,
E. SCHULZ ⁽⁴⁾, A.-M. AUCOUR ⁽¹⁾

La partie malienne du Sahara s'étend au Nord de la boucle du Niger, entre 17° et 24° N. C'est une région hyperaride peu connue où les précipitations annuelles moyennes ne dépassent guère 60 mm au Sud et 5 mm au Nord (chiffres donnés par Dubief en 1963). Nous y avons étudié trois régions qui constituent des bassins hydrologiques différents (fig. 1). A l'Est, jusqu'à Tagnout-Chaggeret et l'Erg Ine Sakane, celle qui est encore proche de la vallée du Tilemsi, de l'Adrar des Iforas et du Timétrine a pu, pendant les périodes humides passées, recevoir les eaux de ces derniers mais aussi peut-être du Hoggar même, par l'oued Tamarrasset. Au Sud, l'Azaouad, très plat (la pente n'est que de 8 m sur les 250 km au N. de Tombouctou), est lié à la nappe du Niger et en a reçu à l'Holocène des effluents de surface (RISER et PETIT-MAIRE, 1986). Enfin, la région située entre le Dhar Knachich et Thraza, proche du Tropique du Cancer, est la plus isolée géographiquement. Ces trois régions se sont révélées très riches en dépôts lacustres ou marécageux holocènes, associés à des flores et des faunes sahéliennes ou même, au Sud, soudanaises : par 19°20' N, à 70 km au N.W. d'Araouane, une chaîne trophique complète de savane boisée existait vers 7 000 B.P. (même la girafe n'y manquait pas) alors que douze espèces de grandes antilopes, des rhinocéros, des hippopotames et des éléphants fréquentaient, à Tagnout-Chaggeret et jusqu'à Kesret-el-Gani, les bords de lacs peuplés de poissons et de crocodiles (PETIT-MAIRE et RISER, 1981 et 1983 ; PETIT-MAIRE, 1986). Nous ne reprendrons pas ici les résultats, déjà connus, de ces recherches et nous bornerons aux nouvelles données obtenues sur un point précis de la plus septentrionale de ces régions : la dépression de Taoudenni qui s'étend sur quelques 150 km entre Agorgott (23° N/4° W) et El Guettara (22° N/3° W) (FABRE, 1983).

La région de Taoudenni, célèbre dans toute l'Afrique de l'Ouest par ses mines de sel, constitue un bassin endoréique dont l'altitude moyenne n'est que de 200-250 m. Elle ne reçoit aucune eau de surface

hors de son propre bassin versant (environ 3 400 km²) et la structure géologique profonde interdit toute communication souterraine entre elle et les aquifères liés au Niger (VILLEMUR, 1967 et rapports comm. pers.). Sa situation très continentale élimine toute influence océanique de quelque importance. En outre, aucun effet anthropique n'a jamais perturbé son évolution naturelle : la vie préhistorique n'a jamais été assez développée pour agir sur les biotopes et, en dehors d'une ou deux pistes caravanières de moins en moins fréquentées, l'homme, même nomade, ne peut actuellement y vivre, en dehors du village même de Taoudenni, à proximité de trois puits. Ainsi, cette région constitue, par son climat extrême et par son isolement géographique et hydrologique, un témoin idéal : les variations observées pourront être attribuées à des facteurs climatiques locaux purs. En outre, il était encore douteux que la phase humide connue à l'Holocène au Sahel ou au Sahara méridional et septentrional ait atteint le cœur même du désert, proche du Tropique, l'une des zones les plus désolées du monde.

Nous y avons observé dans deux paléolacs distincts des séquences sédimentaires continues fossilifères, déposées à l'Holocène dans la zone de contact entre le grand glaciaire karstique de la Hammada-el-Haricha, au NE, et les argiles gypsifères imperméables du « pays rouge » carbonifère, au SW (fig. 2). Le lac saumâtre d'Agorgott, au creux du bassin, a évolué en sebkha et le sel y est exploité depuis le XVI^e siècle. Celui d'Hajjad a laissé des accumulations carbonatées de 4 à 6 m d'épaisseur dont les restes ruiformes, bien lités, découpés par les vents violents de cette zone soumise à une forte déflation (FABRE et MAINGUET, 1984), ont fourni une riche faune d'Ostracodes et de Mollusques d'eau douce (cf. photos couvertures PETIT-MAIRE et RISER, 1983 et PETIT-MAIRE, 1986). L'évolution hydrologique de ces deux lacs a pu être bien datée et corrélée.

