

FONDS MONDIAL DE L'ENVIRONNEMENT

PNUD
BANQUE MONDIALE
PNUE

C.B.L.T.

ONU-DADSG

GESTION INTÉGRÉE DU BASSIN DU LAC TCHAD

ASSISTANCE PRÉPARATOIRE « B »

RAF/95/G48

***DOSSIER DIAGNOSTIC
THEME 1 : L'HYDROSYSTEME PHYSIQUE***

**Jean-Claude OLIVRY
Christian LEDUC**

Juillet 1996

Sommaire

- Avant-Propos
- Introduction

Première partie : Étude diagnostique

- 1- Généralités sur le lac Tchad et son évolution depuis le quaternaire récent
- 2- Climatologie
- 3- Hydrologie
- 4- Hydrogéologie
- 5- Besoins en eau et activités économiques
- 6- Les outils pour un suivi de l'environnement et de la gestion de la ressource en eau

Deuxième partie : Scénarios, risques éventuels et recommandations

- 1- Généralités
- 2- Les alternatives
- 3- Les contraintes
- 4- La solution des transferts d'eau
- 5- Recommandations

Bibliographie

Annexes

Annexes A et B: Termes de référence de la mission, personnes rencontrées.
Annexes 1 à 5 : Annexes scientifiques sur la variabilité climatique, le contexte déficitaire régional, la Komadougou Yobé, les modèles utilisés en hydrologie au Tchad et quelques commentaires sur des projets du plan directeur de la CBLT

AVANT-PROPOS

Notre consultation s'inscrit au début d'un processus d'assistance préparatoire du FME, avec le PNUD comme agence FME chef de file et l'ONU-DADSG comme agence d'exécution. Selon les termes de référence de la consultation en gestion intégrée des ressources en eau (texte complet en annexe A), il convenait :

1. d'apporter un diagnostic sur le comportement des eaux du lac Tchad et de son bassin,
2. d'orienter l'assistance préparatoire du futur programme FME pour :
 - la prise en compte des contraintes connues liées à la maîtrise des ressources en eau internationales, de leur variabilité et des risques identifiables,
 - donner des recommandations de sous-programmes complémentaires, réalistes et prioritaires.

La mission à N'Djaména s'est déroulée du 18 au 26 juin 1996 pour J.C. Olivry et du 21 au 30 juin pour C. Leduc. Elle a eu lieu en même temps que celles de J.M. Chéné, chef de projet ONU-DADSG, et de P. Harrisson, consultant en développement intégré et participatif. Elle a permis de rencontrer de nombreux interlocuteurs, dont la liste est donnée en annexe. Malgré des conditions matérielles peu favorables (coupures de courant toute la journée par exemple), nous avons pu rassembler les documents les plus importants pour effectuer la synthèse demandée.

Nos recommandations font avant toute chose appel au bon sens scientifique.

Le bassin du lac Tchad est un milieu fragile du fait de sa situation sahélienne : il est exposé à une forte variabilité climatique sur laquelle l'homme n'a aucune prise. Il lui faut simplement essayer de se prémunir contre les situations exceptionnelles, statistiquement rares mais aux effets dévastateurs. La variabilité des précipitations se traduit mécaniquement par une variabilité des écoulements de surface à peine moins marquée. Au contraire, les eaux souterraines, bien que presque entièrement dépendantes du réseau hydrographique pour leur réalimentation, ont une forte inertie face aux aléas climatiques.

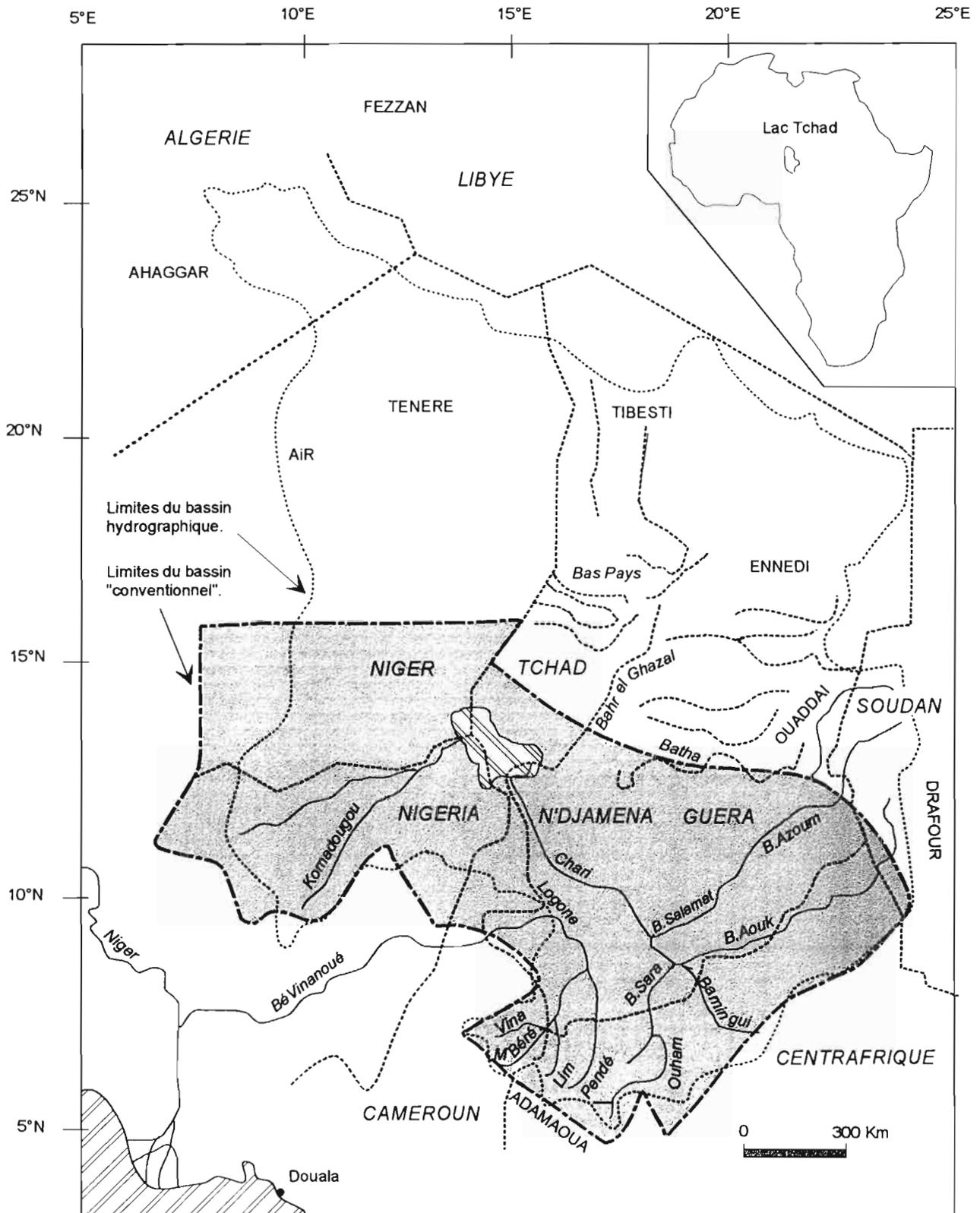
La gestion raisonnable des ressources en eau du bassin du lac Tchad doit donc combiner les spécificités des eaux de surface et des eaux souterraines. Elle dépend fondamentalement d'un travail anonyme et quotidien d'acquisition et d'exploitation de données élémentaires.

L'endoréisme du bassin et sa situation géographique font que l'eau disponible n'est présente qu'en quantité limitée et qu'il convient de la gérer au mieux. L'alimentation en eau potable des populations en forte croissance démographique, l'abreuvement de leurs troupeaux constituent la première priorité. Ces consommations, actuellement faibles du fait des conditions d'exploitation et du niveau de vie, ne peuvent que croître. Il en découle qu'il faut analyser avec courage et honnêteté les divers grands projets d'irrigation, gros consommateurs d'eau et à la rentabilité économique incertaine. Ce terme du bilan en eau du bassin est celui sur lequel les plus gros gains peuvent être espérés.

Les zones humides du bassin sont importantes pour la faune comme pour le fonctionnement hydraulique (épandage de crue, recharge de la nappe phréatique). Dans la plupart des cas, elles n'ont pas fait l'objet d'études suffisamment poussées pour que les processus hydrologiques puissent y être quantifiés finement. Il faut donc s'abstenir

de toute intervention sur ces secteurs sensibles avant d'avoir entrepris les investigations adéquates, qui peuvent nécessiter plusieurs années de mesures.

Les auteurs tiennent à exprimer leurs plus vifs remerciements aux personnes rencontrées au cours de leur mission (services nationaux, ONG, PNUD) et plus particulièrement au Secrétaire Général de la CBLT ainsi qu'à ses collaborateurs qui ont mis à leur disposition une bonne partie de la documentation nécessaire à cette expertise.



BASSIN HYDROGRAPHIQUE ET BASSIN CONVENTIONNEL

INTRODUCTION

« Exploiter les eaux du bassin du lac Tchad pour le bien-être des populations concernées », tel est l'objectif de la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT). Cette organisation régionale, une des plus anciennes organisations africaines, réunit depuis 1964 le Cameroun, le Niger, le Nigeria et le Tchad autour des problèmes d'aménagement et de développement d'un ensemble appelé « bassin conventionnel » centré sur le lac Tchad. Depuis 1994, la RCA est membre de la CBLT et le « bassin conventionnel » s'est enrichi des bassins supérieurs du système Logone-Chari et Komadougou Yobé. Le « bassin conventionnel » ne constitue qu'une petite part du bassin hydrographique théorique du lac Tchad (figure 1). Le bassin hydrographique avec une superficie d'environ 2 500 000 km², est pour moitié désertique ; il s'étend jusqu'au Ahaggar algérien, couvre le Ténéré et les confins de l'Aïr au Niger, le Tibesti et l'Ennedi au Tchad. Sa partie hydrologiquement active ne couvre que 700 000 km², dont 600 000 km² pour le bassin du Chari, et concerne, en dehors du Nigeria, du Cameroun et du Tchad, le Centrafrique et la province du Darfour au Soudan.

Plusieurs études de synthèse ont été réalisées sur l'hydrosystème Chari-Logone et des publications récentes ont précisé l'évolution des régimes hydrologiques. Ces travaux ont permis une évaluation des apports hydriques au lac Tchad, contribuant ainsi à la quantification de la ressource en eau, préoccupation majeure des développeurs en charge de son exploitation optimale. Mais l'arrivée de ces apports dans le lac Tchad génère aussi une ressource importante dont la disponibilité s'appuie sur une gestion rationnelle très dépendante d'une bonne connaissance du régime hydrologique du lac. Pendant 25 ans, des moyens humains et matériels considérables ont été mis en oeuvre, en particulier par l'Orstom, dans ces recherches hydroclimatologiques. Dans le même temps –et pour ne parler que des sciences de l'environnement– d'autres équipes, spécialisées en hydrobiologie, en hydrogéologie, en sédimentologie, en géochimie, en botanique, en télédétection et en géographie ont apporté une contribution multidisciplinaire importante à la connaissance du lac. Toutes ont dû faire référence à la variabilité des paramètres hydroclimatiques étudiés. Beaucoup ont apporté de leur côté les éléments d'une meilleure compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème. Les périodes troublées qu'a connues la région ont interrompu pour un temps la majeure partie de ces recherches, même si un minimum d'observations a pu être assuré par le service hydrologique tchadien, la météorologie nationale et la cellule Agrhymet de N'Djaména, ou par l'interprétation de l'imagerie satellitaire disponible.

L'étude diagnostique sur le comportement des eaux du lac Tchad et de son bassin s'appuie sur la consultation de divers documents et des services nationaux du Tchad et de la CBLT. Les principaux ouvrages utilisés pour ce diagnostic sont les suivants :

- Le bassin du fleuve Chari, monographie hydrologique Orstom n°2, 1974.
- Hydrologie du lac Tchad, monographie hydrologique Orstom n°12, 1996.
- Sub Saharan Africa hydrological assessment, West African countries. Country reports of Nigeria, Chad, Niger and Cameroon ; World Bank, PNUD... 1992.
- Modèle mathématique du comportement hydrologique du lac Tchad et des fleuves qui l'alimentent par Mott-Mac Donald international, 1994.

- Rapport de la mission d'actualisation des données de base socio-économiques et d'environnement. Paoletti et Lemoalle, PNUD/DADSG/CBLT RAF/88/029 : 1991.
- Definition of the development strategies of the water resources of the lake Chad basin, G.R. King, PNUD/DADSG/CBLT RAF/88/029, 1993.
- Cartes hydrogéologiques de la République du Tchad. Document BRGM n°209 ; 1992.

Les références complètes de ces ouvrages, ainsi que celles des autres publications et rapports consultés sont données en annexe.

Première partie : Étude diagnostique

Nous avons retenu dans ce chapitre les points essentiels se rapportant au milieu physique du bassin du lac Tchad, à son environnement et à ses ressources en eau, et en particulier à leur évolution actuelle. A l'appui de ce diagnostic, nous donnons en annexe quelques développements d'ordre scientifique.

1) GÉNÉRALITÉS SUR LE LAC TCHAD ET SON ÉVOLUTION DEPUIS LE QUATERNAIRE RÉCENT

1.1. Généralités

Pour de nombreux auteurs, le lac Tchad serait ce qui reste d'une "mer paléotchadienne dont l'extension était considérable ; les Bas-Pays du Tchad étaient submergés et la mer se serait étendue jusqu'aux limites du bassin versant du Nil". L'hydrographie fossile de l'Aïr, du Tibesti et de l'Ennedi montre que cette époque a connu des fleuves puissants mais les études paléoclimatiques les plus récentes infirment l'extension de cette « mer ».

A l'époque actuelle, le lac occupe encore une superficie respectable, comprise approximativement entre 10 000 km² et 25 000 km² suivant l'importance des crues du Chari.

Une des particularités les plus frappantes du lac Tchad est sa très faible profondeur moyenne qui permettrait presque de le considérer comme un immense étang plutôt que comme un véritable lac. Cependant on connaît dans le monde quelques cas analogues à un stade plus ou moins avancé de fossilisation, comme le Grand Lac Salé de l'Utah, le lac Eyre en Australie qui peuvent s'assécher plus ou moins complètement à la suite d'un déficit pluviométrique prolongé ; c'est un peu le cas du lac Tchad mais, contrairement à ce qui est habituel pour les lacs de ce type, la salinité de ses eaux reste très faible.

Le Chari grossi du Logone est de nos jours le principal tributaire du lac ; il collecte les apports des cours d'eau venant de la partie méridionale du bassin versant. La Komadougou Yobé, l'El Beïd et divers petits cours d'eau issus du Nigeria et du Cameroun ont un débit très faible comparé à celui du Chari.

Le lac Tchad s'étend dans une cuvette endoréique faiblement déprimée. Suivant les phases d'hydraulicité, il peut passer de l'aspect d'une véritable petite mer intérieure à celui d'un vaste étang plus ou moins marécageux. C'est dire qu'en volume, le lac Tchad, même en période de haut niveau, ne représente que de très faibles potentialités hydriques par rapport aux grands lacs du continent Africain.

Les climats du nord et du sud du lac sont très différents. N'Guigmi est très proche du désert, les dunes restent de sable nu, sauf pendant la saison des pluies. Dans le sud, les bords du Chari, à son arrivée dans le Delta, étaient encore, dans les années 1950, couverts d'une forêt dense qui rappelait les rivières guinéennes. Malheureusement, sous l'action de l'homme, cette forêt a de nos jours pratiquement disparu. Bien d'autres

dégradations du milieu sont observées sur le bassin du fait de la pression anthropique, en particulier pour tout ce qui concerne le couvert ligneux de toutes les régions avoisinant les grandes villes comme N'Djaména, Maïduguri (600 000 h chacune) ou Maroua et Diffa (100 000 h), ou encore les régions à forte densité pastorale. Mais on a démontré dans les zones amont productrices de la ressource en eau que le couvert végétal n'avait pas été altéré de manière significative par les déficits pluviométriques (Geffard, 1992) et qu'on n'avait pas de modification des paramètres du milieu physique intervenant dans le bilan hydrologique.

1.2 Le Paléotchad depuis la fin du Pléistocène :

D'une manière générale, les grandes tendances climatiques pour le bassin du lac Tchad montrent des maximums successifs entre 12 000 et 11 000 ans BP, 9 000 et 8 000 ans BP, 6 000 et 5 000 ans BP et enfin 4 000 et 3 000 ans BP (BP pour *before present*).

Ces travaux récents permettent de dégager quelques enseignements importants :

- La phase lacustre du Pléistocène terminal datée au carbone 14 entre 30 000 et 24 000 ans BP (Servant, 1973) doit encore être confirmée par des mesures de Th et U.

- L'existence d'un Mégatchad holocène à un niveau de 320 m (Schneider, 1967) ne paraît plus vraiment évidente pour Durand (1984), Fontes et Gasse (1991). Le plus haut niveau du lac Tchad observé au Niger daté de 6 000 ans BP se situe à l'altitude 300 m. La modélisation des bilans hydrologiques et d'énergie calculée à partir des valeurs de paléoprécipitations ne peut pas rendre compte d'une telle élévation de niveau d'un Mégatchad autour de 9 000 ans BP.

- **Un épisode globalement plus humide qu'aujourd'hui** a existé entre 12 000 et 4 000 - 3 000 ans BP. On lui doit l'existence de nombreux lacs sur l'ensemble de la région mais cela **n'implique pas** pour autant des interconnexions générales dans la phase la plus humide conduisant à observer au Tchad **une petite Caspienne d'eau douce**.

Le chapitre des recherches paléoclimatiques est loin d'être achevé, mais il n'est pas raisonnable de lire encore aujourd'hui des références sur une mer intérieure de 500 000 km² ou davantage pour une histoire géologique récente.

1.3. Histoire du lac Tchad depuis le dernier millénaire :

L'étude stratigraphique et palynologique des sédiments déposés dans le fond du lac Tchad a permis à Maley (1973) de remonter dans le temps à partir de l'actuel et d'étudier **les fluctuations lacustres depuis environ un millénaire**. On relève :

- une phase lacustre ancienne (transgression t_1) se terminant entre le VIII^e et le X^e siècle ;
- une régression (r_1) postérieure au X^e siècle ;
- une phase lacustre (t_2) centrée sur les XIV^e et XV^e siècles ;
- une régression (r_2) conduisant à un assèchement partiel daté de 460 +/- 95 ans BP. Cet assèchement se situe donc approximativement en l'an 1 500 ;
- une phase lacustre (t_3) aux XVI^e et XVII^e siècles ;

- la régression actuelle (r_t) avec les sursauts des périodes humides de la 2^{ème} moitié du XIX^e siècle et des années 1950-1960 de ce siècle.

Enfin l'ajustement final et l'établissement d'une chronologie calendaire ont été réalisés en utilisant de nombreuses données historiques ou de tradition orale des populations régionales, calées par les historiens sur diverses généalogies de sultans dont surtout celle du Kanem qui est connue avec une assez bonne précision et remonte au début du dernier millénaire. Un exemple de l'importance des traditions orales est celle que C. Seignobos a récoltée auprès de vieux Peuls dans des villages du sud du lac Tchad. Maley a situé assez précisément vers le milieu du XV^e siècle la plus importante des régressions du lac Tchad. Or les traditions orales très précises et circonstanciées recueillies décrivent un long assèchement record du lac Tchad que Seignobos a daté de la même période avec des données historiques connues, en particulier l'émergence du Royaume du Baguirmi au début du XVI^e siècle. Ces traditions rapportent que les ancêtres des Peuls, chassés par la sécheresse, vinrent installer leurs villages dans la partie méridionale asséchée du lac et cela durant une génération, c'est-à-dire durant 20 à 25 ans. **Le retour du lac se fit d'une façon brutale et catastrophique** et c'est surtout cet événement qui a frappé les imaginations et a été mémorisé (Maley, 1989). **Il s'agit donc bien là d'un risque très réel qu'il convient de prendre en compte aujourd'hui.** La situation climatique au milieu du XV^e siècle paraît donc assez comparable à l'actuelle, mais à cette époque l'assèchement a été nettement plus long et plus marqué. Des indices de cette sécheresse semblent se retrouver dans le secteur du Moyen-Niger (Mali, Burkina)

1.4. Variations actuelles du lac Tchad :

Les niveaux interannuels du lac sont généralement compris entre les cotes 279 et 283 m. En 1963, la cote 283, record pour le siècle, a été atteinte avec une superficie du lac approchant les 24 000 km² dont 11 000 pour la cuvette nord et 13 000 dans la cuvette sud. A la fin des années 1960, la taille et le volume du plan d'eau diminuent considérablement. En avril 1973 le lac s'est scindé en deux comme cela avait déjà été observé au début du siècle et va connaître un déficit chronique avec des fluctuations qui vont de la cote 280 (20 km³ en volume, 10 000 km² en superficie), jusqu'à moins de 2 km³ dans une poche résiduelle de 2 000 km² en juin 1985.

Ces données seront précisées plus loin.

Des épisodes « petit Tchad » ne sont pas exceptionnels ; on les a observés dans le siècle pour de courtes durées, à l'époque historique sur plusieurs décennies et dans le quaternaire récent avec de longues phases d'assèchement complet. Aujourd'hui comme hier, la sécheresse climatique en est la cause exclusive. Les prélèvements anthropiques actuels sont inférieurs à 1 km³.an⁻¹ (King, 1993) et représentent moins de 5 % des apports moyens d'années sèches. Le contexte est donc complètement différent de celui de la mer d'Aral, privée par l'homme de l'essentiel de ses ressources fluviales.

2) CLIMATOLOGIE

2.1 Climatologie du lac

Le climat de la région est directement lié au mouvement du front intertropical (FIT), équilibre entre les flux secs venant du nord-est (harmattan) et les flux de mousson depuis le golfe de Guinée. Le FIT, situé très au sud en hiver, commence à remonter vers le nord au printemps et atteint le 20° parallèle en juillet et août ; ensuite, il redescend rapidement vers le sud.

De nombreuses informations de ce paragraphe sont extraites d'Olivry *et al.* (1996).

La température moyenne annuelle est homogène sur l'ensemble du lac ; elle est de 27,9°C à N'Djaména. L'écart entre le mois le plus chaud, avril, et le mois le plus froid, janvier, est de 7°C. Les fluctuations journalières sont maximales en février (20°C) et minimales en août (inférieures à 10°C).

L'évaporation est un des termes principaux du bilan hydrologique. Plusieurs méthodes permettent son évaluation soit par mesure directe soit par calcul. Les estimations peuvent différer sensiblement ; par exemple pour la ville de N'Djaména, on a :

- bac Colorado/1964-1973 : 2574 mm/an ;
- bac classe A/1964-1973 : 2824 mm/an ;
- évapotranspiromètre/1964-1973 : 1914 m/an ;
- Penman : 2284 mm/an.

A l'échelle du lac Tchad l'évaporation est devenue une grandeur physique de signification régionale. Les variations interannuelles d'évaporation sur le lac ne sont pas considérables (2065 mm à 2255 mm par an, entre 1967-68 et 1976-77, tableau 4.13), du fait du microclimat causé par l'étendue du lac Tchad. Enfin, il existe une très bonne corrélation entre les 12 valeurs moyennes interannuelles (1965 à 1978 d'évaporation sur le lac (ELAC) et celles observées sur bac Colorado sol nu (ECOL, station de Bol Matafo) pour la même période : $ELAC = 0,645 * ECOL + 0,318$, avec $n = 12$, $r = 0,91$, (Pouyaud, 1986).

Evaporation annuelle sur le lac

Année Hydrologique	Evaporation (mm)
1967-68	2065
1968-69	2150
1969-70	2243
1970-71	2249
1971-72	2183
1972-73	2255
1973-74	2248
1974-75	2069
1975-76	2190
1976-77	2164

Il n'y a pas de modification fondamentale aujourd'hui du taux d'évaporation ou d'évapotranspiration de la région ; les modifications d'albédo, souvent invoquées, ne

sont pas suffisantes, quand elles sont observées, au plan du bilan radiatif pour entraîner une augmentation de l'évaporation

L'étude des précipitations s'est penchée sur le contexte régional d'une part, sur le lac d'autre part.

D'après la carte de L'Hôte et Mahé (1996), la précipitation moyenne annuelle, calculée sur la période 1951-1989, varie entre moins de 50 mm au nord et 1300 mm pour l'extrême amont du bassin, en Centrafrique. Une grande partie du bassin connaît donc un climat semi-aride, voire aride.

Les différentes études réalisées sur les pluies au Sahel, par exemple Taupin *et al.* (1993), ont souligné leur très forte variabilité dans le temps et l'espace : la pluviosité annuelle peut varier du simple au double sur 30 km. Il faut donc toujours relativiser les observations en un poste isolé. Ce n'est que sur des cumuls de plusieurs années que l'on voit réapparaître la distribution approximativement nord-sud des précipitations. Cette hétérogénéité se réduit en descendant vers le sud dans les zones à plus forte pluviosité.

