

# I-3. Variabilité paléohydrologique et changements climatiques

---

F. SYLVESTRE<sup>1</sup>

## Introduction

Nous savons, grâce aux données sur la période instrumentée, que le lac Tchad a oscillé entre trois états, le Petit, le Moyen et le Grand lac. Au cours des 60 dernières années, les données instrumentales montrent que le Lac est passé d'un stade de Grand Tchad dans les années 1950 à un stade de Petit lac depuis la période de sécheresse qui a débuté en 1970-1973. Cependant, est-ce que le lac Tchad a toujours évolué au cours du temps entre ces trois états ? A-t-il pu connaître des phases d'assèchement ou au contraire des phases de hauts niveaux lacustres ? Comment a-t-il varié aux échelles pluri-décennales à plurimillénaires ? Le regard vers le passé apporte des réponses à ces questions. Cette connaissance permet sur une longue échelle de temps d'appréhender la variabilité naturelle du lac Tchad, et de comprendre les mécanismes à l'origine de ces fluctuations.

Alors qu'aujourd'hui seule la partie sud du bassin est hydrologiquement active, les variations hydrologiques du Lac dans le passé doivent être considérées sur l'ensemble de son bassin orographique. En effet, dès lors que le seuil du Bahr El Ghazal est dépassé à 286 m, le Lac actuel va se déverser vers la partie nord dans la région du Djourab et vers la

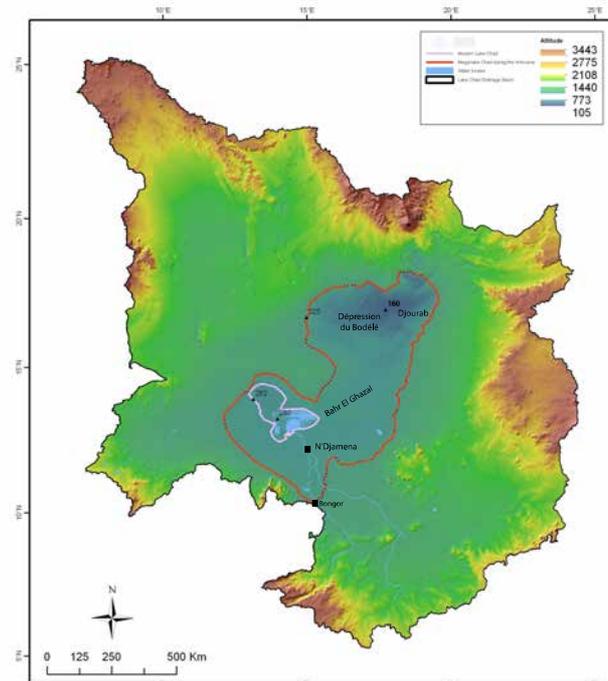
---

<sup>1</sup> Citation conseillée : Sylvestre F., 2014– “Variabilité paléohydrologique et changements climatiques”, In Lemoalle J., Magrin G. (dir.) : *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, Marseille, IRD Editions, coll. Expertise collégiale : 79-92 (clé USB).

dépression du Bodélé (figure 1). Cette extension maximale vers le nord du bassin, dans un second temps, est contrainte par un seuil à 324 m situé au sud du bassin à Dana proche de Bongor ; ce seuil atteint, le Lac se déverse alors dans le bassin de la Bénoué vers l'Ouest empruntant le réseau hydrographique du Mayo Kebbi pour aller rejoindre l'Océan Atlantique par le fleuve Niger.

