

I-1. Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad

J. LEMOALLE ¹

Les variations de surface du lac Tchad au cours des cinquante dernières années ont été spectaculaires et illustrées par des séries d'images satellitaires largement diffusées. Cependant, les données hydrologiques et les observations de terrain relatives au lac sont insuffisantes et pour la plupart peu accessibles. C'est sans doute cet écart entre une abondance d'images disponibles et le manque de données de terrain qui explique en partie les nombreuses interprétations inexactes publiées dans la littérature scientifique ou grand public, avec pour résultat une image brouillée du lac Tchad.

Un malentendu important réside dans la compréhension de ce qu'est la « surface du lac ». Pour un lac constitué à un moment donné d'une partie d'eau libre et d'une partie d'eau couverte de végétation marécageuse, certains considèrent que la surface du lac est la surface en eau libre tandis que d'autres estiment que la surface du lac est la surface totale inondée, comprenant à la fois l'eau libre et les marécages. Les marécages sont donc souvent oubliés dans l'estimation de la surface du lac Tchad. Or ces marécages, lorsqu'ils sont inondés, doivent être considérés comme des écosystèmes aquatiques ; ils participent notamment à la production en poisson. Pour les riverains, qui utilisent la pirogue pour y circuler, ils appartiennent au Lac. C'est donc ainsi que nous les considérons dans cette étude.

¹ Citation conseillée: Lemoalle J., 2014 – “Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad”, In Lemoalle J., Magrin G. (dir.) : *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, Marseille, IRD Editions, coll. Expertise collégiale : 16-58 (clé USB)

Dans l'utilisation des données satellitaires, l'eau libre est aisément identifiable en canal proche infrarouge et sa surface est facile à quantifier. L'identification des surfaces de marécages inondés est plus difficile à distinguer, ce qui explique en partie leur non-prise en compte dans certaines évaluations.

On sait depuis Tilho (1910, 1928) que le lac Tchad est un lac fermé, sans exutoire de surface sauf lors de ses plus hauts niveaux. Le bilan hydrique est constitué par les apports par les fleuves et la pluie directe, et les pertes par évaporation ainsi que de faibles infiltrations vers les nappes phréatiques bordières. Lorsque les apports d'une année excèdent les pertes, le niveau du lac s'élève et sa surface augmente, ce qui accroît les pertes par évaporation et tend à rétablir un nouvel équilibre à un niveau légèrement supérieur.

Les variations du Lac au cours du dernier demi-siècle correspondent à des modifications des termes du bilan hydrique. Comment les apports ont-ils varié, et quelles en sont les causes? Quelles sont les données disponibles? Peut-on attribuer aux prélèvements pour l'irrigation dans le bassin la diminution des apports fluviaux, comme cela a été écrit, ou bien la diminution de la pluie est-elle le facteur principal? Quelle est la surface en eau du Lac depuis 1950 et comment se présente le Lac aujourd'hui?

Dans un premier temps, nous analysons les variations de la pluie sur le bassin et leur traduction en apports en eau au Lac. Dans un deuxième temps, nous résumons une série de trois publications récentes faisant le point sur l'état du Lac et son fonctionnement hydrologique actuel et récent.

1. Le bassin versant du lac Tchad

Le **bassin versant actif du lac**, qui contribue à son alimentation en eau, est constitué du bassin du Chari avec son affluent principal le Logone au sud (610 000 km²), et du bassin de la Komadougou Yobé à l'ouest (174 000 km²), auxquels s'ajoutent les petits bassins de l'El Beïd, du Yedseram et Ngadda au Nigeria (environ 30 000 km²) situés au sud du Lac entre les deux bassins cités plus haut (figure 1).

Ce bassin versant actif ne doit pas être confondu avec le bassin conventionnel du Lac Tchad, ni avec le bassin orographique, souvent dénommé à tort bassin hydrographique du Lac.

Dans le cadre de la Commission du Bassin du lac Tchad (CBLT) **un bassin conventionnel** a été délimité, pour gérer les ressources en eau

communes au pays membres. Le bassin conventionnel est une entité juridique. Il couvrait à sa création en 1964 une superficie de 427 300 km² partagée entre le Niger, le Cameroun, le Tchad et le Nigeria (CBLT, 2013). Aujourd'hui, le bassin conventionnel couvre 967 000 km² (tableau 1) et un pays supplémentaire, la République Centrafricaine. L'adhésion du Soudan comme 7^{ème} pays membre, envisagée depuis juillet 2000, est soumise à sa ratification de la Convention de Fort Lamy, qui n'est pas encore effectuée à ce jour. La portion du bassin conventionnel dans le territoire national du Soudan est de 69 000 km². Si l'admission de ce pays dans la CBLT se concrétise, le bassin conventionnel passera alors à 1 053 455 km².

Tableau 1 – Répartition de la superficie du bassin conventionnel entre les États membres de la CBLT (source : CBLT, 2007).

État	Portion du bassin conventionnel		Portion du territoire national (%)
	(km ²)	(%)	
Cameroun	56 800	6	12,1
Niger	162 375	17	12,7
Nigeria	188 000	19	22,2
Tchad	361 980	36	28,4
RCA	197 800	22	31,8
Total	967 000	100	-

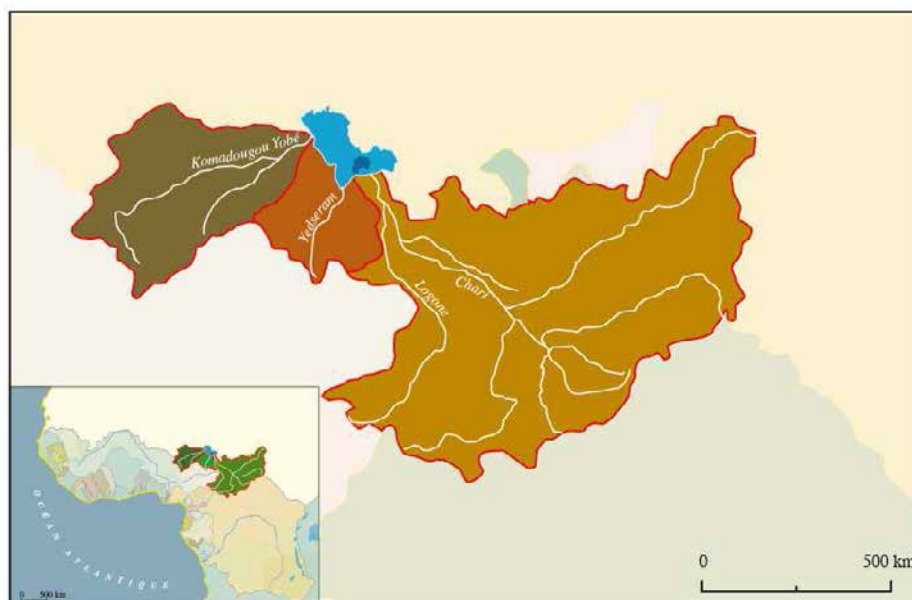


Figure 1 – Le bassin versant actif du lac Tchad constitué des bassins du Chari, de la Komadougou Yobé et des petits bassins intermédiaires (d'après Dieulin 2007 et Atlas du Lac Tchad, à paraître).

Le lac Tchad est situé dans une grande cuvette (son **bassin oro-hydrographique**) de 2 400 000 km², soit 8 % du continent africain, qui constituait autrefois le bassin versant du Mega Lac Tchad (voir I-2). Le lac Tchad actuel n'est pas situé au fond de ce bassin dont le point bas est situé à près de 500 km au nord-est du lac entre le 16° et 18° de latitude nord, 17° et 19° de longitude Est, dans les pays du Djourab et du Bodelé (155 à 180 m d'altitude). Il n'est donc pas exact de considérer cette grande cuvette comme le bassin hydrographique du Lac puisque toute l'eau qui pourrait y tomber ne serait pas drainée vers le lac actuel.

L'alimentation en eau de surface du lac Tchad est assurée par plusieurs affluents dont le plus important est le fleuve Chari. La Komadougou Yobé, l'El Beid et les petits tributaires du Nigeria complètent ces apports. La description de ces affluents permettra de mieux comprendre la dynamique de chacun dans son apport en eau au Lac.

Le fleuve **Chari** prend sa source dans les zones montagneuses de la République Centrafricaine où la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 1500 mm/an. Ce fleuve permanent parcourt la République du Tchad sur environ 800 km. Au cours de son trajet, le Chari fait jonction avec le Logone à N'Djaména et Kousséri, et marque alors la frontière entre le Cameroun et le Tchad. Les eaux du Chari, augmentées du Logone, apportent au Lac près de 90 % de ses apports de surface pour un bassin de l'ordre de 610 000 km² (Dieulin, 2007).

La question s'est posée très tôt d'une capture possible par la Bénoué du Logone dont les débordements dans la région d'Éré au Tchad rejoignent le Mayo Kebbi. Les missions consacrées à cette question à partir de 1935 ont montré qu'il s'agit en fait d'une défluviation très partielle, sans risque d'augmentation (Rodier, 1966).

La rivière Yobé (**Komadougou Yobé**) vient de régions humides du Nigeria, notamment les hauts plateaux de Jos, et traverse la zone de dunes sablonneuses des bords du lac Tchad. La Komadougou Yobé coule entre le Niger et le Nigeria sur 150 km environ avant d'atteindre le lac Tchad aux environs de Bosso au nord de Malam Fatori. Elle perd 40% de son débit par infiltration et évaporation en débordant dans la plaine d'inondation Hadejia-Jamare entre Damasale et Yau sur une distance d'environ 96 km. La Yobé a apporté environ 0,5 km³/an au Lac pour la période 1990-2000, soit 1,8% des apports du Chari (Bader et al., 2011). Des barrages ont été construits dans le cours supérieur de la rivière : Tiga en 1974 et Challawa Gorge en 1992 (CBLT, 2007). Ils ont pu modifier ses apports au Lac, mais le fait que la plaine d'inondation de Hadejia-Jamare soit maintenant moins inondée (et donc perde moins d'eau par évaporation) compense en partie les prélèvements dans les barrages. Le débit de la rivière est largement modifié par ces barrages, aussi bien en termes de quantité d'eau que de variation

saisonnière, avec des impacts sur les ressources et le fonctionnement des marais du bassin.

Dans son cours aval, la rivière Yobé contribue également à l'irrigation. Elle est à sec pendant plus de la moitié de l'année, mais son estuaire constitue une zone humide, même en cas d'assèchement de la cuvette nord du lac, qui est mise à profit pour les cultures dans les polders qui y ont été aménagés.

Débouchant dans le sud-ouest du lac Tchad, **l'El Beïd** est l'exutoire du Yaéré, plaine d'inondation du Logone au Nord Cameroun. Son débit est maximal entre novembre et décembre (Bloxman et Hassan Harouna, 2007). Le régime hydrologique de l'El Beïd est irrégulier, les débits variant d'une année à une autre en fonction des crues du Logone. Ce fleuve forme la frontière entre le Cameroun et l'État de Bornou au Nigeria. Son lit est sec pendant la saison sèche (mars à juin-juillet). Entre 1953 et 2008, son débit moyen représentait 2,2 % de celui du Chari (Bader et al., 2011). L'El Beïd constitue le principal apport du Nigeria au Lac bien que ses eaux proviennent pour l'essentiel du Cameroun.

D'autres rivières alimentent aussi le lac Tchad. On peut citer entre autres le **Yedseram**, le **Ngadda**, partiellement utilisés pour l'alimentation de la ville Maiduguri et qui se perdent dans leur cours aval dans les marécages de la pointe sud du lac.

Les mares temporaires dans l'ensemble du bassin du Lac et sur sa périphérie constituent une ressource largement utilisée par le bétail, auquel elles fournissent un accès à l'eau facile et en général plus court que les milieux permanents. L'énergie ainsi économisée pour l'accès à l'eau est transformée en gain de poids.

2. La pluie sur le bassin versant

Le bassin du Lac est situé dans la zone de balancement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), zone de rencontre entre les masses d'air des zones de haute pression des hémisphères nord (anticyclone des Açores) et sud (anticyclone de Sainte Hélène). C'est au sud du maximum de convergence que se déclenchent les pluies ou les lignes de grains (Météo-France, 2013). La ZCIT se déplace vers le nord de janvier à juillet, et reflue vers le sud de juillet à janvier. L'importance de la saison des pluies, en quantité et en durée, dépend de l'amplitude de la migration de la ZCIT qui peut varier sensiblement selon les années.

Sur le continent africain, le front intertropical (FIT) est la trace au sol de la ZCIT : il s'agit de la zone de confluence des alizés de nord-est, très chauds et très secs, désignés sous le nom d'Harmattan, et des alizés de l'hémisphère sud venant du golfe de Guinée, qui ont ici une orientation sud-ouest, et sont moins chauds et plus humides. Cette zone frontale est particulièrement active en été où elle diffuse les pluies de mousson. Dans le Sahel, le passage du FIT vers le nord est annonciateur de la saison des pluies.