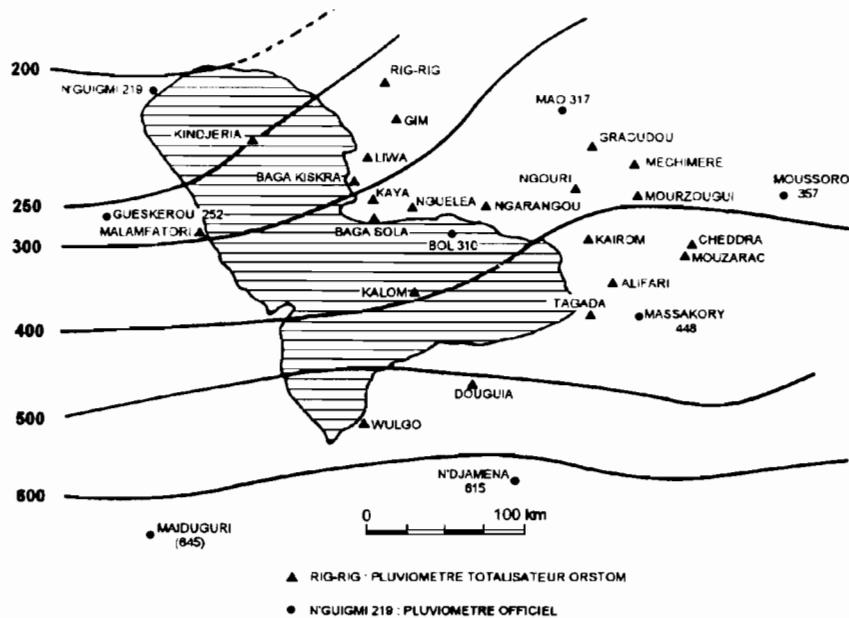
La station de Nguigmi, au nord du lac, peut illustrer les variations climatiques depuis le début du siècle. On note que le passé récent (début du siècle) a déjà connu des années particulièrement sèches ; la sécheresse des années 70 et 80 n'est donc pas remarquable par sa faible pluviosité mais par sa durée. A l'opposé, les années 50 et 60 étaient particulièrement arrosées.

Dans la zone sahélienne, la diminution de la pluviosité depuis deux décennies s'est traduite par une réduction du nombre d'événements et non pas par une diminution de la hauteur moyenne des événements (Lebel et LeBarbé, 1996). Le déficit des années 70 et 80 par rapport aux années 50 et 60 est plus important dans le sud que dans le nord et la variabilité interannuelle s'est accrue.

Un des nombreux problèmes dans la compréhension des processus météorologiques est de savoir ce qui dans la vapeur d'eau disponible à un moment et un endroit donnés provient de circulations à grande échelle (océans indien et atlantique) ou de recyclage local.

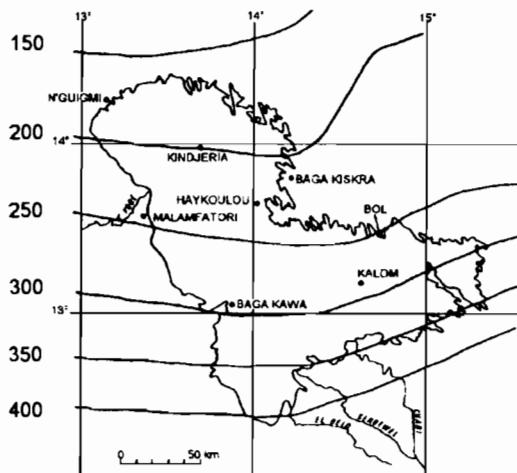
L'évolution du climat est liée à la fois à des paramètres astronomiques, pour les grandes oscillations, et à des causes globales et locales. Pour l'instant, malgré les développements des modèles de circulation atmosphérique globale, il est impossible de réaliser la moindre prévision climatique fiable à l'échelle de l'année ou de la saison et personne ne peut dire si et comment la sécheresse des dernières décennies pourrait se prolonger. (voir infra).

L'étude de la pluviométrie du lac est basée principalement sur les relevés de sept stations officielles situées au Tchad et au Niger. Secondairement, on a pu utiliser les relevés de quatorze pluviomètres totalisateurs installés par l'Orstom dans la région du Kanem à l'est du lac ainsi que les données fournies par les pluviomètres totalisateurs mis en place en 1975 sur les îles de Kindjéria et Kalom et à Baga Kiskra. On dispose également des relevés pluviométriques de la station de Malamfatori (Nigeria), de celle de la mission de Haykoulou depuis 1976 et des données annuelles concernant la station de Maïduguri (Nigeria) de 1951 à 1989.

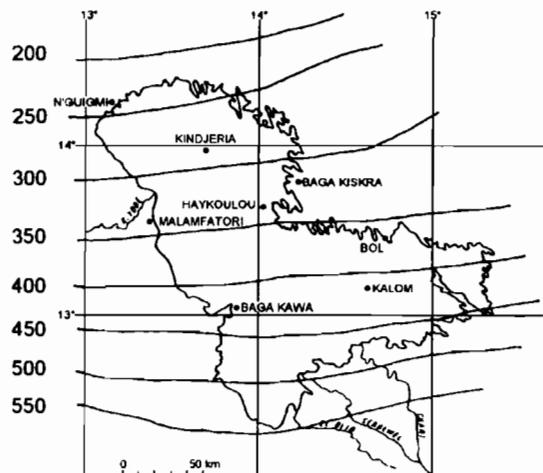


Isohyètes interannuelles (période 1932-1977).

Sur les 2 figures qui suivent, Mahé (1993) propose les isohyètes obtenues à partir du fichier de données annuelles observées et reconstituées, sur les périodes 1971-1989 (b) (déficitaire) et 1951-1970 (c) (excédentaire). On observe un très net déplacement des isohyètes vers le sud au cours des 20 dernières années, les isohyètes extrêmes passant de 550-220 mm à 400-150 mm.



Isohyètes interannuelles calculées sur la période déficitaire 1971-1989 (moyenne : 207 mm)



Isohyètes interannuelles calculées sur la période excédentaire 1951-1970 (moyenne : 320 mm)

La moyenne des précipitations annuelles sur le lac a été calculée par la méthode de THIESSEN. La moyenne interannuelle est de 288 mm.

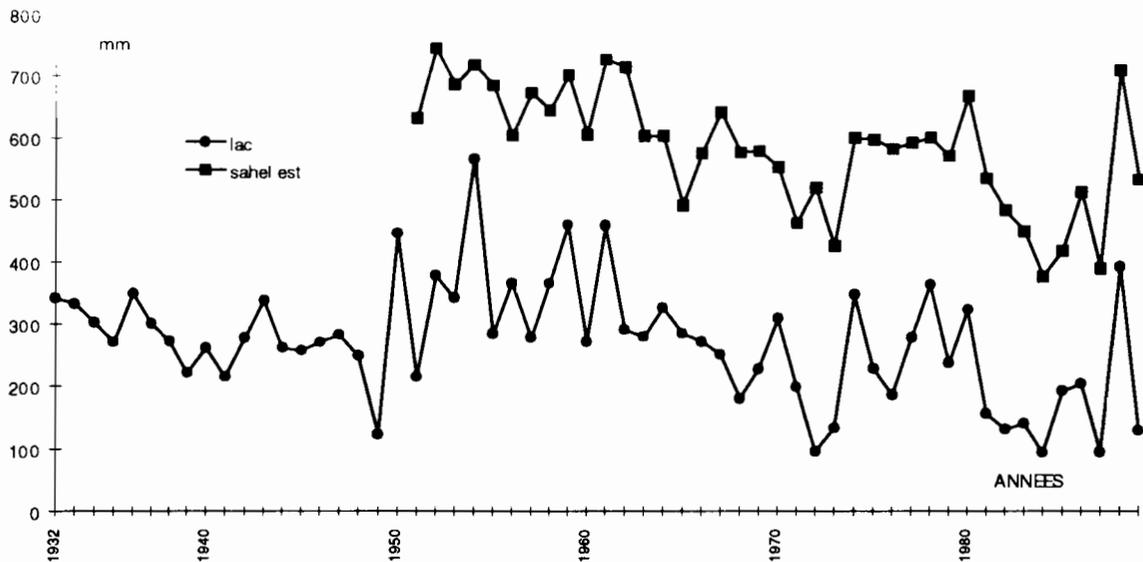
Les moyennes pluviométriques ainsi obtenues ne sont qu'assez grossièrement approximatives étant donné la faible densité des pluviomètres et leur situation périphérique par rapport au lac. Cependant, pour les années 1975 à 1977, nous avons les

relevés des totalisateurs des îles de Kalom et Kindjéria ainsi que ceux de quelques postes situés sur le rivage même du lac.

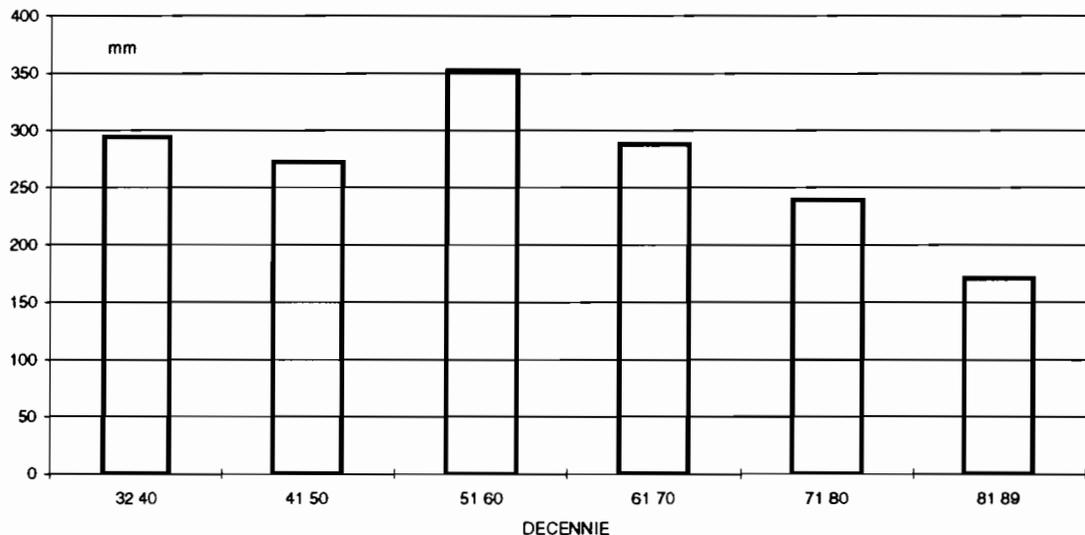
On remarquera que de 1937 à 1949, les précipitations annuelles ont presque toujours été nettement déficitaires, alors que la période 1950-1961 a, dans l'ensemble, été largement excédentaire. On notera également les très faibles valeurs des années 1972, 1984 et 1987.

Hauteurs des précipitations moyennes annuelles reçues sur le lac Tchad.

ANNEE	Moyenne des précipitations sur le lac (mm)	ANNEE	Moyenne des précipitations sur le lac (mm)
1932	342	1961	458
1933	330	1962	291
1934	303	1963	280
1935	271	1964	326
1936	349	1965	285
1937	301	1966	272
1938	272	1967	251
1939	221	1968	181
1940	262	1969	228
1941	215	1970	309
1942	278	1971	199
1943	338	1972	95
1944	262	1973	133
1945	257	1974	347
1946	271	1975	228
1947	283	1976	186
1948	249	1977	278
1949	123	1978	363
1950	445	1979	237
1951	215	1980	323
1952	378	1981	156
1953	342	1982	131
1954	565	1983	142
1955	284	1984	94
1956	366	1985	193
1957	278	1986	205
1958	365	1987	95
1959	459	1988	394
1960	272	1989	130



Evolution de la pluviométrie moyenne annuelle tombée sur le lac depuis 1932 comparée à celle de la région Sahel est de 1950 à 1989.



Précipitations moyennes annuelles reçues par le lac Tchad et calculées pour les six dernières décennies

2.2. Variations climatiques

La variabilité climatique est inhérente au climat africain mais on doit bien constater que le réchauffement à partir du milieu des années 1960 des océans de l'hémisphère sud montre que les différences d'anomalies de température de la surface de la mer (TSM) des océans du sud et du nord sont en relation inverse avec les anomalies pluviométriques du Sahel. Une bonne corrélation a été établie entre les TSM et les pluies sur la période Juillet -Septembre et un modèle de prévision du Bureau Météorologique du Royaume-Uni réalise de bonnes simulations, à partir des TSM de Juin, de la saison des pluies sahéliennes.

L'augmentation plus rapide des TSM au sud entraîne une réduction des transferts de chaleur et de la puissance de la mousson vers le nord. Cette anomalie a été rapprochée de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et donc attribuée à un réchauffement anthropique global.

Pour un doublement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, à un horizon indéterminé, certains chercheurs du Climatic Research Unit (R.U.) estiment dans un scénario composite de 5 modèles que l'augmentation probable de température serait de l'ordre de 2°5 C, qu'il y aurait une augmentation de 45 mm de précipitations sur les régions du lac, mais par contre une stabilité des pluies sur les principales zones d'apports des bassins supérieurs du Logone et du Chari. En fait, les zones tempérées du globe verraient des changements plus significatifs que les zones intertropicales.

On trouvera en annexe d'autres développements sur le sujet, mais on peut ici conclure que la science ne maîtrise pas encore les phénomènes explicatifs des variations climatiques et qu'aucune solution n'est aujourd'hui envisagée pour remédier aux situations de sécheresse climatique. On peut ajouter que la sécheresse au Sahel n'est pas liée aux influences anthropiques locales, même si celles-ci sont souvent responsables d'une dégradation de l'environnement et du cadre de vie des populations des régions sahéniennes et semi-arides.

La raison commande que l'on considère aujourd'hui, dans les projets de développement durable, que les aléas climatiques à dominante déficitaire constitueront la règle pour de nombreuses années encore.

Les circulations atmosphériques et les mécanismes des précipitations sont de mieux en mieux connus. Cependant, on est encore très loin d'avoir la capacité de prévoir sérieusement le temps à l'échelle d'une saison, même par corrélation empirique avec des variables simples (températures des océans par exemple). Il est impossible de dire si l'avenir sera une prolongation de la situation actuelle ou bien un retour rapide à une pluviosité faste comme dans les années 60.

Depuis une trentaine d'années, différents tests de **pluie provoquée** ont été menés dans de multiples pays. Le scepticisme des scientifiques vis à vis de cette méthode est général. Au Sahel comme ailleurs, il n'est pas possible de démontrer que ces expériences ont eu un impact significatif sur la pluviosité (Puech, 1984). L'impossibilité d'apprécier scientifiquement l'effet des ensemencements s'explique en particulier par l'extrême variabilité spatio-temporelle des précipitations naturelles sahéniennes, qui fait qu'on ne dispose pas d'un témoin fiable.

Les tests entrepris (Burkina Faso, Niger) avaient toujours un objectif très localisé et un contrôle au sol insuffisant. Même en imaginant que les pluies provoquées aient une réelle efficacité, cette méthode n'est pas envisageable à l'échelle d'un grand bassin comme celui du lac Tchad : le gain à un endroit se ferait probablement aux dépens d'une autre zone du même bassin comme noté lors de l'expérience de 1967 à Ouagadougou (Cotte et Lemoine, 1972) avec "une pluviométrie supérieure de 36 %" dans la zone d'ensemencement et "une pluviométrie inférieure de 50 %" à proximité...

A moyen terme, il n'est donc pas possible d'espérer prévoir ou modifier le climat du bassin du lac Tchad. Il faut prendre en compte sa variabilité, notamment les situations exceptionnelles, pour apprécier l'impact des différents aménagements déjà réalisés ou programmés et définir leurs politiques de gestion pour éviter une trop forte dégradation de l'environnement.

3) HYDROLOGIE

3.1. Généralités

L'hydrologie de surface est le facteur fondamental qui conditionne la ressource en eau de la région et son devenir. On doit distinguer d'une part les apports des tributaires du lac et leur régime particulier d'autre part le fonctionnement propre au lac. Suivant les périodes considérées, les valeurs citées dans la littérature varient (les moyennes ne sont pas établies sur les mêmes périodes) et nous distinguerons les termes du bilan hydrologique d'une part sur l'ensemble de la période incluant les premières années de la sécheresse et l'ensemble de la période humide, et, d'autre part, les observations des deux dernières décennies de sécheresse.

Après quelques généralités sur les apports fluviaux, nous préciserons le fonctionnement de quelques régions diagnostiques, identifiées par Kindler (1989), telles le lac lui-même, le Chari-Logone, le Grand Yaéré ou la Komadougou Yobé.

Dans un bilan interannuel établi en 1984, Olivry propose la répartition suivante des termes du bilan du lac Tchad ; pour un « moyen Tchad » à la cote 281,5 m, les apports superficiels sont en année moyenne de 40 km³, dont 37,8 km³ pour le Chari et 2,2 km³ pour l'El Beid et la Komadougou Yobé ; l'apport des pluies sur le lac est de 6 km³ ; en état d'équilibre, les pertes totalisent 46 km³ dont 95 % en évaporation et 3 km³ en infiltration.

Plus dans le détail, le Chari supérieur fournit 25,8 km³ et reçoit 12 km³ du Logone sur les 16,8 km³ mesurés à Bongor ; celui-ci a en effet alimenté les plaines d'inondation de rive droite pour 0,8 km³ et le Yaéré du Cameroun pour 3,6 km³, la différence étant liée à d'autres débordements. Le Yaéré est drainé par l'El Beid qui restitue 1,2 km³ au lac sur les apports du Logone et les 0,95 km³ des apports camerounais des Monts Mandara. Les apports de la Komadougou Yobé dans la cuvette nord du lac et ceux du Yedseram dans la cuvette sud, en provenance du Nigeria totalisent alors 1 km³.

Dans le contexte des années déficitaires récentes le bilan est tout à fait différent. La moyenne des apports du Chari sur la période 1971-1990 est de 21,8 km³.an⁻¹ ; l'alimentation potentielle du Yaéré n'excède pas 0,5 km³ en provenance des Monts Mandara et 2 km³ en provenance du Logone ; son drainage par l'El Beid n'est que de 0,2 km³.an⁻¹. Les apports au lac totalisent alors 22 km³.an⁻¹, soit la moitié des apports antérieurs et se limitent globalement à l'alimentation de la cuvette sud.

Dans son modèle mathématique, Mott et Mac Donald International a pris en compte la période 1960-1979 et donne les débits suivants :

Chari à Sahr :	275 m ³ .s ⁻¹
Bahr Sara à Manda :	450
Bahr Keita :	35
Bahr Salamat :	20
Chari à Bouso	735
Chari à Chagoua	730
Logone à Baïbokoum (apports Cameroun)	285
Logone à Moundou	375
Logone à Lai	485
Logone à Kousseri	350
Chari à N'Djaména	1080 m ³ /s, soit 34 km ³ /an pour cette

période encore bien marquée par la période humide, et avec un maximum de crue moyen de 3500 m³/s et un étiage minimum moyen de 110 m³/s.

Pour les années 1960, le système Komadougou Yobé d'une superficie de 148 000 km² donne à la sortie de la partie amont à Gashua 1,5 km³/an et seulement

0,45 km³ à son arrivée au lac. De même, le Yedseram et la Ngadda, contrôlés au pont de Mbuli (9750 km²) n'apportent que 3 m³/s alors qu'on mesure 7.7 m³/s à Bama en amont (4750 km²). Les plaines d'inondation de l'aval n'expliquent pas tout. Il est raisonnable de penser que le bassin supérieur de la Komadougou Yobé pour une superficie de l'ordre de 70 000 km² a un débit spécifique de l'ordre de 3 l/s/km², soit un **volume interannuel voisin de 7 km³ utilisé dans les multiples aménagements des provinces de Kano et Bauchi et pour l'essentiel soustrait aux eaux internationales Niger-Nigéria de la Yobé aval (voir annexe 3).**

3.2. Hydrologie du lac Tchad

3.2.1. Le lac Tchad et le fleuve Chari

L'étude des niveaux du lac a été principalement orientée dans les travaux antérieurs cités par Olivry *et al.* (1996) sur celle des maximums, des minimums et de l'amplitude annuelle des variations de niveau. Des relations ont pu être établies entre niveaux maximums d'années consécutives ou encore entre maximums et minimums successifs et ont été utilisées pour la reconstitution de données manquantes et faire de la prévision sur les étiages du lac après l'observation du maximum annuel.

La prise en compte des données récentes montre que ces relations ne peuvent pas être utilisées pour les périodes de petit Tchad avec séparation des cuvettes nord et sud. L'autocorrélation des niveaux du lac est pour une bonne part liée à l'évolution des débits du Chari. Sur la période d'observation commune (1950-1978, 1981 et 1988-1993), on a recherché quelle était la meilleure régression entre le niveau maximal du lac observé à Bol (ou cote fictive d'après la station de Kalom) et les valeurs annuelles ou les moyennes mobiles, calculées sur 2 ou 3 ans, des crues maximales et des modules annuels du fleuve Chari à N'Djaména.

Les meilleures relations sont obtenues pour les modules, avec des coefficients de corrélation très voisins de 0,905 et 0,911 suivant qu'il s'agit des modules moyens calculés sur 2 ou 3 ans. On a une bonne relation entre Hx du lac et le module moyen du Chari calculé sur 3 ans. L'équation de la régression s'écrit :

$$Hx_i = 0,35 \left(\frac{Q_i + Q_{i-1} + Q_{i-2}}{3} \right)$$

avec Hx en cm à l'échelle de Bol et Q en m³ s⁻¹.

Le tableau suivant résume l'analyse fréquentielle faite suivant des lois de Jenkinson des différents paramètres hydrologiques du Chari pris en compte ici.

Etude fréquentielle des crues et modules du Chari à N'Djaména

Paramètre en	f %	1	5	10	20	50	80	90	95	99
en m ³ s ⁻¹	T	100	20	10	5	2	5	10	20	100
Qx		477	1280	1710	2230	3180	4060	4450	4740	5150
Q \bar{x} 2 ans		682	1450	1850	2330	3200	3960	4300	4530	4850
Q \bar{x} 3 ans		844	1560	1930	2380	3190	3910	4230	4450	4750
Module		113	382	527	706	1050	1370	1530	1650	1820
Mod. moy. 2 ans		139	407	551	715	1050	1360	1500	1600	1750
Mod. moy. 3 ans		162	427	568	738	1060	1350	1480	1580	1710

L'application de la relation $Hx_i = f(Q \text{ Chari})$ permet de proposer pour différentes périodes de retour le niveau maximum atteint par le lac.

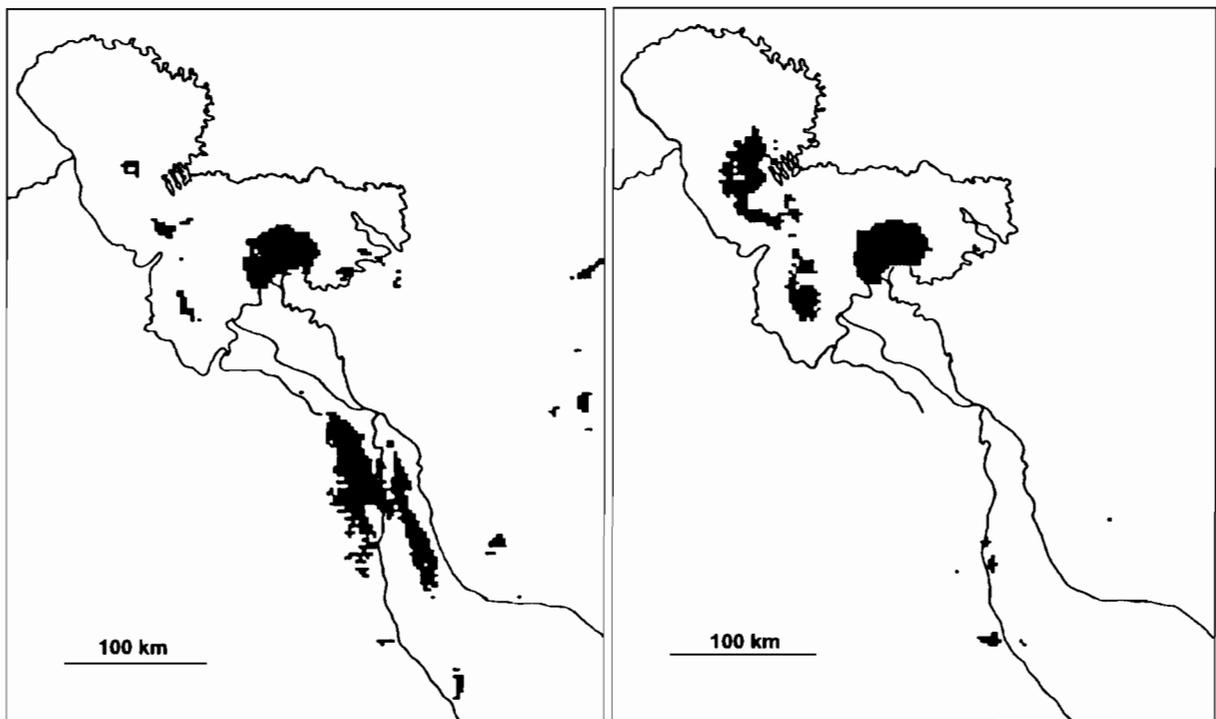
Période de retour	Années sèches				Médiane	Années humides			
	100	20	10	5	2	5	10	20	100
Niveau de crue à Bol Hx en cm	57	149	199	258	371	472	518	553	599
Altitude IGN m	278,44	279,36	279,86	280,45	281,58	282,59	283,05	283,40	283,86

Ces résultats doivent cependant être considérés avec réserve pour les niveaux les plus bas, les auteurs ne précisant pas dans les documents disponibles les fourchettes d'incertitude déduites de la corrélation.

3.2.2. La crue 1994-1995

L'abondance des précipitations en 1994 laissait espérer une meilleure alimentation du lac Tchad que celle qui a été observée après l'arrivée de la crue du Chari. Les surfaces en eau libre détectées par Météosat ont été remplacées dans la figure ci-après par rapport aux contours du lac Tchad Normal pour deux images fournies par le laboratoire UTIS de Dakar du 9 novembre 1994 et du 15 février 1995 et traitées par Lemoalle.

L'image du 9 novembre montre que les pluies et la crue des fleuves ont contribué à l'alimentation des plaines d'inondation (Yaéré) au sud du confluent Chari-Logone. Dans le lac la zone des eaux libres du sud conserve une surface constante devant le delta du Chari. La pluie a provoqué l'inondation de petites surfaces dans les bas-fonds de la cuvette nord. L'image du 15 février montre des eaux libres au sud de Baga Kawa. La cuvette sud est proche de son maximum de niveau et a débordé vers la cuvette nord jusqu'à la latitude de Boso. Dans le bas de l'image, la retenue de Maga au Cameroun en rive gauche du Logone est bien visible.