Grâce aux observations de terrain, à des forages ayant atteint le substratum et aux relevés géologiques effectués à la fin des années 1960, le cadre sédimentaire du lac Tchad et de son bassin a été établi (Servant, 1983 ; Schneider, 1989) et il a permis de définir les grandes phases hydrologiques que le Lac et son bassin-versant ont connues au cours des 7 derniers millions d'années. Le bassin du lac Tchad repose sur le socle cristallin atteint à plus de 500 m de profondeur dans la partie sud du lac actuel. Ce socle est recouvert par trois séries de dépôts, dont les deux plus récentes ont fait l'objet de travaux. La première série concerne la période mio-pliocène (6 à 2 Millions d'années (Ma) connue grâce aux travaux de la mission paléanthropologique franco-tchadienne (MPFT) dirigée par M. Brunet dans le nord du bassin (e.g. Djourab, Dépression du Bodélé). La seconde période bien étudiée couvre les 20 000 dernières années englobant le dernier maximum glaciaire (21 000 ans before present (BP)), la dernière transition glaciaire-interglaciaire (15 000-12 000 ans BP) et l'Holocène (10 000-0 ans). Entre ces deux périodes, il n'y a pas ou très peu d'observations.

Une fois replacées les variations du Lac dans un contexte paléoclimatique global, on constate que le lac Tchad semble s'assécher pendant les périodes globalement froides à l'échelle planétaire, alors qu'il serait à son maximum d'extension pendant des périodes chaudes. Pourtant, aujourd'hui, le lac Tchad connaît une phase de Petit Lac alors que nous entrons dans une phase de réchauffement climatique. Comment peut-on expliquer cette situation ? Quels sont les facteurs dans le changement climatique actuel qui permettent d'expliquer que le lac Tchad connaît une période de diminution de sa superficie ?



**Figure 1 – Le lac Tchad et son bassin versant.**

Légende : la ligne noire délimite le bassin orographique couvrant 2,5 millions de km<sup>2</sup>, la ligne rouge délimite l'extension du Mega-lac Tchad à l'Holocène couvrant 340 000 km<sup>2</sup> avec une altitude à 320 m, la ligne rose délimite le Moyen lac Tchad à 282 m. L'image a été réalisée avec les données GTopo3 et Hydro1k (source : USGS).

## 1. Le lac Tchad entre 7 et 2 millions d'années

La connaissance du lac Tchad pour cette période provient principalement d'un sondage réalisé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières dans les années 1970 dans l'archipel de Bol. Ce sondage a pu être étudié par les équipes des Universités de Poitiers, de Strasbourg et du CEREGE. Son étude nous livre l'histoire du lac entre 2,6 et 6,35 Ma (Lebatard *et al.*, 2010 ; Moussa, 2010 ; Novello, 2013). Grâce à ce sondage, on sait aujourd'hui que le lac Tchad existe au moins depuis 6 Ma et qu'il a oscillé au cours de cette période entre des phases de hauts niveaux lacustres et des phases plus modérées (Novello, 2013).

Ces observations sont en accord avec les études menées dans le Djourab par la MPFT. Elles reposent sur l'étude des dépôts sédimentaires réalisée à partir de quatre sites, Toros-Menalla, Kossom Bougoudi, Kollé et Koro-Toro (Schuster *et al.*, 2009). Les dépôts sédimentaires permettent de définir trois grands types d'environnements : (i) les environnements désertiques attestés par des accumulations de grande ampleur de sables, des dunes et des figures de sédimentation de sables stratifiés, (ii) des dépôts massifs argileux intercalés avec des dépôts de diatomites témoignant d'environnements lacustres et (iii) des environnements transitoires de type palustres, périlacustres, alluvionnaires et fluviales. C'est d'ailleurs dans ces derniers que les hominidés *Sahelanthropus tchadensis* (Toumaï) et *Australopithecus bahrelghazali* (Abel) ont été retrouvés associés à une riche faune de vertébrés (Brunet *et al.*, 1995 ; Brunet *et al.*, 2002) datés respectivement à 7 Ma pour Toumaï et 3,5 Ma pour Abel (Lebatard *et al.*, 2008). La succession de ces environnements suggère une alternance de phases humides et sèches (« désert-lac ») avec la récurrence d'au moins 10 événements lacustres majeurs depuis 7 Ma (Schuster *et al.*, 2006). Cette date est aussi, en l'état actuel des connaissances, l'âge attribué à l'apparition du désert du Sahara.