Ce système de mousson africaine est beaucoup moins régulier que la mousson indienne, ce qui se traduit par une variabilité interannuelle de la pluie beaucoup plus forte. Le grand programme scientifique AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) a été mis en place pour mieux comprendre les mécanismes de cette variabilité et ses implications sur les sociétés (AMMA, 2013 ; Redelsperger, 2006). La traduction au sol de ces phénomènes atmosphériques est un gradient sud-nord décroissant de l'importance et de la durée de la saison des pluies, et croissant de l'évaporation et des températures maximales observées (figure 2).

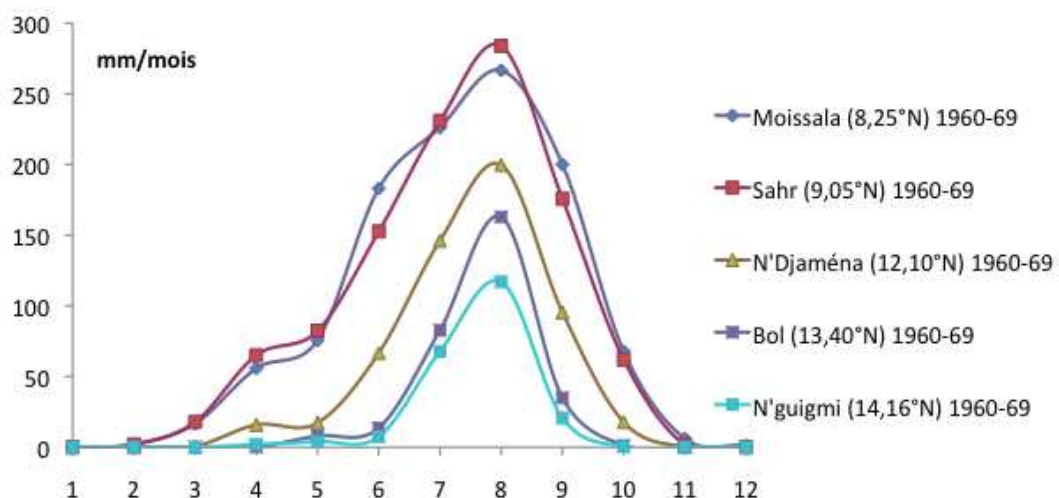


Figure 2 – Distribution de la pluie moyenne du sud au nord du bassin actif lors d'une phase de pluie moyenne (période 1960-69, données DREM Tchad et PNUE).

À ce gradient moyen de pluie s'est superposée une translation vers le sud d'environ 150 km des isohyètes durant les années 1970-80 : après une phase relativement humide sur le Sahel ouest africain de 1950 à 1967, la zone de convergence intertropicale s'est déplacée moins loin vers le nord qu'auparavant, d'où une diminution de la pluie sur le bassin, avec des sécheresses sévères en 1972 et 1984 (L'Hôte et Mahé 2002 ; Niel et al.

2005) (figure 3). Sur l'ensemble du bassin du Chari, la pluie moyenne annuelle a diminué d'environ 150 mm, passant de 1095 mm/an (1950-67) à 932 mm/an pour la période 1972-2006 (figure 4).

Depuis 1994, on assiste cependant à une reprise partielle de la pluviométrie et un retour vers le nord des isohyètes. La pluie sur le bassin a été de 983 mm/an pour la période 1994-2006, peu différente de la moyenne sur le long terme de 992 mm/an pour la période 1901-2006.

Au cours des années récentes, la pluie annuelle a été en moyenne comprise entre 1468 mm/an (période de 1990 à 2000) au sud du bassin à Bangui en RCA, et 219 mm/an sur les rives nord du Lac à Bol (1980-87) et N'guigmi (1992-2002). À ce gradient de pluie correspond une transition agro-climatique depuis la zone guinéenne (>1100 mm/an) à la zone soudanienne subtropicale à saison sèche (900-1100 mm/an) puis sahélo-soudanienne (500-900 mm/an) et enfin sahélienne (300-500 mm/an) qui impose une adaptation des sociétés et des pratiques agricoles très différentes.

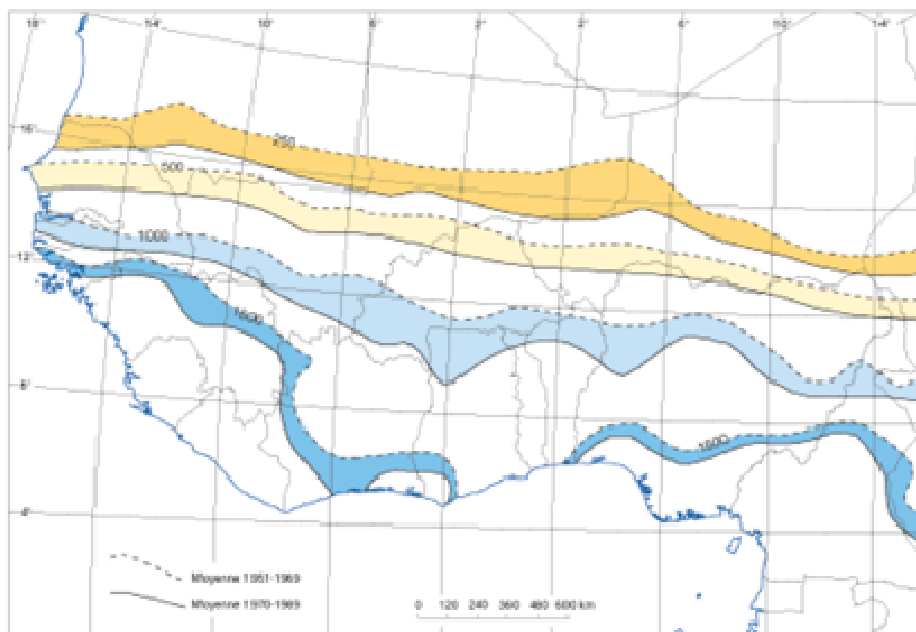


Figure 3 – Carte des isohyètes sur l'Afrique de l'Ouest et centrale montrant la translation d'environ 120 km vers le sud des isohyètes moyennes entre les périodes 1951-69 (en tireté) et 1970-89 (ligne continue). Pour la période sèche, la pluie moyenne sur le Lac est de l'ordre de 250 mm/an.

Source : L'Hôte et Mahé (1996).

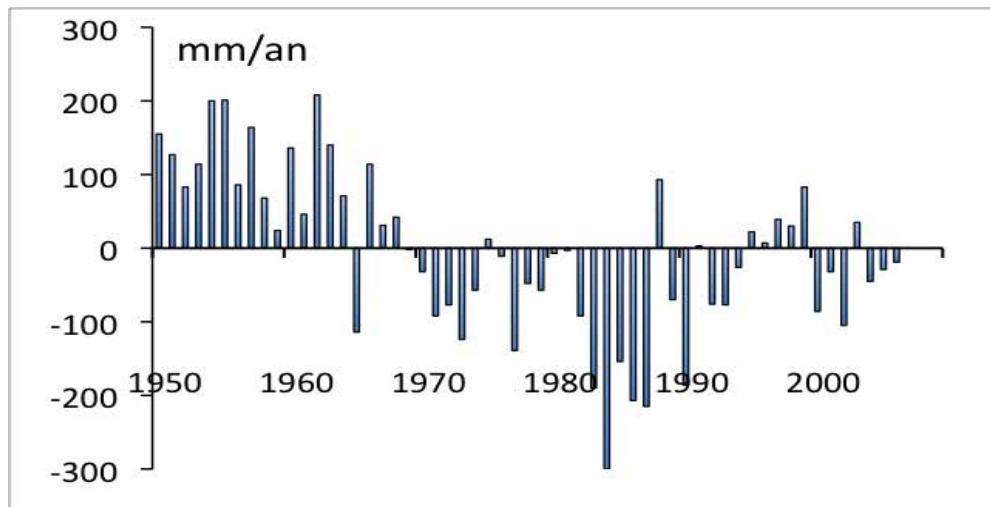


Figure 4 – Écarts à la moyenne sur la période 1950-2006 de la pluie sur le bassin du Chari-Logone. Durant cette période, la pluie moyenne sur le bassin a été de 986 mm/an (données CRU).

3. Les apports au Lac

Les bassins du Chari et de la Komadougou Yobé contribuent de façon très différente à l'alimentation du Lac du fait de leur position dans le gradient pluviométrique nord-sud de cette région de l'Afrique. En période de Moyen Tchad, la Komadougou Yobé contribue pour 0,9 % des apports totaux au Lac, tandis que le Chari en fournit 82 % (Lemoalle, 2012). Pour la période 1990-2000, l'apport moyen de la Komadougou Yobé au Lac a été d'environ 0,5 km³/an (Bader et al, 2011).

La variable principale à considérer est donc l'apport du Chari, estimé à partir des observations faites à l'échelle de N'Djaména.

Du fait des variations de la pluie sur le bassin, les apports annuels du Chari au Lac ont fortement fluctué au cours des décennies successives (voir tableau 2). Dans ce tableau, une surface d'équilibre hydrique du Lac a été calculée en se basant sur une évaporation annuelle de 2170 mm/an et considérant que les apports du Chari mesurés à N'Djaména représentent en moyenne 81 à 89 % des apports totaux selon l'état du Lac (voir plus loin dans ce chapitre). Cette surface correspond à une valeur moyenne de la surface en eau du Lac durant la décennie considérée, les surfaces maximales atteintes lors de la crue étant bien supérieures.

On a observé qu'une variation de $\pm 10\%$ de la pluie sur le bassin se traduit par une variation de même signe de $\pm 30\%$ du débit annuel du Chari, le principal tributaire du Lac (figure 5).

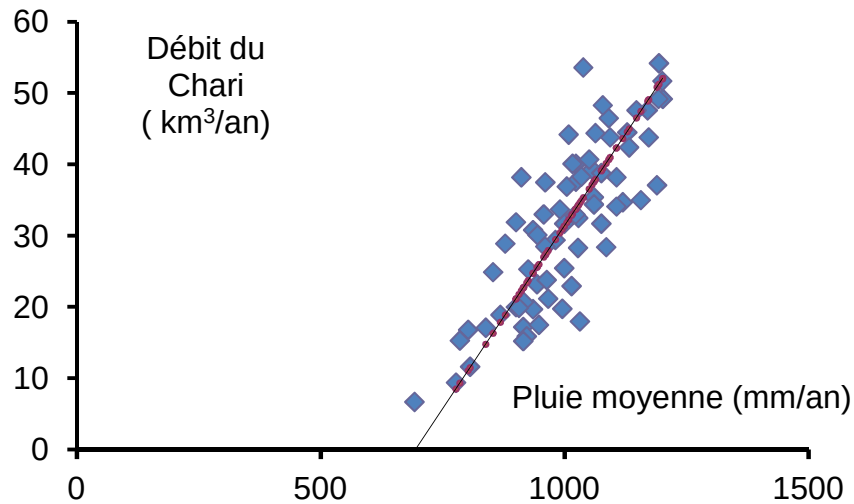


Figure 5 – Relation entre la pluie sur le bassin du Chari-Logone et le débit du fleuve. Pour une variation de 10 % de la pluie, le débit annuel du fleuve varie de 30 %.

Sources : données CRU et DREM Tchad.

Si l'on considère que les années de bonne hydraulité sont situées avant 1971 et les années sèches après 1971, les débits moyens du Chari à N'Djaména sont respectivement de 39,1 milliards de m^3 (1950-71) et de 21,8 milliards de m^3 (1972-2000 avec deux années manquantes). Le débit en période sèche est donc près de la moitié du débit annuel en période humide. À cette période de sécheresse sont associés une modification de la courbe de tarissement du Chari et des débits d'étiage plus bas.

Tableau 2 – Relation entre la pluie sur le bassin du Chari, le débit annuel moyen du fleuve et la surface en eau moyenne du Lac. Données Olivry et al 1996, DREM Tchad et CRU.

Période	Pluie bassin	Débit annuel		Superficie d'équilibre
		km ³ /an	m ³ /s	
1950 - 59	1114	42,1	1334	24 000
1960 - 69	1059	40,3	1278	22 900
1970 - 79	929	27,3	866	15 200
1980 - 89	877	17,7	561	9 200
1990 - 99	974	21,7	688	11 200
2000 - 09		21,2	672	11 000

Ces variations des apports du Chari au Lac (figure 6), qui résultent des variations de la pluie sur le bassin du Chari, sont la principale cause de la diminution de la surface et du volume du lac Tchad : la surface en eau moyenne du Lac est en effet approximativement proportionnelle au débit annuel du Chari.