On peut distinguer trois épisodes : l'installation de la phase humide (9 000-8 300 B.P.), un optimum hydrologique (8 300-6 700 B.P.) et une détérioration clima-

* Cet article est une contribution au PICG n° 252.

(1) Lab. Géol. Quaternaire, CNRS, Case 907, Université Marseille-Luminy, 13288 Marseille Cedex 2.

(2) Centre Géol. Géophysique, Place Eugène-Bataillon, 34060 Montpellier Cedex.

(3) Lab. Géol. et Océanol., Université Bordeaux I, 33405 Talence Cedex.

(4) Geographisches Inst der Universität Würzburg, D 8700 Würzburg, RFA.

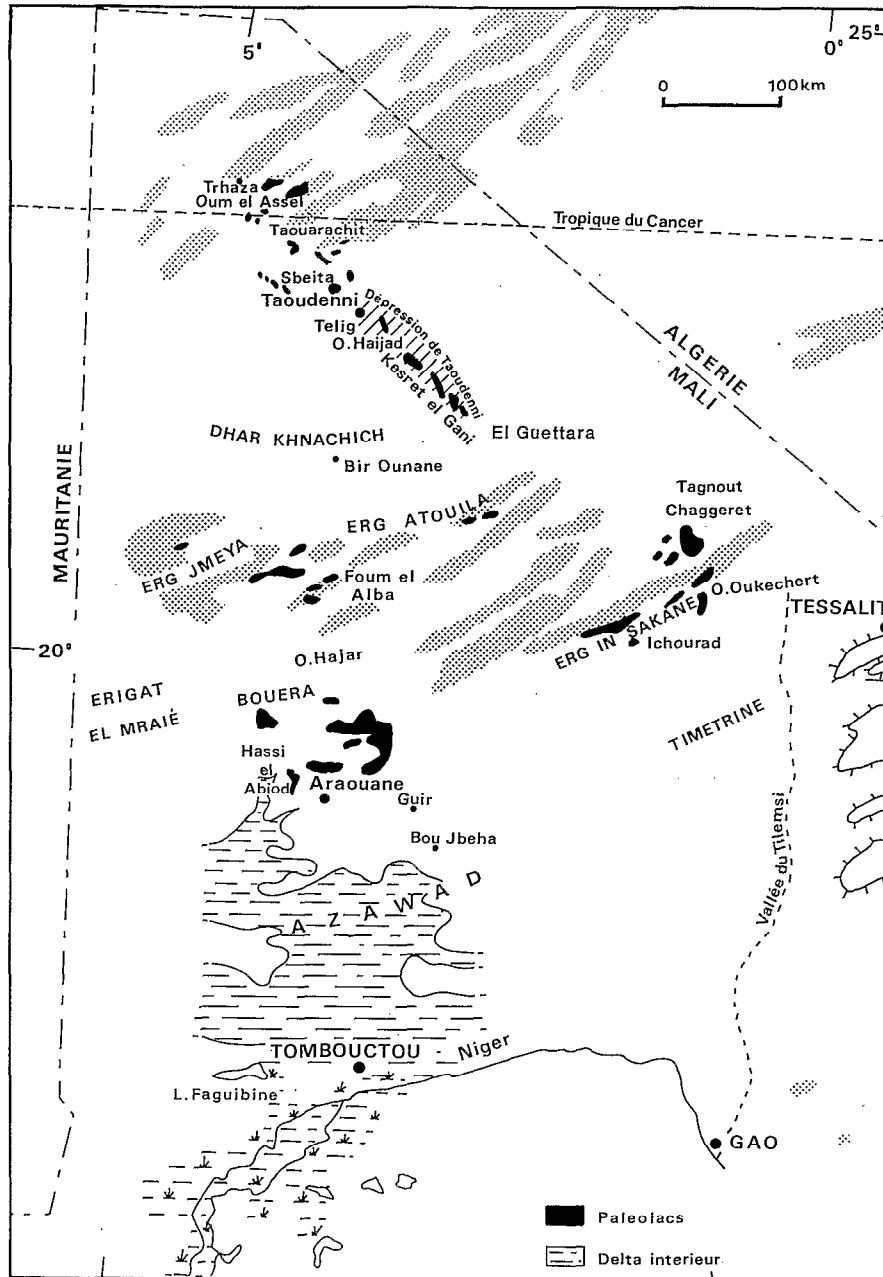


Fig. 1. — Lacs holocènes observés au Sahara malien. Noter, au Nord, la dépression de Taoudenni.