Sur la base de ces observations, on peut donc envisager très raisonnablement pendant cette période des phases récurrentes de 'méga-lac Tchad' avec des extensions lacustres maximales dans le nord du bassin. Les analyses minéralogiques des constituants sédimentaires du sondage de Bol et la présence d'anciens deltas (Angamma) et structures sédimentaires (Goz Kherki) attestant d'une activité fluviale suggèrent à la fois des sources d'alimentation en provenance du bassin du sud (système Chari-Logone) et des apports en provenance des massifs situés au nord et à l'est du bassin (Schuster *et al.*, 2009).

## **2. Le lac Tchad depuis 40 000 ans**

### **2.1. Le Dernier Maximum glaciaire (21 000 ans)**

À partir de 40 000 ans BP, les observations géologiques couplées aux analyses géochimiques des eaux souterraines suggèrent que le Lac a connu une période humide entre 40 000 et 20 000 ans BP avec une phase de recharge des nappes d'eaux souterraines entre 24 000 et 20 000 ans BP (Edmunds *et al.*, 2004).

Des données plus robustes, étayées par une synthèse régionale, débutent à partir du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans. Cette période aurait connu une phase d'extrême aridité. Mise en évidence par des dépôts éoliens sur les contours du Lac, il avait été suggéré au dernier maximum glaciaire une disparition complète des nappes d'eau dans un contexte favorable aux remaniements éoliens, dont le façonnement de l'erg du Kanem serait une manifestation (Servant, 1983). Des observations montrant des formations éoliennes au nord du Cameroun (Sieffermann, 1970) laissaient à penser une extension très au sud de l'activité éolienne. Cette hypothèse vient d'être confirmée par des données très récentes. En effet, une campagne de sismique sur l'ensemble de la cuvette sud du lac Tchad actuel réalisée en 2011 montre un champ de dunes enfoui sous les sédiments d'âge holocène à une vingtaine de mètres de profondeur. Ces données confirment que le lac était très certainement complètement asséché sur l'ensemble de son bassin. De plus, ces données permettent de préciser la reconstitution paléogéographique du dernier maximum glaciaire montrant une extension des conditions arides au moins jusqu'à 12°S suggérant que le 'Sahara' à cette époque s'étendait à ces latitudes.

### **2.2. La dernière transition glaciaire-interglaciaire (18 000-12 000 ans)**

Après cette période d'extrême aridité et d'assèchement du lac, les conditions humides à l'échelle de la bande sahélo-saharienne seraient réapparues entre 15 000 et 12 000 ans BP ; de nombreuses données semblent mettre en évidence une réapparition des milieux palustres et lacustres vers 14 500 ans BP (Gasse, 2000; Lézine *et al.*, 2011). Les données disponibles montrent que le lac Tchad serait réapparu vers 14 000 ans BP. Elles tendent à être précisées aujourd'hui grâce à un sondage réalisé dans la cuvette sud où la sédimentation débute par un paléosol très riche en matière organique daté à 12 500 ans BP (Sylvestre *et al.*, en préparation).

### 2.3. L'Holocène moyen (10 000-4000 ans)

Cette période a fait l'objet de nombreux travaux puisqu'elle correspond à la phase où la bande sahélo-saharienne aurait connu une extension importante des milieux humides: on parle de la période du 'Sahara vert'.

C'est à cette période que le lac aurait connu une phase d'extension maximale. Cette phase de méga-lac Tchad a d'abord été mise en évidence par Tilho lors de ses expéditions dans les années 1910 (Tilho, 1925), confirmée successivement par les études ultérieures (Servant, 1983) (Schneider, 1989), et remise en cause par Durand (1982). Cependant, grâce à des techniques plus récentes, appuyées par des observations de terrain, la phase de Méga-Tchad durant l'Holocène est maintenant confirmée (Ghienne *et al.*, 2002 ; Leblanc *et al.*, 2006). Son extension maximale a été estimée à 350 000 km<sup>2</sup>. En outre, s'il est certain que le Lac au cours de l'Holocène moyen a dû atteindre cette superficie, il est important de noter qu'il n'est pas resté à cette taille durant toute la période ; la figure 1 montrant la délimitation maximale de l'extension du lac doit être modulée par les oscillations qu'il a probablement connues pendant cette période.