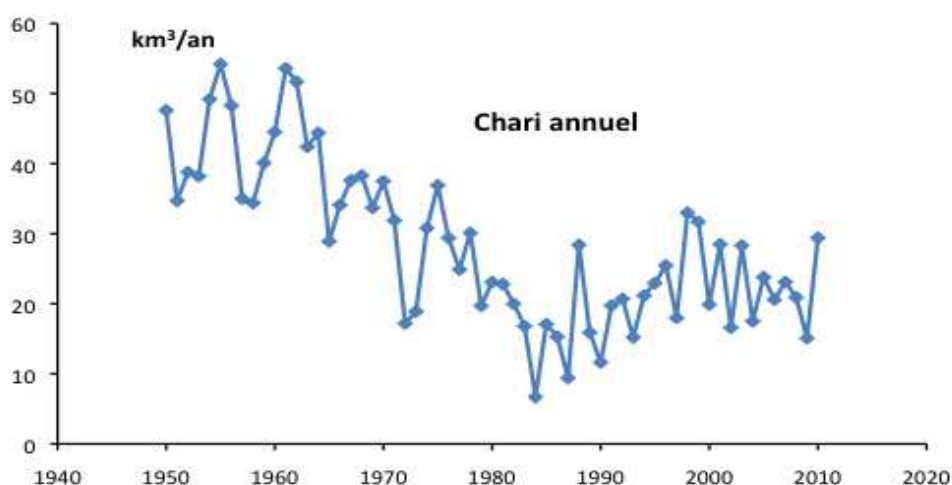


Figure 6 – Débits annuels du Chari à N'Djaména (données DREM Tchad et CBLT)

3.1. L'évapotranspiration dans le bilan hydrique du bassin

L'évaporation par les surfaces d'eau libre ou par le sol, plus l'eau transpirée par la végétation, constitue la part dominante du bilan hydrique du bassin actif du Lac. Pour le bassin du Chari-Logone, avec une pluie moyenne de 928 mm/an sur un bassin de 610 000 km², le débit moyen du Chari a été de 21,8 km³/an (période 1972-2006).

Au total, le Chari apporte donc au Lac seulement 3,8 % de l'eau qui est tombée sur son bassin, le reste étant retourné dans l'atmosphère par évapotranspiration. La quantité perdue par évapotranspiration étant relativement peu variable d'une année à l'autre, c'est la quantité d'eau qui parvient aux fleuves qui varie fortement.

3.2. L'importance de la station hydrométrique de N'Djaména TP

Le débit annuel du Chari et la pluie directe sur le Lac sont directement liés aux mouvements de l'ITCZ et varient dans le même sens. Il suffit donc de connaître le débit du Chari à N'Djaména pour estimer avec une bonne précision l'apport total en eau au Lac (eau fluviale plus pluie directe). C'est ce qui explique l'importance de bonnes mesures du débit à l'échelle de N'Djaména TP : enregistrement ou lectures quotidiennes et étalonnages effectués régulièrement sont indispensables si l'on veut comprendre ce qui se passe dans le Lac. Il faut de plus rendre les données accessibles à tous.

Le débit du Chari à N'Djaména (en aval de la confluence Chari-Logone) est mesuré depuis 1933. Son évolution récente, depuis 1950, est représentée figure 6, avec une diminution depuis le début des années 1960 et un point bas en 1984-85, année de sécheresse sévère dans toute la région durant laquelle le Chari à Chagoua, en amont de la confluence avec le Logone, a momentanément cessé de couler (mai 1985). Depuis, les débits ont légèrement augmenté, avec des années humides comme 1988, 1998 et 2012.

Ailleurs sur le bassin, l'évolution des débits a suivi le même schéma, avec une période humide suivie d'une période plus sèche dont le milieu des années 1980 a constitué le point bas.

I-1 Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad

J. Lemoalle

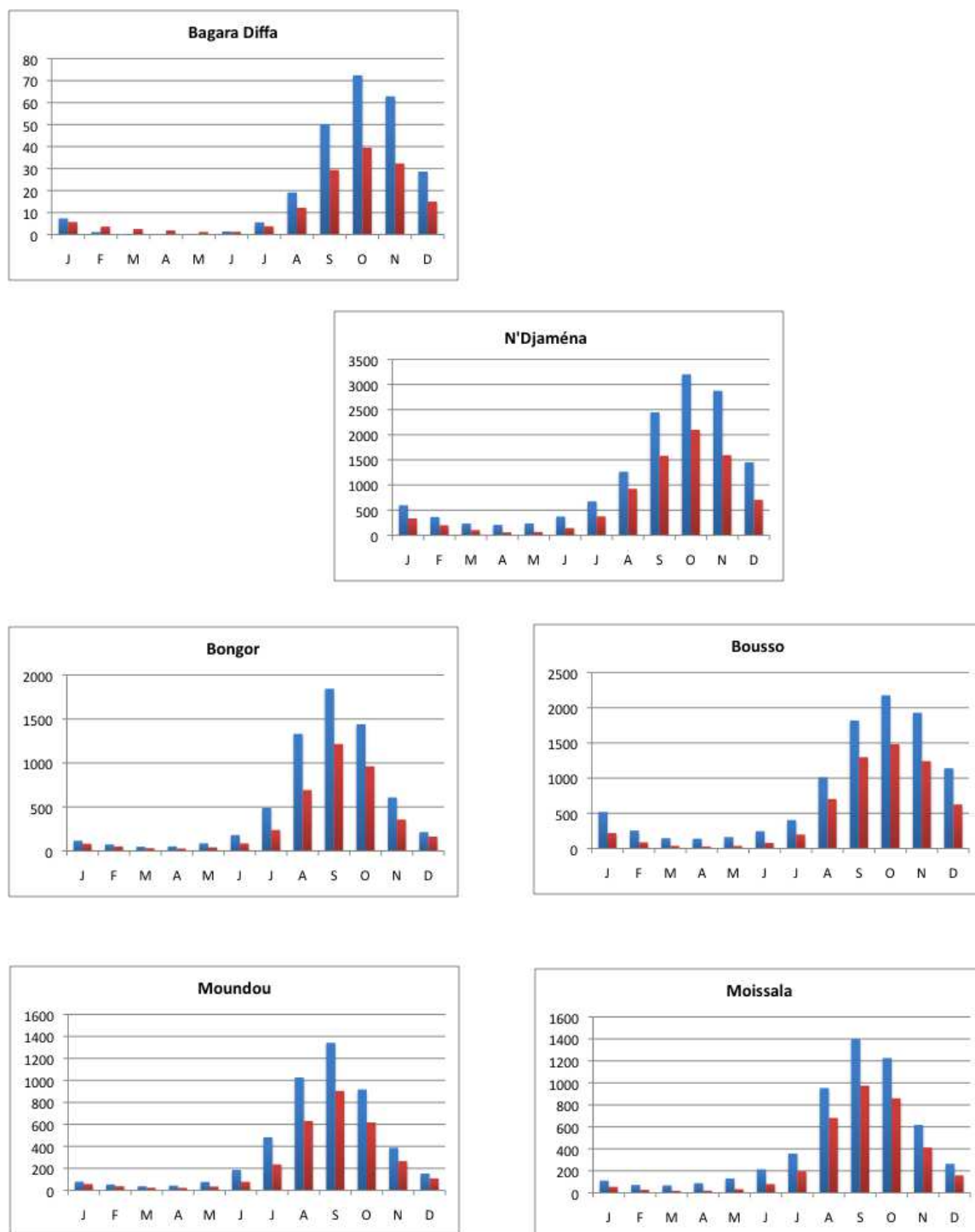


Figure 7 – Les débits mensuels moyens sur quelques stations du bassin du Lac: en bleu pour la période 1952-76 et en rouge pour 1977-2001. D'après CBLT-BRLI, 2011.

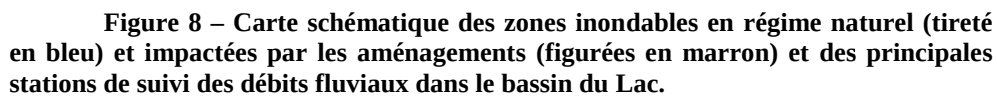
3.3. Évolution des débits fluviaux depuis 1950

La figure 7 représente les débits mensuels moyens à différentes stations du Chari, du Logone et de la Komadougou Yobé observés ou reconstitués pour les périodes 1952-76 et 1977-2005. Elle fournit plusieurs indications importantes :

- tout le bassin a été impacté par le changement du régime des pluies autour de l'année 1970. En amont du bassin comme à l'aval, l'impact de ce changement est du même ordre de grandeur. Il est donc indépendant des prélèvements pour l'irrigation (tableau 3) ;
- les étiages sont beaucoup plus bas partout, ce qui se traduit par une émergence plus grande et plus longue des bancs de sable. Il en résulte une impression d'ensablement du lit fluvial qui n'est corroborée par aucune mesure (voir chapitre I-5) ;
- les hautes eaux sont aussi beaucoup plus basses: l'inondation des plaines inondables est moins importante aussi bien en extension qu'en durée, avec des impacts sur la régénération des pâturages et sur la reproduction des poissons.

Tableau 3 – Débits moyens annuels à quelques stations importantes du bassin du Chari-Logone (m³/s, d'après CBLT-BRLI, 2011).

m³/s	N'Djaména	Bouso	Bongor	Bossangoa	Sahr
1952-1976	1159	829	540	231	288
1977-2001	683	501	332	128	127



3.4. Les zones inondables proches du lac

Les plaines d'inondation proches du Lac, comme le Grand Yaéré et la plaine inondable entre Chari et Logone, la plaine de Massénya, les zones inondables d'Hadejia-Nguru sur la Komadougou Yobé au Nigeria près de la frontière avec le Niger ou la partie aval des rivières Ngadda, Yedseram et El Beïd au Nigéria, sont presque totalement asséchées une partie de l'année. L'inondation saisonnière, de courte durée dans les zones périphériques, ne compense alors que très partiellement l'aridité du climat, ce qui implique un cycle végétatif court et une remise en fonctionnement complète de l'écosystème aquatique à chaque crue (Talling et Lemoalle, 1998).

Ces zones jouent un rôle multiple :

- dans les apports en eau au Lac : les plaines inondables représentent des surfaces évaporatoires importantes entre le mois d'août et le mois de janvier, avec environ 1 000 mm de perte par évaporation. La pluie directe sur les surfaces inondées ne compense pas cette évaporation, d'où une perte nette des apports qui a pu être quantifiée pour le Grand Yaéré et la plaine d'inondation de Massénya (tableau 4). Les services rendus par ces écosystèmes peuvent donc être mis en balance par rapport aux pertes d'eau par évaporation. Ce serait oublier les services rendus par ailleurs ;
- dans le régime hydrologique du Lac en écrêtant le pic de crue. Les volumes d'eau entrés dans les plaines inondables lors du maximum de la crue peuvent être importants (tableau 4), avec une double conséquence. D'une part le marnage saisonnier du Lac est amorti, en évitant un fort apport dans un temps limité. D'autre part, on peut considérer que le grand Yaéré et la plaine de Massénya font partie du complexe des zones inondables en amont de N'Djaména et de Kousséri, deux agglomérations importantes (au total plus d'un million d'habitants) situées au confluent du Chari et du Logone et exposées aux inondations en cas de forte crue de ces deux fleuves. En année normale, l'inondation des deux plaines contribue à écrêter la crue de 4,9 km³ au confluent, et donc limite largement les risques d'inondation des villes. La recharge des nappes phréatiques par les plaines inondées, souvent mise en avant pour justifier leur sauvegarde, ne semble pas encore démontrée ;
- dans le bilan sédimentaire du Lac, avec le piégeage d'une partie des sédiments transportés par les fleuves lorsque les eaux de crue, particulièrement riches en sédiments en suspension, entrent dans la plaine. Les deux exemples donnés dans le tableau 4 indiquent un piégeage d'environ 1,1 million de tonnes quand les apports fluviaux au Lac sont d'environ 3 millions de tonnes (Gac, 1980) ;
- dans l'écologie des ressources naturelles à la fois localement avec les possibilités de pêche, d'élevage et de culture dans la plaine inondée elle-même, mais aussi par la reproduction des poissons migrateurs dont les juvéniles regagnent le Lac après une première phase de croissance dans la zone inondée. Il est généralement estimé que la production en poissons d'une plaine inondable est proportionnelle à la surface inondée (Crul, 1992).

Tableau 4 – Bilan moyen annuel de deux plaines d'inondation (d'après Gac, 1980)

Zone		Entrée	Sortie	Bilan	Unités
Yaéré	Eau de surface	3.2	1.15	- 2,05	km ³
	Solides en suspension	897	27	- 870	10 ³ tonnes
	Substances dissoutes	185	151	- 34	10 ³ tonnes
Massenya	Eau de surface	1.7	0.8	- 0.9	km ³
	Solides en suspension	257	16	- 241	10 ³ tonnes
	Substances dissoutes	104	101	- 3	10 ³ tonnes

3.5. La part des prélèvements pour l'irrigation

Le diagnostic élaboré en préparation à la Charte de l'eau du lac Tchad (CBLT, 2011) a établi que les consommations d'eau issues de prélèvements dans le Lac, ses contributeurs ou leurs nappes alluviales sont estimées, pour 2010, à environ 2,5 km³/an répartis entre 0,5 km³ pour l'eau potable, 1,8 km³ pour l'irrigation et 0,2 km³ pour l'abreuvement du bétail. Ce bilan inclut les petits périmètres privés situés le long des cours d'eau.

Les principaux grands périmètres irrigués qui sont des préleveurs actifs ou potentiels dans le bassin sont :

- Bongor, casiers A, B, C (Tchad) ;
- Sategui Deressia (Tchad) ;
- Périmètre sucrier de Banda (Tchad) ;
- SEMRY I et II (Cameroun) ;
- Hadejia Valley Irrigation Project (Nigeria) ;
- Kano Irrigation Development Project KIDP (Nigeria) ;
- South Chad Irrigation Project SCIP et Baga Polder (Nigeria).

