

Hydrologie du lac Tchad



Jean-Claude Olivry
Alfred Chouret
Gabriel Vuillaume †
Jacques Lemoalle
Jean-Pierre Bricquet

CRSTOM
éditions

Hydrologie du lac Tchad

Monographie hydrologique 12

Jean-Claude Olivry
Alfred Chouret
Gabriel Vuillaume †
Jacques Lemoalle
Jean-Pierre Bricquet

ORSTOM éditions

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

PARIS 1996

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

En hommage à Jean RODIER (1914-1994) père de
l'hydrologie africaine et initiateur des recherches
hydrologiques de l'Orstom sur le lac Tchad.

REMERCIEMENTS

La réalisation et la mise en forme du manuscrit ont été effectuées au Centre Orstom de Bamako. Nos remerciements s'adressent d'abord à Mesdames Assita Malikité, Sitan Guindo qui ont assuré la saisie du manuscrit, à Monsieur Jean Pierre Debuiche pour une partie des figures ainsi qu'à Mesdemoiselles Aminata Thiam et Aminata Diallo, à Mamadou Diarra, pour les compléments iconographiques, la présentation des tableaux et les recherches bibliographiques, à Madame Danielle Olivry pour les corrections du manuscrit.

Nous remercions également les responsables du Service Hydrologique National et de la Météorologie Nationale du Tchad (Direction des Ressources en Eaux et de la Météorologie), Housseini A. Maïga, Ingénieur de la Direction Nationale de l'Hydrologie du Mali, détaché à la cellule Agrhymet, (CILSS-PNUD-OMM) de N'Djaména et le centre Agrhymet de Niamey pour la communication de données récentes.

Nos remerciements s'adressent aussi à Gil Mahé et Fatogoma Bamba pour leur contribution ponctuelle mais précieuse dans l'analyse de quelques aspects actualisés de nos recherches.

Enfin qu'il nous soit permis de saluer ici la mémoire de Gabriel Vuillaume, coauteur de cet ouvrage, disparu prématurément.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
<u>Le cadre physique du lac Tchad</u>	<u>9</u>
Première partie	
Chapitre 1 : Morphologie du lac Tchad.....	11
Chapitre 2 : Géologie générale du lac Tchad.....	35
Chapitre 3 : Végétation du lac Tchad.....	73
<u>Climatologie du lac Tchad</u>	<u>83</u>
Deuxième partie	
Chapitre 4 : Mécanismes du climat et données climatologiques.....	85
Chapitre 5 : Etude des précipitations.....	117
<u>Hydrologie du lac Tchad</u>	<u>135</u>
Troisième partie	
Chapitre 6 : Données limnimétriques et hydrologiques.....	137
Chapitre 7 : Bilan hydrologique et modélisation des hauteurs d'eau du lac Tchad.....	165
Chapitre 8 : Crues et étiages du lac - prévision et prédétermination.....	191
Chapitre 9 : Le Petit Tchad des vingt-cinq dernières années.....	217
CONCLUSION	
Le lac Tchad est-il appelé à disparaître ?	241
Références bibliographiques	
Table des matières	
Planches photographiques hors-texte	

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.

Avec un peu plus de 400 000 km² et une répartition entre Etats rappelée dans le tableau ci-après, 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'Air 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.

Bassin conventionnel du lac Tchad : répartition par pays (avant 1994)

Pays	Superficie en km ² dans le bassin conventionnel	Pourcentage du bassin conventionnel	Pourcentage du territoire national
Cameroun	37 500	8,5	8
Niger	121 500	29,5	9,5
Nigeria	90 000	21	9,7
Tchad	178 300	41	14
Total	427 300	100	-

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. Ils ont, en outre, été marqués, depuis plus de deux décennies, par une participation active de l'Orstom à la formation en hydrologie de cadres du Tchad et du Cameroun.

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.

Cette grande flaque d'eau, bue par les sables et le soleil, au coeur de l'Afrique tropicale sèche, dont les rivages viennent, s'éloignent, s'estompent et reviennent, a fasciné plusieurs générations de chercheurs. 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 Agrhyment de N'Djaména, ou par l'interprétation de l'imagerie satellitaire disponible.

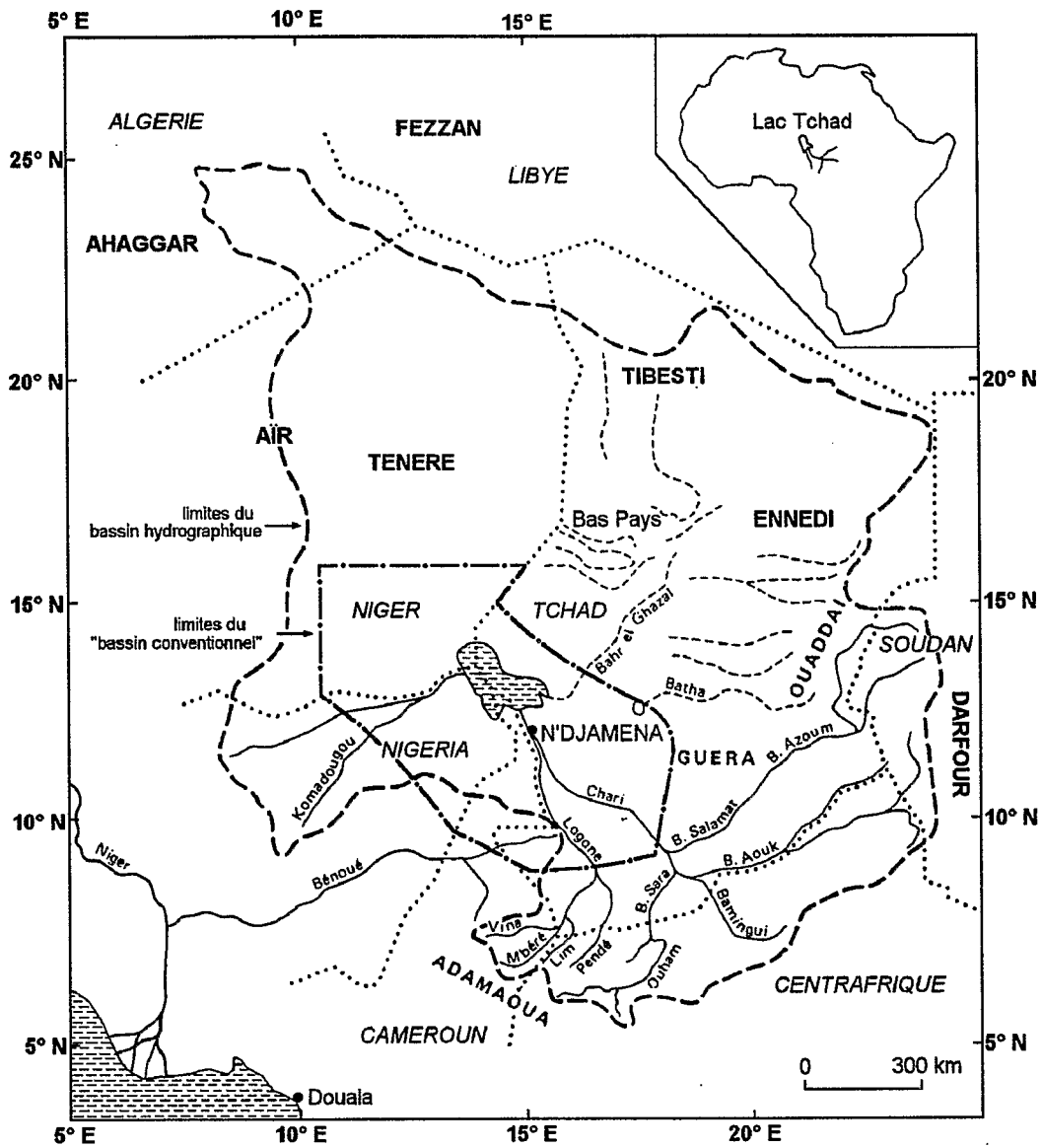


Figure 1

Bassin hydrographique et bassin conventionnel du lac Tchad

A l'heure où de nouvelles générations peuvent entreprendre de nouvelles études, que ce soit au plan de la recherche fondamentale ou en termes plus concrets de projets de développement, il nous a paru important de rassembler dans un ouvrage aussi synthétique que possible les connaissances sur l'hydrologie du lac Tchad.

L'objectif de cet ouvrage est donc de présenter la mémoire du savoir acquis sur le lac. Plus que la présentation des savoir-faire, qui ont d'ailleurs évolué avec le développement des sciences, c'est le « faire-savoir » de notre expérience qui sous-tend cette publication.

Mais l'étude synthétique d'un objet aussi fugace que le lac Tchad, d'un hydrosystème aussi variable, semblait être une gageure dans la période actuelle. Ne devrait-on pas parler « des hydrologies » du lac Tchad plutôt que d'hydrologie ? Quelle valeur accorder aux analyses hydrologiques effectuées pour l'essentiel sur une période de bonne hydraulité ? Quelle signification donner à des études statistiques décalées dans le temps ? Le lac Tchad est-il condamné à disparaître ?

Autant de questions qui resteront présentes à l'esprit des auteurs tout au long de cet ouvrage, avec, comme corollaire, la préoccupation constante du contexte déficitaire actuel qui, tel un thème lancinant, reviendra souvent au fil des chapitres.

L'ouvrage a été divisé en trois parties. Dans la première partie consacrée au cadre physique du lac, trois chapitres abordent successivement la morphologie du lac, la géologie générale du lac (avec les aspects paléogéographie, sédimentologie, géochimie et hydrogéologie) et la végétation.

La seconde partie porte sur la climatologie du lac, avec une étude des mécanismes généraux du climat, des paramètres climatiques intervenant dans le calcul de l'évaporation, puis l'étude des précipitations.

La troisième partie consacrée à l'hydrologie proprement dite contient quatre chapitres. Le premier porte sur les données de base (données limnimétriques et hydrologiques). Le second chapitre traite du bilan hydrologique et de la modélisation des hauteurs d'eau. Le troisième chapitre aborde l'étude des crues et des étiages du lac, leur prévision et leur étude statistique. Un dernier chapitre a été consacré à la description du Petit Tchad dans la période récente et aux perspectives de son évolution.

L'ouvrage est complété par d'abondantes références bibliographiques qui ne prétendent cependant pas à l'exhaustivité. Enfin, et quoique largement cités dans le texte, les auteurs tiennent à souligner l'importance des travaux produits, sous la responsabilité de Jean Rodier, par A. Bouchardeau, R. Lefèvre, M. Roche, P. Touchebeuf de Lussigny, B. Billon, Ch. Riou, M.A. Roche, P. Carré, hydrologues qui ont précédé ou accompagné leur génération. Leur contribution a constitué un atout de premier plan dans la réalisation de cet ouvrage dont l'ambition est d'être un outil pour le futur des recherches sur le lac Tchad.

Le cadre physique du lac Tchad

Première Partie

Morphologie du Lac Tchad

Chapitre 1

1. SITUATION ET CARTOGRAPHIE

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 (fig. 1.1).

A l'époque actuelle, bien qu'il ne représente plus qu'une petite partie de cette mer ancienne, le lac occupe encore une superficie respectable comprise *grosso modo* entre 10 000 et 25 000 km² suivant l'importance des crues du Chari. Dans cette gamme de superficies, le lac Tchad se classe entre le 12^{ème} et 18^{ème} rang parmi les grands lacs du monde. Il est le quatrième des lacs africains après les lacs Victoria, Tanganyika et Nyassa. Si l'on ne considère que les lacs endoréiques, sans relation hydrographique avec la mer, il est le troisième du monde après la mer Caspienne et la mer d'Aral. Ces dernières étant par définition des étendues d'eau salée, le lac Tchad aux eaux douces occuperait donc le premier rang de sa catégorie juste avant le lac Balkhach en Russie, qui est cependant moins sensible aux variations de superficie (18 400 km²).

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 ou encore le Salar de Uyuni en Bolivie (le plus étendu de tous, mais définitivement asséché). Il s'agit là de lacs ou d'anciens lacs endoréiques situés en zone aride du type "Sebkha" ou "Salt Pan", 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 est très faible, comme l'avaient déjà noté les premiers explorateurs.

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 Yobe ¹, 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.

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.

¹ La Komadougou Yobe apparaît improprement dans le reste de l'ouvrage sous le seul nom de Komadougou.

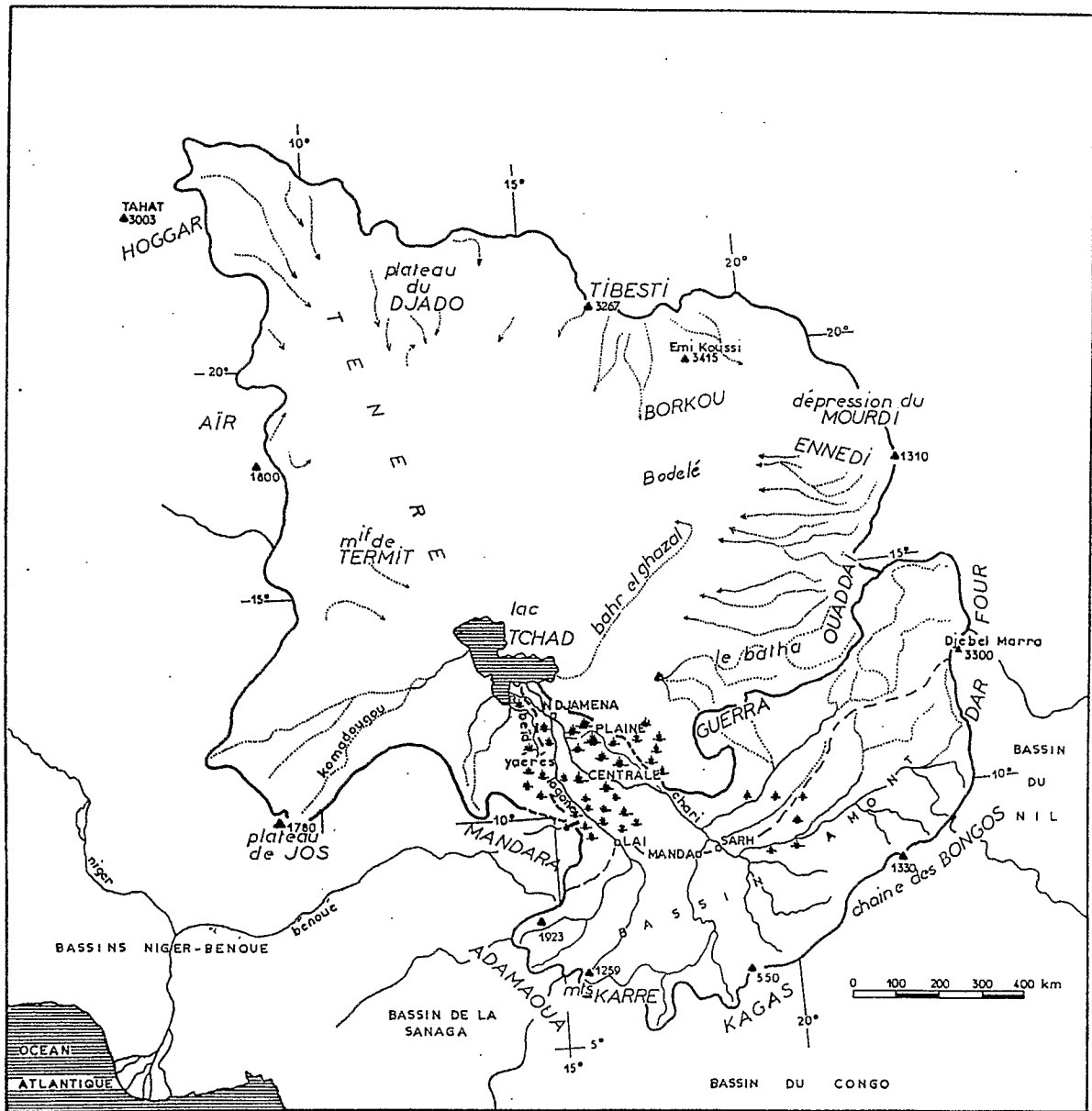


Figure 1.1

Carte du bassin hydrographique théorique du lac Tchad.

Compris entre les parallèles 12°20' et 14°20' de latitude nord, d'une part, et entre les méridiens 13° et 15°20' de longitude est, d'autre part, le lac Tchad est partagé entre les territoires des quatre états suivants :

- le Tchad	à l'est,	pour moitié environ ;
- le Niger	au nord-ouest,	pour 1/6 environ ;
- le Nigeria	à l'ouest,	pour 1/4 environ
- le Cameroun	au sud,	pour 1/12 environ

Les parties du lac rattachées à des états francophones, c'est-à-dire à peu près les trois quarts de sa superficie, sont couvertes par les cartes de l'Institut Géographique National au 1/200 000e dont la liste est donnée ci-dessous :

Goulfey	14 à 15°E, 12 à 13°N - Cameroun et Tchad
N'Djaména	15 à 16°E, 12 à 13°N - Tchad
Boso	13 à 14°E, 13 à 14°N - Niger et Tchad
Bol	14 à 15°E, 13 à 14°N - Tchad
Ngouri	15 à 16°E, 13 à 14°N - Tchad
N'Guigmi	13 à 14°E, 14 à 15°N - Niger et Tchad
Nokou	14 à 15°E, 14 à 15°N - Tchad

La bordure occidentale du lac qui est rattachée au Nigeria est couverte par des cartes au 1/50 000e publiées entre 1963 et 1965 par le "Directorate of overseas surveys" pour le Gouvernement Nigérian. Elles ont été publiées à partir de diverses séries de photographies prises entre 1951 et 1963.

Après les prospections de la mission Tilho, à laquelle on doit une première série de documents de base faisant encore autorité, le lac Tchad a longtemps été considéré comme un marécage abandonné aux moustiques. Ces prospections avaient été faites de 1905 à 1908, alors que les eaux du lac étaient très basses, ce qui explique cette impression générale que l'on peut d'ailleurs éprouver encore dans la période récente où le lac est à nouveau comparable à celui qu'a connu Tilho.

Cette situation, due à la persistance des effets de la grande sécheresse des années 70 et 80, ne doit pas faire oublier le lac tel qu'il a été dans les années 1953 à 1967, avec en particulier le maximum de 1963, et l'intérêt important que présente cette région pour les pays riverains.

Les initiatives du Chef de District de Bol qui, durant les années 1950, a donné une extension importante aux "polders" du lac, les nouvelles extensions de ces polders, les activités de la Société de Développement du Lac (SODELAC), les recherches effectuées par les chercheurs de l'ORSTOM, du Muséum d'Histoire Naturelle et de l'Université, la création de la commission du bassin du Lac Tchad (CBLT), enfin l'élaboration de nouvelles cartes précises, ont concouru à mettre en évidence que le lac lui-même et ses rives constituaient pour la République du Tchad une région très intéressante susceptible de jouer un rôle important dans la vie économique du pays. Ce rôle n'a évidemment pas échappé aux autres pays riverains et en particulier au Nigeria qui a largement utilisé les potentialités offertes.

2. DESCRIPTION GENERALE DU LAC

2.1. Le lac lui-même

La description générale du lac que nous donnons ici ne correspond évidemment pas à la situation exceptionnelle des années 80, résultat des effets de la sécheresse passée et de leur persistance, mais à la situation que l'on a pu observer lors des années 1967-1969 où le plan d'eau était à la cote moyenne 281,8 m et qui correspond approximativement au stade "Moyen Tchad", selon la classification de Tilho¹, schématisé par la figure 1.2.

On distingue d'abord une cuvette nord et une cuvette sud qui communiquent plus ou moins bien, ou pas du tout, suivant le niveau du lac, à travers ce que l'on nomme "la Grande Barrière", zone de hauts-fonds souvent marécageux établis selon l'axe Baga Kawa - Baga Sola au niveau de l'étranglement des rives.

Loin d'être uniforme, le lac présente des caractères morphologiques variés sur toute son étendue. En résumé, on distingue :

- *LES EAUX LIBRES* : Elles donnent l'impression de pleine mer lorsqu'on les parcourt en bateau. Elles s'étendent au nord, à l'est et au sud-ouest du delta du Chari d'une part (eaux libres du sud-est et du sud), au nord, à l'est et au sud de l'embouchure de la Komadougou d'autre part (eaux libres du nord). Leur extension varie beaucoup avec le niveau des eaux, comme on le précisera plus loin.
- *L'ARCHIPEL* : Les deux cuvettes sont bordées au nord et à l'est par un erg fixé dont les sommets des dunes, orientés sud-est - nord-ouest, forment une myriade d'îles qui constituent un vaste archipel (archipel nord-est, archipel sud-est, archipel de l'est).
- *LES "ÎLOTS-BANCS"* : L'archipel est prolongé vers l'intérieur du lac par des îles de végétation ou "îlots-bancs" correspondant à des hauts - fonds dunaires submergés sous une faible profondeur et colonisés par des phanérogames aquatiques. Les îlots-bancs forment la transition entre l'archipel et les eaux libres.
- *LA "GRANDE BARRIERE"* : C'est, comme nous l'avons vu, une zone de hauts-fonds séparant plus ou moins complètement la partie sud-est du lac de la partie nord-ouest. Lorsque le niveau du lac n'est pas trop haut, la "Grande Barrière" présente un aspect analogue à celui des "îlots-bancs", avec une épaisse végétation aquatique. Au cours des phases de niveaux très bas du lac, elle peut être totalement exondée (juin 1905, juillet 1914, 1973, 1974, depuis 1984) isolant complètement la partie nord du sud. Après des périodes d'exondation, une végétation intense peut s'y installer ("ambatches" en particulier) et constituer un vrai barrage végétal. Bien que cette région soit inondée, l'eau ne peut que très difficilement filtrer à travers la végétation et la partie nord se trouve alors asséchée (début 1908, situation 73 et 74 et à la suite de la sécheresse actuelle). La Grande Barrière joue donc un rôle très important dans le comportement hydraulique du lac.
- *LES MARECAGES* : Appelés aussi "herbiers", ils constituent un autre type de paysage et peuvent avoir une extension considérable selon le niveau des eaux. Vus des eaux libres, ils ressemblent aux îlots-bancs et sont difficilement pénétrables. Du côté de la terre ferme, ils se présentent souvent comme des prairies

¹ Dans une publication en 1928 (Ann. Géographie, 37, P. 238 - 260), Tilho parle en fait d'un stade « Tchad Normal ». Etant donné les très grandes variations du milieu physique observées depuis le début du siècle, il nous a semblé difficile de considérer un « Tchad Normal » et préférable de décrire un stade de remplissage « Moyen Tchad » par rapport aux Grand et Petit Tchad (cf. sous-chapitre 3).

de graminées aquatiques, qui, par endroits, peuvent être mises temporairement en cultures ou utilisées comme pâturages.

Lors des périodes récentes de très bas niveaux, ces marécages sont surtout apparus sur la partie sud-ouest de Wulgo vers Baga-Kawa, sur toute la côte nord-ouest et dans la région de Hadjer El Hamis. Ces vastes étendues marécageuses dégagent une odeur fétide, sensible même lors de reconnaissances aériennes à basse altitude. A la suite du retour à un niveau élevé, l'inondation finit par envahir ces marécages, la végétation est arrachée ou disparaît et des bras d'eaux libres apparaissent reliés entre eux par les chenaux tracés par des pirogues.

- **LES "KIRTAS"** : Les "Kirtas" se forment à la montée des eaux lorsque des papyrus se détachent en masse des hauts-fonds. Les "Kirtas" constituent des îlots flottants de forme circulaire dont le diamètre varie entre quelques mètres et quelques centaines de mètres. On a noté leur réapparition en 1977 alors qu'ils avaient disparu entre 1973 et 1975. Ils dérivent au gré des vents ou des courants et viennent parfois boucher temporairement une passe entre deux îles. Ils sont un obstacle et même dans certains cas un danger pour la navigation.

Les modifications importantes qu'apportent à la physionomie du lac les variations du niveau des eaux seront explicitées dans le sous-chapitre 3.

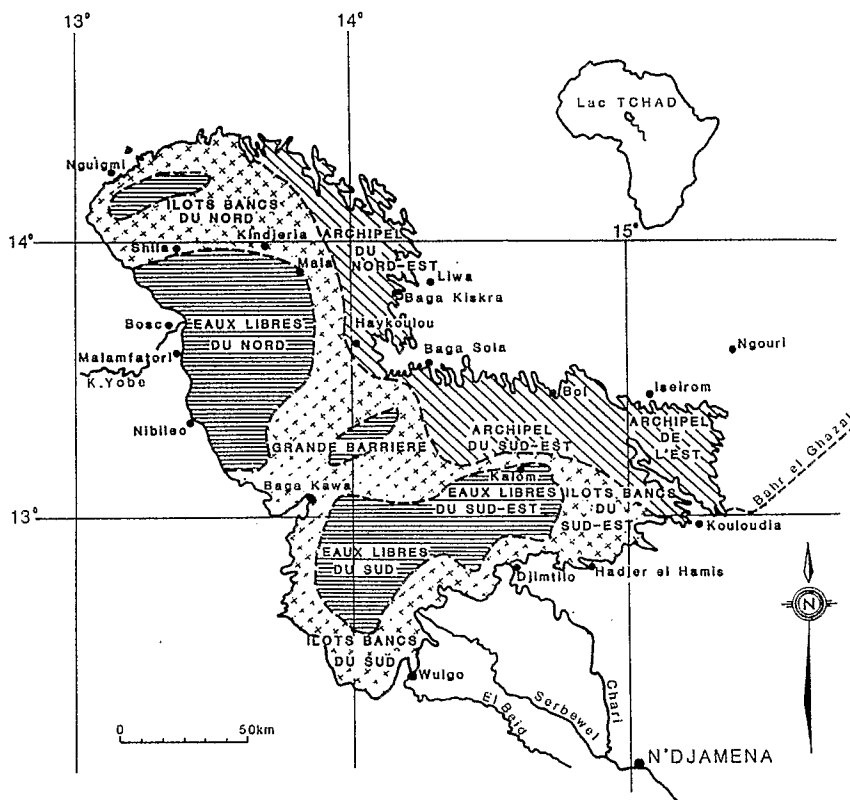


Figure 1.2

Régions naturelles du lac Tchad pour une altitude du plan d'eau à 281,8 m (Moyen Tchad)

2.2. Les côtes

L'aspect des côtes est lié non seulement à leur genèse mais aussi à l'état de remplissage du lac. On distinguera rapidement une côte orientale de N^oGuigmi au Bahr El Ghazal et une côte occidentale. La première, qui correspond à la région de l'archipel, est constituée par des formations éoliennes. Son aspect est extrêmement découpé et il est difficile de déterminer avec précision une ligne de rivage. A l'opposé, sur la partie occidentale, la côte est nette, bien déterminée et même rectiligne vers le nord-ouest.

La région du delta représente un type de paysage particulier qui peut également varier suivant le remplissage du lac en rapport avec les crues du Chari. Le véritable delta actuel commence en aval de Djimtilo. La position de ce village par rapport au rivage du lac est très variable. D'après les cartes de Tilho en 1906, il se trouvait tout près du lac, alors qu'il en était éloigné de plusieurs dizaines de kilomètres lors du paroxysme de la sécheresse récente. En période de crue, les charges solides du Chari ne se déposent qu'à l'extrême pointe du delta et même bien au-delà dans les eaux mêmes du lac.

L'embouchure de la Komadougou n'a rien de comparable avec le delta du Chari. Le cône d'alluvions déborde à peine sur la côte rectiligne et le débit est insuffisant pour balayer la végétation qui encombre le lit très en amont de l'embouchure, quel que soit l'état de remplissage du lac. C'est pourtant bien aux alluvions de la Komadougou que la majeure partie de la côte ouest doit sa formation. Ces alluvions, entre Baga-Kawa et Bangoa, ont été remaniées et forment une dune de sable continue.

2.3. Le Bahr El Ghazal

Le Bahr El Ghazal est un émissaire fossile du lac Tchad qui, à certaines époques de son histoire, le reliait aux "Pays-Bas" du Tchad dont l'altitude minimale se situe à quelque 120 m plus bas que le niveau actuel du lac. Cet émissaire long de 500 km quitte le lac à son extrémité sud-est, passe au voisinage de Massakory, puis sur 450 km environ suit une direction nord-est jusqu'à Koro-Toro.

Lorsqu'à la suite d'une série d'années pluvieuses le niveau du lac est particulièrement élevé, le Bahr El Ghazal tend à jouer à nouveau le rôle d'émissaire mais la pénétration des eaux dans sa vallée dépasse très rarement quelques dizaines de kilomètres et s'arrête toujours très loin de Koro-Toro.

Le Bahr El Ghazal apparaît d'abord comme le prolongement de l'une des nombreuses zones inter-dunaires orientées nord-ouest - sud-est qui caractérisent la rive sud-est du lac. Un peu en amont de Tagaga son lit devient plus marqué ; sa largeur excède rarement une centaine de mètres et lorsqu'il est inondé il se présente comme une succession de mares reliées par des chenaux étroits.

Cet aspect subsiste sur une dizaine de kilomètres en aval de Massakory ; le Bahr El Ghazal aborde ensuite des régions ensablées couvertes d'une maigre steppe et sa morphologie se modifie profondément. Son lit commence à s'élargir et à se subdiviser en plusieurs bras, puis en aval de Chedra, où l'on note encore quelques méandres bien conservés, la dégradation s'accroît et la vallée n'est plus très marquée. Dans la région de Moussoro, elle s'étale sur une quarantaine de kilomètres et est encombrée de bras morts sinueux, plus ou moins reliés à d'innombrables dépressions intermédiaires qui sont occupées par des mares temporaires (fig. 1.3).

La vallée du Bahr El Ghazal reprend peu à peu un aspect moins diffus et se distingue nettement des régions avoisinantes par sa végétation plus dense. Dans la région du Salal, sa largeur varie entre 2 et 7 km. On y observe encore de nombreux vestiges de méandres et de bras morts, mais leur comblement éolien est de plus en plus avancé de sorte que la route de Koro-Toro peut sans grande difficulté emprunter la vallée sur une bonne partie de

son tracé. Vers Nedeley, toute trace d'anciens bras a disparu et l'on ne rencontre plus, çà et là, que des mares temporaires alimentées épisodiquement par le ruissellement des versants de la vallée. Celle-ci s'estompe progressivement et disparaît dans les sables vers Koro-Toro.

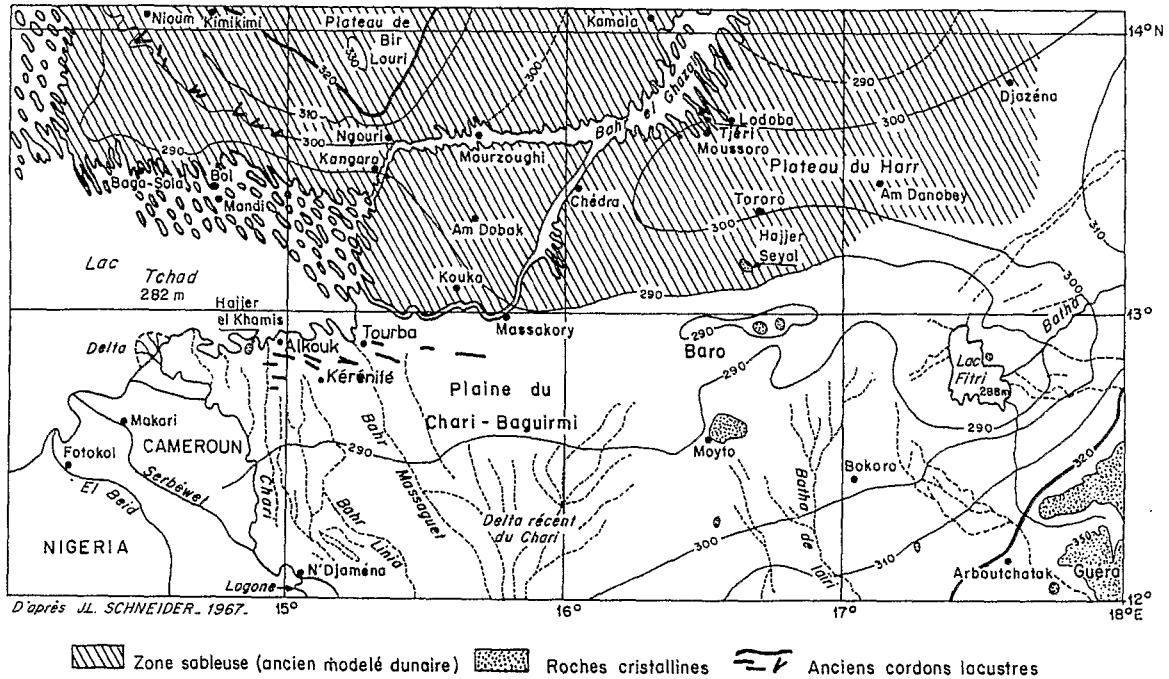


Figure 1.3

Esquisse géomorphologique de la partie orientale du lac Tchad et du Bahr El Ghazal (Schneider, 1967). (échelle approximative : 1 cm pour 30 km)

A l'origine du Bahr El Ghazal, le sous-sol est constitué par un sable fin, d'épaisseur inconnue. Dans le fond des dépressions, on observe des dépôts limono-argileux sur des argiles feuilletées, interstratifiées de sable. En surface, on trouve :

- entre les dépressions, des sols bruns sableux couverts par une savane arbustive dense,
- sur les pentes, des sables colluviaux plus épais sur argiles feuilletées,
- dans les fonds, des argiles noires tropicales couvertes de cultures de mil et de bosquets d'*Acacia scorpioides*.

Les dunes qui apparaissent au nord-est de Massakory sont constituées de sables grossiers donnant naissance à des sols bruns ou brun-rouge steppiques couverts de graminées. Sur les pentes, on observe des terrasses couvertes d'une végétation arbustive clairsemée comportant en particulier des balanites. Des touffes de palmiers doums poussent parfois en bordure des fonds.

2. 4. Les polders des rives nord-est du lac Tchad

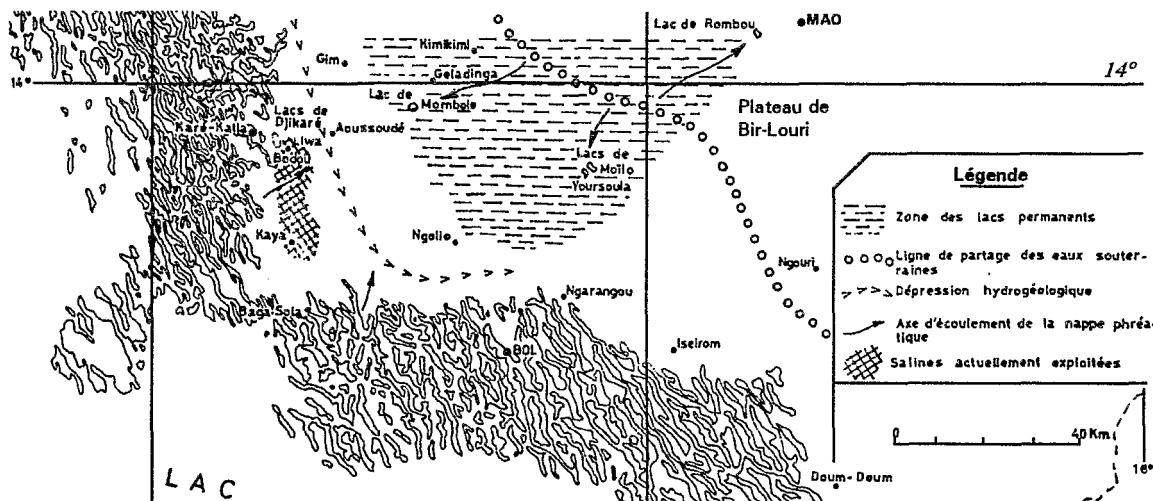
L'isolement de certains bras de la bordure nord-est du lac par la construction de barrages en sable et l'évaporation des masses d'eau ainsi emprisonnées ont conduit à la création de "polders". C. Cheverry (1967) note que les matériaux sédimentaires lacustres exondés sont riches en argile, en matière organique bien humifiée, en azote, en phosphore, en potassium. La présence à faible profondeur d'une nappe phréatique entretient dans les sols une humidité favorable au développement des plantes. Ces caractères sont autant d'atouts agronomiques qui font de ces zones des terres fertiles. Les cultures comme le blé, le maïs, le coton, la pomme de terre y réussissent bien.

Le facteur réduisant progressivement cette fertilité est la salinisation progressive de la nappe phréatique et des sols. Ces polders fonctionnent en effet comme des bassins évaporatoires et les sels, très dilués au niveau du lac, s'y concentrent. Cette concentration est hétérogène et certains secteurs des polders sont beaucoup plus touchés que d'autres. Toujours pour Cheverry, la mise en place d'un système d'irrigation (avec les eaux du lac) associé à un système de drainage serait un moyen efficace, mais coûteux, de réduire les effets défavorable de cette salinisation.

2.5. Les dépressions interdunaires de la bordure septentrionale du lac Tchad

Celles-ci ont été étudiées en particulier par G. Maglione (1976). Ses travaux ont abouti à l'analyse proposée ci-après. Les dépressions interdunaires de la bordure septentrionale du lac Tchad sont tapissées de dépôts lacustres fins argilo-diatomiques à intercalations de sables éoliens, profondément marqués par des phénomènes d'halomorphie.

Ces dépressions sont de deux types. Ce sont soit des lacs temporaires permettant une évaporation directe (lacs interdunaires), soit des dépressions où la nappe phréatique subaffleurante est le siège d'un régime évaporatoire de type capillaire (fig. 1.4).



Zone de formation des évaporites sur la bordure nord-est du lac Tchad

Les conditions climatiques et sédimentologiques sont propices à la mise en place d'évaporites. A l'échelle du bassin tchadien, ces interdunes constituent un milieu confinant alcalin du "domaine aval du type cumulatif" dans lequel l'entretien de conditions réductrices par la production de CO₂ biogénique permet des accumulations carbonatées et silicatées sodiques.

Deux types de paragenèse ont été mis en évidence :

- paragenèse syngénétique dans le cas d'une évaporation directe (lacs interdunaires),
- paragenèse diagénétique précoce dans le cas d'une évaporation capillaire à partir d'une nappe à faible profondeur (natronières).

Les mécanismes qui conduisent aux mêmes associations minérales avec toutefois des habitus différents ont pu jouer alternativement dans le temps, au gré des fluctuations lacustres de l'holocène.

La concentration par évaporation des ions en solution et leur précipitation sous forme de sels cristallisés se fait suivant deux voies, selon les conditions d'aération et de drainage du milieu :

- La voie carbonatée en milieu confiné réducteur qui livre des carbonates (Calcite, Gaylussite, Nahcolite, Trona, Natron, Thermonatrite) et des silicates sodiques ou calco-sodiques (Mordénite, Magadiite, Kenyaite et Kanémite¹).

Cette série domine actuellement dans les interdunes du Kanem dont le milieu confinant induit un fond géochimique régional carbonaté ;

- La voie chloro-sulfatée en milieu drainé oxydant qui constitue des anomalies locales (par exemple le gisement chloro-sulfaté de l'île de Napal dans l'archipel du nord-est du lac) livrant des chlorures et des sulfates sodiques (Halite, Northupite, Gypse, Bloedite, Mirabilite, Thénardite,...).

Quelle que soit la voie empruntée, le sodium est toujours le cation dominant.

La cristallisation des sels dans les interdunes du Kanem constitue un des principaux facteurs de la régulation saline du lac Tchad. Maglione (1976) a ainsi estimé qu'elle permettait le stockage de 28 à 37% des ions et de 10% de la silice. En fait, le transit des sels du lac vers la nappe interdunaire littorale ne se fait pas par un transfert massif d'eau, mais par une suite de relais à sec.

¹ Espèce minérale identifiée au cours de l'étude.

3. SUPERFICIE DU LAC

Nous avons vu que le lac actuel pouvait être le vestige d'une mer paléotchadienne qui se serait étendue à l'Holocène sur près de 350 000 km². L'histoire géologique du lac sera abordée en détail au chapitre 2. Ici nous retracerons brièvement les variations de sa superficie et son histoire récente depuis le XIXe siècle.

Les plus hauts niveaux du lac ont été décrits par les voyageurs et explorateurs de la moitié ou la fin du siècle dernier (Barth et Nachtigal). Malgré la crue du lac de 1953 à 1964, avec le maximum observé en 1963, ces hauts niveaux de la fin du siècle passé n'ont plus jamais été observés.

A la suite des observations de Tilho, de sa classification proposée en 1928 et des remarques qui précèdent, on peut distinguer trois stades en fonction de la superficie et de l'aspect morphologique du lac (fig. 1.5) :

- "GRAND-TCHAD" : La cote du plan d'eau est à une altitude de l'ordre de 284 m. C'est le lac décrit par les voyageurs du XIXe siècle. Le haut niveau du "Grand-Tchad" entraîne la disparition des îlots-bancs, l'inondation de nombreuses dépressions dont le Barh El Ghazal sur une longueur de 200 km d'après Nachtigal en 1870. La surface en eau estimée approche 25 000 km² et la navigation est possible partout mais les tempêtes sont dangereuses.

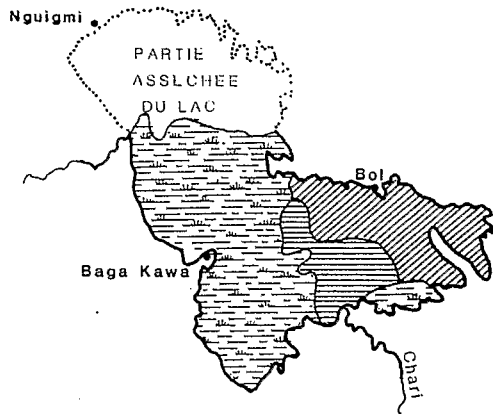
Les lacs "1957" et "1962-1965", peuvent être considérés comme se rapprochant de ce stade, mais avec cependant de nombreuses réserves surtout pour 1957 où la végétation était encore très importante et gênait la navigation. De ce fait, le lac "1962-1965", bien qu'à un niveau légèrement inférieur, se rapprocherait plus du "Grand-Tchad", débarrassé qu'il était de la plus grande partie de l'ancienne végétation déjà balayée par la crue de 1957. Il en est de même du lac "1967", bien que le niveau des eaux fût bien plus bas cette année - là qu'en 1957.

- "MOYEN-TCHAD" : C'est le lac observé par Tilho de 1917 à 1919 et que nous avons connu de 1967 à 1969 ; la superficie en eau à ce stade est de l'ordre de 15 000 à 20 000 km², la cote du plan d'eau de 282 m environ. Des îlots-bancs bordent les zones d'archipel, la navigation est possible sinon facile, notamment au niveau de la "Grande-Barrière" pour passer de la cuvette sud dans la cuvette nord.
- "PETIT-TCHAD" : C'est le stade atteint lorsque le plan d'eau s'abaisse à la cote 280 m et au-dessous. La navigation devient alors pratiquement impossible dans la cuvette sud qui est séparée du nord par l'exondation de la "Grande-Barrière". Ce sont ces conditions, observées par Freydenberg en 1905, Tilho en 1905, 1907 et juillet 1914, qui sont de nouveau apparues au cours de la sécheresse récente à partir de mai 1973. Il faut noter que si ce bas niveau persiste plusieurs années, la cuvette nord qui n'est alors pratiquement plus alimentée, peut s'assécher complètement plus ou moins durablement (ce fut le cas début 1908 et c'est ce que l'on observe de 1975 à 1995).

Depuis le XIXe siècle, à partir des observations des voyageurs, de la mission Tilho et des hydrologues de l'ORSTOM, les fluctuations du niveau du lac peuvent se résumer ainsi:

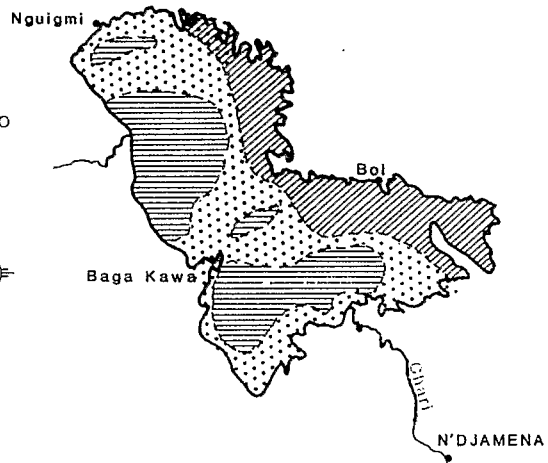
- vers 1800, le lac est à un très haut niveau (286 m ?) ;
- en 1823, le lac était à un niveau proche de 282 m ;
- entre cette date et 1850, période d'assèchement ;
- de 1850 à 1900, période de crue, niveau oscillant entre 283 et 284 m sans atteindre le très haut niveau de la fin du XVIIIe siècle ;

PETIT TCHAD (cote 280m)



D'APRES LES DOCUMENTS DE LA MISSION TILHO
(Début 1908)

MOYEN TCHAD (cote 281,8m)



GRAND TCHAD (cote 284m)

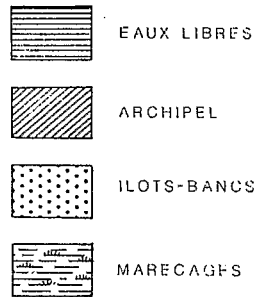
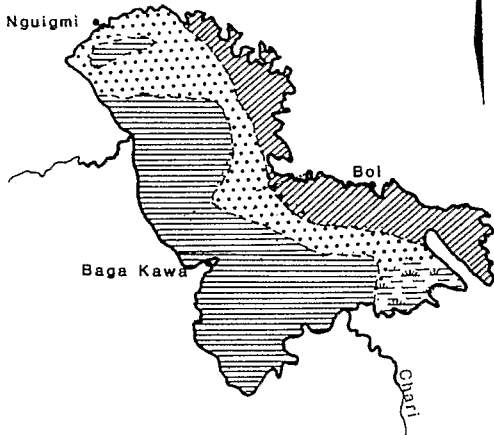


Figure 1.5

Différents stades de remplissage du lac Tchad.

- de 1900 à 1950, le niveau du lac redescend pour osciller entre 281 et 282 m, avec un minimum proche de 280 m en 1908 et 1914. Au cours de cette période, toute la partie nord du lac a été asséchée au début 1908 ; en 1905 (Freydenberg) et en juillet 1914 le lac est scindé en deux parties. Cette dernière situation se serait à nouveau produite au cours des années 1940 ;
- de 1953 à 1964, crue brève du lac qui dépasse légèrement 283 m au début de 1963, maximum du siècle ;
- à partir de 1965, baisse progressive du niveau qui devient brutale à partir de 1972 avec la coupure en deux lacs au cours des étiages lacustres de 1973 et 1974, puis passage à l'état Petit Tchad à partir de l'étiage 1973. Cet état dure encore en 1995. A partir de 1976, le lac est pratiquement réduit à la seule cuvette sud, les remises en eau de la cuvette nord qui se produisent au début de chaque année n'étant que de très courte durée et ne constituant que des marécages de très faible profondeur. La figure 1.6. donne un exemple de ces phases d'assèchement puis de remplissage épisodique de la partie nord du lac.

En considérant les fluctuations du lac depuis plus de cent ans, certains chercheurs ont été tentés d'en déduire une périodicité. D'après le rapport de la mission Tilho, plusieurs auteurs ont essayé de formuler une loi. Hardellet a admis, sur la foi de renseignements obtenus auprès des populations riveraines, une période de 70 à 80 ans. Freydenberg, pour sa part, donne une période de 20 ans aux petits mouvements du lac, avec toutes les 4 ou 5 périodes, un assèchement presque complet. Mais cette loi se trouve plusieurs fois en défaut, en 1866 et 1870 par exemple.

En fait, les variations des apports tributaires du lac sont la cause essentielle des fluctuations du lac ; or, il n'a pas encore été constaté de périodicité dans les crues du Chari ou dans les précipitations intéressant le lac. Les années humides ou sèches se groupent par périodes de durées inégales ; on peut rencontrer une année très sèche au milieu d'années humides ou vice-versa. Il est donc bien hasardeux de tenter de formuler une loi périodique, en particulier en fonction de l'activité des taches solaires à laquelle on a rattaché de nombreux phénomènes naturels avec plus ou moins de succès. En 1965, certaines possibilités de corrélations ont été présentées (Guilcher, 1965), mais celles-ci n'ont pas été confirmées par les faits dans les années suivantes.

Il convient également de rappeler ici la comparaison effectuée par Tilho (1928) entre les fluctuations connues du Tchad et celles des glaciers alpins : les phases du "Grand-Tchad" correspondraient au maximum d'extension des glaciers du Grindelwald et des Bossons, le "Petit-Tchad" aux phases de régression. En se référant aux travaux de P. Mougin (1926) sur les crues du glacier des Bossons, Tilho en 1928 annonçait une phase "Grand-Tchad" vers 1952-1957 et 1993-1997, une phase "Petit-Tchad" vers 1940-1950 et 1975-1985. Il y a bien eu une crue du lac de 1954 à 1963 et la sécheresse des années 1940 est bien connue, de même que celle que nous observons sur le lac aujourd'hui, notamment sur la période 1973-1990. On pourrait ainsi espérer voir le prochain stade "Grand-Tchad" se produire à la fin du siècle, mais la prudence s'impose pour ce genre de prévisions, d'autant que celles de Mougin ont été démenties sur les glaciers alpins... et que rien n'annonce un réel renversement de tendance au début des années 90 dans les régions soudano-sahéliennes.

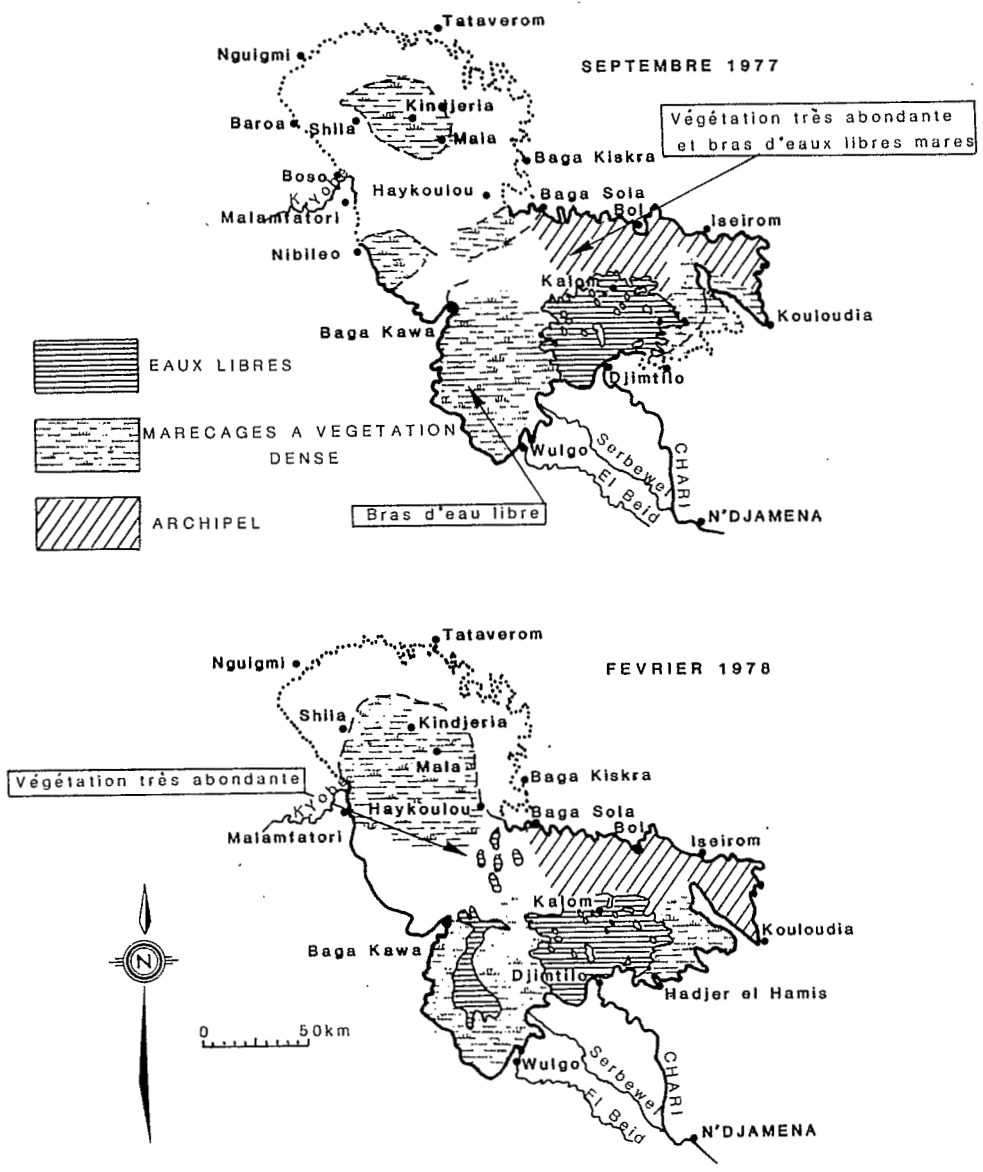


Figure 1.6

Deux aspects du lac Tchad illustrant les variations rapides de sa physionomie : situations en septembre 1977 et février 1978 (les zones en blanc sont exondées).

4. RELATIONS ENTRE LE NIVEAU ET LA SUPERFICIE DES EAUX

4.1. Utilisation des documents cartographiques

La détermination de la superficie du lac par la méthode classique de planimétrie, pour une cote donnée à l'échelle de référence, est une opération délicate :

- au nord et à l'est, les limites du lac sont extrêmement sinueuses et découpées. Sur les cartes, il est impossible de suivre avec la pointe d'un planimètre le contour des myriades d'îles et de presqu'îles de l'archipel. On est donc bien obligé de recourir à des simplifications plus ou moins approximatives. De plus, le contour des îles bordées de roseaux ou de papyrus manque souvent de netteté, ce qui nuit encore à la précision des mesures de surface ;
- au sud et au sud-ouest, les rives du lac sont marécageuses et indécises ; la végétation aquatique ou semi-aquatique ne permet généralement pas de déterminer avec précision la limite des eaux du lac sur les photographies aériennes. La distinction entre les eaux du lac et les eaux de débordement des tributaires est, par ailleurs, assez arbitraire. Or ces eaux de débordement occupent de vastes superficies dans la région du delta du Chari et des autres tributaires camerounais ou nigériens;
- lorsque le niveau des eaux reste assez bas pendant plusieurs années consécutives, la "Grande-Barrière" isole plus ou moins complètement la partie nord du lac qui tend ainsi à s'assécher. Il n'existe alors plus de relation bien définie entre le niveau des eaux relevé dans la partie sud-est du lac et la superficie totale de celui-ci.

C'est néanmoins la technique qui a été utilisée jusqu'à l'exploitation récente des possibilités offertes par la télédétection. Comme elle est restée longtemps la seule méthode applicable et que les travaux de détermination des surfaces concernaient non seulement les eaux libres mais aussi les îlots-bancs immergés et les marécages (alors que la télédétection ne s'est intéressée qu'aux eaux libres), il n'est pas inutile d'inventorier les données existantes :

- *Fin 1907-début 1908 (Mission TILHO)* : superficie en eau estimée à 13 700 km². Le niveau des eaux était alors voisin (cote reconstituée par A. Bouchardeau, 1969) de 280,0 m (H Bol = 2,63 m). Le lac était à un stade "Petit-Tchad" comparable à la phase récente de fin 1977. La cote à Bol n'est pas représentative du plan d'eau de tout le lac.
- *1950-1951 (Commission LOGONE - TCHAD)* : les superficies en eau ont été calculées sur des cartes IGN au 1/200 000e établies à partir de photographies aériennes prises en 1950-1951 à une époque où, d'après A. Bouchardeau, le niveau des eaux était à peu près à l'altitude 282,0 m (H Bol = 4,13 m). Ces cartes ne couvrent malheureusement pas la partie nigérienne du lac et il est assez difficile de combler cette lacune avec les cartes D.O.S. (Directorate Overseas Survey) au 1/50 000e car celles-ci ont été dressées à partir de photographies aériennes prises entre 1951 et 1963. On peut cependant évaluer à environ 21 600 km² la surface liquide du lac correspondant à l'altitude 282,0 m.
- *1956 (Commission LOGONE - TCHAD)* : la carte au 1/500 000e établie en 1958 par la Commission Scientifique Logone-Tchad à partir de photographies aériennes prises en 1956 donne une surface liquide de 23 590 km² pour un niveau des eaux voisines de 282,65 m (H Bol = 4,78 m).
- *1967-1969* : M.A. Roche, à partir des cartes IGN au 1/200 000e, corrigées d'après ses propres observations sur le terrain et en avion, et des fonds topographiques au 1/50 000e du Federal Survey

Department (Nigeria), a pu estimer les surfaces en eau à environ 19 500 km², pour un niveau moyen du plan d'eau sur la période égal à 281,8 m (H Bol = 3,93 m).

- *Juillet 1973* : grâce à la couverture photographique aérienne du lac de juin-juillet 1973, réalisée par la Commission du Bassin du lac Tchad, A. Chouret et J. Lemoalle ont pu évaluer les nouvelles superficies en juillet 1973. La surface en eau était d'environ 9 000 km² dont 7 000 km² pour la cuvette nord et 2 000 km² pour la cuvette sud. La cote à Bol (archipel isolé de tout le reste du lac) était de 278,37 m (H Bol = 0,50 m).
- *Décembre 1973* : après le remise en eau due à l'arrivée de la crue fluviale, A. Chouret et J. Lemoalle ont tenté une approximation grossière des marécages et des surfaces en eau sous la végétation à partir de reconnaissances aériennes. D'après ces estimations, 5 000 km² de marécages viendraient s'ajouter aux surfaces en eau de juillet 1973. A la fin 1973, la superficie en eau du lac était donc d'environ 14 000 km² pour une cote à Bol de 279,50 m (H Bol = 1,63 m), qui n'est pas représentative de l'ensemble du Lac.

La figure 1.7 illustre les évaluations de surface et de volume faites en 1969 en fonction de l'altitude du plan d'eau. Les volumes sont alors nettement sous-estimés.