En l'état actuel des connaissances, nous ne disposons pas d'un enregistrement sédimentaire continu de la variabilité du niveau lacustre du lac Tchad pour cette période. Nous disposons d'une reconstitution à partir d'une coupe prélevée dans un puits à 15 km au nord de Moussoro à Tjeri situé dans un relief interdunaire au nord de l'exutoire du Lac actuel dans la vallée du Bahr el Ghazal (Servant, 1980). La reconstitution des variations du niveau du Lac à partir de cette coupe suggère une remise en eau relativement précoce vers 14 000 ans BP, suivie d'une phase de hauts niveaux lacustres entre 12 000 et 8 000 ans BP interrompue à 8 200 ans BP par un événement aride. Le maximum de l'extension du lac Tchad aurait été enregistré entre 7 000 et 4 500 ans BP. C'est certainement pendant cette phase que le Lac a dû atteindre son extension maximale avec une profondeur de 30-40 m dans le bassin sud et de plus de 140 m dans la partie nord. La fin de cette phase humide fait l'objet de nombreux débats dans la littérature à l'échelle de la bande sahélo-saharienne. Pour le lac Tchad, elle vient d'être précisée grâce à un enregistrement sédimentaire réalisé dans la cuvette sud du lac, datée à 5 700 ans BP (Amaral *et al.*, 2013). A partir de cette date, le niveau du Lac n'a cessé de décroître, affecté par une phase très aride qui a culminé entre 4 200 et 4 000 ans BP. On considère également que c'est à partir de cette date que le Lac s'est stabilisé dans sa position actuelle. Toutefois, on note qu'il était encore suffisamment élevé par rapport à l'actuel car il y a environ 2 500 ans BP, il débordait régulièrement dans le Bahr El Ghazal. Il faut également remarquer, bien que nous n'ayons pas encore d'évidences claires, que pendant cette phase de récession, le Lac a pu se scinder en deux, avec la subsistance d'un lac résiduel au nord du bassin, déconnecté du lac dans sa position actuelle qui a continué à être alimenté par le sud.

### 3. Le dernier millénaire (1000 ans – 1950 de notre ère)

Au cours du dernier millénaire, nous disposons d'une reconstitution basée sur des observations géologiques et des données historiques, qui ont permis de proposer une courbe des niveaux du lac Tchad (figure 2 ; Maley, 1981). Diverses données montrent qu'au début du millénaire, la zone sahélienne était dans son ensemble nettement plus humide, ayant favorisé le développement de peuplements à l'échelle régionale comme l'attestent les petits royaumes chrétiens de Nubie, la situation de la capitale de l'Empire du Kanem dans le Bodélé ou le développement jusqu'au XIII<sup>e</sup> siècle de la civilisation haddadienne (Treinen-Claustre, 1982).

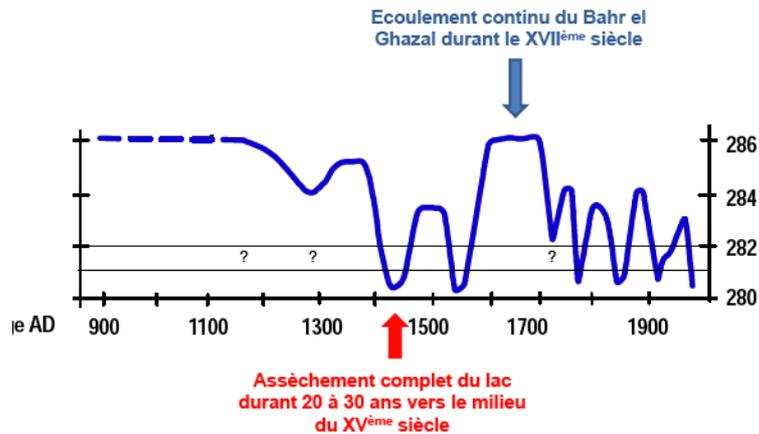


Figure 2 – Reconstitution des variations du niveau lacustre du lac Tchad au cours des 1000 dernières années (modifié de Maley, 1981).