Les polders dans la partie tchadienne de l'archipel n'interfèrent pas dans le bilan du Lac : le volume d'eau utilisé pour irriguer les polders modernes est équivalent à celui qui serait évaporé par la surface lacustre s'il n'y avait pas de polder. Il en est de même dans les polders traditionnels ou traditionnels améliorés, où l'évapotranspiration du polder est du même ordre que l'évaporation de la surface lacustre qu'il remplace.

Ces éléments quantitatifs permettent d'aboutir au constat suivant :

- les consommations annuelles totales en eau sur le bassin du lac Tchad ont un poids relativement faible dans le bilan du Lac

- (estimation CBLT, 2011) ;
- les variations de niveau du Lac s'expliquent, au moins jusqu'en 2013, date de rédaction de ce document, essentiellement par l'aléa des précipitations ;
 - les grands périmètres riverains du Lac au Nigéria, South Chad Irrigation Project et Baga Polder, qui pourraient consommer plus de 2 km³ par an s'ils étaient pleinement opérationnels, ne sont pas fonctionnels en phase de Petit Tchad et ne contribuent donc pas à la baisse du Lac. Les chiffres de 10 km³/an pour le bassin du Chari et de 1 km³/an pour celui de la Komadougou Yobé donnés pour les prélèvements pour l'irrigation par Coe et Foley (2001) sont hors de proportion avec la réalité. Ces volumes permettraient en effet d'irriguer 550 000 hectares qui ne passeraient pas inaperçus dans le bassin.

4. Le fonctionnement hydrologique du Lac

Le bassin versant actif du lac Tchad a bénéficié d'un régime de pluies relativement abondantes au cours de la période 1950-70 qui a été suivie d'une période plus sèche de 1970 à nos jours. Un nouvel état d'équilibre du Lac s'est établi, mais peu de données de terrain ont été collectées, ce qui a conduit à un certain nombre d'interprétations erronées, notamment en ce qui concerne une éventuelle disparition du Lac. La surface de celui-ci a diminué de façon spectaculaire durant les années 1970-75, et le Lac s'est scindé en plusieurs cuvettes, ce qui rend difficile une description simple de son état. On peut néanmoins considérer que depuis 1973, le Lac est dans un état de Petit Tchad relativement stable : il ne diminue pas.

Sans préjuger de l'avenir, le fait majeur actuel est la séparation du Lac en deux cuvettes distinctes avec des fonctionnements hydrologiques différents. Cette situation a des implications importantes pour les sociétés qui vivent des ressources du Lac.

4.1. La morphométrie du Lac

Les diverses observations effectuées sur les niveaux et les surfaces en eau du Lac Tchad depuis 1953 (Bouchardeau et Lefèvre, 1957 ; Touchebeuf de Lussigny et al., 1969 ; Chouret, 1977 ; Lemoalle, 1978 ;

Olivry et al., 1996 ; Leblanc et al., 2011) permettent de définir les différents bassins qui composent le lac et leur topographie.

Deux bassins principaux peuvent être individualisés (figure 9) :

- la cuvette nord ;
- la cuvette sud, qui elle-même peut être divisée en un archipel et une zone d'eaux libres.

Les deux cuvettes sud et nord sont séparées par une zone de hauts-fonds, la Grande Barrière qui s'étend approximativement entre Baga Sola au Tchad et Baga Kawa au Nigeria. Les deux parties de la cuvette sud sont également séparées par des hauts-fonds entre eaux libres et archipel. Ces hauts-fonds constituent des seuils qui émergent lors des très basses eaux et que l'eau ne franchit que lorsqu'elle atteint un niveau suffisant, d'environ 279,3 m.

Schématiquement, la relation entre les deux grandes cuvettes peut être représentée par une coupe transversale qui explique le fonctionnement hydrologique du lac (figure 10):

La cuvette sud est alimentée par les pluies directes et par les tributaires de surface, le Chari et les rivières Ngadda, Yedseram et El Beïd. Le fond de cette cuvette, très plat dans la zone d'eau libre, est à une altitude d'environ 278,2 m.

Le seuil, vers 279 m, qui isole l'archipel de Bol est le plus souvent submergé, sauf lors d'années particulièrement déficitaires (en particulier 1973, 1985).

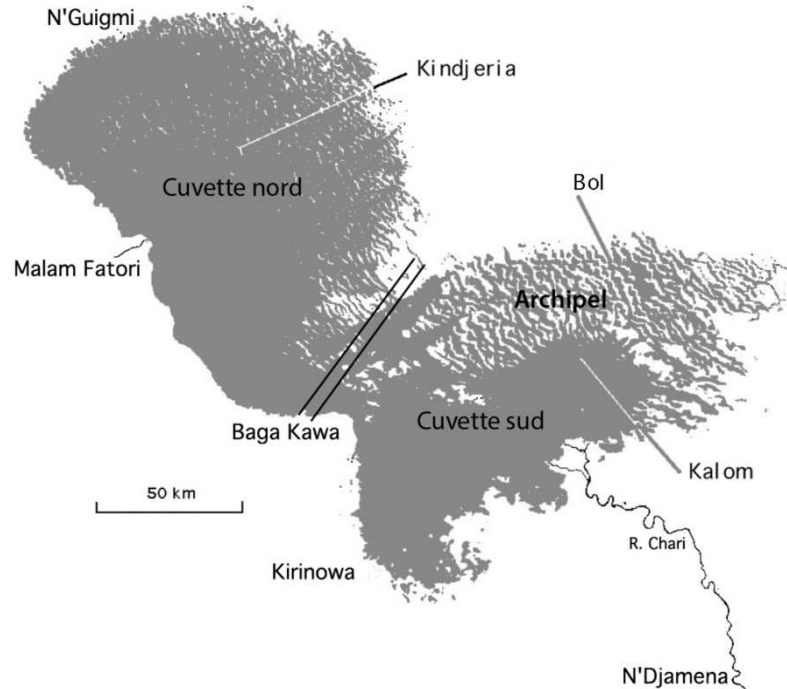


Figure 9 – Le lac Tchad à l'état de Tchad Moyen avec la Grande Barrière symbolisée par le double trait entre cuvettes sud et nord

Source : d'après une mosaïque Landsat de janvier 1973.

Le seuil constitué par la Grande Barrière a une altitude de 279,3 m environ, mais l'eau ne la traverse de façon sensible que lorsque le niveau dans la cuvette sud atteint au moins 280,5 m. La végétation de la Grande Barrière constitue donc l'équivalent d'un seuil supplémentaire de plus d'un mètre.

Le fond du centre de la cuvette nord est situé vers 275,3 m, soit environ 2,9 m plus bas que celui de la cuvette sud.

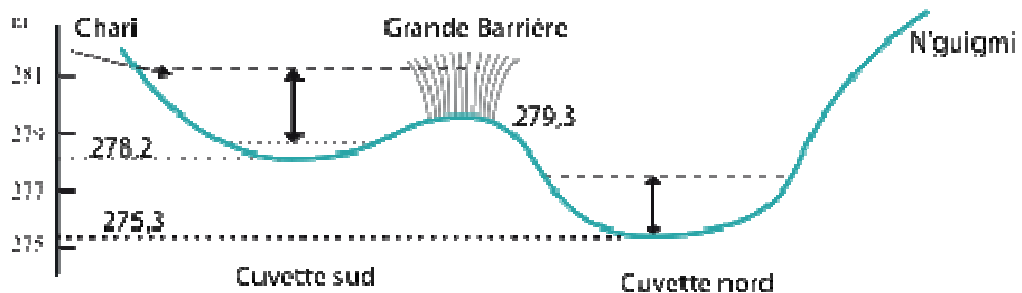


Figure 10 - Schéma simplifié d'une coupe du Lac entre le delta du Chari et N'guigmi montrant une cuvette sud qui déborde vers la cuvette nord uniquement quand les apports du Chari sont suffisants. Les flèches verticales donnent un exemple des variations du niveau au cours d'une année.

4.2. Les trois états du lac Tchad

Depuis le début du XIX^e siècle, les géographes et explorateurs européens ont décrit divers états du lac, depuis un vaste marécage jusqu'à une grande mer intérieure. Une classification en trois états principaux du Lac Tchad a été proposée par Tilho (1928), qui a en outre montré que les grandes variations du niveau de l'eau et des paysages sont directement dépendantes des variations de la pluie sur le bassin du Chari.

- Le **Grand Lac Tchad** est caractérisé par une grande surface d'eau libre à un niveau supérieur à 282,3 m, qui s'étend sur 24 000 km² bordée d'un archipel dunaire peu développé. Le Lac déborde à l'est dans le Bahr El Ghazal qui conduit vers la dépression du Bodélé située à 550 km au Nord Est et environ 120 m plus bas que le Lac. Ce stade de Grand Tchad n'est apparu que pendant de brefs épisodes durant le dernier siècle, et pour la dernière fois au milieu des années 1950 (Olivry et al., 1996).

- En période de **Moyen Tchad**, au sens de Tilho, le Lac présente pendant toute l'année un seul plan d'eau qui couvre entre 15 000 et 20 000 km² à une altitude de 280 à 282 m, avec deux grandes cuvettes, sud et nord, séparées par un étranglement. Un archipel, constitué par un erg fossile, s'enfonce progressivement dans le lac à partir du nord-est. L'archipel est prolongé vers l'intérieur du lac par des îles de végétation, appelées îlots-bancs, correspondant à des hauts fonds dunaires submergés et colonisés par des phanérogames aquatiques. Le Tchad Moyen ou Normal est caractérisé par l'étendue des zones d'eau libre, par l'espace navigable entre les îles des archipels, et par une frange limitée de végétation le long des rives (voir figure 9).

Dans cet état de Tchad Moyen, le Lac est donc formé d'un archipel bien développé et d'étendues d'eau libre couvrant 4000 à 6000 km² dans chacun des deux bassins. La variation annuelle de surface totale du lac est d'environ 2000 km² pour une variation du niveau de l'eau de 1 m autour de 281 m, avec des berges plus abruptes dans la cuvette nord. La profondeur de la zone centrale est de 5,3 m dans le bassin nord et de 2,7 m dans le bassin sud. La profondeur moyenne du Lac est respectivement de 2,1 et de 3,5 m pour des niveaux de l'eau de 280 et de 282 m (Bader et al. 2011). Ce stade de Tchad Moyen est observé quand les apports du Chari, le principal tributaire du lac, sont compris entre 34 et 43 km³/an (tableau 5).

Conséquence des variations climatiques, les phases de Moyen Tchad sont entrecoupées de phases de bas niveau. Trois phases de Petit Tchad sont intervenues depuis le début du siècle dernier, la première (1907-1917) ayant été décrite en détail par Tilho (1910). La seconde, vers 1940, n'est documentée que par tradition orale. Le dernier passage à un Petit Tchad a eu lieu en 1973 et, depuis cette date, le lac fonctionne suivant ce nouveau régime.

- Le **Petit Tchad** est constitué de plusieurs plans d'eau séparés pendant au moins une partie de l'année. Dans la cuvette sud, une surface en eau libre d'environ 1 700 km² est située devant le delta du Chari avec un niveau de l'eau de 2 279 à 281 m. Elle est entourée de vastes marécages permanents souvent oubliés dans l'estimation de la surface inondée du lac. La cuvette nord est séparée de la cuvette sud par l'exondation plus ou moins permanente de la Grande Barrière. Des marécages permanents ou saisonniers couvrent dans l'ensemble du Lac entre 2 000 à 14 000 km² (Leblanc et al., 2011).

Ce stade de Petit Tchad, caractérisé par la séparation des deux cuvettes, a lieu quand les apports annuels du Chari sont

inférieurs à 34 km³/an. La cuvette nord du Lac n'est pas alimentée quand l'apport annuel du Chari est inférieur à 15 km³/an. Elle peut alors rester totalement asséchée pendant plus d'une année, ce qui définit un état de **Petit Tchad sec** avec des répercussions écologiques et humaines importantes (Lemoalle et al., 2012).

Entre 1957 et 2008, le lac Tchad a été dans un état de Petit Tchad 69 % du temps, et dans un état de Tchad Moyen ou Grand Tchad 31 % du temps (Bader et al., 2011). Les années 1985, 1987, 1988 et 1991 correspondent à un Petit Tchad sec avec une cuvette nord sèche toute l'année. Cette cuvette a été sèche une partie de l'année en 1975, 1977, 1982, 1984, 1990, 1992, 1993 et 1994. Elle a conservé un peu d'eau toute l'année en 1989 et depuis 1995 à 2013.

Tableau 5 – Les caractéristiques principales des différents états du lac Tchad

Lac Tchad	Petit	Moyen	Grand
Apports du Chari (km ³ /an)	10 - 34	40	45
Niveau de l'eau (m)	différents niveaux	280 - 282	>282,3
Nombre de plans d'eau	plusieurs	un seul	un seul
Surface totale du lac (km ²)	2000 -15 000	15 000 - 20 000	20 000 - 25 000
Surface inondée de la cuvette nord (km ²)	0 – 8000	9000	10 000
Paysage dominant	marécages	archipel dunaire	eaux libres
Végétation aquatique	+++	++	+

4.3. Le bilan hydrique du lac

Sauf en phase de Grand Tchad, le lac n'a pas d'exutoire. Les apports par les tributaires et la pluie sont compensés par les pertes par évapotranspiration, par infiltration vers les nappes bordières et par les variations saisonnières ou annuelles de niveau et de surface. Comme les apports sont directement dépendants des pluies sur le bassin versant, le lac

est très sensible aux variations climatiques. En conditions naturelles, le lac est un amplificateur des variations de la pluie sur son bassin.