9 novembre 1994

15 février 1995

Crue 1994-95 : inondation du Yaéré en novembre 1994
et franchissement de la Grande Barrière en février 1995.

3.2.3 Le fonctionnement hydrologique du 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.

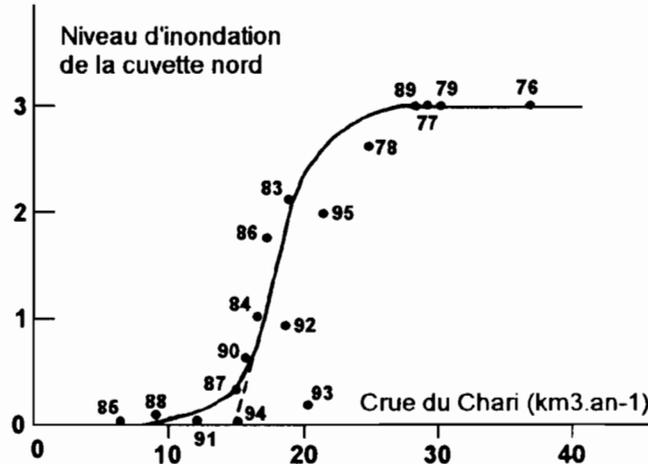
En ce qui concerne la cuvette sud (eaux libres, marécages et archipel) ce cycle est tout à fait reproductible d'une année sur l'autre, la différence entre les hautes eaux d'une année d'apports déficitaires (9,4 km³ en 1987-88 par exemple) et une année proche de la normale (36,9 km³ en 1975-1976) étant de l'ordre de 1 m.

L'inondation de la cuvette nord en fin janvier de chaque année (extension maximale annuelle) a été évaluée suivant une échelle arbitraire de 0 à 3 correspondant approximativement aux superficies inondées :

- 0 = pas de passage d'eau à travers la Grande Barrière ;
- 1 = inondation peu importante de la partie méridionale ;
- 2 = inondation jusqu'à la latitude de Boso ;
- 3 = inondation très sensiblement au nord de cette dernière limite.

La relation entre le module annuel du Chari et l'importance de l'inondation de la cuvette nord est représenté par une courbe sigmoïde établie sur les données de 1975 à 1995 (complété de Lemoalle, 1989) où :

- le module nécessaire à un cycle annuel normal de la cuvette sud seule, sans débordement, est de 15 km³.
- le module permettant une inondation complète de la cuvette nord est de 28 km³.
- un apport compris entre 15 et 28 km³ se traduit par une inondation partielle de la cuvette nord.



Importance de l'inondation de la cuvette nord (suivant des unités arbitraires) en fonction du module annuel du Chari au cours de la période de Petit Tchad. L'année indiquée est celle du remplissage de la cuvette nord (fin janvier).

Rappelons l'effet de seuil créé par la végétation de la Grande Barrière. Une modification de cette végétation se répercuterait nettement sur les échanges entre les deux cuvettes et donc sur leurs niveaux. C'est bien ce que suggère le report des points les plus récents

(1991 à 1995). L'inondation de la cuvette nord suivant les mêmes niveaux de l'échelle choisie paraît nécessiter un apport supplémentaire du Chari de $5 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$.

Par ailleurs, si nous comparons les apports d'équilibre du Chari pour la cuvette sud en période de Petit Tchad (15 km^3 pour 7500 km^2) et pour l'ensemble du lac en période de Tchad normal (42 km^3 pour environ $20\,000 \text{ km}^2$), nous constatons que les pertes annuelles par unité de surface représentent sensiblement 2 m pour chacune des périodes considérées. Rapportées aux apports totaux au lac (et non uniquement aux apports du Chari) ces pertes représentent environ 2,3 m par unité de surface. La modification des paysages, le développement de la végétation marécageuse, ne semblent donc pas avoir modifié sensiblement les pertes par évaporation. Dans la limite des approximations faites, les surfaces de marécage n'ont pas une évaporation sensiblement différente de surfaces équivalentes d'eau libre.

3.3. Les débits du Chari

Le remplissage du lac Tchad est une variable pluriannuelle, les niveaux de crue ou d'étiage dépendant non seulement des apports annuels provenant du fleuve Chari mais également de l'état de remplissage antérieur du lac (niveau de crue ou niveau d'étiage de l'année précédente). Ceci explique pour une part l'effet de persistance de l'évolution actuelle du lac mais ne suffirait pas à rendre compte d'un petit Tchad qui se pérennise, s'il n'y avait aussi un effet de persistance majeur au plan de la péjoration climatique de la région, au plan de l'évolution des régimes hydrologiques actuels du fleuve Chari.

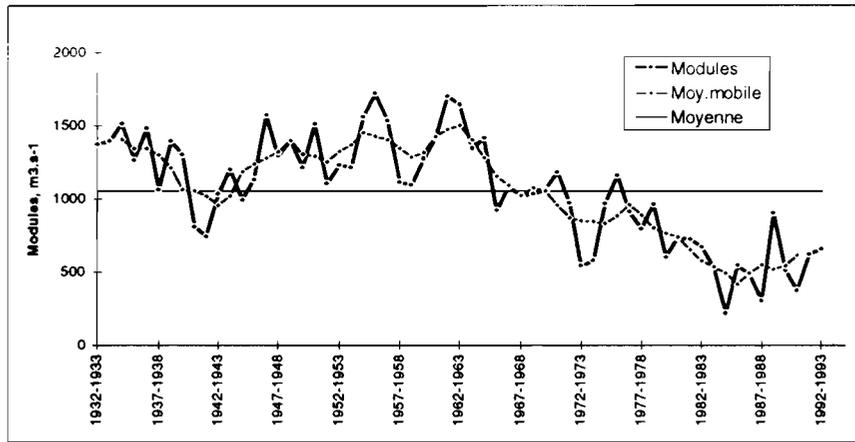
Or la chronique des maximums de crue moyens du Chari calculés par décennie pour la période de reconstitution (1870-1931) et la période d'observation (1932-1994) est très évocatrice de la dégradation des ressources en eaux du fleuve.

Décennie	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990 (5 ans)
Maximum moyen en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	5070	4400	4960	3670	3540	3500	3670	3380	3790	4060	2820	1870	1930

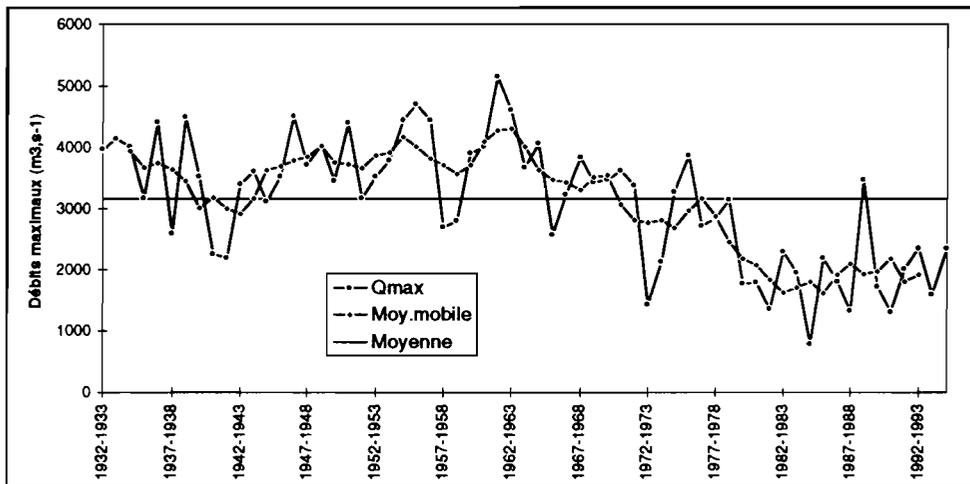
Le maximum de crue interannuel est de $3660 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur 125 ans. L'appauvrissement persistant de l'hydraulicité du Chari apparaît plus nettement encore à travers les dix dernières années pour lesquelles l'apport interannuel est le plus faible jamais observé, avec seulement $18,4 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$, soit moins de la moitié de l'apport interannuel calculé sur la période d'observation.

Les figures ci-dessous illustrent bien cette évolution des modules et maximums de crue du fleuve Chari. La figure suivante montre quelques hydrogrammes caractéristiques du Chari à N'Djaména et notamment le formidable déficit hydrologique de l'année 1984-1985 par rapport à l'année médiane et à l'année 1961-1962.

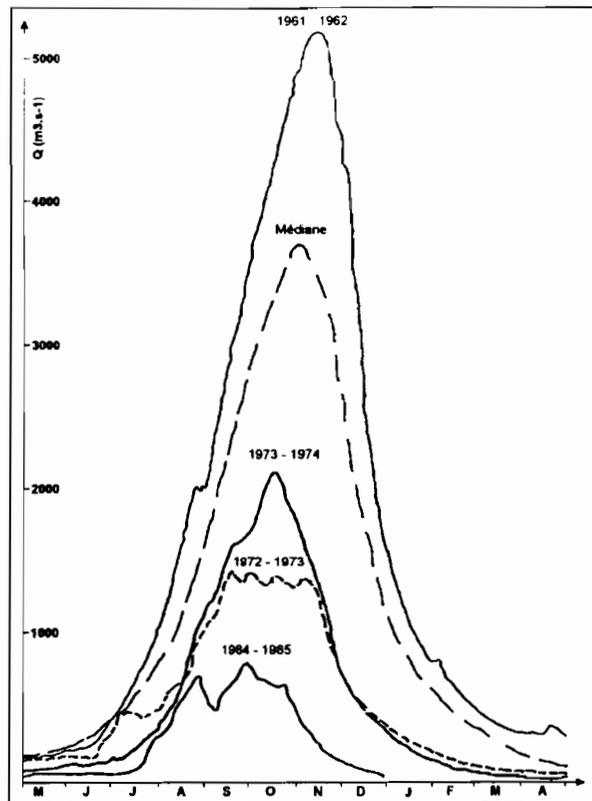
Mais le cas du Chari est loin de constituer une exception dans la région. Le phénomène est général, du Sénégal au Tchad.



Variation annuelle des modules du Chari à N'Djaména



Variation des débits maximaux du Chari à N'Djaména



Hydrogrammes de crue du Chari à N'Djaména

3.4. Le Logone, le Grand Yaéré et l'El Beïd

Les informations présentées ici sont pour l'essentiel tirées de la Monographie hydrologique du Logone (Billon *et al*, 1967) et des travaux d'Olivry (1986), de Naah (1990), d'Olivry et Naah (1996) et Olivry *et al* (1996).

À Laï, le Logone est formé de la réunion de sa branche occidentale venue du Cameroun et de sa branche orientale issue de la Pende. Le bassin versant a une superficie de 56 700 km² ; son débit interannuel sur la période 1948-1973 est de 512 m³/s mais, sur 40 ans avec les années sèches observées jusqu'en 1987, ce débit tombe à 464 m³/s ; le Logone s'écoule dans une large plaine sédimentaire à très faible pente et montre des défluences en rive droite qui vont former le Ba-Illi. En rive gauche, le défluent d'Eré rejoint le bassin de la Bénoué par un seuil déversant large de 4 km et sous une lame d'eau de 0 à 0,9 m suivant l'année (volume perdu de 0 à 1 km³/an, en moyenne 0,3 km³ à revoir à la baisse). Le seuil de Dana est beaucoup plus modeste avec des écoulements n'excédant pas 10 millions de m³.an⁻¹. A Bongor, le Logone devient fleuve frontalier entre le Cameroun et le Tchad ; son débit (1948- 1973) est de 534 m³/s, (488 m³/s pour les 40 années citées plus haut) et malgré des apports intermédiaires n'a pratiquement pas augmenté depuis Laï. À partir de Bongor, la dégradation du réseau hydrographique est telle que les déversements dans les plaines d'inondation vont se multiplier et à Logone-Birni le module est de 380 m³/s (12 km³/an) pour 35 ans et de 317 m³/s sur 40 ans, soit 161 m³/s en moins sur la dernière période.

Bien entendu, ces faibles pentes et ces défluences entraînent un ralentissement et un amortissement de la crue annuelle. C'est l'importance de la crue observée à Bongor qui va déterminer l'importance de l'inondation dans le Yaéré et plus tard de l'écoulement dans l'El Beïd. L'étude statistique des maximums de crue du Logone à Bongor situe la

valeur médiane à 1990 m³/s, valeur qui doit probablement être revue à la baisse mais qui a son importance dans l'occurrence du fonctionnement hydrologique du Yaéré et de l'El Beïd.

Quand le débit à Bongor dépasse 700 m³/s, des défluences importantes commencent à être observées et le Logomatia, mis en eau, s'écoule vers le nord ; si le maximum de Bongor ne dépasse pas les 1100 m³/s, l'extension de l'inondation reste limitée à la plaine de la Logomatia et à quelques débordements à l'ouest.

Au dessus de 1200 m³/s à Bongor, le flot de crue inonde l'ensemble du Yaéré. L'extension de l'inondation dans le Yaéré varie de 0 à 6000 km² avec une extension moyenne de 3400 km².

Il faut un débit supérieur à 1500 m³/s pour que l'onde de crue parvienne à l'El Beïd. L'importance de la crue du Logone en débit et en durée est parfaitement corrélée à l'hydraulicité de l'El Beïd (pour des débits supérieurs à 1500 m³/s). La crue de l'El Beïd atteint son maximum à la mi-décembre mais au cours des deux dernières décennies, il y a eu de nombreuses années sans écoulement. L'écoulement moyen est de 1,23 km³ (1954-1973) et sur cette même période le maximum de crue médian était estimé à 180 m³/s. Avant la crue ayant pour origine le Logone, on peut observer une précrue en août correspondant aux apports des mayos des Monts Mandara mais qui ne représente que de 10 à 15 % en volume de la crue principale. Naturellement, cette précrue n'a plus été observée dans les années les plus sèches et la participation des apports Mandara à l'inondation des plaines du Yaéré est d'autant plus réduite aujourd'hui que les mayos Tsanaga et Boula contribuent au remplissage du lac de Maga (Semry II) et que les mayos du nord-est franchissent rarement le cordon sableux de Limani (ancien rivage du lac Tchad), soit que leurs débits sont trop faibles, soit que des petites retenues aient été construites en montagne. Ceci n'est pas sans conséquence sur la partie arborée du parc de Waza. Enfin, les aménagements de la Semry (barrage de Maga et endiguement de Pouss à Tékélé affectent l'alimentation en eau du sud du Yaéré.

Dans les dernières dizaines de kilomètres de son cours aval, l'El Beïd est un petit fleuve frontalier (Nigéria-Cameroun) dont les éventuels apports peuvent être précieux pour les populations riveraines et pour l'alimentation de la petite cuvette sud-ouest du lac Tchad.

3.5. Les étiages du Chari et du Logone

Leur étude est importante puisque les étiages conditionnent les limites inférieures des disponibilités en eau de surface en fin de saison sèche.

L'étiage absolu médian du Chari à N'Djaména était estimé à 126 m³/s et admettait une valeur décennale sèche de 88 m³/s. Les étiages absolus de 1973 et 1974 étaient de 47,7 et 38,6 m³/s et depuis, pour les années les plus défavorisées, ces débits sont tombés à 20-25 m³/s

Pour le Logone à Bongor, l'étiage absolu médian était estimé à 40 m³/s et l'étiage décennal sec à 24 m³/s. En 1984, 1985, 1986 et 1987, l'étiage absolu était inférieur à 10 m³/s.

Il y a bien eu une rupture dans le régime des basses-eaux. Le comportement nouveau de ces très faibles étiages est lié à un effet mémoire de la sécheresse climatique imputé par Olivry (1987, 1992 et 1993) à l'amenuisement de la contribution des réserves souterraines des nappes de versant des hauts bassins dans l'écoulement de base. L'augmentation des coefficients de tarissement des fleuves traduit la réduction de l'extension de ces nappes de versant. Il s'agit là de conséquences durables de la sécheresse qu'il faut prendre en compte dans les modèles mathématiques.

Le phénomène est décrit plus largement en annexe.

Les modifications des sections de mesure (bancs de sable, déplacement de chenaux) aux stations hydrométriques impliquent des jaugeages fréquents en basses eaux si on veut bien connaître les étiages. L'évaluation hydrologique (Water Assessment 1992) a bien montré l'importance des erreurs relatives dans le calcul des débits de basses eaux à partir de tarages obsolètes.

Enfin, il convient de s'assurer que les règles de gestion définies par l'accord de Moundou entre le Cameroun et le Tchad sont bien observées au niveau des périmètres irrigués pendant la période de basses-eaux. Il n'est pas exclu que des prélèvements par pompage dans le Logone augmentent le déficit des étiages (seulement pour Semry I, Semry II dépendant de la retenue de Maga)

3.6. Qualité des eaux

Les études existent, tant sur le Chari et le Logone avec un suivi des transports en suspension et des charges dissoutes arrivant dans le lac Tchad, que sur le lac où la turbidité a été mesurée de même que l'évolution spatiale de la salinité.

La charge solide parvenant au lac provient pour l'essentiel du fleuve Chari. Les concentrations moyennes mensuelles des matières en suspension sont nettement plus fortes sur le Logone puisqu'elles peuvent dépasser 500 mg l⁻¹ en juillet, alors qu'elles atteignent rarement 150 mg l⁻¹ à Chagoua au mois d'août. Les valeurs moyennes annuelles sont de 54 mg l⁻¹ sur le Chari à Chagoua et de 123 mg l⁻¹ sur le Logone à Kousséri. Après le confluent, le Chari à N'Djaména montre une concentration moyenne annuelle de 76 mg l⁻¹. La comparaison des concentrations annuelles à N'Djaména en année humide (73 mg l⁻¹) et en année sèche (97 mg l⁻¹) montre que la variabilité du transport de matière est moindre que celle de l'hydraulicité du fleuve. La charge solide moyenne de l'El Beïd ne dépasse pas 23 mg l⁻¹.

Les apports moyens annuels en sels dissous au lac ont été estimés dans la fourchette 2,6 - 2,8 millions de tonnes (Carmouze, 1972 et 1976 ; Gac, 1980). La charge dissoute varie de 50 à 82 mg l⁻¹ suivant la saison et est en moyenne de 67 mg.l⁻¹. La concentration ionique varie de 80 à 1100 mg l⁻¹ du delta du Chari à l'extrême nord du lac. En période de réduction drastique des plans d'eau, liée à la sécheresse, les concentrations s'élèvent considérablement et ceci d'autant plus que les phénomènes de régulation saline, mis en évidence par Roche (1973), ne s'exercent qu'aux bordures du lac « Moyen Tchad » et peu sur ses cuvettes résiduelles.

En considérant le lac comme un milieu unique et homogène, Carmouze (1976) a proposé un modèle simplifié de l'équilibre dynamique moyen annuel de chacun des éléments sur la base des caractéristiques suivantes :

- régime des apports fluviaux,
- régime des pertes par infiltration et sédimentation,
- état hydrochimique du stock lacustre,
- taux de renouvellement annuel des stocks.

En comparant ces différents équilibres hydrochimiques, on note immédiatement que chacun des composants de la salure a son propre mode de régulation. Ainsi, pour ne citer que les régimes extrêmes, ceux du sodium et de la silice dissoute, on remarque que le renouvellement annuel du stock du premier est de 5,3 %, celui du second de 28,7 % ; autrement dit, le sodium provenant des fleuves séjourne en moyenne 19 ans dans le lac avant de s'éliminer par infiltration, tandis que la silice dissoute n'y séjourne que 3,5 ans, du fait de l'importante sédimentation chimique à laquelle elle participe. En conséquence,

à l'égard du sodium, le lac est essentiellement un lieu de transit, dans lequel les régimes des apports fluviaux et des pertes par infiltration entretiennent un stock en cet élément relativement élevé ; au contraire, vis-à-vis de la silice dissoute, le lac est en grande partie un lieu de sédimentation chimique dans lequel les régimes des apports fluviaux et des pertes par voie biogéochimique et, à un moindre degré, par voie d'infiltration, maintiennent un stock de silice relativement faible. Les autres éléments ont un mode de régulation intermédiaire.

A notre connaissance, il n'y a pas eu d'études comparables sur la qualité des eaux dans les années récentes d'observation du petit Tchad. Les études disponibles permettent cependant une compréhension du fonctionnement hydrochimique du lac Tchad qui n'a pas dû subir d'altérations majeures dans la cuvette sud.

4. HYDROGEOLOGIE

4.1 Les processus en jeu

Le bassin du lac Tchad a fait l'objet de nombreuses études hydrogéologiques depuis une trentaine d'années. L'histoire géologique et ses implications sur la circulation des eaux souterraines est décrite dans de très nombreux documents, dont quelques uns synthétisent très bien les connaissances actuelles ; ils sont indiqués ci-dessous. Cependant, beaucoup d'autres ne présentent que peu d'intérêt puisqu'ils ne font souvent que citer, parfois de manière maladroite ou incorrecte, les ouvrages fondamentaux.

Pour ce qui concerne la description géologique et hydrogéologique de l'ensemble du bassin, la référence scientifique reste le rapport de Schroeter et Gear pour la FAO en 1973. En 1987, Solages synthétise assez bien l'état des lieux et les perspectives. Malgré quelques approximations, l'actualisation/modélisation d'Eberschweiler en 1993 est riche d'informations récentes.

Pour une étude ciblée sur une région particulière, on peut citer d'autres documents dont les différents volumes de l'évaluation hydrologique de l'Afrique de l'ouest (Mott MacDonald *et al.*, 1992), de qualité variable selon les pays et qui ne font généralement qu'un état partiel de l'infrastructure en hydrologie et hydrogéologie. Pour le Cameroun, il faut remonter à Biscaldi (1968), complété en 1970. Pour le Niger, la synthèse du PNUD (1991) exploite les données apparues depuis Greigert (1979) et donne les références bibliographiques antérieures à consulter. Pour le Nigéria, il existe peu de références autres que Barber (1965) ou Scet (1979). Pour l'ensemble du Tchad, les multiples travaux de Schneider (dont la somme de 1992) font autorité ; de manière plus détaillée sur le Chari-Baguirmi, la modélisation de Bonnet et Meurville doit être consultée.

Rappelons brièvement les grands traits hydrogéologiques. Dans le bassin du lac Tchad, les eaux souterraines d'importance régionale sont principalement représentées par deux systèmes aquifères :

- la nappe phréatique contenue dans les sédiments quaternaires sableux ou sablo-argileux, rarement argileux. Ces dépôts lacustres, fluviaux ou éluviaux forment la partie supérieure des « formations du Tchad » ; ils présentent une très grande variabilité horizontale et verticale de faciès. Selon les endroits, la nappe se trouve à une profondeur variant de quelques mètres à une cinquantaine de mètres. On peut la considérer comme présente sur l'ensemble du bassin. Elle est généralement assez peu minéralisée mais l'extension du bassin et la diversité géologique, notamment la nature continentale des dépôts, explique que la nappe présente des caractéristiques assez variables : la conductivité électrique varie entre 50 et 5000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; elle dépasse 1000

près du lac. Elle est abondamment exploitée par de nombreux puits (traditionnels ou cimentés) et par des forages (AEP ou irrigation) :

- la nappe pliocène, captive et souvent artésienne, autrefois dénommée nappe moyenne des « formations du Tchad », reconnue seulement dans la partie centrale du bassin. Atteinte à une profondeur généralement forte (souvent entre 250 et 400 m), elle est très exploitée au Nigéria. De nombreux forages, réalisés dans les années 60 et souvent en mauvais état, laissent s'échapper des volumes importants en pure perte. Cette nappe a une moindre extension géographique que la nappe phréatique. Son eau est beaucoup plus ancienne et beaucoup plus minéralisée (de 700 à 4000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Dans la partie habitée du bassin du lac Tchad, les argiles tardi-pliocènes séparant ces deux aquifères ont une épaisseur variant généralement entre 100 et 250 m. Elles témoignent d'une sédimentation lacustre monotone rarement entrecoupée de minces bancs sableux. Aucun échange hydraulique significatif n'y est donc possible en fonctionnement naturel. Dans la zone du Ténére, cet écran argileux pourrait s'amincir ; le rapprochement des piézométries des deux nappes pourrait être un indice de ce phénomène mais les coupes géologiques disponibles sont trop rares et trop schématiques dans cette région pour en être sûr.

En dehors de ces deux grands aquifères, il pourrait exister à plus forte profondeur d'autres niveaux captifs dont l'extension et les capacités sont très mal connues (Continental Terminal, Continental Hamadien et Intercalaire). Il s'agit probablement d'eaux fossiles très minéralisées qui ne pourraient servir, en recours ultime, qu'à quelques emplois très limités. Ces horizons auraient une charge hydraulique comparable à celle du Pliocène mais il est probable que les échanges avec cette dernière nappe sont nuls ou extrêmement faibles.

De petites zones non sédimentaires existent dans le sud du bassin. Elles ont généralement des ressources en eau beaucoup plus réduites et plus difficiles à exploiter. L'eau contenue dans les deux grands aquifères représente des volumes colossaux : Schroeter et Gear (1973) donnaient un chiffre « pessimiste » de 150 km³ pour l'eau de la nappe quaternaire dans tout le bassin ; le PNUD (1991) donnait une estimation supérieure pour le seul secteur nigérien du bassin. Cependant, la plus grande partie de ces réserves se trouve dans le nord du bassin où les besoins sont quasi-inexistants du fait de la densité particulièrement faible des consommateurs potentiels (hommes et troupeaux).

Dans de multiples endroits du bassin, notamment à proximité du lac, existent des dépressions piézométriques fermées dans la nappe phréatique ("nappes en creux"). Cette forme, fréquente dans l'ensemble du Sahel, indique des écoulements souterrains convergents vers le centre de la dépression et ne peut être expliquée que par un terme [infiltration-évaporation] négatif et par des caractéristiques hydrodynamiques très médiocres. Les plus marquées ont une surface piézométrique environ 40 m plus bas au centre que sur les bords.