À partir du XIII<sup>e</sup> siècle, on observe un assèchement progressif des bras du delta récent à mettre en relation avec la diminution des apports du Chari, ce qui a conduit à une baisse du niveau du lac Tchad, et à une phase d'assèchement ou de très forte diminution du Bahr El Ghazal. A cette époque, les nomades Kréda ont effectué une première migration du Borkou vers le Kanem suite probablement à une phase d'aridification dans le nord du Tchad (Clanet, 1975).

Après une remontée du niveau au XIV<sup>e</sup> siècle, une très forte régression, ayant conduit à une disparition des eaux libres dans le bassin du sud, est intervenue au milieu du XV<sup>e</sup> siècle. Des évidences géologiques attestent de cette sécheresse, couplée à des témoignages historiques des

Fellata qui rapportent que les villages ont du être déplacés et que l'eau n'était trouvée que dans des puits creusés dans le fond du lac asséché. Le retour brutal de la crue noya tous ces villages, ce qui explique pourquoi les Fellata mémorisèrent cet événement catastrophique (Seignobos, 1993).

La dernière période de hauts niveaux du Lac durant laquelle il aurait stationné vers 286 m (au seuil du Bahr El Ghazal) se situe au XVII<sup>e</sup> siècle. De nombreux témoignages historiques et la tradition orale apportent des arguments pour attester de cet épisode, avec notamment la migration du peuple Kréda entre le Borkou et le Kanem.

Les XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles sont marqués par des phases de très bas niveaux lacustres ; une amélioration est observée à partir de 1920, avec toutefois une péjoration vers 1940. Ces années furent suivies par une courte phase de Grand Lac dans les années 1950 avant de connaître à partir de 1973 une phase de sécheresse qui se prolonge encore aujourd'hui.

## **4. Variabilité hydrologique et climat**

Il est maintenant bien admis que les précipitations apportées par la mousson en saison humide sur l'Afrique de l'Ouest et centrale, sont expliquées, d'une part, par des mécanismes de forçage externe en relation avec les paramètres orbitaux modifiant l'insolation et les cycles de précession à l'origine de la migration saisonnière de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Et, d'autre part, par des mécanismes de forçage interne lié au gradient de température entre les océans et les continents modifiant la pénétration de la ZCIT et donc les précipitations sur le continent. Alimenté actuellement à près de 85 % par les apports du Chari et du Logone, le lac Tchad présente des fluctuations qui reflètent principalement l'évolution climatique de la zone soudano-guinéenne arrosée par les pluies issues de la mousson. En outre, des évidences géologiques suggèrent pendant les phases passées de méga-lac une alimentation par les rivières drainant les massifs du nord et de l'est du bassin.

À l'échelle des derniers millénaires, il semblerait que le lac Tchad présente de hauts niveaux lacustres en période globalement plus chaude, alors qu'il présente de bas niveaux voire des assèchements pendant des phases de refroidissement. Aujourd'hui, la situation semble donc paradoxale puisqu'on observe une augmentation globale des températures à l'échelle planétaire alors que le lac est à son stade de Petit Tchad.

L'incertitude concernant l'impact du changement climatique actuel sur le lac Tchad et son bassin-versant réside dans le fait que l'analyse des simulations des modèles climatiques montre qu'aucun consensus solide ne peut être établi sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (Cook, 2008). Le consensus le plus fort, sur une mousson moins large mais plus intense, restant plus longtemps sur le continent en fin de saison, n'est partagé que par la moitié des modèles utilisés. La différence entre les modèles pour le signal du changement climatique a plusieurs causes en fonction du moment de la saison auquel on s'intéresse. La modification future des contrastes des températures de surface de l'océan aurait un fort impact sur les précipitations en début de saison, tandis que l'opposition entre réchauffement moyen des océans et des continents porterait sur la position et l'intensité de la mousson au milieu de la saison des pluies. La fonte massive des glaces de l'Atlantique nord maintiendrait un contraste océan-continent ne permettant pas un déplacement suffisamment septentrional de la ZCIT et donc une mousson vers le sud du continent (Shanahan *et al.*, 2009).