tique (6 700-4 500 B.P.) suivie de l'entrée dans une nouvelle phase aride (4 500-4 000 B.P.). Ainsi, dans cette région, l'humide a-t-il été plus court que dans les deux autres, mentionnées *supra*, soumises à des influences extérieures (fig. 3).

DÉBUT DE LA PHASE HUMIDE

Dans d'autres coupes au Sahara malien (PETIT-MAIRE, 1986), les premières traces d'humidité consistent en un remaniement hydrique des épaisse couches

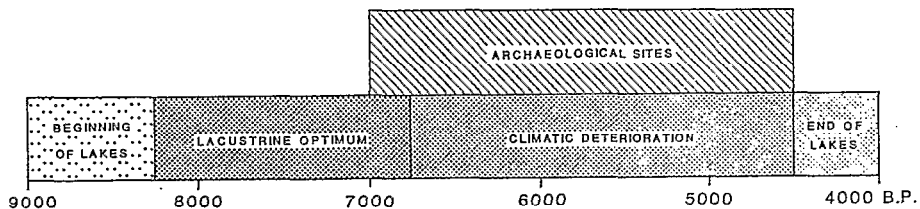
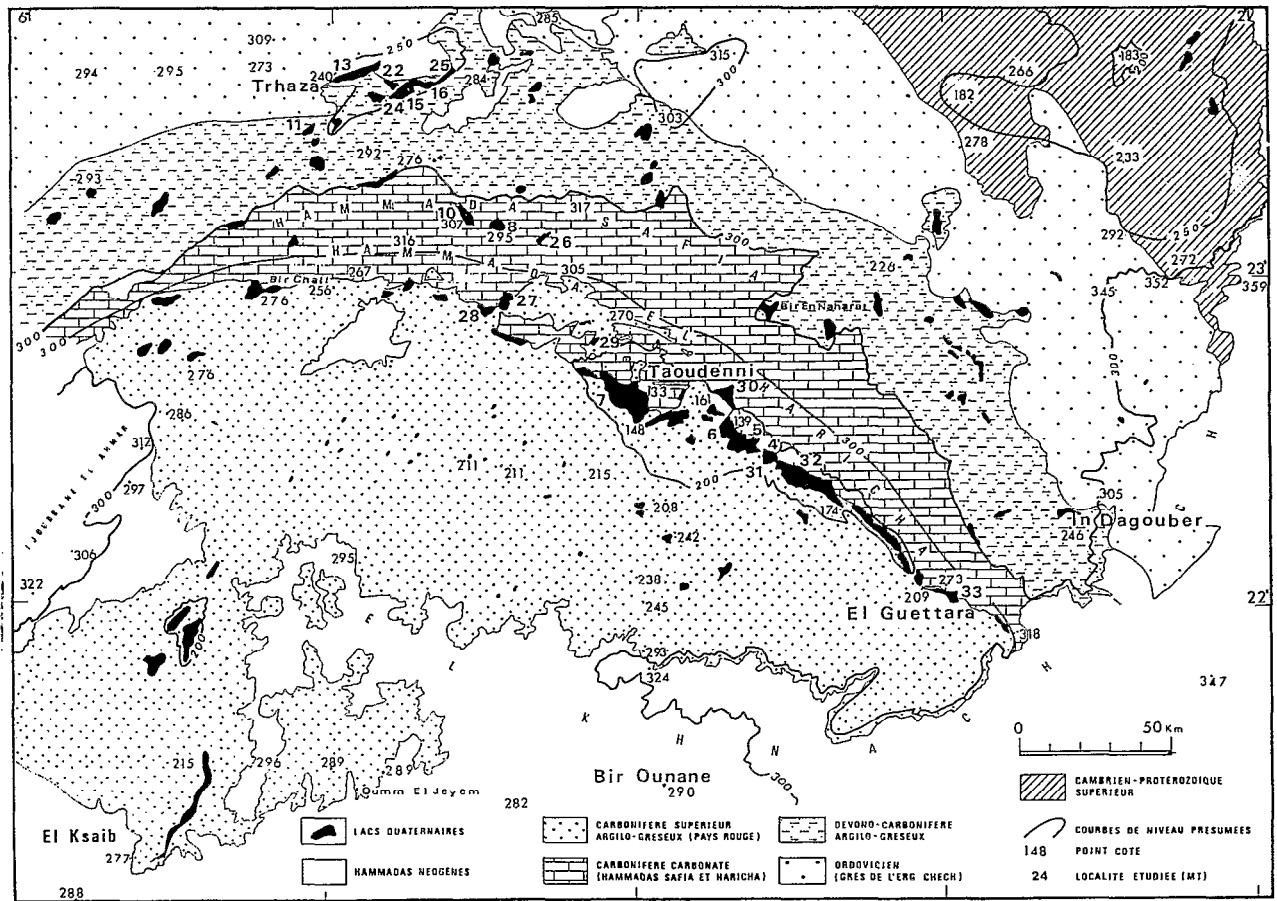