Le bilan hydrique du lac Tchad a été analysé par de nombreux auteurs (voir Olivry et al., 1996). Les valeurs moyennes des composantes du bilan pour le Tchad Moyen au cours de la période 1954-1969 sont données dans le tableau 6. L'apport principal est fourni par le Chari (81 % des apports totaux) complété par la pluie directe sur le Lac (14 % des apports totaux) et l'apport des petits tributaires, El Beïd et Komadougou Yobé (4% des apports). Les pertes sont dues principalement à l'évaporation (95,7 %) et aux infiltrations hors du Lac vers les nappes phréatiques, qui ne représentent que 4,3%. Ces infiltrations sont variables, saisonnièrement ou d'une année à l'autre selon l'évolution pluriannuelle du niveau du Lac, et suivant le point d'observation sur la rive du Lac.

Tableau 6 – Les composantes approchées du bilan hydrique en phase de Moyen Tchad et de Petit Tchad exprimées en km³/an (d'après Vuillaume, 1981; Bader et al., 2012).

Apports (km³/an)	Moyen Tchad 1954-1969	Petit Tchad 1988-2010
Chari	42,0	21,1
El Beïd	1,5	0,3
Komadougou Yobé	0,7	0,5
Pluie directe	7,4	1,9
Pertes (km³/an)		
Évaporation	48,8	22,6
Infiltration nette	2,3	1,0
Débordement	0,2	0

Le bilan hydrique du Petit Tchad est plus compliqué à quantifier du fait de l'évolution séparée des cuvettes sud et nord. Il a été ici calculé à l'aide du modèle hydrologique du Lac pour l'ensemble de la période 1988-2010 (Bader et al., 2011).

La relation observée entre débit du fleuve et pluie sur le bassin du Chari, illustrée figure 5, indique que pour une variation de la pluie sur le bassin de 10 %, le débit du fleuve varie de près de 30 %. La surface en eau du Lac étant approximativement proportionnelle aux apports du Chari, le Lac est donc très sensible aux variations de la pluie. Son état actuel de Petit Tchad résulte du changement du régime des pluies qui s'est produit sur le bassin autour du début des années 1970.

4.4. Le fonctionnement hydrologique : pourquoi le Petit Tchad ?

Supposons un lac fermé dont le bilan hydrique est constitué des apports d'un fleuve Q et des pertes par évaporation. La tranche d'eau perdue par l'évaporation en une année a pour épaisseur E (l'évaporation annuelle) et pour surface S (la surface du lac), donc un volume $S \times E$. Le lac ne change pas de niveau ou de surface si les apports égalent les pertes $Q = S \times E$. Selon que les apports sont inférieurs ou supérieurs à cette valeur d'équilibre, la surface et le volume du lac diminuent ou augmentent.

Dans la réalité, l'évolution interannuelle du Lac dépend du bilan entre les apports (fleuves, pluies) et les pertes (évaporation, infiltrations), mais le schéma de fonctionnement demeure le même. Un équilibre transitoire entre apports en eau et surface du Lac peut être évalué avec les exemples suivants.

Avec une évaporation de l'ordre de 2,2 m par an, la surface moyenne en eau du Lac en équilibre avec les apports serait d'environ 18 000 km² et de 13 600 km² pour des apports respectivement de 40 et de 30 km³/an. Les niveaux correspondants à ces deux surfaces sont respectivement au-dessus et au-dessous des seuils séparant les cuvettes. On a donc dans le premier cas une nappe d'eau unique pour l'ensemble du Lac et dans le deuxième cas un état de Petit Tchad avec des seuils temporairement émergés séparant les cuvettes.

Nous avons vu qu'en première approximation, les apports annuels du Chari mesurés à N'Djaména peuvent être considérés comme un bon indicateur des apports totaux. La relation entre ces apports du Chari et les différentes situations lacustres est examinée ci-dessous pour la période de Petit Tchad.

A partir d'un niveau très bas des eaux de la cuvette sud (cas de l'étiage de juillet 1973), les eaux de crue du Chari contribuent successivement :

- à relever le niveau de la cuvette sud ;
- à alimenter l'archipel de Bol par-dessus le seuil des îlots-bancs ;
- à alimenter la cuvette nord par-dessus ou à travers la Grande Barrière.

Ces trois processus se produisent successivement à condition que les apports soient suffisants :

- si l'apport annuel du Chari est inférieur à 15 km³, l'archipel est partiellement inondé mais la cuvette nord n'est pas alimentée. Elle finit de s'assécher si la crue précédente l'a abondamment alimentée, ou reste sèche si la crue précédente a été faible ;
- si l'apport annuel du Chari est compris entre 15 et 34 km³, le niveau dans la cuvette sud dépasse les seuils et la cuvette nord est plus ou moins alimentée. Suivant l'importance de la crue du fleuve, l'eau traverse la Grande Barrière en décembre ou janvier, et le maximum de l'extension de l'inondation se produit entre février et fin mars. Avec un apport du Chari de 30 à 32 km³, l'eau atteint ou dépasse Léléwa en direction de N'guigmi.
- Après la crue, les pertes par évaporation et infiltration dépassent les apports, le niveau baisse et les seuils séparant les cuvettes peuvent s'exonder. Dans la cuvette nord dès lors très peu alimentée, le niveau peut baisser jusqu'à l'assèchement complet ;
- si l'apport du Chari excède 34 km³, une situation de Moyen Tchad peut se rétablir et se maintenir.

Rappelons l'effet de seuil créé par la végétation de la Grande Barrière : une modification de cette végétation, soit naturelle soit du fait de l'action humaine, se répercuterait nettement sur les échanges entre les deux cuvettes et donc sur leurs niveaux (voir plus loin dans la discussion du modèle hydrologique).

En ce qui concerne la cuvette sud (eaux libres, marécages et archipel), le cycle hydrologique est assez bien reproductible d'une année sur l'autre, la différence entre les hautes eaux d'une année d'apports déficitaires (9,4 km³ en 1987-88 par exemple) et une année proche de la normale (36,9 km³ en 1975-76) étant de l'ordre de 1 m.

Dans l'état actuel de Petit Tchad, cette reproductibilité ne s'applique cependant pas également aux deux cuvettes sud et nord. Les trop-pleins de la cuvette sud, quand ils existent, inondent plus ou moins la cuvette nord, et pour des durées variables. C'est dans cette cuvette nord que se trouve reportée la variabilité classiquement associée à l'ensemble du Lac.

Les surfaces de marnage (découvertes par la baisse de niveau entre niveau maximal de crue et minimal annuel suivant) dans les deux cuvettes constituent de grandes surfaces de terres riches pour les cultures et l'élevage. Une évaluation de ces surfaces de marnage en fonction du débit du Chari indique qu'elles sont assez peu variables dans la cuvette sud au sens large (cuvette sud et archipel) mais elles présentent un maximum dans la cuvette nord pour un apport du Chari de l'ordre de 22 km³/an. Pour l'ensemble du Lac, ces surfaces disponibles pour l'élevage et les cultures sont donc plus importantes en phase de Petit Tchad (apports de 22 km³/an) qu'en phase de Moyen Tchad (apports de 40 km³/an) (figure 11).

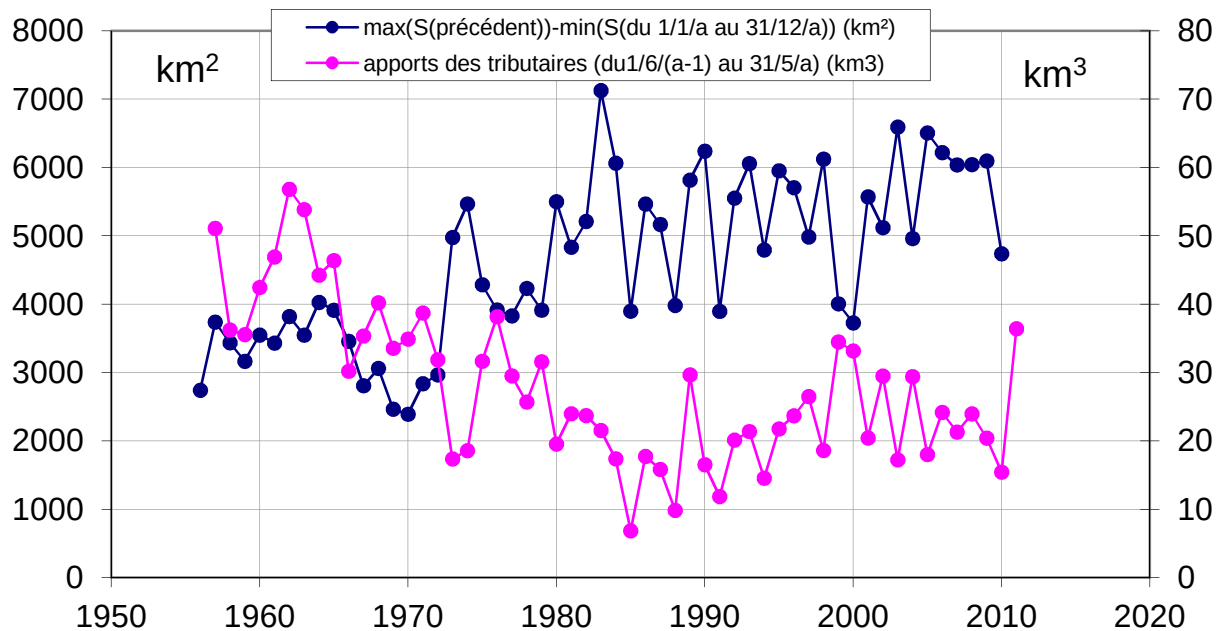


Figure 11 – Les surfaces de marnage (km², courbe bleue) dans le Lac augmentent quand le Lac passe à l'état de Petit Tchad avec des apports annuels au Lac qui diminuent (km³/an, courbe rouge).

Source : Lemoalle et al., 2012.

4.5. Le modèle hydrologique du Lac

Une nouvelle version de modèle hydrologique du Lac a été récemment mise au point (Bader et al., 2011) après celle de Vuillaume (1981) pour un Moyen Tchad et les modèles corrélatoires de Lemoalle (1991) et Leblanc et al. (2011) pour le Petit Tchad.

Le modèle hydrologique du lac Tchad a été développé pour pallier le manque de données observées, d'une part, et, d'autre part, pour répondre à la question "que se passerait-il si..." les apports au Lac se trouvaient modifiés du fait d'un changement dans le régime des pluies sur son bassin ou d'activités humaines comme des prélèvements pour l'irrigation ou des transferts interbassins. Le modèle hydrologique du Lac a été ensuite couplé avec un modèle de bassin (CBLT-BRLI, 2011).

4.5.1. Les données de terrain

Les observations de terrain concernant les variations du niveau et de surface en eau du Lac au cours des années récentes sont peu nombreuses. Elles sont insuffisantes pour rendre compte de l'évolution du Lac depuis son

passage à l'état de Petit Tchad en mars 1973. C'est pourquoi nous avons dû avoir recours à la modélisation pour reconstituer les niveaux passés. Certaines données des satellites altimétriques ont également été utilisées.

La description ci-dessous est un résumé des données disponibles.

- Les relevés quotidiens effectués à Bol couvrent la période 1956-2008 à l'exception des années 1981 et 1982 (Olivry *et al.*, 1996 ; DREM du Tchad). C'est la série la plus complète.

- Le niveau dans le centre de la cuvette sud est décrit par deux séries d'observations, à Kalom et Kirinowa (figure 2) pour la période 1973-1984. Une autre série de valeurs décrivant le niveau dans la cuvette sud provient de mesures altimétriques réalisées par les satellites Topex Poseidon et Envisat depuis 1992 (Crétaux & Birkett, 2006).

- Il n'y a pas de données pour la cuvette nord depuis 1976.

- La superficie du plan d'eau de la cuvette nord (S_n) est décrite par les valeurs publiées par Leblanc *et al.* (2011), obtenues à partir d'images Météosat sur la période de mai 1986 à mai 2001.

Ces données ont été utilisées pour calibrer et valider le modèle hydrologique du Lac décrit par Bader *et al.* (2011) dont les résultats pour la période de 1973-2011 sont présentés plus bas (voir notamment les figures 13 et 14).

4.5.2. Description du modèle hydrologique

Le lac Tchad est modélisé par un bilan de volumes donnant les niveaux et superficies de plans d'eau en fonction d'apports et pertes : débit des tributaires, pluie directe, évaporation, infiltration. Le Lac est représenté par trois réservoirs (cuvette nord, archipel de la cuvette sud et cuvette sud) dont les niveaux, distincts en situation de Petit Tchad, sont identiques en période de Moyen Tchad) (figure 12). Le modèle est discrétisé à un pas de temps journalier.