Enfin, des études récentes portant sur l'impact du Lac sur le climat local montrent que notamment dans ses phases d'extension maximale, par exemple à l'Holocène moyen il y a 6000 ans, le Lac réduit les précipitations et augmente l'évaporation et a donc un impact négatif sur son bilan en eau (Contoux, 2013).

## **Conclusion**

Le lac Tchad connaît donc une variabilité naturelle importante de ses niveaux lacustres. Sur la base des connaissances actuelles, qui restent encore très faibles d'un point de vue temporel (seulement deux périodes connues sur les temps géologiques, sans reconstitution continue et détaillée) et spatial (peu de points d'observations), on sait que le Lac a pu connaître des phases d'extension maximale comme celle observée au cours de l'Holocène moyen avec une superficie de 350 000 km<sup>2</sup>. Il a également accusé des phases de diminution voire des périodes d'assèchement complet ou quasi-complet, notamment au cours du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans, ou encore plus proche de nous au XV<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> siècle.

Nous avons vu que le lac Tchad semble s'assécher pendant les périodes globalement froides à l'échelle planétaire, alors qu'il serait à son maximum d'extension pendant des périodes chaudes. Aujourd'hui, la diminution des précipitations maintenant le lac dans une phase de Petit Lac dans un contexte de réchauffement climatique semblerait s'expliquer par un contraste océan-continent qui maintiendrait la zone de convergence intertropicale vers le sud du continent.

Les modèles de simulation climatique ne sont cependant pas encore suffisamment robustes pour comprendre l'impact du changement climatique sur les précipitations sur le bassin et donc sur le devenir à moyen terme du Lac.

## **Recommandations**

En l'état actuel des connaissances sur le changement climatique, il est impossible de fournir la récurrence des oscillations du Lac pour les années, voire les décennies à venir. Ces connaissances sur le passé sont l'unique moyen de pouvoir valider les modèles de prédiction pour le futur des variations hydrologiques. La connaissance des variations du Lac est cruciale pour connaître les superficies disponibles et exploitables pour les activités agro-pastorales en fonction de chaque état du lac.

Il est donc important de poursuivre les recherches sur la variabilité paléohydrologique à long terme du lac Tchad, basées sur les reconstitutions à partir des archives sédimentaires et des méthodes géologiques, géophysiques et géochimiques.

## Références bibliographiques

Amaral P.G.C., Vincens A., Guiot J., Buchet G., Deschamps P., Doumnang J., Sylvestre F., 2013 – Palynological evidence for gradual vegetation and climate changes during the “African Humid Period” termination at 13°N from a Mega-Lake Chad sedimentary sequence. *Climate of the Past* 9: 1-19.

Brunet, M., Guy F., Pilbeam D., Mackaye H.T., Likius A., Ahounta D., Beauvilain A., Blondel C., Bocherens H., Boisserie J.R., De Bonis L., Coppens Y., Dejax J., Denys C., Düringer P., Eisenmann V.R., Fanone G., Fronty P., Geraads D., Lehmann T., Lihoreau F., Louchart A., Mahamat A., Merceron G., Mouchelin G., Otero O., Campomanes P.P., De Leon M.P., Rage J.C., Sapanet M., Schuster M., Sudre J., Tassy P., Valentin X., Vignaud P., Viriot L., Zazzo A., Zollikofer C., 2002 – A new hominid from the Upper Miocene of Chad, central Africa. *Nature* 418: 145-151.

Brunet, M., Beauvilain A., Coppens Y., Heintz E., Moutaye A.H., Pilbeam D., 1995 – The first australopithecine 2500 kilometers west of the Rift Valley (Chad). *Nature* 378: 273-275.