Fig. 2. - Lacs et évolution holocène des environnements dans la dépression de Taoudenni (22°-23° N) (carte J. FABRE).

sableuses du Pléistocène supérieur. Dans la dépression de Taoudenni, la déflation a enlevé tous les dépôts récents et mis à nu le plancher argileux carbonifère : ce sont donc ses argiles rouges qui y sont remaniées ; des sols marécageux se forment. A 8 800 B.P., des nappes d'eau peu profondes existent à Telig et Sbeita (fig. 1). L'on peut fixer à environ 9 000 B.P. l'âge du changement climatique à cette latitude. Cependant, bien que des Mollusques d'eau douce colonisent déjà les marais, de petites fentes de dessiccation et de fines croûtes calcaires évoquent encore des précipitations faibles et irrégulières, peut-être à saisonnalité marquée.

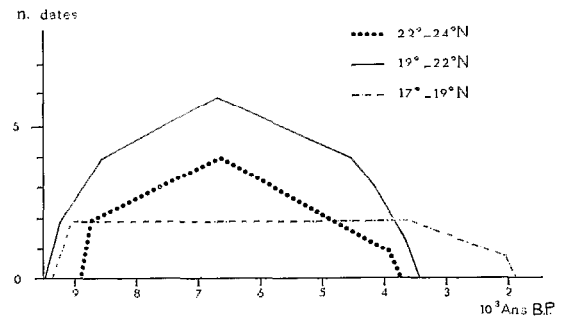


Fig. 3. - Phases lacustres au Sahara malien.

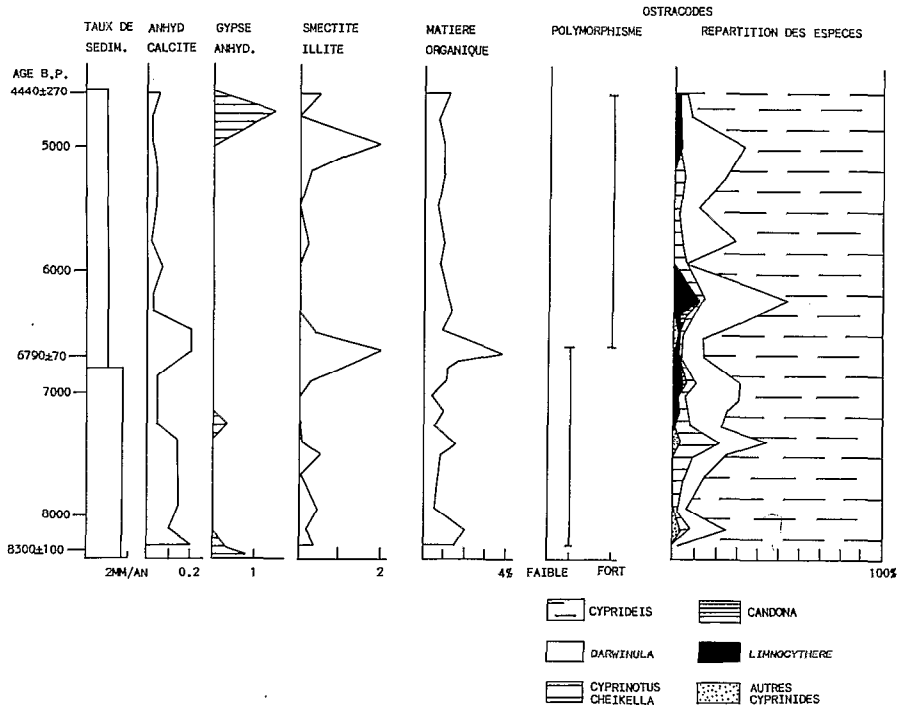


Fig. 4. — Dépôts lacustres de l'Oued Haijad. Variations de la sédimentation et des faunes d'Ostracodes.