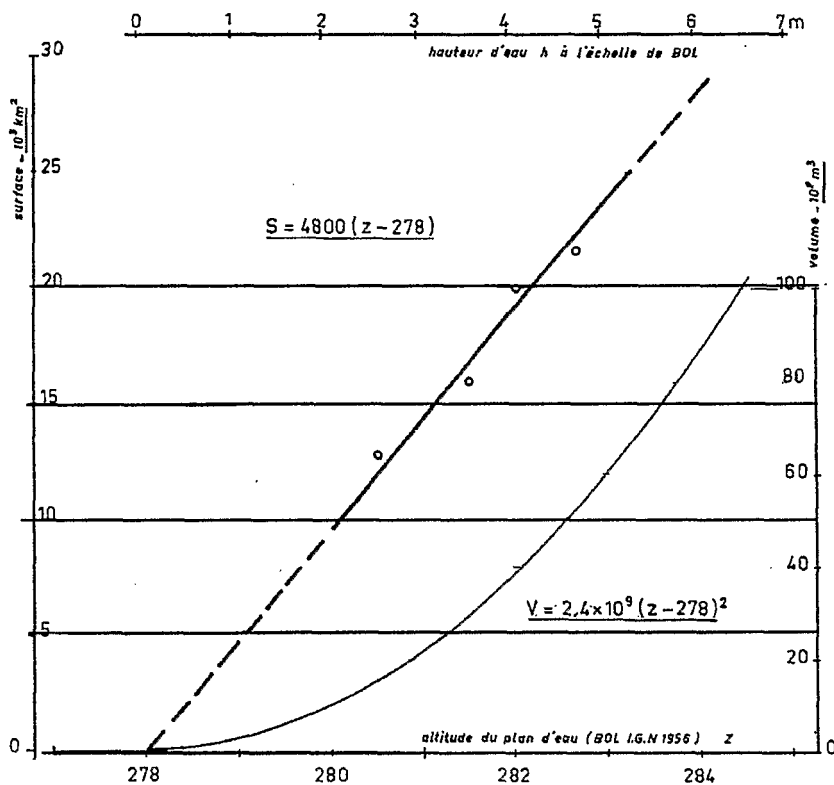


Figure 1.7

Relations proposées en 1969 (Touchebeuf) entre l'altitude du plan d'eau, la surface et le volume du lac Tchad. L'absence d'observations en dessous du niveau 280,5 m conduit à une sous-estimation des surfaces au stade «petit Tchad» et plus globalement des volumes.

4.2. Utilisation de l'imagerie satellitaire

L'exploitation des données Landsat obtenues par télédétection a permis à J. Lemoalle (1979) d'établir les relations Surface-Cote non seulement pour le lac dans son ensemble mais également pour chacune des cuvettes nord et sud.

Chacune des trente-huit images (scènes) utilisées couvrant un carré d'environ 180 km de côté (soit 32 400 km²) est obtenue par un radiomètre à balayage possédant quatre canaux dans le visible et le proche infra-rouge. En raison du recouvrement latéral des éléments successifs, chaque point élémentaire (pixel) d'une image possède une résolution de 57 x 79 m ; chaque image est constituée de 2 256 lignes de 3 240 éléments chacune.

Les données originales fournies sous forme numérique (luminances) sont traduites en images noir et blanc, canal par canal, ou en images colorées (fausses couleurs) par combinaison de canaux, puis interprétées à l'analyseur d'image. Chaque image fait l'objet d'une interprétation propre, c'est-à-dire que la différenciation des éléments du paysage dont les luminances sont voisines s'appuie sur des observations réelles (survol mensuels à basse altitude) ; c'est notamment le cas pour ce qui concerne la délimitation exacte des lignes de rivage, les transitions étant souvent progressives entre l'eau peu profonde, la boue et le sol humide, ou bien entre l'eau, quelques macrophytes aquatiques et une couverture végétale dense.

La période pour laquelle les données Landsat ont été exploitées pour établir la relation surface-niveau (1972-1976) correspond à une phase d'évolution rapide du lac :

- 1973 - Baisse importante du niveau dans les deux cuvettes, exondation de la Grande Barrière et du seuil des îlots-bancs de la cuvette sud avec développement des macrophytes sur les sédiments exondés.
- 1975 - Assèchement complet de la cuvette nord en octobre.

La figure 1.8. présente le résultat des travaux d'interprétation : sur cette figure, sont également portées les données correspondant aux observations ponctuelles antérieures. Les courbes de cette figure concernent les surfaces réelles en eau alors que les estimations précédentes comptaient les îlots-bancs et les marécages, ce qui explique le décalage entre les observations ponctuelles et les tracés.

Le traitement informatique des données obtenues par télédétection permet d'obtenir une approximation plus fine de la relation Surface-Cote, mais il subsiste plusieurs causes d'imprécision telles les oscillations du plan d'eau qui, sous l'influence des vents, peuvent avoir une amplitude de 20 cm.

La relation entre le niveau et le volume des eaux est aussi indiquée dans la figure 1.8. Le volume d'eau contenu dans le lac en fonction de l'altitude du plan d'eau est déterminé par intégration de la relation entre superficie et niveau. A la cote 282m, le volume total du lac est estimé à 63 milliards de m³ (km³).

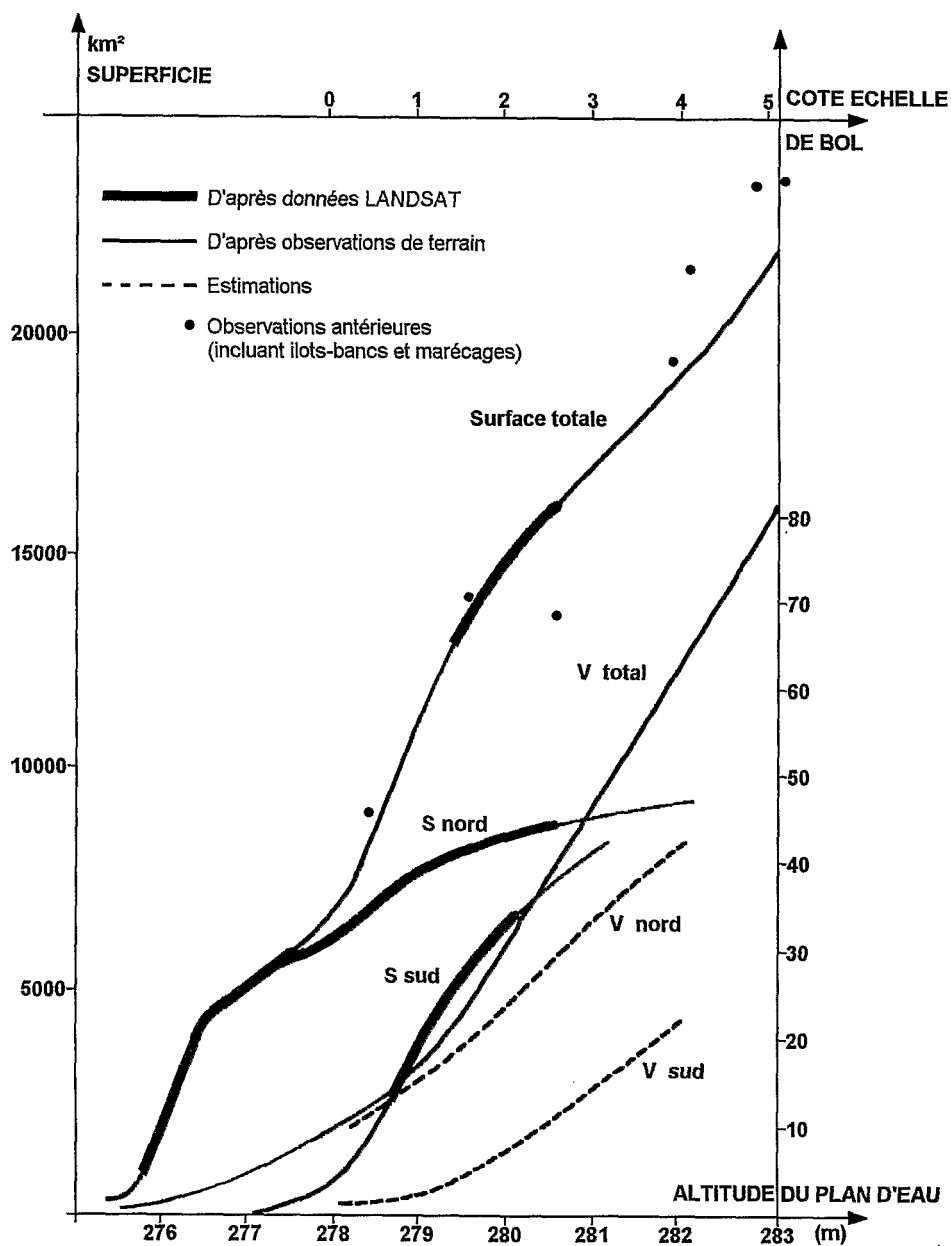


Figure 1.8

Relations actualisées par Lemoalle (1979) entre superficie et volumes du lac et l'altitude du plan d'eau. Les données de terrain ont été complétées par l'interprétation de l'imagerie Landsat disponible pour les années de sécheresse ; les cuvettes sud et nord ont été individualisées (Lemoalle, 1978).

5. ALTITUDE DES FONDS ET PROFONDEUR DES EAUX

En 1957, la Commission Scientifique Logone-Tchad (A. Bouchardeau et R. Lefèvre) avait commencé des mesures systématiques de profondeur à l'aide d'un sondeur à ultrasons Kelvin-Hugues (type MS-26F). Ces mesures n'ont pu être continuées par la suite et se sont limitées à une série d'itinéraires à travers le lac totalisant à peu près un millier de kilomètres. Il est fréquent que les enregistrements du sondeur fassent apparaître deux échos distincts qui correspondent à des couches de sédiments nettement différenciés.

En 1962, une seconde campagne de mesures a été réalisée (B. Billon) avec le même sondeur à ultrasons en vue d'étudier les conditions de navigation entre N'Djaména et la zone côtière susceptible d'être aménagée en "polders". En plus des levés effectués sur le cours du Chari, on a relevé les profondeurs du lac sur des itinéraires totalisant 200 km entre le delta du Chari, Bol, Baga-Sola et Tataverom (fig. 1.9). La figure 1.10 présente des profils bathymétriques tracés d'après les mesures effectuées à l'écho-sondeur par B. Billon en 1962.

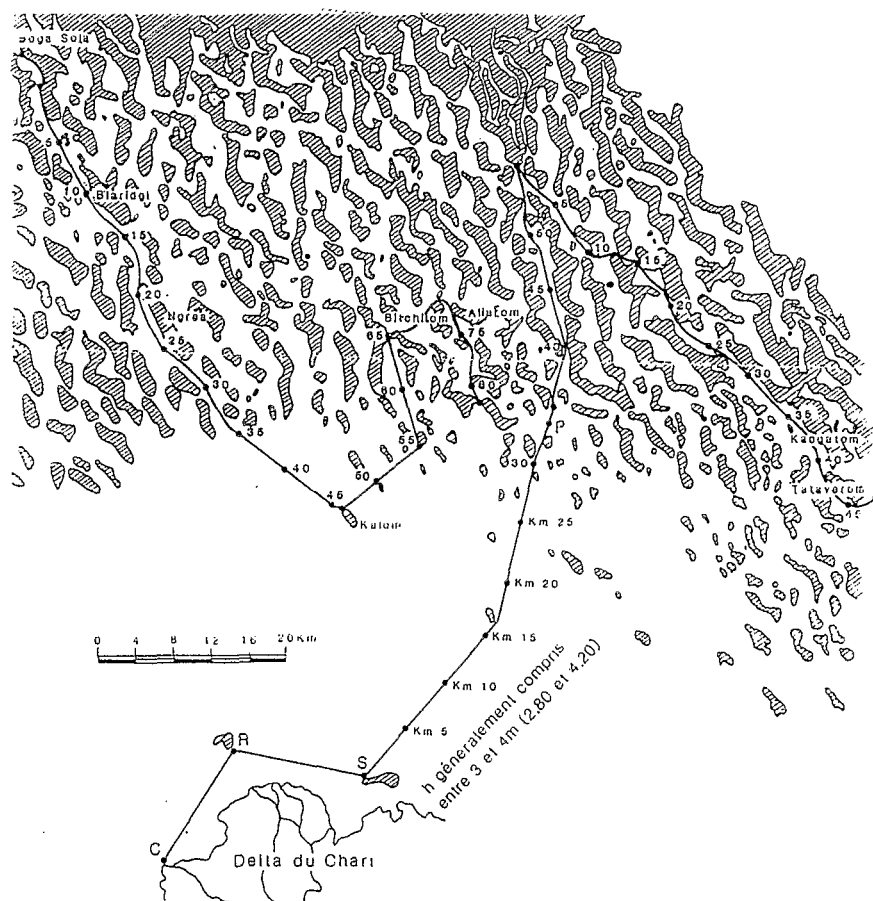


Figure 1.9

Campagnes bathymétriques sur le lac Tchad. Exemple d'itinéraires parcourus en 1962 entre le delta du Chari et Bol et à travers l'archipel du nord-est.

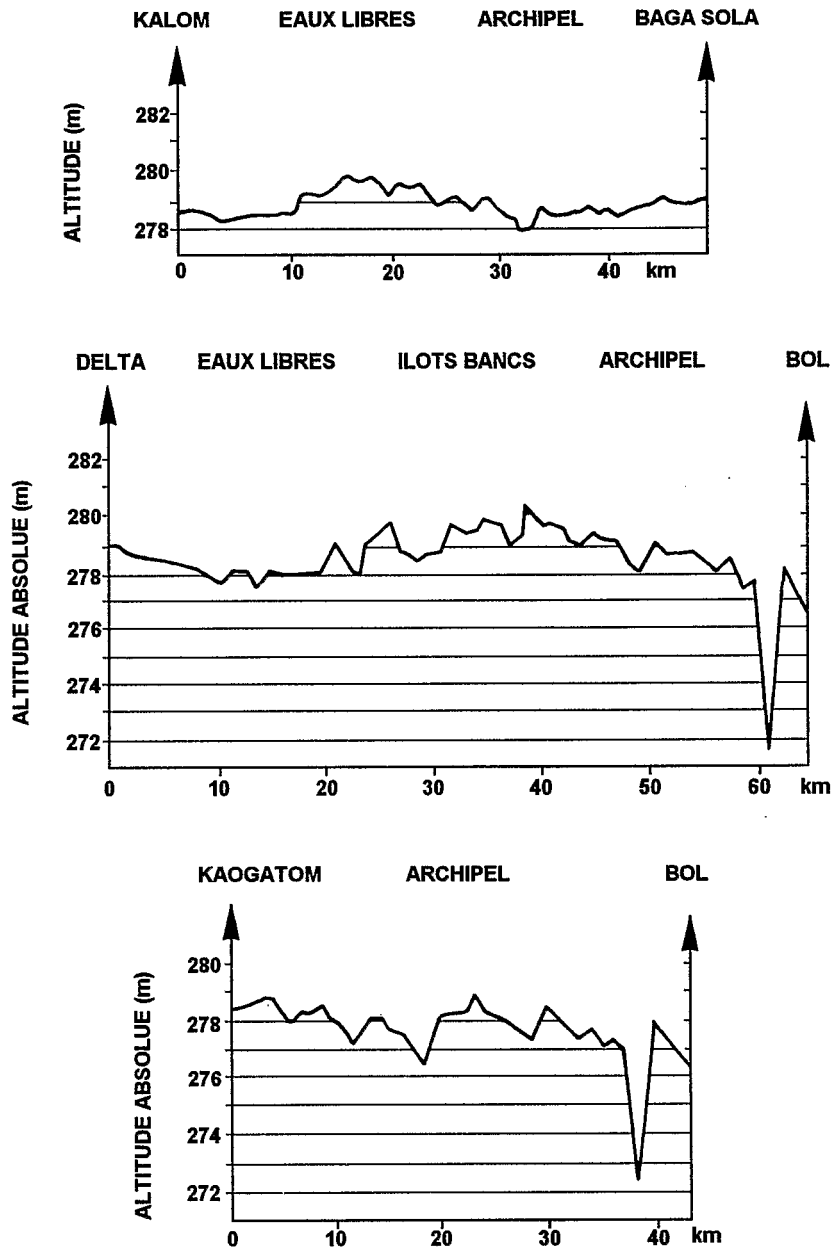


Figure 1.10

Profils bathymétriques du lac Tchad correspondant aux itinéraires de la figure 1.9.

Ces mesures ont été poursuivies par J.P. Carmouze, B. Dupont (1970), et M.A. Roche.

La carte de la figure 1.11 a été dressée à partir des observations de A. Bouchardeau, R. Lefèvre, B. Billon et de M.A. Roche.. Des courbes de niveau du fond ont pu être esquissées (M.A. Roche, 1971).

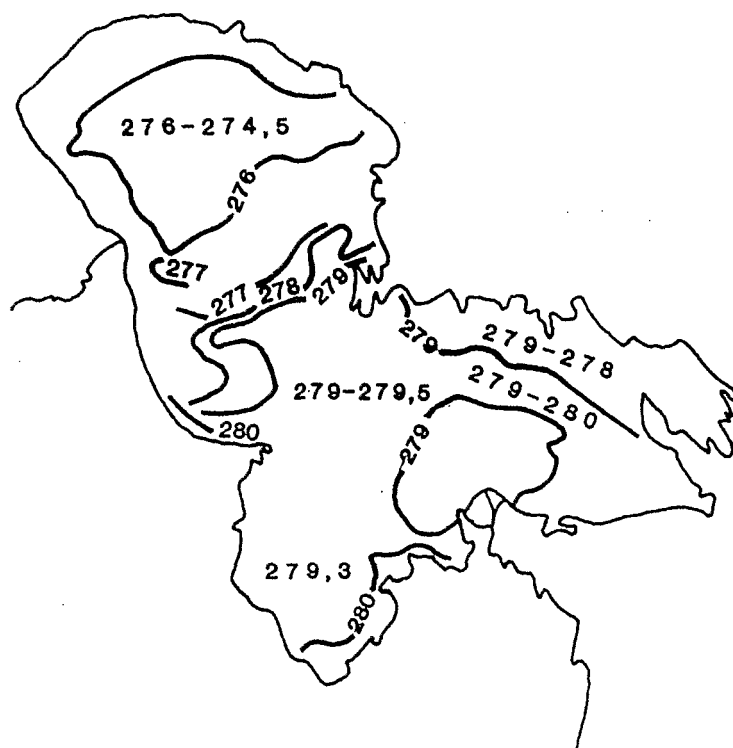


Figure 1.11

Courbes de niveau des fonds du lac Tchad (d'après M.A. ROCHE, 1980).

La figure 1.12 précise l'altitude moyenne des fonds pour différentes zones du lac.

D'après les travaux de M.A. Roche (1971 et 1973) qui ont porté sur la période 1967-1969 et qui font la synthèse des mesures antérieures, il apparaît que, pour un niveau de référence de 281,8 m (altitude moyenne du plan d'eau de 1967 à 1969), l'altitude des différentes régions du lac s'échelonne entre 275,8 et 280,1 m. La profondeur moyenne serait alors de l'ordre de 3,6 m.

La partie septentrionale du lac est plus profonde que la partie méridionale. Dans la partie sud, les fonds sont rarement à une altitude inférieure à 278 m. Les eaux libres du sud-est apparaissent comme une région péri-deltaïque déprimée par rapport à celles qui l'entourent. Les fonds s'y établissent entre 278,3 et 278,7 m tandis que dans la région de Meinara, au SSW, ils varient entre 279,0 et 279,5 m pour se relever progressivement en direction des côtes. Les îlots-bancs et le sud de l'archipel du sud-est correspondent à une surélévation des fonds qui remontent entre 279 et 280 m pour s'abaisser ensuite entre 279 et 278 m en direction des côtes du Kanem.

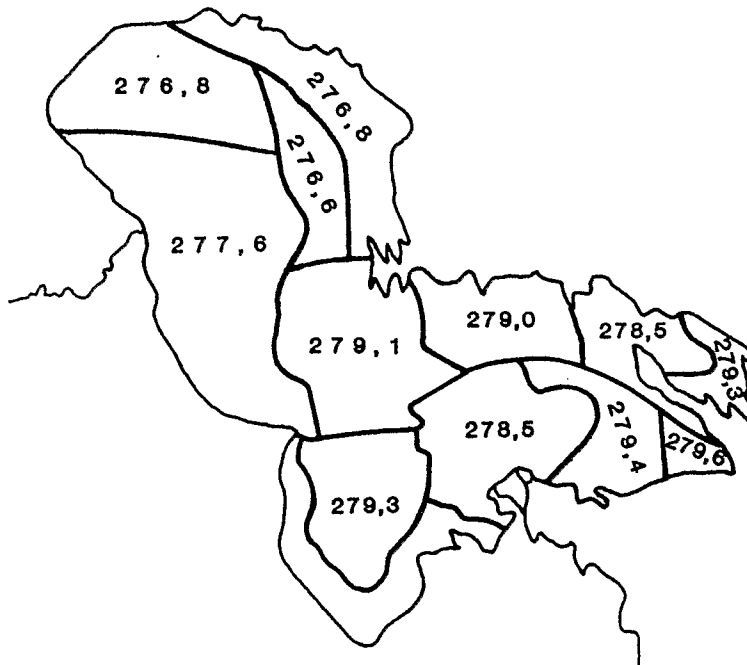


Figure 1.12

Altitude moyenne des fonds pour différentes zones du lac (Roche 1980).

L'altitude des fonds de la Grande-Barrière varie entre 279,0 et 279,5 m. Dans le bassin septentrional, les fonds s'abaissent progressivement vers le nord de 279 à 275 m pour remonter légèrement de 276 à 277 m vers les côtes du Kanem et en pente plus douce vers les côtes ouest. Le nord des eaux libres, des îlots-bancs et de l'archipel du nord-est ainsi que le sud des îlots-bancs du nord sont les zones les plus basses du lac. La figure 1.13 illustre cette différence entre profondeurs des cuvettes sud et nord et l'effet de seuil de la Grande Barrière (Lemoalle, 1989). Les altitudes les plus faibles, très localisées, atteignent 271,4 m au sud de Bol et plus couramment 275,5 m dans la région des îlots-bancs du nord.

Le fond est très régulier dans certaines régions (extrême sud des eaux libres du sud, poches d'eaux libres en face de Baga-Kawa), mais par contre il peut être irrégulier dans d'autres régions en particulier la Grande Barrière et l'Archipel, ce qui est normal puisque le lac y recouvre des dunes mortes. Si les passes entre les îles correspondent fréquemment à des seuils sableux, dans certains cas au contraire, des fosses relativement profondes peuvent s'y établir. On a noté quelques maximums d'une dizaine de mètres dans certains bras de l'archipel, toujours pour le même niveau de référence de 281,8 m.

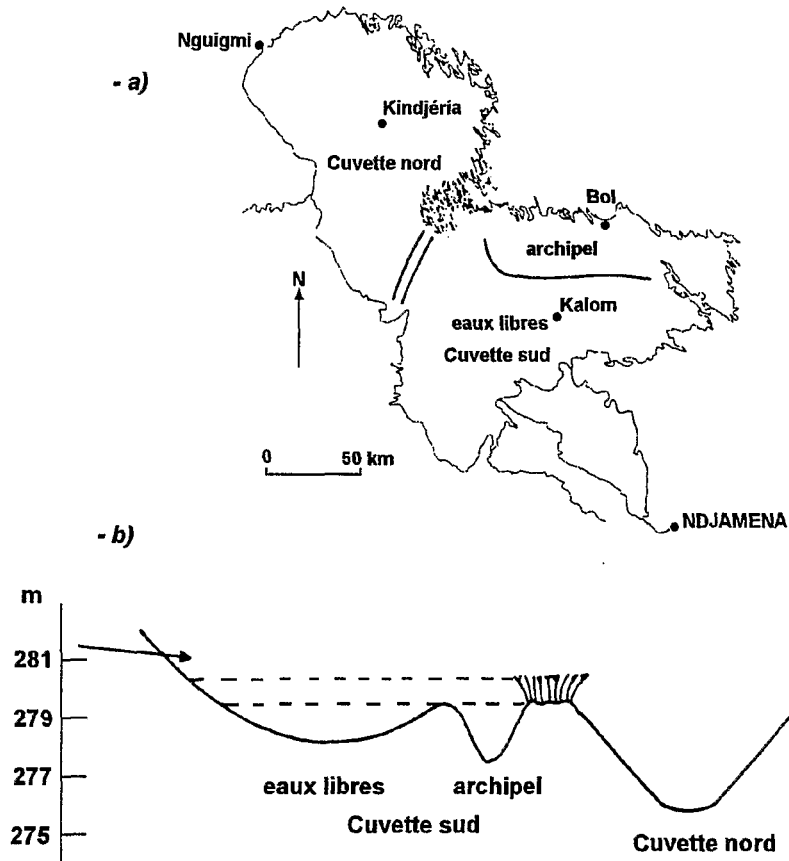


Figure 1.13

Représentation schématique des seuils et des bassins du lac en période de «petit Tchad» (a) et coupe SE. NW expliquant le fonctionnement hydrologique du lac avec l'effet de seuil dû à la végétation dans la Grande Barrière (b) (Lemoalle, 1989).

6. CONDITIONS DE NAVIGATION

Il y a encore vingt-cinq ans, un trafic de quelques milliers de tonnes par an était assuré entre N'Djaména et Bol ou Baga Sola par des barges accouplées à un remorqueur. Ce trafic concernait le transport de denrées alimentaires et de matériaux divers dans le sens N'Djaména-Bol et de natron dans le sens inverse. Il était destiné à s'accroître avec le développement des polders de la région de Bol, dont il faut acheminer les productions diverses, en particulier le blé, vers N'Djaména.

Un trafic de natron peu important mais non négligeable existait également à partir de Bol et Baga-Sola en direction de Baga-Kawa. il utilisait alors des bateaux légers "Kadeye", faits de roseaux ou de papyrus, fréquents sur

l'ensemble du lac. Ces embarcations ont à l'heure actuelle pratiquement disparu et ont été supplantées par des pirogues quelquefois équipées de moteur.

Ahmed Ibn Fartwa, historiographe d'Idriss Alaoma, roi du Bornou (in H.R. Palmer, 1928), mentionne déjà à la fin du XVI^e siècle, une navigation organisée sur la Komadougou Yobe et le lac, avec la fabrication de grosses péniches pour le transport rapide des vivres et des troupes. Mais, les récits des voyageurs et explorateurs du début du siècle nous ont laissé des descriptions qui montrent combien ces conditions de navigation peuvent varier avec l'état de remplissage du lac qui s'accompagne également suivant le cas d'une réduction ou d'une extension considérable de la végétation. La grave sécheresse récente a bien mis en évidence ces modifications déjà entrevues autrefois et apparues à partir des années 1970, où pratiquement toute la navigation a été interrompue sur le lac, et où dans certaines régions, même le trafic des pirogues était rendu très difficile, sinon impossible, soit du fait de la lame d'eau réduite à quelques centimètres, soit du fait de l'inextricable enchevêtrement végétal. En juillet 1973 et 1974, l'exondation de la Grande-Barrière et l'isolement de la région de l'archipel de Bol par rapport à la poche des eaux libres en face du delta du Chari ont eu pour conséquence l'échouage ou au moins l'immobilisation de certaines embarcations de tonnage important. Certaines d'entre elles n'ont pu être ramenées qu'au début 1977 de Bol à N'Djaména grâce à l'élévation du plan d'eau dans la cuvette sud et à l'ouverture, par les commerçants et transporteurs, d'un chenal à travers la végétation palustre de la zone de l'archipel permettant ainsi de rejoindre les eaux libres et le delta. C'est en particulier le cas du "Jacques Daget", navire de recherche de l'Orstom.

Dès l'exondation de la Grande-Barrière en juin 1973, un déplacement des pôles d'activité économique a été constaté. Ainsi Baga-Sola, traditionnel port du natron, alors asséché, a été abandonné au profit de Baga-Kiskra en face de Liwa jusqu'en 1974 où cette région a été asséchée. Baga-Sola, situé dans la cuvette sud, reprend épisodiquement, lors des remises en eau, son rôle traditionnel de transit du natron vers Baga-Kawa, non sans difficultés en raison de l'importante végétation.

Dans le nord, à la suite des phases d'assèchement répétées, suivies de courtes périodes de remise en eau limitées et sans effets durables, de nombreuses pirogues abandonnées jalonnent les anciens itinéraires et plusieurs embarcations importantes (navire de la station des pêches, navire hôpital de la Sudan Unit Mission") ont été immobilisées pour longtemps. Au cours de ces périodes de très bas niveaux, l'accès au lac à la sortie de l'estuaire du delta a toujours été très difficile, même avec des embarcations à fond plat.

Par contre, lorsque le niveau des eaux est assez élevé, comme ce fut le cas de 1956 à 1957, les profondeurs entre l'estuaire du Chari et Bol sont presque partout supérieures à 2 m, même en étiage. Les principales difficultés viennent alors du vent qui crée parfois une houle courte dont le creux dépasse 1 m et qui peut être dangereuse pour des bateaux mal adaptés. C'est ainsi qu'en 1956, une tempête a provoqué le naufrage d'une pinasse du Service des Douanes.

Même au stade "Moyen Tchad", les conditions de navigation peuvent varier facilement avec le niveau de l'eau, en particulier pour le franchissement des passes clés : cuvette sud - cuvette nord (passe de Baga-Kawa ou passe de Kadin), entrée du lac au débouché du Chari, passages permettant de rejoindre Bol depuis les eaux libres (Billon et Boulin, 1962). Suivant les cas, ces passes permettent soit un itinéraire à peu près direct du delta à Bol, soit des itinéraires détournés obligeant à contourner les îlots-bancs en passant par Seyorom et Nguelea au sud de Baga-Sola, ce qui double largement le parcours entre l'estuaire du Chari et Bol. Cela était le cas jusqu'en octobre 1953 et depuis plus de vingt ans, à la suite d'un barrage végétal quasi infranchissable. Dans d'autres cas, des passes habituellement bien reconnues peuvent être provisoirement bouchées par des bancs de papyrus dérivants ou des "Kirtas". En général, on peut trouver une autre passe, ou bien, en saison des pluies, les changements fréquents de la direction du vent dégagent assez rapidement les passes. Enfin, en cas de tornades, la côte orientale est la moins dangereuse car les îlots innombrables permettent toujours de se protéger rapidement contre le vent et la houle. La

côte occidentale, par contre, en particulier le long des eaux libres du nord, peut réserver quelques désagréments car elle n'offre aucun abri en cas de mauvais temps.

Les conditions de navigation sont appelées à redevenir une question d'actualité avec le problème du désenclavement de la Région du Lac, qui devrait jouer un rôle important dans la vie économique du Tchad, grâce à la mise en valeur des polders et aux découvertes de gisements pétrolifères dans le Kanem, ceci, évidemment, lorsque les effets de la sécheresse actuelle auront disparu mais il faut bien constater que pour l'instant, et en particulier dans les années 80 et 90, le trafic des camions et des "4 X 4 du désert" a remplacé, notamment dans la partie nord, celui des pirogues et des pinasses.

1. LE CADRE GEOLOGIQUE

Les études de P. Mathieu, géologue de l'Orstom, basées sur ses propres recherches et des travaux antérieurs, permettent de proposer une rapide esquisse géologique.

Les dépôts plio-pléistocènes et holocènes, localement épais de plusieurs centaines de mètres, masquent toutes les structures géologiques du fond de la cuvette tchadienne (fig. 2.1). Ces dernières ont cependant pu être reconnues par les techniques géophysiques (Louis, 1970) et par sondages.

Le socle, sous la couverture sédimentaire, s'enfoncé vers l'ouest, l'isobathe 200 m passant sensiblement au 16°E avec une remontée marquée par les massifs intrusifs d'Hadjer El Hamis. La profondeur de 550 m a été déterminée par sismique à N'Djaména.

Au nord du lac, le socle s'enfoncerait de façon continue pour constituer au Niger oriental la grande fosse de Bilma profonde de plusieurs milliers de mètres. Le lac Tchad se situe sur le rebord méridional de ce vaste bassin.

Les formations secondaires et tertiaires n'affleurent que sur les marges de la cuvette tchadienne, dans les zones du piémont.

Les études gravimétriques ont mis en évidence des axes lourds orientés sud ouest-nord est, l'un allant du fossé de la Bénoué à Largeau, l'autre allant de Massenya à Ounianga-Kebir. L'âge de ces accidents est à l'heure actuelle mal déterminé. Ils peuvent être relativement jeunes, d'âge crétacé ou même être contemporains du volcanisme tertiaire et quaternaire du Cameroun et du Tibesti. Il semble cependant d'après Louis (1970), que l'axe lourd Massenya-Ounianga soit beaucoup plus ancien, d'âge calédonien voire même précambrien.

Des accidents cassants ont affecté les couches sédimentaires avec un paroxysme situé à la fin du Crétacé et au début du Tertiaire (Faure, 1966). Ils ont pu rejouer récemment pendant les grandes phases volcaniques du Tertiaire et du Quaternaire.

Les mouvements épeirogéniques ont réglé la répartition des aires de dépôts, créant à une vaste échelle une véritable inversion de reliefs qui se serait produite entre le Crétacé-Tertiaire et le Quaternaire : à l'enfoncement des zones situées vers le lac Tchad correspond un soulèvement relatif des zones centrées sur le Niger (Faure, 1966). La vitesse moyenne d'enfoncement vertical a été évaluée par Faure (1967) à plus de 1 m par siècle.

Le déplacement des aires de dépôt se traduit par le caractère transgressif des séries continentales tertiaires sur le socle (série du Bodélé) (Servant, 1973), ce qui indique que la cuvette tchadienne a commencé à s'individualiser à l'Oligo-Miocène pour se développer au Pliocène inférieur. Les mouvements épeirogéniques se sont poursuivis de manière de moins en moins perceptible jusqu'à l'époque actuelle provoquant des variations d'épaisseur et de faibles basculements des dépôts plio-pléistocène anciens.

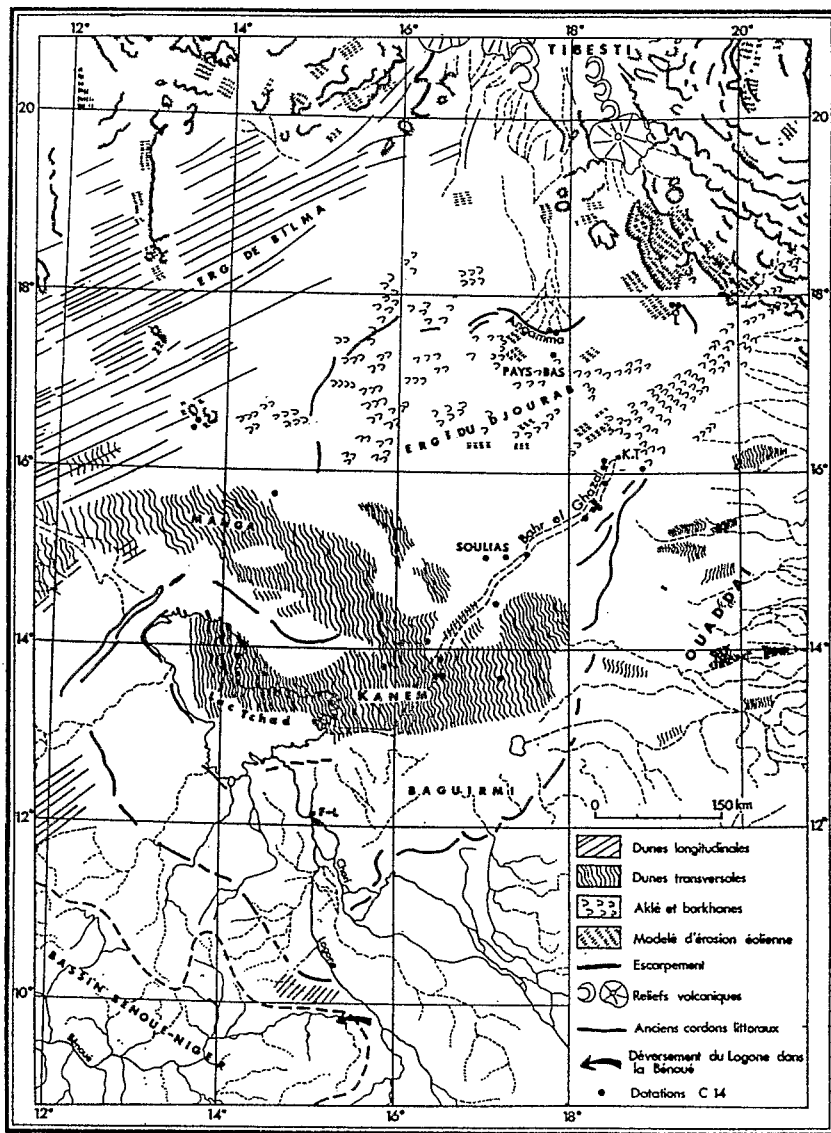


Figure 2.1

Les grandes régions de la cuvette tchadienne (d'après M. et S. Servant, 1970).

2. PALEOGEOGRAPHIE DU LAC TCHAD

L'histoire géologique du lac Tchad a fait l'objet de nombreux travaux dont une bonne part s'est attachée à reconstituer la paléogéographie de la cuvette lacustre depuis sa mise en place et la paléoclimatologie de la région.

Dans la période la plus récente, celle des quarante derniers millénaires, une certaine précision a pu être obtenue grâce à de nombreuses déterminations d'âges absolus par la méthode du Carbone 14 ; d'autres outils, et en particulier le développement des études fines en sédimentologie, en palynologie, en chimie isotopique d'aquifères anciens, ont aussi contribué à une meilleure connaissance de la chronologie paléoclimatique de la cuvette tchadienne.

La passion de certains pour un Sahara jadis vert, une préhistoire riche et des civilisations disparues, la tentation de "prévoir le futur dans les archives du passé", pour quelques - uns, et, pour tous, la volonté de faire progresser la connaissance, expliquent, sans doute, les nombreuses contributions que le sujet a suscitées.

La synthèse proposée ici s'appuie essentiellement sur des recherches, pas toujours convergentes, menées par Tilho, Barbeau et Coppens, Sieffermann, Faure, Schneider, Pias, Dupont, Nicholson, Servant, Servant-Vildary, Durand, Maley, Fontes et Gasse.

La position particulière du lac Tchad explique que, dès le Tertiaire, les changements climatiques de la région ne résultent que des variations du schéma de circulation des masses d'air humide dans la zone intertropicale.

Ce schéma s'organise autour des déplacements saisonniers de ces masses d'air humide (Fontes et Gasse, 1991) :

- pendant l'été boréal, la remontée vers le Nord de l'anticyclone de Ste Hélène entraîne les masses d'air humide du Golfe de Guinée en repoussant les masses d'air sec saharien au niveau de la zone de convergence intertropicale qui peut atteindre la latitude de 20° N.
- pendant l'hiver boréal, le front humide Nord Atlantique des masses polaires transportant l'humidité atlantique et méditerranéenne gagne vers le Sud et peut arriver également jusqu'à la latitude 20°N.

Maley (1980), Citeau *et al* (1988) relèvent que ces déplacements saisonniers sont d'autant plus importants que les gradients thermiques entre les pôles et l'Équateur sont forts. La deuxième partie de l'ouvrage sera l'occasion de développements plus complets sur la circulation atmosphérique.

Ainsi, toute l'histoire paléoclimatique de la région dépendrait de l'évolution de ce schéma entre deux scénarios opposés (Servant et Servant-Vildary, 1978). Le premier suppose de faibles anticyclones sur le Sahara qui n'empêchent pas le passage direct de l'air polaire vers l'Équateur et de l'air tropical vers les latitudes moyennes. Il est caractérisé par de fréquents échanges méridiens. Le second implique un renforcement des cellules anticycloniques subtropicales, avec, comme dans la période actuelle, des échanges méridiens moins fréquents.

2.1. La Cuvette Lacustre de l'Oligo-Miocène au Plio-Pléistocène

La mise en place à l'Oligo-Miocène de la cuvette lacustre est marquée, dans la stratigraphie tchadienne par des séries détritiques transgressives sur le socle d'ouest en est (série de Bodélé, M. Servant, 1973) qui montrent un déplacement des aires de dépôts lié aux mouvements épeirogéniques (Faure, 1966). Les dépôts du continental terminal - désignés par Wachenier, (1961) sous le nom de "série paléotchadienne"- sont donc les témoins des premières et sans doute des plus importantes extensions lacustres sous un climat tropical humide provoquant une altération intense des sédiments émergés et le développement des surfaces cuirassées. D'une puissance de 300 à

700 m, ils affleurent à la périphérie du bassin dans les zones de piémont. Dans le centre de la cuvette, ils sont masqués par les sédiments du plio-quaternaire. Ces dépôts sont extrêmement variés et se présentent sous la forme de sables et de grès intercalés d'argilites, ce qui laisse supposer l'existence de plusieurs cycles sédimentaires (Pias, 1970).

Au cours du Plio-Pléistocène, les mouvements de subsidence de la cuvette tchadienne et de surrection des massifs de sa périphérie ont conduit à la dislocation et à l'ablation partielle des formations du continental terminal qui alimentent à l'aval les dépôts de la "formation ancienne remaniée" dans un lac dont la cote a pu atteindre 380-400 m tandis que s'édifie un vaste delta du Chari. Il s'agit du premier pluvial de la séquence paléoclimatique de Pias (1970) (tableau 2.1).

Tableau 2.1
Les différentes transgressions du lac Tchad (fig. 2.2) (d'après J. Pias, 1970)

ETIAGE	NIVEAU DU LAC (m)	SEDIMENTATION	REMANIEMENTS EOLIENS	AGES APPROX. B.P.
Actuel	282	Dépôts argileux (polder)	Erg actuel (16e parallèle)	
4e transgression	287-290	Série argileuse subact. à récente ; 3e delta du CHARI, Cordon sableux.		1 800 3 200
Récurrence sèche			3e erg (12e parallèle)	
3e transgression	320	Série argileuse et sableuse, récente ; 2e delta. Cordon sableux		5 400 12 000
Récurrence sèche			2e erg (12e parallèle)	
2e transgression	400-370 350	Série fluvio-lacustre ancienne		21 350
Récurrence sèche			1er erg (10e parallèle)	30 000
1e transgression	400-380	Série ancienne remaniée 1er delta du CHARI		

Cette phase humide s'achève au Pléistocène supérieur par une récurrence sèche au cours de laquelle s'édifie le "premier erg" limité au sud par le 10e parallèle.

Une seconde transgression lacustre a amené ensuite le niveau du lac à des altitudes qui semblent avoir été comprises entre 350 et 400 m. Se dépose alors ce que Pias appelle la "série fluvio-lacustre ancienne". Ce second pluvial s'achève vers 20 000 ans BP pour céder la place à une phase majeure de désertification qui se prolonge jusque vers 12 000 ans BP, au cours de laquelle s'édifie le "second erg", dont des témoins se retrouvent aux abords du 12e parallèle.

Au nord du 13e parallèle, dans le Kanem oriental et le Bahr El Ghazal, M. Servant (1973) définit deux unités stratigraphiques attribuées au Plio-Pléistocène :

- la série du *BAHR EL GHAZAL* d'âge plio-pléistocène ancien est caractérisée par l'apparition de faciès typiquement lacustres et d'une abondante microflore de diatomées dont l'étude détaillée (S. Servant-Vildary, 1973) a permis de définir plusieurs stades d'évolution successifs pouvant correspondre à des zones biostratigraphiques. Cette microflore contient à la base des espèces archaïques et éteintes, connues dans le Pliocène d'Europe et d'Amérique du Nord, tandis qu'au sommet se développent des espèces à

cachet moderne. C'est à la base de ces dépôts que se rattachent les gisements de vertébrés étudiés par Coppens et datés de 5 à 4 MA ;

la série des SOULIAS d'âge pléistocène moyen à supérieur est formée de sables éoliens entrecoupés de termes lacustres, datées de 40 000 à 20 000 ans BP correspondant aux extensions lacustres du Ghazalien. Les études paléoécologiques (S. Servant-Vildary, 1978) et sédimentologiques (M. Servant, 1973) ont permis de définir, au cours de cette période, un épisode froid caractérisé par l'abondance des sédiments calcaires et la présence de diatomées cryophiles.

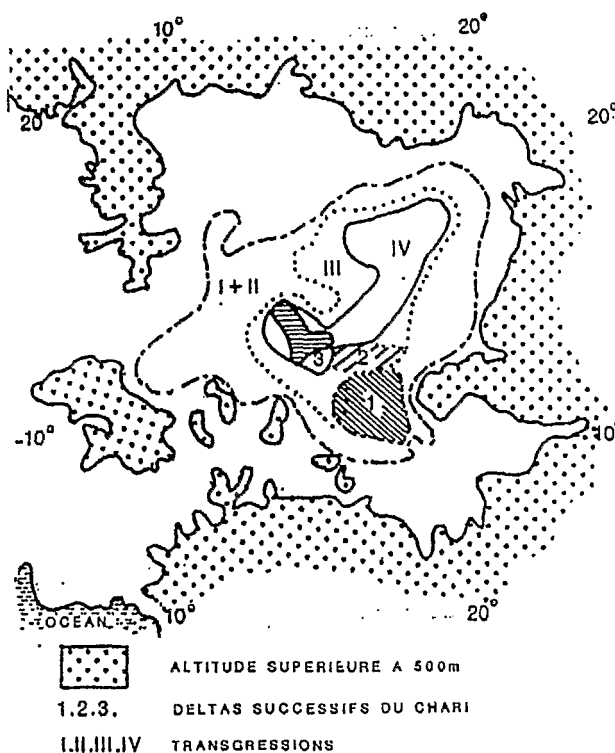


Figure 2.2

Les transgressions lacustres au Quaternaire (d'après Schneider, 1967).

2.2. Le Paléo-Tchad du Pléistocène terminal et de l'Holocène (12 000 ans BP à actuel)

A la suite de la phase aride (20 000 à 12 000 ans BP), une nouvelle transgression lacustre donne naissance à la "série sableuse et argileuse récente" tandis que s'édifie un second delta du Chari, moins développé que le précédent (Pias, 1970). C'est au cours de cette période que se met en place le réseau hydrographique tel qu'il apparaît de nos jours. Une partie des apports hydriques peut échapper au lac par le fonctionnement intermittent du seuil de la Bénoué. La réduction des surfaces lacustres peut dès lors ne pas avoir pour seule origine des phénomènes

climatiques. Un vaste lac atteignant la cote 310-320 aurait occupé la cuvette tchadienne jusqu'au pied du Tibesti dont il reçoit les écoulements. C'est le fameux Mégatchad évoqué en début d'ouvrage, cher à Schneider (1969). Il est délimité par un cordon sableux bien marqué dans le paysage et se prolongeant au Cameroun et au Nigéria. Cette vaste étendue lacustre semble avoir persisté jusque vers 5 400 ans BP.

Une nouvelle récurrence sèche se manifeste entre 5 400 et 3 200 ans BP qui donne naissance au "troisième erg" dont les témoins apparaissent jusqu'au niveau du 12e parallèle sous forme d'accolements sableux autour des pointements du socle. L'abaissement des niveaux lacustres est alors bien marqué dans la partie septentrionale du bassin.

Une quatrième transgression, moins importante, amenant le lac à la cote 287-290 m se développe entre 3 200 et 1800 ans BP en même temps qu'un "troisième delta" du Chari se construit au nord de N'Djaména. A cette nouvelle transgression correspondent les dépôts de la "série alluviale actuelle à subactuelle" et de la "série argileuse subactuelle à récente"(figures 2.2 et 2.3 ; tableau 2.1).

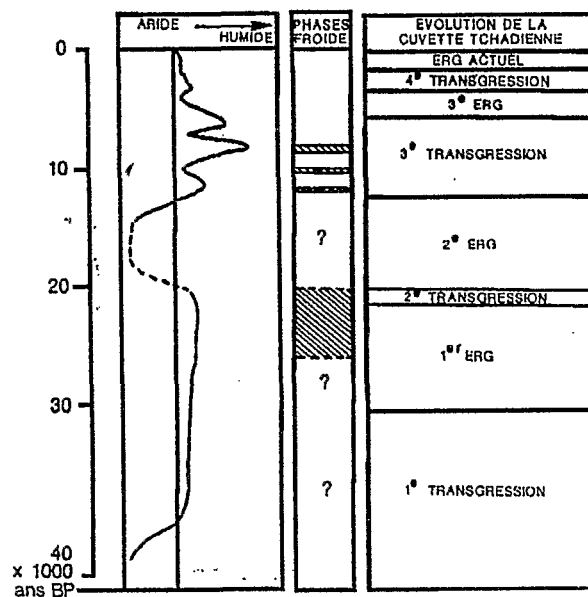


Figure 2.3

Evolution paléoclimatique du bassin du Tchad (d'après Pias, 1970).

Au nord du 13e parallèle, les fluctuations lacustres du Pléistocène terminal et de l'Holocène (*Nigéro-Tchadien*) ont pu être identifiées par M. Servant (1973) dans les dépôts colmatant les fonds des interdunes et surmontant la série des Soulias. C'est la série de *Labde* correspondant à des dépôts deltaïques ou lacustres. Cette série a été interrompue à plusieurs reprises dans les régions septentrionales du bassin par des remaniements éoliens. Elle repose sur une surface topographique pratiquement identique à l'actuelle. Les dépôts de cette série ont été datés dans le Kanem oriental. Ils comprennent typiquement deux épisodes majeurs de sédimentation :

- un premier épisode, daté de 12 000 ans BP à la base à 9 000-9 600 ans BP au sommet, admet au moins une phase froide soulignée par l'abondance des dépôts calcaires et par la présence de diatomées cryophiles;
- un second épisode daté de 9 000-9 600 BP ne comprend qu'une seule séquence lithologique.

La partie supérieure de cette série marque une évolution du Kanem oriental vers un assèchement complet à partir de 2 400 ans BP et l'orientation du milieu vers les conditions actuelles.

Les extensions lacustres du Nigéro-Tchadien ont été beaucoup plus importantes qu'au Ghazalien. De plus, les variations des plans d'eau ont été synchrones, ce qui a permis à Servant (1973) de la subdiviser en 7 périodes successives. La période de plus grande humidité au Nigéro-Tchadien se situe entre 9 000 et 8 000 ans BP. Un important changement climatique apparaît vers 7 000 ans BP marqué par la disparition des diatomées cryophiles et par celle quasi généralisée des dépôts calcaires, ce qui semble indiquer qu'il n'y a plus eu d'épisode froid, à partir de cette date, dans la cuvette tchadienne.

Au cours de l'Holocène ancien, le lac recevait des écoulements venant du Tibesti, comme en témoigne le Paléo-Delta de l'Angamma. Il semble que ces écoulements aient été interrompus dans le courant de l'Holocène moyen marqué par d'importants changements dans le régime des écoulements superficiels.

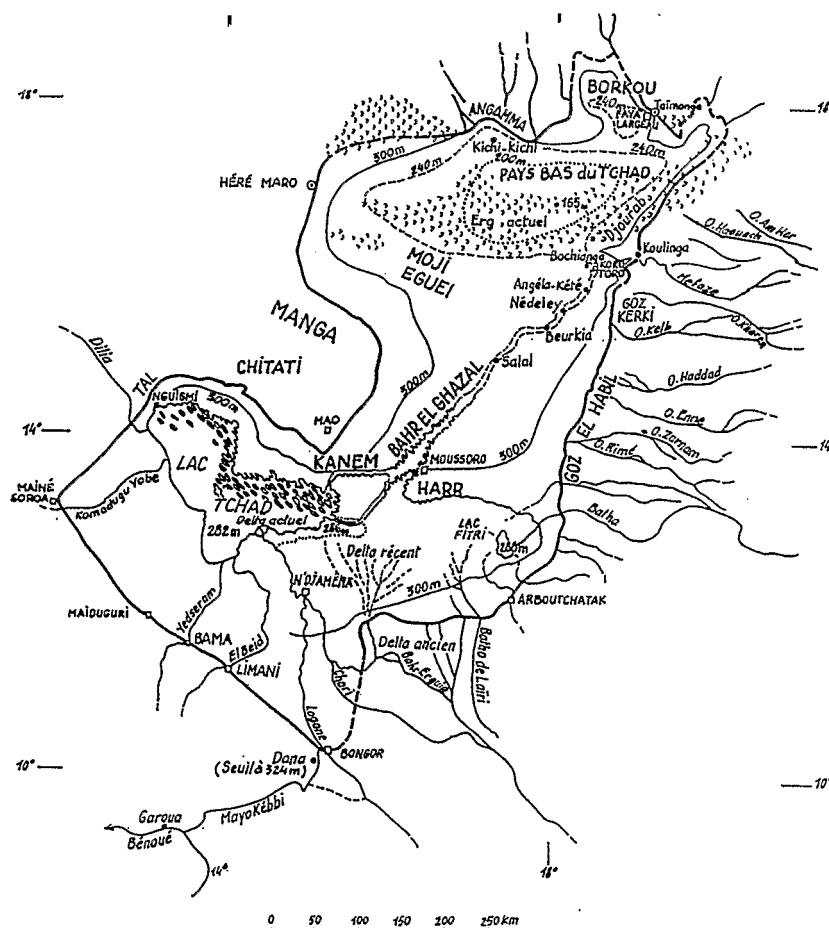


Figure 2.4

Carte du Paléotchad maximum à l'altitude 320 m, d'après Schneider (1967)
(toponymie complétée par Maley, 1981).

Une autre analyse intéressante est proposée par Maley qui confronte les études palynologiques à celle des diatomées et aux observations géologiques.

L'évolution de la végétation au cours de l'Holocène a été étudiée sur la coupe de Tjéri située au Kanem vers le centre du Paléotchad à environ 15 km au nord de Moussoro (fig. 2.4) (Servant, 1973 ; Maley, 1981). Les pollens observés dans les 46 échantillons étudiés ont été classés suivant l'appartenance écologique des taxons dont ils sont issus et aussi d'après la dominance actuelle plus ou moins marquée de ces taxons dans les différentes zones climatiques du bassin du Tchad. Les principaux résultats sont synthétisés sur la figure 2.5.

L'étude des diatomées, effectuée sur les mêmes échantillons que ceux utilisés par la palynologie, a permis à Servant-Vildary (1978) de tracer une courbe de la variation de la profondeur de l'eau à la station de Tjéri (fig. 2.5, courbe a). Vu la position de cette station, cette courbe retrace l'évolution des niveaux du Paléotchad durant l'Holocène. Les principales phases d'extension lacustre mises en évidence grâce à la géologie en divers points de la zone du Paléotchad (Servant, 1973 ; Maley, 1981), se retrouvent sur cette courbe.

De cette manière on voit que la phase du Paléotchad maximum (cordons lacustres vers 320 m) correspond à l'extension maximum de cette courbe (fig. 2.5 a). Diverses données géologiques la situent au cours de l'Holocène moyen (Schneider, 1969 ; Servant, 1973) ; il est possible que le maximum ait été relativement bref et se soit produit durant la phase IVa (fig. 2.5), c'est-à-dire entre environ 7 000 et 6 000 ans BP, en résultant non seulement des apports très élevés de l'ensemble Chari-Logone (période de formation du très grand « delta ancien », mais aussi d'une pluviosité régionale importante comme le montrent les hauts niveaux lacustres recensés pour cette époque dans les petits bassins isolés du Niger oriental.

Il est aussi possible de corréliser la diminution majeure des pourcentages des pollens de l'élément sahélien (fig. 2.5, courbe c, phase III) à la phase aride située vers 7 500 ans BP. Cette période aride, bien mise en évidence par des données géologiques (Servant, 1973), a affecté surtout la zone sahélienne ainsi que le Sahara méridional et central. On doit donc conclure que la transgression, mise en évidence par les diatomées durant la phase III, n'a pu être causée que par des apports fluviaux allochtones à la zone tropicale sèche. L'examen des données palynologiques et le fait bien établi que les fleuves du bassin du Tchad - le Chari et le Logone - transportent des pollens depuis leurs zones d'alimentation (Maley, 1972, 1981), montrent que ces apports fluviaux venaient de la zone tropicale humide.

Des données purement physiques concernant le bassin adjacent du Niger dont les sources (Bénoué et haut Niger) se trouvent aussi en zone tropicale humide, indiquent que les apports fluviaux dans le Golfe de Guinée ont été aussi maximum entre 8 500 et 6 500 ans BP. Un tel déphasage climatique n'est pas un phénomène isolé car il a été aussi mis en évidence à d'autres époques, comme vers le milieu du 1er millénaire de notre ère et au XVIIe siècle AD.

Concernant l'évolution de la végétation en zone sahélienne, les spectres polliniques de Tjéri (Kanem) montrent que le maximum relatif des arbres s'est produit à l'Holocène moyen (7 000 à 4 500 ans BP). Ce fait ainsi que l'extension sur le Sahara méridional de sols de type ferrugineux tropical, avec parfois formation de cuirasses ferrugineuses, permet de conclure qu'à l'Holocène moyen s'est produit un glissement vers le nord des zones climatiques, avec probablement une extension de la savane de type sahélien sur le Sahara méridional et central.

Des travaux plus récents, dont ceux du programme PALHYDAF (Paléohydrologie Africaine), nuancent quelque peu les conclusions de Schneider (1967, 1969) et Pias (1970). On doit citer en particulier les travaux de Durand (1984), de Fontes et Gasse (1986), de Durand *et al* (1979, 1983, 1984).