Clanet J., 1975 – *Les éleveurs de l'Ouest tchadien. La mobilité des éleveurs du Kanem et leurs réponses à la crise climatique de 1969/1973*. Université de Rouen, 268 p.

Contoux C., Jost A., Ramstein G., Sepulchre P., Krinner G., Schuster M., 2013 – Megalake Chad impact on climate and vegetation during the late Pliocene and the mid-Holocene. *Climate of the Past* 9: 1417-1430.

Cook K., Vizzy E., 2006 – Coupled model simulations of the west african monsoon system: 20th and 21st century simulations. *Journal of Climate* 19: 3681-3703.

Durand A., 1982 – Oscillations of Lake Chad over the past 50,000 years: New data and new hypothesis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 39: 37-53.

Edmunds W.M., Dodo A., Djoret D., Gasse F., Gaye C.B., Goni I.B., Travi Y., Zouari K., Zuppi G.M., 2004 – Groundwater as an archive of climatic and environmental change: Europe to Africa In Battarbee R W., Gasse, F., Stickley C.E. (Eds.): *Past Climate Variability Through Europe and Africa*. Springer: 279-306.

Gasse, F., 2000 – Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 19: 189-211.

Ghienne J.-F., Schuster M., Bernard A., Düringer P., Brunet M., 2002 – The Holocene giant Lake Chad revealed by digital elevation models. *Quaternary International* 87 : 81-85.

Lebatard A.-E., Bourles D., Braucher R., Arnold M., Düringer P., Jolivet M., Moussa A., Deschamps P., Roquin C., Carcaillet J., Schuster M., Lihoreau F., Likius A., Mackaye H.T., Vignaud P., Brunet M., 2010 – Application of the authigenic  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  dating method to continental sediments: Reconstruction of the Mio-Pleistocene sedimentary sequence in the early hominid fossiliferous areas of the northern Chad Basin. *Earth and Planetary Science Letters* 297: 57-70.

Lebatard A.E., Bourles D.L., Düringer P., Jolivet M., Braucher R., Carcaillet J., Schuster M., Arnaud N., Monie P., Lihoreau F., Likius A., Mackaye H.T., Vignaud P., Brunet M., 2008 – Cosmogenic nuclide dating of Sahelanthropus tchadensis and Australopithecus bahrelghazali: Mio-Pliocene hominids from Chad. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 3226-3231.

Leblanc M.J., Leduc C., Stagnitti F., van Oevelen P.J., Jones C., Mofor L.A., Razack M., Favreau, G., 2006 – Evidence for Megalake Chad, north-central Africa, during the late Quaternary from satellite data. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 230 : 230-242.

Lézine, A.-M.H., Christelle; Grenier, Christophe; Braconnot, Pascale; Krinner, Gerhard, 2011 – Sahara and Sahel vulnerability to climate changes, lessons from Holocene hydrological data. *Quaternary Science Reviews* 30 : 3001-3012.

Maley, J., 1981 – *Études palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30000 ans à l'époque actuelle*. Paris, ORSTOM, 586 p.

Moussa, A., 2010 – *Les séries sédimentaires fluviatiles, lacustres et éoliennes du bassin du Tchad depuis le Miocène terminal*. Thèse Université de Strasbourg, 249p.

Novello, A., 2013 – Les phytolithes, marqueurs des environnements mio-pliocènes du Tchad. Thèse Université de Poitiers, p. 227.

Schneider J.L., 1989 – Géologie et Hydrogéologie de la République du Tchad. Thèse Univ. Avignon, 3 vol.

Schuster M., Düringer P., Ghienne J.-F., Roquin C., Sepulchre P., Moussa A., Lebatard A.-E., Mackaye H.T., Likius A., Vignaud P., Brunet M., 2009 – Chad Basin: Paleoenvironments of the Sahara since the Late Miocene. *Comptes Rendus Geosciences* 341 : 603-611.