La cuvette nord comprend un "réservoir sol", une certaine épaisseur de sédiment devant être imbibée d'eau pour que celle-ci puisse apparaître en surface. En février 2004, pendant la phase annuelle de remplissage du lac, alors que la cuvette sud débordait vers la cuvette nord, nous avons observé une montée assez rapide de l'eau dans une dépression isolée au milieu d'une zone encore asséchée de la cuvette nord. Dans des circonstances analogues, Tilho (1909-1910) avait observé le 6 février 1908 le même phénomène. Ceci traduit un stockage d'eau rapide dans le sol, susceptible d'absorber une part non négligeable des apports avant qu'une lame d'eau ne recouvre le sol initialement sec

Le modèle utilise sept paramètres optimisés : intensité d'infiltration ; profondeur du « réservoir sol » ; quatre paramètres d'échange entre réservoirs ; niveau de fond de l'archipel. Grâce aux données mesurées au sol ou par satellite (débits, précipitations, évaporation, niveaux et superficie de plans d'eau), il est calé sur la période 1970-1996 et validé sur la période 1956-2008.

Les observations de plan d'eau (niveau sur l'archipel et superficie sur la cuvette nord) sont correctement reproduites (coefficient de Nash de 0,8 sur la période 1985-2003).

Les nombreuses images des satellites d'observation de la terre, qui permettent une appréciation visuelle des surfaces en eau du Lac, concordent avec les résultats du modèle (USGS, 2013).

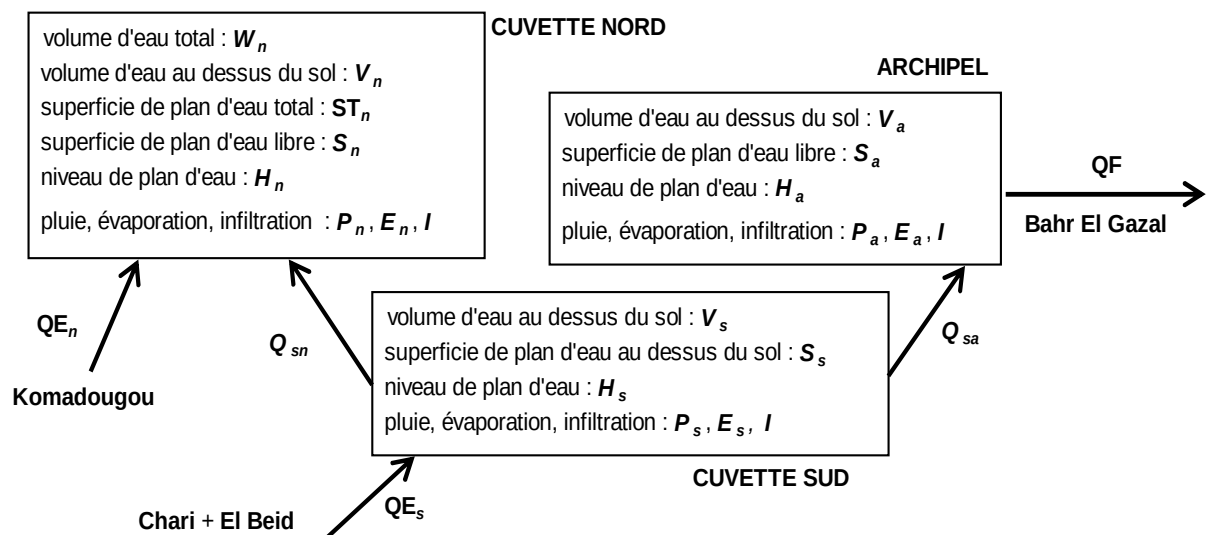


Figure 12 – Schéma conceptuel du modèle lacustre : trois bassins sont alimentés par la pluie, par les fleuves ou le débordement de la cuvette sud. Ils sont caractérisés par un niveau de l'eau, un volume et une surface en eau

Source : Bader et al, 2011.

4.6. Les variations récentes de niveau et de surface du lac Tchad

On a observé que dès l'émergence de la Grande Barrière en mars 1973, le niveau de la cuvette nord évolue indépendamment de celui de la cuvette sud avec une baisse rapide dans un premier temps (figure 13).

Contrairement à ce qui est fait le plus souvent, le Lac ne peut donc être caractérisé par une seule valeur de son niveau. Il y a deux lacs distincts connectés de façon intermittente.

Au cours des années 1980, la cuvette nord est souvent à sec, parfois pendant plus d'une année. Sa surface en eau varie entre 0 et 6 000 km². Dans la cuvette sud, dont le niveau moyen varie assez peu, le marnage est le plus souvent supérieur à 1,5 m, ce qui procure de grandes surfaces pour les cultures (figure 13).

En relation avec l'assèchement de la cuvette nord dans les années 1980, la surface totale du Lac a connu des valeurs basses durant cette période, particulièrement au cours des basses eaux annuelles, avec des minimums inférieurs à 2000 km².

De 1990 à 2013, la surface totale moyenne du Lac a été de l'ordre de 8000 km² (figure 14).

Une carte récente est proposée figure 18, représentant le Lac en avril-mai 2013 lors d'une des plus grandes crues lacustres observées depuis son passage à l'état de Petit Tchad. La surface totale en eau correspondante a été estimée à 14800 km². Elle a été à nouveau du même ordre en 2014 après la crue du Chari de 2013.

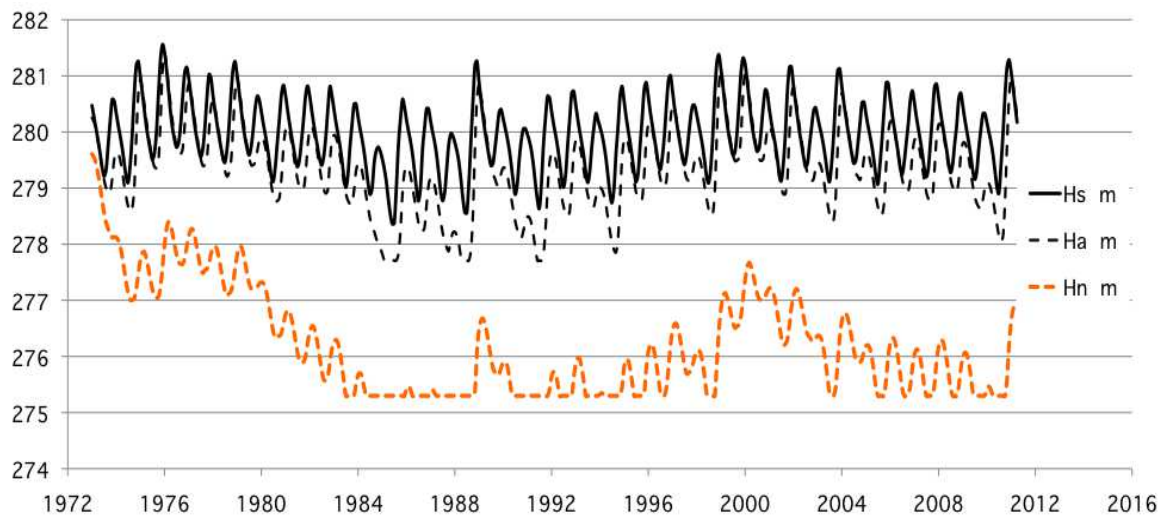


Figure 13 – Les variations du niveau dans la cuvette sud (Hs) dans l'archipel de la cuvette sud (Ha) et dans la cuvette nord (Hn) au cours de la période récente depuis le passage à l'état de Petit Tchad en 1973.

Sources : données issues du modèle hydrologique (Bader et al., 2011 et CBLT-BRLI, 2011).

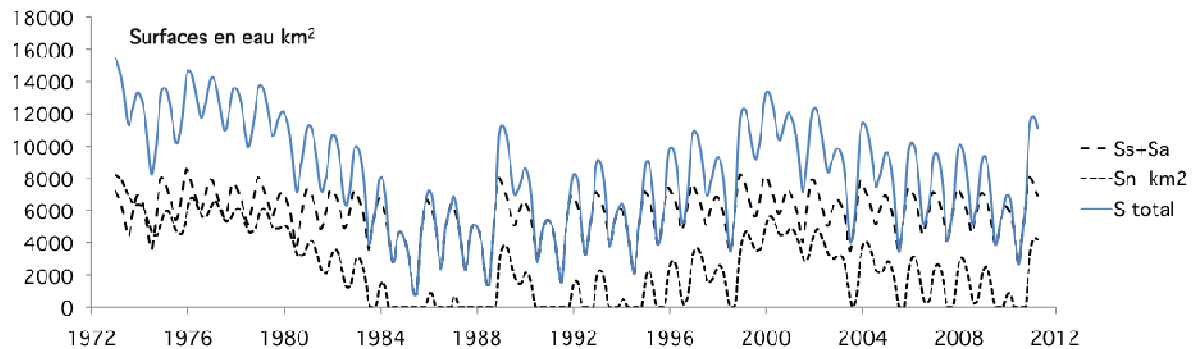


Figure 14 – Les variations de surface en eau du lac Tchad depuis son passage à l'état de Petit Tchad : surface de la cuvette sud entière (Ss+Sa), de la cuvette nord (Sn) et surface totale (Stotal).

Sources : données issues du modèle hydrologique (Bader et al., 2011, et CBLT-BRLI, 2011).

Le modèle hydrologique, utilisant les informations diverses disponibles, a ainsi permis de reconstituer l'évolution du Lac depuis son passage à l'état de Petit Tchad. Plus généralement, le modèle hydrologique de la CBLT (CBLT-BRLI, 2011) de l'ensemble du bassin, couplant le bassin versant et le Lac, permet d'aborder des questions de gestion et d'aménagement des ressources en eau (voir plus loin dans ce chapitre).

4.7. Le modèle hydrologique du bassin GIRE/CBLT/UE

Un modèle de bassin est un des outils fondamentaux pour une GIRE effective, pouvant alimenter les États membres en analyses fiables et utilisables pour des recommandations opérationnelles.

Le modèle GIRE/CBLT/UE de planification pour la gestion de l'eau sur le bassin du lac Tchad (CBLT-BRLI, 2011) est composé de trois ensembles :

- un modèle GR2M de relation pluie-débit utilisé pour obtenir des séries complètes de débits naturels ;
- un modèle développé sous WEAP (Stockholm Environment Institute, Boston, USA) qui permet de gérer l'allocation des ressources en eau sur le bassin fluvial du Lac ;
- un modèle IRD de fonctionnement hydrologique du Lac.

La période d'étude est 1950-2007, au pas de temps mensuel. Les données hydrométéorologiques utilisées en entrée du modèle proviennent de la base de données de la CBLT, qui a été continuellement enrichie par les projets CBLT/BGR, CBLT/GIZ/AHT et PAGIRE/CBLT/UE.

La difficulté du calage du modèle de planification est liée au fait que des phénomènes hydrauliques complexes ont lieu sur le bassin et n'ont pas été suffisamment observés/analysés par le passé :

- a) propagation et effet retard le long du fleuve ;
- b) débordement dans le lit majeur ;
- c) défluviation ;
- d) inondation ;
- e) prélèvements ;
- f) infiltrations ;
- g) règles de gestion de réservoirs.

L'utilisation du modèle a porté dans un premier temps sur l'élaboration de douze scénarios de gestion des ressources en eau sur le bassin du lac Tchad :

- scénario de référence, 58 années prenant en compte la gestion actuelle (2011) des ressources en eau ;
- scénario irrigation de référence avec une hausse de l'irrigation (54 000 ha de contre-saison et 50 000 ha d'hivernage) ;
- divers scénarios de transfert analysés dans le rapport CIMA sur la faisabilité des transferts Oubangui-Tchad, avec ou sans irrigation ;
- scénario irrigation et débits environnementaux pour satisfaire des débits environnementaux conformes à la Charte de l'eau en certains points de référence.

Les résultats des simulations pour les différents scénarios portent sur le lac Tchad (superficie totale, niveaux de l'eau dans les deux cuvettes, état du Lac) et les débits en certains points de référence du bassin dans les fleuves, dans les plaines inondables, pour l'irrigation.

Le développement du modèle dans le futur se fera par le personnel formé de la CBLT en fonction de l'acquisition de nouvelles données et des questions qui se poseront.

4.8. Le Lac de 1960 et le Petit Tchad des années 1990-2010 : les services rendus par l'écosystème

Une des questions qui se posent quant à la gestion du lac Tchad est celle de la situation hydrologique du Lac qui rendrait le plus de services aux populations qui vivent directement de ses ressources ou qui bénéficient de sa productivité. Nous proposons ici une description du Moyen Tchad du début des années 1960 et du Petit Tchad tel qu'il a été observé vers 2010, après la décennie 1980 durant laquelle la cuvette nord a été asséchée assez régulièrement.