Ainsi, deux carottes prélevées à Ari Koukouri et à N'Guigmi dans des dépressions interdunaires de la bordure nord-ouest du lac Tchad montrent trois types successifs d'environnement aquatiques entre 11 000 et 1 800 ans BP (milieu peu profond, milieux profonds, milieu marécageux). A Ari Koukouri, la plus ancienne phase humide

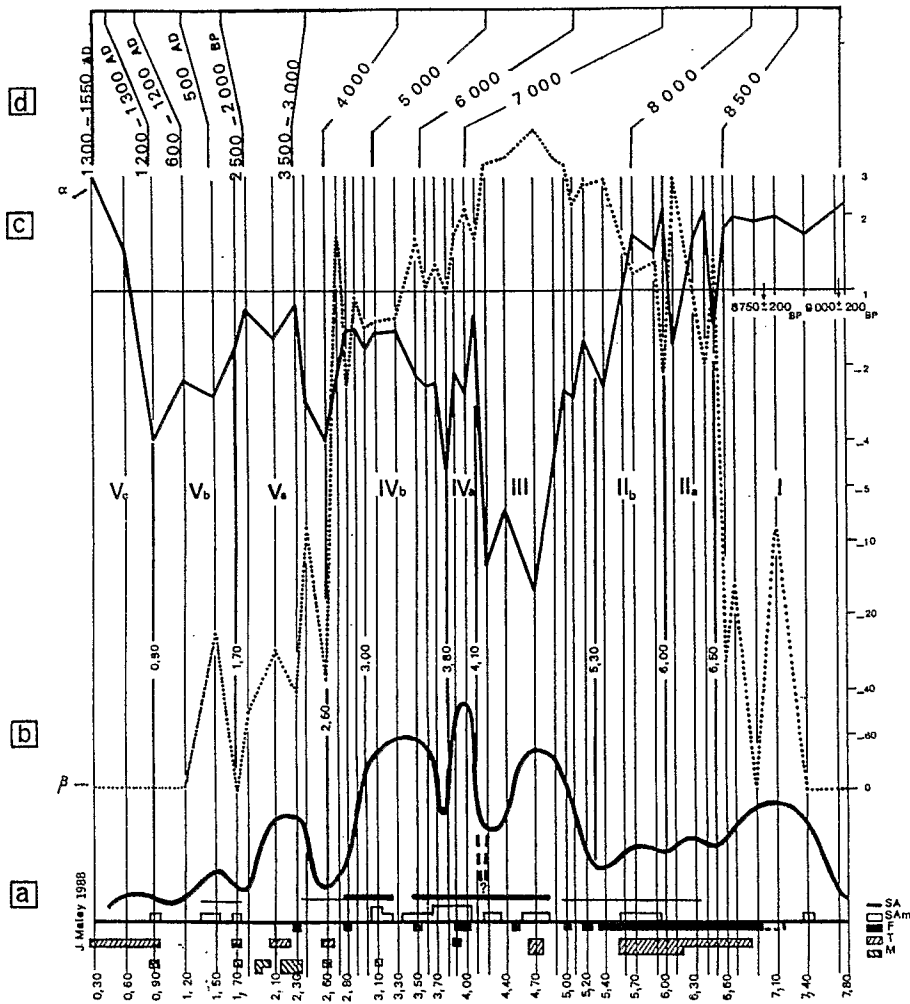


Figure 2.5

Evolution comparée de la paléoclimatologie du lac Tchad à l'Holocène à travers l'étude des diatomées et de la palynologie de la coupe de Tjeri (d'après Maley, 1988) :

a : Niveaux lacustres relatifs d'après les diatomées (Servant-Vildary, 1978) ; quelques diatomées écologiquement importantes, SA, *Stephanodiscus astrea*; Sam, *Stephanodiscus astrea var. minutula*, F, diverses diatomées psychrophiles, surtout *Cymatopleura elliptica* et *Melosira italica var. valida*, T, *Cyclotella ocellata*, M, *Melosira italica*.

b : Courbe pollinique de l'élément soudano-guinéen (en pointillés), β pourcentages actuels.

c : Courbe pollinique de l'élément sahélien (trait plein) α pourcentages actuels. Ces deux courbes (b,c) ont été construites en utilisant le rapport à la moyenne avec une échelle logarithmique.

d : Chronologie partiellement reconstituée d'après diverses corrélations régionales. Vers la base deux datations radiométriques.

est datée de 10 700 à 10 300 ans BP. Le faible contenu détritique, les précipitations de Mg-Calcite, associées à des débris coquilliers d'ostracodes et de mollusques, suggèrent une alimentation par l'aquifère local (milieu peu profond avec une salinité faible à moyenne).

Un second épisode lacustre avec augmentation de la profondeur est enregistré entre 10 300 et 8 900 ans BP (eau douce ou très légère salinité). La relative abondance de matériaux détritiques montre l'importance des apports en eaux de surface et une augmentation de ruissellement local. Cet épisode est suivi d'une phase d'assèchement marquée par un horizon sableux recouvert d'un paléosol daté à 6 400 ans BP.

Entre cette date et 4 000 ans BP, une élévation du niveau du lac est confirmée sur les sites d'Ari Koukouri et de N'Guigmi par le dépôt de diatomites argileuses avec prédominance d'espèces planctoniques (eaux douces, légèrement alcalines).

De 4 000 à 3 800 ans BP un abaissement du niveau d'eau est mis en évidence par la présence de plusieurs couches de dépôts carbonatés indurés et une augmentation des diatomées périphtiques ; il a dû se traduire par un environnement marécageux favorable à la méthanogénèse (milieu réducteur).

La partie supérieure du profil de N'Guigmi montre l'établissement de marécages tropicaux de 3 800 à 1 800 ans BP avec des fluctuations, de grande amplitude mais rapides, des conditions environnementales, avant l'assèchement actuel de la dépression, coupée du lac Tchad proprement dit.

D'une manière générale, les grandes tendances climatiques retrouvées dans l'analyse des échantillons de Ari Koukouri et de N'Guigmi correspondent aux variations du rapport précipitation / évaporation proposées par Servant (1973) pour le bassin du lac Tchad avec 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.

Ces travaux récents permettent en outre 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 (1982), 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 rendre compte d'une telle élévation de niveau d'un Mégatchad autour de 9 000 ans BP (Kutzbach, 1980).
- 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. Comme on le voit, le chapitre des recherches paléoclimatiques est loin d'être achevé et de nombreuses investigations restent à faire.

2.3. L'évolution du lac Tchad au cours du 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. Son interprétation est basée sur les études sédimentologiques et géochronologiques faites par Dupont et Delibrias (1970), et Dupont et Cheverry (1970). Un schéma d'évolution peut être présenté à partir de

l'alternance des couches d'argile (hauts niveaux : transgressions), d'argile sableuse et de vase tourbeuse (bas niveaux : régressions) (fig. 2.6). On relève :

- une phase lacustre ancienne (transgression t_1) ;
- une régression (r_1) ;
- une phase lacustre (t_2) ;
- 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) ;
- la régression actuelle (r_3).

Les déterminations d'âges absolus et le calcul des vitesses moyennes de sédimentation permettent de préciser les dates de ces variations du plan d'eau :

- la fin de t_1 se situerait entre le VIII^e siècle et le Xe siècle ;
- la fin de r_2 vers 1 500 ;
- le début de t_3 vers 1 600, ce qui situe t_3 entre la fin du XVI^e siècle et la fin du XVIII^e siècle.

La mise en place des pseudo-sables dans les fonds lacustres au large de l'embouchure aurait débuté pendant les bas niveaux postérieurs au Xe siècle et se serait poursuivie jusqu'à l'époque actuelle (Mathieu, comm. pers.). Leur formation est liée à un changement climatique rapide entraînant la dégradation de la végétation sur le bassin et la reprise de l'érosion des sols, phénomène qui n'a pu être enrayé par la courte période humide des XVII^e et XVIII^e siècles (t_3).

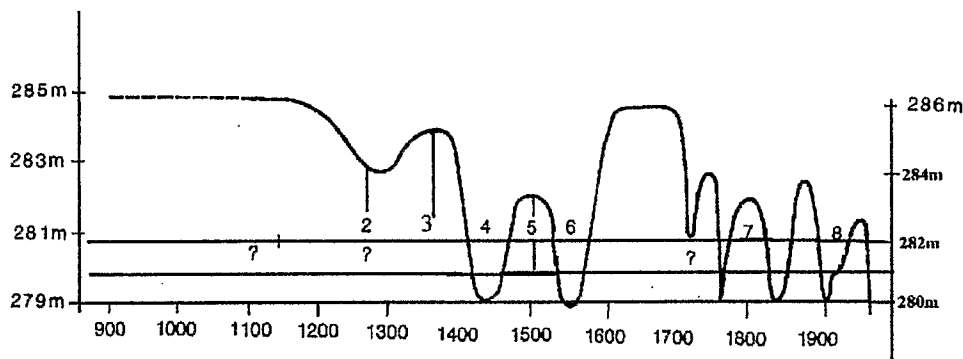


Figure 2.6

Schéma des variations du niveau du lac Tchad au cours du dernier millénaire (Maley, 1981).
(Les chiffres de 1 à 8 correspondent à la position des analyses polliniques d'une coupe de référence située à Baga-Sola par rapport à l'étude stratigraphique de plusieurs carottes et aux datations au radiocarbone).

Le décalage d'un mètre des cotes entre l'époque actuelle et le début du dernier millénaire (fig. 2.6) correspond à l'épaisseur moyenne de sédiment déposé dans la cuvette méridionale du lac (environ 1 m en mille ans). 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 (cf. Lange, 1977 ; Zeltner, 1980).

Cet aspect original des recherches a été rendu possible :

- d'une part grâce à la richesse des données historiques et de la tradition orale et au travail considérable effectué par les historiens et aux remarquables documents ramenés par les premiers explorateurs (surtout Barth, ainsi que Denham et Nachtigal (cf. Maley, 1981).
- d'autre part aux conditions géographiques particulières du lac Tchad. En effet, lorsque le Bahr El Ghazal - émissaire du lac Tchad vers le nord-est - se met à couler régulièrement, on peut en déduire pour le lac un niveau proche de 286 m. Comme cet écoulement ne survient que par périodes, ce phénomène frappe les populations locales qui le rapportent dans leur tradition en l'associant à certaines phases de leur histoire.

Un autre exemple de l'importance des traditions orales est celle que C. Seignobos a récolté auprès de vieux Peuls dans des villages du sud du lac Tchad. Maley avait situé assez précisément vers le milieu du XVe siècle la plus importante des régressions du lac Tchad qui était marquée dans la géologie des dépôts par une discontinuité très nette, par la présence de fissures de dessiccation remplies de charbons de bois dus au brûlage d'une végétation aquatique desséchée et par la formation d'une croûte calcaire relativement épaisse. Cette époque avait correspondu aussi dans le bassin méridional du lac au début de la formation d'oolithes ferrugineuses. 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 XVIe 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).

La situation climatique au milieu du XVe 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) (Maley, 1981), et aussi peut-être dans la zone forestière plus au sud où une forte régression du lac Bosumtwi au Ghana pourrait se situer aussi vers le milieu du XVe siècle.

3. SEDIMENTOLOGIE DES FONDS DU LAC

Les recherches effectuées par B. Dupont (1970), M.A. Roche (1973) et J.P. Carmouze (1976) ont permis de préciser la nature et la distribution des fonds du lac. Leur étude peut contribuer à expliquer, outre les rapports entre le lac et la nappe souterraine, les modifications de salure des eaux par le nord et l'extrême nord-est du lac.

3.1. Nature des fonds du lac

Quatre types principaux de sédiments constituent les fonds du lac Tchad :

- *LES VASES* : On désigne sous ce terme un matériau sans aucune structure, de couleur brune, grise ou noire, se présentant sous forme de suspension homogène, ou parfois de gros flocons, dans les régions de fortes salures. Leur phase aqueuse est toujours importante (de 230 à 500% du poids sec). Leur fraction minérale (environ 80% du poids sec total) se répartit en trois lots granulométriques d'importance sensiblement égale : argile, limon et sable. La fraction organique (13% du poids sec) se présente sous forme de débris végétaux de l'ordre du millimètre, encore peu décomposés et facilement identifiables. Ces derniers sont parfois très abondants et l'on se trouve en présence d'une véritable tourbe (30% de matières organiques).
- *LES ARGILES* : Le matériau gris-bleu est présent sous divers aspects ; argile molle, homogène, sans structure ; argile structurée, se débitant en polyèdres anguleux de quelques centimètres et en agrégats de plus petite taille ; argile granulaire constituée de petits éléments de quelques millimètres à 2 ou 3 cm, ne s'écrasant que difficilement à la main. La phase aqueuse représente entre 120 et 320 % du poids sec de l'argile molle, entre 40 et 130 % de celui de l'argile structurée. La fraction argileuse varie de 55 à 85% de la phase minérale. La matière organique représente 3 à 4 % du poids sec.
- *"LES PSEUDO-SABLES"* : Formés de petits grains arrondis de 0,2 mm sans aucun ciment entre eux, ils ont l'aspect du marc de café. Deux types de grains peuvent être distingués. Les uns sont formés d'un noyau d'argile, brun-jaune clair, entouré d'un cortex sombre, d'épaisseur irrégulière, généralement mince mais parfois épais et à structure pelliculaire nette. Ce cortex présente fréquemment des marques d'érosion. Les autres présentent une structure oolithique nette ; ils ont un noyau rouge très sombre à noir, arrondi ou ovoïde, entouré d'un cortex brun-rouge, épais, à structure pelliculaire. Les grains de ce type sont très généralement plus gros que les premiers ; leur diamètre est presque toujours supérieur à 0,4 mm. Ils ne représentent qu'environ 5% de la fraction totale. Leur caractérisation chimique et minéralogique (Carmouze, 1976) a permis d'établir que ces granules sont composés de nontronite néoformée dans le lac par silicification de la goethite qui s'individualise rapidement à partir des oxydes ferriques des apports fluviaux.
- *LES SABLES* : Ils sont fins et bien triés. Leurs médianes sont comprises entre 0,28 et 0,11 mm ; le pourcentage d'éléments fins (inférieurs à 0,5 mm) n'atteint qu'exceptionnellement 10%. L'étude granulométrique met en évidence trois stocks différents. Les deux premiers, généralement mêlés, correspondent aux sables de l'erg du Kanem (moyenne 0,25 mm) et aux apports des tributaires (moyenne : 0,16 mm). Le troisième stock apparaît toujours en mélange (14%) ; il correspond à des sables dont la moyenne est voisine de 0,40 mm. Leur teneur en matière organique, toujours faible, est de l'ordre de 1% ; les grosseurs médianes sont comprises entre 0,20 et 0,28 mm.

L'analyse aux rayons X montre que la nature des minéraux argileux est la même dans les vases et les argiles. La montmorillonite, généralement bien cristallisée, domine largement, tandis que la kaolinite et l'illite sont en faible quantité ou à l'état de traces. Aucune différence de composition n'est apparue entre les sédiments des diverses zones. Cependant, des études récentes ont mis en évidence, dans le nord et l'extrême est du lac, une néoformation de smectite magnésienne, accompagnée d'une précipitation de calcite, probablement magnésienne.

La capacité d'échange, calculée sur des échantillons totaux de vase, et non sur la seule fraction argileuse, est voisine de 45me/100g. Pour les argiles, elle est voisine de 30me/100g.

Le fer total contenu dans les vases et les argiles représente 7,5% du poids sec.

Les vases et les argiles, prélevées en surface ou en profondeur, ont généralement des teneurs nulles en carbonates. Cependant, au nord de la latitude de Komadougou, les teneurs peuvent atteindre 5%. Dans cette région, la surface de nombreux blocs et granules d'argile présente un encroûtement carbonaté blanchâtre de très faible épaisseur : l'analyse aux rayons X révèle la présence de calcite. Dans les ouadis et les anciens bras du lac, parfois asséchés, ces encroûtements sont beaucoup plus largement développés, certains prennent même l'aspect de véritables tufs calcaires (M.A. Roche, 1967 ; B. Dupont, 1970).

3.2. Distribution des fonds du lac Tchad

La carte de distribution des fonds (fig. 2.7) montre que les vases sont surtout abondantes dans la partie nord du lac, la Grande-Barrière, les archipels et îlots-bancs du sud-ouest. Leur épaisseur n'est habituellement que de quelques dizaines de centimètres mais elle peut localement atteindre et dépasser 1m, notamment dans la Grande-Barrière et dans les anses de l'archipel.

Les argiles se rencontrent partout dans le lac mais sont parfois recouvertes par les autres types de sédiments. Elles se présentent habituellement sous forme d'argile structurée dans la partie sud en bordure des archipels, sous forme d'argile molle dans la partie nord, sous forme d'argile granulaire dans les zones sud-est et sud-ouest, où la hauteur d'eau est la plus faible.

Les fonds sableux sont peu importants et localisés le long de la rive nigériane de Baga Kawa à la Komadougou, au débouché du Chari, du Serbewel et de la Komadougou. Dans le lac lui-même, les sables n'apparaissent que localement sur de petites superficies correspondant à des hauts-fonds, à une frange très étroite en bordure des îles et à certaines passes entre les îles.

Les "pseudo-sables" se rencontrent au large du delta du Chari vers l'ouest, sur une superficie d'environ 2 700 km² ; leur épaisseur est habituellement de 5 à 10 cm mais peut atteindre 45 cm. D'après leur spectre pollinique (Maley, 1973), il s'agit de matériau autochtone lié aux apports du Chari et dont la mise en place implique la dégradation de la végétation sur le bassin et la reprise de l'érosion favorisant la mobilisation du fer.

En définitive, les sédiments du lac, mises à part peut-être les argiles molles, paraissent donc plutôt favorables à l'infiltration des eaux, et en particulier les sables, relativement dispersés dans le lac.

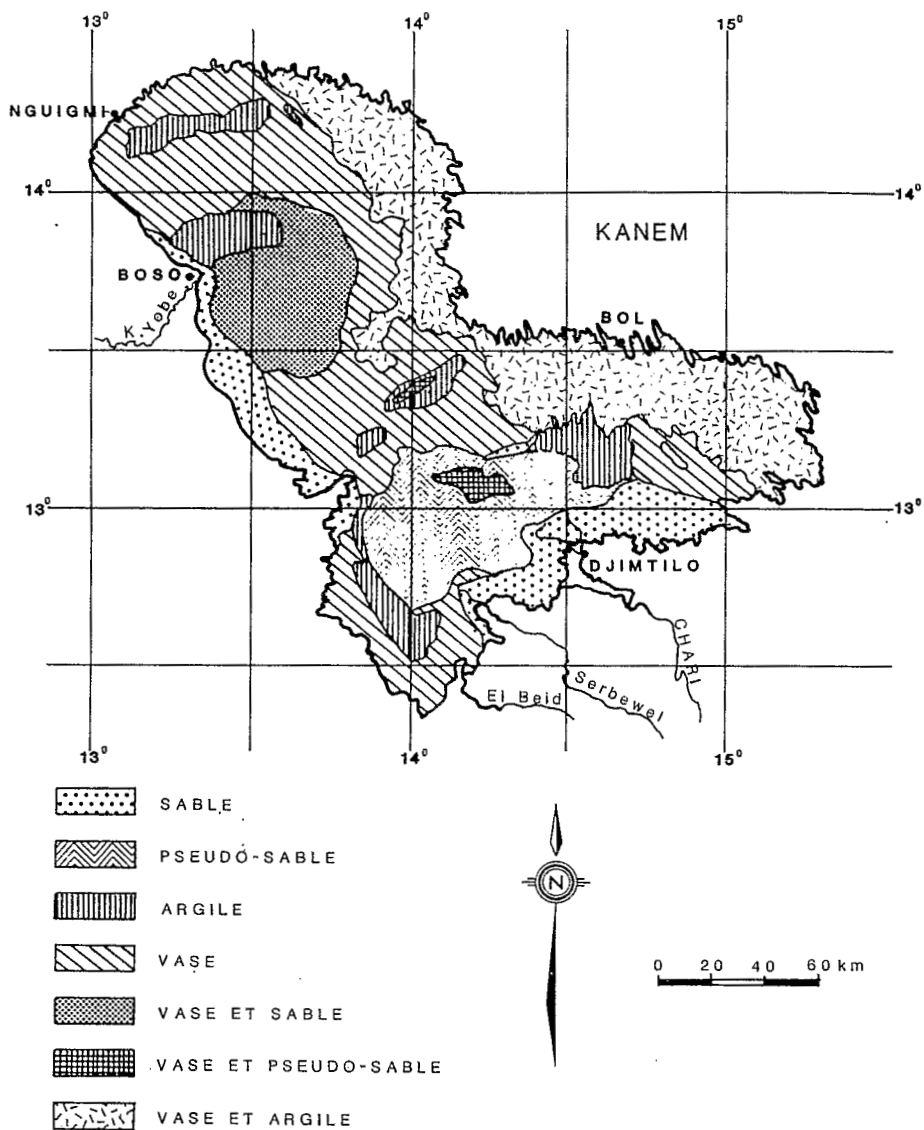


Figure 2.7

Répartition et nature des fonds du lac Tchad (d'après Dupont, 1970).

4. APPORTS SEDIMENTAIRES AU LAC TCHAD

4.1. Les apports fluviaux

Les sédiments du lac Tchad sont essentiellement d'origine fluviale et les conditions contemporaines du transport de matières solides par les fleuves tributaires ont été étudiées par Billon (1968) et surtout par Carré (1972, 1977), puis Chouret (1973, 1975, 1977). Leurs résultats ont été repris par Gac qui en étudiant la géodynamique des altérations mécanique et chimique du bassin du lac Tchad et en utilisant les travaux sur les transports en suspension réalisés sur les bassins amont (Gac et Callède, 1970) ainsi que ceux du bassin camerounais du lac Tchad (Nouvelot, 1972 ; Olivry et al 1974, 1976 ; Olivry, 1977) aboutit à une synthèse dont nous reprenons les éléments principaux (Gac, 1980).

La charge solide parvenant au lac provient pour l'essentiel du fleuve Chari, une faible part étant fournie par l'El Beïd. On ne dispose pas d'informations sur les apports de la Komadougou. Les mesures effectuées par Carré et Chouret de 1969 à 1975 sur le Chari à Chagoua et le Logone à Kousséri montrent des concentrations moyennes mensuelles des matières en suspension 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 sur les 6 années (pondérées par les débits annuels correspondants) 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 de ses branches amont, le Chari à N'Djaména montre une concentration moyenne annuelle de 76 mg l⁻¹. Le tableau ci-après montre les variations mensuelles des concentrations du Chari à N'Djaména pour des années humide et sèche et l'année moyenne en mg l⁻¹.

	M	J	J	A	J	O	N	D	J	F	M	A	Année
Moyenne	63	143	310	188	81	42	39	51	41	34	36	35	76
Année humide	83	131	345	185	78	36	37	48	38	34	36	37	73
Année sèche	62	199	284	299	154	95	75	48	34	25	28	37	97

Les concentrations maximales en juillet-août correspondent à la reprise des écoulements de crue, un premier minimum étant observé en octobre - novembre au maximum de la crue, le minimum absolu survenant en période d'étiage après une légère remontée due à la vidange des zones de débordement du Logone.

La figure 2.8. illustre ces variations mensuelles des 3 stations, de juin 1969 à janvier 1971 et indique sous forme d'histogrammes les transports solides correspondants en kg s⁻¹ du Logone à Kousséri et du Chari à Chagoua.

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. En d'autres termes, l'augmentation des concentrations des matières en suspension compense pour partie la diminution des écoulements (Olivry *et al*, 1974) au niveau du tonnage des matières transportées.

La charge solide moyenne de l'El Beïd ne dépasse pas 23 mg l⁻¹ ; l'alimentation de ce cours d'eau, principalement due à la vidange des plaines inondées des Yayrés¹, explique que la majeure partie des argiles en suspension, venues du Logone, ne parvient pas au lac.

¹ Le terme « yayré correspond mieux, pour C. Seignobos, à la transcription du mot vernaculaire utilisé pour désigner ces plaines d'inondation; d'autres auteurs utilisent plus couramment le mot « yaéré ».

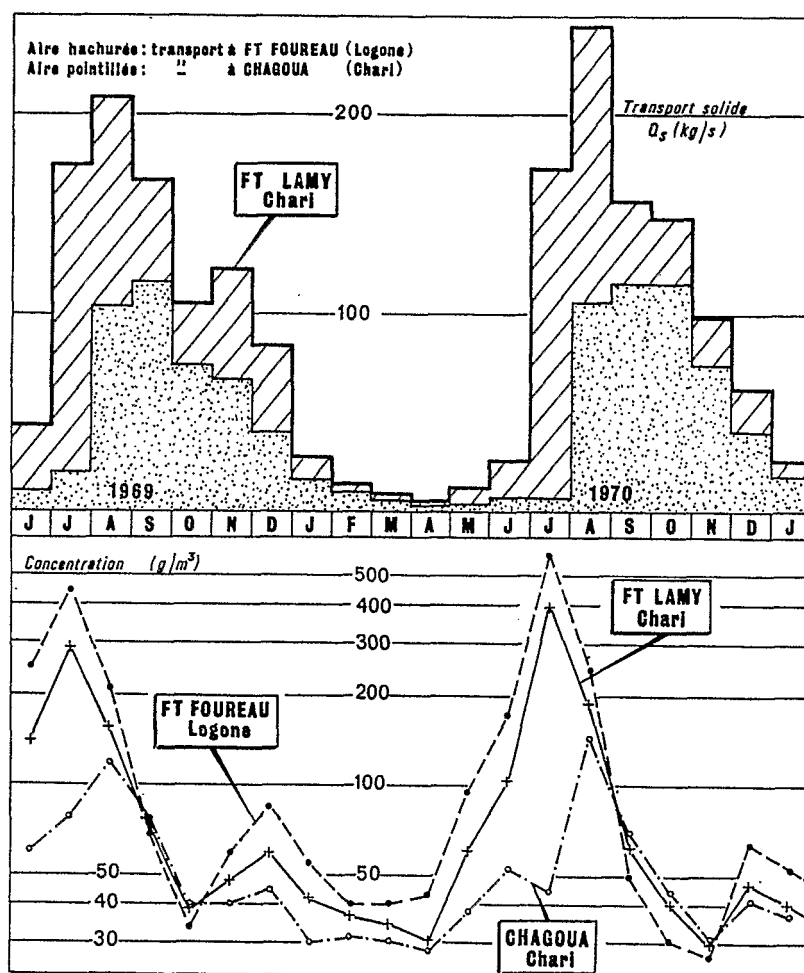


Figure 2.8

Concentrations ($mg\ l^{-1}$) et transport ($kg\ s^{-1}$) moyens mensuels de matériaux en suspension du Logone et du Chari, à Kousséri (ex Fort-Foureau), Chagoua et N'Djaména (ex Fort-Lamy), d'après le document original de P. Carré (1972).

Gac (1980) évalue à 2 840 000 tonnes le transport annuel de matériaux en suspension à N'Djaména. Cette valeur est tout à fait comparable à celle établie par Carmouze (1976) qui indique 2 790 000 tonnes ; elle est, en revanche, supérieure de 10 % aux estimations de Carré (1972) et de Chouret (1975) qui admettent un apport annuel de 2 600 000 tonnes.

Ce tonnage se partage approximativement de façon équitable entre le Logone à Kousséri et le Chari à Chagoua dont les apports respectifs se chiffrent à 1 460 000 tonnes et 1 380 000 tonnes. Le tableau 2.2 fait le bilan mois par mois des apports totaux au lac Tchad sur l'année hydrologique moyenne de la période d'observation, sur l'El Beïd, le Chari et le Logone.

Tableau 2.2

Apports moyens (en tonnes) de matériaux en suspension par l'El Beïd, le Chari et le Logone au lac Tchad

Bassins	El Beïd	Chari	Logone	Apports totaux au lac Tchad
Mai	0	11 000	24 000	35 000
Juin	1 500	22 000	85 000	108 500
Juillet	3 100	38 000	459 000	500 100
Août	3 000	282 000	378 000	663 000
Septembre	1 700	338 000	155 000	494 700
Octobre	500	251 000	98 000	349 500
Novembre	5 800	189 000	115 000	309 800
Décembre	8 000	140 000	91 000	239 000
Janvier	3 000	53 000	29 000	85 000
Février	200	24 000	11 000	35 200
Mars	200	18 000	6 000	24 200
Avril	0	10 000	6 000	16 000
Apport annuel	27 000	1 376 000	1 457 000	2 860 000

Cette répartition des transports en suspension au cours de l'année moyenne (concentrations et tonnages) a été reportée dans la figure 2.9 avec l'hydrogramme du Chari à N'Djaména.

Les analyses granulométriques indiquent qu'en moyenne 55% de la charge en suspension est constituée d'argiles et le complément en limons et sables.

La nature minéralogique et la composition chimique des matériaux varient peu en cours d'année (Carré, 1972 ; Carmouze, 1976).

La kaolinite constitue le minéral dominant dans les suspensions du Logone et du Chari et représente près de 50% du cortège minéral soit environ 1 400 000 tonnes par an. Le tableau 2.3 donne la répartition approximative en % des principaux constituants minéralogiques, déterminée par diffractométrie aux rayons X pour les suspensions du Chari à N'Djaména et les sédiments du lac.

L'étude de la composition chimique et minéralogique des sédiments lacustres met en évidence l'opposition très nette entre le domaine d'altération qui livre des matériaux à dominante kaolinique, et le domaine de sédimentation à montmorillonite. Dans ce domaine de sédimentation les caractères distinctifs entre les milieux sud et nord sont soulignés par la présence au sud, de goéthite, de nontronite et de montmorillonite ferri-magnésienne, au nord, de montmorillonite magnésienne, de silice amorphe et de calcite.

La composition chimique moyenne annuelle des apports totaux au lac des teneurs en oxydes et la perte à 1 000 °C exprimés en gramme pour 100 grammes de l'échantillon sec et des éléments traces donnés en ppm (Gac, 1980) est indiquée ci-après :

Majeurs	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₄	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Perte à 1000° C	
en g	48,98	24,2	0,62	0,25	8,52	0,07	1,32	0,29	1,45	14,30	
Traces	Ba	Zn	Cr	V	Ni	Sr	Pb	Cu	Ga	Co	Sn
en ppm	365	146	126	120	76	63	41	32	29	23	5

Tableau 2.3

Composition minéralogique (exprimée en % pondéral) des matières en suspension et des sédiments du lac (après correction de la perte au feu, Carmouze, 1976). (*) y compris les interstratifiés partagés équitablement entre l'illite et la montmorillonite

Constituants	Matières en suspension (delta du Chari)	Sédiments du lac			
		Cuvette Sud	Zone médiane	Cuvette nord	Moyen
Kaolinite	48,5	35,1	24,2	35,1	33,1
Montmorillonite	14,2 *	28,9	31,6	20,4	26,1
Illite et Interstratifiés	13,7 *	8,6	12,0	10,0	9,8
Quartz	11,7	14,0	16,0	12,7	13,9
Feldspaths	5,2	6,2	7,0	3,7	5,3
Goethite	3,1				
Fe ₂ O ₃	2,4	{ 1,8	{ 3,3	{ 0,9	{ 1,7
Produits amorphes	0,7	0,4	0,2	0,2	0,3
SiO ₂	0,4	5,0	5,7	7,4	6,1
Calcite	0	traces	traces	9,8	3,7

En année moyenne, le Chari livre au lac 1 374 000 tonnes de kaolinite, 495 000 tonnes d'illite et d'édifices interstratifiés, 331 000 tonnes de quartz, 297 000 tonnes de montmorillonite, 147 000 tonnes de feldspaths, 88 000 tonnes de goethite et 99 000 tonnes de constituants amorphes dont 68 000 tonnes de fer amorphe, 20 000 tonnes d'alumine amorphe et 11 000 tonnes de silice amorphe.

En année moyenne (tableau 2.2), le lac Tchad reçoit 2 860 000 tonnes de matériaux en suspension. La quasi-totalité (99,1 %) de cet apport détritique est assurée par le Chari et le Logone. La faible contribution de l'El Beïd (fig. 2.9), n'entraîne que des modifications mineures dans les tonnages établis pour chaque constituant dans les eaux du Chari à N'Djaména : kaolinite 1 382 000 tonnes, illite et interstratifiés 505 000 tonnes, montmorillonite 305 000 tonnes, les tonnages en quartz, feldspaths, goethite et en produits amorphes sont inchangés.

Enfin, on a pu comparer ces données quantitatives de l'année moyenne, avec celles calculées par Carmouze (1976) pour une année sèche. Les caractères distinctifs apparaissent avec les tonnages moins importants en année sèche pour la kaolinite (400 000 tonnes), le quartz (65 000 tonnes) et plus importants pour les matières amorphes (70 000 tonnes). En revanche, les quantités d'illite, de minéraux interstratifiés et de feldspaths sont semblables et les apports de montmorillonite du même ordre de grandeur (297 000 tonnes en année moyenne et 270 000 tonnes en année sèche). Ainsi, il se confirme que la montmorillonite exportée vers le lac provient essentiellement des berges du Chari et du Logone et non du lessivage par les nappes submergeantes des horizons de surface des sols de la plaine d'inondation. Le taux moyen annuel de montmorillonite néoformée dans le lac atteignant 600.000 tonnes (Carmouze, 1976), on peut en déduire qu'un tiers de la montmorillonite des sédiments lacustres (soit 300 000 tonnes) est héritée des berges des fleuves. La baisse de 10% de la part de kaolinite dans le cortège minéral provient de la diminution en année sèche du taux d'érosion mécanique des bassins amont.

Enfin, la charge solide transportée par charriage et saltation (sables moyens à grossiers) n'a pu être estimée avec précision. Des modèles hydrauliques permettent de penser qu'elle pourrait représenter 5% de la charge en suspension à N'Djaména. Les très faibles pentes suggèrent que la majeure partie de ces transports se dépose dans le bief aval et le delta du Chari et ne parvient pas au lac. Le tonnage relatif à ce mode de transport apporté au lac est probablement très inférieur à 100 000 tonnes.

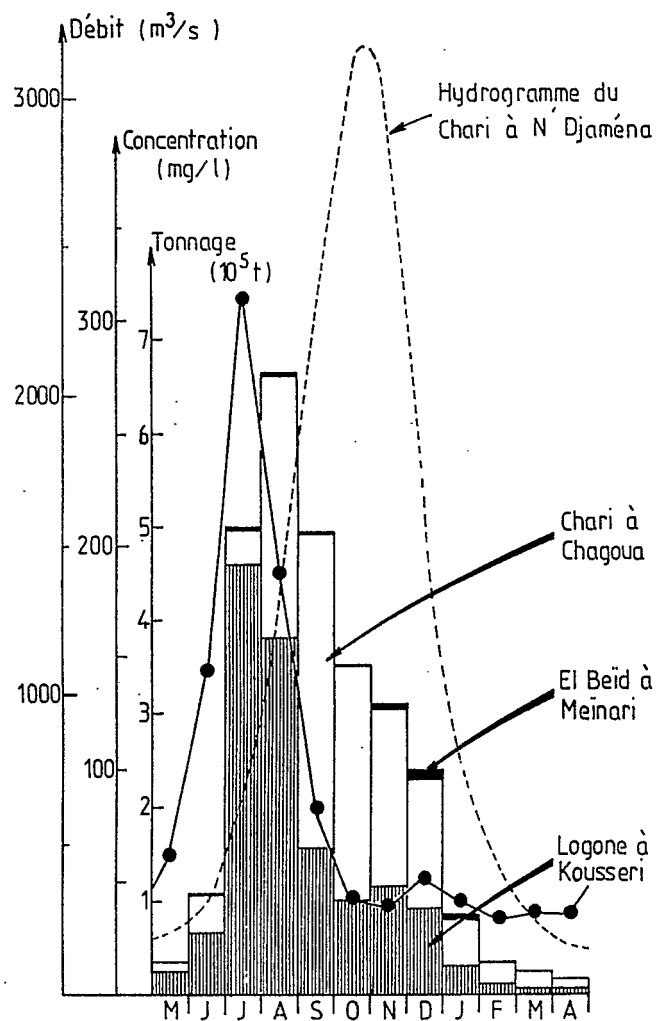


Figure 2.9

Hydrogramme du Chari à N'Djaména. - tonnages mensuels exportés par les trois tributaires (Logone, Chari, El Beïd). Variations mensuelles de la charge solide pour l'ensemble des trois cours d'eau (Gac, 1980).

4.2. Apports météoriques de poussières

Les apports éoliens de poussières et sables sont difficiles à évaluer sans l'emploi de méthodes très élaborées qui n'ont pas été mises en oeuvre dans la région. Il est évident que l'érosion éolienne entraîne, par l'arasement des reliefs dunaires, notamment au nord est et dans l'archipel, un apport local en sables, mais le phénomène le plus important est celui de la brume sèche apportée du Sahara par l'Harmattan.

Seule une partie de l'aérosol contenu dans ces brumes sèches va se déposer et sera définitivement piégée lorsque le dépôt se situe sur nappe d'eau. Les mesures de la concentration de poussières dans l'atmosphère ne rendent pas directement compte du dépôt effectif au sol. Celui-ci doit être mesuré dans des pièges à poussière.

Des mesures sommaires effectuées par Dupont (1967) à N'Djaména conduisent à une valeur de $110 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dont 99 % de grains de quartz. Gac, sur un environnement comparable au lac Tchad aux plans physique et climatique, a mesuré sur le lac de Guiers, pour 7 années de déficit pluviométrique prononcé, une valeur moyenne de $175 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (70% quartz). Le dépôt mesuré sur la même période à Dakar (1988-1993) est de $145 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Quoique fort éloignées du lac Tchad, ces mesures ont l'intérêt de valoriser les relevés de B. Dupont. Il est certain que l'occurrence d'observer des brumes sèches a considérablement augmenté au cours des vingt dernières années et que les dépôts actuels d'origine météorique sur l'année moyenne sont probablement bien supérieurs.

En supposant un dépôt atmosphérique en année moyenne compris entre 50 et $100 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, l'apport au lac ($20\,000 \text{ km}^2$) varierait de 1 à 2 millions de tonnes. Avec une valeur de $150 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ en année de sécheresse pour un lac réduit à $7\,000 \text{ km}^2$, le dépôt d'aérosols piégé sur les plans d'eau excéderait encore 1 million de tonnes.

Ces résultats correspondent à des tonnages variant de 1/3 à 2/3 des apports fluviaux ce qui est considérable. La sédimentologie des fonds du lac devrait rendre compte de la large prédominance du quartz dans les dépôts d'origine atmosphérique. Ce n'est pas le cas : le % de quartz dans les sédiments du lac est à peine supérieur à celui des apports fluviaux (tableau 2.3).

Dans ces conditions la méthodologie des mesures semble devoir être approfondie en considérant les dépôts d'origine vraiment allochtone et les reprises de dépôts au niveau local par les vents et en particulier les vents de poussière précédant les tornades, très efficaces sur les surfaces exondées.

5. GEOCHIMIE DES EAUX DU LAC TCHAD

Trois études principales, synthétisant les recherches de nombreux chercheurs et réalisées sous la conduite de M.A. Roche (1973, 1980) de J.P. Carmouze (1976) et de J.Y. Gac (1980), ont été utilisées pour tracer ici un rapide aperçu des conditions d'alimentation du lac en matières dissoutes d'une part, et de la qualité des eaux du lac proprement dit d'autre part.

5.1. Les apports dissous au lac

Essentiellement d'origine fluviale, ces apports sont liés au fonctionnement hydrochimique du fleuve Chari. Le suivi de la salure des eaux basé sur la mesure des conductivités a été assuré de manière hebdomadaire à partir de

1958 par les hydrologues de l'Orstom (Touchebeuf *et al*, 1969). C'est seulement depuis 1967, avec les premières analyses régulières que la composition chimique des eaux du Chari est bien connue. Compte tenu des très faibles concentrations en chlorures, sulfates, sels nutritifs etc., l'essentiel de la charge dissoute est constituée par les éléments Na^+ , Ca^{++} , Mg^+ , K^+ , CO_3H^- et SiO_4H_4 .

Les variations mensuelles des concentrations de ces divers éléments ont été reportées dans le tableau 2.4. L'évolution saisonnière montre des eaux plus concentrées à l'étiage (75 à 82 mg l^{-1}) et plus diluées en août et septembre (50 à 60 mg l^{-1}), mais l'amplitude de ces variations reste relativement faible. La concentration moyenne annuelle calculée par Gac (1980) est de 66,9 mg l^{-1} et tient compte des années sèches des années 70. Les résultats antérieurs - de 67,3 mg l^{-1} (Carmouze, 1976) et de 66,8 mg l^{-1} (Roche, 1973) - montrent une remarquable stabilité interannuelle des concentrations. Le tonnage de matières dissoutes parvenant au lac est entièrement dépendant du débit du fleuve.

Tableau 2.4

Composition chimique des eaux du Chari à N'Djaména : les concentrations moyennes mensuelles et annuelles sont exprimées en mmoles. l^{-1} , la charge totale en solution en mg.l^{-1} .

Mois	pH	En mM.l^{-1}						Charge totale
		K	Na	Ca	Mg	HCO_3	H_2SiO_4	en mg l^{-1}
M	7,5	0,061	0,157	0,135	0,113	0,69	0,418	81,3
J	7,4	0,061	0,159	0,119	0,102	0,65	0,406	77,3
J	7,2	0,058	0,124	0,099	0,085	0,53	0,343	64,1
A	7,1	0,041	0,104	0,069	0,069	0,41	0,296	51,2
S	7,1	0,046	0,115	0,087	0,073	0,47	0,324	57,8
O	7,0	0,049	0,120	0,097	0,076	0,51	0,370	63,8
N	7,5	0,049	0,129	0,106	0,079	0,53	0,379	66,1
D	7,6	0,046	0,132	0,123	0,085	0,58	0,385	70,3
J	7,2	0,049	0,139	0,124	0,089	0,60	0,394	72,5
F	7,1	0,052	0,141	0,128	0,100	0,63	0,405	75,6
M	7,4	0,056	0,146	0,134	0,108	0,67	0,405	78,7
A	7,5	0,062	0,156	0,138	0,117	0,71	0,416	82,7
Moyenne annuelle	7,3	0,051	0,131	0,105	0,082	0,55	0,37	66,9

La concentration moyenne annuelle en substances dissoutes est de 131 mg l^{-1} sur l'El Beïd, soit le double de celle du Chari.

Gac (1980) a estimé les apports moyens annuels en sels dissous du Chari à 2,43 millions de tonnes, de l'El Beïd à 150 000 tonnes, soit un total de 2,58 millions de tonnes.

De son côté, Carmouze (1976) en reconstituant les moyennes annuelles sur la période 1954 - 1972, période globalement humide, aboutit à un total de sels dissous apportés au lac de 2,8 millions de tonnes par an. Ces tonnages se répartissent comme suit :

	CO_3H^-	SiO_4H_4	Ca^{++}	Mg^+	Na^+	K^+	Total
10^3 tonnes	1365	970	175	80	130	80	2800

L'apport dissous probable des précipitations a été estimé à 150 000 tonnes par an.

La figure 2.10 donne la variation mensuelle interannuelle des charges solubles (mg l⁻¹) et des tonnages de matière soluble exportés par le Chari et l'El Beïd (Gac, 1980).

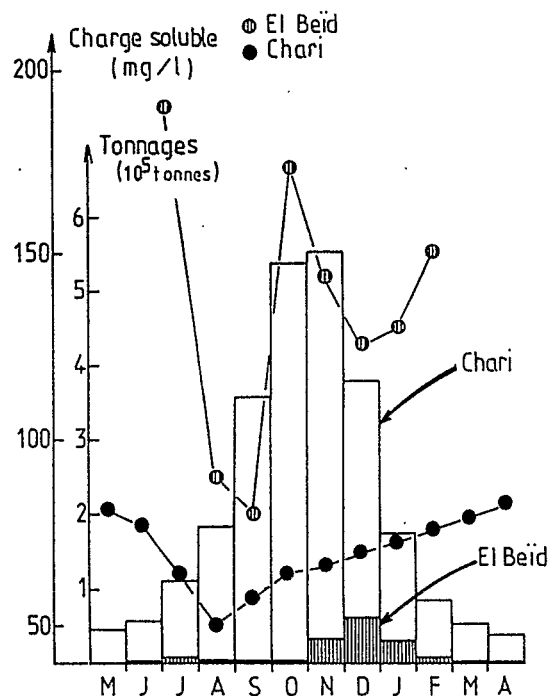


Figure 2.10

Tonnages mensuels exportés en solution vers le lac par le Chari et l'El Beïd (10⁵ tonnes) et variations saisonnières de la charge soluble (mg l⁻¹), d'après Gac (1980).

5.2. Composition chimique des eaux du lac

Cette composition est éminemment variable tant au plan saisonnier qu'au plan spatial ; ceci est évidemment lié à la variabilité saisonnière de l'alimentation du lac par les fleuves, à l'éloignement plus ou moins grand des zones lacustres du delta du Chari et à la variabilité spatio-temporelle de l'évaporation.

A titre d'exemple, nous avons reproduit dans la figure 2.11 la carte des isolignes de conductivité électrique établie par Roche (1973) en plein coeur de la saison sèche (mars - avril 1967). La figure 2.12 relie les conductivités aux concentrations en ions et montre que la concentration ionique varie du sud à l'extrême nord entre 80 mg l⁻¹ et

1 100 mg l⁻¹. 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) et dont on reparlera dans le chapitre hydrogéologie, ne s'exercent qu'aux bordures du lac « moyen Tchad » et pas sur des cuvettes résiduelles.

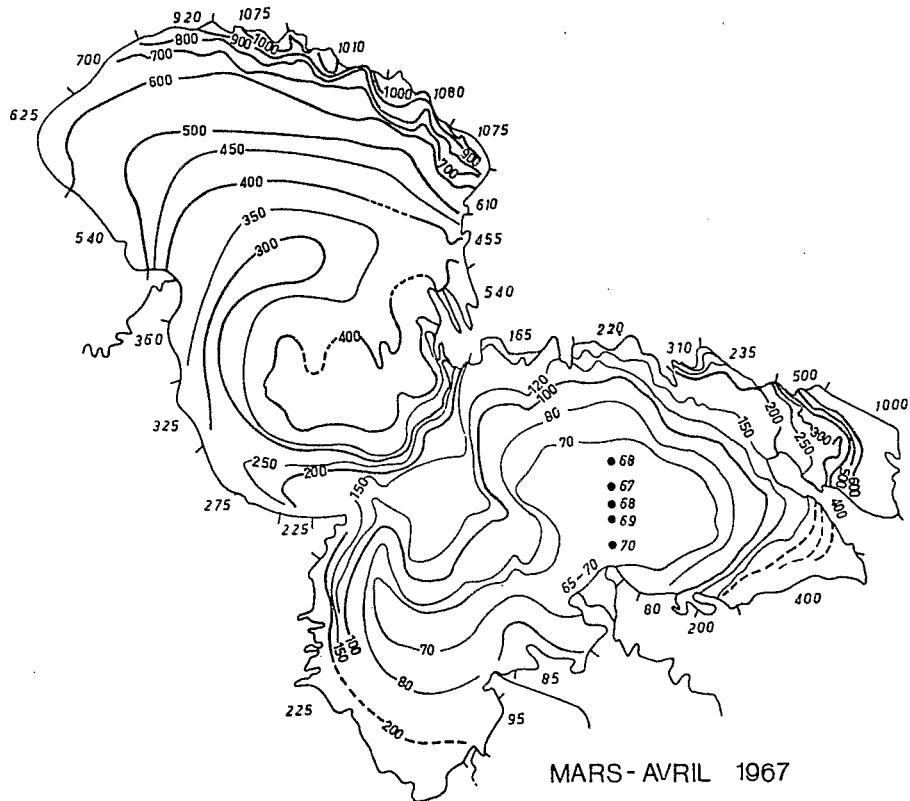


Figure 2.11

Conductivité électrique (en $\mu\text{mhos cm}^{-1}$ à 25°C) des eaux du lac Tchad en courbes isovaleurs en mars-avril 1967 et valeurs moyennes sur le front côtier (M.A. Roche, 1980).

Pour illustrer cette variabilité des compositions chimiques sur le lac, on a reporté dans le tableau 2.5 pour les principaux éléments les concentrations en millimoles par litre des eaux fluviales, de la cuvette sud, de la cuvette nord et de la moyenne du lac pour une année moyenne. Les concentrations relatives sont calculées par rapport au groupe des cations et à l'ensemble bicarbonates-silice dissoute. On notera que l'on rencontre des eaux de plus en plus basiques en allant du sud vers le nord.

Tableau 2.5

Variabilité des compositions chimiques des eaux du lac Tchad

	Unité	Cations				Bicarbonate et silice		"pH"
		Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CO ₃ H ⁻	SiO ₂ H ₄	
Apports des fleuves -F	mM l ⁻¹	0,131	0,105	0,082	0,051	0,550	0,370	7,3
Concentration relative	%	35,5	28,5	22,2	13,8	60	40	
Cuvette Sud S	mM l ⁻¹	0,353	0,206	0,152	0,111	1,150	0,593	7,6
rapport S/F		2,7	2,7	1,85	2,2	2,1	1,6	
Cuvette Nord N	mM l ⁻¹	2,060	0,852	0,702	0,605	5,630	0,879	8,75
rapport N/F		15,7	8,1	8,6	11,9	10,2	2,4	
Moyenne lac L	mM l ⁻¹	1,460	0,625	0,480	0,432	3,950	0,780	8,15
rapport L/F		11,4	6	5,85	8,5	7,2	2,1	
Concentration relative	%	48,7	20,8	16	14,5	83,5	16,5	

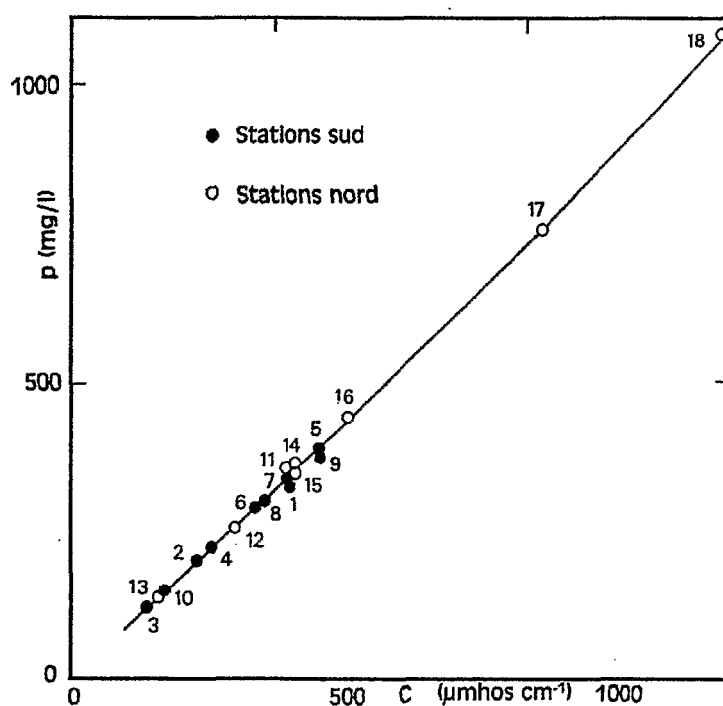


Figure 2.12

Relation entre la conductivité C (à 25°C) et la teneur ionique globale p (Ca, Mg, Na, K, CO₃, et CO₃H en mg.l⁻¹) moyennes annuelles des eaux du lac Tchad aux stations d'observation :
 1 : Hadjer El Hamis, 2 : Soula, 3 : Bol, 4 : Choua, 5 : Kouta, 6 : Ndjowa, 7 : Ndjowa extrem, 8 : Daguil, 9 :
 Daguil extrem, 10 : Baga Sola, 11 : Haykoulou, 12 : Borgomerom, 13 : Baga Kawa, 14 : Malamfatori,
 15 : C 1, 16 : Kiskra, 17 : Magi, 18 : Tataverom. (d'après Roche, 1980).

Les rapports de concentration des eaux du lac par rapport à ceux des fleuves montrent un accroissement différentiel des teneurs des divers composants, dû à des régimes de pertes par voie biogéochimique variables d'un élément à l'autre. Ainsi les teneurs relatives des eaux lacustres en sodium et potassium augmentent aux dépens de celles du calcium et du magnésium. Il en est de même de celles des bicarbonates au détriment de la silice dissoute ; la composition de la salure évolue vers un pôle bicarbonaté sodique.

Carmouze (1976) a proposé les caractéristiques hydrochimiques moyennes du lac en état d'équilibre dynamique à partir des données de l'année 1967 (volume du lac : 72 km³) et de certaines hypothèses sur l'état d'équilibre du lac à cette époque (tableau 2.6).

En considérant le lac comme un milieu unique et homogène, il devient alors possible d'établir 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 par 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, celui du sodium et celui de la silice dissoute, on peut remarquer 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 degré moindre, par voie d'infiltration, maintiennent un stock de silice relativement faible. Les autres éléments ont un mode de régulation intermédiaire (Carmouze, 1976).

Tableau 2.6

Caractéristiques hydrochimiques du lac en état d'équilibre dynamique

	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CO ₃ H ⁻	SiO ₄ H ₄
Apports fluviaux 10 ³ t	130	175	80	80	1365	970
Pertes en 10 ³ t						
infiltration	130	97	47	64	950	182
sédimentation	0	78	33	16	415	788
Stocks du lac en 10 ³ t	2420	1805	890	1215	17800	3370
Concentration absolue mg l ⁻¹	33,5	25,1	12,4	16,9	247,7	46,8
Taux de renouvellement annuel en %	5,3	9,65	9,0	6,6	7,65	28,7
Temps de séjour moyen en années	18,9	10,4	11,1	15,2	13,1	3,5

Ces équilibres moyens annuels ont été schématisés dans la figure 2.13 pour l'ensemble des cations d'une part, pour les bicarbonates et la silice d'autre part. Les valeurs y sont données en milliards de moles. Que ce soit pour l'étude géodynamique du bassin d'alimentation du lac Tchad (Gac, 1980) ou celles effectuées par Roche (1973, 1980) et Carmouze (1976) sur le lac Tchad, les quelques informations données ici ne traduisent qu'une petite partie de la complexité des hydrosystèmes. En outre, ces travaux - qui ont été complétés sur la chimie du phosphore et du fer (et autres paramètres intervenant dans la production primaire) pour l'étude de la biomasse et production phytoplanctoniques du lac par J. Lemoalle (1979) - se rapportent pour l'essentiel à une période de « moyen Tchad » ; les quelques années sèches qui ont pu être observées n'avaient pas encore fondamentalement modifié le milieu, comme ce sera le cas dans les années 80. Malheureusement, les chercheurs de l'Orstom n'ont pas pu poursuivre leurs investigations, pour les raisons politiques que l'on sait, dans cette phase d'extrême sécheresse.

Il n'en reste pas moins que la réversibilité des conditions hydrologiques dont on reparlera plus loin permet de penser que les caractéristiques géochimiques du lac présentées ici retrouveront à terme toute leur validité.

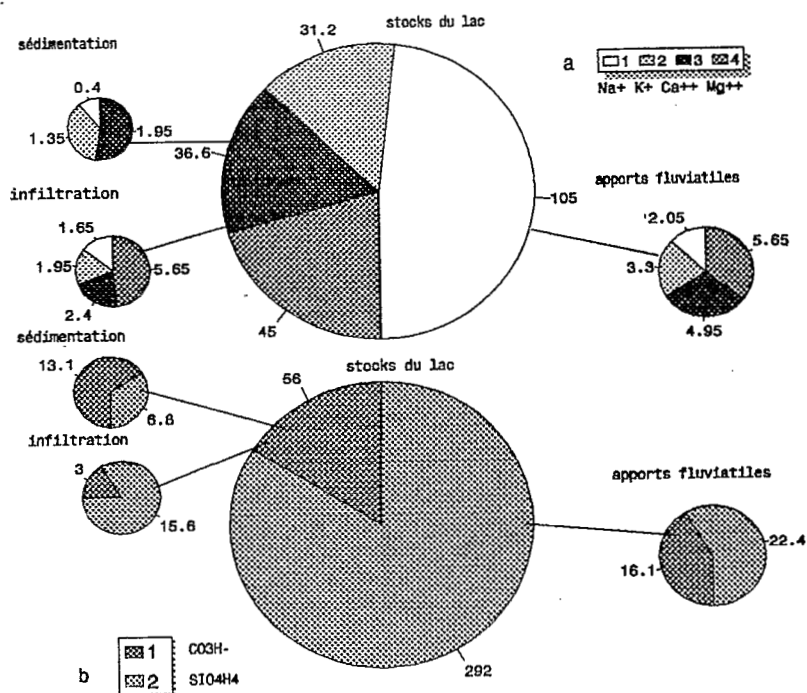


Figure 2.13

Equilibres moyens annuels de l'ensemble des cations (a) et des bicarbonates et de la silice dissoute réunis (b). Les transferts et les stocks de sels dissous sont figurés par des disques de surfaces proportionnelles à leurs propres valeurs exprimées en milliards de moles (d'après Carmouze, 1976).

6. HYDROGEOLOGIE GENERALE DU LAC TCHAD

Nous nous contenterons ici d'esquisser les grandes lignes de l'hydrogéologie des régions qui entourent le lac Tchad, principalement en ce qui concerne la nappe phréatique.

6.1. Rappel des travaux effectués

Les travaux de reconnaissance hydrogéologique ont été entrepris par le BRGM au Tchad en 1965 avec la publication des cartes hydrogéologiques au 1/500 000e. En 1969, le BRGM a publié la synthèse cartographique au 1/1 500 000e des travaux réalisés (Schneider, 1969). Faisant suite aux travaux de Jones et Barber (1957) au Nigeria, ces études ont permis de déterminer la piézométrie de l'aquifère à la périphérie du lac Tchad.

Les premières mesures de fluctuation des nappes phréatiques au Kanem, au Chari-Baguirmi et au Batha ont été entreprises dès 1963 dans le cadre du levé des cartes hydrogéologiques par le BRGM. Ces mesures ont été poursuivies entre 1964 et 1968 et publiées par Schneider (1969).

L'ensemble des données acquises sur le bassin du lac Tchad a fait l'objet d'une synthèse géohydrologique publiée par l'UNESCO en 1969 (fig. 2.14).

Une étude des ressources en eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad en vue d'un programme de développement a été effectuée par la FAO (Schroeter, 1973) pour le compte de la Commission du Bassin du lac Tchad. Pour cette étude, une campagne de mesures sur la composition isotopique des eaux souterraines a été réalisée et les résultats présentés par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique à Vienne, en 1972.

Dans le cadre des études pluridisciplinaires de l'ORSTOM, en République du Tchad, plus particulièrement axées sur le lac et son environnement, l'accent a été mis sur les relations entre le lac et la nappe côtière phréatique dans le but de préciser les phénomènes de régulation saline, problème soulevé en 1908 par la mission Tilho, et sur l'évolution paléogéographique et paléoclimatique récente de la cuvette tchadienne. Citons les travaux de Bouchardeau et Lefèvre (1957), Touchebeuf de Lussigny (1969), Pias (1970, Fontes *et al.* (1969 et 1970), Carmouze *et al.* (1972), Maley (1973), Roche (1973), Servant (1973), Cheverry (1974), Maglione (1974), Chouret, Fontes, Mathieu (1975 et 1977).