Schuster M., Düringer P., Ghienne J.F., Vignaud P., Mackaye H.T., Likies A., Brunet M., 2006 – The age of the Sahara Desert. *Science* 311 : 821-821.

Schuster, M., Roquin, C., Düringer, P., Brunet, M., Caugy, M., Fontugne, M., Taisso Mackaye, H., Vignaud, P., Ghienne, J.-F., 2005 – Holocene Lake Mega-Chad palaeoshorelines from space. *Quaternary Science Reviews* 24: 1821-1827.

Seignobos C., 1993 – Des traditions Fellata et de l'assèchement du lac Tchad., *In* Barreteau, D., von Graffenried (Ed.): *Datation et chronologie dans le bassin du Lac Chad = Dating and chronology in the Lake Chad basin*, Paris, ORSTOM :165-182.

Servant, M., 1983 – Séquences continentales et variations climatiques: évolution du Bassin du Lac Tchad au Cénozoïque supérieur. Paris, ORSTOM, 573 p.

Servant M., Servant-Vildary S., 1980 – L'environnement quaternaire du bassin du Tchad, *In* Williams M.A.J., Faure H. (Eds.): *The Sahara and the Nile. Quaternary environments and prehistoric occupation in northern Africa*. Rotterdam, Balkema :133-162.

Shanahan, T.M., Overpeck, J.T., Anchukaitis, K.J., Beck, J.W., Cole, J.E., Dettman, D.L., Peck, J.A., Scholz, C.A., King, J.W., 2009 – Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa. *Science* 324 : 377-380.

Sieffermann G., 1970 – Variations climatiques au Quaternaire dans le sud-ouest de la cuvette tchadienne. C.R. 92e Cong. Nat. Soc. Savantes Strasbourg 2 : 485-494.

Tilho J., 1925 – Sur l'aire probable d'extension maxima de la mer paléotchadienne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 181: 643-646.

Treinen-Claustre F., 1982 – *Sahara et Sahel à l'âge du fer. Borkou, Tchad*. Mémoire de la société des Africanistes, 214 p.

# **Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles**

**Sous la direction de :**

Jacques LEMOALLE et Géraud MAGRIN

**Experts coordonnateurs :**

SAIBOU ISSA, Goltob Mbaye NGARESSEM,  
Benjamin NGOUNOU NGATCHA, Christine RAIMOND

**Experts du collège :**

Boureima AMADOU, Daira DJORET, Guillaume FAVREAU, Ibrahim Baba GONI,  
Hubert GUÉRIN, Frédéric REOUNODJI, Florence SYLVESTRE,  
Muhammad WAZIRI

**Avec les contributions de :**

Mouhamadou ABDOURAHAMANI, Marie BOUVAREL,  
Audrey Mbagogo, Ronan MUGELÉ, Hadiza Kiari FOUGOU, Charline RANGÉ

*Expertise collégiale réalisée par l'IRD  
à la demande de la Commission du bassin du lac Tchad*

**IRD Éditions**

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT

Collection expertise collégiale

Marseille, 2014

**Responsable éditorial**

Sylvain ROBERT

**Coordination éditoriale**

Laure Vaitiare ANDRE

**Relecture scientifique des contributions intégrales**

Jean-Claude OLIVRY

Christian SEIGNOBOS

**Relecture technique des contributions intégrales et mise en forme**

Laure Vaitiare ANDRE

Danielle GRANIER

Eva LEGRAS

Sylvain ROBERT

**Coordination de fabrication**

Catherine PLASSE

**Duplication de la clé USB et interactivité :**

Digital Services/Poisson soluble

Cette clé USB regroupe la version numérique de la synthèse en français et en anglais, ainsi que l'ensemble des contributions intégrales des experts du collège.

Pour citer cet ouvrage :

Lemoalle J., Magrin G. (dir.), 2014 – *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*. Marseille, IRD Editions, coll. Expertise collégiale, 218 p + clé USB.

© IRD, 2014

ISSN : 1633-9924

ISBN : 978-2-7099-1836-7