En zone sahélienne, l'infiltration directe (percolation diffuse de la pluie au travers de la zone non saturée) est généralement très faible. C'est également le cas dans le bassin du lac Tchad où la recharge de la nappe phréatique est principalement due à l'infiltration à partir du réseau hydrographique, sous les cours d'eau, dans les zones inondables et en bordure du lac lorsqu'il est en eau. Parmi les nombreux indices disponibles de ces mécanismes, il faut citer :

- la piézométrie est généralement haute sous les rivières et baisse au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cours d'eau ;
- la coïncidence temporelle des niveaux hauts en rivière et dans la nappe à proximité ;
- la moindre salinité de la nappe à proximité des rivières ;

- la baisse de la nappe près du lac depuis l'assèchement de la cuvette nord ;
- la faible fluctuation de nappe depuis une trentaine d'années alors que les précipitations ont sensiblement varié.

Les eaux superficielles et celles de la nappe phréatique sont donc liées et tout aménagement de surface aura un impact certain sur la nappe quaternaire. Par contre, la nappe artésienne pliocène est indépendante des conditions hydrologiques actuelles (hors exploitation bien sûr).

4.2. Qualité des données disponibles

Actuellement, il existe un suivi piézométrique sur un nombre limité d'ouvrages au Niger et au Tchad. La fréquence des mesures est insuffisante pour déterminer la variabilité annuelle et éliminer les perturbations provoquées par les pompages. Dans la plupart des cas, il n'est pas possible de se fier aux essais de pompage qui ont été entrepris sur les puits et forages pour apprécier vraiment les caractéristiques hydrauliques des aquifères et donc leurs capacités de production. En effet, le mode de construction des ouvrages entraîne souvent des pertes de charge élevées et les essais de pompage ont rarement été réalisés dans des conditions satisfaisantes.

Les informations concernant les puits et forages sont archivées en base de données au Cameroun, au Niger et au Tchad. Le contrôle de leur qualité avant archivage est loin d'être systématique.

Il ne semble pas y avoir une grande attention aux problèmes de qualité de l'eau. Les analyses chimiques sont rares et pas toujours fiables. En milieu naturel, la minéralisation doit être étudiée tant pour la satisfaction de la consommation humaine (respect de normes de potabilité) que pour d'éventuelles utilisations agricoles (aptitude à l'irrigation). La pollution provoquée par les grands centres urbains (notamment N'Djaména et Maïduguri) doit faire l'objet d'une attention particulière.

Il n'existe pas actuellement de données fiables permettant de connaître le pourcentage de la population pouvant se procurer de l'eau sans risque pour sa santé dans des conditions d'accès (particulièrement d'éloignement) raisonnables.

La modélisation numérique des écoulements souterrains à l'aide de modèles hydrogéologiques est encore limitée (modélisation préliminaire au Niger, modélisation du Chari-Baguirmi et de l'ensemble du bassin) mais constitue une très bonne base de réflexion.

Les deux principales nappes du bassin, quaternaire phréatique et pliocène captive, contiennent d'énormes réserves d'une eau généralement de bonne qualité, disponible en toute saison sur l'ensemble du bassin. La faiblesse de leur renouvellement fait qu'elles sont peu sensibles aux fluctuations climatiques de courte durée (quelques années ou décennies).

4.3. Relations lac-nappe phréatique

Sur la base des études isotopiques réalisées dans les années 70 (Faure et al., 1970 ; Chouret et al., 1977 ; Roche, 1980), on pouvait noter quelques propriétés singulières du système extrêmement complexe de la nappe phréatique à la périphérie du lac :

- les eaux souterraines sont situées à une cote généralement plus basse que celle des eaux lacustres libres qui représentent un point haut du système. L'aquifère ne contient pourtant pas de grandes quantités d'eaux lacustres ;
- les transferts de pression, qui sont mis en évidence par les études d'hydraulique souterraine, ne correspondent en général pas à de grands transports de matière liquide. Les eaux sont peu circulantes ;
- les différentes parties du système apparaissaient à l'époque en équilibre (régime permanent) qui n'était pas encore sensiblement troublé par les années de sécheresse ;
- les variations de faciès salins sont à relier aux mouvements des solutions vers le haut en saison sèche, vers le bas de la surface phréatique en saison de mousson ;
- les eaux des dépressions piézométriques sont récentes et plus salées que dans le reste de l'aquifère, mais ceci ne concerne que la partie supérieure de la nappe.
- la migration des sels est caractérisée par une suite de "relais à sec" qui s'accompagne d'une évolution univoque caractérisée par une augmentation de la salinité globale et une perte en alcalino-terreux.

Ces interprétations étaient basées sur des observations et prélèvements en bordure immédiate du rivage tchadien du lac. Elles sont intéressantes mais doivent être mieux confrontées avec des observations hydrodynamiques ; de plus leur validité doit être vérifiée dans d'autres zones bordant le lac. La succession de dômes et de dépressions piézométriques très marquées sur de faibles distances implique d'un point de vue purement hydrodynamique de très médiocres valeurs de perméabilité, comme suggéré par les isotopes. Cependant, d'autres affirmations méritent d'être réexaminées. Ainsi, l'analyse des fluctuations piézométriques entre 1975 et 1990 dans le sud-est nigérien semble indiquer que la disparition du lac a provoqué une baisse de la nappe phréatique, ce qui est en contradiction avec certaines conclusions isotopiques. Ceci prouve bien qu'en présence d'une nappe à faible nervosité une observation ponctuelle ne peut avoir de signification que replacée dans une histoire et un contexte hydrogéologiques plus vastes.

Il reste donc encore de nombreuses études fondamentales à réaliser avant de prétendre bien comprendre et quantifier les mécanismes de la recharge de la nappe phréatique dans le bassin du lac Tchad. Une des composantes de cette connaissance est un suivi, hydrodynamique et hydrochimique, à long terme dont la durée et l'apparence routinière sont peu compatibles avec les ambitions de la plupart des projets mis en oeuvre dans la région.

4.4. Risques d'une surexploitation des réserves souterraines

Il convient de modérer l'optimisme qui pourrait venir à la seule lecture des estimations des réserves disponibles dans les différentes nappes du bassin comme par exemple au Niger oriental où les réserves estimées par le PNUD (1991) dépasseraient la centaine de milliards de m³ pour une consommation inférieure à 20 millions de m³ par an. Il faut en effet rappeler que la plus grande partie de ces réserves, quasiment fossiles, se trouve dans le nord du bassin où la demande en eau est insignifiante et que vaste quantité disponible ne rime pas forcément avec facilité d'exploitation.

Dans la nappe phréatique, les nombreuses dépressions piézométriques fermées sont autant d'indicateurs de très médiocre perméabilité et d'absence de recharge actuelle. Ces zones peuvent être complètement déséquilibrées par des augmentations, même limitées des prélèvements, alors qu'elles sont probablement moins sensibles aux variations climatiques telles que connues depuis un siècle. Le reste de la nappe phréatique reçoit

une infiltration faible : les caractéristiques hydrodynamiques y sont également plus fortes mais toujours relativement médiocres.

Ces paramètres physiques permettent une exploitation limitée et diffuse telle que pratiquée par les captages d'hydraulique villageoise ou pastorale. Par contre, dès que les pompages sont élevés et concentrés (grandes villes, gros périmètres irrigués), le risque de surexploitation locale est important.

Dans les zones où la nappe est à moyenne ou forte profondeur (plus de 20 m), une modification de la piézométrie (par variation des pompages ou de l'infiltration) aura peu d'influence directe sur l'environnement puisque les échanges avec la surface sont faibles et lents. Par contre, là où la nappe est proche de la surface, une variation de son niveau peut avoir un impact rapidement visible : un abaissement de nappe amène une diminution d'humidité dans le sol, pouvant se traduire par des moindres rendements agricoles ou la disparition de certaines espèces végétales ou animales ; une remontée peut provoquer des précipitations de sel dans le sol par augmentation de l'évaporation.

A l'échelle d'une région ou du bassin entier, la seule manière de quantifier les évolutions de la nappe est d'utiliser un modèle numérique représentant les écoulements souterrains. On peut ainsi simuler différentes contraintes naturelles (fluctuations du réseau hydrographique) ou anthropiques (prélèvements). Sans cet outil indispensable (cf pour plus de détails le paragraphe 6.2 plus loin) ne peuvent être données que des indications sommaires et évidentes.

La nappe pliocène contient des eaux très anciennes qui s'écoulent naturellement très lentement vers le Pays Bas du Tchad. La situation piézométrique actuelle est artificiellement provoquée par la multiplication des pompages et des écoulements artésiens non contrariés, notamment au Nigéria. Son évolution dépendra donc complètement des conditions de gestion que les autorités des différents pays décideront. Elle peut être très bien simulée par modélisation numérique grâce à un modèle autonome en profitant de la déconnexion hydraulique des deux nappes sur l'essentiel du bassin.

Le gaspillage de la nappe pliocène peut se produire de deux façons : d'une manière visible par écoulement artésien sans contrôle du forage, d'une manière discrète au travers des tubages corrodés par alimentation directe de la nappe phréatique.

La nappe pliocène est en général à très forte profondeur. Sa surexploitation n'aura donc pas d'impact direct immédiat sur l'environnement du bassin, sauf par exemple l'assèchement de quelques mares artificielles alimentées par le débordement des forages artésiens. La baisse de la charge hydraulique induite par la surexploitation nigériane provoquera à terme une économie relative de la ressource par baisse des débits artésiens s'écoulant en pure perte, donc un moindre gaspillage, et par augmentation des coûts d'exploitation, qui limitera financièrement les pompages.

5. BESOINS EN EAU ET ACTIVITES ECONOMIQUES

La littérature est assez abondante pour relater ces besoins ; elle est aussi très variée dans ses estimations et les bases de calcul utilisées sont imprécises. Ainsi Falkenmark (1989) évalue les besoins de la République du Tchad à 160 Mm³ dont 75 % pour l'irrigation et l'élevage ; Alanaye Djogromel (1992) évoque des besoins pour ce même pays de 220 Mm³ dont seulement 50 Mm³ pour le secteur irrigué... Plusieurs études commandées par le RAF/88 précisent ces besoins dans le détail pour le bassin conventionnel.

Les besoins des populations ont été calculés sur les données démographiques du bassin conventionnel d'avant 1994 d'un total de 8.8 millions d'habitants répartis comme suit :

- Tchad : 3 200 000 h. dont 75,4 % de population rurale ;
- Niger : 200 000 h. dont 77,6 % « » ;
- Cameroun : 2 400 000 h. dont 65 % « » ;
- Nigeria : 3 000 000 h. (% de la pop. rurale non connu).

Les effectifs du cheptel, en UBT (Unités de bétail tropical), sont passés de 3 900 000 en 1980 à 7 850 000 en 1992. Il y avait 4 700 000 têtes de bovins en 1972 et 6 870 000 en 1992 (+46 %). La population globale du cheptel a augmenté de 60 % en 20 ans.

Pour Paoletti et Lemoalle (1991) les besoins ont été estimés comme suit :

- besoins des populations (avec 15 % de population urbaine) 168 Mm³
- besoins du bétail 60 Mm³
- besoins de l'agriculture irriguée (réduite à 30 000 ha) 768 Mm³

soit un total de 988 Mm³,
valeur qui aurait pu atteindre 2,4 km³ si les 110 000 ha aménagés avaient pu être exploités.

Une projection sur 2020, avec la progression démographique et 30 % de population urbaine, donne des estimations des besoins humains de 500 à 640 Mm³, suivant que l'on considère ou non une augmentation de la consommation *per capita* de 30 % ; les besoins du bétail seraient de 77 Mm³ et l'irrigation de 220 000 ha nécessiterait 4,6 km³, soit un total de 5,2 à 5,4 km³.

En 1993, G.R. King *et al.* ont publié une étude très documentée sur les surfaces des périmètres existants et l'exploitation réelle de ces périmètres en 1992, en calculant les besoins pour les cycles agricoles de saison des pluies et de saison sèche (riz, maraîchage, blé, maïs...) :

Région	Consommation 1992	Besoins périmètres existants
Logone et Chari	240	460
Komadougou Yobé	134	380
Lac Tchad	86	1930
Total	460	2770 Mm ³

Avec les besoins humains et ceux du bétail, les besoins globaux se situent à l'heure actuelle et jusqu'à l'horizon 2000 à la hauteur de 3 km³/an pour une exploitation optimale de l'existant, dont 90 % pour les projets de grands périmètres irrigués.

Ces besoins doivent être mis en rapport avec les revenus des différents types d'activités. On a par ordre décroissant et par année moyenne (King, 1993) :

- Activités de la pêche 26,3 milliards de francs CFA
- Cultures de décrue 15,5 " (sans le Nigéria)
- Elevage, bétail 8,6 "
- Petite irrigation 6,3 "
- Grands projets irrigation 5,5 "

Les grands périmètres irrigués, en consommant potentiellement 90 % des besoins, concernent moins de 10 % de la richesse produite. Ce constat peut constituer un élément de hiérarchisation dans les priorités du développement ; dans le même sens, on doit souligner le coût énorme des grands aménagements envisagés ; mais à l'inverse, il faudrait connaître le poids réel de ces aménagements dans la recherche de l'autosuffisance alimentaire de la région.

La répartition des grands périmètres (Paoletti et al., 1991), donnée en annexe, peut être résumée comme suit :

Région	Tchad	Cameroun	Nigeria	Niger	Total (en ha)
Chari-Logone	15 800	13 300			29 100
Komadougou Yobé			13 550	3700*	17 250
Lac Tchad	1050		87 600		88 650
Total	16 850	13 300	101 150	3700*	135 000

* avec petits périmètres irrigués.

On voit que les 2/3 de ces périmètres ont pour source d'alimentation le lac Tchad et se situent principalement au Nigéria, avec des besoins en eau qui approchent les 2 km³/an.

On relève aussi chez Paoletti (1991) que les petits périmètres irrigués totaliseraient 12 000 ha (dont 7000 (?) dans la vallée du Mayo Tsanaga au Cameroun), soit environ 10 % des grands périmètres pour une richesse produite supérieure, le maraîchage étant d'un meilleur rapport (piment, oignons, gombo, etc.).

On a noté que moins du 1/5 des besoins en eau a été satisfait en 1992 ; mais c'est moins de 5 % des besoins qui ont été satisfaits à partir du lac ; malgré des apports de 20 km³ en 1991 et en 1992, qui ne sont pas les plus faibles de la période, les prises d'eau restant éloignées des surfaces en eau du lac.

Dans l'état de faible hydraulité du lac Tchad, des questions doivent être posées :

- **Faut-il optimiser l'exploitation des grands périmètres existants**, ou en projet, en assurant leurs ressources en eau à partir de la cuvette sud du lac, **en rallongeant les canaux de prise**, comme cela est envisagé, **au risque de réduire encore la cuvette sud et la réserve de biosphère** qu'elle constitue, **en favorisant le remplissage de la cuvette sud par des travaux d'endiguement du Logone et du Chari**, confisquant l'eau aux plaines d'inondation et **sacrifiant le Yaéré et ses réserves naturelles de faune, ses promesses de ressources halieutiques renouvelées, ou ses pâturages précieux** pour tous les grands troupeaux de la région ?

6. LES OUTILS POUR UN SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU

6.1. Les réseaux de mesure

Le réseau de **stations pluviométriques** est tenu par les différents services nationaux ou provinciaux des services météorologiques des Etats membres de la CBLT. Il est globalement opérationnel surtout pour les stations synoptiques, mais les données sont rarement exploitées si ce n'est dans la publication de bulletins agro-météorologiques permettant de situer l'évolution des campagnes agricoles. Sa densité peut être considérée comme acceptable mais des contrôles de la qualité des mesures et de l'appareillage en service devraient être faits plus fréquemment. Le lac Tchad n'est pas

suivi avec une densité de postes suffisante et on devrait envisager d'équiper certaines zones d'îles en appareils automatiques ou en pluviomètres totalisateurs comme cela a été fait il y a une vingtaine d'années afin de préciser la lame d'eau précipitée sur le lac.

Les **stations climatologiques** sont plus rares et leur importance est grande pour tout ce qui concerne le suivi des paramètres climatiques et en particulier de ceux qui permettent d'approcher au mieux l'évaluation de l'évapotranspiration. Là encore, il faut s'assurer de la bonne qualité des résultats et critiquer ceux-ci avant leur publication dans des annales.

La CBLT a pour mission de centraliser dans une base de données ces informations communiquées par les Etats. Il semble qu'actuellement cette mission ne soit pas pleinement remplie notamment à cause de l'hétérogénéité des bases de données nationales et des aléas de transmission de ces mesures à la CBLT.

Le suivi des eaux de surface des stations du **réseau hydrométrique** pose beaucoup de problèmes.

- le réseau du Niger ne comprend que peu de stations sur la Komadougou Yobé aval et la validité des relevés peut être sérieusement mise en doute (voir annexe 4) ;
- le réseau du Nigeria n'a pu être évalué par manque d'informations ; il serait surprenant qu'un suivi pérenne existe ailleurs que dans la gestion des ouvrages du haut bassin de la Komadougou Yobé ;
- l'ensemble du réseau hydrométrique du Cameroun est arrêté, faute de crédits de fonctionnements depuis environ 8 ans. Quelques informations ponctuelles sont acquises à l'occasion d'études spécifiques financées par des bailleurs de fonds, mais peu concernent le bassin du lac Tchad ; des équipes confirmées d'hydrologues (chercheurs et ingénieurs) existent et il serait relativement simple de redynamiser une brigade hydrologique dans le nord du pays ;
- selon certaines sources, des observations auraient été entreprises en Centrafrique grâce au projet RAF/84/007 sur le haut bassin du Chari et du Logone après de nombreuses années d'interruption. Nous ne sommes pas sûrs de la qualité et de la constance de ces mesures, le service hydrologique national ayant déjà beaucoup de mal à suivre un minimum de stations sur le bassin de l'Oubangui. ;
- seule la république du Tchad a conservé un réseau ramené à une quarantaine de stations dans un projet de réhabilitation et suit les principales stations du Logone et du Chari et le lac à la station de Bol quand celle-ci est en eau. Un projet de stations automatiques avec télétransmission par Météosat sur quatre stations principales pourrait être financé par la France en appui au dispositif actuel et dans le cadre d'HYCOS (WHYCOS) piloté par l'OMM. Mais le problème de l'étalonnage des stations se pose avec les fréquents détarages de basses-eaux ; les budgets de fonctionnement manquent pour aller sur le terrain.

L'expérience montre que les gouvernements sont peu enclins à supporter les coûts de gestion des réseaux hydrométriques, que les fonctionnaires de ces services, peu payés ou payés avec retard, sont peu disposés à s'investir dans ce type de travaux sans intéressement et moyens de fonctionnement adéquats. Les multiples expériences de réhabilitation de réseaux hydrologiques, avec le concours de l'aide internationale (PNUD-OMM, à travers AGRHYMET pour les pays du CILSS...) ou bilatérale (Coopération française et Orstom) ne survivent pas très longtemps à la durée des

projets : les formations techniques gratifiantes, acquises à l'étranger, sont peu souvent valorisées dans la pratique quotidienne de gestion des services hydrologiques.

C'est la raison pour laquelle **on s'oriente de plus en plus vers la gestion d'un réseau minimum d'observatoires permanents de l'environnement** qui est en bonne voie de réalisation au Tchad.

On a noté que le service hydrologique tchadien a une bonne compétence dans le traitement de l'information hydrologique et la gestion des banques de données, il gère lui-même son système d'annonce des crues et, si des moyens de fonctionnement corrects étaient attribués, on pourrait relancer les campagnes de terrain absolument indispensables.

Mais c'est sans doute à la CBLT de créer sa propre cellule hydrologique en fédérant les activités d'hydrologie des différents Etats, pour ce qui concerne le lac Tchad et son bassin, et en accueillant en détachement quelques ingénieurs de ces Etats, dont les compétences ont été identifiées par des évaluateurs indépendants, pour assurer la gestion des observatoires qui auront été retenus et la diffusion des banques de données. En intéressant la recherche universitaire des États-membres à l'exploitation scientifique et technique des données, la CBLT apportera un plus dans la sensibilisation des élites locales aux problèmes de l'eau et de l'environnement.

On ne peut prétendre gérer une ressource sans la connaître. Tant que l'action de l'homme se limite à une ponction tout à fait minime, il n'est pas nécessaire de disposer d'outils d'évaluation sophistiqués. Mais dès que l'on veut aménager, développer une région sans risquer de voir les infrastructures rendues inutiles par une dégradation imprévue de l'environnement, il convient de comprendre et quantifier les processus en jeu. De multiples projets, nationaux ou internationaux, ont été mal menés ou ont abouti à des échecs coûteux par simple méconnaissance de notions élémentaires d'**hydrogéologie** : il ne suffit pas d'être capable de payer un puits ou un forage pour prétendre maîtriser la nappe.

Dans le domaine des eaux souterraines où les "temps de réaction" des aquifères dépassent parfois la décennie, cela implique d'abord de disposer de réseaux d'observation fiables fonctionnant sur de longues périodes. Ces réseaux fournissent des données qui doivent être archivées efficacement et analysées finement. Si besoin est, ces informations sont introduites dans des modèles mathématiques permettant de reproduire le comportement actuel du milieu naturel et de prévoir son évolution face à différentes contraintes, naturelles ou anthropiques.

Même si ces recommandations ne paraissent pas du ressort immédiat d'un programme FME, elles doivent être mises en oeuvre impérativement. Leur prise en charge pourrait être le fait d'autres organisations internationales ou de coopérations bilatérales.

Un réseau de contrôle de la piézométrie de la nappe phréatique doit donc être créé ou, lorsqu'il existe déjà, soutenu. Cela implique de sélectionner des ouvrages représentatifs de l'aquifère, idéalement des ouvrages dédiés à l'observation ou, sinon, peu perturbés par les pompages. Le rythme des mesures doit être accordé à la dynamique des processus à étudier (par exemple augmentation de la fréquence de visite en saison des pluies ou en période de crue pour les points proches du réseau hydrographique). Les observations sont plus denses les premières années afin de mieux caractériser chacun des sites, le dispositif pouvant être allégé ensuite au vu des premières chroniques. À proximité du réseau hydrographique, des doublets ou triplets alignés selon une perpendiculaire à l'axe de recharge sont indispensables pour apprécier la géométrie des dômes piézométriques. Un tel réseau n'a de sens que s'il est stable à long terme.

Actuellement, un suivi piézométrique de la **nappe phréatique** est réalisé au Niger oriental grâce à des financements suisses : nous en ignorons la composition actuelle et la fréquence de mesure. D'après notre expérience passée, ce réseau ne couvrait que la partie sud du département de Diffa ; les mesures sont archivées mais non analysées.

Au Tchad, il existe des données piézométriques éparses antérieures à 1970. A partir de 1986, un réseau national a été reconstitué ; il comportait 66 piézomètres visités deux fois par an (Mott McDonald et al., 1992). Par manque de moyens, il tend à disparaître.

Au Cameroun et au Nigéria, rien n'existe.

On peut donc constater que, sur la plus grande partie du bassin du lac Tchad, les réseaux d'observation de la nappe phréatique sont inexistantes ou insuffisants. Le trop faible nombre de mesures dans le temps et dans l'espace ne permet alors pas de comprendre les processus en jeu ni de décrire les évolutions à long terme, comme l'impact de l'augmentation de la pression anthropique ou l'effet de la variabilité climatique. Tout un travail de critique doit être réalisé avant d'archiver les informations en base de données hydrogéologiques, ce qui nécessite une compétence hydrogéologique qu'on ne trouve pas dans toutes les administrations chargées du suivi piézométrique.

Pour la **nappe pliocène**, aucun dispositif n'existe pour le moment. Son régime actuel est beaucoup plus influencé par les prélèvements que par les conditions naturelles. La fréquence des mesures du futur réseau peut donc être bien moindre que pour la nappe phréatique. Par contre, là où l'artésianisme existe encore, il faut vérifier le bon état des tubages et disposer de matériel de mesure de pression adapté.

Cela implique de disposer de véhicules tout-terrain en bon état, de matériel fonctionnel (sonde piézométrique, conductivimètre, pH-mètre, GPS) et de personnel motivé.

Il est évident qu'existent dans le bassin de nombreux obstacles à la constitution et au maintien d'un réseau piézométrique : l'insécurité cyclique qui règne dans plusieurs régions et le dénuement financier ne sont pas les moindres.

En plus du suivi de routine de la **qualité de l'eau**, appréhendée au travers de la conductivité lors des tournées piézométriques, il serait utile de prévoir des analyses chimiques (ions majeurs) réalisées dans des laboratoires fiables pour vérifier la potabilité des eaux consommées. Dans tout le bassin, de très nombreux puits et forages sont pollués notamment par les déjections humaines et animales. En zone rurale cette contamination peut être combattue simplement à la fois par la sensibilisation et l'éducation des populations et des restrictions d'accès aux abords immédiats des ouvrages. Dans les grands centres urbains le risque chimique et bactériologique est beaucoup plus grave ; il faut alors un suivi détaillé et des mesures de protection beaucoup plus rigoureuses et coûteuses.

6.2. Les bases de données

Les données obtenues doivent être contrôlées et exploitées au fur et à mesure de leur acquisition, archivées en base de données et publiées. En hydrologie, des bases de données fonctionnent déjà au Cameroun, au Niger et au Tchad, avec une architecture identique pour les banques camerounaise et tchadienne (logiciels Hydrom et Pluviom de l'Orstom). Il ne devrait pas y avoir trop de problème pour assurer la cohérence de ces trois bases. Pour le Nigéria, il convient de vérifier la réalité d'un archivage informatisé ; en cas d'absence, il faudrait le créer au plus tôt selon un des modèles opérationnels dans les autres pays du bassin.