Rappelons que, dans la région de l'Erg Ine Sakane, par $20^{\circ}40'/21^{\circ}$ N, de grands lacs existaient déjà à $9\,320 \pm 260$ B.P. (RISER *et al.*, 1983 ; HILLAIRE-MARCEL, 1983 ; PETIT-MAIRE, 1986).

PHASE LACUSTRE (EAU PERMANENTE)

Sur la bordure du lac d'Haijad, des coupes naturelles continues exposent des boues carbonatées et des argiles, très fossilifères, datées sur coquilles de Mollusques de $8\,300 \pm 100$ B.P. à la base et $4\,440 \pm 270$ B.P. au sommet. Ces sédiments contiennent très peu de fragments siliclastiques ; à la base, on retrouve quelques éléments remaniés du substratum mais, dans l'ensemble, l'absence de traces de courants ou de rides est remarquable. Le taux de sédimentation a pu être estimé, dans deux secteurs du lac, à 2,6 mm/an et 1,6 mm/an. Le rapport illite/smectite et la proportion de matière organique varient dans les coupes. Des fentes de dessiccation marquent les buttes témoins proches du rivage lacustre et des niveaux à *Phragmites in situ*, à 100-150 m du haut rivage, témoignent également de variations de niveau importantes, bien que le lac n'ait jamais connu de dessiccation totale jusqu'à 4 500 B.P.

Aucun pollen n'a été retrouvé à Haijad (sans doute en raison de processus d'oxydation).

La faune aquatique, au contraire, est très riche. Les Mollusques, parmi lesquels les espèces indiquant une faible salinité (*Bulinus truncatus*, *Biomphalaria*

pfeifferi, *Lymnaea natalensis*, *Corbicula africana*, *Caelatura lacoini*) sont irrégulièrement associés à *Melania tuberculata*, plus euryhaline, confirment de légères variations du milieu lacustre. Les Ostracodes sont très abondants (plus de 1 000 individus par échantillon). Le spectre faunique, relativement monotone, est toujours composé au moins à 50 % (mais le plus souvent à plus de 75 %) de *Cyprideis* ; d'autres espèces (*Darwinula* sp. 1 et *Cyprinotus*) se retrouvent également tout au long de la coupe dans la proportion de 1 à 8 %. L'abondance des *Cyprideis* indique des eaux à salinités faibles, bien que variables ; l'analyse des rapports Sr/Ca et Mg/Ca dans les carapaces de cette espèce les situent entre 2 et 5 à 6‰ (de DECKER, comm. pers.). Pendant cet épisode, le polymorphisme est faible : seuls deux morphotypes sont présents avec une dominance de l'un à 90 %, ce qui témoigne d'un contraste saisonnier peu marqué. La présence constante de *Darwinula* implique des eaux permanentes ; leur courbe varie à l'inverse de celle des *Cyprinotus* qui indiquent des périodes de bas niveaux avec émergence de la zone littorale et confirment les observations *supra*.

Le lac d'Agorgott, dans l'attente d'un carottage plus profond (prévu par notre équipe en 1987) a permis l'observation de coupes continues couvrant la période de 7 000 B.P. à l'actuel. Son évolution a pu être mise en parallèle avec celle du lac d'Haijad ; bien qu'il s'agisse cette fois d'un lac saumâtre où la vie animale n'a guère pu se développer, des bois flottés abondants ont permis d'en dater l'histoire.