6.2. Conditions de gisement de la nappe phréatique

La situation hydrogéologique apparaît simple à la première analyse. Les terrains superficiels (M. Servant, 1974) sont faits de sédiments quaternaires meubles où dominant les éléments fins, le plus souvent repris par une éluviation éolienne. En particulier, la région du nord-est du lac (Kanem) est le siège d'un véritable erg aux sommets dunaires rabotés par la déflation et dont les interdunes ont à plusieurs reprises été envahis par les eaux à l'occasion des pulsations du lac Tchad.

La nappe phréatique est considérée comme un ensemble continu dans la cuvette tchadienne. Elle est contenue dans 60 à 80 m de sables éoliens dont le modelé est antérieur à 40 000 ans BP, interstratifiés de lentilles argileuses pouvant diviser localement la nappe en étages indépendants. Ces argiles appartiennent à deux séries définies par Servant (1973). Les unes d'âge pléistocène moyen à supérieur appartiennent à la série de Soulias et sont susceptibles de contenir des dépôts évaporitiques fossilisés permettant d'expliquer au moins en partie, l'augmentation des salures lors du cheminement des eaux dans l'aquifère dunaire (Maglione, 1974). Les autres,

datées de la fin du Pléistocène et de l'Holocène, sont des argiles craquelées qui tapissent le fond des dépressions interdunaires. Elles appartiennent à la série de Labdé dont la puissance maximale ne dépasse pas 10 m.

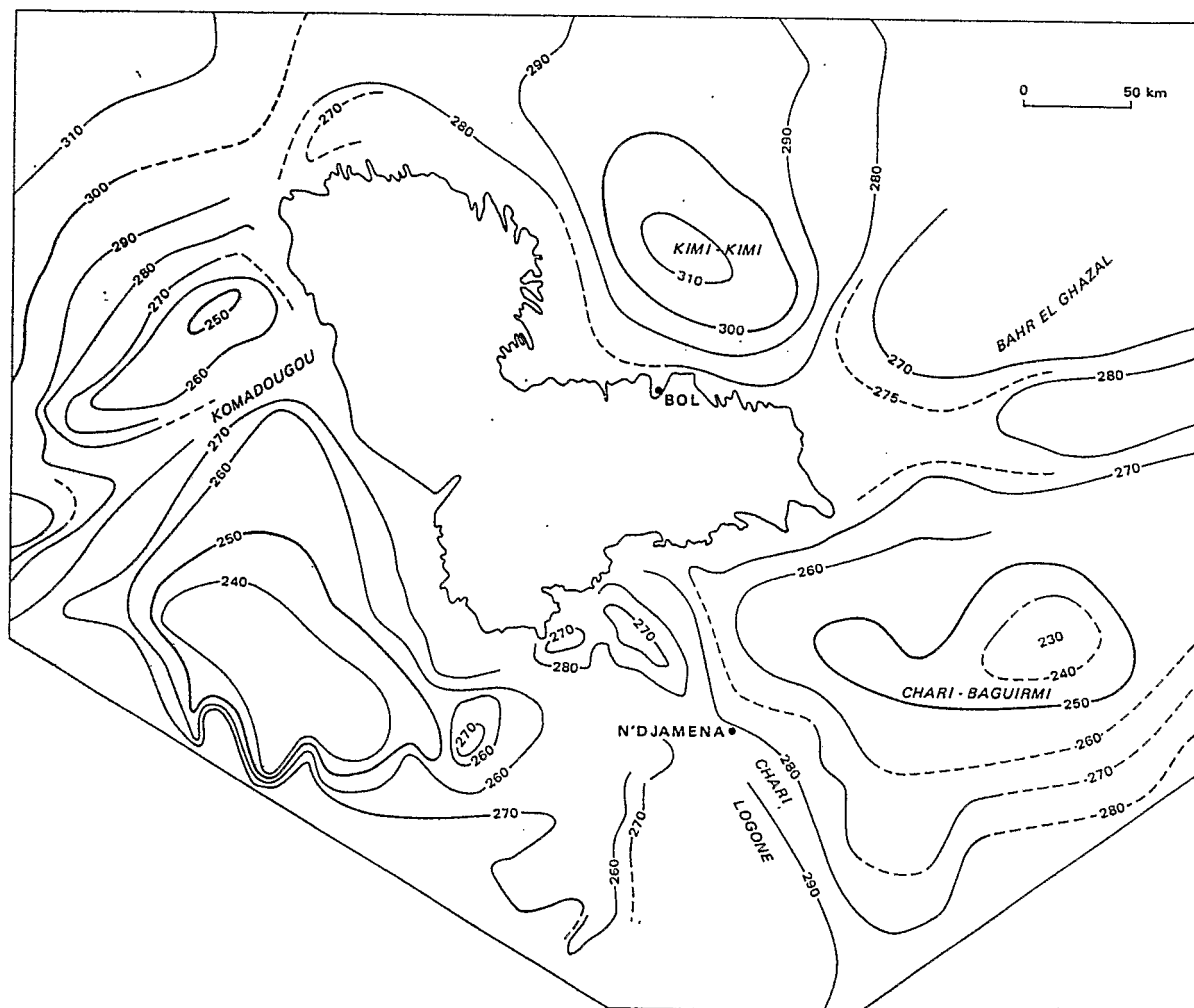


Figure 2.14

Courbes isopièzes de la nappe phréatique de la cuvette tchadienne en 1966 d'après documents PNUD/UNESCO.

L'ensemble repose sur un mur d'argiles lacustres imperméable, situé entre 70 et 100 m de profondeur, attribué au Plio-Pléistocène ancien dont l'épaisseur peut dépasser 200 m.

La distinction entre un bassin nord et un bassin sud, séparés approximativement au niveau du 14^e parallèle, faite par Schneider (1968), se justifie principalement par les différences dans les conditions de réalimentation ; le bassin nord se caractérise par l'absence d'eau de surface pérenne et par une morphologie dunaire ; le bassin sud montre la présence d'un réseau de drainage en surface et l'influence marquée de l'alluvionnement fluvial et deltaïque.

Il est logique d'admettre que les zones marginales du lac alimentent la nappe assurant en cela la régulation saline du système par pertes de solutions concentrées. Tout ceci est d'ailleurs explicité ou fort bien pressenti dans les rapports des cavaliers du général Tilho au début de ce siècle, comme en témoigne le remarquable commentaire du premier "Atlas des Colonies Françaises".

6.3. Piézométrie de l'aquifère

Le lac Tchad apparaît comme un point haut par rapport au système hydrogéologique général. Il est entouré de dépressions piézométriques centrées sur le Chari-Baguirmi, l'axe du Bahr El Ghazal, au Tchad, sur la zone située entre le Chari et l'El Beïd au Cameroun, et du Nigeria au nord de la Komadougou sur le Kadzell. En outre, une dépression en forme de gouttière longe la rive nord-est du lac sur une largeur de 20 km environ (figures 2.15 et 2.16).

A un stade où la cote du lac est de l'ordre de 282 m, la surface piézométrique atteint 230 m, dans le fond de la dépression du Chari-Baguirmi, à l'ouest de Moyto, ce qui détermine un axe d'écoulement allant du lac (région d'Alkouk) vers le centre de la dépression. Dans l'axe du Bahr El Ghazal, au nord de Moussoro, la surface piézométrique atteint 260 m pour s'enfoncer ensuite en direction de Bas-Pays, pour atteindre la cote 166 m dans la région de Koro-Toro. Néanmoins, l'action drainante exercée par le Bahr El Ghazal doit être limitée compte tenu du faible gradient hydraulique qui est de l'ordre de 2.10^{-4} .

Au nord du lac et au-delà de la gouttière piézométrique marginale, la surface piézométrique remonte en direction de Mao pour former un dôme. Elle culmine à 313 m dans la région de Kimi-Kimi.

A l'est du lac, le dôme du Harr sépare les dépressions du Chari-Baguirmi et du Bahr El Ghazal. la ligne de partage des eaux suit l'axe de chacun de ces dômes.

Les gradients piézométriques sont toujours orientés vers l'intérieur des terres. Cependant, la gouttière piézométrique qui s'intercale entre le lac et le dôme de Kimi-Kimi au nord-est du lac confère à cette zone une disposition particulière puisqu'il s'y produit un double écoulement orienté du lac vers la gouttière d'une part, du dôme vers cette même gouttière d'autre part.

Enfin, un examen, même sommaire, des courbes isopièzes révèle aussi que la surface d'équilibre de l'eau souterraine montre des dômes et des dépressions circonscrites avec des différences de cote de plusieurs dizaines de mètres. Rien dans la topographie ou dans le couvert végétal ne semble pouvoir être parallélisé avec ces gigantesques bosses ou creux de la surface de la nappe. Repérées depuis le début des études hydrogéologiques (Schneider, 1967), ces accidents piézométriques sont connus dans toute l'Afrique intertropicale (Archambault, 1960) et n'ont pas reçu d'explication satisfaisante.

Signalons une autre anomalie qui a trait cette fois à la chimie des eaux de la nappe phréatique. Les eaux sont généralement plus salées que celles du lac Tchad sur le front supposé d'infiltration (Roche, 1973 ; Maglione, 1974). Nous y revenons plus loin.

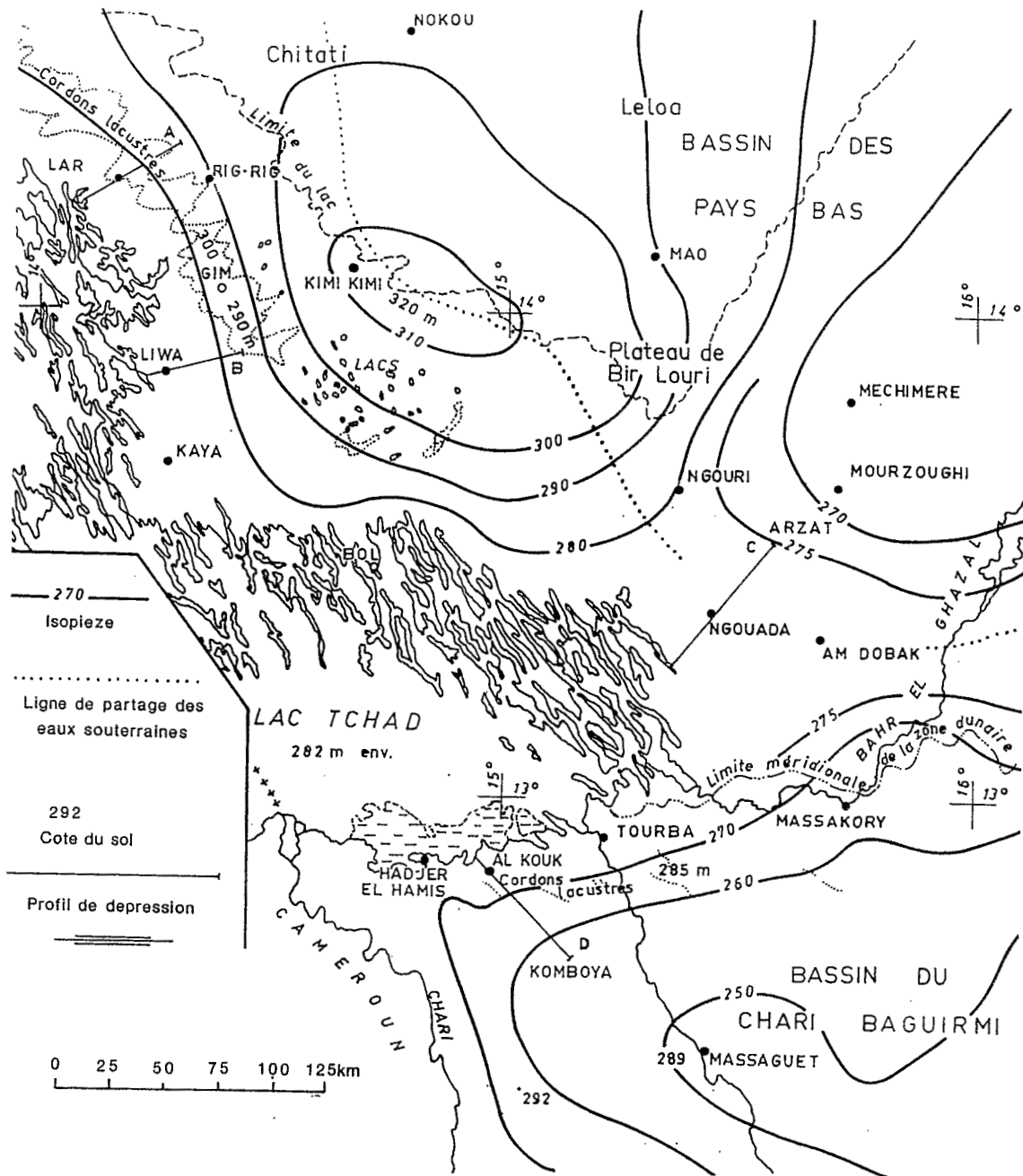


Figure 2.15

Piézométrie de la nappe phréatique à l'est du lac Tchad, d'après J.L. Schneider 1967 (avec indication des profils A, B, C et D de la figure 2.16).

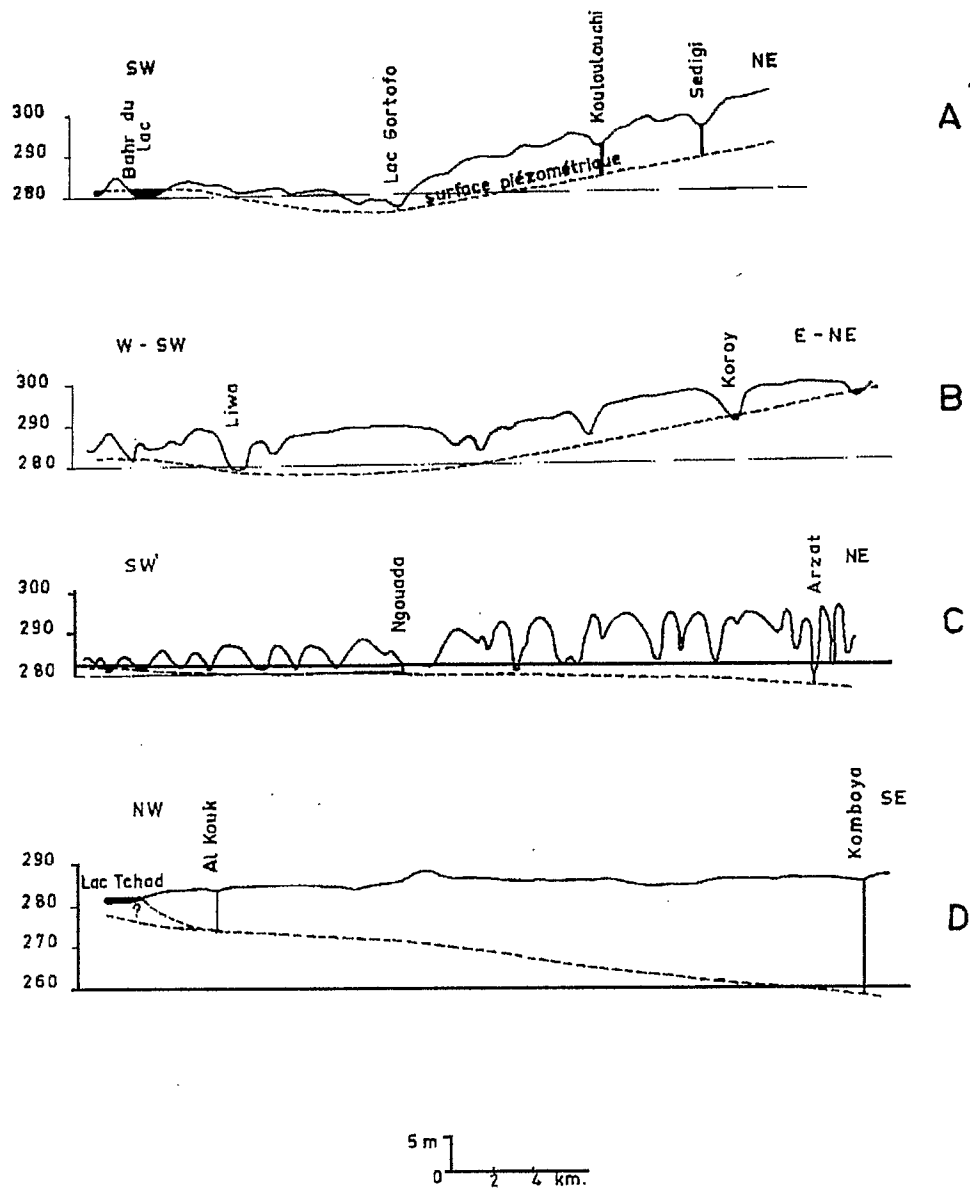


Figure 2.16

Profils de dépression de la surface piézométrique de la nappe aux bordures est et sud du lac Tchad (d'après Schneider, 1967).

6.4. Fluctuations de la piézométrie

Les variations saisonnières du niveau du lac qui sont de l'ordre de 1m n'ont pas de répercussion sur la nappe phréatique sauf sur une étroite bande côtière. Elles ne permettent pas, en tout cas, une inversion de gradients comme cela a été confirmé par Roche (1973).

Les fluctuations pluriannuelles, liées au débit du Chari, réagissent sur la bordure lacustre de la nappe, notamment en milieu dunaire. En comparant les observations faites par Tilho, à une époque où le lac était en grande partie asséché, avec celles qui ont suivi la remise en eau du lac, il est montré que la nappe a subi un relèvement général au voisinage du lac.

En ce qui concerne les apports météoriques, ils permettent des réalimentations de secteurs de nappe particulièrement pendant les années très pluvieuses et en milieu dunaire. Par contre, en de nombreux points, Roche (1980) montre l'absence de réaction aux saisons des pluies et l'absence ou la faiblesse de la réalimentation dans les creux piézométriques. D'une manière générale, dans ces secteurs, l'enfoncement des nappes se ferait en phases discontinues et rien n'indique que le phénomène s'amortisse.

6.5. Les études isotopiques

Elles constituent une contribution décisive à une bonne compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la région et des relations nappe-lac (Fontes, 1976). Des campagnes de reconnaissance (Fontes *et al.*, 1969a et b, 1970) ont montré que les eaux des puits indigènes de la bordure nord-est du lac, où le faciès dunaire des rives est théoriquement le plus favorable à l'infiltration, avaient une teneur en isotopes lourds plus faible que celle des eaux lacustres. Les valeurs les plus fréquentes en 1967-1968 ($\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$) sont même inférieures aux teneurs annuelles moyennes des eaux fluviales affluentes dans le lac ($\delta^{18}\text{O}$ Chari, 1967 = -3,3). Dans la zone tout à fait littorale, les teneurs en isotopes lourds sont plus proches de celles du lac. Mais, dès lors que l'on progresse de quelques mètres à l'intérieur des terres, les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines diminuent. Par exemple à Bol, le lac a une composition isotopique moyenne voisine de 5,5 ‰. A 60 m de la rive, la nappe a une composition isotopique moyenne de + 2,5 ‰. En un site, la dune de Bol et ses annexes, les polders de Bol Guirmi et Bol Berim, l'eau de la nappe phréatique est collectée en profondeur. Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ sont de l'ordre de -4 ‰ sauf l'axe de la dune ($\delta^{18}\text{O} = +4,6$) et sur les marges des polders où les imprégnations latérales par le lac sont évidentes ($\delta^{18}\text{O} = +3,6$ à + 6,9).

Les cuvettes interdunaires des natronières, où se dépose surtout du trona (NaHCO_3 , Na_2CO_3 , $2\text{H}_2\text{O}$) sont alimentées par les eaux de la nappe. A l'entrée du système, ces eaux sont plus chargées en sels que les eaux du lac et ont une teneur en isotopes lourds plus faible comme le montre la coupe (tableau 2.7) réalisée à la tarière au toit de la nappe de la natronière de Liwa, le 7.10.67 (Fontes *et al.*, 1970).

Tableau 2.7

Profil salin et isotopique de la natronière de Liwa

Distance à la dune côté lac	0 m	20 m	71 m	180 m	220 m	260 m
Conductivité mmhos.cm-1	2,02	37,9	104	108	101	105
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW	- 0,3	+ 0,9	+ 2,5	+ 2,9	+ 7,7	+ 11,9
$\delta^2\text{H}\text{‰}$ vs SMOW	- 4,0	+ 1,0	+ 50	+ 10	+ 34	+ 54

L'étude isotopique préliminaire aboutit donc aux hypothèses de travail suivantes :

- Le lac Tchad n'alimente pas d'infiltration massive dans ses rivages. Il imprègne simplement les rives, mais la partie circulante de l'aquifère est fournie par les précipitations qui s'accumulent à la partie supérieure d'une réserve, également d'origine météorique, mais d'accumulation probablement ancienne puisque la pluviosité actuelle moyenne (300 mm) dans le secteur paraît trop faible pour autoriser la constitution d'un tel matelas d'eau souterraine. Les dunes du Kanem, au nord-est du lac, sont considérées comme un système dont la haute porosité est propice à l'infiltration et réfractaire à l'évaporation des eaux pluviales puisque les colonnes capillaires ne s'amorcent pas dans le sédiment trop grossier. Dans les interdunes où les sédiments contiennent une fraction plus fine, l'évaporation capillaire s'amorce à partir de l'eau de la nappe et porte, très vite et localement, les solutions à la saturation en trona, vers le centre de la cuvette.

Une étude isotopique systématique a alors été entreprise (Fontes *et al.*, 1970). Elle a porté à la fois sur le lac lui-même et sur un relevé aussi complet que possible des points d'eau de l'intérieur des terres, augmenté d'une série de transversales au lac réalisées sur les dunes littorales avec sondages piézométriques en trois stations (Soro, No et Tchingam) espacées sur les rives nord-est. Ces plans de prélèvement ont été coordonnés avec ceux des équipes de l'UNESCO et de la FAO qui assuraient une campagne d'échantillonnage de vaste extension spatiale et dont les collections sont analysées par l'IAEA.

Les résultats de ces campagnes de prélèvements sont donnés ci-après:

- Sur le front d'infiltration supposé, au tréfonds des bras lacustres insinués dans les interdunes, la conductivité ne dépasse pas 1 000 $\mu\text{mhos.cm}^{-1}$ pour des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ qui peuvent atteindre + 15 et même + 17‰.

- Les sections dans les dunes littorales montrent que les eaux souterraines sont :

- à une cote inférieure à celle du lac,
- plus chargées en sels,
- rapidement moins riches en isotopes lourds.

- Les interdunes sont les sièges d'enrichissement en sels et en isotopes lourds, d'autant plus marqués que le toit de la nappe est plus proche de la surface. Dans des diagrammes teneur en sels-compositions isotopiques, les verticales piézométriques de Soro, No et Tchingam montrent, comme l'ensemble des sections à la tarière, des répartitions de mélange complexes dans des espaces dont les pôles sont :

- eau lacustre,
- eau météorique non chargée en sels,
- eau météorique chargée en sels par dissolution,
- eau météorique chargée en sels par évaporation.

Les prélèvements réalisés à bonne distance du lac (quelques kilomètres à quelques dizaines de km) confirment généralement la notion d'eaux souterraines plus chargées en sels, mais à teneurs plus faibles en ^{18}O que les masses lacustres. Dans la région du Bahr El Ghazal, on relève des eaux à fortes teneurs en ^{18}O . Les eaux de la nappe phréatique contiennent en général des teneurs variables, mais significatives en tritium, y compris à la base de l'aquifère, à Soro, No et Tchingam.

L'interprétation proposée par J.Ch. Fontes (1976) est la suivante :

- Les eaux du lac Tchad ne jouent aucun rôle dans la réserve de la nappe phréatique. Les eaux lacustres qui s'infiltrèrent sont :
 - * - reprises par l'évaporation dans les interdunes les plus proches,
 - * - diluées par l'infiltration météorique dans le système dunaire.

- Le seul secteur où l'on retrouve des eaux souterraines d'origine lacustre est le Bahr El Ghazal. Le tritium indique clairement que ces eaux ne sont pas parvenues à cette distance du lac par la voie souterraine. Il s'agit au contraire de venues de surface consécutives aux crues exceptionnelles du lac qui s'engouffrent dans le Bahr. Comme les montées des eaux de crues agissent en impulsions élastiques et peu miscibles, ce sont des eaux déjà enrichies en isotopes lourds par évaporation qui sont poussées en avant de l'onde de crue et qui rechargent la nappe.
- La réserve ancienne admise à l'issue des premières études n'est pas prouvée.

6.6. La régulation hydrochimique du lac Tchad

L'enquête géochimique et isotopique livre les éléments d'interprétation suivants :

- une partie des entrées en sels dans le lac est immobilisée par les réactions solution-sédiment (reconstitution des smectites à partir des kaolinites, piégeage interfoliaire, précipitation de calcite : Roche, 1973 ; Carmouze, 1976).

ions	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ H ⁻ + CO ₃ ²⁻	SiO ₂
% fixé	58	45	0	23	37	83

*Immobilisation par réactions entre l'eau du lac et les sédiments (Roche, 1973).
Calcul supposant la conservation du sodium dans la phase liquide.*

- Le solde des ions, essentiellement les alcalins, les carbonates et les sulfates, quitte le lac et se retrouve dans les nappes et les bassins salifères des interdunes,
- Les sels dissous sont véhiculés par les eaux d'origine pluviale. Le passage des ions dans les eaux souterraines se fait en deux temps : d'abord par une accumulation superficielle des sels sur les rivages très sinueux du lac, puis leur lessivage par la pluie.
- Les pulsations annuelles et interannuelles du plan d'eau découvrent de larges surfaces où les solutions marginales les plus concentrées des fonds s'évaporent sans faire retour à la circulation générale et précipitent leurs sels,
- la zone littorale est imprégnée d'eaux lacustres qui remontent en s'évaporant dès que la topographie l'autorise, les sels s'accumulent dans le sol et en surface. Ensuite, dans les deux cas, à la saison des pluies, qui survient près de 6 mois avant la crue du lac, les sels superficiels sont dissous. Entraînés vers la nappe par la circulation générale centripète des eaux souterraines, ils sont éloignés du domaine lacustre avant que la crue saisonnière ne reprenne possession du secteur. Le phénomène de reprise évaporatoire peut s'exercer à nouveau dans les interdunes suivantes, contribuant simplement à renouveler l'eau qui véhicule les sels.

Il n'y a ni circulation souterraine d'eaux lacustres (Roche, 1974), ni dissolution d'évaporites anciennes (Maglione, 1974) par la nappe, comme cela a pu être avancé pour rendre compte des fortes salures des eaux souterraines. Les sels quittent le système par une succession de relais à sec dans les zones superficielles des sols et des sédiments interdunaires (fig. 2.17).

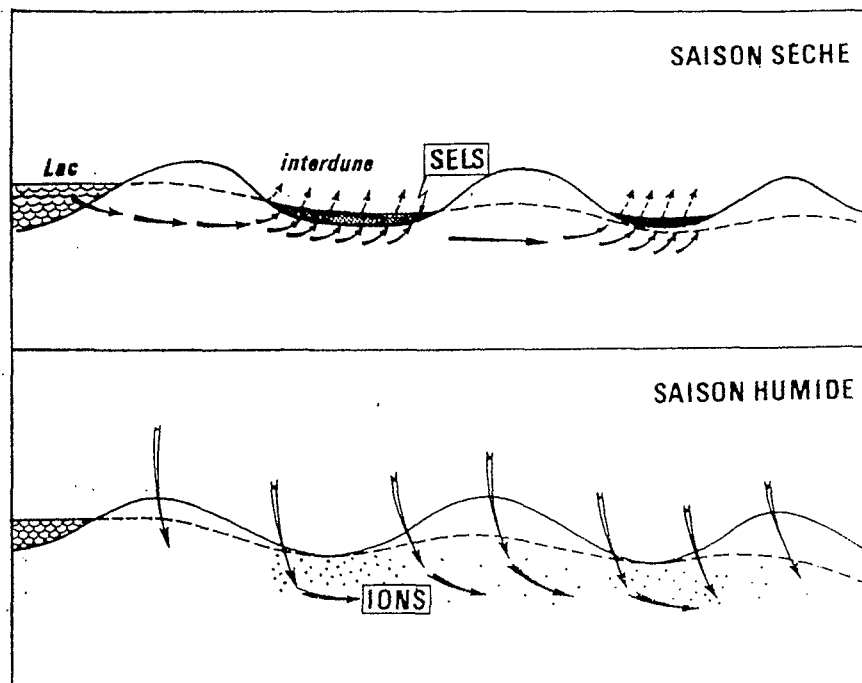


Figure 2.17

Régulation hydrochimique des eaux du lac Tchad. Schéma hypothétique pour expliquer le mécanisme par lequel le lac Tchad conserve des eaux de faible salure.

Les masses d'eaux lacustres sont poussées vers les marges du lac sous l'effet des chocs élastiques successifs, rythmés par la crue saisonnière du Chari et du Logone. L'ensemble joue au profit d'une alimentation sans retour vers les fonds de bras où l'eau chargée en sels peut s'infiltrer pendant la crue du lac Tchad. Pendant la décrue de saison sèche, le lac abandonne également des sels diffus dans les sédiments des rives.

Le gradient général de la nappe engendre un écoulement centripète. Les eaux lacustres infiltrées sont entraînées sous les dunes mais sont reprises par l'évaporation au niveau des interdunes où le niveau piézométrique se rapproche de la surface du sol et où les sédiments plus fins sont moins propices à l'évaporation capillaire.

A l'issue de quelques passages par de telles zones évaporatoires, l'eau lacustre est pratiquement éliminée du système. Les sels sont repris par un autre vecteur, l'eau météorique de la saison humide qui lave les franges des interdunes ainsi que les rives du lac découvertes par la décrue et véhicule les sels vers la nappe. D'interdune en interdune et de relais à sec en relais à sec, les sels sont exportés hors du domaine lacustre.

Ce mécanisme complète la capture ionique sur les argiles des fonds lacustres qui immobilise environ 50 % des apports en ions et en silice dans le lac lui-même (d'après Roche (1973), in Fontes 1976).

Un tel mécanisme rend compte de la plupart des faits observés, mais doit cependant faire face à certaines difficultés d'ordre géochimique. Par exemple, tous les alcalino-terreux ne sont pas piégés dans les fonds lacustres et une certaine fraction devrait obéir au même mécanisme de "relais à sec". Or, le magnésium et surtout le calcium se prêtent mal à des stades successifs de mobilisation et précipitation, et on devrait assister à une immobilisation de ces produits dès les premières précipitations. On remarque en effet (Roche, 1974), que le faciès calco-sodique des eaux lacustres s'inverse dans la nappe au profit des alcalins. Ce phénomène devrait pouvoir être relié à la mise en évidence de carbonates dans les sols des polders littoraux de la région de Bol (Cheverry, 1974).

6.7. Conclusions sur les études de la nappe phréatique

Sur la base de l'ensemble des travaux antérieurs et en particulier de la totalité des études isotopiques réalisées à ce jour, on peut présenter un résumé des 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 apparaissent en équilibre de régime permanent qui n'a pas été sensiblement troublé par la sécheresse des années récentes ;
- Les facteurs qui régissent cet équilibre hydraulique souterrain interannuel sont :
 - * l'existence d'une réserve d'eau ancienne peut-être en partie héritée du dernier pluvial climatique ou des hauts niveaux du lac qui ont caractérisé cette époque.
 - * la présence d'une zone de renouvellement à la partie supérieure de l'aquifère. Cette tranche d'eau d'épaisseur variable, mais généralement faible, est d'origine météorique dans les dômes du Harr et de Kimi-Kimi ainsi que très probablement dans la zone du Chari-Baguirmi. Elle est d'origine fluviale dans l'axe de la vallée du Chari ainsi que dans la région de la dépression du Nord-Cameroun. Elle est d'origine lacustre dans la zone littorale du lac Tchad sauf dans la tranche superficielle de l'aquifère.
 - * la présence d'une alimentation sporadique dans le Bahr El Ghazal où les eaux des crues exceptionnelles repoussent les eaux marginales de la cuvette lacustre dans l'axe de cet exutoire où elle s'infiltrerait au fur et à mesure de leur avancée.
 - * l'évaporation intense dans les creux topographiques où la surface piézométrique est généralement assez proche. Ce phénomène a pour effet de délester les sels dans les zones superficielles où ils sont repris par les eaux météoriques et transportés à nouveau vers la nappe.
- 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 ;
- Les eaux du dôme semblent contenir une composante ancienne qui pourrait être liée à une drainance verticale en des secteurs où l'écran argileux, qui sépare l'aquifère confiné de la nappe phréatique, se trouverait aminci ou étiré par remontée du socle;
- La continuité hydraulique de l'ensemble de l'aquifère phréatique ne peut absolument pas être garantie sur la base des études isotopiques et il est clair que ceci conduit à émettre les plus expresses réserves sur toutes les applications locales des lois de l'hydraulique souterraine classique qui présuppose la continuité hydraulique de l'aquifère.

La végétation du Lac Tchad

Chapitre 3

Forcément évolutive en fonction du contexte hydrologique du lac, la végétation ne peut être décrite que par rapport à une situation donnée. Les descriptions qui sont faites ici ne correspondent donc qu'à des "instantanés" basés sur les observations effectuées par J. Léonard, en 1964 et 1968, et G. Fotius, botaniste de l'Orstom en 1974 et 1976.

Rappelons qu'en 1964-1968, le lac était à un stade proche du "Grand Tchad", après le maximum contemporain de 1963, évoluant vers le "Moyen Tchad". Les reconnaissances de G. Fotius ont eu lieu à une époque de très bas niveau du "Petit Tchad", après un premier paroxysme de la sécheresse actuelle (1972 et 1973).

1. APERCU SUR LA VEGETATION DE 1964 A 1968

1.1. Principaux types de milieux et considérations phytogéographiques.

Il saute rapidement aux yeux que le lac Tchad ne constitue pas une entité homogène, mais que divers types de milieux s'y rencontrent. Le lac Tchad, à flore relativement pauvre, banale et dépourvue d'endémisme, ne mérite pas une subdivision phytogéographique propre d'un niveau hiérarchique élevé. Néanmoins, par suite de sa superficie non négligeable et du milieu spécial qu'il représente au sein de la zone sahélienne, un *District phytogéographique du lac Tchad* pourrait être établi.

D'après les conditions écologiques et la végétation phanérogame, ce "district" peut être partagé en au moins 9 subdivisions, reliées les unes aux autres par des zones intermédiaires et assez bien disposées selon un gradient sud-nord.

1° Mares temporaires des bassins du Chari et de l'El Beïd et lits de petits cours d'eau périodiquement asséchés à végétation herbacée éphémère.

2° Sables du Chari et de ses défluent jusqu'au delta avec groupements psamophiles herbacés et arbustifs divers.

3° Zone de vases de l'El Beïd jusqu'à son delta et des vases de la Komadougou-Yobe caractérisée par un excellent développement de la végétation aquatique (*Pistia*, *Nymphaea*) et de la végétation semi-aquatique étalée à *Ludwigia*

4° Deltas du Chari et de l'El Beïd avec prairie aquatique à *Vossia* et apparition de *Cyperus papyrus* et de *Phragmites*

5° Zone de dépôt des vases en aval du delta de l'El Beïd avec bonne représentation des groupements à *Pistia*, à *Nymphaea* et *Ludwigia*

6° Eaux libres du lac.

Cette zone, pratiquement dépourvue de végétation, doit-elle être subdivisée en eaux libres du Nord et en eaux libres du Sud de part et d'autre d'un axe Baga Kawa - Baga Sola ? Aucun argument botanique (phanérogamie) ne milite en faveur de cette séparation.

7° Ilots-bancs

Les innombrables îlots-bancs du lac sont couverts d'une végétation soit étalée à extrémités dressées formant prairie aquatique (prairie à *Vossia*), soit dressée formant roselières (papyraie à *Cyperus papyrus*, phragmitaie à *Phragmites*, typhaie à *Typha*). Ils possèdent souvent en leur centre une zone d'eau plus ou moins libre avec nympheaie et typhaie.

En progressant du sud vers le nord du lac, on observe fréquemment autour de chaque îlot-banc des zones concentriques de végétation disposées dans l'ordre centripète suivant :

Vossia - *Cyperus papyrus* - *Phragmites*

Cyperus papyrus - *Phragmites* - *Typha*

Phragmites - *Typha*

Sous une action purement mécanique, due surtout aux variations du niveau de l'eau et à l'action des vagues, des fragments parfois énormes (Kirtas) de végétation à *Vossia*, à *Cyperus* ou à *Phragmites* se détachent des bords des îlots-bancs. Poussés par les vents, ces kirtas partent à la dérive sur les eaux libres du lac et finissent par s'y échouer en bouleversant souvent la succession des groupements en place.

8° Îles de l'archipel

Les centaines d'îles constituant l'archipel se distinguent des îlots-bancs par la succession d'une frange ripicole (prairie aquatique ou roselière) beaucoup plus étroite, d'une zone périodiquement inondée - exondée, souvent très riche (nympheaie, groupement à *Cyperus mundii*, prairie aquatique à *Leersia*) et enfin d'une zone centrale sablonneuse, généralement exondée, dont la limite eau - sable est ordinairement marquée par une ceinture de palmiers doum (*Hyphaene thebaica*) et de plantes diverses (*Cassia*, *Ipomoea*, *Sporobolus*).

Du Sud vers le Nord du lac, les îles ont un relief de plus en plus marqué, avec des variantes dans les paysages végétaux :

- La zone des îles plates, dépourvues d'arbres peut montrer une frange ripicole suivie de vastes prairies aquatiques périodiquement inondées - exondées (à *Leersia* ou à *Echinochloa*). Ce type d'îles constitue la transition avec les îlots-bancs. D'autres îles ont une frange ripicole qui ceinture de vastes prairies longtemps exondées (notamment à *Panicum repens* et à *Sporobolus spicatus*), sur lesquelles s'installent temporairement des troupeaux et des villages. Certaines montrent même une ceinture de palmiers doum (*Hyphaene*) au niveau des plus hautes eaux.
- La zone des îles à relief et à végétation arborescente correspond en fait aux sommets d'un système de dunes parallèles dont la hauteur hors de l'eau oscille entre 1 et 10 à 15 mètres. On peut distinguer, d'une part des dunes peu élevées avec quelques éléments de végétation sahélienne arborescente jamais inondée (*Acacia*, *Bananites*, *Calotropis*, *Leptadenia*, etc.) et avec une strate herbacée demeurant verte pendant une grande partie de l'année par suite de la faible profondeur de la nappe phréatique et d'autre part, des dunes au relief nettement marqué avec une végétation sahélienne typique et un sol sablonneux pratiquement nu en saison sèche, mais très vert en saison des pluies.

9° Mares du KANEM

L'eau des innombrables mares et petits lacs du Kanem peut être, soit d'origine météorique, soit d'origine phréatique ; elle est généralement liée aux variations du plan d'eau du lac Tchad. Certaines mares ont une alimentation mixte.

Trois principaux types de végétation y ont été observés :

Des mares avec îlots de *Phragmites* entremêlées de quelques lianes, avec une prairie à *Panicum repens* en bordure et un groupement à *Sporobolus spicatus* sur le sable sec.

D'autres mares se caractérisent par un peuplement aquatique exclusif de *Phragmites* assez malingres, avec sur les bords, un groupement de *Cyperus Laevigatus* souvent accompagné de *Panicum repens*, puis la végétation à *Sporobolus*.

Enfin on observe aussi des mares sans aucune végétation dans l'eau, mais avec une ceinture marginale bien verte de *Cyperus Laevigatus* en avant du groupement à *Sporobolus*.

Il aurait été intéressant de comparer ces 9 subdivisions écologiques, caractérisées chacune par une végétation phanérogame propre, avec celles établies d'après d'autres critères, tels l'étude du phyto et du zooplancton, des insectes aquatiques, des poissons ou de la composition physico-chimique des eaux.

1.2. Les facteurs écologiques

Parmi les principaux facteurs écologiques qui conditionnent l'existence des divers types de milieux, on doit mentionner les variations du plan d'eau, la nature des sédiments, le vent, ainsi que la composition physico-chimique des eaux.

Les variations du plan d'eau provoquent soit l'apparition ou la disparition de la végétation des mares temporaires, des vases exondées et des sables fluviatiles, soit l'extension ou le rétrécissement des divers types de végétation périodiquement inondée - exondée des îlots-bancs et des îles de l'archipel.

La nature des sédiments joue également un rôle important (sable ou vase). Le développement des *Pistia* par exemple est lié à l'abondance des sédiments vaseux (El Beïd et Komadougou-Yobé principalement).

Le vent, par l'action mécanique incessante des vagues qu'il provoque sur les franges des îlots-bancs et des îles de l'archipel, conditionne souvent l'aspect de la végétation des rives au vent (à roselières marginales) ou sous le vent (avec associations marginales à *Pistia*, à *Nymphaea*, à *Ludwigia* ou à prairie aquatique en avant des roselières).

La composition physico-chimique des eaux joue un rôle, tant pour les variations du pH que pour celles de la concentration en sels.

Il existe enfin un autre facteur dont l'influence se traduit par de nettes modifications dans l'aspect de la végétation. Si l'on se dirige du sud du lac vers le nord, du delta du Chari à N'Guigmi (Niger) par exemple, on observe la nette évolution suivante :

- Dominance puis disparition progressive des prairies aquatiques à *Vossia*
- Abondance puis disparition progressive des papyrus avec une zone intermédiaire typique de papyrus maladifs.
- Disparition progressive de nombreuses espèces et groupements aquatiques liés aux eaux douces (nymphaies, utriculaire etc.) entraînant un net appauvrissement en espèces de la flore du lac du sud vers le nord.
- Dominance progressive, par suite de ces disparitions successives, des *Typha*, puis celle des *Phragmites* vers le nord.

- Apparition sporadique, mais significative, de *Cyperus Laevigatus*, l'espèce exclusive des bords de mares natronées, soit sous forme de petites plages dans les prairies à bétail des îles plates non boisées du nord de l'archipel, soit sous forme de touffes isolées sur les matelas radiculaires de *Phragmites* dans l'extrême nord du lac.
- Poursuite enfin dans les lacs et mares du Kanem, de l'appauvrissement progressif de la végétation du lac.

C'est dans ce dernier milieu que le botaniste trouve l'explication de l'évolution de la végétation. Les trois types de végétation observés dans et autour des mares du Kanem sont fonction, en effet, de la concentration de plus en plus forte des eaux en sels minéraux. L'appauvrissement extrême de la végétation se trouve représenté dans les mares natronées avec ou sans *Phragmites* malingres dans l'eau et avec une typique ceinture pure et bien verte de *Cyperus Laevigatus* souvent entremêlés de cristallisations blanchâtres de sels divers. Cette même végétation se retrouve au bord de lacs natronés à travers tout le Sahara, jusqu'à Ounianga Kébir (Tchad) et Koufra (Sud de la Libye).

Le facteur écologique fondamental qui règle les modifications de la végétation du sud vers le nord semble donc bien être la concentration progressive des sels minéraux vers le nord, en s'éloignant du Chari, le plus important apport d'eau douce du lac.

1.3. Les regroupements végétaux

Voici, brièvement énumérés, les principaux groupements végétaux liés à l'eau rencontrés dans la région du lac Tchad au cours de cette période de 1964 à 1968.

1.3.1. Végétation aquatique des eaux calmes douces

Association à *Potamogeton* et *Vallisneria*

Delta du Chari et eaux du lac - au niveau de l'eau et surtout dans l'eau - constitue parfois d'immenses herbiers aquatiques (herbiers à *Potamogeton* au large de Hadjer El Hamis).

Se compose de *Potamogeton*, *Vallisneria*, *Najas* et souvent de *Ceratophyllum*.

Divers faciès caractérisés par la dominance parfois exclusive de chacun des constituants.

Association à *Pistia* et *Lemna*

Sur l'eau des mares ou des anses calmes ainsi que dans les franges de végétation herbacée semi-aquatique dans des endroits calmes, aussi bien dans le lac que dans l'El Beïd et Komadougou-Yobé.

Espèces composantes : *Pistia stratiotes* (salade du Nil), *Lemna perpusilla*, *Spirodela polyrrhiza* (lentilles d'eau) ainsi qu'*Azolla africana*, très souvent accompagnées de *Ceratophyllum demersum* dans l'eau.

Divers faciès à dominance d'une ou deux espèces.

Association à *Nymphaea* et *Utricularia* (nymphaie)

Mares, anses calmes, bords des rives sous le vent.

Principales espèces constituantes : 4 espèces de *Nymphaea* (nénuphar) et 3 espèces d'*Utricularia* (utriculaire).

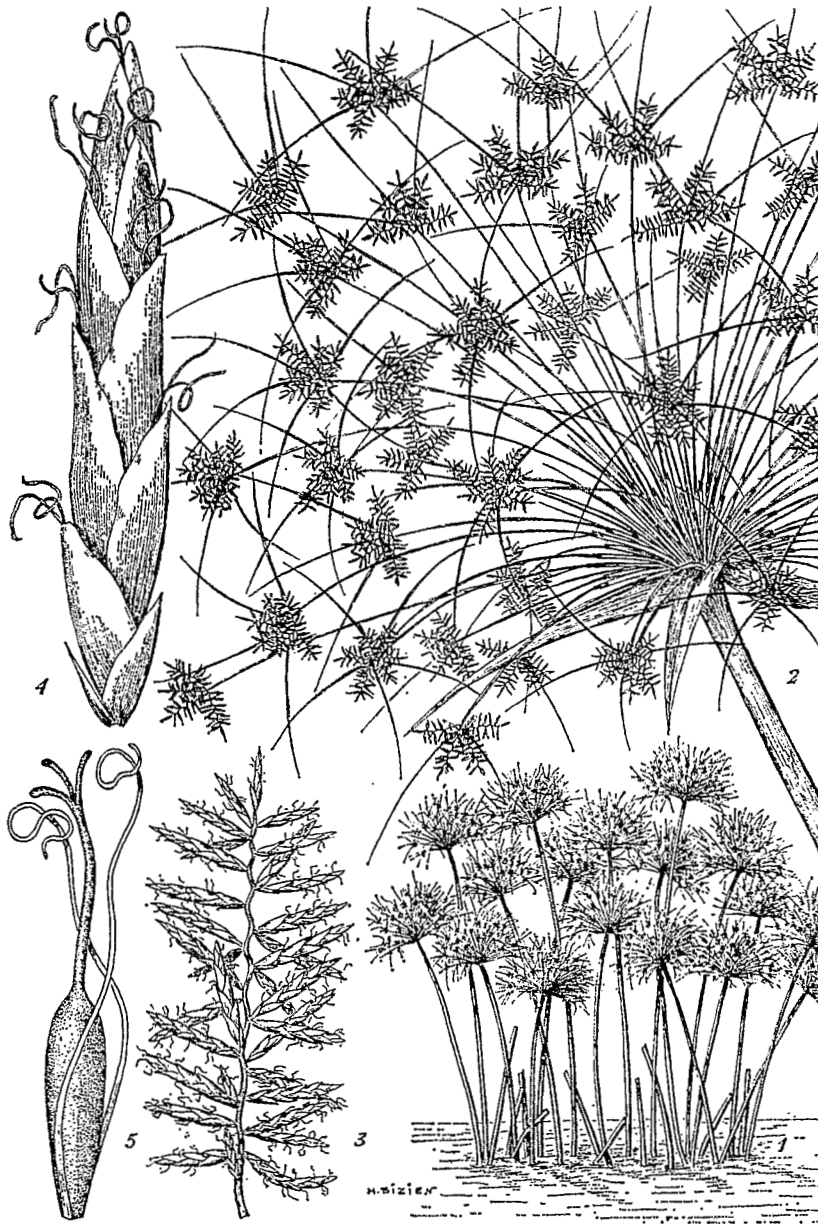


Planche 3.1

Cyperus papyrus L. : 1, port de la plante x1/30 - noter l'absence de feuilles développées ; 2, inflorescence x1/3 ; 3, un épi d'épillets x2 ; 4, un épillet x15 ; 5, fleur, contenue dans l'une des glumes de l'épillet x30 - les deux étamines sont déjà flétries, leurs anthères sont tombées ; les 3 stigmates par contre sont épanouis. (d'après A. RAYNAL-ROQUES, 1980).

1.3.2. Végétation des bords des mares temporaires d'eau douce

Association à *Ammannia* et *Heliotropium*

Bord des mares superficielles temporaires, lits de petits cours d'eau périodiquement asséchés. Progression centripète de la végétation en fonction de l'assèchement.

Végétation herbacée, naine, éphémère, très riche en espèces : *Ammannia*, *Heliotropium*, divers *Cyperus*, *Marsilea*, etc.

1.3.3. Végétation des bords des eaux natronées

Association à *Cyperus laevigatus*

Forme une ceinture marginale très verte en bordure même des mares et des petits lacs à eau natronée du Kanem.

Constituant presque exclusif : *Cyperus laevigatus*, herbe rhizomateuse.

1.3.4. Végétation des sables fluviaux et lacustres périodiquement inondés-exondés

Association à *Panicum repens*

Groupement herbeux sur les sables fluviaux et lacustres périodiquement inondés - exondés. Se compose principalement de *Panicum repens*, espèce rhizomateuse.

1.3.5. Végétation nitrophile des vases exondées

Association à *Eclipta* et *Basilicum*

Végétation nitrophile fugace de dépôts vaseux périodiquement exondés. Diverses espèces, dont surtout *Eclipta prostrata*, *Basilicum polystachyon*.

1.3.6. Végétation herbacée semi-aquatique

1.3.6.1. Végétation étalée des bords des eaux

Association à *Ludwigia stolonifera*

Bord des eaux, franges des prairies aquatiques et des roselières dans des anses calmes sous le vent, mares. Forme tapis flottant adapté aux fluctuations du plan d'eau. Espèces très sociables, vivaces, envahissantes, longuement étalées sur l'eau.

Principaux constituants : *Ludwigia stolonifera*, *Cyperus mundii*, *Ipomoea aquatica*, *Neptunia cubenses*.

Divers faciès selon la dominance de l'une ou l'autre espèce.

1.3.6.2. Végétation étalée, à extrémités dressées, formant prairies aquatiques.

Diverses associations et sous-associations, caractérisées chacune par la dominance presque exclusive d'une espèce, généralement une graminée, et par une écologie assez particulière. Végétation vivace, longuement étalée dans l'eau

mais à extrémités dressées, périodiquement plus ou moins longtemps exondée, adaptée à l'exhaussement du substrat.

Association à *Echinocloa stagnina*

Vases, eaux calmes à courant faible et eaux peu profondes. Constitue des prairies aquatiques presque entièrement recouvertes par les hautes eaux. Groupement rare et généralement de faible superficie.

Association à *Echinocloa pyramidalis*

Végétation jamais recouverte entièrement par les hautes eaux, remarquablement adaptée aux fluctuations du plan d'eau. Diverses sous-associations :

- Prairie aquatique à *Echinocloa pyramidalis*
Bancs de sable, berges sablonneuses, franges de végétation ripicole arbustive, mares en voie d'atterrissement, courant lent, groupement rare
- Prairie aquatique à *Vossia cuspidata*
Bancs de sable, franges de roselières. Eau assez profonde et plus ou moins agitée. Groupement dominant dans le delta du Chari.
- Prairie aquatique à *Leersia hexandra*
Mares en voie d'atterrissement, îles plates du lac, bordure des zones centrales exondées des îles de l'archipel ; substrat généralement vaseux. Eaux peu profondes à courant faible ou nul.
- Prairie aquatique à *Polygonum*
Bancs de sable et berges sablonneuses du Chari.

1.3.6.3. Végétation dressée formant roselières :

Végétation de plusieurs mètres de haut, installée en eaux assez profondes au moins durant une partie de l'année, à dominance d'une espèce.

Association à *Cyperus papyrus* (papyraie)

Épais matelas flottant de rhizomes entremêlés de papyrus, de tiges mortes et de débris divers permettant le développement de fougères (*Thelypteris totta*) et de nombreuses lianes (*Ipomoea*, *Luffa*, *Oxystelma*, *Cayratia Vigna*).

Association à *Phragmites australis* subsp. *altissimus* (phragmitaie)

Épais matelas flottant avec diverses lianes semblables à celle des papyraies.

Association à *Typha australis* (typhaie)

Absence de matelas flottant expliquant la grande pauvreté spécifique de ce groupement. Quelques lianes, dont *Oxystelma*.

1.3.7. Végétation arbustive périodiquement inondée-exondée

Association ripicole à *Mimosa* et *Salix*

Frange arbustive sur les berges du Chari.

Principales espèces : *Mimosa pigra*, *Salix ledermannii*, *Phyllanthus*, *Ficus Sesbania*.

Groupement à *Aeschynomene elaphroxylon* (ambatch)

Îlots-bancs et marges de îles. Groupement pratiquement disparu en 1964-1968 par la suite des fortes crues 1963 et 1964, alors qu'il était bien développé quelques dizaines d'années auparavant. Rares lambeaux observés çà et là, de jeunes plants rencontrés en bordure de certaines îles de l'archipel. L'ambatch peut atteindre 5 - 6 m de haut et 15 - 30 cm de diamètre.

1.4. Dynamique de la végétation du lac

Avant 1972, il semble que les espèces qui couvraient les plus grandes superficies soient respectivement les *Phragmites*, puis les *Cyperus papyrus*, les *Vossia* et les *Typha* et enfin les *Potamogeton* et *Ceratophyllum*. Les *Phragmites* occupaient les îlots-bancs principalement tandis que les papyrus se trouvaient en pourtour de ceux-ci ou des îles franches. Les "Kirtas" (îles flottantes) de papyrus étaient nombreuses et parfois de très grande dimension. *Vossia cuspidata* se cantonnait au delta du Chari. *Aeschynomene elaphroxylon* (l'ambatch) était rarissime et, dans l'extrême nord du lac, il ne se trouvait pratiquement que des peuplements de *Phragmites*.

A cette époque, le niveau du lac ne présentait que des variations relativement faibles au cours du cycle hydrologique annuel, avec une profondeur moyenne de l'ordre de 3 m.

2. APERÇU SUR LA VÉGÉTATION DE 1974 A 1976

L'assèchement brutal du lac, à partir de 1973, a entraîné des changements considérables de végétation qui n'ont pu malheureusement être observés en continu. Seulement deux constats de l'état de la végétation, portant sur la cuvette sud, ont pu être effectués en janvier 1974 et juin 1976.

En 1974, la végétation était très diversifiée du point de vue des espèces, mais deux espèces dominaient nettement : l'ambatch et le papyrus, avec un maximum d'extension dans l'archipel de la Grande Barrière. Les *Phragmites* des îlots-bancs, transformés en îles, n'apparaissent plus dans le paysage. Par ailleurs, on pouvait observer de grandes étendues occupées par un certain nombre d'espèces, parfois en peuplement monospécifique comme :

- *Typha australis*, *Vossia cuspidata*, *Cyperus articulatus*, *Ipomoea aquatica*, *Nymphaea* sp. ainsi que des franges plus ou moins flottantes constituées d'un mélange de plantes avec :
- *Cyperus* sp., *Ludwigia adscendens*, *Polygonum* ssp., *Sacciolepis africana*....

Dans la cuvette nord, en revanche, la baisse constante des eaux, due à l'effet de barrage de la Grande Barrière, a entraîné le dépérissement de toute la végétation. Seul le *Typha* pouvait encore se maintenir par endroits.

A partir de 1974, le niveau moyen du lac dans la cuvette sud est remonté mais avec de fortes amplitudes entre étiages et périodes de crue. D'où de nouvelles modifications de la flore :

- disparition des herbiers à *Ipomoea aquatica*, *Cyperus articulatus*,
- régression considérable des surfaces occupées par les papyrus et les *Typha*,
- apparition massive de plantes nouvelles dans les franges flottantes à composition mixte : *Pistia stratiotes*, *Leersia hexandra*, *Ludwigia leptocarpa*,

- développement considérable des surfaces occupées par le *Vossia* et, dans une moindre mesure, par *Nymphaea lotus*,
- maintien de l'ambatch dans ses stations de 1974, sans extension de surface, du moins apparemment. Dans certains cas, il y a eu destruction de quelques forêts avec recolonisation des trouées par le *Vossia*, mais aussi par le papyrus dans certaines stations.

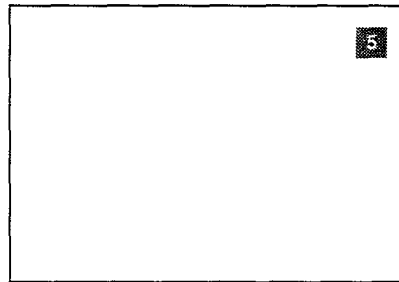
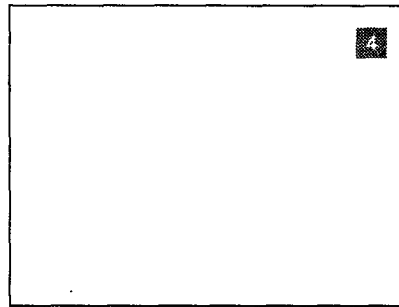
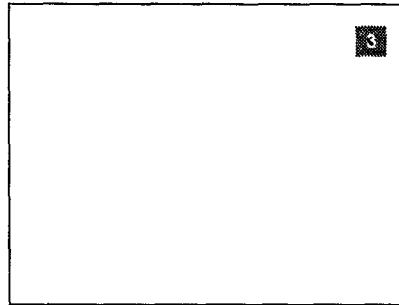
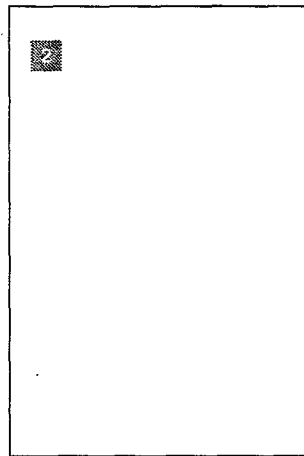
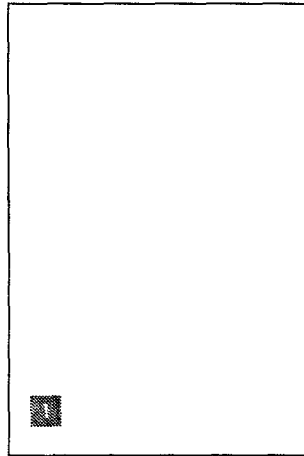
Dans l'ensemble, en 1976, le fond de la végétation était constitué par le couple *Vossia* - *Aeschynomene*, au lieu de *C. papyrus* - *Aeschynomene* en 1974.