En hydrogéologie, des bases de données existent au Niger et au Tchad. Elles ne fonctionnent pas avec les mêmes logiciels mais des informations peuvent être échangées entre les deux systèmes sans trop de difficultés ; celle du Tchad est de conception et d'aspect plus modernes.

Il faut bien rappeler que la constitution d'une base de données ne se limite pas à la transcription des documents papiers sur un support informatique mais que cela implique une critique sévère des données qui ne peut en aucun cas être du ressort d'un opérateur de saisie mais doit être assurée par un hydrologue ou un hydrogéologue averti. Les insuffisances des bases actuelles montrent qu'un tel travail reste à accomplir, au moins en partie. Il n'est pas sûr qu'aujourd'hui tous les services nationaux disposent des compétences effectives pour réaliser ce travail de critique. Dans ce cas, il pourrait être envisagé la répartition suivante : le travail de collecte de l'information est assuré par les administrations nationales qui remplissent leurs bases de données ; les mesures sont transmises à un spécialiste qui centralise et exploite les données de l'ensemble du bassin et en restitue l'analyse aux fournisseurs primaires.

6.3. Les modèles numériques

Parmi les outils informatiques disponibles sur le bassin du lac Tchad on doit évoquer les **modèles mathématiques utilisés en hydrologie**. La CBLT dispose en particulier, depuis 1994, d'un modèle mathématique du comportement hydrologique du lac Tchad et des fleuves qui l'alimentent, baptisé **HYDROCHAD** et réalisé par Mott-MacDonald International. Ce modèle comprend un modèle hydrologique de production pluie-débit aux entrées amont du bassin et un modèle hydraulique de transfert des écoulements dans le réseau hydrographique et les plaines d'inondation. Il n'est pas encore complètement opérationnel à la CBLT et certaines approximations en limiteront sans doute l'utilisation, mais il constitue d'ores et déjà un outil précieux pour des simulations globales. Un autre modèle de conception plus modeste a été mis au point par l'Orstom pour assurer **la prévision des crues du Chari à N'Djaména à 10, 15 et 20 jours**. Ces deux modèles sont décrits en annexe 4.

La **modélisation numérique des écoulements souterrains** permet de mieux comprendre le fonctionnement d'une nappe, de pouvoir simuler l'impact de possibles modifications climatiques ou anthropiques. Pour l'instant, la nappe phréatique est l'objet principal des modélisations numériques. La nappe pliocène peut également être modélisée mais du fait de sa moindre exploitation (en nombres de captages comme en volumes extraits), cette entreprise ne représente pas une priorité dans la maîtrise raisonnée des ressources en eau souterraine du bassin du lac Tchad. Deux arguments militent en faveur de modélisations séparées :

- l'indépendance hydraulique des deux aquifères sur la quasi-totalité du bassin,
- le surcroît de lourdeur dans la définition et la manipulation d'un modèle bicouche non indispensable par rapport à deux modèles autonomes qui respecteront mieux les spécificités d'extension et de fonctionnement des deux nappes.

Par contre, il est nécessaire de réaliser rapidement une véritable modélisation numérique des écoulements dans l'ensemble de la nappe phréatique avec une qualité et une précision suffisantes pour en faire un outil de gestion opérationnel. Ceci requiert un processus d'allers et retours réguliers entre l'acquisition des données de terrain et la modélisation : les données nouvelles permettant d'affiner le modèle et le modèle désignant des zones sensibles qui méritent des compléments d'investigation. La modélisation numérique est d'autant plus facile à réaliser que les données nécessaires

seront facilement accessibles et manipulables grâce à un archivage en base de données performant.

A notre connaissance, il existe déjà trois modélisations qui intéressent le bassin :

- la modélisation de la nappe phréatique du Niger oriental en 1991 dans le cadre du projet PNUD DCTD NER86001 ;
- la pré-modélisation de la nappe phréatique et de la nappe pliocène sur l'ensemble du bassin (Eberschweiler, 1993) ;
- la modélisation de la nappe phréatique du Chari-Baguirmi (Bonnet et Meurville, 1995).

La modélisation du Niger devra être affinée en complétant et actualisant les données disponibles. Elle a été réalisée uniquement en régime permanent, ce qui paraît raisonnable au regard des évolutions lentes de la piézométrie et des prélèvements constatés dans le secteur. Une modélisation en régime transitoire sera utile si l'on veut détailler les relations entre la Komadougou et la nappe, par exemple apprécier l'impact de la diminution de la crue de la rivière. La bonne reproduction de la piézométrie et les quantifications des différents termes du bilan hydrique, concordantes avec les estimations proposées ailleurs, laissent penser que le modèle est opérationnel.

La modélisation de l'ensemble du bassin comporte en fait deux modèles indépendants : celui de la nappe phréatique et celui de la nappe pliocène puisqu'on estime que les deux aquifères sont presque partout indépendants. Cela représente un très gros travail très utile. Il est évident qu'il ne s'agit pas là de l'outil définitif qui permettra de tester tous les scénarios climatiques ou d'aménagement. Des incertitudes pèsent sur les données utilisées, certaines schématisations sont discutables (comme le choix d'un mur de la nappe phréatique horizontal uniforme sur l'ensemble du domaine) et les conditions de calage ne sont pas toujours explicites. Il s'agit pourtant de la première étape fondamentale vers la gestion intelligente des ressources en eaux souterraines à l'échelle du bassin.

La modélisation du Chari-Baguirmi est, comme les autres, très dépendante de la qualité des données disponibles. Elle est bien réalisée et le rapport didactique. Elle reconstitue de manière satisfaisante la piézométrie et permet d'évaluer l'évolution de la nappe dans les prochaines années, en particulier dans la région de N'Djaména.

Ces modélisations déjà entreprises illustrent parfaitement ce qu'il faut concevoir comme outils de modélisation hydrogéologique :

- un modèle de l'ensemble du bassin qui permet de représenter les processus fondamentaux et d'apprécier les tendances régionales à long terme. Le modèle général, de par sa taille, ne peut résoudre des problèmes ponctuels. Les deux principaux aquifères importants du bassin (nappe phréatique, nappe pliocène) doivent impérativement être modélisés ;

- des modèles locaux pour répondre à des interrogations plus spécifiques (impact d'un barrage, forte croissance de la demande des villes, développement de périmètres irrigués). Ils s'appuient sur les résultats du modèle général mais leur taille et les données requises pour leur mise au point sont adaptées à la question posée.

Il faut être extrêmement attentif aux conditions imposées dans le modèle et à la fidélité de représentation des processus naturels. Même si un modèle ne peut jamais représenter le milieu dans toute sa diversité, les schématisations imposées dans le modèle ne doivent jamais déformer outrancièrement la réalité. De plus, après avoir testé différentes simulations, il faut nécessairement vérifier la compatibilité des résultats avec les hypothèses initiales.

La modélisation des écoulements souterrains est une tâche lourde qui doit être confiée à un expert possédant des compétences avérées en hydrogéologie, pour comprendre et schématiser intelligemment les mécanismes en jeu, et en modélisation numérique, pour

pouvoir maîtriser l'outil et le faire évoluer. Actuellement, un tel profil est exceptionnel dans le bassin du lac Tchad (peut-être une personne à la DHA de N'Djaména, dont il faudrait compléter l'expérience).

La structure "naturelle" d'accueil du modèle général semble être la CBLT. Les modèles régionaux pourraient par contre être abrités soit dans leur zone d'application soit regroupés au niveau du bassin. L'impossibilité de trouver dans chacun des états concernés les compétences nécessaires pour réaliser les modèles et les faire fonctionner milite plutôt en faveur de la deuxième proposition.

On doit cependant rappeler encore une fois que la fiabilité d'une modélisation numérique est directement dépendante de la qualité des données de base. Il faut tout d'abord identifier et mesurer les processus hydrogéologiques en jeu dans le bassin (il n'est pas sûr du tout que les mêmes mécanismes interviennent en bordure saharienne ou en limite de la forêt centrafricaine) ; ceci exige un très gros travail de terrain mené par des hydrogéologues confirmés. Ces compétences sont-elles disponibles partout dans le bassin ?

6.4. Imagerie satellitaire

La télédétection constitue déjà un outil de choix pour les chercheurs dans l'étude du lac Tchad et de son bassin ; de nombreux laboratoires de par le monde s'intéressent à l'évolution de cette zone humide et il devrait être possible de formaliser davantage, dans le cadre de la CBLT, l'acquisition d'images SPOT et leur exploitation, en choisissant pour un suivi régulier une zone de référence qui pourrait être la cuvette sud du lac. Les moyens et compétences en télédétection et traitement d'images semblent être nombreuses (au moins CBLT et CNAR à N'Djaména, Agrhymet à Niamey) et pourraient permettre par exemple un suivi temporel fin des zones inondées, des cultures, etc.

Deuxième partie : Scénarios, risques éventuels et recommandations

1. GÉNÉRALITÉS

Les données les plus récentes (Olivry *et al*, 1996) et les analyses faites sur « les fleuves malades d'Afrique » (voir annexe 3) permettent de situer le devenir de l'hydrosystème du lac Tchad à trois niveaux :

Le premier niveau est celui de la « **mémoire du lac** ». S'il a fallu plusieurs années déficitaires pour arriver à son quasi-assèchement, quelques années moyennes des apports du Chari ou deux années exceptionnelles consécutives suffiraient en termes de bilan à redonner au lac sa physionomie que l'on a connue jusqu'en 1970. Une crue du Chari de 52 km³, déjà observée, est nécessaire pour que l'on observe un plan d'eau unique au stade de Tchad « normal », au maximum des eaux en janvier ; pour que ce plan d'eau unique persiste toute l'année (cote supérieure à 280,8 m en janvier), deux crues importantes successives sont nécessaires et une telle remise en eau s'est déjà produite deux fois depuis le début du siècle. La « mémoire du lac » est donc suffisamment courte pour ne pas condamner irrémédiablement celui-ci à son stade d'assèchement avancé.

Le deuxième niveau est celui de la **persistance, ou non, de la dégradation du climat** de la région ; l'évolution climatique des prochaines décennies constitue le moteur principal de l'évolution possible du lac. Le regain des précipitations dans les années les plus récentes ne signifie pas qu'il y a eu renversement de tendance mais peut aussi indiquer que le pessimisme n'est pas de rigueur.

Le troisième niveau est celui de la « **mémoire du fleuve** ». On a dit (voir annexe 3) que l'appauvrissement des ressources fluviales résultait à la fois de la crise climatique subie par les bassins fluviaux et de l'effet cumulé des déficits pluviométriques sur les réserves aquifères des hauts bassins participant aux écoulements de base, ce qui conduit à une minoration durable de la ressource.

C'est la conjugaison des deux derniers niveaux qui est déterminante pour l'avenir hydrologique du Chari et du lac Tchad. Plusieurs scénarios sont possibles :

1°/ Poursuite ou aggravation de l'état de sécheresse : les processus mis en évidence sont exacerbés, les fleuves cesseront rapidement d'être pérennes en saison sèche ; on s'orienterait vers des régimes hydrologiques sahéliens ou subdésertiques et à long terme aux réseaux hydrographiques fossiles du Sahara. Mais rien dans les scénarios du réchauffement global et de l'effet de serre ne va dans le sens de telles modifications climatiques dans la région ;

2°/ Apparition d'une longue période humide, comparable en durée à la période déficitaire actuelle: un retour progressif aux basses eaux antérieures est prévisible, avec une abondance retrouvée des ressources au terme de dix ou quinze ans de récupération (modules et crues) ;

3°/ Reprise épisodique de précipitations excédentaires alternant avec de nouveaux épisodes secs : de la durée de ceux-ci dépend une stabilisation du niveau de dégradation hydrologique avec un appauvrissement durable des ressources de saison sèche et plus globalement des modules et crues, tels qu'on les a observés dans ces dernières années.

Sans s'attarder aux conséquences du scénario le plus pessimiste, il convient de souligner que **l'occurrence d'une situation médiane conduit à pérenniser la dégradation du régime hydrologique** des fleuves de la région et que, dans la perspective la plus optimiste, les effets de la sécheresse actuelle se feront sentir encore pendant de longues années.

Il paraît donc raisonnable de considérer que les actions intégrées de gestion de la ressource en eau du bassin du lac Tchad doivent s'appuyer sur l'hypothèse d'un niveau de ressources aléatoire autour du niveau moyen des 25 dernières années.

Cela signifie que l'on doit tabler sur des **apports moyens du Chari de l'ordre de 20 km³**, sur un remplissage médiocre de la cuvette sud du lac, un franchissement très aléatoire de la Grande Barrière avec alimentation très limitée et peu durable de la Cuvette Nord du lac, une inondation nulle à moyenne du Grand Yaéré, des écoulements nuls ou modestes de l'El Beïd et pratiquement nuls sur les biefs aval du Yedseram et de la Komadougou Yobé.

L'évaluation statistique du risque de défaillances de la ressource doit alors être faite sur les chroniques hydrologiques acquises depuis 1970.

Dans le même ordre d'idées –et même si les chroniques météorologiques disponibles en de nombreux points depuis le début du siècle et les multiples recherches traitant du climat sahélien permettent de bien cerner ses caractéristiques fondamentales en rendant possible, malgré la très forte variabilité, l'évaluation du risque d'occurrence d'événements rares– les études climatologiques doivent être actualisées, en termes de statistique, sur la période actuelle en partant du principe qu'il y a eu rupture climatique vers 1970.

Ces nouvelles chroniques ne doivent cependant pas reléguer l'occurrence d'événements « forts » à des fréquences de retour improbables. La notion de **risque d'événements catastrophiques** comme les très fortes crues du Chari doit être établie sur une prédétermination basée sur l'ensemble des chroniques disponibles, afin de ne pas être minimisée.

Dans les conditions climatiques que l'on connaît, il va de soi que **la pression anthropique a des conséquences graves pour l'environnement des populations du lac et des basses plaines**. Les dégradations ont déjà été inventoriées qu'il s'agisse de la surexploitation des stocks halieutiques dans les zones refuge des espèces piscicoles, de la disparition de nombreuses espèces arbustives dans de larges espaces autour des villes (bois de chauffe), ou dans des zones où le niveau piézométrique a trop baissé pour assurer leur survie, de la surcharge des troupeaux sur des pâturages réduits, de la réduction de la faune et de la disparition de certaines espèces, ou encore de la surexploitation des réserves souterraines ou des débits d'étiage.

Mais **cette pression anthropique n'est en rien responsable de l'évolution climatique de la région** ; il n'est même pas prouvé aujourd'hui que l'augmentation de l'effet de serre global, probablement d'origine anthropique, est en relation avec la sécheresse au Sahel.

Sur les hauts-bassins, différentes études utilisant la télédétection ont montré qu'il n'y avait **pas de modification significative du couvert végétal** susceptible d'augmenter l'érosion des reliefs ou de modifier au niveau des surfaces réceptrices les paramètres du cycle de l'eau. Les densités de population y sont très faibles et les régions très éloignées de centres urbains pouvant surexploiter les ressources ligneuses.

2 / LES ALTERNATIVES

Y a-t-il des alternatives envisageables pour diminuer la péjoration du climat du Sahel ?

Il convient d'évacuer un certain nombre d'idées qui reviennent périodiquement dans la littérature :

- **l'idée d'une ceinture verte** pour arrêter le désert a fait l'objet de recommandations à Nairobi en 1977. On peut fixer des dunes dans des zones sensibles par une végétalisation d'espèces appropriées, mais ce n'est pas une ceinture verte qui arrêtera l'aridité du climat ; en outre, des plantations d'arbres à cette échelle supposent une exploitation intensive des réserves souterraines non renouvelables : phréatiques, leur niveau baissera, hors d'atteinte pour la flore naturelle résiduelle ; pliocènes, elles risquent de ne plus alimenter les oasis des Bas-Pays de l'est du Tchad. Quant aux microclimats supposés, ils doivent être réservés aux espaces verts des villes et villages ;
- **la diminution de l'évaporation** peut être envisagée par une modification des pratiques culturales sur les espaces cultivés (paillage des sillons avec les adventices, binage fréquent des sols encroûtés pour favoriser l'infiltration, économie des eaux d'irrigation), mais certainement pas par la construction de haies vives qui consommeraient plus d'eau que le pouvoir desséchant de l'harmattan ;
- **les pluies artificielles ou provoquées**, déjà évoquées dans les expériences plutôt décevantes réalisées en Afrique de l'Ouest, n'ont de toutes façons pas vocation à résoudre les problèmes des précipitations déficitaires d'un bassin comme celui du Tchad.

Y a-t-il des alternatives pour mieux maîtriser la ressource en eaux de surface disponible ?

Celles-ci sont évidemment liées à l'usage que l'on veut faire de la ressource. La préoccupation majeure des gouvernements paraît être de favoriser l'alimentation de grands périmètres irrigués (polders de Bol, South Chad Irrigation Project) en augmentant autant que possible le remplissage du lac Tchad ou les débits de basses eaux des cours d'eau.

- On peut, par exemple, **recupérer les volumes qui partent par évaporation** dans les plaines d'inondation du Chari et du Logone **en supprimant les débordements par un endiguement** total de ces cours d'eau (voir annexe 4). Le gain pour le lac ne correspond pas au bilan d'évaporation de ces plaines qui inclut aussi les apports précipités qu'elles reçoivent, mais il est loin d'être négligeable comme on l'a vu pour le Logone. Cet apport complémentaire au lac contribue avant tout à augmenter sa surface

évaporante et prive d'eau des zones économiquement importantes comme le Grand Yaéré ou la vallée de l'El Beïd.

- On a aussi envisagé la **construction de grands réservoirs à l'amont sur la Pende et la Vina-Nord**, pour régulariser les crues et donc diminuer les débordements dans les plaines, mais surtout pour restituer un stockage d'environ 7,8 km³ pendant la saison sèche afin de **soutenir les débits de basses eaux** à des fins d'irrigation en contre saison. Outre que ces lacs de retenue ajoutent au bilan général une perte supplémentaire par évaporation, on revient au même cas de figure que précédemment pour les plaines à l'aval.

- On peut aussi **fermer les seuils d'Eré et de Dana** et supprimer les pertes qui alimentent le Mayo Kébi, affluent de la Bénoué, et les lacs de Léré, Fianga et autres, mais cette partie tchadienne du bassin du Mayo Kébi, densément peuplée, (le Bec de Canard), fait partie intégrante du bassin conventionnel du lac Tchad.

Gérer la pénurie hydrologique ne paraît donc pas très simple et doit tenir compte d'un certain nombre de contraintes qui sont évoquées plus loin pour les différentes régions diagnostiquées touchées par d'éventuels aménagements.

Y a-t-il des alternatives pour mieux gérer l'exploitation des eaux souterraines ?

- **La préservation des zones humides** en est une.

Dans le bassin du lac Tchad, les zones humides (lac, Yaérés, lits majeurs des cours d'eau) n'occupent qu'une surface très réduite. Elles sont cependant très importantes pour les échanges entre le réseau hydrographique et la nappe phréatique d'une part, pour le maintien de la diversité biologique d'autre part.

Les zones d'épandage de crue sont fondamentales pour la recharge de la nappe, ainsi que le montre l'allure des courbes piézométriques. Cependant, il n'existe qu'un nombre limité d'informations détaillant l'infiltration dans ces zones. Ainsi, à notre connaissance, aucune étude hydrogéologique n'a quantifié la réalimentation à partir des Yaérés ; leur rôle exact ne peut alors être appréhendé que par analogie avec les secteurs du bassin où les phénomènes sont mieux observés.

Avant de décider quelque aménagement que ce soit, il conviendra donc d'entreprendre des études hydrogéologiques ; en attendant, il est prudent de considérer ces milieux comme essentiels et fragiles. Par exemple, l'endiguement du Chari et du Logone se traduirait bien sûr par un plus fort apport au lac (dont une partie serait aussitôt reperdue en évaporation) mais aussi par une baisse de la nappe et des risques sérieux pour l'alimentation de N'Djaména ; il n'est pas certain que le gain en écoulements de surface compense la perte en eau souterraine.

- **L'exploitation des aquifères peut être optimisée.**

L'alimentation en eau du bassin du lac Tchad est principalement assurée par les écoulements de surface en provenance du sud. Comme il n'est pas possible de prévoir l'évolution climatique des prochaines années ou décennies, il convient de considérer la situation actuelle comme une donnée durable. L'augmentation de la population implique une augmentation de la consommation d'eau, directement pour son alimentation en eau potable et indirectement pour la production de sa nourriture. Le stock disponible dans le bassin (superficiel et souterrain) a été mis à mal par les

sécheresses répétées. Il constitue une ressource limitée qu'il convient de gérer au mieux. En dehors d'un hypothétique transfert d'eau depuis un autre bassin hydrologique, les stratégies sont à développer selon plusieurs axes :

- * éviter les gaspillages comme, par exemple, dans l'agriculture, en remplaçant les cultures irriguées actuelles par d'autres productions moins exigeantes en eau et plus adaptées aux conditions climatiques. Par ailleurs, la réfection des tubages des vieux forages artésiens captant le Pliocène et leur équipement avec des vannes permettrait de très importantes économies ; ceci devrait s'accompagner d'une éducation et responsabilisation des populations et de leurs administrations ;
- * optimiser la gestion des ressources actuelles en disposant d'outils fiables et robustes.

Le remplacement des actuelles cultures de nombreux périmètres irrigués par des productions agricoles plus cohérentes avec leur environnement est indispensable. Le bon sens, qui a si souvent fait défaut dans la gestion des ressources naturelles lors des dernières décennies, et les études réellement scientifiques montrent que le bassin du lac Tchad est un milieu particulièrement fragile. Mieux vaut reconnaître les erreurs d'aménagement avant qu'il ne soit trop tard. Cette remise en cause des grands projets d'irrigation semble maintenant acceptée, au moins dans son principe (cf Plan directeur CBLT 1992).

L'analyse des données hydrogéologiques montre que **les ressources en eau souterraines**, même immenses, **sont fragiles**. Comme il n'est pas possible de compter sur une amélioration climatique à brève échéance, la seule manière de pourvoir à une augmentation sensible de la consommation en eau dans le bassin du lac Tchad serait d'opérer un transfert d'eau depuis un autre bassin.

3 / LES CONTRAINTES

3.1 Les eaux internationales

On a successivement du nord au sud :

- **La Komadougou Yobé aval**, frontière sur environ 150 km entre le Niger et le Nigeria, avec des ressources à ce niveau même pas suffisantes pour recharger valablement la nappe souterraine commune aux deux pays. Le niveau d'aménagements du bassin amont est tel, avec un rapport de populations Niger/Nigeria tellement déséquilibré, qu'il paraît peu probable de voir **restituer à l'aval un débit minimum garanti raisonnable**.

- **L'El Beïd**, fleuve frontière sur environ 50 km entre le Nigeria et le Cameroun, draine le Grand Yaéré camerounais alimenté pour l'essentiel par le Logone. **Son débit dépend du niveau de crue atteint par le Logone**. La retenue de Maga au Cameroun (Semry II) a souvent été incriminée dans la baisse d'hydraulicité de l'El Beïd, mais le prélèvement sur le Logone ne dépasse pas 1 % du volume écoulé et se situe au moment de la crue ; le stockage d'une partie des apports des Monts Mandara doit être aussi relativisé, puisque ceux-ci dans la période actuelle n'excèdent pas 0,4 km³. Le partage des ressources doit être envisagé entre les riverains des deux pays et le remplissage de la petite cuvette sud-ouest lorsque celle-ci est isolée de la grande cuvette sud.

- **Le Chari aval**, entre N'Djaména et le delta, frontière naturelle du Cameroun et du Tchad, assure le transfert au lac de la majorité des apports. Les prélèvements sont

limités et le partage de ces eaux ne pose pas de problèmes. A noter que le Serbewel, effluent du Chari à l'aval de Kousséri, est entièrement camerounais.

- **Le Logone à partir de Bongor** constitue la frontière naturelle entre le Cameroun et le Tchad. Les grands périmètres irrigués sont encore limités par rapport aux ressources disponibles, d'autant qu'ils ne sont pas tous fonctionnels, et leur alimentation ne prend qu'une faible part des eaux qui transitent dans le Logone, sauf en basses eaux où des débits minimums doivent être garantis vers l'aval et la grande culture irriguée proscrite.

- **Les eaux du lac**, lorsqu'elles sont **réduites à la cuvette sud** et compte tenu des frontières qui ont été établies sur le lac Tchad, se partagent entre le Cameroun pour une petite part et le Tchad pour l'essentiel. La question de l'utilisation de ces eaux devra être posée et surtout limitée en volume si on veut sauvegarder **un sanctuaire environnemental**, promesse d'une conservation de la faune et de la flore qui conditionne largement le futur des ressources du lac

3.2. Le contexte socio-économique

On a déjà abordé dans le chapitre 5 de la première partie ces aspects. Sans préjuger des analyses qui sont faites par ailleurs par des spécialistes en socio-économie, nous voulons seulement dégager ce qui à notre sens doit constituer des priorités pour une gestion intégrée des ressources en eau du bassin. Ces réserves étant faites, on a le classement suivant :

- **satisfaction des besoins humains** (eaux de surface et eaux souterraines), consommation d'eau par les populations ; cela ne pose pas de réels problèmes et les financements pour améliorer cette fourniture en milieu rural comme en milieu urbain sont là pour le montrer. Cette priorité peut s'exercer dans certains cas aux dépens des agriculteurs (grandes villes comme Kano) ;
- **soutien et sauvegarde des activités de la pêche**. Cela concerne 50 000 pêcheurs et cinq fois plus de personnes dans la commercialisation du poisson, aussi bien des Tchadiens que des Camerounais ou des Nigériens, par des circuits complexes existants entre les 3 pays (le Niger étant malheureusement hors-jeu dans la période actuelle). Les régions diagnostiques concernées sont les plaines d'inondation du Logone et Chari dont le Grand Yaéré (frayères et nurseries) et bien sûr le lac lui-même. Les relations établies entre la production halieutique et le maximum de la crue du Chari sont très nettes. De plus cette activité ne consomme pas la ressource en eau ;
- **soutien et sauvegarde des activités d'élevage** et de ses zones de repli en saison sèche dans le Grand Yaéré notamment en maintenant ses ressources fourragères liées à son inondation et à l'ampleur de la crue du Logone. Cela concerne des troupeaux venant des quatre pays riverains du lac. Il faudra veiller à ce que ces activités n'entraînent pas de surcharge sur les pâturages ;
- **développement des cultures de décrue traditionnelles** bien évidemment liées à l'ampleur et à la durée de la crue le long des biefs fluviaux et dans les bas-fonds ;
- **développement limité de la culture irriguée** en privilégiant la petite irrigation paysanne par rapport aux grands périmètres agro-industriels et en modulant les surfaces exploitées et le type de culture suivant les disponibilités du moment.