La base des coupes correspond encore à l'optimum lacustre ; elle est constituée de boues glauabériques et magnésiennes, riches en matière organique, en smectites et thénardite qui contiennent des cristaux de sel épars. Trois minces couches de sel impliquent de courts épisodes de bas niveaux ; la couche médiane contient des restes végétaux (*Acacia* et plantes aquatiques) qui ont livré un âge de $6\,760 \pm 110$ B.P. : cette date correspond également à un bas niveau du lac d'Haijad daté, sur un sol marécageux remplissant des fentes de dessiccation, à $6\,790 \pm 70$ B.P. (PETIT-MAIRE, 1986). Les argiles intercalées montrent des lamines varvées, claires et foncées, qui pourront être étudiées (en termes de variations saisonnières ?) avec précision.

Les Ostracodes ne sont présents que très sporadiquement dans ces couches. Il s'agit toujours d'une monospécificité à *Cyprideis*. Les individus, peu nombreux (moins de 10 par échantillon) sont mal calcifiés, monomorphes et souvent juvéniles. Ils témoignent donc déjà d'un biotope peu favorable.

A la différence de Haijad, ces dépôts d'Agorgott ont livré un contenu important de pollens soudanais et sahéliens (*Combretaceae*, *Sapindaceae*, *Securinega*, *Diospyros*, *Celtis*, *Lannaea*, *Acacia*, *Maerua*, *Salvadora*, *Capparis*, *Cadaba*, *Fagonia*, *Cassia*, *Grewia*) démontrant — comme les bois flottés de plantes non halophiles — l'existence d'un biotope terrestre très différent de l'actuel (SCHULZ, 1987).

DÉTÉRIORATION CLIMATIQUE (6 700-4 500 B.P.)

Tous les éléments (sédimentation, flores, faunes) réunis dans les deux lacs considérés s'accordent pour définir un changement climatique à partir de 6 700 B.P. environ.

A Haijad, le taux de sédimentation tombe à 0,5 mm/an à partir de cette date. Un changement net se manifeste dans la faune d'Ostracodes par l'apparition sporadique de *Candona neglecta* (jusqu'à 5 000 B.P.) et *Limnocythere africana* (jusqu'à 4 500 B.P.), dans une proportion de 5 à 15%. Par ailleurs, la présence et l'abondance locale de *Limnocythere*, dans un niveau peu postérieur à 6 700 B.P., indiquent une alcalinité relativement forte. Pendant cet épisode, le polymorphisme des *Cyprideis* augmente avec la présence de quatre morphotypes en proportions relativement comparables. Ces données confirment l'augmentation de la salinité du lac après 6 700 B.P. et concordent avec des observations du même type dans le Sahara septentrional, où un contraste saisonnier beaucoup plus marqué est également indiqué alors par la faune d'Ostracodes (FONTES *et al.*, 1986).

A Agorgott, d'épaisses couches de halite, séparées par des lits d'argile et de glauabérite, vont se déposer (on peut les estimer à 7 millions de tonnes au total dans un lac de 16 km²!).

Pendant cet épisode, les lacs restent permanents, mais, relativement à l'épisode optimal précédent, un changement important du rapport Précipitation/Évaporation est cependant traduit par l'ensemble des données (fig. 4).

Notons qu'aucune couche sableuse n'a été observée dans les coupes pendant toute la phase lacustre (même sous forme de voile léger), ce qui exclut une reprise de l'activité éolienne (et donc un épisode climatique aride) pendant les 4 000 ans de la vie du lac de Haijad. Ces données sont en contradiction avec les données d'autres auteurs sur l'existence d'un épisode aride intercalé dans l'Holocène.