Ces peuplements végétaux observés à la fin 1976, loin d'être stabilisés, vont se modifier jusqu'à ce que le lac se remplisse de nouveau de façon à amortir les fortes variations de niveau annuelles que l'on peut observer au cours de la période de sécheresse.

Dans le cas d'un retour à un état lacustre comparable à celui de 1964-1968, une nette montée des eaux se maintenant durant plusieurs années aurait pour conséquence la régression de toute la végétation (sauf de l'association à *Pistia*), le rétrécissement de la surface des îles et des îlots-bancs (avec disparition de beaucoup d'entre eux) la transformation de la plupart des îles plates en îlots-bancs et la régression nette, voire la disparition, des *Aeschynomene*.

Les rochers intrusifs
d'Hadjer el Hamis,
sur la rive sud du lac.

Clichés
Christian LÉVÊQUE, 1968.



Boeufs kouris
dans l'archipel
de la région de Bol.

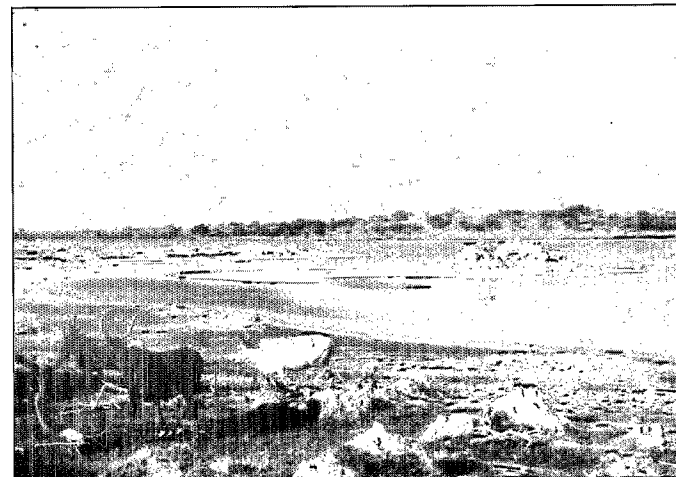
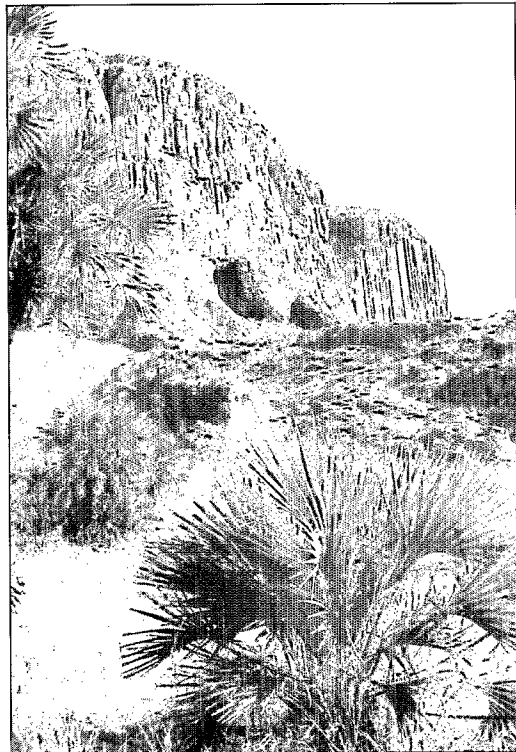
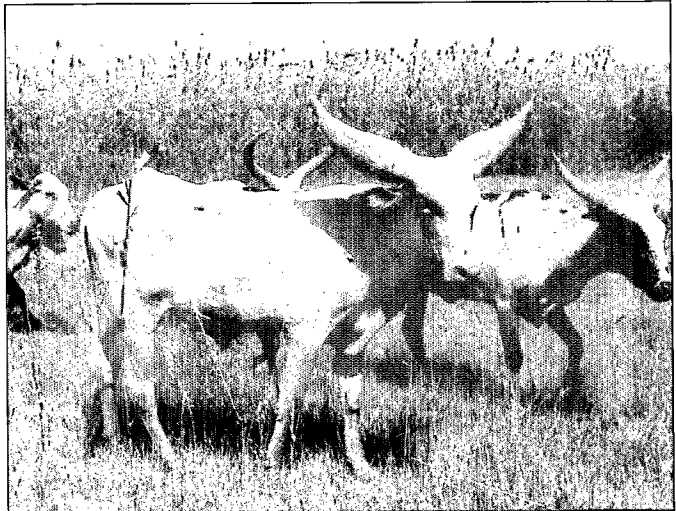
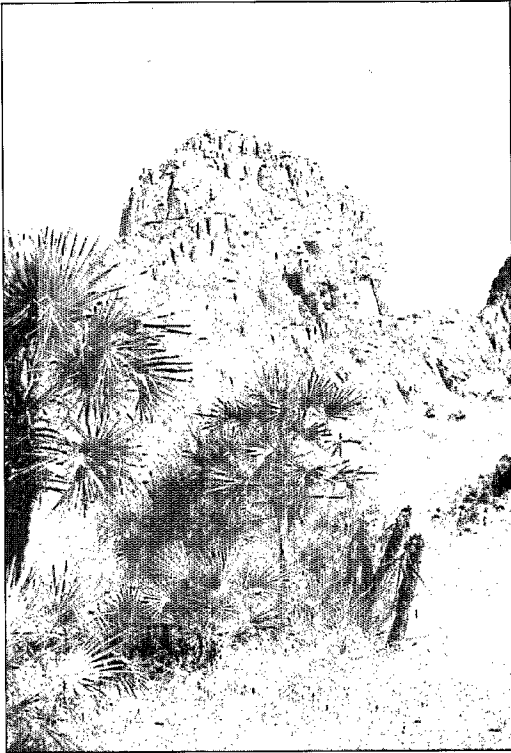
Cliché
Christian LÉVÊQUE, 1968.

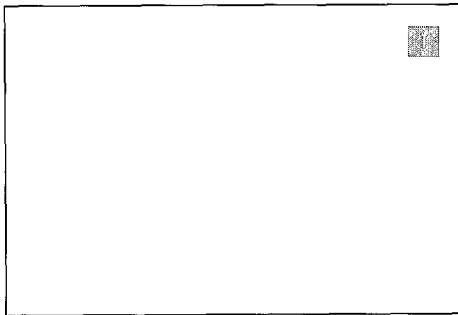
Femmes se rendant
au marché de Bol
pour vendre
leur production
de nattes tressées.

Cliché
Christian LÉVÊQUE, 1968.

Efflorescences
de natron
dans une mare
du Kanem.

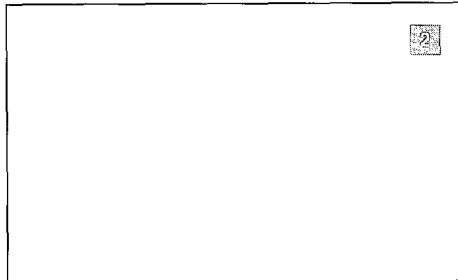
Cliché
Christian LÉVÊQUE, 1968.





Le rocher dit de l'éléphant
d'Hadjer el Hamis.

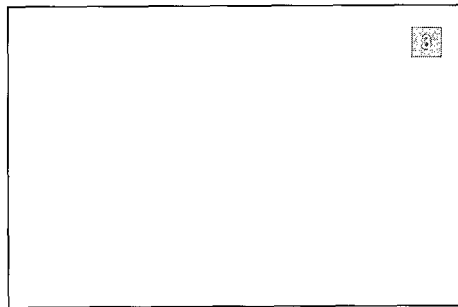
Cliché Christian LÉVÊQUE, 1968.



Le séjour prolongé de quelques
éléphants sur une île de l'archipel
de Bol se traduit par la destruction
de la végétation arbustive.

Seul *Callotropis procera* subsiste.

Cliché Christian LÉVÊQUE, 1968.



Les troupeaux de bœufs nagent
d'île en île en quête de pâturage
dans l'archipel. Les bergers s'aident
d'un flotteur en tiges de papyrus.

Cliché Christian LÉVÊQUE, 1968.

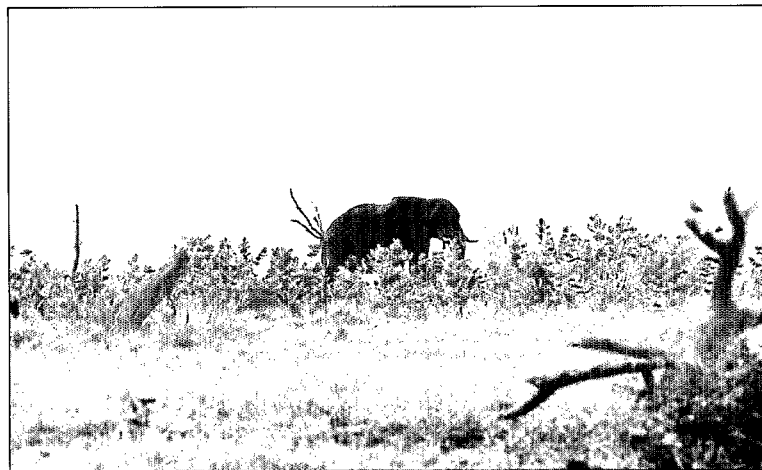
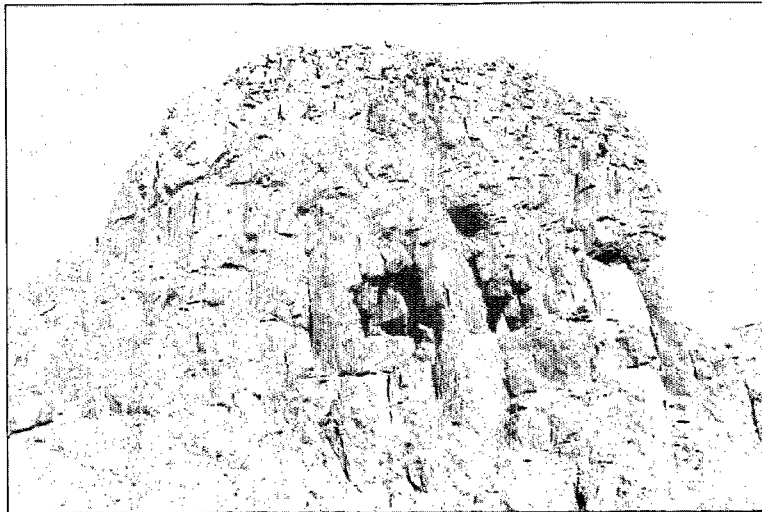
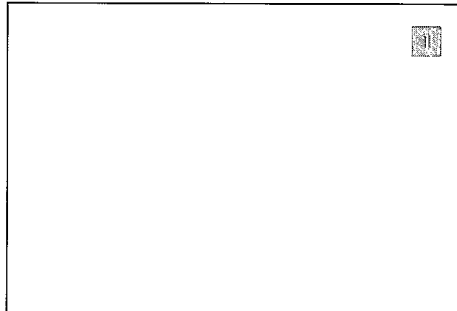
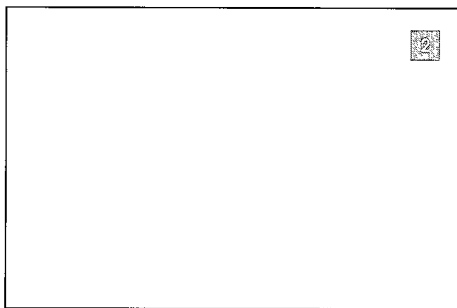


Planche II



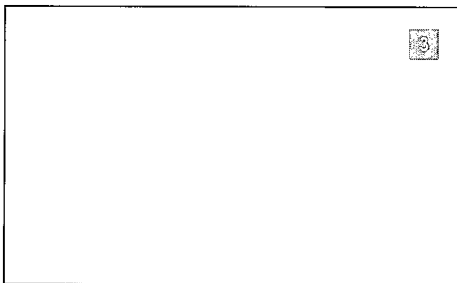
Vues aériennes de l'archipel
dans la région de Bol
en période de Tchad moyen.
Au premier plan le Sud de Bérin,
puis la pointe nord de Yakoua
et, plus loin, Koremirom.

Cliché Christian LÉVÉQUE, 1968.



Dans les baies abritées se développe
une frange végétale plus large
dont des fractions peuvent se détacher
et former les îles flottantes.

Cliché Christian LÉVÉQUE, 1968.



Le bateau et le quai de la station
nigériane de recherche à Malamfatori
en période de moyen Tchad.

Cliché Christian LÉVÉQUE, 1968.

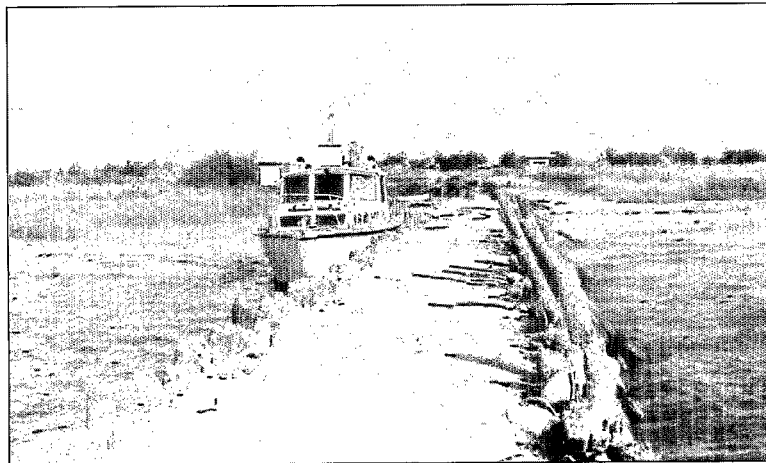
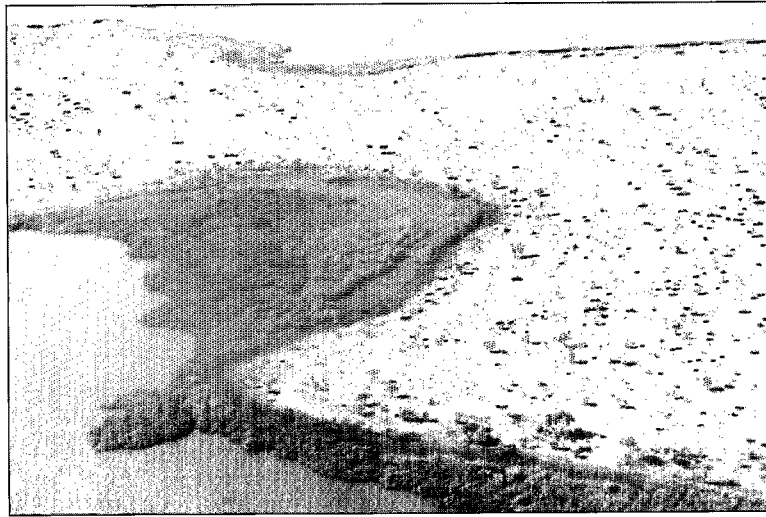
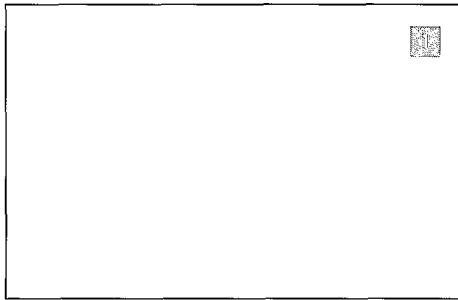
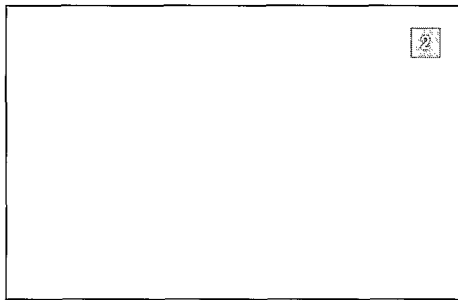


Planche III



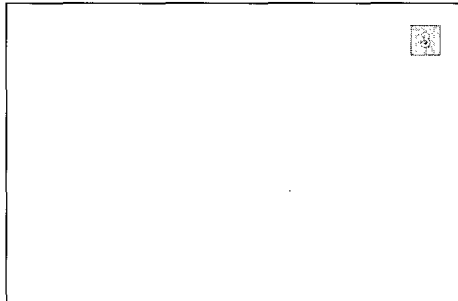
Le natron, exploité dans les mares du Kanem, constitue une ressource importante pour les habitants de la Préfecture du Lac au Tchad. Il est transporté traditionnellement par les caravanes de dromadaires...

Cliché Christian LÉVEQUE, 1968.



... sous forme de plaques dont le poids et les dimensions sont adaptées au bât des animaux, ou sous forme de pierres de moindre taille.

Cliché Christian LÉVEQUE, 1968.



Une partie de la production est acheminée ainsi jusqu'au lac, pour être ensuite transportée par bateau vers N'Djamena ou le Nigeria. Avec la sécheresse, la baisse de la nappe phréatique a fortement diminué les possibilités d'extraction.

Cliché Christian LÉVEQUE, 1968.

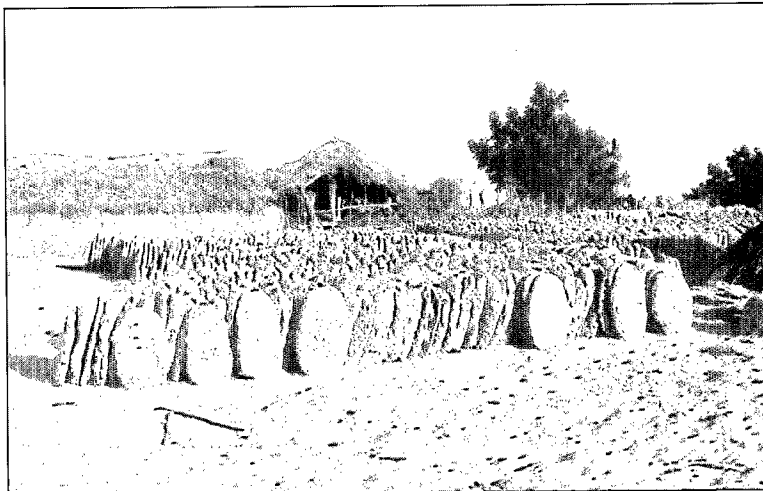
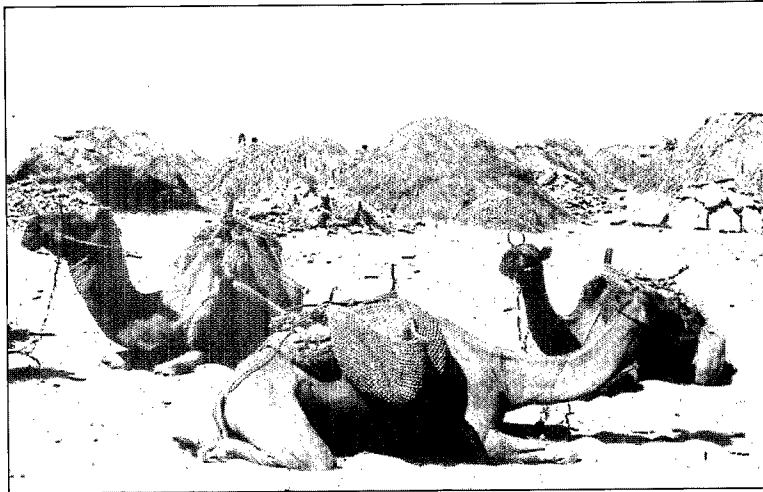
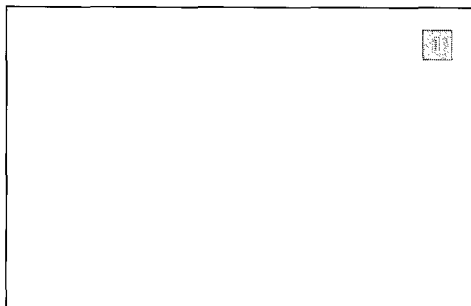
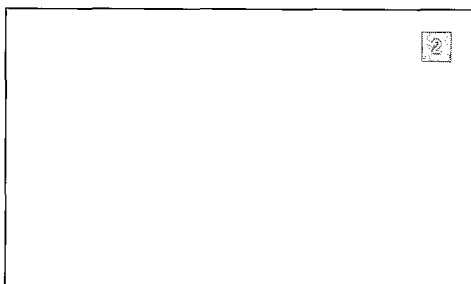


Planche IV



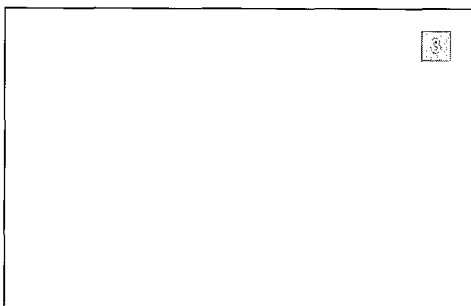
La rive sud du lac Tchad
vue du rocher d'Hadjer el Hamis
en période de moyen Tchad.

Cliché Christian LÉVEQUE, 1967.



Plus à l'ouest, le delta du Chari
déploie ses multiples ramifications.

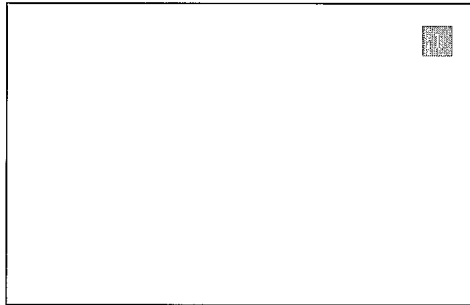
Cliché J. LEMOALLE, 1975.



Dans la même région,
les hauts fonds sont colonisés
par une végétation dense,
où domine ici *Phragmites australis*,
et forment les îlots-bancs.

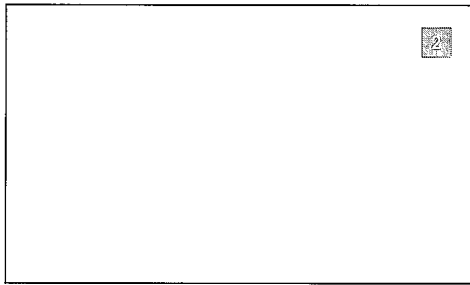
Cliché A. ILTIS, 1970.





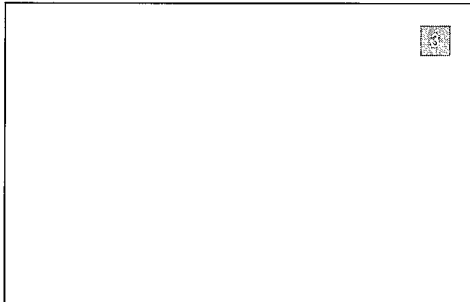
L'archipel de la région de Bol
en période de moyen Tchad :
de vastes plans d'eau séparent
des îles où la végétation des rives
reste modérée.

Cliché A. ILTIS, 1970.



La ville de Bol préfecture,
située entre un bras du lac en eau
et un autre bras transformé en polder
(en bas à droite de l'image).

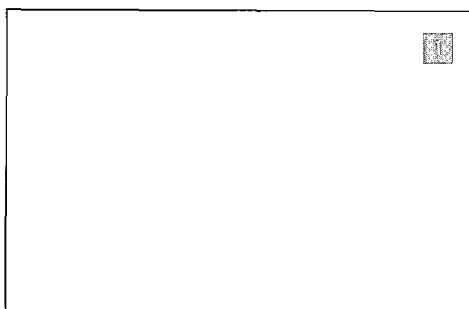
Cliché CADOU, 1971.



Sur les berges, le natron attend
d'être embarqué.

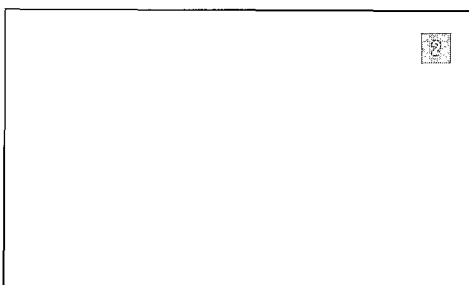
Cliché Christian LÉVEQUE, 1966.





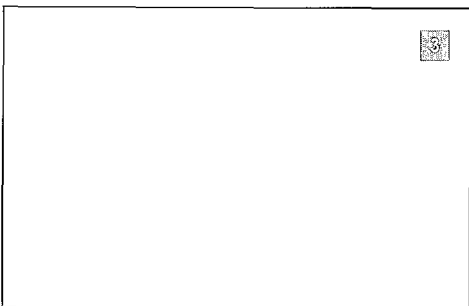
Des campements
plus ou moins provisoires...

Cliché Christian LÉVÊQUE, 1970.



... abritent les pasteurs
qui se déplacent d'île en île
en fonction des pâturages disponibles.

Cliché Christian LÉVÊQUE, 1970.

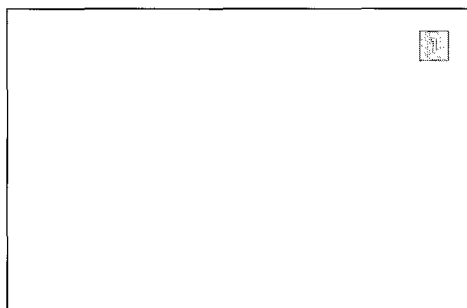


Les bœufs sont utilisés
pour transporter le matériel,
comme ici sur les berges du Chari.

Cliché Christian LÉVÊQUE, 1970.

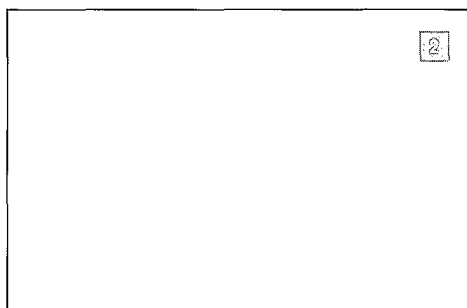


Planche VII



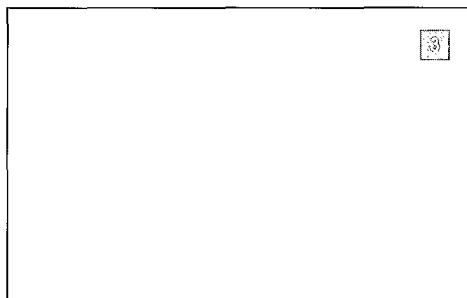
Embarcation employée traditionnellement pour la pêche ou le transport, la kadeï a pratiquement disparu. La kadeï est constituée de tiges (ici de papyrus) assemblées en faisceaux selon une technique que l'on retrouve en de nombreuses régions marécageuses du monde...

Cliché Christian LÉVÉQUE, 1970.



... dont le lac Titicaca (Bolivie-Pérou), le Chatt el Arab (Irak) ou la côte maritime du Pérou. Les pêcheurs utilisent maintenant des pirogues en planches, parfois motorisées.

Cliché Christian LÉVÉQUE, 1970.



Dans des campements saisonniers, les hommes capturent le poisson que les femmes font sécher et fumer sur un feu d'herbes aquatiques.

Cliché Christian LÉVÉQUE, 1970.



Planche VIII

Climatologie du lac Tchad

Deuxième Partie

Mécanismes du climat et données climatologiques

Chapitre 4

Le climat constitue un facteur dominant de la mise en place des paysages d'une région, que ce soit dans le court terme au plan phytogéographique, ou au long terme dans l'altération des roches et la pédogenèse. Il conditionne les régimes hydrologiques.

De grandes fluctuations climatiques entraînent des modifications fondamentales du milieu et des écosystèmes ; c'est ce qui a été relevé dans l'approche paléoclimatique proposée dans un chapitre précédent.

Des fluctuations plus modestes ont aussi des conséquences importantes surtout dans des zones sensibles comme celle du lac Tchad, ce sont celles que nous observons aujourd'hui.

La simple lecture de données météorologiques ou même de données sur les précipitations ne suffit généralement pas à identifier ce qui ressort d'un simple aléa statistique ou d'une évolution climatique déterminée... Il faut aller plus loin, s'intéresser aux processus, aux mécanismes du climat... prendre un peu de hauteur par rapport au lac Tchad et le replacer dans le contexte de la météorologie tropicale et des grands traits de la circulation atmosphérique.

1. LES MECANISMES DU CLIMAT

Nous empruntons à G. Mahé (1993) l'essentiel des analyses proposées ici ; celles-ci constituent une synthèse des nombreux travaux réalisés par les climatologues tropicalistes et ont le mérite de faire le point sur l'évolution chronologique des travaux les plus récents. Au-delà des concepts généraux sur les mécanismes du climat, nous avons surtout pris en compte les éléments qui concourent à une meilleure compréhension des échanges continent-atmosphère dans la région du lac Tchad.

1.1. La Circulation atmosphérique

1.1.1. Les schémas de circulation générale

Dhonneur (1985) a retracé les grandes étapes historiques de l'évolution conceptuelle de la circulation générale.

Dans le premier schéma proposé par Hadley en 1735 (fig. 4.1), apparaît pour la première fois le concept de circulation atmosphérique globale. Hadley propose une circulation cellulaire depuis l'équateur vers les pôles en altitude, et des pôles vers l'équateur au sol par l'intermédiaire de vents d'est (les alizés). Cette cellule est le véhicule du transfert de chaleur entre les régions intertropicales surchauffées et les hautes latitudes plus froides. En 1930, Rossby fait apparaître la notion de centres de hautes et basses pressions permanentes (fig. 4.2). Rossby distingue les basses pressions équatoriales, celles centrées vers 50° - 60°N, et les hautes pressions tropicales. La présence de ces centres de pression permanents divise la cellule de Hadley globale en plusieurs cellules plus petites.

La terre est entourée d'une atmosphère plus épaisse à l'équateur (chaud) qu'aux pôles (froids), qui n'a pas la même densité sous toutes les latitudes, et à l'intérieur de laquelle existent des mouvements cellulaires méridiens. A la

convergence ascendante de deux cellules, on trouve des basses pressions (Equateur) ; à la convergence descendante de deux cellules, on trouve des hautes pressions (Açores, Sainte-Hélène).

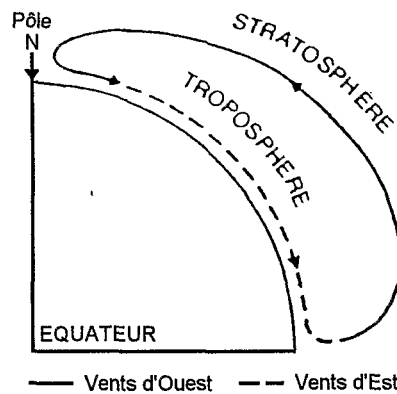


Figure 4.1

Schéma de la circulation de Hadley d'après Dhonneur (1985). La déviation des vents au sol vers l'ouest dans le sens pôles-équateur, due à la force de Coriolis, apparaît pour la première fois, ainsi que la notion de circulation générale en 1735.

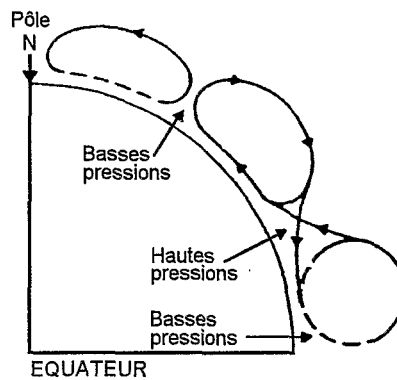


Figure 4.2

Schéma de circulation de Rossby (1930), d'après Dhonneur(1985). La cellule de circulation de Hadley est découpée par des zones d'ascendances et de subsidences donnant naissance à des zones de hautes et de basses pressions.

Circulation méridienne et cellules de Hadley

Le moteur de cette circulation est la convection équatoriale. La circulation méridienne s'effectue selon la direction pôles-équateur. Les cellules de circulation méridienne nord et sud centrées sur l'équateur ont pris le nom de Hadley, leur inventeur. L'air chauffé à l'équateur se répand en altitude vers les pôles ; il perd de sa chaleur, devient dense et descend vers les latitudes 30° d'où, retournant vers l'équateur, il se recharge en humidité en passant au-dessus des océans. A l'équateur, l'air ascendant est remplacé en surface par de l'air plus froid et humide venant des moyennes et hautes latitudes. Du fait de la rotation de la terre, les masses d'air se déplaçant vers l'équateur sont déviées vers l'ouest par la force de Coriolis et prennent le nom d'alizés. Le flux de mousson atlantique est donc la branche basse de la cellule de Hadley sud, bien développée en été boréal quand l'anticyclone

de Sainte-Hélène est le plus puissant. L'équateur météorologique étant situé en général au nord de l'équateur géographique, le flux d'alizés de sud-est est dévié une seconde fois, du fait du changement de signe de la force de Coriolis, et prend la direction du nord-est.

Sous les tropiques, cette cellule est le véhicule privilégié des transferts moyens d'énergie. On retrouve ces cellules dans le schéma de Palmen (1951) qui introduit en outre le concept de circulation zonale.

Circulation zonale, courants-jet et cellules de Walker

Les mouvements atmosphériques cellulaires suivant la direction est-ouest, autrement dit la circulation zonale, n'apparaissent que tardivement dans les schémas conceptuels. Le schéma de Palmen (fig. 4.3) est toujours d'actualité. Il met en valeur les échanges horizontaux à grande échelle et fait apparaître de forts vents d'ouest : les courants-jets (ou jets).

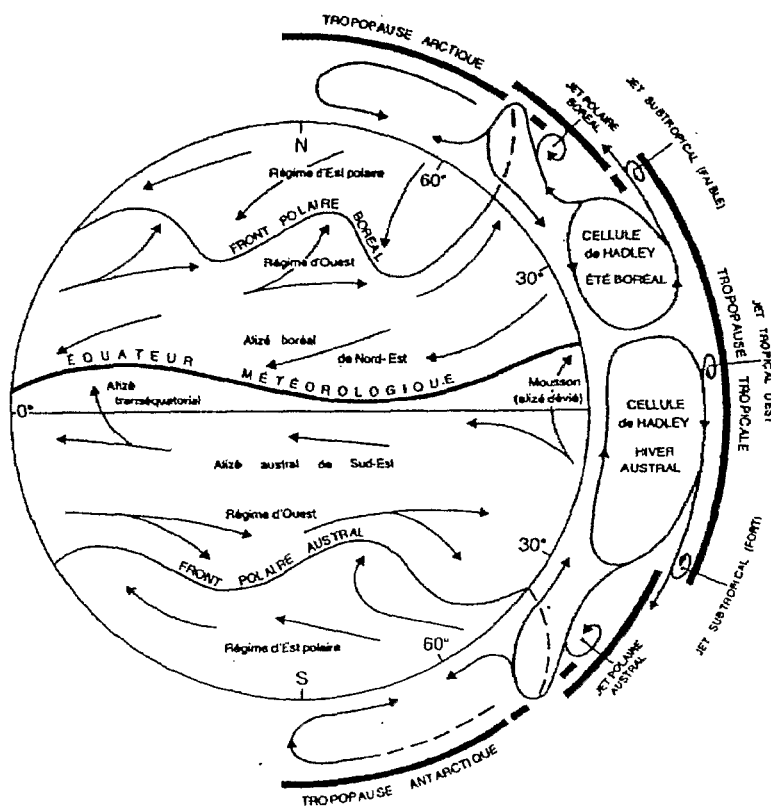


Figure 4.3

Schéma de circulation générale de Palmen (1950), d'après Dhonneur (1985). C'est le modèle de base actuel. Les courants jets de moyenne et haute altitude y apparaissent, ainsi que les régimes de vents d'ouest des moyennes latitudes.

En Afrique, ils soufflent entre 30°N et 30°S. Au dessus du flux de mousson on les trouve entre 5 000 et 12 000 mètres d'altitude. D'après Cadet (1988), "dans les régions tropicales, les circulations zonales (est-ouest) jouent un rôle au moins aussi important que la circulation méridienne (et le transport méridien) liée à la cellule de Hadley".

Dans la ceinture intertropicale, on a pu mettre en évidence l'existence de cellules de circulation zonale, dont les branches en altitude seraient constituées par les jets, et dont une particularité est que les branches ascendantes et descendantes se situent souvent sur les continents, au niveau de la Zone Inter Tropicale de Convergence (ZITC). Ces cellules ont reçu le nom de cellules de Walker.

La ZITC est donc l'élément central de la circulation atmosphérique intertropicale.

La zone intertropicale de convergence (ZITC)

Celle-ci constitue la branche ascendante de la cellule de Hadley. C'est également un autre nom de l'équateur météorologique (EM). Elle correspond au contact dynamique des circulations atmosphériques des deux hémisphères. Elle est repérée par un alignement de nuages convectifs à fort développement vertical (cumulonimbus). Sa structure et sa position varient beaucoup d'un jour à l'autre, aussi bien au-dessus des continents que des océans (Diagne *et al.*, 1984). Elle reste pratiquement constamment dans l'hémisphère nord, quelle que soit la saison, du fait du déséquilibre de la répartition des terres émergées entre les deux hémisphères. La bande nuageuse équatoriale qui permet de la repérer est bien visible sur les images satellitaires (NOAA, GOES, METEOSAT), et a été abondamment décrite sur tous les océans (Grüber, 1972 ; Hobbs, 1974 ; Semenov, 1977 ; Citeau *et al.*, 1988a, 1989).

Le mouvement zénithal du soleil commande la migration de la trace au sol de l'EM au-dessus de l'Afrique de l'ouest, l'EM présente une structure en front, de pente très inclinée, s'abaissant de l'équateur vers le nord, appelée également Front Inter Tropical (FIT). La migration de l'EM varie en fonction des facteurs locaux qui permettent ou non la migration N-S au sol des basses pressions intertropicales. En Afrique intertropicale, trois secteurs peuvent être définis (cf. fig. 4.4 et 4.5) :

- 35° de latitude de migration sur l'Afrique orientale (l'axe de la migration des basses pressions intertropicales est représenté par les chaînes liées au rift est - africain).
- 15° de latitude de migration sur l'Afrique occidentale, au-dessus de laquelle l'EM migre avec le soleil lors de son passage zénithal dans l'hémisphère nord, mais reste bloqué au sud à la limite nord de la forêt sempervirente lorsqu'il devrait passer dans l'hémisphère sud.
- Sur l'Afrique centrale, entre 10° et 30° est, la forêt sempervirente de la cuvette congolaise fait obstacle à la migration vers le sud des basses pressions intertropicales. Celles-ci ne peuvent s'établir que sur les hauteurs des rebords nord-est et sud de la cuvette.

En juillet-août, l'EM occupe sa position la plus septentrionale (fig. 4.5), de même la C.I.O. (Confluence Inter Océanique), autrement dit la discontinuité d'alizés et de mousson entre les flux atlantiques et indiens, avance sur les bordures de la cuvette congolaise (moindres pluies dans le Congo occidental). En janvier-février, l'EM a migré vers le sud contournant la cuvette congolaise (moindres pluies dans le Congo oriental).

1.1.2. Le facteur thermique

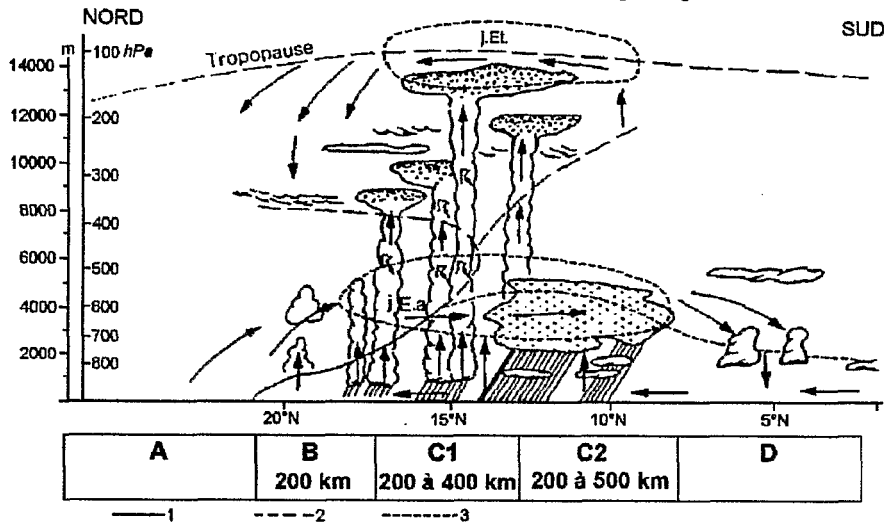
L'origine des mouvements atmosphériques à l'intérieur de la pellicule d'atmosphère terrestre se trouve donc dans l'inégalité de répartition du rayonnement solaire entre les pôles et l'équateur.

Le bilan radiatif de l'ensemble terre-atmosphère, c'est à dire la différence entre l'énergie reçue par la terre et l'énergie rayonnée vers l'espace, est positif entre 35°N et 35°S, et négatif au-delà. Suivant l'hypothèse d'un système en équilibre interviennent alors des transferts d'énergie de la surface vers l'atmosphère, et des zones tropicales excédentaires vers les moyennes et hautes latitudes déficitaires. Ces transferts engendrent la formation de centres

d'action d'origine thermique dont les hautes pressions polaires et les basses pressions équatoriales, et sont à l'origine des vents.

La circulation dépend donc dans la troposphère de l'organisation du champ de pression, elle-même commandée par le facteur thermique. Du fait principalement que la chaleur spécifique de l'eau est plus élevée que celle du sol, pour une radiation de même intensité, la température de l'eau monte plus lentement que la température du sol. Ainsi le déphasage de la réponse du substratum à l'action des radiations solaires n'est que d'un mois environ sur les continents contre deux en mer. De plus la végétation atténue l'échauffement donc augmente le déphasage. L'altitude produit l'effet inverse.

L'opposition de l'influence océanique et de l'influence continentale détermine dans le temps et dans l'espace la disposition du champ des températures, qui commande en partie le champ des pressions.



Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine. 1. Front Inter-tropical (FIT). 2. Limite inférieure de l'air équatorial d'altitude. 3. Limite supérieure de la mousson J.E.a., Jet d'Est Africain (JEA). J.E.T., Jet d'Est Tropical (JET). Les principales zones de temps : A, zone sans pluie. B, zone avec des orages isolés. C1, zone où dominent les lignes de grains. C2, zone où dominent les « pluies de mousson ». D, zones avec des pluies réduites. Les flèches schématisent les flux et en particulier les mouvements de convection ou de subsidence de masses d'air (d'après Detwiller, 1965 ; Flohn, 1965).

1.2. Éléments de météorologie

1.2.1. Les centres de pressions

C'est Rossby qui a mis le premier en évidence les basses pressions vers 60°N et les hautes pressions tropicales, dont l'anticyclone de Sainte-Hélène (fig. 4.2 et 4.5).

L'anticyclone de Sainte-Hélène domine l'ensemble du golfe de Guinée : 1025 hPa en hiver austral contre 1019 hPa en été. Il est centré en moyenne sur 28°S- 10°W. De même, on distingue au nord les anticyclones des Açores et de Libye.

La tendance anticyclonique s'étend aux surfaces continentales couvertes par la forêt sempervirente. La cuvette congolaise peut être considérée comme une "mer continentale", prolongation du golfe de Guinée et de l'influence océanique à l'intérieur du continent.

L'influence océanique est particulièrement marquée dans l'hémisphère sud où l'importance relative des continents est moindre. Dans l'hémisphère nord, l'importance des continents est prépondérante, le facteur thermique y joue un rôle considérable.

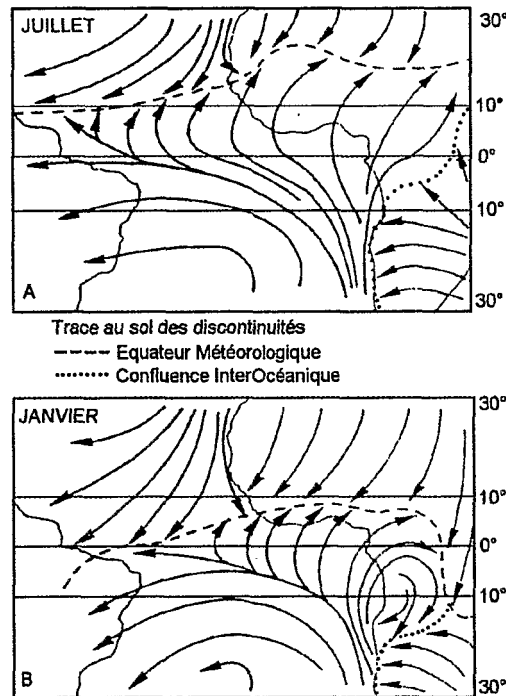


Figure 4.5

Les vents en surface sur l'Afrique et l'Atlantique intertropical en janvier et juillet. Le trait tiré marque la trace au sol de l'équateur météorologique (EM), les pointillés celle de la confluence inter océanique (C.I.O.). (Leroux, 1980).

Les grandes tendances anticycloniques sont plus ou moins contrariées ou renforcées localement, et c'est dans l'hémisphère nord que le champ des hautes pressions tropicales est le plus perturbé par les dépressions thermiques d'été, conduisant à un découpage de ce champ en plusieurs unités de circulation.

1.2.2. Les vents

Au-dessus de la zone étudiée les vents proviennent soit de l'Atlantique sud (anticyclone de Sainte-Hélène), soit de l'anticyclone égypto-libyen (fig. 4.6.).

La disposition de l'EM et des couches de la troposphère est différente au-dessus des continents et des océans. Dans la troposphère on peut distinguer trois couches différentes par la nature des vents rencontrés : une couche basse (flux de mousson), moyenne (Jet d'Est Africain, JEA) et haute (Jet d'Est Tropical, JET).

Dans les basses couches, la circulation est déterminée par l'agencement des cellules de pression, elles-mêmes liées aux facteurs thermiques locaux, c'est le domaine du flux de mousson, de 0 à 2 500 m environ.

Dans la haute troposphère, au niveau de l'EM, de grandes quantités de chaleur latente sont libérées par la condensation de la vapeur d'eau portée en latitude dans les formations nuageuses au niveau de la ZITC. L'énergie libérée varie suivant les variations d'activité de l'EM, et entraîne l'établissement de gradients zonaux de température, qui sont à l'origine d'accélération dans les vents d'est des couches hautes, vents dont le moteur principal est la rotation de la terre.

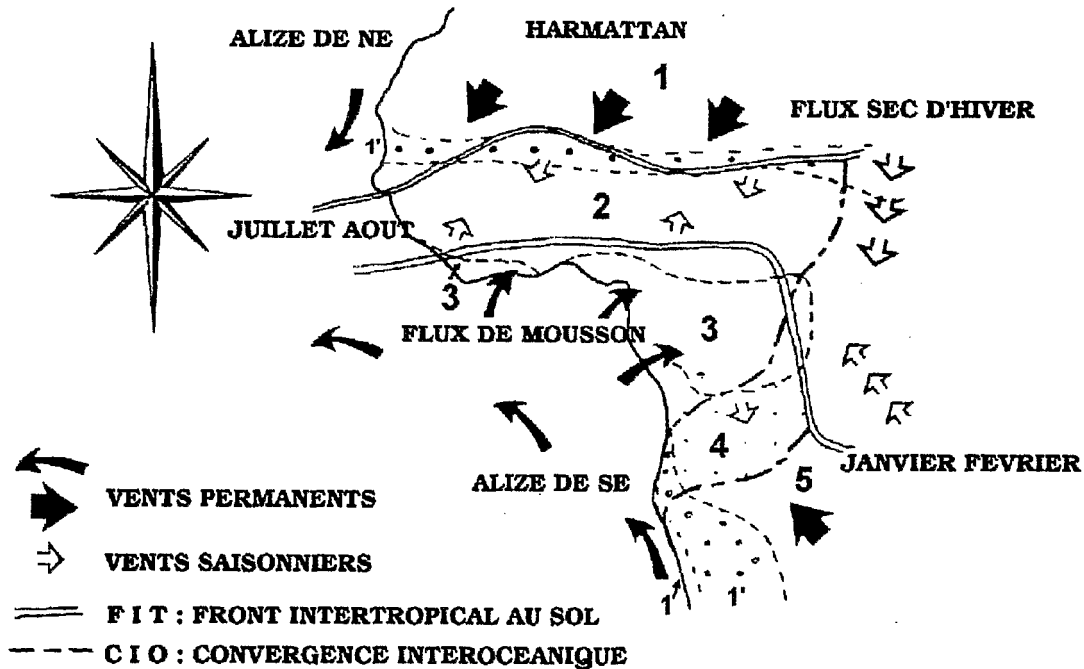


Figure 4.6

Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août. Les grandes zonation végétale sont repérées par des numéros : 1: déserts, 1': steppes et brousses à épineux, 2, 4 et 5: savanes herbacées à arborées, 3: forêt dense, (Mahé, 1993).

Enfin, au sud et au nord de l'EM, entre 500 et 700 hPa (3 000 à 6 000 mètres), on peut individualiser en Afrique de l'ouest des accélérations dans le flux d'est des couches moyennes. Ce flux accéléré prend le nom de Jet d'Est Africain.

Au nord de l'EM, sur l'Afrique occidentale et centrale, le JEA est repéré en janvier vers 5°N (8,5 m.s⁻¹) et migre jusqu'à 15-17°N, donc au-dessus du lac Tchad, en juillet-août avec l'EM (12 m.s⁻¹).

Le cisaillement entre ces jets d'est des couches moyennes et les flux humides de basses couches qu'ils surmontent explique la faible efficacité pluviogénétique du FIT au-dessus de l'Afrique de l'ouest, car cette situation réduit les possibilités de mouvements ascendants des nuages, à l'origine des pluies dans ces régions. L'humidité est forte dans la couche d'air au contact de l'océan ; elle est transportée par les alizés vers l'équateur. L'air sus-jacent sec et plus lourd confine l'air humide dans une mince couche atmosphérique près de la surface. La discontinuité entre l'air humide et l'air sec, correspondant souvent à un changement de direction des vents dominants, est appelée

l'inversion d'alizés. Le poids de l'air sec diminue vers l'équateur, ce qui permet à la couche humide de se développer en épaisseur.

Ce couvercle d'air subsident interdit la condensation de cette vapeur d'eau qui se concentre sous l'inversion, et est transportée en direction de l'équateur. Cette eau ne pourra être précipitée que si elle réussit à s'élever. Ce qui se produit régulièrement dans deux cas : au niveau de l'EM quand la subsidence s'atténue d'elle-même, et quand le relief force l'ascendance du flux (mont Cameroun par exemple). Mais le même effet peut découler aussi de la venue de perturbations se propageant d'est en ouest dans les flux d'alizés (au-dessus de l'Afrique de l'ouest on les appelle des ondes d'est) qui forcent l'ascendance de la basse couche humide, entraînant des formations nuageuses dispensatrices de pluies : les cumulo-nimbus.

Dans les basses couches, la tendance anticyclonique permanente qui règne sur l'Atlantique sud et la présence de zones dépressionnaires sur le continent, orientent les déplacements de l'air de l'océan vers le continent, sur l'ensemble du golfe de Guinée. L'alizé du S-E est attiré par les dépressions continentales et devient ce qu'on appelle le flux de mousson. Ces déplacements s'organisent autour du centre inducteur des hautes pressions tropicales de Sainte-Hélène.

Au nord de l'EM, l'anticyclone égypto-libyen distribue un flux d'alizé continental sec et chaud de secteur NE et E connu sous le nom d'harmattan. Durant les deux dernières décennies ce flux continental a atteint très souvent la côte nord du golfe de Guinée, événement exceptionnel avant 1970.

L'essentiel de l'humidité apportée sur l'Afrique occidentale et centrale dans les basses couches provient de l'hémisphère sud. Avant d'atteindre le continent, ce flux transite par le golfe de Guinée, lieu potentiel de transformations.

1.2.3. Les perturbations tropicales et les facteurs inhibiteurs de pluies

Une des causes de ces perturbations est la pénétration d'air polaire aux latitudes tropicales, en direction de l'EM. Une autre est la propagation d'ondes d'est, qui prennent naissance à la faveur de discontinuités dynamiques entre différentes composantes atmosphériques tels les jets. Leur influence sur les précipitations comme facteur de pluviogenèse est non négligeable, mais sur l'Afrique de l'Ouest seulement, car elles sont à peine décelables à 25°E.

Au-dessus de l'Afrique occidentale et centrale, ces perturbations se manifestent différemment selon la hauteur à laquelle elles rencontrent le flux de mousson, et l'épaisseur de ce flux.

Dans les basses couches, on dit que l'air polaire est "injecté" sous le flux tropical, provoquant des mouvements ascendants. Sur l'Afrique septentrionale, en hiver, l'air froid soulève l'alizé continental, donnant des vents de sable. En été, il peut atteindre le flux de mousson. Au contact des deux masses d'air se produisent de violentes turbulences pouvant conduire à des précipitations quand l'épaisseur de la mousson augmente.

En altitude, des langues d'air froid s'avancent fréquemment jusqu'au voisinage de l'équateur (invasion polaire). En hiver boréal, elles peuvent soulever l'air tropical chaud et humide, entraînant au-dessus de 3 000 m (dans les couches moyennes et supérieures) la formation de masses nuageuses génératrices de pluies, les "pluies des mangues", pluies insolites pour cette saison en principe sèche.

Les événements pluvieux les plus importants en dehors des pluies de mousson sont les lignes de grains. Ce sont des intrusions du flux d'est dans le flux de mousson, soulevant l'air humide en un front mobile le long duquel se produisent orages et averses. L'air humide porté en altitude et contournant le noyau de vents forts donne à ces lignes de grains une forme arquée caractéristique.

Les lignes de grains peuvent prendre naissance partout où le flux atlantique rencontre une impulsion de direction opposée, donc en particulier le long de la trace au sol de l'EM.

La structure centrale de l'EM impose aux régions qu'elle balaye un maximum dans les précipitations qui correspond à son passage à la verticale du lieu.

L'importance climatique des lignes de grains tient au fait que ce sont pratiquement les seuls événements utilisateurs de l'humidité du flux de mousson au nord de la position la plus septentrionale de la ZITC, le long du FIT

Plusieurs structures atmosphériques agissent de façon inhibitrice sur les précipitations, par l'intermédiaire de mécanismes de trois types :

- stabilisation de l'air inférieur, au contact d'un substrat refroidi,
- cisaillement par air sec de couche moyenne,
- subsidence de l'air supérieur.

Les facteurs inhibiteurs, combinaisons de tout ou partie de ces mécanismes, bloquent les ascendances d'air humide à différents niveaux et ainsi enravent la formation de nuages pluvio-gènes.

La structure en front incliné de l'EM au-dessus de l'Afrique de l'ouest est le fruit de la subsidence de l'air supérieur, et du cisaillement du flux de mousson par les jets d'est de moyenne et haute altitude. La subsidence est imposée par le centre de hautes pressions égypto-libyen, qui est à l'origine de l'harmattan, vent sec et chaud des couches moyennes qui souffle au-dessus du FIT et du flux de mousson. Plus en altitude, les jets d'est ont une action de cisaillement intensif sur la convection.

1.3. Conclusion

La circulation atmosphérique tropicale a une apparence simple : convergence des alizés vers la ZITC, convection le long de l'équateur météorologique, reprise de l'air en altitude au-dessus de l'EM vers les hautes pressions tropicales par l'intermédiaire des cellules de Hadley. Mais elle est en réalité tout aussi complexe que celle des régions tempérées.

La zone (1), désertique (fig. 4.6), ne connaît jamais le flux de mousson et la végétation y est rare ou absente. Entre cette zone et les savanes tropicales se développent des steppes et brousses à épineux.

La zone (2) est pendant l'été boréal sous l'influence du flux de mousson, mais se trouve rarement sous la structure centrale de l'EM, où la mousson est la plus épaisse. Dans cette zone les principaux utilisateurs de l'humidité sont les lignes de grains. La végétation y est de type savane, plus ou moins fournie.

La zone (3) est balayée au moins une fois par an par le centre de l'EM et est donc la plus arrosée. Elle est pratiquement toute l'année sous le régime des alizés de l'Atlantique sud. C'est dans ce domaine que l'on trouve la forêt sempervirente.

La trace au sol de l'équateur météorologique remonte loin vers le nord dans le Sahara, mais le flux de mousson est cisailé par les vents d'est qui empêchent les masses d'air humides sous-jacentes de se développer verticalement et d'engendrer des pluies.

Autour du golfe de Guinée les conditions climatiques sont commandées principalement par les variations d'activité du flux de mousson. Vers le nord, l'est et le sud, le flux de mousson rencontre des masses d'air plus ou moins sèches. Les zones de contact sont alors soumises à des conditions climatiques particulières où l'influence d'éléments extratropicaux peut avoir une grande importance.

2. DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Le bassin tchadien est actuellement soumis en grande partie à un régime aride et subaride. Les régions riveraines du lac reçoivent, en année moyenne, des précipitations comprises entre 550 et 200 mm. Selon la classification des hydrologues (J. Rodier, 1963), leur climat est donc de type sahélien et confine vers le nord au type subdésertique.

Les caractéristiques saisonnières de ces climats sont liées aux déplacements du front intertropical (FIT).

De novembre à mars, le FIT est situé très loin au sud du lac : l'harmattan règne et la saison sèche est absolue. A partir d'avril, le FIT commence à remonter nettement vers le nord avec des reculs temporaires. De petites précipitations apparaissent en mai et juin. Le FIT atteint sa position la plus septentrionale, vers le 20^e parallèle, en juillet et août. Les trois quarts environ des précipitations annuelles tombent pendant ces deux mois. Les précipitations sont encore notables en septembre, mais le FIT rétrograde rapidement vers le sud. La saison sèche s'installe à la fin de ce mois ou au début d'octobre.

2.1. Les vents

Le régime des vents est en grande partie lié aux déplacements du FIT et, à un degré moindre, aux phénomènes thermiques créés par le microclimat du lac lui-même.