De cette énumération, il ressort qu'au plan économique et au plan environnemental, deux régions diagnostiques ressortent clairement: le lac réduit à sa cuvette sud et le

Grand Yaéré. Le paramètre important au plan hydrologique est la crue du Logone et du Chari. Ceci n'est pas bien nouveau en soi, mais implique quand même que **la crue doit être sauvegardée à son état naturel sans autre aménagement qui pourrait modifier le fonctionnement de l'hydrosystème.**

Le problème qui demeure n'est pas mince puisque l'occurrence d'observer de bonnes crues est relativement faible. Sans modifier le fonctionnement de l'hydrosystème, il faut envisager, en appoint aux ressources du bassin, des apports extérieurs.

4./ LA SOLUTION DES TRANSFERTS D'EAU

4.1. Les transferts au Nigeria

Des transferts sont en projet au Nigéria, d'une part vers les rivières Ngadda et Yedseram, à partir de la rivière Hawal, affluent de la Gongola, tributaire elle-même de la Bénoué, et d'autre part vers la Komadougou Gana, affluent de la Komadougou Yobé, à partir de la Gongola supérieure par le barrage de Dindima.

Dans le cas du transfert d'apports de la rivière Hawal, les prévisions portent sur un volume de $0,82 \text{ km}^3$ et un débit moyen de $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous n'avons pas de précisions sur le transfert vers la Komadougou Yobé. La contribution de ces apports au lac Tchad peut être considérée comme négligeable compte tenu des projets d'irrigation associés. Ces projets devraient rester une affaire intérieure du Nigéria, sauf si ces apports devaient compenser sur la Yobé une partie des débits exploités sur son haut-bassin et alimenter les eaux internationales communes avec le Niger. Il convient sans doute d'approfondir l'analyse du rapport national du Nigeria sur le sujet.

4.2. Le projet TRANSAQUA

Pour gigantesque que soit ce projet, cette « idée pour le Sahel » conçue par Bonifica (1991), bureau d'études italien, mérite d'être développée. Le projet propose le transfert au bassin du Tchad de 100 km^3 par an, soit un débit moyen de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$, **à partir du bassin du Zaïre** qui ne perdrait, il est vrai, que 8 % de son module interannuel, par un canal de 2400 km dont 1600 km au Zaïre. Ce canal recouperait les bassins supérieurs d'affluents zaïrois et centrafricains, jusqu'à la ligne de partage des eaux Zaïre-Tchad, auxquels il prendrait une bonne partie des ressources (superficie du bassin coupé par le canal: $220\,000 \text{ km}^2$; altitude de départ du canal à 900-950 m ; canal de navigation de 100 m de large sur 25 m de profondeur, etc.). Les eaux ayant rejoint le bassin supérieur du Chari pourraient fournir dans divers aménagements hydroélectriques de 30 à 35 milliards de kilowatts et serviraient à l'irrigation de 7 millions d'hectares dont une partie dans les Bas-Pays du Tchad.

Séduisant par son aspect monumental, le projet l'est moins par les coûts prévisibles d'une telle réalisation, qui dans les décennies à venir restera sans doute du domaine de l'utopie. Il aurait en outre des **impacts sur l'environnement** dont on n'a pas commencé à faire l'inventaire et qui risquent d'être très sérieux: appauvrissement de l'Oubangui, charge organique des eaux équatoriales dans les eaux du Chari, reprise d'érosion fluviale dans le lit du Chari et éventuel comblement de la cuvette sud du Lac, introduction de nouvelles espèces de poissons risquant de détruire l'équilibre de la ressource halieutique existante, etc.

4.3. Transfert d'eau de l'Oubangui vers le Chari

Après TRANSAQUA, ce projet paraît plus réaliste ; il n'en est pas moins très important et supposera de lourds investissements. Il s'agit de transférer de 300 à 500 m³/s de l'Oubangui à l'amont de Bangui grâce à un barrage sur le fleuve, puis à un canal de 70 km et à un pompage sur 250 m de dénivelée pour atteindre la ligne de partage des eaux et s'écouler ensuite naturellement par la rivière Fafa, affluent de l'Ouham et du Chari, avec production d'électricité pour assurer le pompage. Le volume du transfert serait donc suivant la gamme retenue de 9,6 à 16 km³/an.

Ce projet, sur des propositions de la Nigerian Electric Power Authority (NEPA) étudiées par Mott-MacDonald Int., prévoit aussi une alimentation par le Zaïre en reliant celui-ci à l'Oubangui par un canal de 170 km, puis de relier par un autre canal le Chari au Logone afin d'alimenter le Mayo Kébi (puis la Bénoué).

Un projet de préfaisabilité devrait être retenu sur ce projet avec des objectifs qui concernent réellement le bassin du Tchad et pas seulement la production d'électricité (aménagement des chutes Gauthiot sur le Kébi, par exemple). Sans forcément aller rechercher les ressources sur le Zaïre, avec le coût supplémentaire que cela implique, le projet devrait s'attacher à bien préciser l'usage qui sera fait de l'eau et par suite le calendrier des prélèvements sur l'Oubangui qui doivent tenir compte en saison sèche des opportunités de soutien à ses basses eaux pour permettre de prolonger dans la saison ses relations de navigation fluviale avec le fleuve Congo-Zaïre. Les ressources en eau de l'Oubangui ont également baissé avec les déficits pluviométriques (voir études Orstom) et, sur les dix dernières années, les débits moyens de mars et avril sont inférieurs à 500 m³/s. En revanche, les débits de juillet à décembre sont supérieurs à 2500 m³/s.

Nous avons bien mis en évidence dans ce qui a précédé (paragraphe 3.2 notamment) que ce qui importait le plus dans la gestion de la ressource, en accord avec le développement durable et l'environnement, c'était **le soutien à la crue annuelle du Logone et du Chari**. Le projet le permet, conjonction favorable avec les débits de l'Oubangui, en retenant l'option canal Chari-Logone, en assurant une alimentation complémentaire à ces fleuves, au Grand Yaéré, à l'El Beïd et au lac.

5 / RECOMMANDATIONS

5.1. Réseaux de suivi du milieu physique et observatoires de l'environnement

Des recommandations ont déjà été faites au chapitre 6 de la première partie sur les **réseaux météorologiques, hydrométriques et piézométriques**. De nombreux projets ont défini les normes et les coûts de tels réseaux ; on peut trouver de telles références dans le Water Assessment des pays de la CBLT (1992) qui pourraient servir à une redéfinition des objectifs, plus conforme à ceux que prévoyait cette présente expertise dans le cadre du FME. Ces réseaux, ce suivi, sont indispensables pour une approche toujours plus précise des fonctionnements du système Tchad et de sa modélisation. Les bases de données acquises seront largement diffusées.

Au plan de l'environnement mondial, le lac Tchad constitue une entité unique et originale qu'il convient de mieux connaître, pour mieux la protéger. Dans ce but, il est très important de prévoir un **observatoire de l'environnement lacustre** au coeur de la cuvette sud au site de l'île de Kalom où une station limnigraphique a longtemps été suivie par l'Orstom et la DREM. Il faut prévoir une station sur pilotis avec mesures complètes de climatologie et mesures hydrologiques et hydrochimiques (On peut aussi prévoir une station flottante du type bac, comme l'épave du bac Kousséri-N'Djaména qui pourrait être renflouée). Cette station devra être gardée (relève du gardien tous les 15 jours), reliée à la CBLT par radio et équipée en moyens de télétransmission satellite des informations scientifiques.

5.2 Suivi environnemental des zones humides

Outre le lac, le Yaéré, les vallées fluviales (Chari, Logone, El Beïd et Komadougou Yobé) doivent être suivis en termes d'écologie, de biodiversité et d'insertion des activités humaines dans le milieu. Les dégradations doivent être inventoriées et des solutions doivent être trouvées pour une meilleure conservation des zones humides (faune et flore).

L'UICN s'est spécialisée dans ce domaine et intervient dans la région ; ses actions devraient être fédérées avec les projets de la CBLT touchant à la protection de la nature (parcs et réserves forestières ou de faune) dans le cadre d'actions soutenues par le FME.

Parmi ces actions, nous recommandons le projet d'étude de l'impact des aménagements de petites retenues sur les mayos des Monts Mandara sur la partie ouest du parc de Waza déjà identifié dans le plan directeur de la CBLT.

Nous recommandons aussi la création d'une **zone écologique protégée au sein de la cuvette sud du lac** où l'observatoire proposé plus haut pourrait occuper une position centrale.

5.3. Autres recommandations

Un **système d'annonce de crues** a été mis en place à N'Djaména pour les crues du Chari. Il est opérationnel mais pourrait être perfectionné en cas de défaillance de stations de référence à l'amont concevant un modèle en mode dégradé. Le système devrait pouvoir être étendu à l'aval jusqu'au lac et être accompagné d'une enquête de géographie situant les habitats nouveaux dans les bas-fonds des lits mineurs et dans les zones exondées du lac susceptibles d'être vulnérables en cas de forte crue. Une

prévision à 10 jours comme celle que l'on a, relayée par les radios locales en langues vernaculaires, permettrait de se garantir autant que possible des pertes en vies humaines, mais aussi des pertes de troupeaux isolés sur des îlots-bancs avant d'être noyés.

L'étude de préfaisabilité et d'impact du transfert d'eau Oubangui-Tchad devrait constituer une priorité de la CBLT. Les délais de mise en route d'un tel projet, ceux de la recherche de son financement ne permettent pas d'espérer une réalisation rapide d'autant que les chantiers devraient durer plusieurs années.

Dans le contexte de pénurie qui risque donc de se prolonger, un partage négocié et équitable des eaux doit être organisé sous l'égide de la CBLT qui devra apaiser au coup par coup par des enquêtes indépendantes appropriées les inquiétudes des uns ou des autres sur l'usage qui est fait de la ressource par d'autres.

En ce qui concerne la qualité des eaux, hormis la surveillance des pollutions urbaines ou industrielles (penser à l'exploitation pétrolière dans le sud du Tchad) et des nappes qui alimentent les populations, il n'y a pas de problème en vue de pollution agricole du fait d'un usage très en dessous des normes d'engrais ou pesticides.

5.4. Mesures institutionnelles

L'expérience montre que le dispositif actuel (administrations nationales + CBLT) ne fonctionne pas de manière satisfaisante. Il est cependant évident que les deux échelons, national et bassin, ont leur importance et qu'il n'est pas possible d'envisager la disparition de l'un ou l'autre. Le dysfonctionnement peut être illustré par la mauvaise circulation de l'information : de nombreux documents ne sont pas transmis par les services nationaux à la CBLT et, à l'inverse, certaines administrations locales ne semblent pas au courant des grandes études menées par la CBLT, probablement parce que leurs responsables ne participent pas directement aux réunions de la CBLT.

Alors que les eaux souterraines représentent souvent la seule ressource permanente, l'extrême faiblesse des compétences hydrogéologiques réelles est un handicap majeur pour la gestion durable de l'environnement dans le bassin du lac Tchad. De plus, les multiples difficultés liées à une conjoncture économique très difficile ont un impact négatif rapide sur la motivation des personnels impliqués.

Dans les diverses administrations nationales, la formation souvent limitée des techniciens et des cadres de terrain ne leur permet pas de maîtriser la complexité des milieux naturels. Tant que durera cet état de choses, il est préférable que les compétences avérées soient rassemblées au sein d'équipes dont la masse critique permet un travail efficace. Ceci est une des justifications du maintien d'un organisme de bassin de type CBLT "rénovée". L'autre est que les impacts des grands projets d'aménagement doivent être évalués au niveau évident du bassin, si possible par une structure indépendante de pressions politiques.

Au niveau national reviennent tout aussi naturellement le contrôle régulier des ressources naturelles et la gestion des petits aménagements.

BIBLIOGRAPHIE

Alanaye Djogromel J., 1992. Contribution de la République du Tchad - Conf. Intern. sur l'Eau et l'Environnement, Dublin jan.1992, 12 p.

Barber D.F.M., 1965. Pressure water in the Chad formation of Borno and Dikwa emirates, northeastern Nigeria. Geological survey of Nigeria, bulletin 35.

Billon B., Bouchardeau A., Pieyns S., Riou C., Roche M. et Rodier J., 1967. Monographie hydrologique du Logone. I. Facteurs conditionnels du régime. Orstom, Paris, 102 p.

Biscaldi R., 1968. Hydrogéologie de la nappe du Logone. Rapport BRGM 68YAO003 pour la Direction des Mines et de la Géologie.

Bonifica S.A.,1991. TRANSAQUA : une idée pour le Sahel. Bonifica Italstat gruppo IRI, Roma.

Bonnet M. et Meurville C., 1995. Mise en place d'un système de suivi et de gestion de la nappe phréatique du Chari-Baguirmi. Rapport Hydroexpert pour la Direction de l'Hydraulique et de l'assainissement. 3 tomes.

Carré P., 1972. Quelques aspects du régime des apports fluviaux des matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. Cah. Orstom, sér. Hydrol, 9 (1) : 19-46.

Carmouze J.P. et Dupont B., 1970. Nouvelles approximations sur la bathymétrie et la superficie du lac Tchad. N'Djaména, Orstom, 2 p.

Carmouze J.P., 1972. Originalité de la régulation saline du lac Tchad. C.R. Acad. Sc. Paris, 275, 1871-1874.

Carmouze J.P., 1976. La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Orstom, série Travaux et documents n° 58, Paris, 418 p.

Carmouze J.P., Golterman H.L. et Pédro G., 1976. The neoformation of sediments in Lake Chad ; their influence on the salinity control. In : Interaction between sediments and freshwater, Junk publ., La Haye, 33-39.

CBLT, 1992. Plan directeur pour le développement et la gestion écologiquement rationnelle des ressources naturelles du bassin conventionnel du lac Tchad.

Chérel-Geffard S. et Pieyns S., 1995. Le bassin versant du lac Tchad. In Water resource management and desertification : problems and challenges - ISCCD-WMO Genève, 127-142.

Chouret A. et Lemoalle J., 1975. Évolution hydrologique du lac Tchad (juillet 1974 - octobre 1975). Orstom, N'Djaména, 6 p.

Chouret A., Fontes J.C. et Mathieu P., 1977. La nappe phréatique à la périphérie du lac Tchad (république du Tchad). Étude complémentaire. Orstom N'Djaména, 2 vol.

Clarke R.B., 1993. Planning and management of the water resources of the Lake Chad Basin. Rapport d'évaluation du projet PNUD/DDSMS (DADSG)/CBLT RAF/88/029.

Cotte A. et Lemoine L., 1972. Étude des possibilités de production de pluie provoquée en Afrique tropicale et à Madagascar. Tome 2 : résultats d'une campagne d'essais. CIEH, Ouagadougou.

Dupont B., 1970. Distribution et nature des fonds du lac Tchad (nouvelles données). Cah. Orstom, sér. Géol., 2 (1), 9-42.

Durand A., Fontes J.C., Gasse F., Icole M. et Lang J., 1984. Le nord-ouest du lac Tchad au Quaternaire : Étude de paléoenvironnements alluviaux, éoliens, palustres et lacustres. *Palaeoecology of Africa*, 16, 215-243.

Eberschweiler C., 1992. Suivi et gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad. Conception et définition d'un réseau piézométrique. Rapport BRGM pour la CBLT.

Eberschweiler C., 1993. Suivi et gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad. Prémodélisation des systèmes aquifères ; évaluation des ressources et simulations d'exploitation. Rapport BRGM pour la CBLT.

Falkenmark M., 1989. The massive water scarcity now threatening Africa- Why isn't being addressed ? in *Ambio*, vol 18 n°2 Stockholm, 112-118.

Faure H., Fontes J.C., Gischler C.E., Mook W.G. et Vogel J.C., 1970. Un exemple d'étude isotopique en pays semi-aride, le bassin du lac Tchad. *Journal of Hydrology*, 10, 141-150.

Feizouré C.T., Orange D. et Olivry J.C., 1992. Bilan hydrologique du bassin centrafricain de l'Oubangui de 1986 à 1991 - *Météo Nat. (S. Hydro)* / Orstom, Bangui, 40 p.

Fontes J.C. et Gasse F., 1986. Palhydraf : état d'avancement, novembre 1985. In : *Inqua : 1986 Dakar Symposium « Changements globaux en Afrique »*. Orstom éd., 149-152.

Fontes J.C. et Gasse F., 1991. Palhydraf (Palaeohydrology in Africa) program : objectives, methods, major results. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 84, 191-215.

Glanz M.H., 1990. Climate and weather modifications in and around arid lands in Africa ; Conference of Maiduguri.

Greigert J., 1979. Atlas des eaux souterraines du Niger. Tome 1 : état des connaissances en mai 1978. Rapport BRGM pour le Ministère des mines et de l'hydraulique 79AGE001, 178 p.

Hollis G.E., Adams W.M. et Aminu Kano M., 1993. The Hadeija-Nguru wetlands. Environment, economy and sustainable development of a Sahelian floodplain wetland. IUCN, Cambridge, 244 p.

Iwaco, 1985. Study of the water resources in the Komadougou Yobé basin. Technical report 5: groundwater resources. Report for the Nigeria-Niger joint commission for cooperation, 36 p.

Janicot S., 1990a. Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique, 1^{re} partie - Synthèse. Thèse de doct., univ. Paris VI, 178p.

Janicot S., 1990b. Deux facteurs principaux impliqués dans la sécheresse au Sahel. Veille climatique satellitaire, n° 32 : 24-33.

Joignerez A, Guiguen N. et Olivry J.C., 1995. Évaluation des ressources en eau non pérennes : méthode de régionalisation des résultats observés - in VIIIèmes Journées Hydrologiques de Montpellier, sept 1992. Régionalisation en hydrologie. Eds. Sc. Le Barbé et Servat ; Coll et Séminaires Orstom, Paris, 343. 361.

Kindler J., Warshall P. Et Arnould E.J., 1990. Le bassin conventionnel du lac Tchad : une étude diagnostique de la dégradation de l'environnement.

King G.R., 1993. Definition of the development strategies of the water resources of the lake Chad Basin. Rapport PNUD/DDSMS (DADSG)/CBLT du projet RAF/88/029.

Lebel T. et LeBarbé L., 1996. Rainfall climatology of the Central Sahel during the years 1950-1990. Journal of Hydrology (à paraître).

Lemoalle J., 1979. Application des données Landsat à la carte bathymétrique du lac Tchad. Cah. Orstom, sér. Hydrobiol. 12 (1) : 83-87.

Lemoalle J., 1989. Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). Rapport Orstom Montpellier 89-03, 27p.

L'Hôte Y. et Mahé G., 1996. Afrique de l'ouest et centrale, précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). Une carte, Orstom éd.

Mahé G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Paris, Orstom, coll. Etudes et Thèses, 438 p.

Mahé G. et Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989, Sécheresse, n°1, vol 6, 10, 109-117.

Maley J., 1989. L'importance de la tradition orale et des données historiques pour la reconstitution paléoclimatique du dernier millénaire sur l'Afrique nord-tropicale, in « Sud-Sahara-Sahel Nord », Cent. Cult. Franç. Abidjan, 53-57.

Mott MacDonald Int., BCEOM et SOGREAH, 1992. Sub-Saharan Africa hydrological assessment. West african countries. Country report: Nigeria. Rapport pour la Banque Mondiale, le PNUD, la BAD et le Ministère français de la Coopération.

Mott MacDonald Int., BCEOM, SOGREAH et Orstom, 1992. Évaluation hydrologique de l'Afrique sub-saharienne. Pays de l'Afrique de l'ouest. Rapport de pays : Tchad. Rapport pour la Banque Mondiale, le PNUD, la BAD et le Ministère français de la Coopération.

Mott MacDonald Int., 1994. Modèle mathématique du comportement hydrologique du lac Tchad et des fleuves qui l'alimentent. HydroChad. Rapport PNUD/DTCD (DADSG)/CBLT du projet RAF/88/029.

Mott MacDonald Int., 1991. Water transfer from the Ubangui River to the lake Chad basin ; NEPA proposals

Naah E., 1992. Hydrologie du grand Yaéré du nord Cameroun. Thèse de doctorat d'Etat es Sciences, Université de Yaoundé, 327 p.

Olivry J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographies Hydrologiques n°9. MESRES-Orstom, fig. et pl. couleur + 2 cartes ann. noir et couleur, 734 p.

Olivry J.C., 1987. Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur les écoulements : Sénégal et Casamance. In Proceedings of the Vancouver Symposium. IAHS Publ. n°168, 501-512.

Olivry J.C. et Joignerez A., 1992. Régionalisation des écoulements non pérennes sur petits bassins au Mali. In Colloques et séminaires Orstom. VIIIèmes Journées Hydrologiques de Montpellier sept. 1992.

Olivry J.C., 1993. Évolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In « l'Eau, la Terre et les Hommes, hommage à René Frécaut » Ed. Madeleine Griselin. Presses Universitaires de Nancy , 181-190.

Olivry J.C., 1993. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. In Actes des Journées Hydrologiques « Centenaire Maurice Pardé ». Institut de Géographie LAMA. Grenoble, septembre 1993, 10 p.

Olivry J.C., Bricquet J.P. et Mahé G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? In Hydrology of Warm Humid Regions ed. by J.S. Gladwell (Proceedings of the Yokohama Symposium July 1993) - IAHS, Publ. n°216, 66-78.

Olivry J.C., 1993. Vers un appauvrissement durable des apports hydriques des grands fleuves au Sahel ? Colloque EQUÉSEN (Orstom, ISRA, Université C.A. Diop) Dakar (Sénégal), décembre 1993, 12 p.

Olivry J.C., Chouret A., Vuillaume G., Lemoalle J. et Bricquet J.P., 1997. Hydrologie du lac Tchad - Monographies hydrologiques Orstom, n°12, Paris, 270 p.

Olivry J.C. et Naah E. 1996. Notice hydrologique de l'Extrême-Nord du Cameroun - In Atlas régional de l'Extrême-Nord du Cameroun. Editions Orstom (à paraître), 40 p.

Olivry J.C., Chouret A., Vuillaume G., Lemoalle J. et Bricquet J.P., 1996. Hydrologie du lac Tchad. Monographie hydrologique n°12, 259 p., Orstom éd.

Paoletti P. et Lemoalle J., 1991. Rapport de la mission d'actualisation des données de base socio-économiques et d'environnement. RAF/88/029 PNUD-CBLT N'Djaména.

PNUD/UNESCO/CBLT, 1972. Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad, 1966-1970. Paris.

PNUD/DCTD (DADSG), 1991. XXX. Département de Diffa : synthèse des ressources en eau souterraines. Rapport du projet NER86001. Niamey, 49 p + cartes.

Pouyaud B., 1985. Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eaux libres en climat tropical sec. Exemple du lac de Bam. et de la Mare d'Oursi (Burkina Faso), du lac Tchad et d'Açudes du Norderste brésilien. Thèse de Doctorat es Sciences., Université de Paris-XI. Paris, Orstom, Coll. Études et Thèses, 254 p.

Puech C., 1984. Opération de pluie provoquée Ouagadougou 1983. Rapport de synthèse. CIEH, Ouagadougou.

Roche M.A., 1980. Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Orstom, série Travaux et documents n° 117, Paris.

Scet International, 1979. Pre-drilling hydrogeological investigations, areas XIV and XV. Rapport pour le Federal Ministry of water resources of Nigeria. Paris.

Servant M., Servant S. et Delibrias G., 1969. Chronologie du quaternaire récent des basses régions du Tchad. CR Acad. Sci., Paris, 269, 1603-1606.

Servant M., 1973. Séquences continentales et variations climatiques. Évolution du bassin du Tchad au Cénozoïde supérieur. Thèse Doct., univ. Paris VI, Paris, Travaux et Documents Orstom, n° 159, 573 p.

Schneider J.L. et Wolff J.P., 1992. Carte géologique et cartes hydrogéologiques à 1/1.500.000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. Document du BRGM n° 209.

Schneider J.L., 1994. Le Tchad depuis 25 000 ans. Géologie, archéologie, hydrogéologie. Masson, Paris, 134 p.

Schroeter P. et Gear D., 1973. Étude des ressources en eau du bassin du lac Tchad en vue d'un programme de développement. Tome I : Ressources en eau souterraine dans le bassin du lac Tchad. Rapport FAO/PNUD pour la CBLT. 107 p.

Solages S., 1987. Inventaire des potentialités naturelles du bassin du lac Tchad. Volet hydrogéologie. Analyse des connaissances. Rapport BRGM 87AFO206EAU pour la CBLT. 2 volumes : rapport de synthèse (144 p) et annexe bibliographique.

Taupin J.D., Amani A. et Lebel T., 1993. Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In : H.J. Bolle, R.A. Feddes et J. Kalma ed., Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales, IAHS Publ. n° 212, 593-602.

Thambyahpillay G.C.R., 1990. Climatic change, drought scenarios and desertification in the Sahelo-Sudanian Environment : Paleoclimatic and contemporary ; Maiduguri Conference.