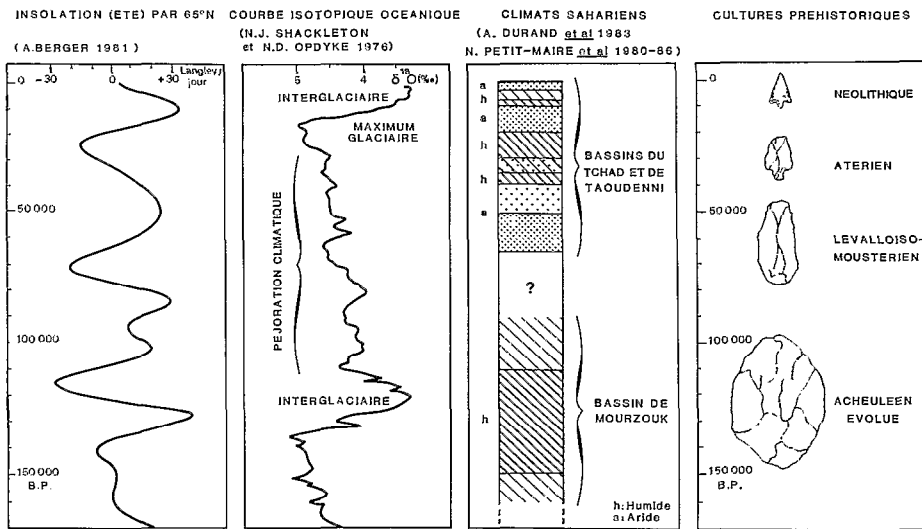


Fig. 5 — Relations entre les variations de l'insolation terrestre et de la cryosphère avec les climats de deux bassins sahariens et des civilisations préhistoriques.

L'environnement terrestre, traduit par les pollens, accuse un éclaircissement et un appauvrissement progressifs de la végétation à partir de 6 000 B.P. La présence de sites préhistoriques, datés 7 000-5 700 B.P. dans cette région, et les restes de grands mammifères de savane sahélienne (éléphants, rhinocéros, hippopotames, antilopes) qui leur sont associés à Kesret-el-Gani (fig. 1) confirment la persistance d'un biotope terrestre favorable à la vie. La courte durée de l'occupation humaine peut être attribuée au temps de migration après le long aride du Pléistocène supérieur (20 000-9 000 B.P.) à cette latitude et à la rapide dégradation des sources de nourriture après l'optimum.

FIN DE LA PHASE HUMIDE

Les lacs de la partie SE de la dépression (entre Guettara et Maglizen), situés quelques mètres plus haut que ceux précédemment décrits, accusent les premiers l'apparition de plus en plus fréquente de travertins qui finissent par couvrir toute la série. A Guettara, des fragments décimétriques de travertins mêlés à des *Melania* témoignent de l'irruption dans le lac de coulées impliquant un ruissellement brutal, caractéristique des climats arides. Le lac d'Haijad s'assèche vers 4 500 B.P., tandis qu'à Agorgott, ce n'est que vers 4 000 B.P. que l'approche de la fin du lac est annoncée par des fentes de dessiccation sur ses bords. Des saupoudrages sableux indiquent une reprise éolienne. Le sommet des sections passe brusquement à des grès argileux rouges grossiers, aujourd'hui labourés par les efflorescences salines de la sebkha. L'absence de sel dans les couches supérieures doit indiquer une brusque baisse de la nappe, due à une réduction drastique des précipitations.

Des Pulmonés terrestres (*Zoothecus insularis*, dét. J.C. Rosso) vivent encore dans le remplissage argi-

leux de travertins pléistocènes jusque vers 4 500 B.P. mais l'homme a quitté la région. La végétation, à 4 000 B.P., a rejoint le type saharien fondamental. Le désert est à nouveau installé.

Notons, à titre préliminaire, que les dépôts lités bien datés de Haijad, comme ceux d'Agorgott, ont permis de tenter une première approximation de calcul de séquences séculaires ou annuelles. Il semble que des rythmes de l'ordre de 360, 250 et 50 ans sont enregistrés : ils pourraient correspondre à ceux décrits par FAIRBRIDGE (1986), FAURE (1981), MÖRNER (1984) et LORIUS (1985). Cependant, une étude devra être menée sur carottes, en laboratoire, pour préciser ces premières données relevées sur le terrain.

CONCLUSIONS

La région isolée et aujourd'hui hyperaride de Taoudenni a donc connu, à l'Holocène, un climat lié à des précipitations locales que l'on peut estimer, étant donné le fort taux d'évaporation à ces latitudes, 50 à 100 fois plus importantes que celles reçues actuellement (5 mm) dans cette zone de hautes pressions quasi-permanentes. Le modèle présenté par BERGER (1978) montrait qu'à 8 000 B.P. les pressions devaient être beaucoup plus faibles sur l'Afrique entre 15° et 35° N. Nos données le confirment et cette situation a donc favorisé l'arrivée d'air humide jusqu'à une zone située 600 km au Nord du front actuel des moussons et l'installation d'un biotope permettant une vie végétale, animale et humaine de type sahélo-soudanien.