En saison sèche, l'harmattan souffle d'une façon générale du nord-est, tandis qu'en saison des pluies, la mousson vient du sud-ouest. A ces deux vents principaux, qui alternent au gré des déplacements du FIT, se superposent des vents locaux secondaires :

- brise venant du lac provoquée dans la journée par des ascendances thermiques sur les régions riveraines lorsque la température y est plus forte que sur le lac ;
- brise venant des terres provoquée la nuit par un phénomène inverse lorsque la température superficielle du lac est sensiblement plus élevée que celle des régions avoisinantes.

Les tableaux 4.1 à 4.4 relatifs à la direction et à la vitesse du vent à Bol et à N'Guigmi montrent les effets combinés des vents principaux et secondaires (fig. 4.7 et 4.8).

On remarque tout d'abord que les vents sont nettement plus forts le jour que la nuit, ce qui est un fait bien connu lié aux variations de la turbulence atmosphérique, laquelle favorise les transferts d'énergie des couches hautes vers les couches basses de l'atmosphère.

Sur la dune de Bol, les vents sont en général un peu plus élevés le matin entre 6 h et 12 h que l'après-midi entre 12 h et 18 h. De septembre 1962 à avril 1963, les moyennes mensuelles à 1 m du sol ont varié entre 1,5 et 2,5 m.s⁻¹. De février à décembre 1957, les vitesses ont été nettement supérieures (entre 4 et 5,25 m.s⁻¹) parce que mesurées à une dizaine de mètres au-dessus du sol.

A N'Guigmi en 1958, les vitesses du vent à 6 h et 18 h sont restées le plus souvent inférieures à 1 m.s⁻¹ sauf de juin à août. Les vitesses à 12 h ont été généralement comprises entre 2 et 4 m.s⁻¹, sauf en février et mars où elles ont assez souvent atteint 5 à 6 m.s⁻¹. En ce qui concerne le sens du vent, on note à Bol deux directions nettement dominantes qui correspondent à celles de l'harmattan et de la mousson. La plupart du temps entre octobre et avril le vent souffle du nord-est, tandis qu'entre mai et septembre il vient du sud-ouest. L'influence des brises locales n'apparaît pas très nettement parce que leur direction est sensiblement la même que celle des vents dominants.

A N'Guigmi, la direction des vents est moins régulière qu'à Bol, sans doute à cause des brises locales dont la direction à N'Guigmi est à peu près perpendiculaire à celle de l'harmattan ou de la mousson. Il en résulte que d'octobre à avril le vent souffle de directions comprises entre le nord et le sud-est, tandis que de mai à septembre le vent vient de directions comprises entre le sud-est et l'ouest.

Tableau 4.1

Direction du Vent à Bol

Nombre moyen de jours où le vent a soufflé d'une direction donnée entre 1956 et 1962

MOIS	HEURE	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
JANVIER	6	7	17	0	0	0	0	0	7
	12	2	17	4	2	0	1	1	4
	18	4	10	0	0	0	4	7	6
FEVRIER	6	6	17	0	0	0	0	0	5
	12	1	16	3	3	0	0	0	5
	18	3	11	1	0	0	4	3	6
MARS	6	7	18	1	1	0	0	0	4
	12	2	17	2	5	0	2	1	2
	18	4	9	0	1	2	5	5	5
AVRIL	6	4	14	2	2	1	5	1	1
	12	1	8	3	8	0	7	2	1
	18	1	6	0	1	0	10	9	3
MAI	6	1	8	1	3	1	9	3	5
	12	0	3	2	5	2	12	5	2
	18	0	3	0	1	2	15	7	3
JUIN	6	1	0	0	2	3	16	5	3
	12	0	0	0	1	2	19	6	2
	18	0	0	0	3	4	15	5	2
JUILLET	6	0	0	0	3	4	17	6	1
	12	0	0	0	1	2	17	7	4
	18	0	0	0	1	2	18	6	4
AOÛT	6	0	1	1	4	3	15	5	2
	12	0	0	0	2	2	17	7	3
	18	0	1	1	2	2	14	7	4
SEPTEMBRE	6	2	2	0	4	3	13	3	3
	12	0	1	0	3	4	13	5	4
	18	1	2	0	3	3	13	5	3
OCTOBRE	6	4	12	2	2	1	5	2	2
	12	1	11	3	5	1	9	1	0
	18	1	6	1	1	1	13	5	3
NOVEMBRE	6	6	19	2	1	0	0	0	2
	12	3	13	5	6	1	1	0	1
	18	4	10	1	1	1	5	6	2
DECEMBRE	6	6	16	2	0	0	0	0	7
	12	3	16	3	3	0	2	0	3
	18	5	9	0	0	0	7	5	5
ANNEE	%	7,4	26,8	3,6	7,4	4,3	27,6	12,0	10,9

Tableau 4.2

Direction du Vent à N'Guigmi
 Nombre de jours où le vent a soufflé d'une direction donnée en 1958

Mois	Heure	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calme 0 - 1	% Calme
Janvier	6	2	6	1	0	0	0	0	0	22	44
	12	0	10	13	6	0	0	0	0	2	
	18	3	9	0	2	0	0	0	0	17	
Février	6	0	10	0	0	0	0	0	0	18	45
	12	1	6	15	6	0	0	0	0	0	
	18	0	9	1	0	0	0	0	0	20	
Mars	6	0	13	1	0	0	0	0	0	17	48
	12	0	8	20	3	2	0	0	0	2	
	18	1	1	0	1	0	0	0	0	26	
Avril	6	1	6	0	0	0	0	1	1	21	54
	12	0	2	14	5	4	2	3	0	0	
	18	0	1	0	0	0	0	1	0	28	
Mai	6	1	5	1	0	0	1	0	0	23	56
	12	0	0	4	8	13	4	0	0	2	
	18	0	1	0	2	1	0	0	0	27	
Juin	6	0	0	0	0	5	8	7	0	10	32
	12	1	0	0	8	5	4	4	2	5	
	18	0	0	0	4	10	1	1	0	14	
Juillet	6	0	1	0	0	3	19	0	0	8	31
	12	0	0	0	2	5	9	8	1	6	
	18	0	0	0	3	4	9	0	0	15	
Août	6	0	1	0	1	3	9	1	1	15	48
	12	1	0	0	5	8	5	3	0	9	
	18	1	0	0	3	4	2	0	0	21	
Septembre	6	1	0	0	0	0	2	3	0	24	58
	12	0	0	6	7	7	1	1	2	6	
	18	0	0	2	3	2	1	0	0	23	
Octobre	6	1	5	0	0	0	0	0	0	25	63
	12	0	0	12	9	4	0	0	0	6	
	18	0	0	0	2	0	1	0	0	30	
Novembre	6	1	0	0	0	0	0	0	0	29	67
	12	0	1	14	9	2	0	0	0	4	
	18	0	0	0	2	0	0	0	0	29	
Décembre	6	2	1	0	0	0	0	0	0	27	67
	12	2	3	9	5	2	0	0	0	10	
	18	4	0	0	2	0	0	0	0	27	
Fréq.en % de l'ensemble des observations	1958	2,1	8,8	10,4	8,9	7,7	7,2	3	0,82	51,1	

L'harmattan et la mousson tendent à être déviés de l'est par la brise du lac qui se produit en général dans le milieu de la journée, tandis qu'ils sont plutôt déviés de l'ouest par la brise de terre que l'on observe parfois en début et en fin de journée. (On manque de relevés nocturnes qui feraient sans doute apparaître plus nettement ce phénomène).

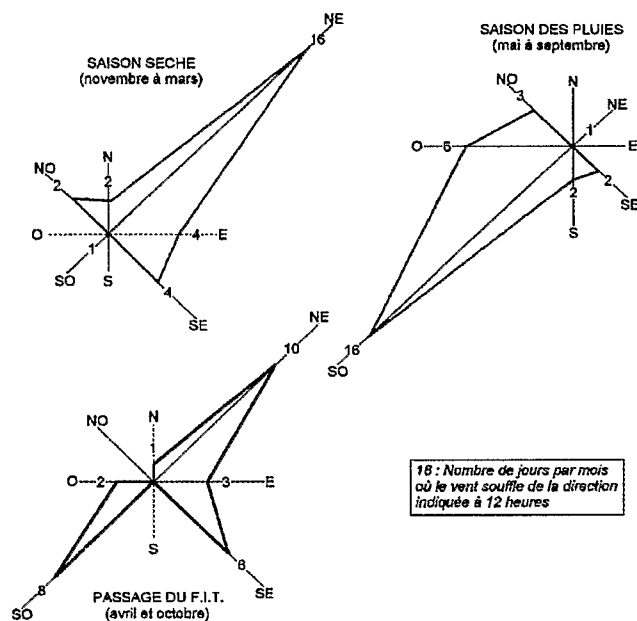


Figure 4.7

Fréquences mensuelles de la direction du vent à la station de Bol.

Tableau 4.3

Vitesse du Vent à Bol-Dune (m.s⁻¹)

ANNEE	MOIS	VITESSE MAXIMALE	VITESSE MOYENNE
1987	Février	13,7	4,81
	Mars	12,9	3,95
	Juillet	8,00	5,05
	Août	10,0	5,26
	Septembre	10,2	4,41
	Octobre	17,0	4,79
	Novembre	9,00	4,35
	Décembre	9,10	4,98

Hauteur de l'anémographe : 10 m environ au dessus du sol, 20 m environ au dessus du lac.

ANNEE	MOIS	de 6H à 12H	de 18H à 18H	de 18H à 6H	Vitesse moyenne
1962	Septembre	2,17	2,23	1,07	1,64
	Octobre	2,36	2,28	1,13	1,73
	novembre	1,85	1,67	1,56	1,66
	Décembre	2,54	2,25	1,38	1,89
1963	Janvier	2,56	2,06	1,20	1,76
	Février	2,82	2,43	1,23	1,82
	Mars	2,36	2,75	1,52	1,15
	Avril	2,26	1,97	0,86	1,49

Hauteur de l'anémographe : 2 m environ au dessus du sol , 10 m au dessus du lac.

Tableau 4.4

Vitesse du vent à N'Guigmi
 Nombre d'observations selon la vitesse (m.s⁻¹)

MOIS	Heure	< 1	2 à 4	5 à 6	7 à 14	15 à 21	> 21
Janvier	6	22	8	1	0	0	0
	12	2	18	9	2	0	0
	18	17	13	1	0	0	0
Février	6	18	7	3	0	0	0
	12	0	12	14	2	0	0
	18	20	4	4	0	0	0
Mars	6	17	13	1	0	0	0
	12	0	18	13	0	0	0
	18	26	5	0	0	0	0
Avril	6	21	7	2	0	0	0
	12	0	23	6	1	0	0
	18	28	1	1	0	0	0
Mai	6	23	7	1	0	0	0
	12	2	25	4	0	0	0
	18	27	3	1	0	0	0
Juin	6	10	18	2	0	0	0
	12	5	21	4	0	0	0
	18	14	15	0	1	0	0
Juillet	6	8	21	1	0	0	0
	12	6	24	1	0	0	0
	18	15	16	0	0	0	0
Août	6	15	15	1	0	0	0
	12	9	22	0	0	0	0
	18	21	10	0	0	0	0
Septembre	6	24	6	0	0	0	0
	12	6	22	1	1	0	0
	18	23	4	2	0	0	0
Octobre	6	25	6	0	0	0	0
	12	6	25	0	0	0	0
	18	30	1	0	0	0	0
Novembre	6	29	1	0	0	0	0
	12	4	25	1	0	0	0
	18	29	1	0	0	0	0
Décembre	6	27	4	0	0	0	0
	12	10	19	2	0	0	0
	18	27	4	0	0	0	0

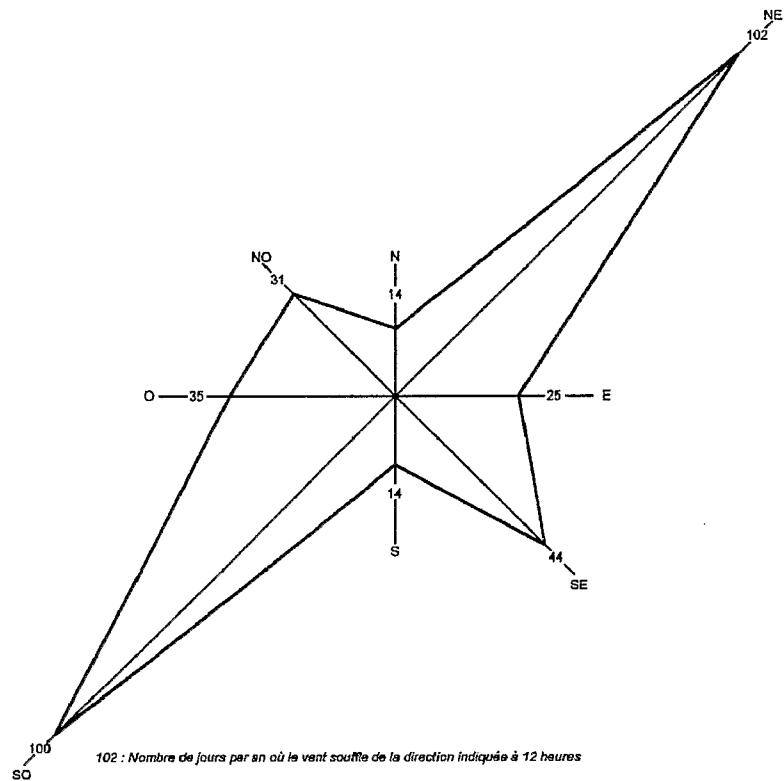


Figure 4.8

Fréquence annuelle de la direction du vent à la station de Bol.

2.2. Température de l'air

Les valeurs caractéristiques étudiées sont les suivantes (tableau 4.5) :

T_x = moyenne mensuelle des températures maximales journalières

T_n = moyenne mensuelle des températures minimales journalières

$(T_x + T_n)/2$ = température moyenne mensuelle

$T_x - T_n$ = écart journalier moyen mensuel.

Période d'observation :

N'Djaména	: 1941-1967 = 27 ans
Bol-Dune	: 1954-1966 = 13 ans
N'Guigmi	: 1928-1965 = 38 ans

La température moyenne interannuelle est de 27,9°C à N'Djaména et à Bol-Dune et de 27,3°C à N'Guigmi. On relève une grande homogénéité pour la région du lac.

Tableau 4.5
Température de l'air (°C)

STATION	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N'DJAMENA (1951-1957)												
T_x	33,2	35,9	38,8	41,0	40,1	36,9	32,8	30,4	32,4	35,9	36,1	33,6
T_n	13,6	15,9	20,3	23,8	25,1	24,0	22,6	21,9	22,3	21,3	17,5	14,3
$(T_x+T_n)/2$	23,4	25,9	29,5	32,4	32,6	30,5	27,7	26,2	27,4	28,4	26,8	23,9
T_x-T_n	19,6	20,0	18,5	17,2	15,0	12,9	10,2	8,5	10,1	14,6	18,6	19,2
BOL-DUNE (1957-1966)												
T_x	31,4	32,6	36,6	38,5	37,6	35,3	33,0	31,0	33,3	36,5	35,0	32,3
T_n	14,0	15,1	19,4	24,2	25,9	26,6	25,3	24,2	24,7	22,6	18,4	14,6
$(T_x+T_n)/2$	27,7	23,8	28,0	31,3	31,8	31,0	29,2	27,6	29,0	29,6	26,7	23,5
T_x-T_n	17,4	17,5	17,2	14,3	11,7	8,7	7,7	6,8	8,6	13,9	16,6	17,7
N'GUIGMI (1965)												
T_x	28,9	31,3	34,8	37,1	38,2	38,2	36,0	33,3	35,2	35,9	33,0	30,1
T_n	13,4	15,0	19,7	22,2	24,3	24,5	24,5	23,3	23,3	20,6	17,6	24,0
$(T_x+T_n)/2$	21,2	23,1	27,4	29,7	31,3	31,4	30,3	28,3	29,2	28,2	25,3	22,0
T_x-T_n	15,5	16,0	15,0	14,9	13,9	13,7	11,5	10,0	11,9	15,3	15,4	16,1

2.2.1. Température moyenne mensuelle

Les variations de la température moyenne mensuelle sont représentées figure 4.9.

La forme des variations est sensiblement la même pour les trois stations, à part un léger décalage du maximum à N'Guigmi (maximum en mai-juin au lieu d'avril-mai).

Le minimum d'août est moins marqué à mesure que l'on se déplace vers la zone saharienne ; par contre, le minimum de janvier est plus creusé. L'abaissement de température hivernal est, d'une façon générale, plus marqué dans les régions sahéliennes qu'en zone tropicale.

2.2.2. Ecart diurne moyen mensuel

Les variations des écarts diurnes mensuels sont représentées figure 4.10.

A Bol-Dune et à N'Djaména, les variations des écarts ont la même forme avec un décalage vers le bas à Bol-Dune dû au lac vraisemblablement. L'écart est minimal au coeur de la saison des pluies (août) et maximal en saison sèche (décembre ou février). A N'Guigmi, les variations sont moins marquées qu'aux deux autres stations mais ont la même allure générale.

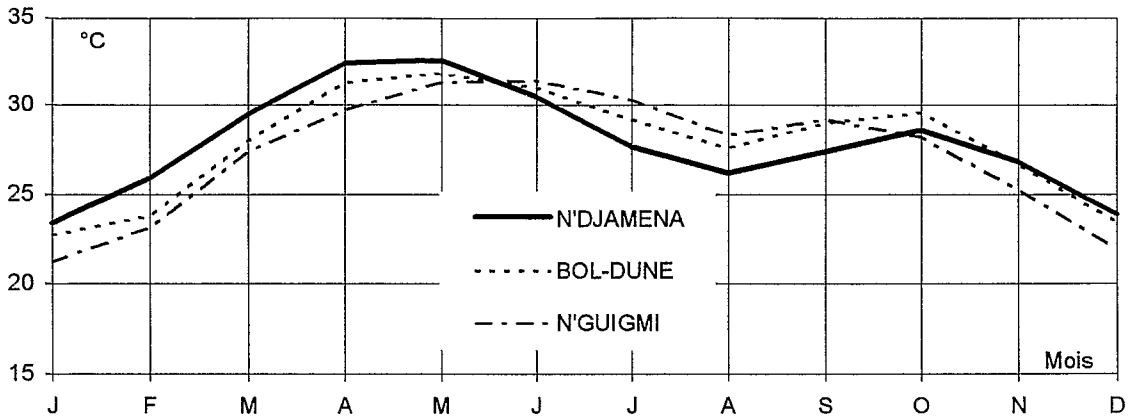


Figure 4.9

Température moyenne mensuelle de l'air.

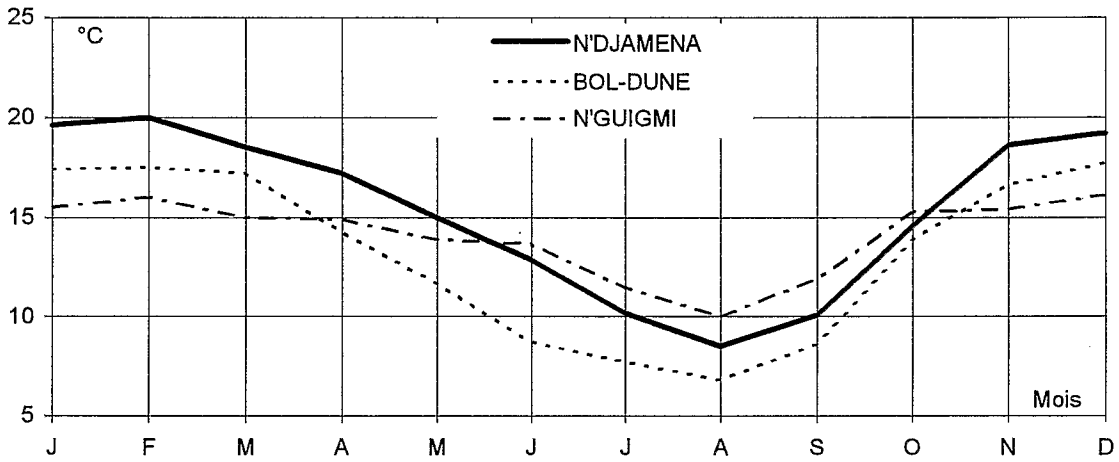


Figure 4.10

Moyennes mensuelles des écarts diurnes de température de l'air.

2.3. Humidité de l'air

L'humidité de l'air s'exprime par le degré hygrométrique ou humidité relative et par la tension de vapeur d'eau.

2.3.1. Humidité relative

Elle est définie par : $u = 100 e/e_w$ avec :

e : tension de vapeur d'eau réelle dans l'air,

e_w : tension de vapeur saturante aux mêmes conditions de température

L'humidité relative moyenne a été calculée pour trois stations :

N'Djaména : période 1951-1967

Bol-Dune : période 1957-1966

N'Guigmi : période 1952-1965

Les données concernent les mesures effectuées à 6 h, 12 h, 18 h. Pour calculer la moyenne journalière, on a affecté du coefficient 2 la donnée 12 heures et du coefficient 3 les données 6 h. et 18 h. Les figures 4.11, 4.12 et 4.13 représentent les variations de l'humidité relative moyenne à 6 h, 12 h, 18 h.

L'humidité relative est maximale pendant la nuit et minimale vers 12 heures.

Pour toutes les stations, le maximum se situe en août et le minimum en février-mars.

En saison sèche à N'Djaména, station située à 100 km au sud du lac, l'humidité relative est plus faible qu'aux autres stations, surtout à 18 h ; pour ces dernières, la proximité du lac est vraisemblablement la cause de cette différence.

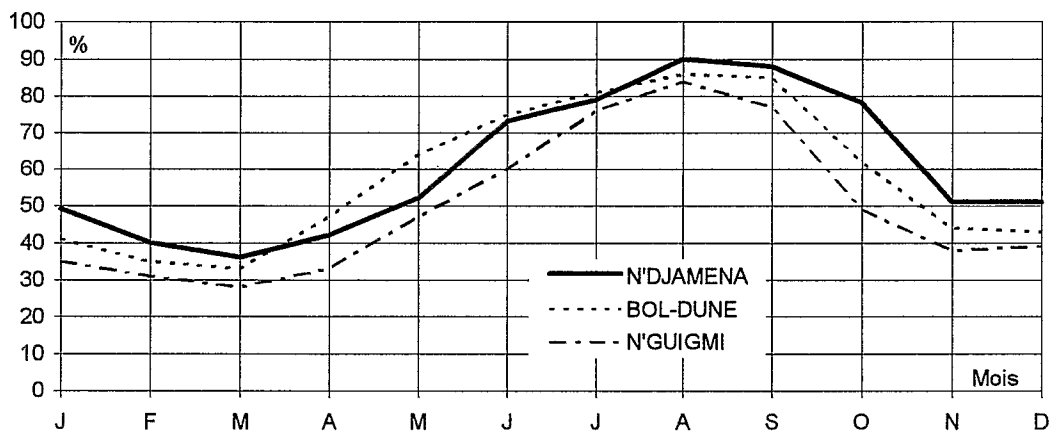


Figure 4.11

Humidité relative à 6 heures.

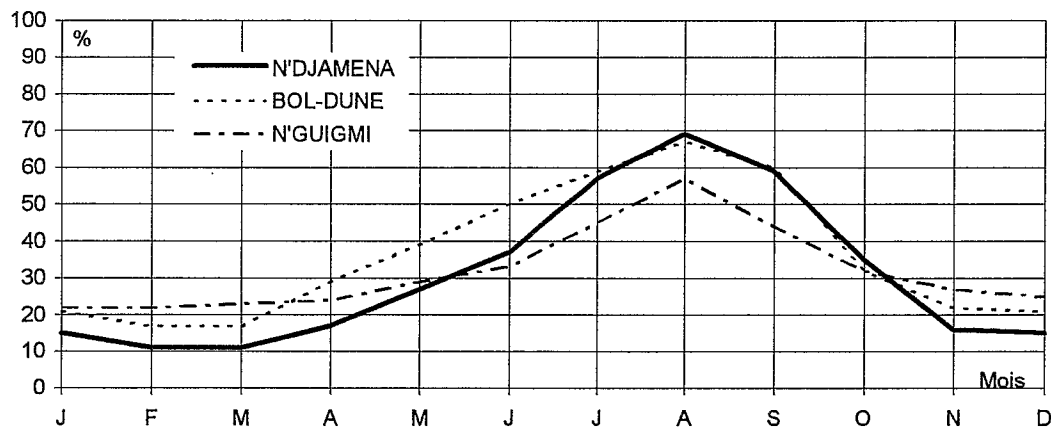


Figure 4.12

Humidité relative à 12 heures.

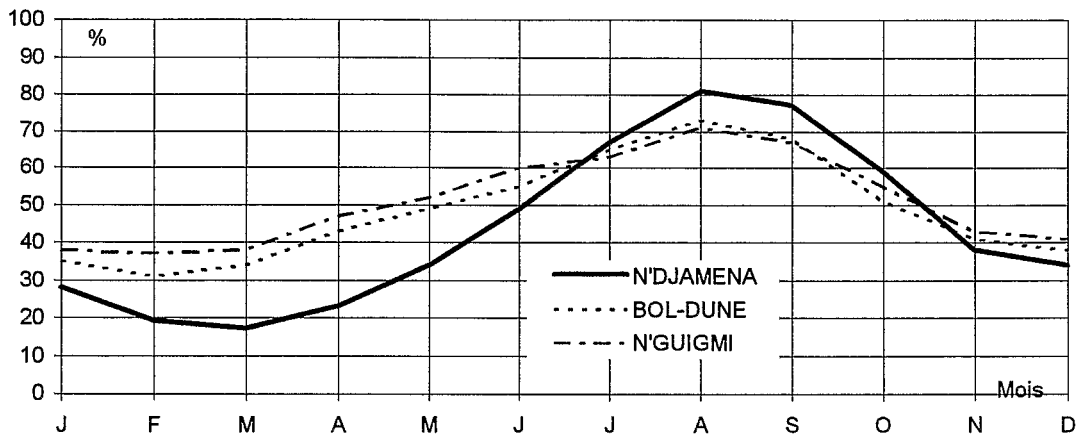


Figure 4.13

Humidité relative à 18 heures.

2.3.2. Tension de vapeur

La figure 4.14 représente les variations de la tension de vapeur moyenne mensuelle.

Les résultats des mesures sont semblables aux trois stations. Toutefois, à Bol-Dune, on remarque que le maximum s'étend pratiquement sur quatre mois, de juin à octobre. Ce fait s'explique par la direction dominante du vent qui est du sud-ouest, par conséquent venant du lac, pendant toute la période considérée.

Le tableau 4.6 résume pour les trois stations de référence les données d'humidité (u) à 6 h, 12 h, 18 h, moyenne journalière et de tension de vapeur (e) en hectopascals (millibars).

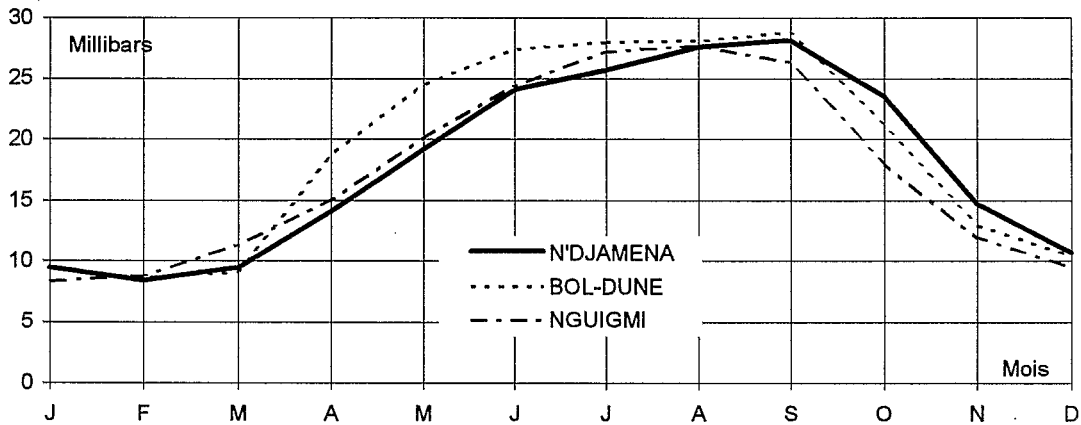


Figure 4.14

Tension de vapeur moyenne mensuelle.

Tableau 4.6

Humidité (u à 6, 12 et 18 heures et moyenne \bar{u} en %) et tension de vapeur e (hectopascals)

STATION		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N'DJAMENA (1951-1967)													
	u6	49	40	36	42	52	73	79	90	88	78	51	51
	u12	15	11	11	17	27	37	57	69	59	35	16	15
	u18	28	19	17	23	34	49	67	81	77	59	38	34
	\bar{u}	33	25	23	29	39	55	69	81	77	60	37	36
	e	9,49	8,35	9,48	14,10	19,18	24,02	25,64	27,54	28,10	23,48	14,72	10,67
BOL-DUNE (1957-1966)													
	u6	41	35	33	47	64	75	81	86	85	62	44	43
	u12	21	17	17	29	39	50	59	67	60	32	22	21
	u18	35	31	34	43	49	55	65	73	68	51	41	38
	\bar{u}	34	29	24	41	52	61	69	76	72	51	37	36
	e	9,37	8,55	9,07	18,73	24,44	27,41	27,97	28,07	28,84	21,15	12,95	10,42
N'GUIGMI (1952-1965)													
	u6	35	31	28	33	47	60	76	84	77	49	38	39
	u12	22	22	23	24	27	33	45	57	44	32	27	25
	u18	38	37	38	47	52	60	63	71	67	55	43	41
	\bar{u}	33	31	31	36	44	53	63	72	65	47	37	36
	e	8,31	8,76	11,32	15,02	20,11	24,36	27,20	27,70	26,34	17,97	11,93	9,51

2.4. Insolation et rayonnement

2.4.1. Insolation

L'insolation est caractérisée par deux valeurs :

- n : nombre d'heures d'insolation par mois, mesuré à l'héliographe CAMPBELL.
- N : nombre d'heures d'insolation théorique par mois. L'insolation théorique journalière est la durée (en heures) qui sépare le lever et le coucher du soleil.
- n/N : insolation relative

Les figures 4.15 et 4.16 représentent les variations de l'insolation moyenne mensuelle n et les variations de l'insolation relative moyenne n/N pour les stations de N'Djaména, N'Guigmi et Bol-Dune, d'après les données qui figurent dans le tableau 4.7 pour les périodes suivantes:

- N'Djaména : 1951-1966
- N'Guigmi : 1957-1965
- Bol-Dune : 1965-1967

Nous avons complété le tableau 4.7 par les données plus récentes concernant N'Djaména, N'Guigmi, Bol-Dune et Bol-Matafo.

Tableau 4.7

Insolation en heures par mois

STATION	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total annuel
N'DJAMENA													
1952-1965	301,3	281,7	269,1	268,8	277,6	245,9	203,0	179,9	217,9	284,0	299,0	310,4	
1966	300,6	287,5	299,3	231,3	230,6	233,4	255,6	224,5	220,9	288,5	309,8	308,1	
n	301,3	282,1	271,0	266,5	274,7	245,1	206,3	182,7	218,1	284,3	299,7	310,3	3142,1
N	338,4	314,2	359,2	355,7	376,0	368,2	379,1	373,1	352,4	352,2	330,0	336,6	
n/N	0,890	0,897	0,749	0,756	0,738	0,668	0,535	0,482	0,618	0,806	0,906	0,922	
1965-1973													
n	300,6	288,7	287,5	270,4	276,3	250,4	221,2	197,9	224,7	290,3	298,5	312,6	3219,1
N'GUIGMI													
1957-1965													
n	293,7	262,7	289,7	277,6	304,1	279,6	261,6	225,6	266,1	314,5	298,2	306,5	3379,9
N	334,9	312,0	358,7	354,4	379,1	371,4	382,9	374,3	352,9	351,3	327,0	332,2	
n/N	0,877	0,842	0,808	0,777	0,802	0,753	0,684	0,603	0,754	0,895	0,912	0,923	
BOL-DUNE													
1965	301,1	284,6	279,3	262,0	338,5	276,4	277,7	223,1	280,7	320,3	314,8	302,7	
1966	288,7	272,0	302,2	267,4	267,9	284,2	300,3	237,2	247,3	305,7	310,2	299,9	
1967	302,6	283,0	270,8	295,2	313,5	276,6	271,7	192,9	246,4	317,9	300,6	291,5	
n	297,5	279,9	284,1	274,9	306,6	279,1	283,2	217,7	258,1	314,6	308,5	298,0	3402,2
N	336,2	312,8	358,9	356,8	378,0	370,2	381,1	373,9	352,7	351,9	328,1	333,8	
n/N	0,884	0,895	0,792	0,770	0,811	0,754	0,743	0,582	0,732	0,894	0,940	0,893	
1965-1970													
n	298,6	287,2	293,9	273,5	297,0	286,2	270,4	230,4	255,7	309,1	306,6	304,8	3413,1
BOL-MATAFO													
1975	290,4	280,1	293,0	295,0	332,5	327,7	240,0	232,3	239,8	304,4	304,4	307,3	
1976	313,2	299,8	312,0	299,8	326,5	315,6	268,1	265,6	258,3	267,3	301,4	304,8	
1977	295,8	257,1	243,8	282,0	309,0	304,2	298,2	213,2	276,4	293,5	319,5	314,0	
n	299,8	279,0	282,9	292,3	322,7	315,8	268,8	237,0	258,2	288,4	308,4	308,7	3462,0

Insolation relative n/N :

Les variations sont pratiquement les mêmes à Bol-Dune et à N'Guigmi ; le maximum (0,92) se situe en novembre et décembre et le minimum, très marqué (0,60) en août.

L'insolation relative de N'Djaména est voisine de celles de Bol et N'Guigmi de novembre à mars, mais leur est sensiblement inférieure pendant les autres mois de l'année (minimum 0,48).

Insolation mensuelle moyenne n :

Elle est peu variable de novembre à mai, puis passe par un minimum en août. Sur la période 1951-65, l'insolation annuelle totalise en moyenne 3142 heures à N'Djaména, (3219 heures sur la période 1965-73) ; à N'Guigmi, elle

est de 3380 heures sur la période 1957-65 ; de 1965 à 1970 à Bol-Dune elle est de 3413 heures ; enfin, à Bol-Matafo sur 1975, 76 et 77, la moyenne est de 3462 heures.

La durée de l'insolation théorique étant pratiquement identique pour les trois stations, le décalage que l'on note pour l'insolation relative apparaît à nouveau ici. L'écart annuel moyen est de l'ordre de 250 heures entre N'Djaména et Bol. On peut retenir une insolation annuelle moyenne de :

- 3150 à 3200 heures pour N'Djaména
- 3400 à 3450 heures pour Bol et N'Guigmi.

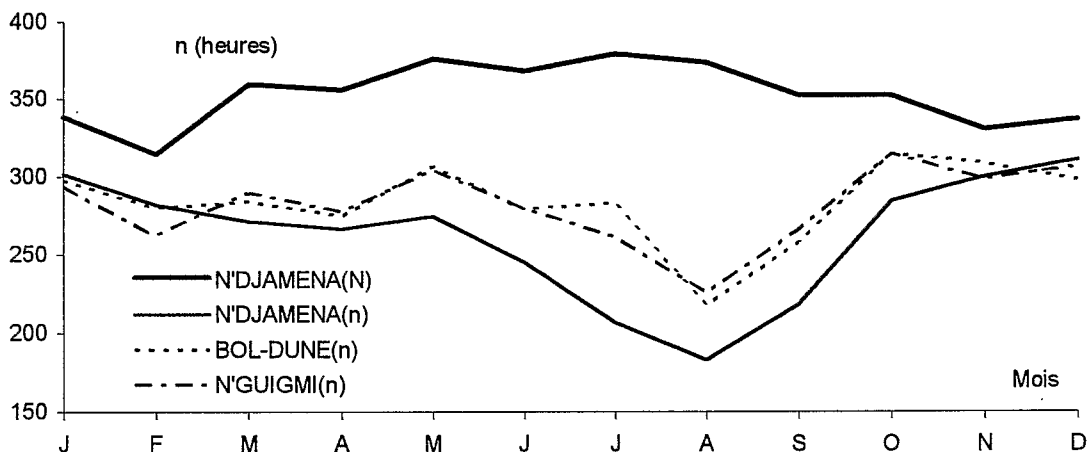


Figure 4.15

Insolation mensuelle moyenne

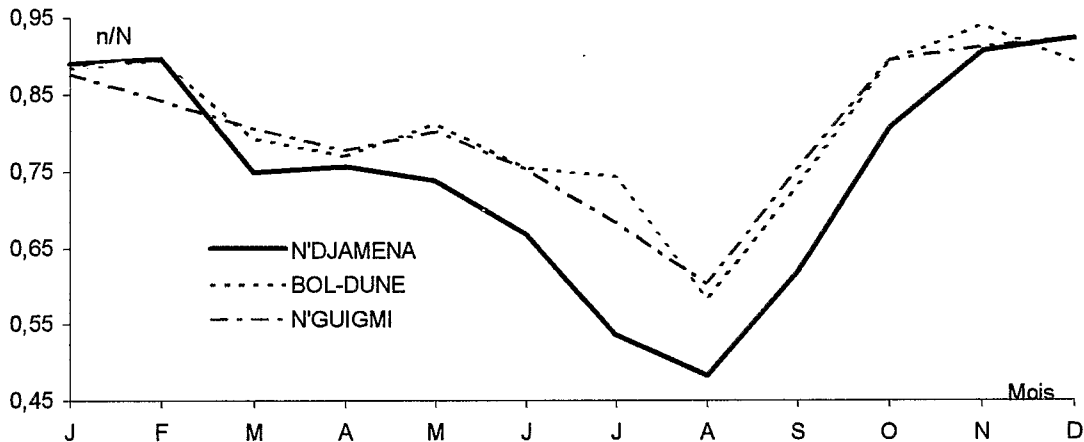


Figure 4.16

Moyennes mensuelles de l'insolation relative.

2.4.2. Rayonnement

On possède deux séries de données. L'une concerne les mesures effectuées à N'Djaména ASECNA de 1958 à 1963. Le rayonnement global mensuel en décajoules par cm^2 (daJcm^2), mesuré avec un solarimètre à thermo-pile, pour cette période est donné ci-après.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Rayonnement solaire global daJcm^2	6410	6528	7902	7421	7564	6969	6591	5904	6529	7383	6919	6630

L'autre série porte sur les observations effectuées, d'une part, au Centre ORSTOM de N'Djaména à partir de 1966 où un équipement complet de mesure du rayonnement solaire (pyranomètre KIPP et ZONEN et enregistreur) a été installé et, d'autre part, à Bol (appareil totaliseur).

A la suite de difficultés d'étalonnage, la période d'observation débute en 1967. La mesure du rayonnement solaire global a pris fin en décembre 1973. Le tableau ci-après donne pour N'Djaména les valeurs moyennes mensuelles obtenues en décajoules par cm^2 (daJcm^2 et en unités d'irradiation $\text{J.cm}^2.\text{j}^{-1}$). Ces valeurs sont reportées sur la figure 4.17. Le rayonnement est maximal en mars et minimal en août. La comparaison avec la série plus ancienne de l'ASECNA montre une légère augmentation du rayonnement de janvier à septembre et une baisse en octobre, novembre et décembre. Le tableau est complété par les mêmes résultats exprimés en calories.¹

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Rayonnement solaire global daJcm^2	6623	7004	7947	7695	7577	7037	6624	6222	6661	7228	6777	6356
cal cm^2	15844	16756	19012	18409	18127	16835	15847	14885	15935	17292	16213	15206
Irradiation journalière moyenne $\text{J cm}^2.\text{j}^{-1}$	2136	2501	2563	2565	2444	2346	2136	2007	2220	2332	2259	2050
$\text{cal cm}^2.\text{j}^{-1}$	5110	5983	6132	6136	5847	5612	5110	4801	5311	5579	5404	4904

Des données (G.J. Dubois, comm. personnelle et Orstom, 1974) moins complètes à Bol sont rappelées ci-après ; les valeurs correspondent aux moyennes de l'irradiation journalière (en $\text{J cm}^2.\text{j}^{-1}$)

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1971				2723	2663	2564	2369	2011		2307	2234	2110
1972	2041	2364	2512	2528	2106		2375	2237	2412	2222	2073	1976
1973	2047	2349	2427	2539	2520	2455	2259					

La moyenne pour les 27 mois est de $2312 \cdot 10^4 \text{ J m}^2$ par jour à Bol tandis que, pour la même période, elle est de $2329 \cdot 10^4 \text{ J m}^2$ par jour à N'Djaména. D'une façon générale, la différence entre les deux stations est donc faible : les valeurs de saison fraîche sont légèrement inférieures à Bol, ce qui est attribué aux vents de sables ou "brumes sèches", et elles sont peut-être un peu plus fortes en saison des pluies, ce qui s'explique par la différence de pluviosité entre les deux localités. Il est probable qu'il existe aussi une différence entre le sud et le nord du lac, les pluviométries étant différentes. Faute de données, on estimera que les valeurs et variations observées à N'Djaména

¹ L'utilisation de différentes unités de rayonnement a été reprise ici dans le but de faciliter les comparaisons avec des données plus anciennes traitant pour d'autres régions indifféremment de rayonnement global ou d'irradiation par unité de surface (1 calorie = 4,18 joules).

représentent une situation proche de la moyenne du lac, en ce qui concerne le rayonnement. N'Djaména présente probablement une variabilité plus forte que le lac durant la saison des pluies.

A N'Djaména, l'irradiation journalière a une moyenne annuelle pour la période 1968-1973 de :

$$I = 2308 \text{ J.cm}^{-2}\text{j}^{-1}$$

avec des valeurs annuelles extrêmes de 2259 et 2361 $\text{J.cm}^{-2}\text{j}^{-1}$. Les variations d'une année sur l'autre sont donc peu importantes et on remarque, en particulier, qu'elles ne reflètent pas la période de sécheresse du Sahel en 1972-73, ce qui ne veut pas dire que la persistance de la sécheresse et l'augmentation des périodes de brumes sèches et de vents de sables soient restées sans influence sur le bilan global d'irradiation.

Le lac Tchad compte parmi les plans d'eau recevant le plus d'énergie rayonnante. Celle-ci varie finalement assez peu au niveau des valeurs moyennes mensuelles. Par contre, la distribution journalière a montré qu'en 1968 (Lemoalle, 1979) 33 jours avaient reçu moins de 1670 $\text{J.cm}^{-2}\text{j}^{-1}$, et 293 jours avaient reçu un rayonnement compris entre 1880 et 2820 $\text{J.cm}^{-2}\text{j}^{-1}$.

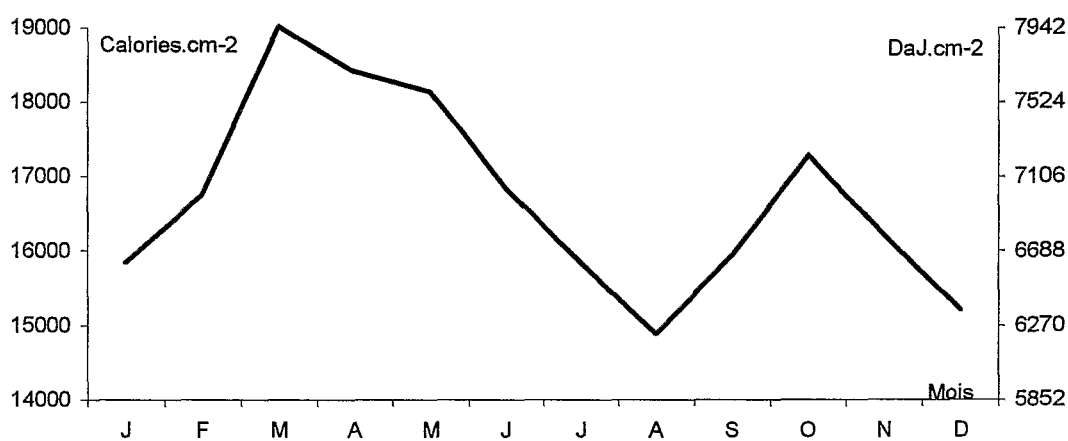


Figure 4.17
Rayonnement solaire global mensuel à N'Djaména (1967-1973).

2.5. Evaporation

L'évaporation représente un des termes principaux du bilan hydrologique. Elle est également un des facteurs essentiels du traçage hydrochimique et isotopique naturel et de la dynamique des eaux. Nous examinerons successivement les différentes données disponibles.

2.5.1. Evaporation Piche

Le tableau 4.8, ci-après, donne les moyennes mensuelles (en mm.mois⁻¹) aux stations de Bol, N'Djaména et N'Guigmi pour les périodes d'observations suivantes :

Bol-Dune	: 1965 à 1970 (6 ans)
Bol-Matafo	: 1965 à 1977 (13 ans)
N'Djaména ASECNA	: 1951 à 1977 (27 ans)

N'Djaména ORSTOM : 1964 à 1973 (10 ans)

N'Guigmi : 1951 à 1965 (15 ans)

Les deux stations de N'Djaména, ASECNA et ORSTOM, donnent des résultats très différents, ce qui montre bien que les conditions d'installation et d'exploitation jouent un grand rôle dans les résultats. La ventilation est meilleure à la station ASECNA.

On a porté dans la figure 4.18 les variations de l'évaporation PICHE moyenne aux deux stations de N'Djaména, à la station de Bol-Dune et à celle de N'Guigmi. On peut voir que l'allure des variations est analogue à celle de la température. L'évaporation mensuelle moyenne est maximale en mars et minimale en août pour les quatre stations.

On remarque que les variations saisonnières de N'Guigmi et Bol sont moins accentuées que celles de N'Djaména ASECNA, mais qu'elles sont sensiblement parallèles à celles de la station ORSTOM.

On note peu de différence entre les résultats obtenus à Bol-Dune et Matafo.

Tableau 4.8

Evaporation Piche à différentes stations du bassin du lac.

MOIS	BOL-DUNE	BOL-MATAFO	N'GUIGMI	N'DJAMENA ASECNA	N'DJAMENA ORSTOM
JANVIER	251	233	285	332	196
FEVRIER	270	247	290	374	255
MARS	235	349	366	470	294
AVRIL	299	340	323	719	279
MAI	252	280	288	347	245
JUIN	173	226	250	242	179
JUILLET	130	176	208	137	125
AOÛT	99	112	142	74	70
SEPTEMBRE	109	124	167	91	84
OCTOBRE	235	241	258	197	158
NOVEMBRE	276	261	271	307	200
DECEMBRE	253	247	267	308	191
TOTAL ANNUEL	2 672	2 836	3 115	3 298	2 276

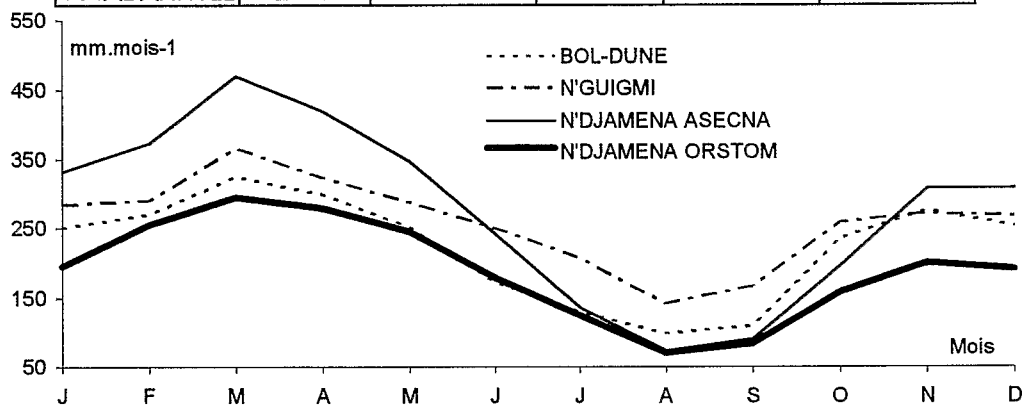


Figure 4.18

Evaporation Piche à N'Djaména, Bol-Dune et N'Guigmi.

2.5.2. Evaporation sur bac

Bac Colorado :

Le tableau 4.9 donne les résultats obtenus sur bac Colorado aux stations N'Djaména, Bol-Dune, Bol-Matafo pour les périodes d'observations suivantes :

N'Djaména : 1964 à 1973 (10 ans)

Bol-Dune : 1965 à 1970 (6 ans)

Bol-Matafo : 1965 à 1977 (13 ans)

Les valeurs de N'Djaména et Bol-Dune sont à comparer à celles de séries antérieures :

- Moyenne sur 7 ans à N'Djaména ; total annuel = 2 504 mm.
- Moyenne 1957-1966, sauf 1962 à Bol-Dune ; total annuel = 3 300 mm.

La figure 4.19 représente les variations de l'évaporation moyenne mensuelle sur bac Colorado aux stations suivies.

Tableau 4.9

Mesure de l'évaporation mensuelle sur le bac Colorado

MOIS	N'DJAMENA	BOL- DUNE	BOL- MATAFO
JANVIER	190	265	228
FEVRIER	215	283	242
MARS	278	358	336
AVRIL	280	342	334
MAI	274	318	305
JUIN	230	258	276
JUILLET	188	237	249
AOUT	142	199	200
SEPTEMBRE	162	199	215
OCTOBRE	213	292	286
NOVEMBRE	212	290	271
DECEMBRE	190	255	238
TOTAL ANNUEL	2 574	3 296	3 186

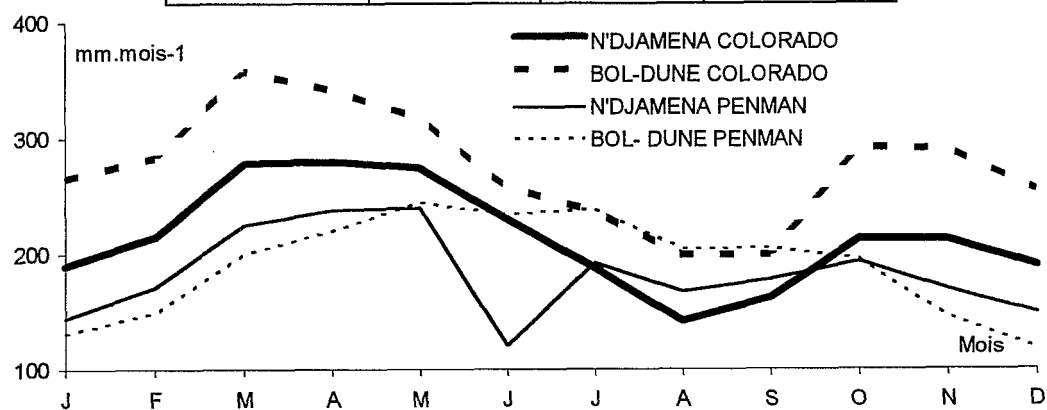


Figure 4.19

Evaporation selon Penman et évaporation sur Bac Colorado.

Le maximum de mars est très bien marqué à Bol ; il est remplacé approximativement par un palier de mars à mai à N'Djaména. Mis à part ce palier, les courbes sont sensiblement parallèles avec un décalage mensuel de 60 mm entre les deux courbes, l'évaporation sur bac à Bol étant supérieure à celle de N'Djaména.

Ce décalage doit provenir d'un régime de vent plus favorable à l'évaporation à Bol, alors que l'humidité est inférieure à N'Djaména et que la température y est plus élevée ou sensiblement égale.

Bac classe A :

Il existe trois séries de mesures, l'une effectuée à N'Djaména de 1964 à 1973, une autre à Bol-Dune de 1965 à 1970 et enfin à Bol-Matafo de 1965 à 1977.

Le tableau 4.10 donne les moyennes mensuelles pour les périodes connues.

Dans la figure 4.20 sont représentées les variations de l'évaporation mensuelle moyenne sur bac Classe A à N'Djaména et à Bol-Dune. On remarque sur ce graphique que l'évaporation sur bac Classe A est nettement plus forte que sur bac Colorado, que ce soit à N'Djaména ou à Bol.

Tableau 4.10

Mesure de l'évaporation mensuelle sur Bac Classe A

MOIS	N'DJAMENA	BOL-DUNE	BOL- MATAFO
JANVIER	209	309	264
FEVRIER	243	342	274
MARS	313	432	401
AVRIL	313	407	386
MAI	302	366	347
JUIN	251	282	300
JUILLET	203	254	268
AOUT	158	220	206
SEPTEMBRE	178	216	220
OCTOBRE	230	325	313
NOVEMBRE	222	331	309
DECEMBRE	202	296	277
TOTAL ANNUEL	2 824	3 780	3 585

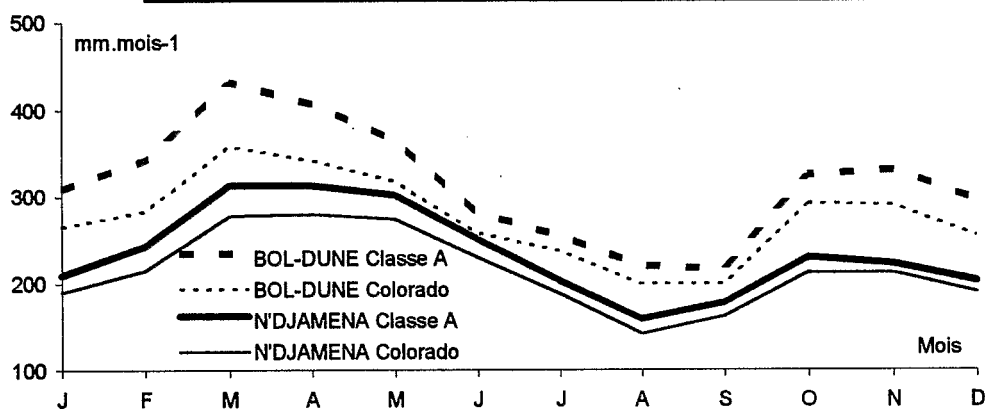


Figure 4.20

Evaporation sur bac à N'Djaména et Bol-Dune.

Évapotranspiromètre (ETP) :

Les moyennes mensuelles présentées dans le tableau 4.11 ont été obtenues à partir des observations réalisées à N'Djaména de 1964 à 1973 et à Bol-Matafo de 1965 à 1977. Les mesures sont faites sur un évapotranspiromètre du type Thornthwaite-4m², placé au centre d'une pelouse de *Cynodondactylon* de 400 m² de superficie.

Comme nous le verrons par la suite, ces données sont très importantes. En effet, la représentativité des données sur l'évaporation aux stations périphériques est bien sûr sujette à caution lorsqu'il s'agit de les appliquer au lac. Par contre, la situation particulière de Matafo, dans un polder cultivé et irrigué, et la présence d'une nappe phréatique proche du sol, confèrent à cette station un climat probablement assez voisin de celui qui règne sur les eaux du lac (Roche M.A., 1973). D'autre part, il est généralement admis que l'évapotranspiration potentielle est la mesure directe facilement obtenue qui se rapproche le plus de l'évaporation réelle d'une grande surface d'eau (Riou C., 1970).

Tableau 4.11

Mesure de l'évaporation mensuelle par évapotranspiromètre

MOIS	N'DJAMENA	BOL- MATAFO
JANVIER	131	136
FEVRIER	150	155
MARS	196	212
AVRIL	199	229
MAI	199	226
JUIN	172	201
JUILLET	156	175
AOUT	120	150
SEPTEMBRE	131	159
OCTOBRE	166	199
NOVEMBRE	158	178
DECEMBRE	136	150
TOTAL ANNUEL	1 914	2 170

Bac flottant

Un bac flottant a existé à la station de Bol-île mais son installation défectueuse n'a pas permis de prendre en considération les résultats fournis. Le bac était installé derrière un rideau de papyrus qui le protégeait des vagues, mais l'abritait aussi du vent et modifiait sensiblement le phénomène d'évaporation.

2.5.3. Application de la formule de PENMAN

Rappel de la formule :

L'évaporation peut se partager en une part radiative et une part convective.

Selon Penman, la hauteur d'eau évaporée sur un plan d'eau libre, en mm par jour, est donnée par la formule :

$$E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_N + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

E_0 : Evaporation sur un plan d'eau libre en mm d'eau par jour

Δ : Pente de la courbe de tension de vapeur saturante en fonction de la température
(en mm Hg/°C, donnée par les tables).

R_N : Rayonnement net (en mm d'eau vaporisée par jour). $R_N = R_C - R_B$

R_C : rayonnement solaire reçu (courte longueur d'onde)

$$\text{avec : } R_C = R_A(1-r).(a+b.n/N)$$

R_A : rayonnement global fonction de la latitude du mois (donné par un abaque)

r = albédo de l'eau # 0,07

$a = 0,29 \cos$ (= latitude du lieu en degrés)

$b = 0,52$

n/N = insolation relative

R_B # : rayonnement diffusé par l'eau (grande longueur d'onde)

$$R_B = \delta T_A^4 (0,56 - 0,09\sqrt{e_d}). (0,10 + 0,90 n/N)$$

avec : T_A = température absolue de l'air (T_A^4 donné par les tables)

δ = constante de STEFAN

e_d = tension de vapeur réelle de l'air (mm Hg)

γ : constante psychrométrique, $\gamma = 0,49$ mm HG/°C, fonction de la pression atmosphérique et de la température

E_a pouvoir asséchant de l'air en mm d'eau par jour $E_a = f(u).(e_s - e_d)$

avec e_s = tension de vapeur saturante à la température de l'air (mm Hg)

$$f(u) = 2,27u_2$$

u_2 = vitesse du vent à 2 m de hauteur en $m s^{-1}$

Il existe une formule donnant la vitesse à 2 m de hauteur connaissant la vitesse à la hauteur h

$$u_2 = u_h \frac{\log 6,6}{\log 3,28h}$$

En fait nous utiliserons l'expression :

$$u_2 = 0,69u_{13,35}$$

Le coefficient 0,69 n'est valable qu'à N'Djaména où il a été déterminé en comparant les mesures effectuées à la station ASECNA à h = 13,35 m.