1960 - Le souvenir et l'image qui restent du Lac dans le début des années 1960 correspondent à un Moyen lac Tchad, avec une abondance d'eau aussi bien dans le Lac que dans la région sahélienne avoisinante avec les principales caractéristiques suivantes :

- un Moyen lac Tchad dont la surface en eau est de l'ordre de 20 000 km², avec un archipel dunaire bien marqué, séparé des eaux libres par une frange d'îlots-bancs ;
- une pluviométrie encore relativement abondante permettant la culture pluviale sur dune jusqu'à la latitude de N'guigmi et des prairies à forte capacité d'accueil, notamment dans le Kanem ;
- des bons rendements de la pêche malgré une technicité encore rudimentaire (avant la généralisation des filets en nylon), un nombre de pêcheurs encore faible et un accès limité aux eaux libres pour les petites pirogues ;
- des troupeaux migrant entre prairies dunaires et îlots-bancs sans rupture d'alimentation ;
- un accès aux ressources sans conflits notables du fait d'une densité de population encore faible.

La situation globale est celle d'une pression humaine relativement faible sur des ressources abondantes dues à une pluviométrie supérieure à la moyenne sur le long terme.

Si on peut considérer que la densité de la population dans le lac Tchad et sa périphérie immédiate a connu une croissance de l'ordre de 3 % par an du fait de la natalité locale, augmentée par un afflux de populations voisines lors des épisodes de sécheresse, la population en 1960 était environ cinq fois moins importante que celle de 2010.

2010 - Deux faits majeurs sont à prendre en compte : la pression humaine sur les ressources naturelles et l'état de Petit Tchad qui se traduisent par les variables suivantes :

- un Petit Tchad avec dans la cuvette nord des grandes surfaces de marnage mais un risque d'assèchement complet certaines années, et dans la cuvette sud de grandes zones régulièrement accessibles à la culture de décrue et à l'élevage ;
- des pluies moins abondantes sur le Lac et sa périphérie, qui limitent les possibilités de culture pluviale et de pâturage hors de la zone lacustre ;
- des prises importantes de poisson avec un risque de surexploitation, et des rendements par pêcheur probablement moindres, ce qui se traduit néanmoins par des captures totales en moyenne un peu supérieures ;
- une compétition pour l'espace et l'accès à la ressource et à l'eau pour les cultures et l'élevage.

Au total, deux situations contrastées du point de vue des ressources. Il faut cependant constater qu'il était difficile d'imaginer, en 1960, que le Lac pourrait fournir un jour la subsistance d'une population environ cinq fois plus importante. Les surfaces accessibles pour la culture et l'élevage lors de la décrue annuelle du Lac actuel, de même que la forte productivité en poissons de la cuvette nord, figurent manifestement parmi les variables qui ont permis cette évolution.

4.9. L'utilisation du modèle pour l'étude de scénarios

Le modèle a été utilisé dans l'étude de faisabilité du transfert inter-bassin Oubangui-Tchad (CIMA International, 2011). Nous l'avons aussi appliqué pour étudier dans quelle mesure un aménagement de la Grande Barrière peut influencer sur les niveaux respectifs des deux cuvettes du Lac.

4.9.1. Simulation d'un transfert interbassin

L'étude de faisabilité d'un transfert d'eau de l'Oubangui au Lac Tchad a conclu sur la faisabilité technique d'un transfert recommandé de 3,4 km³/an à partir du barrage de Bria (CIMA International, 2011). Une autre hypothèse comporte un transfert supplémentaire à partir du barrage de Palambo (scénario T4) dont les effets cumulés sur le débit du Chari sont évalués ci-dessous.

Les simulations présentées ci-dessous portent sur le débit du Chari à N'Djaména et le niveau de la cuvette nord.

La figure 15 représente un échantillon des calculs effectués sur l'apport du Chari au Lac : le flux naturel (Chari plus El Beïd) est peu modifié par un apport supplémentaire de $6,2 \text{ km}^3/\text{an}$ (scénario T4, transfert par deux barrages). Pour des apports en phase de Petit Tchad, tels qu'observés entre 2005 et 2011, le débit d'étiage et les pointes de crue sont légèrement augmentés mais n'atteignent pas les débits observés en période de Moyen Tchad.

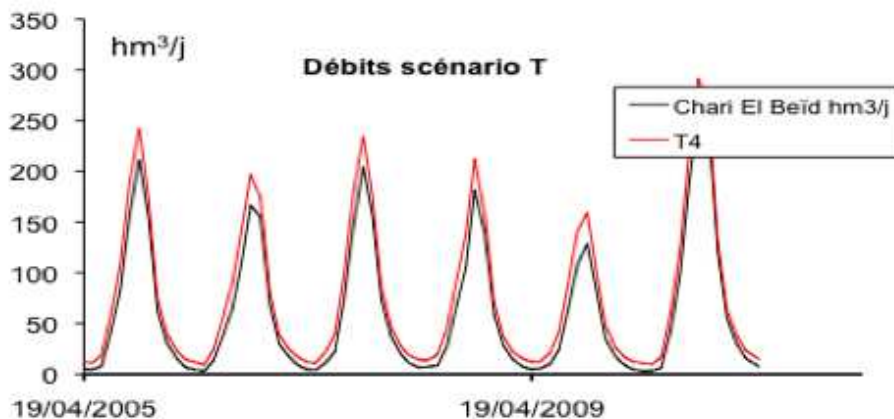


Figure 15 – Simulation du débit du Chari avec un transfert de $6,2 \text{ km}^3/\text{an}$ (courbe rouge) en comparaison de l'apport naturel du fleuve au Lac pour la période 2005-2011 (courbe en noir).

L'impact du transfert conseillé (barrage de Bria seul, $3,4 \text{ km}^3/\text{an}$) sur le niveau de l'eau dans la cuvette nord du Lac est représenté figure 16 pour la période 1980-2012. L'effet le plus notable du transfert est la diminution des phases d'assèchement de la cuvette nord : celle-ci s'assèche moins souvent pendant une année complète (moins d'état de Petit Tchad sec) et les assèchements temporaires, également plus rares, disparaissent quasiment après 1995. Pour la période 1995-2012, le Lac reçoit plus d'eau que nécessaire pour fonctionner en Petit Tchad avec de bonnes ressources, et il est possible d'utiliser une partie de la ressource en eau pour l'irrigation dans le bassin.

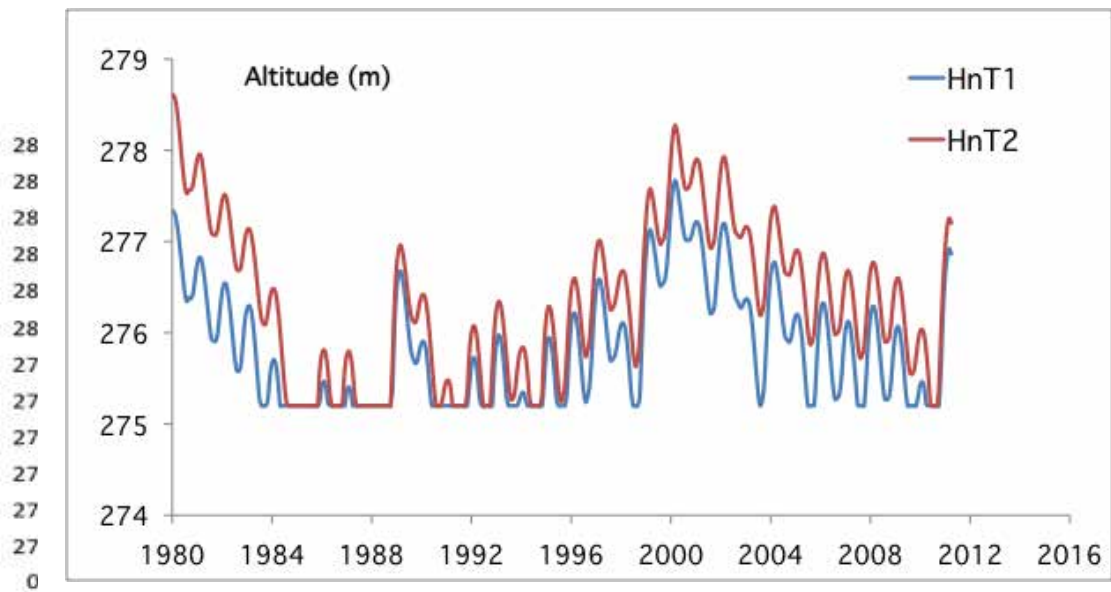


Figure 16 – Le niveau naturel reconstitué (en bleu, scénario HnT1) et le niveau simulé de la cuvette nord du Lac avec un apport supplémentaire de 3,4 km³/an (en rouge, scénario HnT2).

4.9.2. Simulation de travaux sur la Grande Barrière

Cette deuxième utilisation du modèle analyse les modifications que pourrait entraîner sur le lac Tchad une modification de la Grande Barrière séparant ses cuvettes sud et nord. Parmi les différents scénarios envisagés, nous donnons ici l'impact de deux types de travaux: d'une part une élimination de la végétation sur toute la surface de la Grande Barrière, d'autre part un chenal de 500 m de large creusé à travers la Grande Barrière avec un fond à l'altitude 277,8 m. Entre ces exemples extrêmes et l'état naturel actuel, on peut imaginer des travaux d'importance intermédiaire avec des impacts également intermédiaires mais mieux ciblés.

Les impacts des aménagements augmentent avec l'importance des travaux et sont évidemment plus marqués en période de Petit Tchad qu'en période de Moyen Tchad. Ils sont caractérisés par une augmentation du niveau de l'eau dans la cuvette nord et une diminution dans la cuvette sud et dans son archipel.

SIMULATIONS EFFECTUEES :

Le modèle est appliqué sur la période de janvier 1956 à décembre 2010 et sur trois scénarios:

- État "actuel": seuil de la Grande Barrière à 279 m et largeur du chenal = 0 ;
- Absence de végétation sur toute la Grande Barrière ;
- Présence d'un chenal de 500 m de large, surcreusé à une altitude de 277,8 m.

RESULTATS OBTENUS :

L'analyse des résultats concerne pour chaque cuvette le niveau minimal et maximal ainsi que la surface découverte par la décrue annuelle.

En période de Moyen Tchad, le niveau de plan d'eau est quasi-uniforme sur l'ensemble du lac (figure 17), indépendamment de la configuration envisagée pour la Grande Barrière.

En phase de Petit Tchad avec une Grande Barrière sans végétation, le niveau maximal annuel est abaissé en moyenne de 1,2 m dans la cuvette sud et rehaussé en moyenne de 1,8 m dans la cuvette nord (figure 17). Par contre, on observe un abaissement moyen de 2 m du niveau maximal annuel et un assèchement quasi-permanent de l'archipel de Bol.

En phase de Petit Tchad avec un canal surcreusé de 500 m de large, les niveaux sont encore fortement modifiés, mais de façon un peu moins marquée. Le niveau de plan d'eau de la cuvette nord est peu différent du schéma précédent, dans la cuvette sud le marnage est particulièrement important. L'archipel de Bol s'assèche fréquemment mais peu de temps pendant l'étiage et se retrouve inondé chaque année pendant la crue.

Les résultats suivants sont obtenus pour les superficies exondées chaque année :

- En période de Moyen Tchad, les effets des aménagements sont négligeables.
- En période de Petit Tchad, l'ouverture de la Grande Barrière sur toute sa longueur par suppression de la végétation fait diminuer la superficie exondée annuellement d'environ 5 % presque chaque année par rapport à la configuration actuelle. Cette diminution s'explique en partie par l'assèchement quasi-permanent de l'archipel qu'on observe dans ce cas.
- Un chenal surcreusé de 500 m de large entraîne une augmentation de 27 % de la surface moyenne de terres exondées chaque année par l'évolution cyclique du Lac en période de faibles apports. Avec un

tel chenal, la superficie exondée annuelle dépasse 5000 km² presque chaque année en période de Petit Tchad.

La simulation hydrologique indique donc que des travaux sur la Grande Barrière permettent de modifier les niveaux et les surfaces de marnage dans les différents compartiments du Lac. Il est possible de rechercher l'aménagement nécessaire si des objectifs précis de niveau et de marnage sont définis.

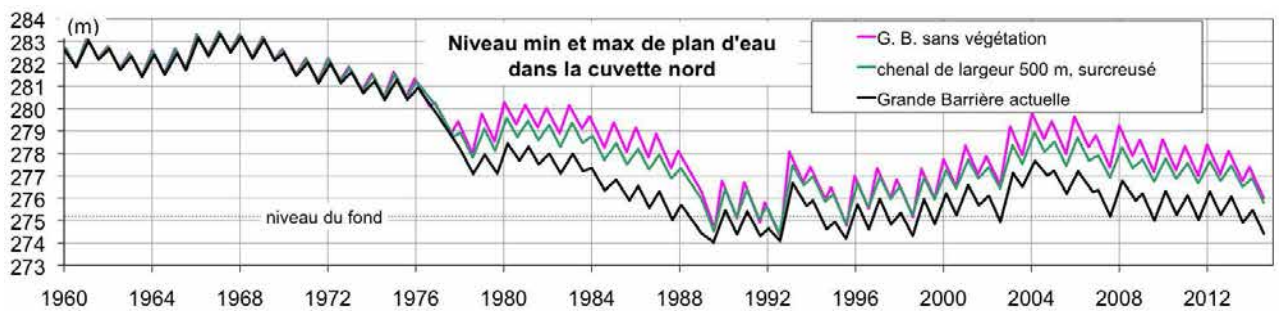


Figure 17 – Impact simulés sur le niveau de l'eau dans la cuvette nord de travaux modifiant la Grande Barrière.