L'étude de la dépression de Taoudenni nous fournit l'exemple d'un cas limite, *minimal*, des effets sur un continent de la situation interglaciaire enregistrée par la cryosphère (LORIUS, 1985) en liaison avec les variations d'insolation (BERGER, 1981 ; BERGER et TRICOT, 1986) (fig. 5).

BIBLIOGRAPHIE

- BERGER (A.L.), 1978. — Long-term variations in daily insolation and Quaternary climatic changes. *J. Atmosph. Sci.*, 35/12 : 2362-2367.
- BERGER (A.), (ed.), 1981. — Climatic variations and variability. Facts and theories. Reidel. Dordrecht.
- BERGER (A.J.), et TRICOT (C.), 1986. — Global climatic change and astronomical theory of palaeoclimates. In : A. CAZENAVE Ed. Earth Rotation : solved and unsolved problems. Reidel Publ.
- DUBIEF (J.), 1963. — *Le climat du Sahara*. Alger : Institut des Recherches sahariennes. 270 p. (Mémoire).
- FABRE (J.), 1983. — Esquisse stratigraphique préliminaire des dépôts lacustres quaternaires. In : PETIT-MAIRE N., RISER J. (Eds.). *Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du Bassin de Taoudenni* : 421-441.
- FABRE (J.), MAINGUET (M.), 1984. — L'ablation éolienne en climat hyperaride : son rôle dans la genèse de la dépression de Taoudenni (Mali). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 299 (II), 13 : 887-892.
- FAIRBRIDGE (R.W.), 1986. — Monsoons and paleomonsoons. *Episodes*, 9/3 : 143-149.
- FAURE (H.), GAC (Y.), 1981. — Will the sahelian drought end in 1985 ? *Nature*, 291, 5815 : 475-478.
- FONTES (J.C.), GASSE (F.), CALLOT (Y.), PLAZIAT (J.C.), CARBONEL (P.), DUPEUBLE (P.), KACZMARSKA (I.), 1985. — Freshwater to marine-like environments from Holocene lakes in northern Sahara. *Nature*, 317 : 608-610.
- HILLAIRE-MARCEL (C.), 1983. — Paléohydrologie isotopique des lacs de l'erg Ine Sakane. In : PETIT-MAIRE N., RISER J. (Eds.). *Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du Bassin de Taoudenni* : 87-96.
- LORIUS (C.), JOUZEL (J.), RITZ (C.), MERLIVAT (L.), BARKOV (N.), KOROTKEVICH (Y.), and KOLYATKOV (V.), 1985. — A 150 000 years climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 316 : 591-596.
- MÖRNER (N.A.), 1984. — Concluding remarks. In : MÖRNER N.A. and KARLEN W. (Eds.). *Climatic changes on a yearly to millennial basis* : 637-652.
- PETIT-MAIRE (N.), 1986. — Paleoclimates in the Sahara of Mali : a multidisciplinary study. *Episodes*, 9/1 : 7-16.

- PETIT-MAIRE (N.), RISER (J.), 1981. — Holocene lake deposits and palaeoenvironment in central Sahara, northeastern Mali. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 35 : 45-61.
- PETIT-MAIRE (N.), RISER (J.) (Eds.), 1983. — *Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du Bassin de Taoudenni* : 473 p. Librairie du Muséum nat. d'Histoire nat., Paris.
- PETIT-MAIRE (N.), RISER (J.), 1987. — Holocene palaeohydrography of the Niger. *Paleoecology of Africa*, 18 : 135-142.
- RISER (J.), HILLAIRES-MARCEL (C.), ROGNON (P.), 1983. — Les phases lacustres holocènes. In : PETIT-MAIRE N., RISER J. (Eds.). *Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du Bassin de Taoudenni* : 65-86.
- RISER (J.), PETIT-MAIRE (N.), 1986. Paléohydrographie du bassin d'Araouane à l'Holocène. *Rev. Géol. dynam. Géogr. phys.*, 27/3-4 : 205-212.
- SCHULZ (E.), 1987. — Die Holozäne Vegetation der Zentralen Sahara (N. Mali, N. Niger, S.W. Libyen). *Paleoecology of Africa*, 18 : 143-162.
- VILLEMUR (J.R.), 1967. — *Reconnaissance géologique et structurale du Nord du Bassin de Taoudenni*. Paris : Bur. rech. géol. Min., 151 p. (Mémoire 51).