Tilho J., 1928. Variations et disparition possible du Tchad. Annales de Géographie, Tome 37, 238-260, Paris.

Vuillaume G., 1981. Bilan Hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. Cahiers Orstom, série Hydrologie, Vol XVIII, n°1, Paris, 1981, 23-72.

Xu Qun, 1987. The significant influence of the annual variation of direct solar radiation on the summer monsoon climates of China and Tropical Africa. 19^{ème} assemblée générale de l'UGGI, Vancouver (Canada). International Association of Meteorology and Atmospheric Physic (IAMAP). M7-28.

ANNEXE A : TERMES DE RÉFÉRENCE DE LA MISSION

ONU (DADSG)

Mai 1996

FOND MONDIAL DE L'ENVIRONNEMENT - PNUD
GESTION INTEGREE du BASSIN DU LAC TCHAD (Assistance "B")

RAF / 95 / G48

TERMES DE REFERENCES DES CONSULTATIONS
EN GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU

* * *

TITRE : *Specialistes Ressources en eau au Sahel :*
1 Hydrologue et 1 Hydrogeologue

DUREE : *2 Semaines chacun*

LIEUX : *1 Semaine N'Djamena (Tchad) Hydrologue du 18 au 26 Juin 1996*
Hydrogeologue du 21 au 29 Juin
et 1 Semaine de redaction a domicile.

OBJECTIFS :

1) Apporter un diagnostic d'experts sur le comportement des eaux du lac Tchad et de son bassin (ressources en eau, mais aussi utilisations amonts et impacts sur la qualite des eaux) et

2) orienter l'assistance preparatoire au futur programme FEM pour

- la prise en compte des contraintes connues liees a la maitrise des ressources en eau internationales, de leur variabilite et des risques identifiables,

- donner des recommandations de sous-programmes

complementaires, realistes et prioritaires, afin de pouvoir observer l'evolution de l'hydro-systeme international des points de vue quantitatifs et qualitatifs, et pour pouvoir, si possible, ameliorer l'efficience de son utilisation et de sa protection (gestion conjointe des eaux de crue et des eaux souterraines... ,

mesures preventives contre les risques possibles pour les populations et les eco-systemes tels qu'ils sont actuellement identifiables par la mission sur le court et le long terme ...)

TACHES A EFFECTUER :

Sous la supervision du siege des Nations-Unies (DADSG), et en coordination etroite avec le consultant en developpement integre de bassin et avec la CBLT, les deux consultants auront conjointement a realiser les taches suivantes :

1) *Prise de connaissance et analyse des etudes principales existantes, bases de donnees et modeles, sur les ressources en eau dans la perspective de valoriser les acquis, et identifier les lacunes, pour pouvoir orienter les questions prioritaires a faire ressortir par l'assistance preparatoire. L'evolution passee et recente du niveau du Lac Tchad , ainsi que des etrages des principales rivieres perennes et des niveaux piezometriques seront decrites et expliquees, de maniere concises avec des figures illustratives.*

(Les principaux documents se trouvent dans les institutions scientifiques specialisees, et a la CBLT).

2) *Dans un deuxieme temps les scenarios possibles d'evolution du Lac Tchad et des eaux internationales seront decrits. Un avis d'expert sera donne sur l'importance relative des risques (economiques, sociaux ou environnementaux) associes a chaque cause possible : secheresse pluviometrique prolongee, crues violentes "oubliees", modification durable du climat, modification du couvert vegetal des hauts-bassins, sur-exploitation des reserves souterraines ou des eaux d'etiage, diminution des plaines d'inondation et des zones d'infiltration, developpement incontrole de reservoirs sur les rivieres... Cet avis des deux experts conduira a classer les causes de risques potentiels par ordre d'importance probable.*

Les alternatives envisageables pour mieux maitriser les ressources en eau, et leur variabilite, seront ensuite rapidement explorees avec leurs avantages et inconvenients connus (transferts inter-bassins, controle des crues et des infiltrations, diminution des evaporations, connaissances prouvees sur les pluies artificielles...) en couvrant tout l'eventail des possibilites imaginables. Les connaissances disponibles sur chaque alternative seront presentees et decrites. Celles meritant des investigations complementaires seront identifiees.

D'autre part les alternatives d'adaptation / prevention aux conditions du milieu et a leurs risques seront examinees. Pour ces alternatives les moyens pouvant etre mis en oeuvre, et juges prioritaires, pour mieux exploiter la ressource disponible et limiter les risques lies au caractere imprevisible de la variabilite climatique (suivi piezometrique, annonce de crues...) seront decrits. Les risques previsibles (sur-exploitations, conflits d'allocations des eaux trans-frontieres, pollutions par les villes , les industries, les activites agricoles ou par les accidents ...) feront l'objet de recommandations d'actions preventives, et/ou de sous-programmes integres.

RAPPORTS

Les deux consultants presenteront un rapport commun dont le plan aura ete propose au DADSG. Ce rapport d'orientation pour les missions ulterieures de l'assistance preparatoire sera concis et pratique. Les principales conclusions de la mission commune de terrain feront l'objet d'un aide memoire qui sera laisse sur place au consultant en developpement integre et participatif de bassin.

Le rapport provisoire sera envoye au DADSG, au maximum 3 semaines apres le retour de la mission de terrain.

L'edition finale prenant en compte les remarques de la CBLT et du DADSG sur la version provisoire sera editee en 8 exemplaires en Francais et 6 exemplaires en Anglais et envoyee au DADSG pour diffusion aux agences du FEM, dans un delai inferieur a deux semaines apres reception des remarques.

ANNEXE B : LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES

Bonvillain, Centre National d'Appui à la Recherche (Tchad)
Chéné, conseiller technique ONU-DADSG, chef du projet
Darde, coopérant technique à la DREM (R. du Tchad)
Diguera Baba, Dpt. Aménagements, projets - Unité Ressources naturelles- CBLT
R.P. Faure, Secadev N'Djaména
Gence, représentant de la FAO au Tchad
de Grammont, Direction de l'Hydraulique et de l'Assainissement (Tchad)
Harrisson, consultant en développement participatif
Jauro Abubakar Bobboi, Secrétaire Exécutif de la CBLT
Mahamad Saleh Adam, chef de programme Environnement, Agriculture PNUD
Nelgar, responsable adjoint service hydrologique DREM Tchad
Sadio, expert FAO à Diffa puis N'Djaména
Sédick Ahmed, hydrologue à la CBLT
Walbadet Appolos, hydrologue DREM Tchad
Secrétaire exécutif adjoint de la CBLT
Chef de la Documentation CBLT
M. le Ministre de l'Elevage du Tchad
M. le Ministre du Plan du Tchad
M. le Ministre du Développement rural du Tchad
M. le Ministre des Transports du Tchad
M. le Représentant du PNUD à N'Djaména
M. le Représentant Adjoint du PNUD à N'Djaména

ANNEXE 1

Hauteurs des précipitations et variations climatiques

1. Généralités

La notion de variation climatique nécessite de spécifier à quelle échelle temporelle celle-ci se réfère. La paléoclimatologie a été abordée dans la première partie de cet ouvrage ; nous venons dans ce qui précède de caractériser les variations saisonnières du climat du lac Tchad. Il s'agit ici d'aborder les fluctuations du climat à l'échelle de temps du monde contemporain et des quelques générations concernées.

Il n'y a pas une cause unique aux variations climatiques sur une échelle temporelle quelconque. Au-delà de la portée des prévisions météorologiques établies selon des méthodes déterministes, la dynamique interne de l'atmosphère perd de son importance et les caractéristiques extérieures à l'atmosphère commencent à prédominer jusqu'à ce que, à l'approche des périodes portant sur les ères géologiques, ce soient les forces extérieures au système Terre-Atmosphère qui prennent de l'importance (Mahé, 1993).

Ainsi, pour les périodes portant sur des saisons et des années, les variations climatiques sont étroitement liées aux interactions externes entre l'atmosphère et la surface sous-jacente des océans et des terres émergées. Pour les variations portant sur des périodes très longues, nous devons étudier des facteurs qui sont davantage du domaine de l'astronomie, les caractéristiques de l'orbite terrestre et la production de rayonnement solaire, par exemple.

Les données climatologiques qui servent de produits d'entrée à l'analyse hydrologique sont elles-mêmes les produits finaux d'un processus bien défini, que l'énergie solaire régit en dernier ressort, mais que viennent modifier, à l'échelon mondial et local, des phénomènes dont l'action de forçage s'exerce sur des périodes de durée très variable. Certains ont un caractère périodique, d'autres sont le produit d'interactions intervenant entre l'atmosphère, l'océan, la biosphère, la cryosphère et la lithosphère, et à l'intérieur de chacun de ces milieux. D'autres encore, au nombre desquels on peut ranger l'activité météorique et volcanique, se manifestent de façon plus sporadique et peuvent être assimilés à l'injection de "chocs statistiques" dans le système. Dans un certain sens, les émissions de gaz agissant sur le rayonnement peuvent être classées dans cette catégorie. Ainsi il est impossible de considérer les séries de données climatologiques et hydrologiques comme des valeurs constantes (Mahé, 1993).

"Il est incontestable que les climats évoluent, la thèse traditionnelle d'un statisme du climat n'est désormais plus défendable" (O.M.M., 1988, 1989).

Selon White (1986), il semble certain que l'augmentation des gaz absorbant l'infrarouge (gaz à effet de serre) provoquent un réchauffement du globe. On a estimé que si la teneur en CO₂ de l'atmosphère était doublée, cela aurait pour conséquence une élévation moyenne de deux à trois degrés Celsius de la température du globe, avec des réchauffements plus importants pour les hautes latitudes que pour la zone équatoriale.

D'après l'O.M.M. (1986), les précipitations pourraient augmenter dans les régions tropicales humides, et les sécheresses estivales devenir plus fréquentes sur les continents situés aux latitudes moyennes dans l'hémisphère nord. L'augmentation de température devrait être plus importante aux pôles qu'à l'équateur, ce qui devrait ralentir les échanges méridiens d'énergie.

2. La normale et l'événement anormal

Les lois de distribution statistique des événements permettent de définir des pourcentages d'apparition d'une normale. Il est d'usage courant de se référer à la normale pour décrire la qualité d'un événement. On parle ainsi d'anomalie positive ou négative. Mais cette conception donne aux occurrences rares une apparence anormale, qui ne se justifie pas puisqu'il est normal qu'elles apparaissent avec un certain pourcentage de probabilité même faible.

Pour la description de l'évolution climatique, la définition d'une échelle de temps est primordiale pour replacer les événements dans un contexte probable d'apparition. Ainsi la notion d'anormalité varie en fonction du nombre d'événements utilisés pour établir la loi de distribution.

Pour l'Afrique soumise au flux de mousson, les banques de données de divers paramètres climatologiques ne portent le plus souvent que sur des périodes d'observation variant de 10 à 40 ans. Les modèles de circulation atmosphérique se basent sur ces données pour la reconstitution des événements. Deux problèmes se posent alors :

- I. Y a-t-il une importante variation climatique durant les années qui servent à établir la climatologie ? Pour l'O.M.M. (1988) l'évolution climatique -sous-entendu à l'échelle humaine- est une réalité. La distribution des événements postérieurs à l'établissement d'une climatologie peut de ce fait s'écarter de la normale.
- II. Existe-t-il des paramètres non pris en compte pour le calcul de la climatologie et dont les variations pourraient la faire sensiblement varier ? Un événement non prévu dans la climatologie et qui se produit néanmoins va constituer statistiquement une situation anormale (et non plus une déviation probable par rapport à la normale).

L'importance de l'apparition d'événements "anormaux" par rapport à la climatologie augmente au fur et à mesure que le climat évolue.

3. Cas de la Région du lac Tchad

Les précipitations annuelles sur le lac évoluent interannuellement suivant une tendance régionale. Les deux séries présentent les mêmes caractéristiques : précipitations les plus fortes durant les années 50 puis tendance décroissante des totaux annuels jusqu'à la décennie 80 où les totaux annuels sont remarquablement bas tous les ans. Depuis 1967 les totaux annuels n'ont dépassé la moyenne 1932-1989 que 6 fois sur 23 ans. Si l'on se réfère aux normales O.M.M. successives et qu'on les compare à la répartition des pluies annuelles des années qui ont suivi, on observe nettement l'évolution du climat régional en constant déphasage par rapport aux normales :

Période de calcul de la normale p	Normale O.M.M. (mm)		NB. d'années suivant la normale jusqu'en 1989 ns	Nombre d'années supérieures à la normale considérée nx	Rapport nx/ns
1932-1960	p ₁	300	29	7	0,24
1941-1970	p ₂	304	19	3	0,16
1951-1980	p ₃	293	9	1	0,11

Cette évolution se retrouve au niveau de la région.

On a représenté ci-après le nombre de stations pluviométriques ayant enregistré leur totaux annuels les plus forts et les plus faibles. Au cours de chacune des 4 dernières décennies, dans la région Sahel est (59 stations), plus de la moitié des minimums se produisent entre 1981 et 1989, dont 25 entre 1983 et 1984 et 11 entre 1972 et 1973.

Décennie	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1989	Total stations
Maximum	35	12	9	3	59
Minimum	2	2	19	36	59

Sur les précipitations moyennes calculées par décennie sur le lac, on observe que de 1981 à 1989 la moyenne est plus de deux fois plus faible que celle de la période 1951-1960 (171 et 352 mm).

En 1988, les précipitations ont été abondantes sur le lac, mais également dans toute la région (figure 5.7) et sont comparables à la hauteur de la pluviométrie des années 50 ; 2 postes ont même enregistré leur maximum

sur la série 1951-1989 cette année-là. On a pu observer par satellite le remplissage du lac : pour la première fois depuis de nombreuses années l'eau passait la Grande Barrière en direction de la cuvette nord (Citeau *et al.* 1988a).

L'évolution des précipitations au Sahel, a été particulièrement importante au cours des 40 dernières années. Les effets du déficit pluviométrique ont été amplifiés au niveau du lac Tchad par une diminution drastique des surfaces inondées.

La très grande variabilité des totaux annuels de pluies est la caractéristique essentielle des pluies dans la région du lac ; même si les pluies peuvent être régulières et abondantes pendant quelques années, par exemple entre 1932 et 1951, des événements exceptionnels peuvent survenir : 1949, 1950. Il est clair également que des modifications à moyen terme (quelques décennies) du régime pluviométrique ont lieu, dont on n'a pas encore trouvé l'origine fondamentale dans la circulation atmosphérique du globe et qui sont impossibles à prévoir, aussi bien pour leur date d'apparition que pour leur durée.

Depuis le début des années 1990, un certain retour à des précipitations plus abondantes paraît devoir s'affirmer globalement dans toute l'Afrique soudano-sahélienne ; certaines années restent très nettement déficitaires, mais on ne peut pas ne pas mentionner les espérances que l'année 1994 largement excédentaire a suscitées dans l'ensemble de la région. Ainsi N'Djaména a reçu, en 1994, 800 mm de pluie, tandis qu'on a relevé 415 mm à Bol et 403 mm à Matafo.

ANNEXE 2

Le contexte déficitaire régional

1. L'évolution récente des précipitations et des écoulements

En Afrique tropicale sèche les déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973, n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années. Une recrudescence notable de la sécheresse s'est manifestée en 1983 et 1984 et les déficits restent la règle générale jusqu'à la période actuelle. Ceux-ci se sont exacerbés au niveau des écoulements des grands fleuves. L'ampleur géographique du phénomène et sa durée, sans équivalence connue dans les chroniques hydroclimatiques (Sircoulon, 1987, 1989), ont conduit certains auteurs à parler de rupture climatique (Carbonnel & Hubert 1985).

Dans les régions soudano-sahéliennes, les hauteurs annuelles de précipitation montrent une tendance à la baisse particulièrement accusée dès 1968 avec des valeurs presque toujours inférieures aux médianes. Certains indices régionaux (Lamb, 1985, Nicholson *et al*, 1988) montrent cette dégradation constante depuis vingt ans. Une amélioration récente a été observée mais reste encore très relative.

Jusqu'à une période récente, on a pensé que la variabilité de l'écoulement annuel constituait, par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'il suppose sur l'ensemble d'un bassin versant, un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques (Olivry 1983, 1987). De fait, les déficits pluviométriques se sont largement répercutés, et généralement amplifiés, dans l'écoulement des bassins fluviaux au point que dans la période la plus récente les paramètres hydrologiques ne sont plus en phase avec la variation pluviométrique annuelle (figure 9.16).

Dans la période récente on a relevé qu'en dépit de certains sursauts d'une relative abondance, l'hydraulicité des fleuves de la région n'a cessé de se dégrader. Cette tendance persistante à la baisse doit être soulignée car elle montre une dégradation durable du système hydrologique malgré un retour assez sensible à de meilleures conditions de précipitations.

Le régime hydrologique des fleuves d'Afrique intertropicale est directement influencé par celui des précipitations mais subit aussi, avec un effet retard, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques répétés.

Les apports des fleuves de l'Afrique sèche du Sénégal au Chari totalisent en moyenne $275 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$. L'appauvrissement de la ressource en eau est pour la décennie 1981-90 de $85 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ (Olivry *et al*, 1993 ; Mahé, 1993).

2. La maladie des basses eaux et l'hypertarissement

Le régime naturel des basses eaux sur le Chari à N'Djaména, comme sur les autres fleuves soudano-sahéliens, est très gravement affecté par la sécheresse actuelle. Les étiages absolus des deux dernières décennies sont systématiquement les plus faibles de la série. L'évolution de la phase de tarissement constitue le processus majeur responsable de l'appauvrissement des basses eaux.

Après transfert à la station d'observation des écoulements rapides (ruissellements), on observe à partir d'un certain stade de la décrue de l'hydrogramme annuel, une décroissance régulière des débits ou phase de tarissement. Celle-ci correspond à la période où la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau de la région.

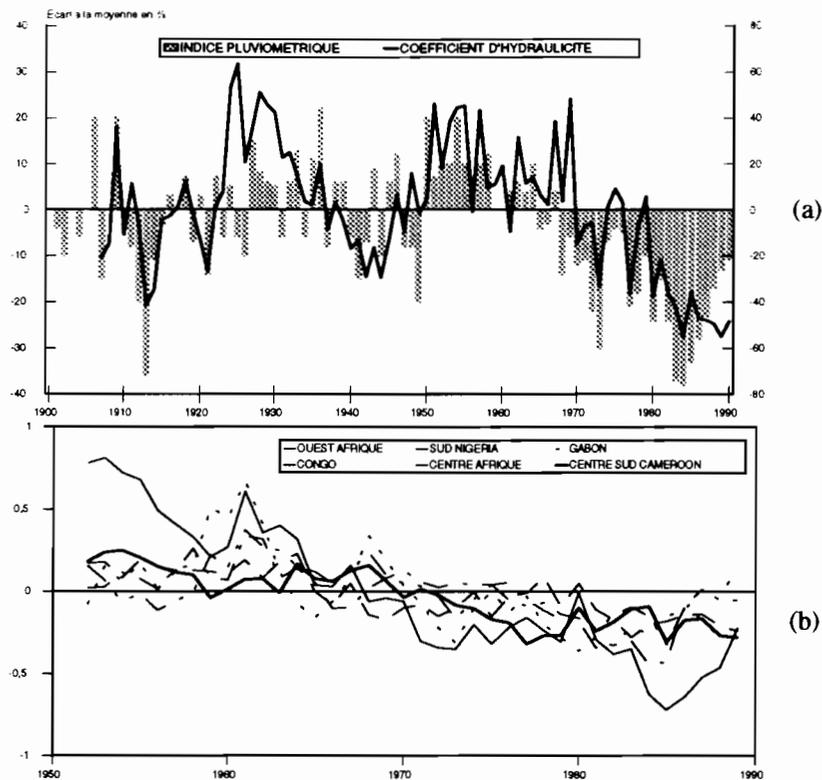


Figure 9.16
Variations hydroclimatiques.
a : pluviométrie et hydraulicité de l'Afrique tropicale sèche de 1900 à 1990
b: évolution de l'écart réduit des précipitations en Afrique humide depuis 1950.

Pour les cours d'eau tropicaux, cette décroissance des débits suit une loi exponentielle classique :

avec Q_i et Q_0 , débits aux instants t_i et t_0 exprimés en jours et α , coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension de l'inverse d'un temps.

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique des fleuves soudano-sahéliens. L'étude des coefficients de tarissement montre jusqu'aux années 1972-73 une relative régularité des valeurs.

Les choses changent du tout au tout au cours des années les plus récentes ; on observe alors un véritable bond des valeurs de α .

Ainsi sur le fleuve Chari, les données montrent une première période de 40 ans avec un coefficient de tarissement moyen nettement inférieur à $0,02 \text{ j}^{-1}$ et depuis 1975 des valeurs en augmentation qui tendent vers $0,03 \text{ j}^{-1}$.

On peut multiplier les exemples dans la région soudano-sahélienne (Sénégal, Niger). On retiendra que le temps nécessaire pour que le débit de tarissement des cours d'eau soudano-sahéliens diminue dans le rapport de 10 à 1 est passé *grosso modo* de 4 mois à 2 mois (Olivry, 1993a).

Cette faiblesse quasi générale des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant du cumul des déficits pluviométriques.

La similitude des tarissements observés en milieu intertropical dans les chroniques de débit antérieures à la période de sécheresse (les valeurs du coefficient α évoluent entre de $0,015$ à $0,025 \text{ j}^{-1}$, en moyenne $0,02 \text{ j}^{-1}$), qu'il s'agisse de grands cours d'eau drainant des bassins de taille très variable ou de petites rivières aux bassins versants très limités, pour autant que les précipitations annuelles dépassent 1000 - 1100 mm, montrent que l'alimentation des basses eaux des rivières apparaît comme principalement due au cumul des vidanges de petites nappes de versant assez semblables et caractéristiques de la géomorphologie générale de l'Afrique intertropicale.

L'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspond essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la largeur des nappes de versant.

La baisse importante du niveau piézométrique est une constante des observations hydrogéologiques des régions soudano-sahéliennes. L'augmentation considérable de l'épaisseur de la tranche aérée du sol au-dessus de la surface piézométrique ne permet pas une réalimentation facile des nappes. Les eaux infiltrées connaissent un long cheminement interstitiel qui n'aboutit pas toujours à la nappe. La zone non saturée peut piéger l'ensemble de la lame d'eau infiltrée de l'année. Celle-ci pourra être reprise par évaporation ou rester en partie en attente d'apports complémentaires des années suivantes. Ceux-ci, s'ils sont assez abondants, et donc que l'on observe de bonnes précipitations, finiront, (effets pistons successifs), par aboutir à une recharge de la nappe.

C'est dans la partie amont de la nappe de versant que l'épaisseur de la zone aérée est la plus grande et donc que les problèmes de réalimentation sont les plus cruciaux. La sécheresse en privant l'aquifère amont des apports de l'infiltration a conduit à une réduction de l'extension de la nappe de versant soit par épuisement des réserves de l'amont, soit par coupure des liaisons entre les aquifères des parties aval et amont

La recharge éventuelle de l'aquifère amont reste dépendante d'un fonctionnement hydrogéologique pluriannuel et, dans la période actuelle, on observe bien un effet mémoire de la sécheresse inscrit dans l'évolution des réserves souterraines.

Le retour à des débits plus soutenus en saison sèche suppose d'abord la reconstitution des aquifères. Celle-ci ne peut-être immédiate et cela s'est bien vu dans la faible incidence d'une meilleure pluviométrie sur le tarissement. Du fait même des aquifères, les réactions sont plus lentes dans la restitution des basses eaux ; elles nécessitent un temps de réponse de plusieurs années et ne sont effectives qu'avec le cumul de variations climatiques de même sens.

A la sécheresse climatique se surimpose avec un décalage pluriannuel une sécheresse spécifique aux cours d'eau qu'on pourrait appeler « sécheresse phréatique ». Les lois de l'hydrogéologie sont telles que, dans de bonnes conditions de pluviosité, l'amélioration du régime de basse eaux pourrait demander un temps comparable à celui qui a conduit à son actuelle dégradation.

3. Evolution de la puissance des maximums de crue annuels

Le déficit d'alimentation des fleuves par les nappes souterraines, apparent en saison sèche, est bien entendu sous-jacent en période de crue et ceci explique aussi la faible hydraulicité et les modestes maximums de crue que l'on continue d'observer malgré une certaine reprise de la pluviosité. Au cours des deux dernières décennies, l'affaiblissement de la puissance des crues n'a fait que s'accroître.

La comparaison des hydrogrammes de crue des différents fleuves étudiés montre dans la période actuelle deux types de situation :

- un hydrogramme tronqué sans maximum nettement affirmé correspondant à une saison des pluies normale en durée mais très déficitaire au coeur de la saison.
- un hydrogramme réduit en durée correspondant à une saison des pluies tardive ou écourtée.

Dans les deux cas, le volume de la crue et le maximum sont faibles.

La persistance de faibles maximums annuels malgré un certain retour à de meilleures conditions de pluviosité constitue un fait d'observation pour l'ensemble de la sous-région (Olivry, 1993 b).

On constate notamment que, pour des saisons des pluies équivalentes, le maximum de crue de la période actuelle reste nettement plus faible que dans le passé.

Or des études récentes du ruissellement sur petits bassins représentatifs ont permis d'observer des conditions générales de genèse des crues sans modification significative par rapport aux observations effectuées une trentaine d'années auparavant (Joignerez et Olivry, 1992). A l'échelle de grands bassins, dans de mêmes conditions pluviométriques, la contribution à l'hydrogramme de crue des écoulements rapides (ruissellement et écoulement hypodermique) devrait être identique. La persistance de l'amoindrissement de la puissance des crues doit donc être recherchée dans une contribution réduite des apports d'origine souterraine.

Ceci nous ramène aux observations effectuées sur le tarissement principal de ces grands fleuves. La part de cet écoulement de base est difficile à chiffrer sur les grands bassins ; elle est probablement plus importante qu'on ne l'imaginait, mais a considérablement diminué dans la période actuelle.