Données :

La formule de Penman a été appliquée aux données des stations de N'Djaména, Bol-Dune et Bol-Matafo (Touchebeuf, 1969 ; Riou, 1972) pour les périodes suivantes:

N'Djaména	: 1958 à 1969
Bol-Dune	: 1965 à 1966
Bol-Matafo	: 1965 à 1970

Pour N'Djaména, les données ont dû souvent être complétées, en particulier pour la mesure du vent et du rayonnement :

- pour le vent, on constate une anomalie dans les mesures effectuées à h = 13,35 m (station ASECNA) à partir de 1962, les vitesses deviennent nettement plus faibles qu'auparavant, ce qui entraîne une diminution de l'évaporation de l'ordre de 15%. On peut penser que les conditions de mesures ont changé ;
- pour le rayonnement, dans la mesure du possible, les mesures directes ont été utilisées de préférence aux valeurs données par la formule théorique.

Résultats :

Le tableau 4.12 donne les hauteurs d'eau moyennes évaporées calculées par la formule de Penman à N'Djaména, Bol-Dune, Bol-Matafo. On trouve en moyenne 2 284 mm.an⁻¹ à N'Djaména, 2 290 mm.an⁻¹ à Bol-Dune et 2 689 mm.an⁻¹ à Matafo.

On note une nette diminution des résultats de N'Djaména à partir de 1963. Elle est due à des modifications dans la mesure du vent.

La figure 4.19 représente les variations de l'évaporation moyenne mensuelle à N'Djaména et à Bol-Dune déterminées à partir de la formule de Penman. En comparaison des résultats des bacs Colorado, on voit que la concordance n'est pas excellente entre ces deux méthodes d'approche.

On remarque notamment que la formule de Penman donne un total annuel plus faible que le bac Colorado. La différence est très marquée pour Bol-Dune (1 010 mm en moyenne); elle l'est beaucoup moins pour N'Djaména (240 mm en moyenne), surtout pour les années 1958-1962, mais les mesures du vent sont assez suspectes pendant ces années-là et faussent sans doute les calculs.

Tableau 4.12

Evaporations mensuelles calculées par la formule de Penman

MOIS	N'DJAMENA	BOL-DUNE	BOL-MATAFO
JANVIER	145	131,5	191
FEVRIER	172	150	206
MARS	225	200	255
AVRIL	238	220	269
MAI	240	244,5	258
JUIN	121	234,5	237
JUILLET	193	239	232
AOUT	168	204,5	205
SEPTEMBRE	178	205	201
OCTOBRE	194	196	230
NOVEMBRE	170	146,5	212
DECEMBRE	149	118,5	193
TOTAL ANNUEL	2.284	2 290	2689

La répartition saisonnière de l'évaporation, donnée par la formule de Penman, est également assez différente de celle qui résulte des mesures sur bac Colorado. Le maximum de mars à mai est atténué et retardé d'environ deux mois ; le minimum d'août est également très estompé, tandis que le minimum de décembre-janvier est au contraire accentué.

En fait, l'application de la formule de Penman appelle un certain nombre de remarques qui en restreignent quelque peu la portée :

- la valeur des coefficients a et b dans l'expression de R_c n'est pas très bien fixée. M. Davies a trouvé pour N'Djaména les valeurs suivantes : a = 0,43, b = 0,32 tandis que Ch. Riou a obtenu : a = 0,30, b = 0,48. Cette imprécision n'a cependant pas une incidence grave sur le calcul de R_c .
- la valeur de l'albédo de l'eau n'est pas non plus exactement fixée. Elle varie suivant les auteurs entre 0,03 et 0,10. La turbidité éventuelle de l'eau doit modifier également la valeur de l'albédo. Il en résulte une erreur de quelques centimètres sur R_c .
- la formule de Brunt utilisée pour évaluer R_b a été établie pour un ciel clair. En cas de ciel nuageux, elle tend à donner des valeurs trop faibles de R_b , ce qui conduit à surestimer le rayonnement net. Ce fait a été vérifié à N'Djaména en saison des pluies.
- la fonction $f(u)$ qui intervient dans l'expression de E_a (loi de Dalton) est mal connue. En utilisant les résultats fournis par des bacs Colorado, Ch. Riou n'a pas pu expliciter la forme de cette fonction, mais a trouvé qu'elle admettait une valeur moyenne de 0,47 à N'Djaména et de 0,74 à Bol. La différence entre ces deux valeurs met bien en évidence l'influence très importante de la vitesse du vent qui est sensiblement plus élevée à Bol qu'à N'Djaména (vitesse moyenne à 2 mètres du sol respectivement de 1,75 et 1,63 m/s en 1965 et 1966 à Bol, contre 1,18 et 1,27 pour ces mêmes années à N'Djaména).
- la formule de Penman qui a pour principal intérêt de faire intervenir la température de l'air (T_a) et non celle de la surface de l'eau (T_s) qui est généralement inconnue, résulte de la combinaison de la loi de Dalton :

$$E = f(u) (e_s - e_a)$$

$$\text{et du rapport de Bowen : } R = y \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a}$$

e_s étant la tension de vapeur saturante correspondant à la température T_s .

Le rapport de Bowen est le rapport de la chaleur sensible perdue par l'eau sous la forme de conduction et de diffusion à la chaleur consommée par l'évaporation. Dans le cas d'un bac Colorado, il se produit, à travers les parois du bac, des échanges de chaleur appréciables entre l'eau et le sol, phénomène qui devient négligeable pour une très grande masse d'eau comme le lac Tchad.

Mais B. Pouyaud précise qu'à 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).

Tableau 4.13

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

Etude des précipitations

Chapitre 5

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 Maiduguri (Nigeria) de 1951 à 1989.

En 1975, un réseau complémentaire de postes pluviométriques a été mis en service dans le Kanem et au sud du lac. On trouvera dans les tableaux 5.1 à 5.3 les caractéristiques principales des stations utilisées (coordonnées géographiques, altitude, période d'observation, moyenne sur la période d'observation).

Tableau 5.1

Caractéristiques des postes pluviométriques principaux

STATION	Latitude nord	Longitude est	Altitude (m)	Période d'observation (années)	Moyenne sur la période d'observation (mm)
TCHAD					
N'DJAMENA	12° 08'	15° 02'	295	53	609
MASSAKORY	13° 00'	15° 44'	284	24	438
MAO	14° 07'	15° 19'	356	30	317
BOL	13° 28'	14° 43'	291	41	288
MOUSSORO	13° 39'	16° 30'	301	29	344
NIGER					
N'GUIGMI	14° 15'	13° 07'	289	55	212
GUESKEROU	13° 25'	12° 48'	290	14	235
NIGERIA					
MAIDUGURI	11° 50'	13° 09'	295		645

Tableau 5.2

Caractéristiques des postes pluviométriques totaliseurs (ORSTOM)

POSTE	Latitude	Longitude	Période d'observation (années)	Moyenne sur la période d'observation (mm)
TCHAD				
ALIFARI	13° 10'	15° 35'	2	374
MOUZARC	13° 18'	15° 58'	2	528
CHEDDRA	13° 26'	16° 02'	4	369
BAGA SOLA	13° 32'	14° 19'	5	272
NGARANGOU	13° 34'	14° 50'	2	268
NGUELEA	13° 35'	15° 28'	8	296
NGOURI	13° 38'	15° 23'	2	315
MOURZOUGUI	13° 38'	25° 43'	4	341
KAYA	13° 41'	24° 18'	8	291
MECHIMERE	13° 49'	15° 44'	3	340
LIWA	13° 52'	14° 16'	8	348
GRAODOU	13° 57'	15° 28'	4	275
GIM	14° 03'	14° 23'	2	193
RIG-RIG	14° 17'	15° 21'	9	322
BAGA-KISKRA	13° 48'	14° 09'	3	234
KALOM	13° 11'	14° 35'	3	274
KINDJERIA	13° 57'	13° 41'	3	247

Tableau 5.3

Caractéristiques des postes pluviométriques annexes

POSTE	Latitude	Longitude	Période d'observation (années)	Moyenne sur la période d'observation (mm)
NIGERIA				
MALAMFATORI	13° 36'	13° 21'	3	184
TCHAD				
HAYKOULOU	13° 37'	14° 04'	2	
KARAL	12° 23'	14° 40'	3	329
DJIMTILO	12° 50'	14° 42'	2	399
DOUM-DOUM	13° 15'	15° 20'	3	323
RIG-RIG	14° 17'	15° 21'	2	232
LIWA	13° 52'	14° 16'	3	182
BAGA-KISKRA	14° 46'	14° 35'	(1)	(214)

1. PRECIPITATIONS ANNUELLES

1.1. Hauteurs de précipitations annuelles

Les périodes d'observation pour les sept stations officielles sont de durée très inégale, variant de 14 ans pour Gueskerou à 67 ans pour N'Guigmi.

Les observations pluviométriques ont été interrompues à de nombreux postes au Tchad dans le courant des années 70 et surtout à partir de 1979. Une précédente étude pluviométrique a été réalisée sur une période allant jusqu'en 1977. Nous en conserverons les principaux résultats statistiques. Mahé (1993) a effectué une mise à jour des fichiers de données annuelles jusqu'en 1989, mais excepté pour N'Guigmi, aucune série d'observations n'a pu être retrouvée pour la période complète. Les données manquantes ont été reconstituées par la méthode du Vecteur Régional (M.V.R.) suivant un découpage en unités climatiques homogènes (Mahé et L'Hôte, 1992).

On a choisi une période d'homogénéisation qui s'étend sur 46 ans et coïncide avec une période d'observation optimale. Durant cette période, on a toujours des relevés sur au moins deux stations sur sept. Les relevés manquants ont été reconstitués par corrélations graphiques, après avoir recherché les meilleures corrélations existant entre les relevés des stations prises deux à deux. Les corrélations retenues ont été les suivantes : Massakory-N'Djaména, Moussoro-N'Djaména, Gueskerou-N'Guigmi, Bol-N'Guigmi, Mao-Massakory ou Mao-N'Djaména.

Le coefficient de la corrélation Moussoro-N'Djaména est médiocre, mais les autres coefficients sont acceptables et permettent une extrapolation sensible de l'information. On trouvera dans le tableau 5.4 les valeurs des pluviométries annuelles qui ont été ainsi complétées de 1932 à 1977 pour les sept stations étudiées et Maiduguri depuis 1951. La dernière colonne de ce même tableau donne les moyennes pluviométriques sur la période d'homogénéisation, lesquelles ont permis de tracer la carte des isohyètes interannuelles (1932-1977) (Figure 5.1a). La dernière partie du tableau 5.4 donne les totaux pluviométriques annuels de 1978 à 1989 et la moyenne 1932 - 1989.

Tableau 5.4

Modules pluviométriques annuels (en mm)

Station	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947
N'Djaména	730	757	524	368	723	497	808	752	625	564	753	652	505	589	877	456
Massakory	524	539	416	336	521	402	566	536	470	438	537	484	408	450	602	500
Moussoro	460	480	306	193	435	288	518	476	382	338	477	404	294	355	470	302
Mao	404	423	259	152	400	240	458	470	275	288	198	65	201	230	637	374
Bol	382	433	324	299	362	322	288	231	327	240	292	352	286	280	282	299
N'Guigmi	323	265	237	202	285	236	176	132	98	120	193	276	184	170	178	217
Gueskerou	340	296	274	247	312	273	227	193	167	184	240	304	233	222	228	258

(les valeurs soulignées ont été reconstituées.)

Tableau 5.4 (suite)

Modules pluviométriques annuels (en mm)

Station	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963
N'Djaména	354	435	952	550	759	643	778	735	607	740	537	990	533	780	490	497
Massakory	334	321	502	530	550	570	526	444	437	486	516	659	410	575	400	511
Moussoro	158	136	418	222	413	624	300	282	434	515	382	444	288	421	327	350
Mao	148	274	480	256	518	464	349	384	295	306	457	454	189	393	441	288
Bol	252	93	458	230	383	313	700	296	482	320	319	521	258	504	270	291
N'Guigmi	174	67	387	115	309	352	325	189	377	145	386	419	224	472	203	164
Gueskerou	<u>225</u>	<u>144</u>	<u>390</u>	181	328	359	350	343	324	226	301	<u>412</u>	<u>264</u>	<u>456</u>	<u>248</u>	<u>218</u>
Maiduguri				540	632	792	698	861	637	736	749	866	732	723	680	688

Station	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	32-77
N'Djaména	477	587	593	610	561	465	653	423	618	315	424	746	651	539	613
Massakory	<u>523</u>	<u>416</u>	476	370	350	258	<u>432</u>	420	<u>387</u>	<u>341</u>	459	403	401	343	458
Moussoro	469	424	348	495	266	344	284	222	190	374	218	265	221	241	353
Mao	323	270	272	388	224	198	220	350	<u>267</u>	145	<u>416</u>	<u>352</u>	<u>356</u>	346	324
Bol	327	312	271	449	250	202	342	208	99	183	395	218	237	283	312
N'Guigmi	193	138	360	170	105	94	237	125	69	85	223	167	81	351	217
Gueskerou	<u>240</u>	<u>192</u>	<u>369</u>	<u>308</u>	<u>174</u>	<u>163</u>	<u>166</u>	<u>292</u>	<u>150</u>	<u>76</u>	<u>147</u>	<u>127</u>	<u>69</u>	<u>355</u>	<u>252</u>
Maiduguri	453	579	621	884	629	585	746	503	439	433	613	672	690	658	-

Station	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	32-89
N'Djaména	666	<u>496</u>	<u>612</u>	451	382	376	231	342	508	405	628	580	584
Massakory	<u>485</u>	<u>465</u>	<u>573</u>	<u>422</u>	<u>402</u>	<u>212</u>	319	243	351	354	601	260	445
Moussoro	<u>150</u>	<u>241</u>	<u>297</u>	<u>219</u>	<u>208</u>	<u>178</u>	<u>165</u>	<u>210</u>	<u>242</u>	<u>178</u>	560	160	328
Mao	<u>335</u>	<u>321</u>	<u>396</u>	<u>292</u>	<u>278</u>	<u>237</u>	117	205	181	120	225	102	306
Bol	<u>350</u>	248	306	225	<u>113</u>	<u>183</u>	<u>170</u>	<u>216</u>	<u>249</u>	108	475	107	295
N'Guigmi	236	225	345	160	173	126	123	238	143	126	273	118	212
Maiduguri	727	711	621	461	354	264	344	414	502	366	781	545	614
													(51-89)

D'après cette carte, la pluviométrie décroît du sud vers le nord-ouest, le lac étant compris entre les isohyètes 550 et 220 mm. Le tracé des isohyètes n'est toutefois donné qu'à titre indicatif, car la densité des pluviomètres est faible et ceux qui sont installés sur le lac même sont de date trop récente pour que leurs données puissent être valablement utilisées. Nous verrons cependant dans le calcul de la moyenne des précipitations annuelles du lac qu'il y a correspondance entre les valeurs calculées et les quelques observations récentes. Les pluviomètres totalisateurs installés sur les îles de Kalom et Kindjéria fourniront plus tard des renseignements intéressants, car il n'est pas sûr que l'influence d'une telle nappe d'eau sur la pluviométrie soit négligeable et ne tende pas à modifier le tracé des isohyètes. Mais pour l'instant, ce tracé est conforté par l'homogénéisation effectuée sur 31 ans (1946-1976) de 101 stations dans le cadre de l'Etude du Bassin conventionnel.

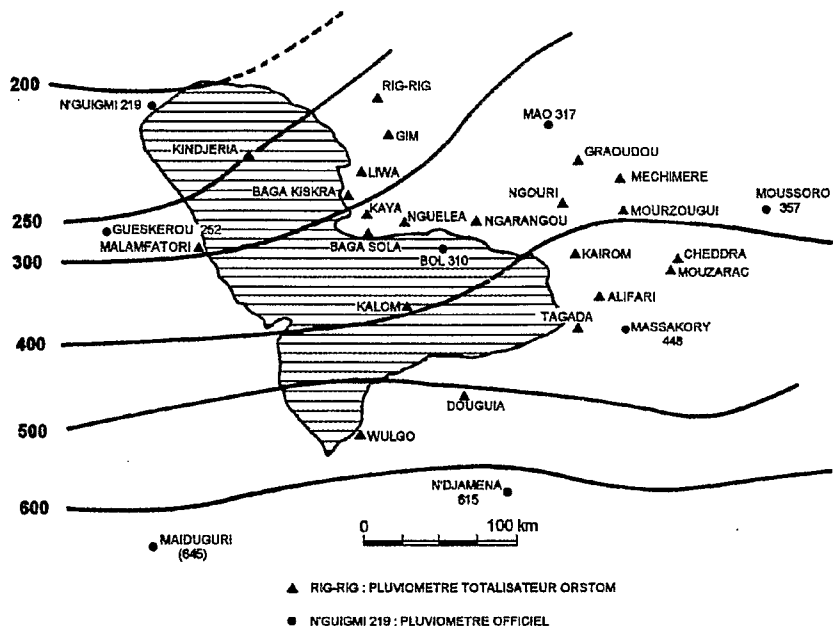


Figure 5.1a

Isohyètes interannuelles (période 1932-1977).

Sur les 2 figures qui suivent (5.1b et c) 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.

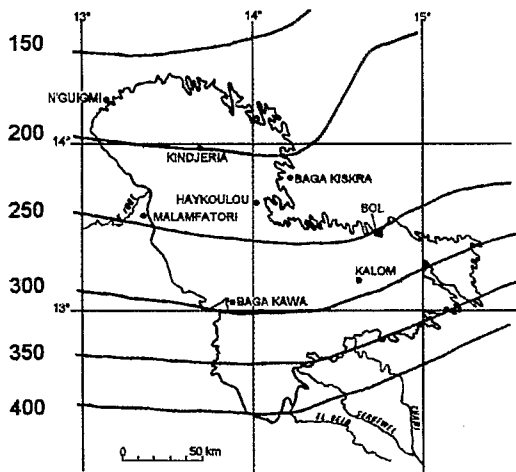


Figure 5.1 b

Isohyètes interannuelles calculées sur la période déficitaire 1971-1989.

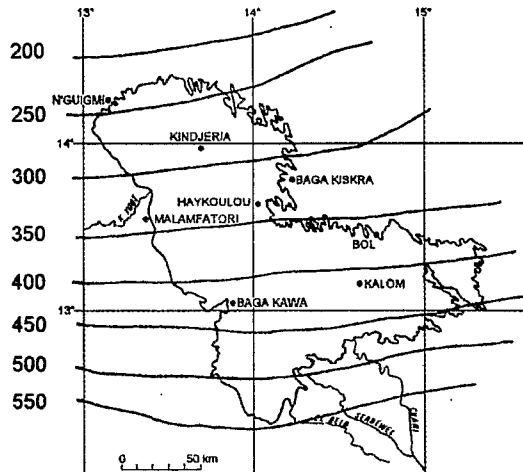


Figure 5.1 c

Isohyètes interannuelles calculées sur la période excédentaire 1951-1970.

1.2. Répartition statistique des pluies annuelles

L'étude de la répartition statistique des pluies annuelles a été faite sur les trois stations possédant une période d'observation suffisamment longue. Pour N'Djaména et N'Guigmi, la distribution s'ajuste assez bien à une droite de Gauss, tandis que pour Bol, les pluviométries des années extrêmes dépassent nettement les valeurs données par la loi de Gauss (figure 5.2) ; les résultats ont été reportés dans le tableau 5.5.

Pour N'Djaména, la période d'observation correspond aux années 1905 à 1908, 1910, 1911 et 1913, 1932 à 1977.

Pour Bol : 1908, 1913 à 1916, 1918, 1938 à 1940, 1946 à 1977.

Pour N'Guigmi : 1922 à 1926, 1928 à 1977.

Il convient de noter que les deux valeurs extrêmes de Bol sont tout à fait sûres (700 et 46 mm) ; la première a été suivie de très près par les équipes de A. Bouchardeau, la seconde par les collaborateurs de J. Tilho et on connaît les soins apportés par cet auteur à ce genre de travail.

L'analyse de 22 stations homogénéisées de 1946 à 1976 lors de l'étude du Bassin Conventionnel (pluviométries annuelles moyennes allant de 346 à 1260 mm) conduit à un ajustement sur une loi de Goodrich. Les estimations des pluviométries de différentes fréquences sèches et humides ont été corrélées à la pluviométrie annuelle moyenne correspondante (fig. 5.3).

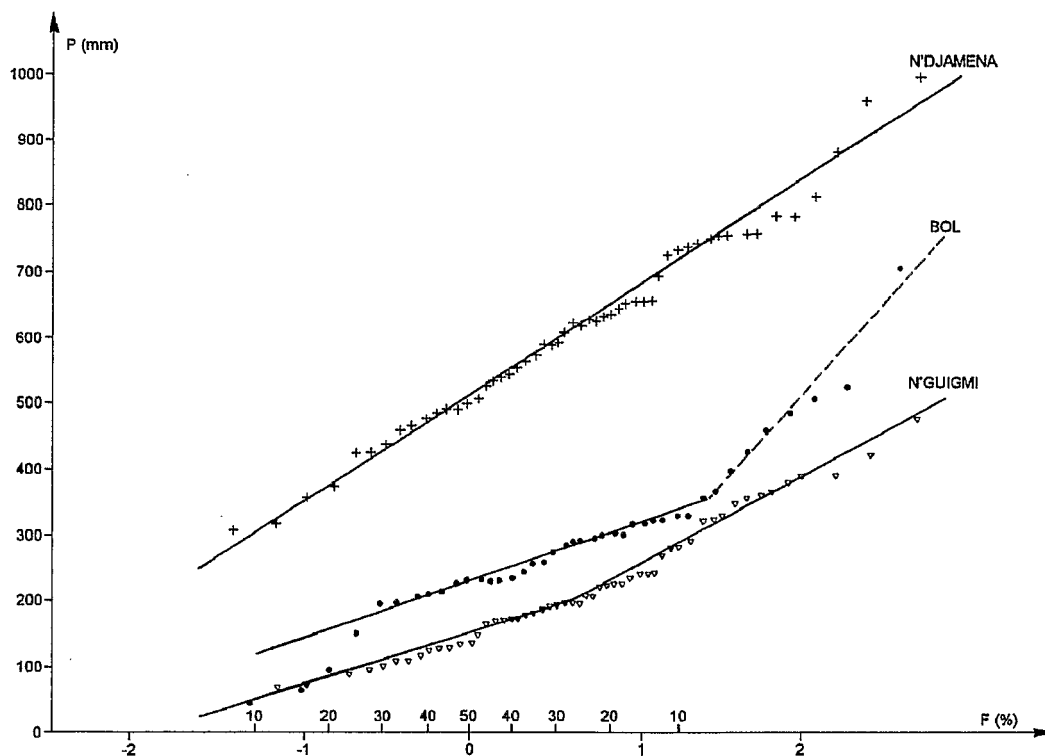


Figure 5.2

Distribution statistique des pluies annuelles à N'Djaména, Bol et N'Guigmi.

Tableau 5.5

Etude fréquentielle des précipitations annuelles

	N'DJAMENA	BOL	N'GUIGMI
Durée période d'observations	53 ans	41ans	55 ans
Moyenne interannuelle	609	288	212
Pluviométrie maximale observée	990	700	472
Pluviométrie minimale observée	306	46	41
Médiane	615	280	200
Décennale sèche	405	175	100
Décennale humide	820	480	370
Ecart - type	150	123	101

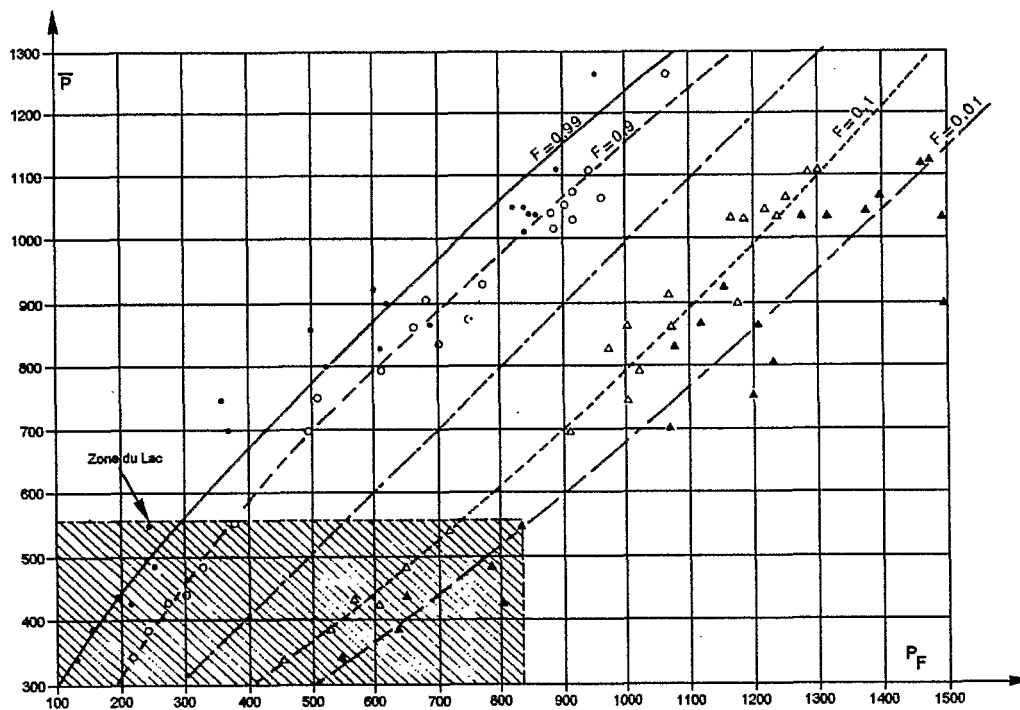


Figure 5.3

Corrélation pluie annuelle moyenne et pluies annuelles de fréquence centennale sèche, décennale sèche, décennale humide, centennale humide.

1.3. Irrégularité locale des précipitations

A l'occasion de l'étude des polders de la région de Bol, on a fait de 1962 à 1964 des observations sur un ensemble de 20 pluviomètres répartis sur une zone d'environ 31 km².

Ce réseau, très dense, a mis en évidence une forte irrégularité locale des précipitations, comme le montrent les données ci-après.

ANNEE	MOYENNE	MAXIMUM	MINIMUM
1962	289 mm	401 mm	248 mm
1963	260 mm	299 mm	220 mm
1964	327 mm	365 mm	219 mm

Cette irrégularité s'explique en climat sahélien par le caractère souvent très localisé des précipitations orageuses. Le nombre des averses orageuses ("tornades") est insuffisant pour qu'en une année s'établisse une bonne compensation entre les précipitations totales recueillies à quelques kilomètres de distance. Les relevés d'un pluviomètre isolé ne donnent donc qu'une idée très imparfaite des chutes de pluies dans la région avoisinante (conséquence du problème de l'abattement des précipitations étudié par G. Vuillaume, 1974).

1.4. Moyenne des précipitations annuelles sur le lac

La moyenne des précipitations annuelles sur le lac a été calculée par la méthode de THIESSEN. Pour la plupart des années, le calcul a été fait à partir des relevés de cinq stations auxquelles on a appliqué les coefficients de pondération suivants :

N'Djaména	0,020
Massakory	0,031
Bol	0,594
N'Guigmi	0,271
Gueskerou	0,084

Pour la période 1975-1977, on a tenu compte des relevés des pluviomètres totalisateurs de la région du Kanem. On a abouti aux résultats donnés dans le tableau 5.6.

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.

Il est intéressant de noter, comme le montre le tableau 5.7 ci-après, la concordance entre valeurs moyennes obtenues sur ces postes et celles obtenues par l'application du coefficient de Thiessen pour les cinq stations retenues.

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.

Tableau 5.6

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

Tableau 5.7

Comparaison des valeurs moyennes des postes totalisateurs et de la moyenne du lac calculée à partir des autres stations.

	1975	1976	1977
KALOM	228	324	268
KINDJERIA	272	118	350
BAGA-KISKRA	181	139	350
MALAMFATORI	225	138	191
BAGA KAWA	192		
MOYENNE	220	180	290
MOYENNE PAR THIESSEN SUR LES AUTRES STATIONS	228	186	278

Les valeurs de pluie annuelle sur le lac de 1978 à 1989 sont obtenues par corrélation. Dans un premier temps on calcule les pluies annuelles sur le lac de 1951 à 1989 à partir d'une grille de valeurs (méthode Spline, pas de 0,7°) suivant une méthode décrite par Mahé *et al* (1994) avec élaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées. Puis on corrèle la série calculée par la méthode de Thiessen (T) avec celle calculée par interpolation Spline (S) sur la période d'observation commune 1951-1977. La régression obtenue est très bonne ($N=27$, $S_{\text{min}} = 0,907 T_{\text{min}} + 61$ avec $r = 0,93$). Ces valeurs corrélées complètent le tableau 5.6 et sont en italiques. La moyenne interannuelle passe ainsi de 288 mm (1932-1977) à 271 mm (1932-1989).

2. PRECIPITATIONS MENSUELLES

2.1. Hauteurs de précipitations mensuelles

Le tableau 5.8 rassemble les valeurs moyennes, maximales et minimales des hauteurs de pluies mensuelles, observées à N'Djaména, Bol et N'Guigmi.

Les diagrammes des précipitations mensuelles moyennes (fig. 5.4) montrent clairement la répartition saisonnière des pluies qui est très simple : les précipitations sont rigoureusement nulles pendant cinq mois (novembre-mars) à N'Djaména, pendant 6 mois (novembre-avril) à Bol, pendant sept mois (octobre-avril) à N'Guigmi. Aux trois stations, les précipitations sont maximales en août, mais le maximum de N'Djaména en année moyenne (238 mm) est nettement plus élevé que celui de Bol (169 mm) et celui de N'Guigmi (124 mm). Les trois mois de juillet, août et septembre voient tomber 80% des précipitations annuelles à N'Djaména, 90% à Bol et 94% à N'Guigmi. A mesure donc que la tendance sahélienne du climat s'affirme du sud vers le nord, les précipitations diminuent et se produisent pendant une période plus courte.

Cette prépondérance des mois de juillet, août et septembre est illustrée par la figure 5.5 qui confronte les pourcentages dans l'année de ces trois mois à la latitude Nord du poste dans l'étude du bassin conventionnel ; la zone couvrant le lac est approximativement supérieure à 12°30N et la latitude 13°N correspond à la cuvette sud.

Tableau 5.8

Hauteurs de précipitations mensuelles (mm)

MOIS	N'DJAMENA (46 ans) 1932 - 1977			BOL (37 ans) 1932-1933 1938-1940 1946-1977			N'GUIGMI (55 ans) 1922-1976		
	Moyenne	Maximum observé	Minimum observé	Moyenne	Maximum observé	Minimum observé	Moyenne	Maximum observé	Minimum observé
JANVIER	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEVRIER	0	1	0	0	0	0	0	0	0
MARS	0	3	0	0	0	0	0	0	0
AVRIL	7	53	0	0	2	0	0	16	0
MAI	31	141	1	6	61	0	7	90	0
JUIN	63	137	2	11	72	0	6	67	0
JUILLET	153	281	49	69	191	0	56	166	2
AOUT	238	582	105	169	547	52	124	318	25
SEPTEMBRE	100	206	17	47	176	2	18	74	0
OCTOBRE	22	95	0	5	58	0	1	15	0
NOVEMBRE	0	16	0	0	0	0	0	1	0
DECEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	2	0
TOTAL	614			307			212		

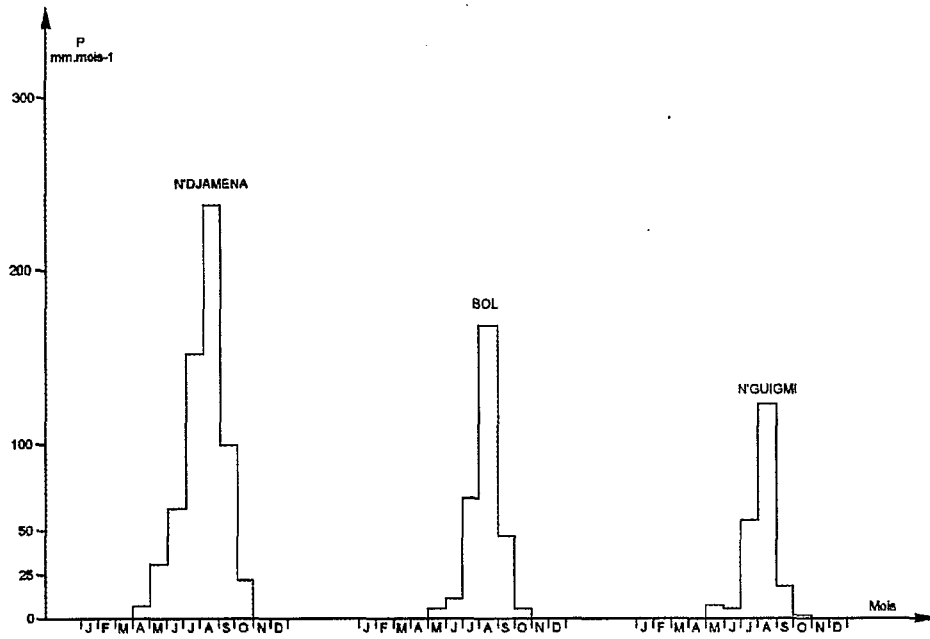


Figure 5.4

Précipitations mensuelles moyennes.

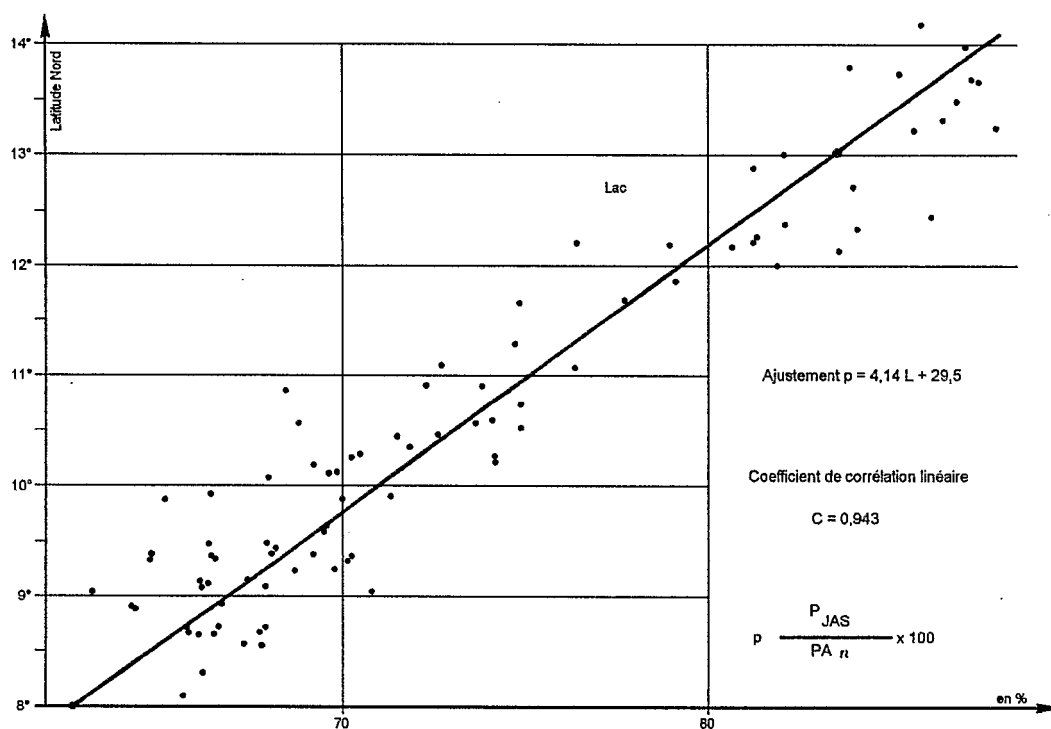


Figure 5.5

Pourcentage du total des précipitations de juillet, août, septembre par rapport au total annuel en fonction de la latitude des postes pluviométriques du bassin du lac Tchad.

2.2. Moyenne des précipitations mensuelles sur le lac

Pour déterminer la moyenne des précipitations mensuelles sur le lac, on a procédé comme pour les précipitations annuelles : on a appliqué la méthode de THIESSEN aux relevés mensuels de N'Djaména, Massakory, Bol, N'Guigmi et Gueskerou. On a toutefois été obligé, dans un certain nombre de cas, d'appliquer la méthode à seulement quatre ou même trois stations lorsque les relevés mensuels de telle ou telle station faisaient défaut. La méthode a été limitée à la période 1954-1977.

Les résultats ainsi obtenus sont consignés dans le tableau 5.9. Il va sans dire que leur précision n'est pas excellente pour les raisons déjà indiquées plus haut. On doit même s'attendre à ce que la précision soit plus médiocre à l'échelle mensuelle qu'à l'échelle annuelle. C'est néanmoins sur ces données que nous nous appuyerons pour l'établissement des bilans hydrologiques ; la modélisation effectuée atteste, à une exception près, la validité de la moyenne retenue.

Tableau 5.9

Moyenne des précipitations mensuelles sur le lac (mm)

ANNEES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
1954	0	0	0	0	5	4	125	419	6	6	0	0	565
1955	0	0	0	0	12	21	39	138	36	38	0	0	284
1956	0	0	0	0	0	13	62	203	74	14	0	0	366
1957	0	0	0	0	8	29	106	58	74	3	0	0	278
1958	0	0	0	0	4	5	120	165	71	0	0	0	365
1959	0	0	0	0	2	3	45	320	89	0	0	0	459
1960	0	0	0	0	2	12	86	135	35	2	0	0	272
1961	0	0	0	0	1	22	160	220	55	0	0	0	458
1962	0	0	0	0	1	10	121	119	40	1	0	0	291
1963	0	0	0	0	8	3	81	170	14	4	0	0	280
1964	0	0	0	1	0	13	64	215	33	0	0	0	326
1965	0	0	0	0	0	8	73	171	33	0	0	0	285
1966	0	0	0	1	53	13	51	95	58	1	0	0	272
1967	0	0	0	1	1	6	59	165	19	0	0	0	251
1968	0	0	0	1	4	39	69	60	7	1	0	0	181
1969	0	0	0	1	10	45	30	111	27	4	0	0	228
1970	0	0	0	0	14	2	80	95	118	0	0	0	309
1971	0	0	0	0	1	0	52	96	49	1	0	0	199
1972	0	0	0	1	5	6	16	52	14	1	0	0	95
1973	0	0	0	0	0	6	27	79	21	0	0	0	133
1974	0	0	0	3	4	1	131	150	54	4	0	0	347
1975	0	0	0	0	0	4	37	144	43	0	0	0	228
1976	0	0	0	1	01	29	27	89	23	16	0	0	186
1977	0	0	0	0	2	3	63	198	12	0	0	0	278

3. PRECIPITATIONS JOURNALIERES

Les précipitations journalières de diverses fréquences ont été calculées par Y. Brunet-Moret (1967) pour toutes les stations d'Afrique occidentale et du Tchad en utilisant une loi de PEARSON III tronquée. D'après les cartes jointes au Rapport de Synthèse de son "Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale", on peut admettre pour les stations voisines du lac Tchad les valeurs approximatives suivantes :

Pluviométrie journalière (mm)

STATION	1 fois en 1 an	1 fois en 2 ans	1 fois en 5 ans	1 fois en 10 ans	1 fois en 20 ans
N'Djaména	55	66	82	93	104
Massakory	51	61	75	87	98
Moussoro	45	57	70	80	92
Bol	46	57	70	80	85
Mao	42	52	64	74	85
N'Guigmi	37	48	58	68	78

Ces valeurs, déterminées à partir de cartes où sont figurées les courbes d'égale précipitation journalière de probabilité donnée, sont quelque peu différentes des valeurs calculées pour chaque station mais elles présentent l'avantage d'atténuer les singularités locales.

4. HAUTEURS DES PRECIPITATIONS ET VARIATIONS CLIMATIQUES

4.1. 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.

4.2. 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.

4.3. Cas de la Région du lac Tchad

Les figures 5.6 et 5.7 se rapportent aux précipitations annuelles dans la région du lac Tchad. Sur la figure 5.6 les séries de pluies annuelles tombées sur le lac (1932 à 1989) calculées à partir des données de 7 postes, sont comparées à celles tombées sur la bande sahélienne du Niger à l'est du Tchad, y compris dans le nord du Nigeria et du Cameroun (1951 à 1989, 59 postes).

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 la figure 5.7 des 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.

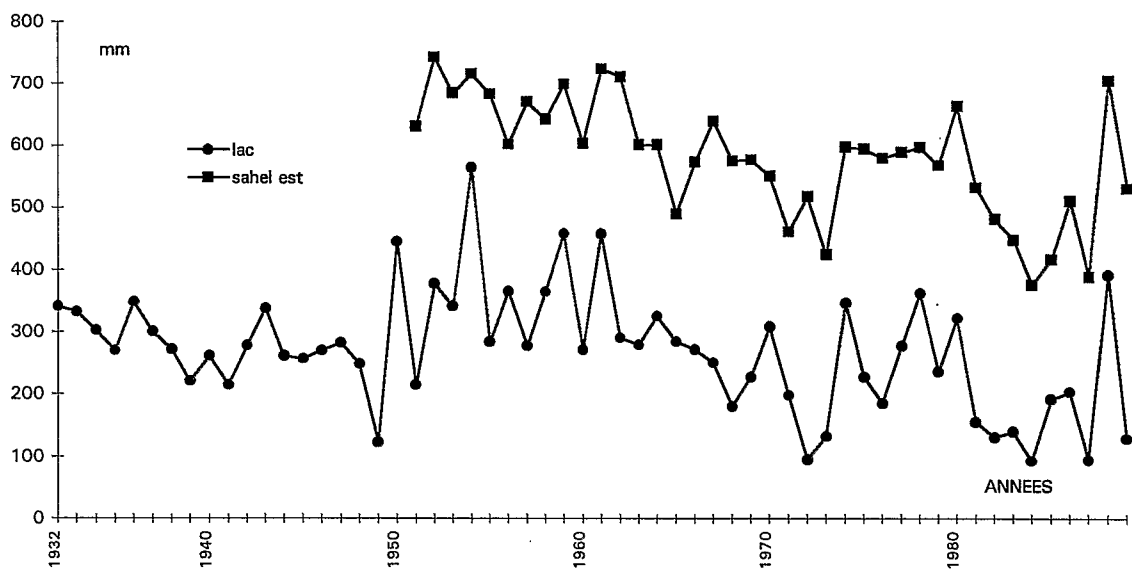


Figure 5.6

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

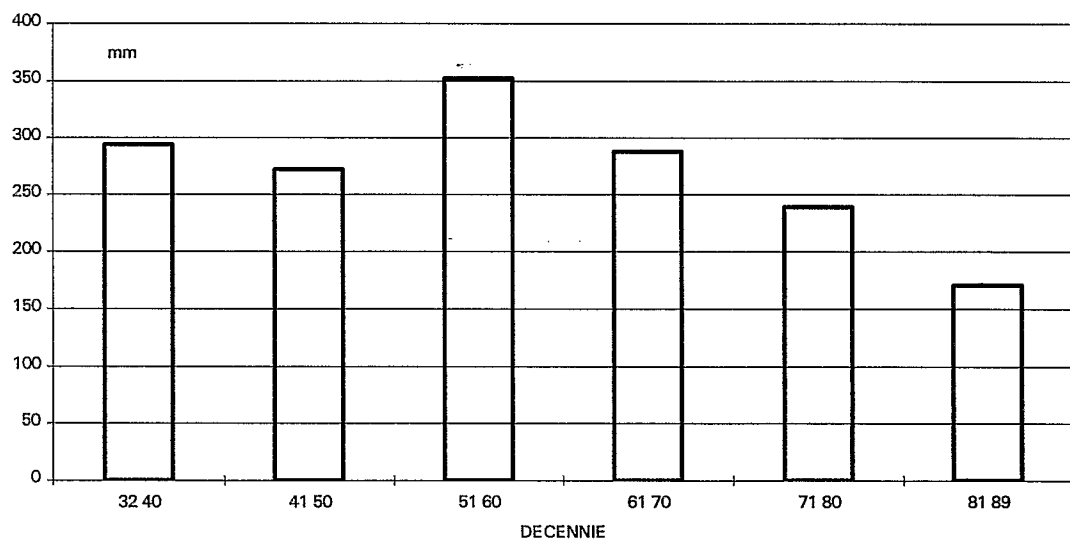


Figure 5.7

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

Hydrologie du lac Tchad

Troisième Partie

1. HISTORIQUE DES OBSERVATIONS ANCIENNES

1.1. Les niveaux du Lac.

Déjà évoquées dans les premières parties de l'ouvrage, les relations de voyage de divers explorateurs, au cours du siècle dernier ou au début de ce siècle, fournissent quelques renseignements sur les variations de niveau du lac. La longueur de pénétration des eaux dans la dépression du Bahr El Ghazal et la distance entre la rive du lac et la ville de N'Guigmi sont les principaux éléments qui permettent de repérer les variations de niveau.

Les plus bas niveaux ont été observés en 1905, en 1907-1908 et en 1914. En 1907-1908, le lac était à un stade comparable à celui que nous connaissons fin 1979 début 1980, conséquence de la sécheresse passée des années 1970 et de la persistance de ses effets.

Ces deux états extrêmes identiques (début du siècle et années 1970) ont été séparés par deux périodes de crues du niveau du lac au cours des années 1953 à 1958 et en 1962-1963 où le maximum de ce siècle a été enregistré. Cependant, il convient de noter que le maximum de 1962-1963 est bien inférieur aux hauts niveaux observés à la fin du siècle dernier.

Les principales données concernant ces observations anciennes sont résumées dans les "Documents Scientifiques de la Mission Tilho, 1906-1909" dont on peut extraire les renseignements suivants :

- En 1824, d'après Denham, le lac atteint N'Guigmi, Woudi, Baroa, Ngormou, et reste au nord d'Hadjer El Hamis.
- En 1851, d'après Barth et Overweg, le lac atteint N'Guigmi, Madouari et se tient à petite distance de Ngornou. La route de N'Guigmi à Béri est en partie submergée.
- En janvier 1854, d'après Vogel, Ngormou est submergé par le lac. Pendant l'hiver 1854-1855, la route entre Baroa et N'Guigmi est couverte par les eaux du Tchad ; le village de N'Guigmi est détruit et les habitants doivent chercher un abri sur la dune, probablement à l'emplacement actuel.
- En 1866, Rohlf's retrouve le Tchad à N'Guigmi et à une heure et demie de "trot allongé" de Kaoua, soit à environ 18 km de ce point. En novembre de la même année, les eaux atteignent un niveau plus élevé qu'aucun autre, de mémoire d'homme.
- En 1870, Nachtigal constate également une crue considérable qui menace Koukaoua ; le Bahr El Ghazal est envahi par l'onde lacustre sur une distance de plus de 100 km. En 1873, le sillon du Bahr El Ghazal était encore submergé à 80 km environ de sa sortie du lac Tchad.
- Foureau, en février 1900, retrouve le Tchad dans les mêmes limites au nord que Barth en 1851. "Nous avons parcouru toute la partie nord du lac, dit-il, ayant en main la carte de Barth ; or nous pouvions

suivre, sinuosité par sinuosité, les petites collines de bordure sur le terrain ; elles coïncidaient toujours avec celles indiquées sur la carte... Les collines étaient bien les mêmes ; et la frange des roseaux du lac, d'autre part, se maintenait à la même distance, plus de 50 ans après le passage du célèbre voyageur. Bien plus, certains détails typiques restaient conformes sur le terrain à la description et au levé de Barth".

- En 1903, le lieutenant de vaisseau Audoin, venant du Chari et de Bosso avec une baleinière de la flottille, passe en embarcation à 1 200 mètres environ au sud de N'Guigmi pour se rendre, toujours par eau, à Kologo, Kindin, Bol et retourner dans le Chari.
- En février 1904, le capitaine Tilho accoste avec le chaland BENOIT-GARNIER à 3 200 mètres dans le sud-est de N'Guigmi et atteint Kouloa par eau ; pour se rendre de Kouloa à Bol, le chaland doit passer au large de l'archipel, la baisse des eaux empêchant le passage entre les îles dans le nord de Kindin.
- En 1905, le capitaine Freydenberg constate que le Tchad est divisé en deux lacs distincts, séparés l'un de l'autre par le barrage de Seyorom à Kindin.
- A la fin de 1907, lors de l'arrivée de la Mission, toute la partie du nord du Tchad était asséchée jusqu'à la hauteur environ du parallèle de la Komadoukou-Yobé.

En comparant ces divers renseignements avec les observations faites par la Mission Logone-Tchad entre 1953 et 1957, A. Bouchardeau avait essayé de reconstituer les niveaux du lac à différentes époques depuis le milieu du siècle dernier. Nous avons reproduit dans le tableau 6.1. les évaluations de A. Bouchardeau en les modifiant légèrement compte tenu des observations plus récentes sur le Bahr El Ghazal. Certaines de ces évaluations ne sont exactes qu'à 40 ou 50 cm près ; en particulier la limite d'inondation du Bahr El Ghazal ne constitue pas un repère très sûr. Comme on le verra ci-après, elle est plus ou moins influencée par des barrages de sable construits par les riverains et ne dépend pas uniquement du niveau maximal du lac pendant l'année considérée (les inondations éventuelles des années antérieures ont une influence non négligeable). Malgré leur imprécision, les données du tableau 6.1 fournissent des indications précieuses sur les variations de niveau du lac depuis une centaine d'années.

1.2. Pénétration des eaux du lac dans le Bahr El Ghazal

Comme on l'a indiqué dans le tableau 6.1, les mémoires de Nachtigal et du général Tilho mentionnent diverses inondations du Bahr El Ghazal survenues au siècle dernier. On sait aussi que la pénétration des eaux a atteint environ 120 km en 1870, 95 km en 1873 et 180 km (jusqu'à Remelé, près de Moussoro) en 1874. Une dernière inondation s'est produite en 1900 sur 70 km environ (jusqu'à Bir Achim), puis il a fallu attendre jusqu'en janvier 1956 pour que les eaux du lac entrent à nouveau dans le Bahr El Ghazal.

En janvier 1955, les eaux avaient déjà atteint un seuil que l'on peut considérer comme le point d'origine du Bahr El Ghazal et qui se trouve à 14 km au nord-est de Kouloudrei, près de la piste reliant Malloum à Nzerom.

En janvier 1956, à la suite de la forte crue du Chari de 1955, le flot d'inondation a rapidement submergé et affouillé les seuils situés jusqu'au km 15. Le 11 février, il coupait la route de Tagaga à Doumsoa, le 9 mars il franchissait le seuil de Conquia (km 21) et enfin entre le 5 et le 9 avril, il atteignait son point extrême d'avancée au km 27,8. Le 11 avril, le débit pénétrant dans le Bahr El Ghazal ne parvenait plus à compenser les pertes par infiltration et par évaporation, de sorte que le front d'inondation avait déjà reculé d'une cinquantaine de mètres.

En 1956-1957, l'inondation du Bahr El Ghazal a été plus précoce et plus étendue que l'année précédente. Le 1er novembre 1956, une diguette construite par les riverains au km zéro était rompue et les eaux pénétraient rapidement dans le Bahr El Ghazal. Le 21 novembre, l'inondation atteignait le km 26, le 18 décembre le km 30, le

31 janvier le km 48, le 24 mars le km 52 et enfin le 12 avril le km 56. La progression des eaux jusqu'au km 28 a été beaucoup plus rapide que lors de l'inondation précédente car celle-ci avait débarrassé les seuils et laissé des mares non encore asséchées. Pendant toute l'année 1957, le Bahr El Ghazal a été alimenté par le lac, mais le débit entrant est resté insignifiant au km zéro entre le 15 mai et le 15 août.

Tableau 6.1

Reconstitution approximative des niveaux du lac Tchad à différentes époques.

ANNEE	Origine des observations	Observations diverses	Inondations BAHR EL GHAZAL	Niveau présumé du lac Tchad	
				Altitude (BOL IGN 1956)	Hauteur d'eau (Ech.BOL 1967)
1873	NATCHIGAL		sur 180 km	284,45	658
1870	ROHLFS		sur 120 km	283,75	588
1866	NATCHIGAL		sur 120 km	283,75	588
1854	BARTH		sur 95 km	283,45	588
1873	NATCHIGAL		sur 95 km	283,15	588
1900	FOUREAU		sur 95 km	283	528
1851	BARTH		sur 70 km	283	513
1892	FOUREAU		sur 60 km	282,97	513
Jan. 1957 (maxi)	Mission LOGONE-TCHAD		sur 60 km	282,67	510
Jan. 1956 (maxi)	Mission LOGONE-TCHAD		sur 55 km	282,42	480
Jan. 1920 (maxi)	TILHO		sur 30 km	282,27	455
Jan. 1955 (maxi)	Mission LOGONE-TCHAD		quelques km	281,97	440
Jan. 1951 (maxi)	Chef de District BOL			281,80	410
1903	AUDOIN	Rivage à moins de 1,2 km de NGUIMI		281,80	393
Jan. 1953 (maxi)	Chef de District BOL			281,80	393
Fév. 1904	TILHO	Lac scindé en deux parties		281,75	388
1909 (maxi)	TILHO	Lac asséché au nord parallèle Bosso		281,42	355
1905	FREYDENBERG	Sondages poche BAGA-KAWA		281,25	338
Nov. 1907 (maxi)	TILHO			280,80	293
Juin. 1908 (mini)	TILHO			280,10	223
Juill 1907 (mini)	TILHO			279,87	200

L'inondation de 1957-1958 n'a pas été suivie d'aussi près que celles des années précédentes. Le 5 octobre 1957, la limite d'inondation était revenue à sa position du mois d'avril 1957 vers le km 56 et, à la fin de mars 1958, elle atteignait son point extrême vers le km 65.

Les observations sur le Bahr El Ghazal n'ont pas été poursuivies les années suivantes sauf en 1962-1963 où une échelle a été installée à Tagaga (km 20). Elle a été lue de façon intermittente et a donné les résultats qui sont mis ci-dessous en parallèle avec les hauteurs nettes relevées simultanément à l'échelle de Bol :

Date	13-11 1962	31-01 1963	22-03 1963	25-04 1963	17-05 1963	30-06 1963	16-08 1963	08-11 1963	23-11 1963
Hauteur d'eau TAGAGA	70	241	223	216	207	180	165	205	212
Hauteur d'eau BOL	239	242	224	213	204	188	184		

Une digue de sable qui barrait l'entrée du Bahr El Ghazal a dû être submergée et partiellement érodée vers le 10 décembre. La pénétration des eaux a été assez rapide et jusqu'en juin les hauteurs relevées à Tagaga ont suivi des variations sensiblement parallèles à celles du niveau du lac. Cependant, l'inondation n'a pas dépassé le km 53 bien qu'en janvier 1963 le lac ait atteint un niveau jamais observé depuis le début du siècle. Il est fort probable que des barrages construits par les riverains pour protéger leurs plantations de mil ont freiné efficacement le flot d'inondation.

On a cherché à définir une relation entre la limite d'inondation du Bahr El Ghazal et le niveau maximal du lac à Bol pour une année donnée. La figure 6.1 montre qu'en première approximation on peut admettre une relation linéaire bien que les deux points relatifs aux années 1957-1958 et 1962-1963 s'écartent assez sensiblement de la droite adoptée. Le principal intérêt de cette droite est de permettre d'évaluer à 50 cm près les plus hauts niveaux atteints par le lac au siècle dernier. En fait, la relation n'est pas très bien définie parce que l'inondation est plus ou moins freinée par des barrages artificiels et parce qu'elle dépend, dans une certaine mesure, de conditions initiales telles que l'humectation du lit et le déblaiement des seuils par inondations antérieures.

Des mesures de débits ont été effectuées en différents points du Bahr El Ghazal. Les résultats obtenus sont récapitulés ci-après :

Date	Lieu	Débit m ³ .s ⁻¹	Date	Lieu	Débit m ³ .s ⁻¹
30.11.1956	KOLLOUM (km 14,5)	6,6	31.01.1957	km 30	6,8
30.11.1956	TAGAGA (km 18,5)	5,5	11.02.1957	km 30	5,0
30.11.1956	DJOUROU (km 28)	6,6	24.03.1957	km 30	5,3
28.12.1956	KOLLOUM	8,9	12.04.1957	km 30	3,7
28.12.1956	TAGAGA	3,5	13.12.1962	TAGAGA (km 18,5)	2,3
30.01.1957	KOLLOUM	10,5	31.01.1963	km 18,5	# 0

On a pu en déduire les volumes d'eau approximatifs qui ont pénétré dans le Bahr El Ghazal :

- $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1956
- $80 \text{ à } 90 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1957
- moins de $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ au droit de Tagaga entre le 15 décembre 1962 et le 15 juin 1964

Ces volumes sont largement supérieurs aux volumes occupés par les eaux en aval de Kolloum au moment du maximum de l'inondation. Les volumes ont, en effet, été grossièrement évalués à :

- $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1956
- $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1957.

Les pertes par évaporation et par infiltration sont donc considérables et ont représenté en 1956 et 1957 au moins les 2/3 du volume écoulé à Kolloum.

En comparaison des apports du Chari qui sont de l'ordre de $40 \times 10^9 \text{ m}^3$, les volumes qui s'échappent du lac pour entrer dans le Bahr El Ghazal restent toujours insignifiants. Il est impossible d'envisager sérieusement un aménagement de la dépression du Bahr El Ghazal pour régulariser le niveau du lac. Il faudrait prélever plus de $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ sur le lac pour abaisser son niveau de 1 cm seulement. Un aménagement hydro-agricole de la dépression, quoique moins utopique, ne paraît pas non plus offrir de possibilités très intéressantes.

Tout à fait indépendamment de son alimentation par le lac Tchad, la dépression du Bahr El Ghazal reçoit épisodiquement quelques apports localisés dus au ruissellement superficiel des eaux de pluies. En cas de précipitations intenses des ruisselets se forment sur les versants de la dépression et débouchent dans des mares dont le fond est colmaté par des dépôts argileux. Ces mares, qui constituent des points d'eau intéressants pour le bétail, sont particulièrement nombreuses dans la partie amont du Bahr El Ghazal. A Koro-Toro même, il en existe une qui peut, certaines années, rester en eau pendant plusieurs mois.