Conclusion

Les modèles de simulation récemment développés ont été transférés à la CBLT qui peut les utiliser pour tester des scénarios. Leur première utilisation a été la reconstitution des niveaux et surfaces en eau du Lac pour toute la période pendant laquelle les observations de terrain manquaient. Malgré le peu de données, nous disposons donc aujourd'hui, avec une approximation convenable, de l'historique récente du lac, qui est dans une phase de Petit Tchad depuis 1973, sans tendance à l'assèchement. Les mesures de débit du Chari à N'Djaména sont indispensables pour le suivi du Lac. Elles doivent être utilisées pour un système d'alerte précoce de la crue lacustre pour les populations vivant des ressources du Lac.

Le fonctionnement hydrologique actuel, à l'état de Petit Tchad, résulte d'une diminution des pluies sur le bassin versant au début des années 1970. La variabilité de ces pluies est amplifiée par les fleuves puis par le Lac, ce qui fait que des modifications modestes de la pluie se traduisent par des variations importantes du Lac. La situation des années 1950-1960 peut être considérée comme humide par rapport à la moyenne depuis 1900, et la période depuis 1990 comme proche de la moyenne sur le siècle.

Compte tenu de l'imprécision des modèles existants sur le changement climatique, particulièrement pour cette région de l'Afrique, il n'est pas possible de faire des prévisions sur l'hydrologie du Lac. Les scénarios de prospective doivent donc envisager plusieurs évolutions possibles.

La phase actuelle depuis 1990, avec les grandes surfaces découvertes dans les deux cuvettes lors de la décrue annuelle du Lac, offre des ressources naturelles importantes pour la culture et l'élevage. Un transfert interbassin de $3,4 \text{ km}^3/\text{an}$, tel qu'envisagé dans l'étude CIMA (2011) aurait pour principale utilité de réduire la probabilité d'un assèchement durable de la cuvette nord en cas d'un retour d'un climat plus sec comme observé entre 1973 et 1990.

Recommandations

Recommandations stratégiques

Les données présentées ci-dessus donnent maintenant une image assez précise sur l'état du Lac et son évolution récente. Elles fournissent une base pour un discours concerté et cohérent au sein de la CBLT et en dehors.

Après une période de crise dans les années 1980 durant laquelle la cuvette nord a été asséchée au cours d'années entières, avec de forts impacts sur les ressources et les populations, l'hydrologie actuelle est propice à des activités diversifiées dans l'ensemble du Lac.

Recommandations opérationnelles

Le modèle de simulation hydrologique installé à la CBLT est un instrument d'aide à la décision. Il permet de tester des scénarios divers, dont le transfert interbassin, des aménagements de la Grande Barrière ou de gestion de l'inondation des plaines inondables. Le modèle doit être utilisé et mis à jour régulièrement en fonction des nouvelles connaissances.

Le manque de données hydrologiques sur le Lac est source de confusion. Il est nécessaire de réinstaller un système de suivi dans la cuvette nord et dans les eaux libres de la cuvette sud. La question de la responsabilité de l'acquisition des données (États, observatoire de la CBLT) et de leur partage doit être résolue rapidement.

Ces données permettront de mettre en place un système d'alerte vers les populations (prévision des risques et communication) permettant d'anticiper les impacts des variations de niveau du Lac sur leurs activités.

Recommandations en recherche développement

Une meilleure connaissance des relations entre le Lac et les nappes bordières permettrait d'envisager un usage durable de la ressource en eau souterraine.

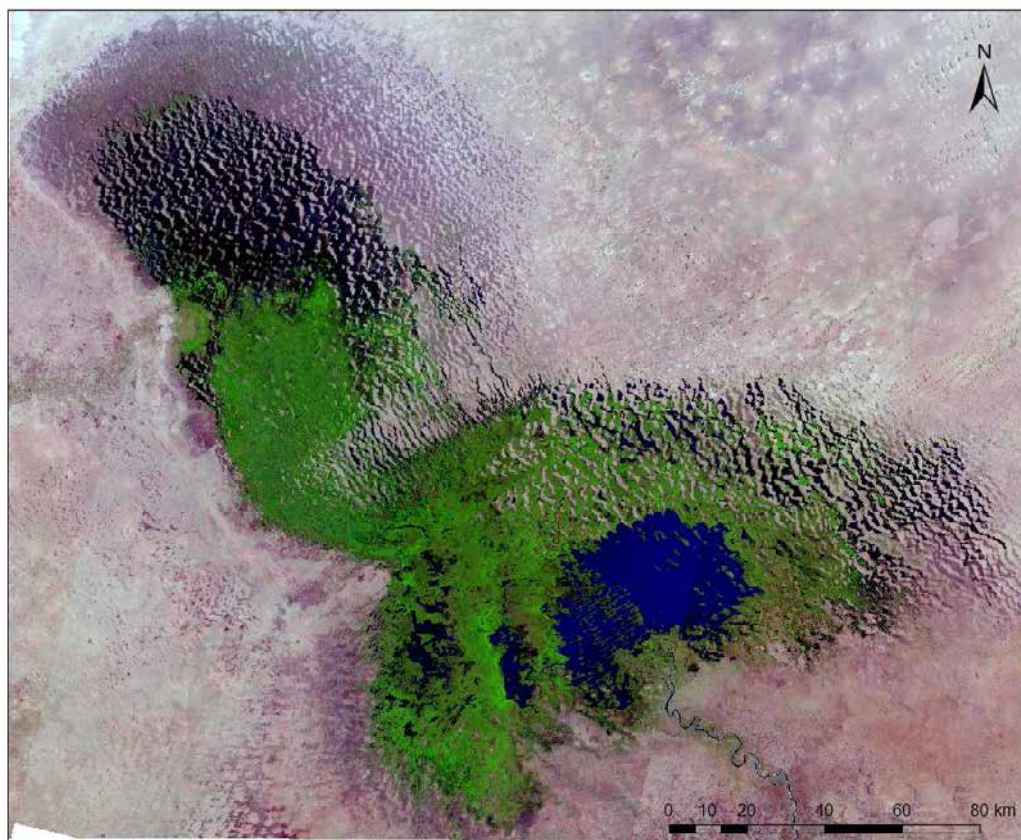


Figure 18 – Le lac Tchad en avril-mai 2013. Mosaïque Landsat où les surfaces en eau libre sont représentées en bleu ou en noir et les marécages inondés en vert (conception Don-Donné Goudoum Pierre, d'après documents NASA).

Références bibliographiques

AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson de l'Afrique de l'Ouest), 2013 - [en ligne] disponible sur <<http://www.amma-international.org/spip.php?rubrique100>> (consulté en juillet 2013).

BADER J.-C., LEMOALLE J., LEBLANC M., 2011 – Modèle hydrologique du Lac Tchad, Hydrological Sciences Journal, 56 (3): 411-425.

BERTONCIN M., PASE A., à paraître – « L'irrigation dans le bassin tchadien », In Magrin G., Lemoalle J., Pourtier R. (dir.), Atlas du lac Tchad, Paris, N'Djaména, Passages, Rép. du Tchad, AFD, IRD.

BDLIYA, H., BLOXOM M., 2012 – Analyse diagnostique transfrontalière du Bassin du Lac Tchad. Programme CBLT-FFEM relatif à l'Inversion de la tendance à la dégradation des ressources en terre et en eau. Commission du Bassin du Lac Tchad, N'Djaména, Tchad, 153 p.

BOUCHARDEAU, A., LEFEVRE R., 1957 – Monographie du lac Tchad, ed. prov. Paris, ORSTOM, 149 p.

CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad), 2013 – [en ligne] Disponible sur <<http://www.cbtl.org/>> (consulté en juillet 2013).

CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad), 2007 - Projet d'analyse diagnostique transfrontalière du bassin du lac Tchad. Préparé par Hassan Haruna Bdliya et Martin Bloxom, Programme CBLT-FEM relatif à l'inversion de la tendance à la dégradation des ressources en terre et en eau. CBLT, N'Djaména, 129 p.

CBLT-BRLI, 2011 - Modèle de planification pour la gestion de l'eau sur le bassin du Lac Tchad. Rapport final. Rapport préparé par J. Verdonck dans le cadre du projet « Programme de Gestion Intégrée des Ressources des Bassins Transfrontaliers en Afrique – Composante du Lac Tchad FED/2009/219-259 », 93 p.

CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad), 2011 – Charte de l'eau du bassin du lac Tchad; Annexe « Usage Irrigation », N'Djaména, 33 p.

CHOURET, A., 1977 – La persistance des effets de la sécheresse sur le lac Tchad. ORSTOM, N'Djaména, 14 p. multig.

CIMA-International, 2011 – Étude de faisabilité du projet de transfert d'eau de l'Oubangui au lac Tchad, 4 volumes CIMA International, Laval (Canada).

COE M.T., FOLEY J.A., 2001 – Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad basin, *Journal of Geophysical Research* D4, 106: 3349–3356.

CRÉTAUX J. F. , BIRKETT S. , 2006 – Lake studies from satellite radar altimetry. *C. R. Geoscience* 338: 1098–1112.

CRU (Climatic Research Unit), 2008 – [en ligne] Disponible sur <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/precip/> (consulté le 15.10.2013)

CRUL R. C. M., 1992 – Modèles pour l'estimation des rendements potentiels en poisson des eaux intérieures africaines. Document occasionnel du CPCA No.16, CPCA/OP16, Rome, FAO, 23 p.

DIEULIN C. ,2007 – Afrique de l'Ouest et centrale. Bassins hydrographiques, IRD, Paris, 1 feuille.

GAC J.-Y., 1980 – Géochimie du bassin du lac Tchad : Bilan de l'altération de l'érosion et de la sédimentation. Paris, ORSTOM, 252 p.

L'HOTE Y., MAHE G., SOME B., TRIBOULET J-P., 2002 – Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues., *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques*, 47: 563-572.

L'HOTE Y. ,MAHE G.,1996 – Afrique de l'Ouest et centrale, précipitations moyennes annuelles (période 1951–1989). Carte à l'échelle 1/6 000 000. ORSTOM, Paris.

LEBLANC M., LEMOALLE J., BADER J-C., TWEED S., MOFOR L., 2011 – Thermal remote sensing of water under aquatic vegetation: example with 15 years of inundation patterns for the 'Small' Lake Chad. *Journal of Hydrology*, 404: 87-98.

LEMOALLE J., 1978 – Application des images Landsat à la courbe bathymétrique du lac Tchad, *Cahiers ORSTOM Série Hydrobiologie*, 12 (1): 83-87.

LEMOALLE J. ,1991 – The hydrology of Lake Chad during a drought period / Eléments d'hydrologie du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). *FAO Fisheries Reports* 445: 54-61.

LEMOALLE J., BADER J-C., LEBLANC M., SEDICK A., 2012 – Recent changes in Lake Chad: observations, simulations and management options (1973-2011). *Global and Planetary Change* 80-81: 247-254.

Météofrance 2013 – [en ligne] Disponible sur <http://comprendre.meteofrance.com> (consulté le 15.10.2013).

NIEL H., LEDUC C., AND DIEULIN C., 2005 – Spatial and temporal variability of annual rainfall in the Lake Chad basin during the 20th century.

Hydrological Sciences Journal/ Journal des Sciences Hydrologiques, 50(2): 223-243.

OLIVRY J.-C., CHOURET A., VUILLAUME G., LEMOALLE J., BRICQUET J.-P., 1996 – Hydrologie du lac Tchad. Paris, ORSTOM, 266 p.

REDELSPERGER J.-L., DIEDHIOU A., FLAMANT C., JANICOT S., LAFORE J.-C., LEBEL T., et al., 2006 – AMMA: un projet international et multidisciplinaire d'étude de la mousson ouest africaine. La Météorologie, 54: 22-32.

RODIER J., 1966 – Les déversements du Logone vers la Bénoué. *Terres et Eaux*, 19:(49) : 2-17.

TALLING J. F., LEMOALLE J., 1998 – Ecological dynamics of tropical inland waters, Cambridge, Cambridge University Press, 451 p.

TILHO J. A., 1910-1914 – Documents scientifiques de la mission Tilho (1906-1909) 3 volumes, Paris Imprimerie Nationale, Tome 1: 412 p., Tome 2: 598 p., Tome III 484 p.

TILHO J., 1928 – Variations et disparition possible du lac Tchad. *Annales de géographie* 37: 238-260.

TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY P., BILLON B., BOUCHARDEAU A., CHEVERRY C., DUPONT B., LAMAGAT J.-P., MAGLIONE G., RIOU C., SERVANT M., ROCHE M.-A., SCHNEIDER J.-L., 1969 – Monographie hydrologique du lac Tchad. Paris, ORSTOM, 226 p.

USGS (United States Geological Service), 2013 – [en ligne] Disponible sur <http://glovis.usgs.gov/> (consulté le 15.10.2013).

WEAP (Water Evaluation and Planning System) 2013 – [en ligne] disponible sur <www.weap21.org> (consulté le 15 mars 2013).

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, 216 p + clé USB.

© IRD, 2014

ISSN : 1633-9924

ISBN : 978-2-7099-1836-7