Le régime déficitaire des précipitations de la période actuelle est bien évidemment responsable de la baisse de puissance des crues. Il a d'abord un effet immédiat, avec des crues réduites en puissance et (ou) en durée, suivant la saison des pluies. Il a ensuite un effet mémoire avec le cumul de déficits des années antérieures et les apports réduits des nappes phréatiques. On doit donc s'attendre à une certaine persistance des faibles maximums de crue, même dans l'éventualité d'un retour à une séquence humide.

ANNEXE 3

La Komadougou Yobé

1. Hydrologie de surface :

Le bassin de la Komadougou est particulier pour plusieurs raisons :

- c'est le seul cours d'eau aboutissant à la cuvette nord du lac,
- dans la partie aval, la rivière ne reçoit aucun affluent et les débits diminuent au fur et à mesure que la rivière s'avance vers son débouché dans le lac Tchad : en année "moyenne" le débit annuel est de $1,3 \text{ km}^3$ à Gashua et seulement $0,3$ à l'arrivée au lac alors que dans la partie amont on a estimé à $7 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ la contribution de l'ensemble des tributaires aux ressources en eau de surface.

En régime naturel, l'écoulement n'est dû qu'aux précipitations tombant sur la partie amont (états de Kano et Bauchi au Nigéria) et aux ponctions représentées par l'évaporation et l'infiltration vers la nappe phréatique. Les observations du début des années 80 montraient que la Komadougou Gana disparaissait plusieurs dizaines de kilomètres avant sa confluence théorique avec la Komadougou Yobé. Plusieurs autres affluents étaient dans le même cas.

Depuis quelques années, plusieurs barrages réalisés au Nigéria (dont celui de Tiga dans l'état de Kano) ont diminué les écoulements dans la rivière en durée et en volume total. La rivière servant de frontière entre le Niger et le Nigéria dans sa partie aval, les ponctions des aménagements amont peuvent être source de conflit.

Les mesures hydrométriques sur la Komadougou réalisées pour Iwaco en 1984 montraient des décalages avec les courbes hauteur-débit antérieures. Même si les conditions de réalisation des mesures de 1984 semblent imparfaites, cela incite à la prudence dans la manipulation des débits supposés. Cette précaution peut être également illustrée par les chiffres de la station de Bagara, près de Diffa : avant 1984 le débit moyen variait entre $1,5$ et $2,2$ millions de m^3 par jour alors qu'il dépasserait $3,2$ après 1987 ; la cause semble être un déplacement de l'échelle limnimétrique sans recalage des nouvelles hauteurs lues, d'où une surestimation des débits récents.

Il conviendrait donc de relancer une campagne significative de jaugeage sur la Komadougou Yobé si l'on veut disposer de chiffres fiables.

2. Hydrogéologie :

La nappe phréatique est alimentée par la Komadougou Yobé et, autrefois, par les rives de la cuvette nord du lac Tchad. Au nord et au sud de la rivière se rencontrent deux dépressions piézométriques fermées profondes d'une quarantaine de mètres. La quantification de la recharge de la nappe par la rivière avait été estimée de manière rapide par Iwaco (1985) à 21 millions de m^3 par an (mais 37 millions ailleurs dans le même texte !). Basée sur plusieurs méthodes d'estimation présentée dans la synthèse du PNUD (1991), la modélisation numérique des écoulements souterrains a retenu un chiffre de 25 millions de m^3 par an. En attendant de nouvelles mesures de terrain, il ne faut considérer ces chiffres que comme des ordres de grandeur.

L'eau souterraine est de qualité variable, mais généralement bonne. Elle est peu minéralisée à proximité de la rivière et très chargée en bordure du lac. Elle est utilisée principalement pour l'abreuvement des troupeaux et l'irrigation et, dans une moindre mesure du fait de la faiblesse démographique, pour l'alimentation humaine.

3. Environnement :

La surface couverte par la crue annuelle est variable : dans la plupart des cas, l'eau recouvre simplement les anciens méandres alors que la région de Hadejia-Jamaare au Nigéria est beaucoup plus vaste. Ces zones inondables recèlent encore une très grande richesse biologique, même si les espèces sont moins nombreuses qu'au début du siècle lorsque Foureau décrivait la région. Cette diversité est directement liée à l'eau.

Les rives de la Komadougou sont aussi particulièrement utiles pour l'agriculture et la pêche. En particulier on peut citer la production de piments et oignons, particulièrement appréciés, facilement exportés et générateurs de revenus non négligeables.

4. Avenir du bassin :

Comme il n'est pas possible de modifier les pluies tombant sur la partie haute du bassin versant et que les prélèvements divers se sont multipliés depuis quelques années tout le long de son cours, il est clair que la partie aval de la Komadougou Yobé (notamment là où elle trace la frontière entre le Niger et le Nigeria) subit une dégradation sensible de la crue annuelle.

Parmi les impacts prévisibles ou déjà observés (Hallis et al., 1993), on peut citer une diminution sensible des surfaces inondées et une moindre recharge de la nappe phréatique. Pour l'agriculture cela implique une diminution des cultures de décrue et un recours plus important à la nappe phréatique, donc des coûts plus élevés. La nappe sera à la fois moins réalimentée et plus pompée ; son niveau devrait donc baisser rapidement et durablement.

La baisse de la rivière et de la nappe fera également disparaître de très nombreuses espèces, animales comme végétales dont la vie dépend directement du retour annuel de la crue. Il n'est pas certain que les périmètres irrigués dans la partie amont du bassin versant, à la rentabilité hypothétique, justifie une telle catastrophe environnementale. La prise de conscience, apparue depuis quelques années, que les grands périmètres irrigués sont extrêmement gourmands en eau et en subvention et qu'ils ne contribuent que très peu à l'auto-suffisance alimentaire des populations devrait inciter à plus de prudence dans la gestion du bassin-versant de la Komadougou Yobé.

Comme il n'est pas possible d'effacer les aménagements déjà réalisés, il convient d'en limiter les impacts négatifs. Le remède proposé par certains est le transfert d'eau depuis une rivière du bassin du Niger vers la Komadougou. Avant de se lancer dans de tels travaux, il conviendra de réaliser une véritable étude de faisabilité technique : il n'est pas impossible que les fortes pertes constatées dans le lit de la Komadougou Yobé comme dans celui de la Komadougou Gana se produisent également dans le canal et que l'apport réel à la rivière dans sa partie aval ne soit de toutes façons très faible.

ANNEXE 4

Modèles utilisés en hydrologie au Tchad

1. Modèle mathématique HYDRO-CHAD

Réalisé par Mott - Mac Donald (MMD) 1994, le modèle mathématique du comportement hydrologique du Lac Tchad et des fleuves qui l'alimentent est un modèle physique qui a demandé un énorme travail d'analyse des données disponibles sur le bassin du Lac Tchad (hydroclimatologie, limnimétrie, etc...). Il est construit sur la base d'un modèle hydrologique précisant les entrées en débit (ou hauteurs d'eau) des principaux tributaires du Lac Tchad et d'un modèle hydraulique reproduisant les transferts d'eau dans les biefs principaux, d'une part, dans les plaines d'inondation et le lac, d'autre part.

1.1 MODELE HYDROLOGIQUE

Le modèle hydrologique est une adaptation du modèle de transformation Pluie-Débit CATCH WK₃ (à 6 paramètres) traitant des **données mensuelles**. Adapté au bassin du Lac Tchad sous le nom de LCBCMOD avec deux options, l'une calquée sur CATCH, l'autre avec seulement 4 paramètres (capacité maximum de rétention d'humidité du sol, proportions d'écoulement vers les aquifères, taux de tarissement des eaux souterraines, temps de montée de l'hydrogramme unitaire), il comprend :

- . Le calcul de la pluie moyenne mensuelle du bassin considéré (maillage d'un 1/10 degré carré et pondération suivant le réseau pluviométrique en service).
- . La formulation des relations pluie-débit et l'application de coefficient de retardement de l'écoulement mensuel.
- . La prise en compte d'un hydrogramme unitaire triangulaire dont le temps de montée est 1/3 du temps de base.

Le modèle principal prend en compte les entrées du Logone à Laiï, du Chari à Sahr et du Barh Sara à Manda (un module complémentaire a été prévu pour la Komadougou Yobé à Gashua et la Komadougou Gana à Kari). On passe des données mensuelles à des **débits journaliers** (interpolation linéaire entre valeurs centrées au milieu du mois) et leurs hauteurs d'eau correspondantes pour définition des entrées du modèle hydraulique.

1.2 MODELE HYDRAULIQUE

Le modèle hydraulique comprend un modèle principal de transfert dans les biefs du Chari et du Logone (plus la Komadougou Yobé), avec un noeud tous les 20 kms à partir de N'Djaména, plus les noeuds des stations hydrométriques et un modèle des plaines d'inondation avec cellules de rétention (54 en tout), pour lesquelles sont introduits les paramètres précipitations et évaporations journalières. Les cellules de rétention concernent les ensembles :

- . Ba Illi du Nord
- . Padjouk
- . Pertes Mayo Kebi
- . El Beid
- . Bahr Erguig
- . Loumia
- . Serbewel
- . Lac Tchad et Bahr el Ghazal

L'utilisation des équations de S^l Venant nécessite qu'en chaque noeud soient déterminées les caractéristiques géométriques des sections des seuils, un coefficient de rugosité (Manning) unique ayant été retenu.

Les sections naturelles mesurées aux stations hydrométriques n'ont été utilisées que pour le calage hauteur-débit. Cette approche mathématique des seuils -qui s'éloigne du modèle physique- a été critiquée par Clarke (1993).

Pour le Lac Tchad, on a en plus un paramètre infiltration (0,55 mm/jour pour la cuvette nord et 1,15 mm/jour pour la cuvette sud) qui est directement inspiré des travaux d'Isiorho et Matisoff, localisés au sud-ouest du Lac. L'ensemble du modèle HYDRO-CHAD a été obtenu à partir des données de 1960 à 1979.

1.3 SIMULATIONS DE CALAGE

Dans son rapport final, MMD présente les simulations de vérifications des hauteurs d'eau faites sur les années 1963-1964, 1988-1989 et 1990-1991 et sur l'année 1975-1976. MMD indique que les performances sont bonnes pour les années sèches et humides, à l'exception des maximums du Chari à Chagoua et N'Djamena pour 1988-1989 avec 1 m sous la valeur observée de 293,4 m et 60 cm sous celle de 1963-1964 (293,6 m observé). MMD impute cette différence à des apports des Bahr Salamat et Keita, non intégrés au modèle, qui auraient pu être élevés ces années-là. En volume annuel, cela supposerait 6 km³ pour 1988-1989, soit 50 % de plus que la valeur interannuelle, peu probable cette année-là ; la seule vérification des différences des débits maximums observé et simulé aurait permis de rejeter cette explication.

Avec Clarke, on peut regretter que les figures présentées ne portent que sur des hauteurs d'eau et non les hydrogrammes des débits. MMD ne soulève pas le problème du décalage de la phase de décrue entre valeurs simulées nettement plus fortes que les hauteurs observées. Ainsi la phase de tarissement naturel du Logone à Logone-Gana montre entre les cotes 298 et 295,5 m de décembre 1988 à mars 1989, un décalage de 60 cm avec la simulation.

D'autres exemples fournis montrent à Katoa, Bongor, Eré pour 1988-1989 et 1990-1991 le même type de simulation surestimée (sensible aussi en début de crue) et qui représente jusqu'à 1,6 km³ soit + 20 % des apports.

Il n'y a pas de décalage pour les limnigrammes de 1963-1964.

1.4 CRITIQUES DU MODELE

Clarke, déjà cité, a émis un certain nombre de critiques que nous ne reprendrons pas ici (notamment sur la partie hydraulique du modèle).

En complément, nous indiquerons d'abord, dans la suite des simulations sur les années les plus récentes, que le modèle (établi sur la période 1960-1979) ne prend pas en compte l'évolution des hydrosystèmes vers des phases de tarissement plus rapide depuis la fin des années 1970. Il y a donc un biais dans le calcul des entrées du modèle hydrologique. (voir notre note sur l'hypertarissement des rivières intertropicales lié à la persistance de la sécheresse).

MMD a relevé qu'une infiltration nulle permettait une meilleure estimation du bilan du lac. Les valeurs initiales choisies, citées plus haut, sont largement surestimées (8,8 km³ soit 19 % des 45 km³/an d'apports) et ne concernent que des sables localisés entre Baga et Kirenowa qui ne représentent pas la nature des fonds du lac (cartographié par Dupont, 1970).

La relation H eau/Surface/Volume du lac a été extraite de Carmouze et Dupont (1970), mais aurait dû être actualisée par les travaux de Lemoalle (1979) et Vuillaume (1981). Ainsi, à la cote 282 m, le lac a un volume total estimé à 63 km³ quand MMD donne 80,2 km³. Les surfaces de l'archipel et des îlots-bancs n'ont pas été déduites. Ceci explique sans doute une partie des différences importantes observées entre les valeurs des bilans hydrologiques de MMD et celles des travaux de Vuillaume (1981).

Les analyses statistiques effectuées par MMD sur les écoulements annuels et les débits maximums annuels du Chari à N'Djamena faites sur 21 ans (période 1972-1992) doivent être utilisées avec beaucoup de prudence. On peut effectivement considérer l'échantillon récent pour l'écoulement annuel, même si cela n'a guère de sens pour des périodes de retour « humides » (de 64 ans pour 1975-1976 avec 36,3 km³), en considérant une médiane à 20,5 km³ comme caractéristique des conditions actuelles. Mais c'est beaucoup plus dangereux pour des débits maximums de crue : la crue 75-76 est donnée avec une période de retour de 38 ans, alors qu'elle est à peine supérieure à la moyenne, si on considère l'ensemble de l'échantillon. Pour des raisons de sécurité des populations riveraines, il n'est pas prudent de considérer cet événement comme ayant une fréquence aussi rare. Sans revenir sur les notions de rupture climatique sur lesquelles on ne peut trancher, et donc sur le choix des échantillons à prendre en compte dans les études statistiques, la règle à utiliser par les projeteurs devrait être la suivante :

- . **Ressource en eau** (débit annuel), maximums de crue d'année sèche, étiages : prendre en compte l'échantillon de la période sèche comme s'il y avait eu rupture climatique et actualiser l'échantillon. Déterminer les **défaillances**.
- . **Maximums de crue**: prendre l'ensemble de l'échantillon disponible pour ne pas minimiser le **risque de crues catastrophiques**.

1.5 UTILISATION DU MODELE

Plusieurs simulations ont été proposées par MDD, suivant différents scénarios et comparés à l'année 1975-1976 :

- élévation de température moyenne de 3 à 4° avec ses conséquences sur l'évapotranspiration qui augmenterait de 7 à 17 %, baisse des maximums du lac de 0,2 à 0,4 m et pertes dans les plaines d'inondation de 0,4 km³ supplémentaires, manquant dans les apports au lac.
- construction de digues le long du Logone ; 80 % de pertes en moins dans les plaines d'inondation et gain sur le lac de 6,1 km³, mais plus de Yaéré et d'écoulement dans l'El Beid.
- réservoirs de stockage à Foré sur la Pendé et Koumban sur la Vina-Nord ; avec 7,8 km³ (2,8 et 5) disponibles de novembre à juillet, élévation du niveau du Logone de 0,5m jusqu'à N'Djaména, pas sensible à l'aval.
- influence du barrage de Maga ; baisse de 0,5m dans les plaines d'inondation du parc de Waza.

Les utilisateurs du modèle à la CBLT nous ont fait une démonstration partielle (coupures de courant électrique à N'Djaména) : évolution du niveau d'un bief du Chari sur une année donnée (suivi des lignes d'eau), calcul de bilans du Lac. Des problèmes sont apparus dans la comparaison d'hydrogrammes simulés et observés, dus d'après la CBLT à la dernière version du modèle qui introduit un module Komadougou Yobé. Toujours d'après les utilisateurs, le modèle admet des bornes inférieures pour les étiages en entrée du modèle hydraulique supérieures aux étiages observés aujourd'hui et le modèle ne tourne pas. Autre inconvénient relevé par les utilisateurs, il s'agit d'un modèle de simulation avec ses 365 entrées journalières de paramètres et non d'un modèle de prévision.

En conclusion, l'outil n'est pas encore vraiment opérationnel à la CBLT au-delà des démonstrations concernant les années-type du document MDD. Il doit pouvoir être amélioré en renonçant au modèle hydrologique qui introduit des biais et en considérant les **entrées réelles des stations hydrologiques** retenues, dont le suivi doit être une **priorité** et qui ne constitue pas en soi de difficultés majeures par rapport au suivi de stations pluviométriques. Le modèle peut être utilisé comme modèle de prévision à partir de septembre après observation des maximums de crue aux entrées, en complétant l'année hydrologique par les données d'années-type antérieures voisines dans la première phase des hydrogrammes. La précision du modèle n'est pas assez grande pour simuler avec fiabilité des aménagements de moyenne importance sur le bassin ; en revanche, il devrait être performant pour simuler les projets de transferts à partir de la RCA de volumes importants (voir par ailleurs).

Dans la perspective d'une actualisation du modèle Hydro-Chad, il est suggéré de reprendre le modèle hydraulique sur la base d'une prise en compte des sections en travers réellement observées pour chacun des noeuds retenus.

2. Modèle de prévision de crues du Chari à N'Djaména

A la demande de la DREM du Tchad, et suite à une urbanisation spontanée des parties basses de la ville de N'Djaména généralement hors d'eau depuis les années sèches, la Coopération française a chargé l'Orstom de réaliser un modèle de prévision des crues permettant d'alerter les populations des risques d'inondation.

Le modèle est un modèle statistique faisant intervenir les données de stations amont et permettant une prévision à 10, 15 et 20 jours. Divers ajustements de relations entre les différentes stations ont permis de retenir 4 stations : Moundou à 500 km à l'amont de N'Djaména sur le Logone et Sahr à 600 km en amont sur le Chari, pour l'essentiel des apports de crue, et, d'autre part, Bongor sur le Logone et Bouso sur le Chari, respectivement à 240 et 340 km de N'Djaména utilisées comme stations intermédiaires et de contrôle et prenant en compte les autres apports et les défluences vers les plaines d'inondation.

Le modèle a été calé en reliant les séries chronologiques de cotes observées à ces stations et à celle de N'Djaména sur les périodes suivies par l'Orstom jusqu'en 1979 et par la DREM de 1981 à 1994.

Un logiciel particulièrement convivial sous WINDOWS appelé « Système d'annonce de crues du Chari à N'Djaména » a été mis à disposition du Service Hydrologique de la DREM en 1995 et est opérationnel. Les

cotes observées aux stations amont sont communiquées chaque jour à la DREM par radio (BLU de la Météo) et permettent une prévision immédiate de la hauteur de crue du Chari à N'Djaména d'une très bonne qualité avec 10 jours d'avance et d'une qualité légèrement dégradée pour 15 et 20 jours. Le système d'alerte à 10 jours (largement suffisant à N'Djaména pour prendre des mesures de sécurité publique) suppose cependant que les données amont parviennent bien au complet au centre de traitement.

Dans la perspective de défaillances d'une ou plusieurs stations, l'Orstom a réalisé un modèle de prévision en « mode dégradé » en introduisant les hauteurs d'eau manquantes suivant des fréquences empiriques de Hazen établies par dates et stations. La mise en œuvre opérationnelle du nouveau logiciel devrait faire l'objet d'un nouveau contrat.

Afin de minimiser le risque de défaillances dans les observations, il a été aussi proposé de doubler le système de collecte des données par un système de stations automatiques avec télétransmission par satellite (Météosat) prévoyant une station de réception à la DREM. Ce système pourrait être financé par la Coopération française et les stations concernées pourraient être incorporées au réseau de stations de référence du réseau africain HYCOS du WHYCOS de l'OMM, projet qui assure une surveillance mondiale de l'environnement à travers le suivi de la composante « eaux de surface » du cycle de l'eau.

Limité dans ses objectifs, ce modèle peut être utilisé, grâce aux relations établies par ailleurs, pour évaluer le remplissage du lac (vs. maximum de N'Djaména).

ANNEXE 5

Commentaires sur les projets 1, 2, 3 et 4 du Plan Directeur de la CBLT (1992)

Projet n°1 :

Le descriptif de ce projet indique qu'il cherche à "initier une action concrète... visant à rendre (le lac) moins vulnérable à la sécheresse". Cet objectif ambitieux est peut-être utopique puisque le niveau du lac dépend principalement de conditions climatiques sur lesquelles l'homme n'a aucune prise. Il peut permettre cependant de dégager les initiatives humaines qui pourraient encore aggraver la situation.

Projet n°2 :

Il s'agit d'étudier en détail la faisabilité du projet pharaonique de détournement d'une partie des eaux du Haut Oubangui vers le bassin du lac Tchad. Au vu des travaux gigantesques requis par une telle entreprise, une courte pré-étude serait peut-être suffisante pour mettre en évidence les difficultés techniques majeures, les coûts et avantages attendus ; elle devrait ajouter une étude d'impact. On peut cependant se demander qui aurait actuellement la capacité de financer un tel projet.

Projet n°3 :

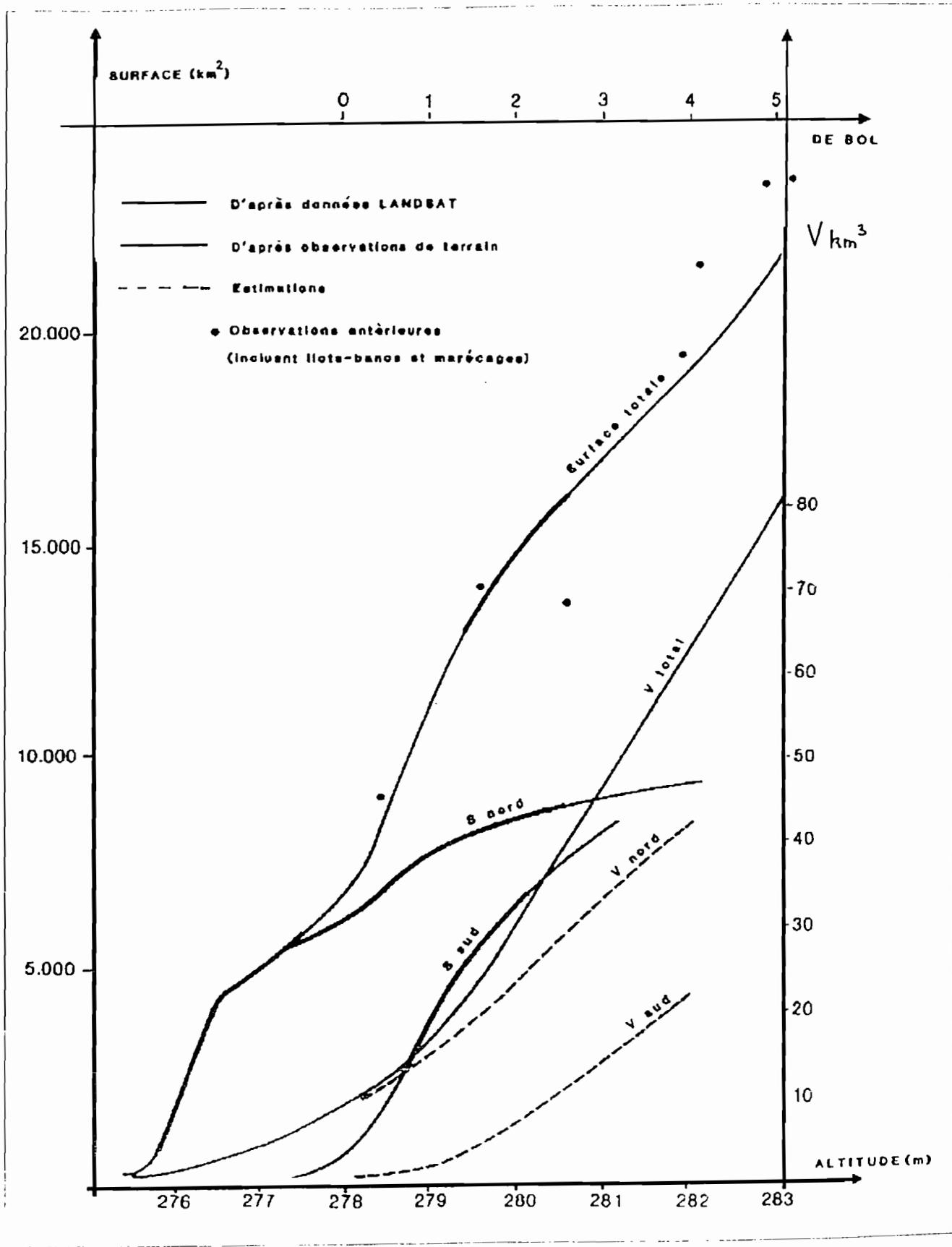
Ce projet vise à une gestion intégrée des eaux du système Chari-Logone. Son succès repose en grande partie sur l'utilisation du modèle hydrologique, dont l'état actuel ne permet pas d'imaginer qu'il soit capable de répondre finement aux questions posées.

Si l'on veut s'intéresser "dans les moindres détails" au rôle des plaines inondables, il faudra réaliser des travaux topographiques conséquents et installer des points d'observation en surface et dans la nappe et accumuler des observations pendant une durée bien plus longue que celle prévue pour le projet (2 ans).

Projet n°4 :

Les points 1, 2 et 3 justifiant la proposition de projet sont des évidences de gestion des eaux qu'il fallait probablement rappeler. Par contre, les problèmes de déforestation ou de mouvement de dunes (points 4, 5 et 6) ne sont pas liés aux ressources en eau.

Il n'est nulle part fait mention des moyens envisagés pour comprendre et prévoir l'impact des différents aménagements du bassin amont : une double modélisation, hydrologique et hydrogéologique, est indispensable.



Correspondance entre surface et volume du lac Tchad