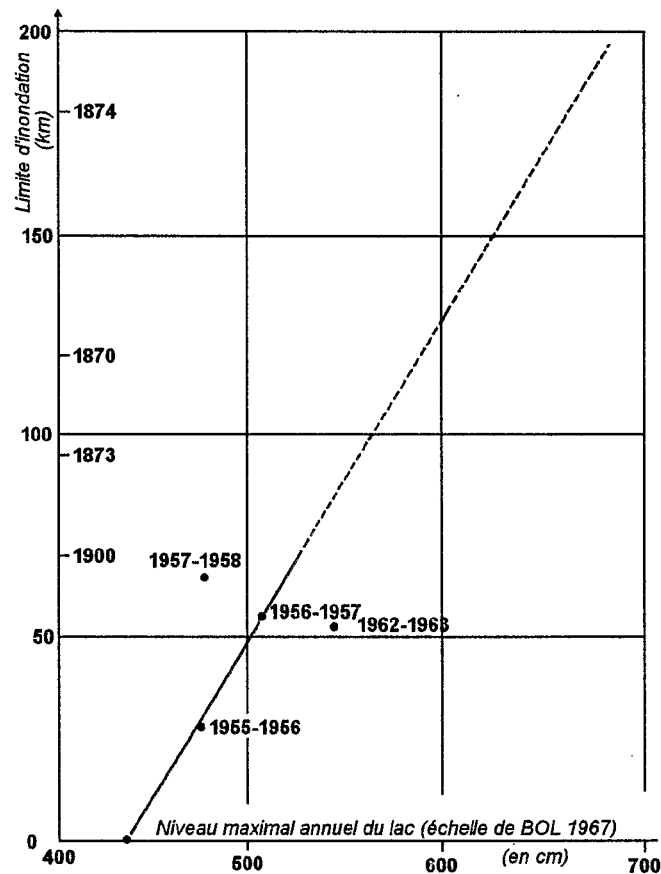


Figure 6.1

Relation entre la limite d'inondation du Bahr El Ghazal et le niveau maximal annuel du lac.

2. EQUIPEMENTS ET OBSERVATIONS LIMNIMETRIQUES

2.1. Station de Bol

C'est la station la plus ancienne du lac (voir figure 6.2.), celle dont les observations sont les plus régulières. En période de "Moyen Tchad" ou "Grand Tchad", elle a pu être considérée comme la station limnimétrique principale du lac. Elle est établie au pied de la dune où est située l'agglomération de Bol. Ses coordonnées sont les suivantes :

13°27' latitude nord

14°42' longitude est

La première échelle limnimétrique a été installée par la mission Tilho le 25 janvier 1908 et a été observée jusqu'au 27 décembre de cette même année. On en possède seulement des relevés graphiques. Une nouvelle échelle a été posée le 20 octobre 1912 et a été lue régulièrement jusqu'au 30 septembre 1919, avec une seule lacune importante entre le 1er janvier et le 30 avril 1917.

Les maximums et minimums des années 1907, 1909, 1912 et 1920 ont été presque tous reconstitués approximativement par Tilho. On possède ainsi une première série d'observations qui s'étend presque sur dix ans.

Ces observations sont approximativement rattachées à un même zéro mais on manquait d'indication précise sur l'altitude de ce zéro. C'est pourquoi A. Bouchardeau a fait réaliser en mars 1956 des mesures de profondeurs d'eau dans la zone dite "poche de Baga-Kawa" où Tilho avait lui-même effectué des sondages en février-mars 1908. La nature des fonds a été retrouvée identique et leur régularité à nouveau notée, avec en moyenne 2 m d'eau de plus qu'en 1908. En admettant que l'envasement de cette poche est négligeable, la différence des profondeurs moyennes mesurées et la connaissance des hauteurs brutes à l'échelle Tilho-1908 et à l'échelle Bouchardeau-1953 ont conduit à la conclusion que le zéro adopté pour les observations limnimétriques de la Mission Tilho était à environ 95 cm au-dessous de l'échelle installée en 1953. Le détail des calculs peut être retrouvé dans la première édition de la Monographie du lac Tchad (1957).

Ce calage approximatif est corroboré par le fait qu'en janvier 1920, les eaux du lac étaient tout près de rentrer dans la dépression du Bahr El Ghazal et que leur niveau devait alors être supérieur à celui de janvier 1955 et inférieur à celui de janvier 1956.

En mars 1976, dans des conditions voisines de celles où se trouvait le lac en 1908, A. Chouret a effectué une nouvelle série de sondages dans la poche de Baga-Kawa. Les mesures ont donné des résultats identiques à celles effectuées par Tilho en 1908 et ont permis de confirmer le calage du zéro de l'échelle de Tilho déterminé par A. Bouchardeau.

On retiendra le zéro des observations faites en 1908 qui était de :

$$279,92 \pm 0,10 \text{ m}$$

dans le système de nivellement IGN 1956. Le calage du zéro était tel que les cotes observées sont restées fréquemment négatives. Le zéro de l'échelle posée en octobre 1912 n'était pas exactement le même que celui de l'échelle de 1908, mais en était, semble-t-il, très voisin. Faute de données plus précises, on a admis qu'il était à la même altitude.

On possède quelques relevés limnimétriques relatifs à l'année 1912 mais ils sont difficilement utilisables, car on n'est pas très sûr du zéro de l'échelle. Ce zéro était à l'altitude de 280,35 m environ.

Des repères marqués sur un rônier par le Chef de District de Bol ont permis de reconstituer les niveaux des plus basses eaux de juin 1950 et des plus hautes eaux de janvier 1951 et janvier 1953.

En juillet 1953, la mission Logone-Tchad a installé une nouvelle échelle limnimétrique composée de deux éléments d'un mètre fixés sur un fer cornière. Cette échelle a d'abord été relevée de façon très épisodique, puis en 1954 et 1955 elle a été observée à peu près régulièrement tous les cinq jours. A partir de 1956, elle a été relevée, avec quelques lacunes, une fois par jour et à partir d'août 1957 deux fois par jour.

En 1964, l'échelle a été doublée d'un limnigraphe qui n'a commencé à fonctionner correctement qu'à partir de 1965. Ce limnigraphe a été déplacé à la station dite de Bol-Bérim au pied de la piste du terrain d'aviation. Cette station a son zéro calé sur celui de la station dite de Bol-Dune installée par la mission Logone-Tchad.

Le 24 janvier 1967, pour éviter des relevés négatifs, en cas de baisse importante du niveau du lac, le zéro de l'échelle a été abaissé de 3 m.

L'échelle a été nivelée par rapport à la borne de nivellement posée par l'IGN en mai 1954 dans la cour de la sous-préfecture de Bol. Suivant les systèmes de nivellement successifs adoptés par l'IGN, on a les résultats :

SYSTEME IGN 1954

Borne M (Matricule II)	: 291,71 m
Zéro échelle 1953	: 281,12 m
Zéro échelle 1967	: 278,12 m

SYSTEME IGN 1956

Borne M (Matricule II)	: 291,462 m
Zéro échelle 1953	: 280,87 m
Zéro échelle 1967	: 277,87 m

Dans cette Monographie, sauf spécification contraire, les niveaux du lac seront rattachés au zéro de l'échelle 1967 de Bol (Bol-Dune et Bol-Bérim) ou à la borne de nivellement M dans le système IGN 1956.

Pour suivre les très bas niveaux du lac enregistrés à Bol au cours de la période de sécheresse récente, des installations limnimétriques provisoires ont dû être mises en place à Bol-Bérim et à Bol-Dune en face du Garage de la SODELAC. Toutes les observations recueillies ont également été rattachées à l'échelle 1967 dans le système IGN 1956.

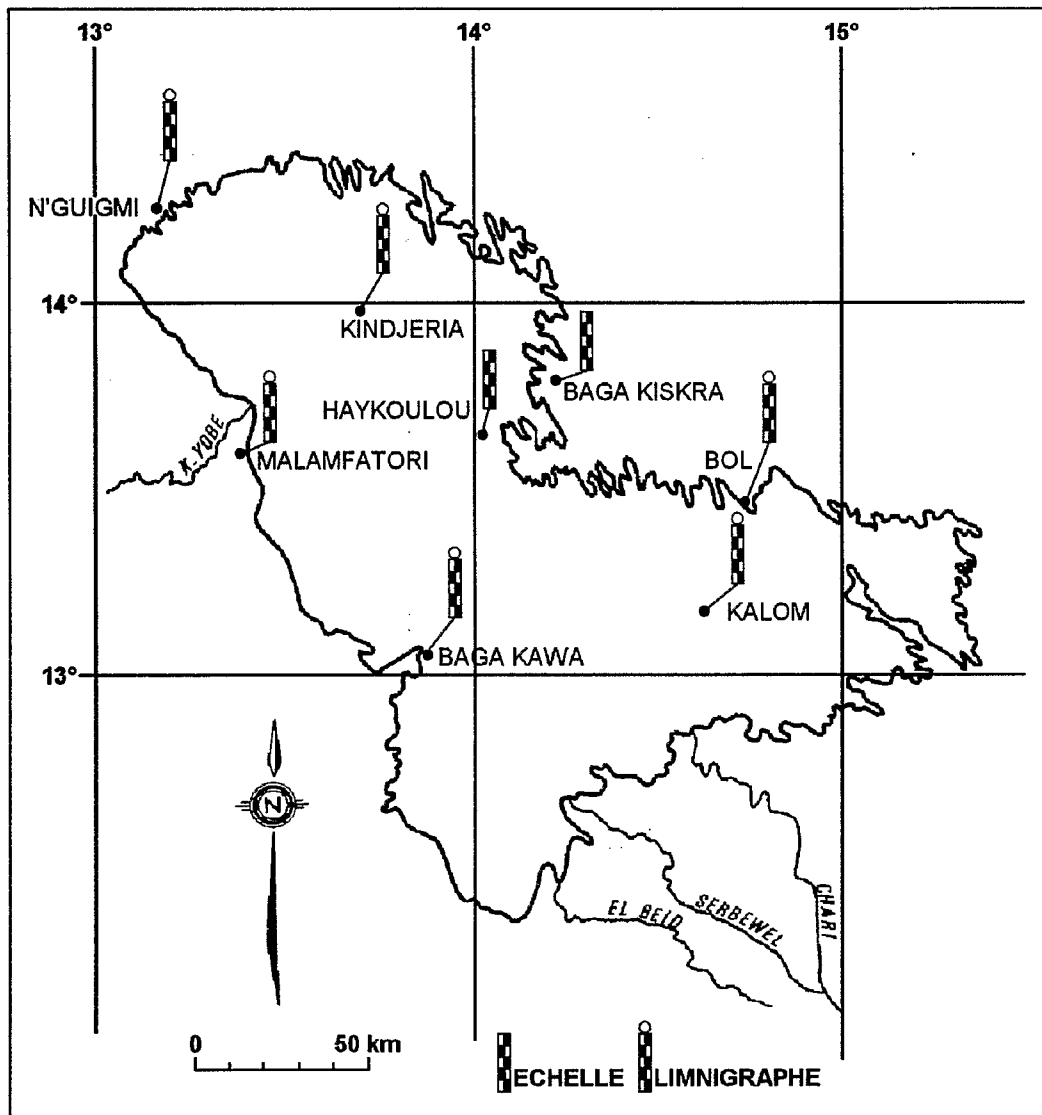


Figure 6.2

Stations limnimétriques principales du lac Tchad

2.2. Station de N'Guigmi

En juillet 1955, la mission Logone-Tchad a installé une échelle limnimétrique à 3,5 km du poste militaire de N'Guigmi.

Ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

14°14' latitude nord

13°08' longitude est.

On en possède des relevés à peu près complets :

- d'avril à décembre 1957 (relevés tous les cinq jours).
- de février 1962 à décembre 1963 (relevés tous les trois jours en général).
- de janvier à octobre 1966.
- de janvier à octobre 1967.

L'échelle de N'Guigmi, composée de deux éléments d'un mètre, a été rattachée à la borne de nivellement IGN située à l'ancien terrain d'aviation. Dans le système de nivellement de 1956 les altitudes sont les suivantes :

REPERE BORNE IGN N°51

(Matricule 9) : 282,401 m

Zéro échelle : 280,69 m.

Une nouvelle échelle a été installée le 11 janvier 1968 avec le même calage que la précédente.

Cette station a dû être abandonnée, vu le retrait important des eaux dans cette région lacustre. Une nouvelle station, équipée d'un limnigraphe, a été mise en place le 12 décembre 1972. Le zéro de la nouvelle échelle est à la cote :

278,22 m IGN 56

Depuis la fin 1973, cette station n'est plus représentative et a été de nouveau abandonnée. A l'heure actuelle, la région de N'Guigmi est totalement asséchée.

2.3. Stations diverses

Le 16 septembre 1954, une échelle a été posée à proximité du rocher le plus important d'Hadjer El Hamis dans un bras marécageux appelé **El Addada**.

Ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

15°52' latitude nord

14°50' longitude est.

Cette échelle a été observée pendant une année seulement, de septembre 1954 à août 1955.

Le rattachement de son zéro au nivellement IGN a donné dans le système 1956 les altitudes suivantes :

REPERE BORNE IGN N°30

(Matricule 21) : 289,414 m
zéro de l'échelle : 280,94 m

En 1953 et 1954, deux échelles avaient été installées sur l'estuaire du Chari. Elles n'ont jamais été observées régulièrement et ont été détruites assez rapidement par des bancs flottants de papyrus.

Une échelle a été posée en avril 1956 à **Magomeri**, village voisin de Boso situé près de l'embouchure de la Komadougou. Elle n'a jamais été observée régulièrement.

Le 13 décembre 1962, une échelle a été installée à **Tagaga** sur le Bahr El Ghazal à quelques kilomètres du lac. Ses coordonnées sont les suivantes :

13°00' latitude nord
15°28' longitude est.

Cette échelle destinée à repérer le niveau d'inondation de la dépression du Bahr El Ghazal a fait l'objet d'observations irrégulières. Elle a été en particulier relevée à peu près une fois par mois de décembre 1962 à avril 1963. Elle a déjà été évoquée en 1.2.

Le 27 janvier 1967 a été mis en service un limnigraphe à **Kare-Katia**, dont les coordonnées géographiques sont les suivantes :

13°55' latitude nord
14°12' longitude est.

Ce limnigraphe, situé dans l'archipel de la partie nord-ouest du lac, a été doublé d'une échelle limnimétrique. Son zéro n'a pu être rattaché au nivellement IGN. Il a toutefois été rattaché à une borne-repère fixe située au-dessus des plus hautes eaux du lac. La dénivelée mesurée entre le repère et le zéro est égale à 7,019 m.

Cette station a été suivie jusqu'en 1970 seulement.

2.4. Stations nouvelles créées pour suivre l'évolution hydrologique du lac pendant la phase de sécheresse.

Dès l'étiage lacustre de 1973, de nouvelles stations limnimétriques ont dû être créées pour suivre l'évolution du milieu, les anciennes stations principales du lac, Bol et N'Guigmi, n'étant plus représentatives.

2.4.1. Station de Malamfatori

Une échelle ancienne dite "Malamfatori II" existait à la station fédérale des Pêches du Nigeria. Ses coordonnées sont les suivantes :

13°36' latitude nord
13°21' longitude est.

Cette échelle graduée en système anglo-saxon a été lue régulièrement à partir de 1962 jusqu'à 1971, date à laquelle elle a été hors d'eau. Les relevés sont publiés sous forme de graphiques dans les rapports annuels du "Federal Fisheries Service, Lake Chad Research Station".

Cette ancienne échelle a été complétée le 6 juillet 1973 par un élément (700) monté sur tube métallique dans l'axe de l'appontement de la station des Pêches. Le 26 septembre 1973, des mires limnimétriques (800 et 600) ont été ajoutées pour compléter cette nouvelle échelle.

La dénivelée entre le zéro de l'échelle ORSTOM 1973, dite "échelle station", est de - 8,576 m par rapport au zéro de l'échelle C de Malamfatori II.

Le retrait des eaux étant spectaculaire et très rapide dans cette région lacustre, il a été nécessaire de mettre en place, au fur et à mesure de l'évolution du milieu, de nouvelles échelles qui ont été raccordées par la suite à l'échelle « station » et plus tard au nivellement général.

Le 13 mars 1974, une échelle dite "N.E. n°1" a été implantée bien au large de la station des Pêches dans une zone susceptible de rester encore longtemps en eau. Son calage est le suivant :

$$H(\text{N.E.n}^{\circ}1) \text{ en m} = H(\text{éch. station})\text{m} + 0,18 \text{ m}$$

Le 23 août 1974, un limnigraphe a été mis en place non loin de "N.E.n°1" et calé sur une nouvelle échelle dite "N.E.n°2".

Le raccordement de "N.E.n°2" par rapport à l'échelle "station" est :

$$H(\text{éch. station})\text{m} = H(\text{N.E.n}^{\circ}2)\text{m} + 0,38 \text{ m}$$

Grâce à un nivellement effectué par des ingénieurs d'un bureau d'études anglais (Sir Mac Donald and Partners, Cambridge-England), le zéro de l'échelle ORSTOM-1973 (échelle station) par rapport à la borne F.A.O. rattachée à la borne IGN (matricule LQ 22) de Bosso (Niger) est à l'altitude :

$$270,98 \text{ m IGN 56}$$

L'enregistrement du limnigraphe est obtenu en système métrique. Les lectures sont effectuées sur la nouvelle échelle "NE n°2" et sont raccordées à l'échelle "station". La surveillance de la station est assurée par un agent du service des Pêches et, depuis la première installation, les observations sont parfaitement régulières et correctes.

2.4.2. Station de Baga-Kawa

Cette station a été ouverte le 9 octobre 1973 à 7 km au SSE de l'agglomération de Baga-Kawa et équipée d'un limnigraphe. L'intérêt principal de cette station est l'étude des franchissements à travers la Grande-Barrière au niveau de la passe de Baga.

Le 26 septembre 1975, l'ensemble des installations a été déplacé en se rapprochant de la ville de Baga, à 5 km au SSE. Les observations ont été souvent épisodiques du fait des difficultés d'accès et de l'impossibilité de recruter un observateur.

Le 15 octobre 1976, la station a été définitivement installée à l'embarcadère du "Lake Chad Fisheries development Project-PNUD-FAO".

Le limnigraphe OTT-X, mensuel, réduction 1/10, fonctionnait parfaitement et grâce à de fréquentes tournées depuis 1975, les observations étaient continues et correctes.

Les coordonnées de la station sont les suivantes :

13 °04' latitude nord

13 °49' longitude est

Le calage approximatif du zéro de l'échelle est :

278,88 ± 0,10 m IGN 56

Cette station était destinée à devenir une des stations de base du nouveau réseau limnimétrique lacustre.

2.4.3. Station de Kindjéria

La station de l'île de Kindjéria a été ouverte le 4 juillet 1973. Ses coordonnées sont:

13 °57' latitude nord

13 °41' longitude est

Un premier élément (400) a été posé sur un fer UPN de 80 en face du dispensaire de la mission évangélique. La dénivelée entre la base de l'élément (400) et le repère de la borne ORSTOM est de - 3,955 m.

Le 12 août 1973, l'installation a été complétée par la mise en place d'un élément (500) et d'un limnigraphe OTT-X, révolution hebdomadaire et réduction 1/10. Le 29 octobre 1973, un élément (300) a été posé, suivi le 8 juillet 1974 d'un nouvel élément inférieur (200).

Le mouvement du limnigraphe, étant donné l'atténuation des effets du vent et les lentes variations du niveau, a été transformé en révolution mensuelle le 31 août 1974. A la fin de novembre 1974, le limnigraphe s'est retrouvé dans une zone asséchée et a été provisoirement démonté. Jusqu'à cette date, les observations ont toujours été régulières et les enregistrements obtenus corrects.

A partir du début 1975, cette région lacustre peut être considérée comme étant en voie d'assèchement avec des remises en eau épisodiques et de courte durée. Le dispensaire de la mission évangélique ayant été fermé par suite du départ des populations, il a été impossible de trouver un observateur. Pendant le premier semestre 1975, les contrôles effectués lors des tournées des hydrologues ou des hydrobiologistes ont néanmoins permis de noter la date du retour de l'eau dans la région et de reconstituer le limnigramme.

Le 29 août 1975, un nouvel emplacement acceptable pour le limnigraphe a pu être trouvé à 1 km environ des échelles de la station dans une anse du rivage NW de l'île. Les observations sont de nouveau continues depuis cette date mais ont nécessité un déplacement en avion tous les mois, l'avion étant alors le seul moyen d'accès à cette station. A la fin juillet 1977, un élément (100) a été ajouté pour compléter l'installation limnimétrique de Kindjéria. Les enregistrements du limnigraphe sont calés sur le zéro de l'échelle station.

Cette station est le poste d'observation de base pour l'étude hydrologique de la cuvette nord. Lors du retour à un stade "Moyen Tchad", elle devra être maintenue et son infrastructure améliorée.

Elle n'est malheureusement plus suivie depuis février 1978 à la suite des événements politiques au Tchad.

Le calage approximatif du zéro de l'échelle est :

274,18 m dans le système IGN 56 ± 0,10 m

2.4.4. Station de Kalom

La station de l'île de Kalom a été ouverte le 14 juillet 1973 à la position géographique de :

13°11 latitude nord

14°35 longitude est.

A cette date où le niveau du lac était le plus bas enregistré jusqu'alors, l'installation limnimétrique consistait uniquement en deux éléments (000 et 100) et un limnigraphe OTT-X mensuel, réduction 1/10. Le 7 juin 1976, l'infrastructure de la station a été entièrement refaite avec l'implantation d'une tour et 4 m de gaine de limnigraphe. Cette station était la station de base de la cuvette sud, au cours de la période des très bas niveaux lacustres.

Le zéro de l'échelle de l'île de Kalom était à la cote :

278,40 ± 0,10 m dans le système IGN 56

Les observations se sont toujours poursuivies sans lacune jusqu'à la destruction de la station en août 1978 par des îles flottantes, lors d'une violente tornade qui aurait fait plusieurs morts parmi les pêcheurs.

2.4.5. Station de Baga-Kiskra

La station a été ouverte le 14 mai 1973. Ses coordonnées sont :

13°48' latitude nord

14°09' longitude est.

Elle comprend 3 éléments (000, 100 et 200). Le zéro de l'échelle est à -5,689 m par rapport à la borne ORSTOM et son calage est dans le système IGN 56 : 277,16 m ± 0,10 m.

Le 12 mai 1974, un élément négatif (800) a été installé. Depuis le début du mois de décembre 1974, cette région lacustre est totalement asséchée et n'a jamais connu de remise en eau, même épisodique, lors des franchissements du flot lacustre à travers la Grande-Barrière aux époques du maximum annuel de la cuvette sud.

2.4.6. Station de Haykoulou

Un premier repère de mesure a été installé par les pasteurs de la mission évangélique en octobre 1971 dès les premières manifestations évidentes de la baisse du lac dans cette région. Cette première échelle a été suivie régulièrement jusqu'en mars 1973. Un élément limnimétrique provisoire, approximativement calé à -1,52 m a été installé le 20 septembre 1973. Cette échelle a été lue épisodiquement, puis des observations approximatives ont été effectuées à partir d'un point de repère non déterminé avec précision. Cette station, étant donné son faible intérêt pour l'étude hydrologique du lac, car très partiellement remise en eau au cours de la période de sécheresse, a été abandonnée. Le 26 février 1977, une nouvelle échelle provisoire calée approximativement sur la base de celle de 1973 a été mise en place. Elle est lue régulièrement lors des courtes remises en eau de cette région.

(Mission et annexes détruites par la guerre civile en février 1978).

Ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

13°37' latitude nord

14°04' longitude est.

Le zéro de l'échelle n'a pas été rattaché au nivellement général.

2.4.7. Stations diverses

Les ingénieurs responsables du "South Chad Irrigation project" de Ngala (Nigeria) nous ont aimablement communiqué les relevés des échelles dites "SOUTH CHAD INTAKE" et "KIRINAWA".

Ces différentes échelles situées sur la partie SSW du lac en territoire nigérian et dont les zéros ont été nivelés, ne présentent qu'un intérêt limité pour l'étude hydrologique générale du lac Tchad, mais nous ont été d'un grand secours pour le calage des zéros des nouvelles échelles implantées sur le lac dans la cuvette sud, comme nous le verrons ci-dessous.

2.4.8. Note sur le calage des zéros des échelles limnimétriques nouvelles installées en 1973

Le rattachement au système IGN 1956 des différentes échelles installées en 1973, dont nous avons donné lors des paragraphes précédents le calage approximatif à $\pm 0,10$ m, a été effectué selon les méthodes suivantes :

- En ce qui concerne les échelles de l'île de Kalom et de Baga-Kawa dans la cuvette sud, nous avons considéré qu'au maximum de la remise en eau de la cuvette sud en décembre 1975, où toute cette région du lac était entièrement en communication, la remontée du plan d'eau, mesurée aux différentes stations limnimétriques, a été sensiblement du même ordre de grandeur (2m). La cote maximale enregistrée, en valeurs lissées graphiquement pour éliminer les variations journalières dues au vent, a été de 281,39 m à Bol (archipel SE) et à "SOUTH CHAD INTAKE" (SSW) à des dates voisines compte tenu de la propagation de l'onde de crue.

A partir de là, il a été possible de caler le zéro de l'échelle de Kalom et de Baga-Kawa en considérant que tous les maximums observés se sont produits à des dates voisines, avec des montées identiques à partir d'un niveau d'étiage où toute la cuvette sud était en communication.

- Pour ce qui est de la cuvette nord, les seules échelles rattachées au nivellement général sont celle de N'Guigmi et de Malanfatori. Cette dernière station étant située sur le rivage ouest du lac, où l'effet du vent est trop sensible par rapport aux autres points d'observation aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies, nous avons utilisé uniquement des correspondances d'échelles entre N'Guigmi, Kindjéria et Baga-Kiskra à l'époque où la région de N'Guigmi était encore en eau et où la cuvette nord était isolée du reste du lac et correspondait donc à une même étendue d'eau soumise à la seule évaporation (fig. 6.3 et 6.4).
- Ces différentes estimations, à l'approximation près ($\pm 0,10$ m) et compte tenu des renversements dus au vent en avril et octobre pour les stations de la cuvette nord, semblent acceptables et confirmées par rapport aux échelles dont le rattachement au nivellement général est connu, comme nous le verrons dans le chapitre 9 en évoquant la sécheresse des années 1970.

Pour les échelles de la cuvette sud, ce calage a été également confirmé par les observations et les résultats des campagnes 1974, 1976 et 1977.

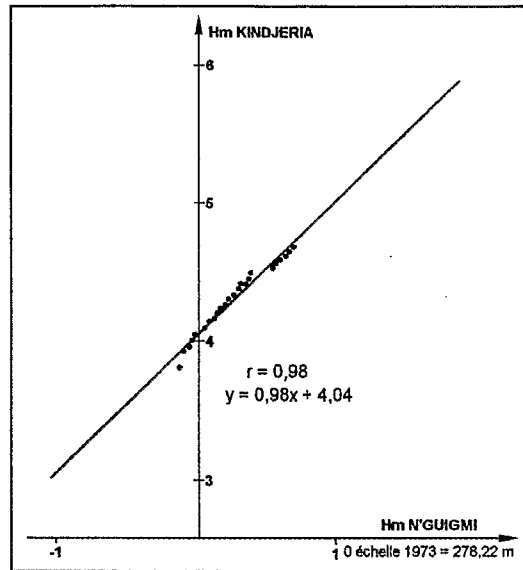


Figure 6.3

Correspondance des échelles N'Guigmi et Kindjéria

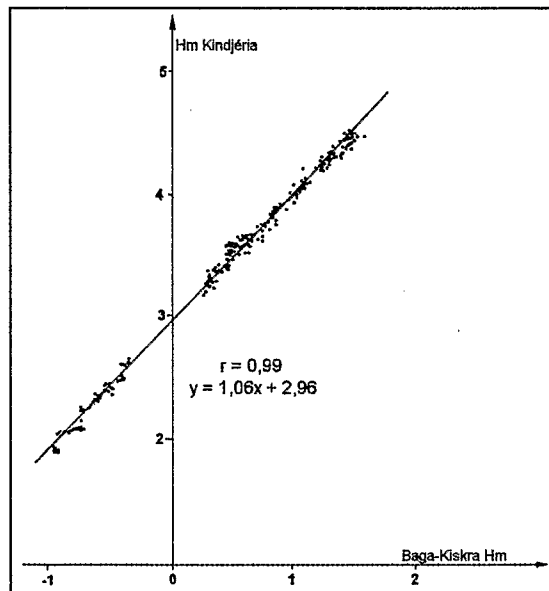


Figure 6.4

Correspondance des échelles Kindjéria et Baga-Kiskra

3. ASPECT DES VARIATIONS DU NIVEAU DU LAC

3.1. Fluctuations saisonnières et rapides

Si l'on porte sur un graphique les variations de niveau du lac, on s'aperçoit que la courbe obtenue pour une année donnée comporte des petites fluctuations rapides qui oscillent autour d'une courbe moyenne très régulière (fig. 6.5).

La courbe moyenne a une allure sinusoïdale ; elle présente un maximum entre la fin novembre et la fin janvier et un minimum dans le courant de juillet. Ces variations saisonnières découlent du régime hydrologique des tributaires du lac et essentiellement de celui du Chari. De juillet à décembre ou janvier, le Chari a sa crue annuelle : les apports sont alors supérieurs aux pertes par évaporation du lac et le niveau monte. De janvier à juillet, au contraire, l'évaporation est prépondérante de sorte que le niveau redescend.

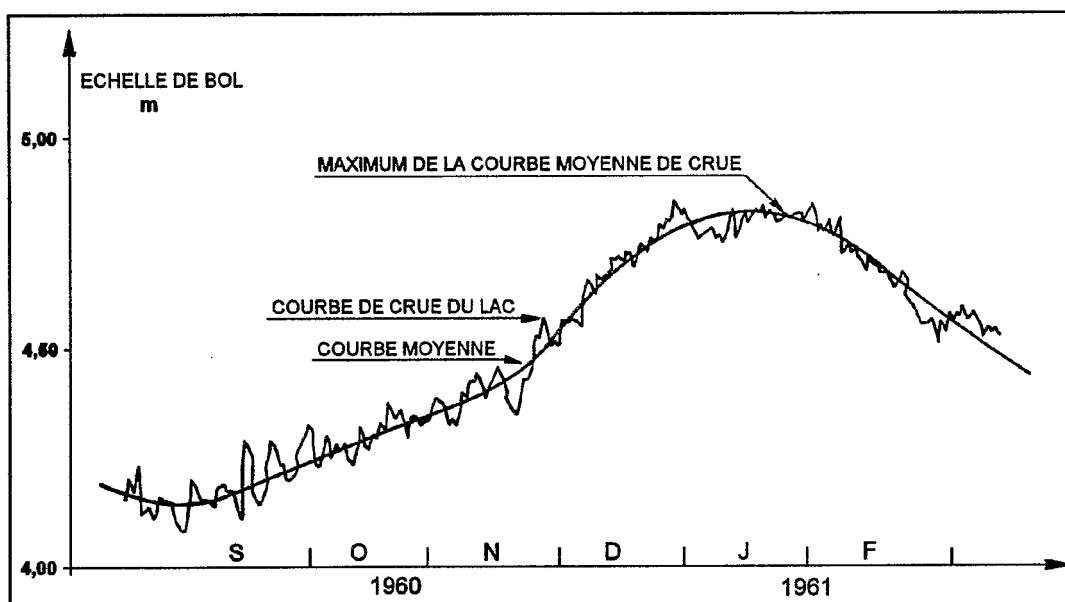


Figure 6.5

Exemple de lissage graphique

L'amplitude des variations saisonnières est en général de l'ordre d'un mètre, mais elle peut s'écarter notablement de cette valeur, comme on le verra plus loin.

Les fluctuations rapides du niveau, telles que les font apparaître les relevés limnimétriques quotidiens de la station de Bol, ont une allure pseudo-périodique, c'est-à-dire que les écarts à la courbe moyenne tendent alternativement à être positifs puis négatifs pendant plusieurs jours consécutifs. Les séries d'écarts positifs ou négatifs ne durent souvent pas plus de quatre ou cinq jours, mais elles peuvent parfois atteindre dix ou même quinze jours. Leur amplitude a été étudiée par B. Billon (1965) pour les mois de décembre et janvier, époque du maximum annuel.

Sur la base des relevés de 18 h effectués entre 1957 et 1962, il a obtenu les résultats suivants pour les écarts positifs :

- Fluctuation maximale de fréquence annuelle : 11 cm
- Fluctuation maximale de fréquence décennale : 18 cm

B. Billon a noté également qu'au voisinage du maximum la courbe moyenne calculée sur la base des relevés de 18 h était située un peu au-dessus de celle calculée sur la base des relevés de 6 h. L'écart varie entre 0 et 6 cm et admet une valeur moyenne de 2 cm.

Les enregistrements continus du limnigraphe de Bol, qui a été mis en service en 1965, ont montré que les fluctuations rapides étaient, en fait, plus complexes que ne le laissent supposer un ou deux relevés par jour. Dans une même journée des variations de niveau comprises entre 5 et 10 cm ne sont pas rares. Dans certains cas, elles peuvent même dépasser 15 cm. Le plus souvent le maximum des oscillations journalières se situe entre 18 et 24 h et le minimum vers le milieu de la journée, mais cette règle est loin d'être absolue.

En définitive, on admettra que la fluctuation maximale que l'on peut observer une fois en dix ans est de 20 cm en moyenne pendant 24 h et de 25 cm pendant 1 heure ou deux, non compris l'effet de la houle.

Les fluctuations rapides du niveau peuvent être attribuées essentiellement à l'influence des vents qui tendent à entraîner dans leur mouvement les eaux de la surface du lac et engendrent ainsi des courants et mouvements oscillatoires complexes désignés généralement sous le nom de "seiches". Des différences de pression barométrique ou des averses intenses localisées sont sans doute également susceptibles de provoquer des seiches de faible importance.

Ces phénomènes sont assez complexes et une étude poussée nécessite que l'on dispose d'enregistrements limnimétriques continus s'étendant sur plusieurs années et portant sur plusieurs points du lac. Les nouvelles stations créées en juillet 1973 n'ont pu être suivies suffisamment longtemps pour que l'on puisse en tirer des interprétations intéressantes. Il convient également de considérer qu'au début de leur mise en service en 1973 et même à certaines périodes des basses eaux de 1974, ces stations ne représentaient que des régions fragmentaires du lac (coupure du lac en deux cuvettes, isolement de l'archipel sud-est de la cuvette sud). Du fait également de l'important développement de la végétation palustre, on ne note plus aucune fluctuation rapide du niveau à certaines stations depuis 1974. C'est en particulier très net à Malamfatori et pour certaines périodes à Bol. On n'enregistre plus alors que la courbe de variation saisonnière du niveau lacustre. Ce phénomène a été également constaté les dernières années à la station de l'île de Kindjéria à la suite du dense couvert végétal installé au cours des phases d'assèchement de cette région.

En revanche à l'île de Kalom, au sein de la poche des eaux libres du sud, où les fluctuations journalières enregistrées sont généralement de faible amplitude, on a noté en septembre 1975 et 1976 des brutales variations du niveau au cours d'une même journée, en l'espace de quatre heures et en moyenne de l'ordre de 20 cm avec des maximums de 30 cm (fig. 6.6). Ce phénomène n'a plus été enregistré et n'a pas été retrouvé aux autres stations.

Cette étude sera à poursuivre lorsque le lac sera revenu à un stade "Moyen Tchad" et débarrassé de toute la végétation actuelle.

On admettra pour ce qui suit que les niveaux moyens journaliers du lac jusqu'en 1972 à Bol sont convenablement représentés par les relevés quotidiens de 6 h ou par les moyennes arithmétiques des relevés biquotidiens de 6 h et 18 h quand ceux-ci existent. A partir de 1973, les relevés sont ceux de 6 h aux différents points d'observation du lac.

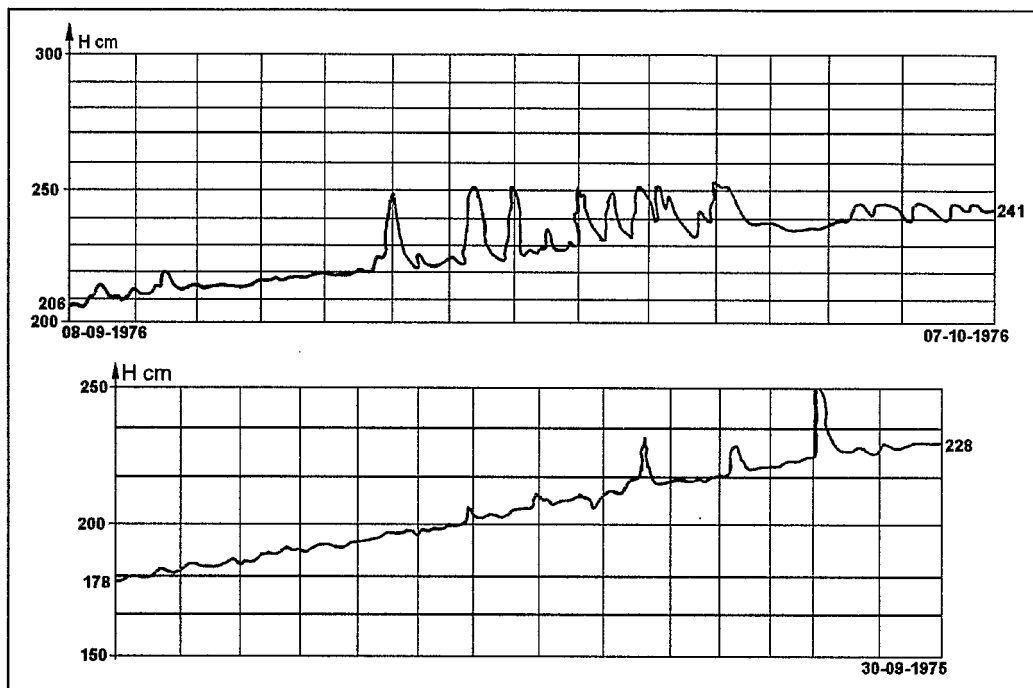


Figure 6.6

Limnogrammes du lac Tchad à l'île de Kalom

De plus, à partir de ces niveaux moyens journaliers appelés "hauteurs d'eau brutes", on a cherché à déterminer des "hauteurs d'eau nettes" ou "hauteurs d'eau lissées" après élimination des fluctuations rapides. Ces dernières valeurs correspondent à la courbe moyenne des variations de niveau du lac obtenue après "lissage" des oscillations aléatoires que nous avons attribuées aux seiches. Cette opération de lissage a été effectuée jusqu'en 1968 suivant le procédé des moyennes mobiles sur quinze jours. Ainsi, la hauteur nette du jour J est par définition la moyenne arithmétique des hauteurs brutes relevées entre le jour J-7 et le jour J+7.

Par la suite, nous avons uniquement adopté le procédé du lissage graphique étant donné les très faibles fluctuations journalières comme nous l'avons signalé plus haut. Pour certaines périodes récentes et à de nombreuses stations, il n'y a d'ailleurs pas de différence entre hauteur d'eau brute et hauteur d'eau nette. De même, pour les quelques années dont les relevés sont incomplets (1908, 1932, 1953, 1954 et 1955), ce même procédé de lissage graphique a été appliqué.

3.2. Fluctuations interannuelles.

Rappel des grands traits de l'hydrologie du lac.

La variation du niveau du lac, situé dans une cuvette endoréique, est le résultat d'un équilibre entre les apports des tributaires d'une part et les pertes par évaporation d'autre part, les pertes par infiltration et fuites marginales n'intervenant que pour une faible part dans le bilan.

Formé d'une tranche d'eau peu profonde, le lac est tout particulièrement vulnérable aux effets de la sécheresse.

La totalité des apports est en année moyenne d'environ 48 milliards de m³. Le fleuve Chari en fournit à lui seul 83% qui peuvent être chiffrés à la station de mesure de N'Djaména. Le restant est donné par les tributaires secondaires (El Beïd, Yedseram et Komadougou-Yobé), dont les débits sont très faibles comparés à ceux du Chari, et par les précipitations tombant directement à la surface du lac qui ne représentent en général que 14% de l'ensemble des apports.

Les fluctuations annuelles du niveau du lac suivent donc, avec un certain décalage, les variations de l'hydrogramme du Chari ; le niveau du lac connaît ainsi chaque année un minimum en juillet et un maximum en décembre-janvier.

En période d'hydraulicité normale, tant que le volume stocké est suffisant, le lac Tchad, à l'échelle interannuelle, se comporte comme un vaste réservoir régulateur qui amortit sensiblement la variabilité des apports annuels. Mais, réagissant fidèlement quoique assez lentement aux variations du climat, il constitue un bon indicateur de tendance climatique pour la région, ce qui apparaît sur la figure 6.7, notamment en ce qui concerne la sécheresse des années 1970.

Les fluctuations interannuelles du niveau du lac traduisent donc l'évolution climatique de la région avec sa succession de phases humides et de phases sèches. Celles-ci sont de durée inégale et, faute d'une périodicité déterminée, on ne peut parler de pseudocycles. Les reconstitutions de niveau qui ont été faites montrent une tendance globale à la baisse depuis la deuxième moitié du XIXe siècle. L'amplitude de la baisse est de l'ordre de 5 m.

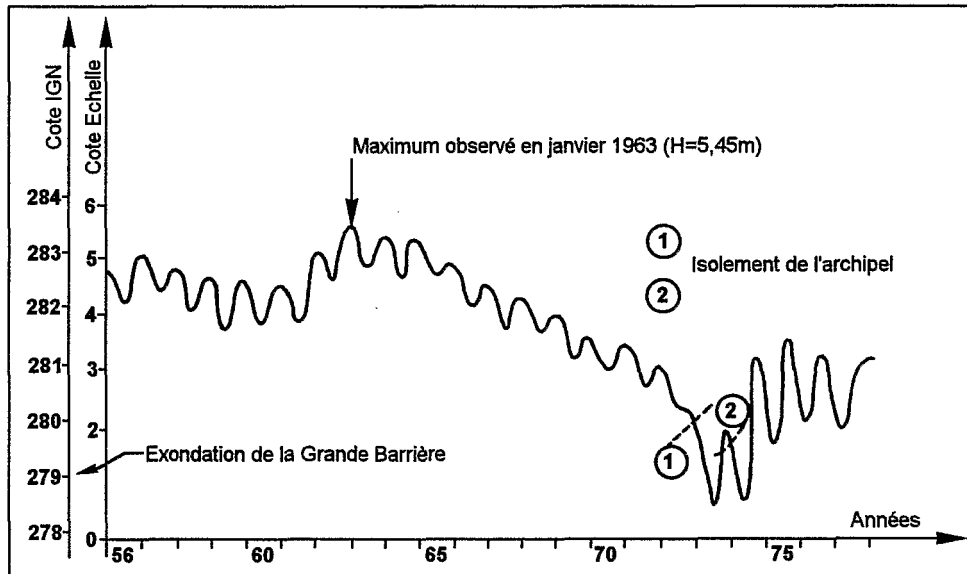


Figure 6.7

Variation interannuelle du niveau d'eau à la station de Bol de 1956 à 1978.

Au XXe siècle, deux périodes humides sont apparues dans les années 1920-1930 et les années 1950-1960 (qui ont été particulièrement étudiées). Sans que l'on puisse parler de « Grand Tchad », le niveau du lac caractérise davantage un stade « Moyen Tchad ». Trois phases sèches encadrent ces périodes humides.

A la fin 1907 et début 1908, Tilho décrit un lac au stade "Petit Tchad" (fig. 1-5) comparable aux courtes périodes de remise en eau et d'assèchements actuels de la partie nord. A l'époque des observations de Tilho, il existait

également sur la Grande Barrière une importante forêt d'ambatches qui freinait le franchissement des eaux. Tilho écrit : "Depuis quelques années, la végétation palustre s'est développée dans une proportion surprenante dans tout le lac et les rives de certaines îles sont bordées par une ceinture d'herbes et d'ambatches haute parfois de 6 à 7 m, le diamètre des troncs d'ambatches pouvant atteindre 45 cm". Cette description ancienne peut s'appliquer parfaitement aux observations actuelles. Des documents et des observations plus récentes font également état d'un même phénomène au cours des années 1940, bien que la sécheresse "1940" ne soit en rien comparable en sévérité à celles de "1913" et des années récentes.

Toujours d'après le même auteur, le lac a été scindé en deux cuvettes en juillet 1913.

Les périodes anciennes de très bas niveaux ont été suivies de phases de retour à de hauts niveaux du stade "Moyen Tchad" ou avoisinant celui du "Grand Tchad", sans jamais cependant atteindre les très hauts niveaux de la fin du siècle dernier.

Mais c'est évidemment l'évolution hydrologique depuis 1971 qui marque jusqu'aux années 90 la phase de sécheresse la plus importante et la plus longue du siècle.

A partir des données recueillies aux nouvelles stations limnimétriques installées en 1973, dont les zéros ont été rattachés approximativement au nivellement général (cf. paragraphe 2.4.8), et des cotes absolues des zéros des échelles anciennes, on peut tracer les différentes courbes de la figure 6.8 depuis 1971. A cette époque, bien que déjà à un niveau très bas, le lac constituait encore un seul plan d'eau comme le prouve la concordance des relevés enregistrés à Bol et à N'Guigmi.

La figure 6.8 met en évidence les effets de la sécheresse avec l'isolement en 1973 de l'archipel de Bol, la coupure en deux cuvettes distinctes du lac, la remise en communication des différentes régions du sud, à partir de fin 1974. Malgré les faibles apports provoquant une remontée du niveau de courte durée de la cuvette nord, on assiste à l'assèchement de cette région lacustre. La région de N'Guigmi est totalement asséchée à partir de mars 1974 et celle de Baga-Kiskra à partir de décembre 1974.

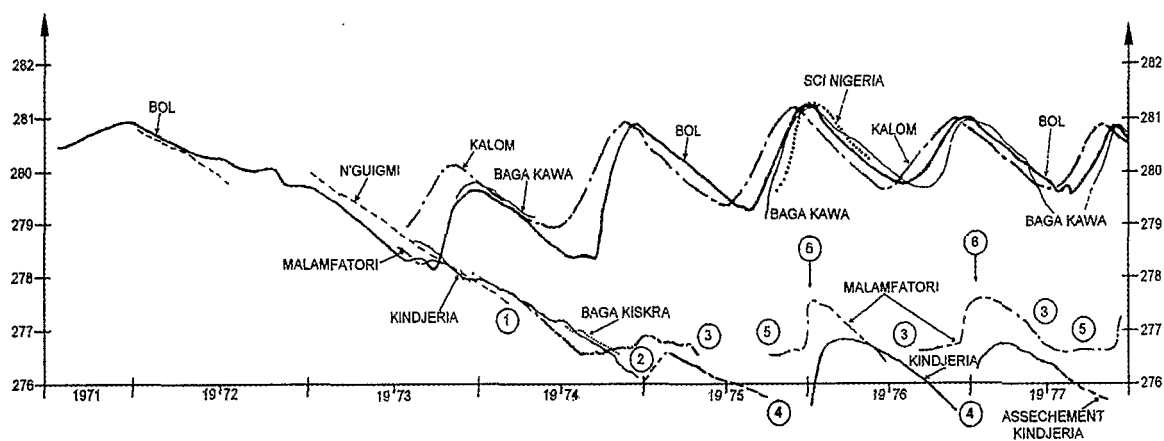


Figure 6.8

Limnigrammes du lac Tchad de 1971 à 1977. 1 Assèchement de la région de N'Guigmi ; 2 Baga-Kiskra à sec ; 3 Assèchement de la région de Malamfatori ; 4 Assèchement total de la Cuvette nord ; 5 Arrivée de la crue de la Komadougou Yobé et crue lacustre ; 6 Remise en eau

Par rapport aux relevés pour lesquels le rattachement IGN est connu (N'Guigmi et Malamfatori), le calage des relevés de Baga-Kiskra et Kindjéria, compte tenu également des renversements dus au vent en avril et octobre, semble acceptable. L'allure générale du limnigraphe de Kindjéria en particulier est bien représentative de l'évolution du milieu physique. Le palier observé en août 1977 à cette station traduit l'influence des fortes précipitations tombées au cours de ce mois sur une surface liquide réduite et de faible profondeur. Le retour de la cuvette sud à un cycle annuel est alors confirmé pour un temps, alors que la lenteur, et donc les difficultés de pénétration du flot liquide à travers le barrage végétal de la Grande Barrière, apparaissent nettement. La différence de niveau entre partie nord et partie sud est de l'ordre de 4m au cours de l'étiage et lors des maximums de remise en eau de 1976-1977, ainsi qu'en décembre 1977. Dans les années qui suivent les observations seront malheureusement plus discontinues. On assistera alors à l'accentuation et à la poursuite de cette période déficitaire dans les années 80 et au début des années 90 avec remises en eau épisodiques lors d'années plus humides. L'ensemble de cette période fera l'objet de développements plus complets en fin d'ouvrage.

4. HAUTEURS LIMNIMETRIQUES OBSERVEES

Nous présentons ici les données essentielles qui permettront aux chapitres suivants d'étudier les principales caractéristiques du régime hydrologique du lac. Ces données sont rassemblées dans trois tableaux.

Les deux premiers (tableaux 6.2 et 6.3) donnent année par année les hauteurs brutes et nettes observées à Bol le premier jour de chaque mois.

Le troisième tableau (6.4) donne les hauteurs nettes maximales et minimales observées chaque année à Bol, avec leur date d'apparition. L'année considérée n'est pas l'année calendaire mais une année hydrologique qui s'étend du 1er août au 31 juillet suivant. Ainsi le maximum, situé en décembre ou janvier et le minimum, qui lui fait suite en juillet, sont compris dans la même année hydrologique.

D'avril à novembre, d'abord en 1973, puis de nouveau en 1974, la station de Bol cesse d'être représentative du niveau du lac en voie d'assèchement. Pour chacune de ces deux périodes, le processus est le même (A. Chouret, J. Lemoalle, 1974) : isolement d'avec les eaux libres de la cuvette sud, tarissement progressif de la mare où est implantée le limnigraphe (avec quelques remontées dues aux averses locales) puis remise en eau brutale, lorsque le front d'eau de la cuvette sud franchit la végétation dense qui s'est rapidement développée sur les fonds exondés au cours des mois précédents. Cette interruption de représentativité a pu être compensée (G. Vuillaume, 1981) par une reconstitution des cotes théoriques (abolissant l'isolement) basée sur la correspondance observée au cours des trois dernières années normales suivantes entre les échelles de Bol et de Kalom ; ces cotes reconstituées figurent en italique dans les tableaux 6.3 et 6.4.

Dans le tableau 6.2, nous avons fait figurer l'information complète qui nous est parvenue pour les années qui ont suivi la période des études hydrologiques de l'Orstom. Les valeurs signalées « 0 » correspondent à la mise hors d'eau de la station de Bol dûment constatée dans les documents des services hydrologiques tchadiens ou de la cellule Agrhymet. Nous avons signalé par un tiret les périodes d'assèchement avéré à la station de Bol et laissé en blanc les lacunes d'observations qui comportent elles-mêmes de très probables et longues périodes sans relation avec le lac. Les observations de Kalom longtemps interrompues ont été épisodiquement reprises sur de nouvelles installations dont le rattachement à l'ancien zéro de l'échelle n'a pu être confirmé. Dès lors, les seules informations susceptibles de nous éclairer sur la situation hydrologique du lac, en dehors de l'imagerie satellitaire, se rapportent aux débits du fleuve Chari.

Tableau 6.2

Hauteurs d'eau brutes relevées à Bol le 1er jour de chaque mois.

ANNEE	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
1908												
1909												
1912											370	382
1913	369	357	345	324	315	299	299	280	282	287	292	297
1914	289	277	273	257	233	228	219	209	231	251	278	295
1915	296	290	272	255	237	235	219	235	255	281	299	288
1916	303	300	279	271	252	245	241	246	282	322	356	405
1917						309	301	301	321	350	381	414
1918	413	393	383	357	342	325	315	316	333	365	390	400
1919	391	379	369	343	327	316	303	308	327			
1932												
1933												
1953												
1954												
1955	430		427		402	387		374	386	407		
1956	475	495	470	458	448	425	412	415	430	456	465	504
1957	510	503	494	478	465	466	444	447	450	460	471	478
1958	482	473	466	452	437	420	418	422	434	447	453	460
1959	462	457	444	434	410	403	382	484	399	424	436	450
1960	462	448	438	434	420	401	393	377	408	404	418	434
1961	462	462	438	426	414	402	384	388	436	445	457	488
1962	512	514	503	493	480	466		469	466	486	506	528
1963	538	544	538	520	516	502	488	482	487	499	518	530
1964	540	534	514	507	495	482	466	469	478	495	511	
1965	538	523	519	509	490	480	462	460	473	488	482	496
1966	496	476	460	453	442	441	426		426	428	437	444
1967	445	440	420	405	408	384	372	370	372	393	409	426
1968	432	420	413	390	396	384	357	361	370	392	380	397
1969	393	379	374	359	343	333	328	314	323	328	345	351
1970	358	351	343	309	309	300			287	299	300	331
1971	340	336	329	321	307			262	282	277	288	305
1972	294	297	286	260	252	247	238	227	218	227	200	188
1973	190	169	153	131	110	089	063	041	043	025	151	186
1974	183	172	156	132	105		045	044	042	121	264	313
1975	297	178	257	270	209	186	166	151	157	215	291	348
1976	345	321	296	250	244	223	204	196	211	235	301	324
1977	321	298	277	229	227	207	187	172	194	249	290	309
1978	291	270	253		210	189	178	170	188	238	299	323
1979	317	295										
1980												
1981												
1982												
1983			210	190								
1984						-	-	-	-	-	-	-
1985	0	0	0	0	0	0	0	0	70	159	189	175
1986	146											
1987												
1988		25	0	0	0	0	0	0	0	60	204	248
1989	215	183	157	126	96	72	49	34	22	15	106	159
1990	160	146	126	97	70	39	8	0	0	0	0	50
1991										42	128	
1992	157	136	106	75	45	20			0		113	183
1993	192	173	153	122	92	64	39	24	.	.	113	149
1994	152	140	121	92	70							

Tableau 6.3

Hauteurs d'eau nettes relevées à Bol le 1er jour de chaque de mois

ANNEE	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
1908	285	275	260	245	232	220	211	210	237	275	320	350
1909	355											
1912											371	383
1913	370	356	342	322	315	300	289	281	282	289	292	292
1914	286	378	268	255	234	227	218	209	232	249	278	297
1915	296	288	271	255		234	221	233	256	281	300	313
1916	304	297	282	270	253	246	240	247	281	319	356	407
1917							301	301	322	350	382	412
1918	411	392	382	356	342	326	314	315	333	365	389	399
1919	392	379	367	342	327	316	304	308				
1932					315	305	295	305	320	330	350	375
1933	365											
1953								310	335	335	370	380
1954	380	380	365	355	345	330	315	325	360	375	395	420
1955	435	435	425	410	400	385	370	370	385	405	420	445
1956	477	477	475	458	443	427	419	421	346	461	470	500
1957	509	500	493	483	469	458	447	449	450	463	472	478
1958	478	473	466	448	434	420	410	412	432	443	448	460
1959	462	455	437	429	414	404	382	379	402	421	432	453
1960	461	451	441	432	421	400	389	383	394	405	416	435
1961	460	462	440	430	419	407	387	386	427	445	460	492
1962	513	512	503	492	482	466	460	458	172	487	505	527
1963	543	545	536	523	512	500	483	477	489	507	519	528
1964	537	531	519	509	490	479	465	465	479	493	504	520
1965	537	527	523	508	496	481	468	461	470	489	484	491
1966	489	479	465	451	440	428	420	410	417	428	438	447
1967	446	736	421	409	390	384	375	367	375	390	406	424
1968	437	423	414	390	382	374	360	360	366	382	386	395
1969	392	377	374	358	342	334	332	313	320	336	342	356
1970	360	352	340	314	309	302	297	294	287	293	310	331
1971	338	340	329	319	300	294	281	265	277	281	289	305
1972	292	296	283	262	252	240	242	226	222	227	195	191
1973	190	169	152	130	115	095	085	075	120	145	175	186
1974	183	172	156	170	120	105	100	115		175	265	313
1975	298	278	158	232	209	186	166	151	153	217	293	348
1976	344	321	296	270	244	223	204	196	211	249	301	324
1977	321	298	277	250	227	207	187	172	194	235	290	309
1978												

Les hauteurs d'eau ont toutes été rapportées au zéro de l'échelle de Bol posée le 24 janvier 1967 (altitude 277,87 m - IGN 1956). En italiques, les valeurs approchées ou reconstituées.

Tableau 6.4

Hauteurs nettes et dates des maximums et minimums annuels à BOL

Année hydrologique	Maximum		Minimum	
	Hauteur nette	Date	Hauteur nette	Date
1906-1907	287	11/1907	200	07/1907
1907-1908	353	12/1908	210	07/1908
1908-1909			265	07/1909
1911-1912			280	08/1912
1912-1913	384	21-30/11/1912	280	05-07/08/1913
1913-1914	293	22-29/11/1913	207	21-28/07/1914
1914-1915	300	21-24/11-1914	220	02-12/07/1915
1915-1916	315	23-25/11/1915	237	12-15/07/1916
1916-1917	419	15-21/12/1916	297	16-22/07/1917
1917-1918	419	18/12/1917	310	18/07/1918
1918-1919	400	23-30/11/1918	301	09-20/1919
1919-1920	450	12/1919		
1949-1950			270	
1950-1951	405			
1953-1954	390	12/1953	310	07/1954
1954-1955	440	01/1955	368	07/1955
1955-1956	479	06/07/01/1966	412	07/1956
1956-1957	509	30/12/1956	445	18-20/07/1957
		06/01/1957		
1957-1958	479	19/25/12/1957	408	04/07/1958
1958-1959	465	06/14/01/1960	375	13-16/07/1959
1959-1960	465	24/25/01/1961	381	28/07/1960
1960-1961	464	22/25/12/1961	385	25-26/07/1961
1961-1962	515		455	21-24/07/1962
1962-1963	545	20/01-03/02/1963	477	19-29/07/1963
1963-1964	537	27/12/63	457	18/07/1964
		05/01/1964		
1964-1965	537	30/12/1964	460	23-31/07/1965
		02/01/1965		
1965-1966	493	05-08/12/1965	410	07/1966
1966-1967	450	08-09/12/1966	366	30-31/07/1967
1967-1968	437	01-02/01/1968	360	01-31/07/1968
1968-1969	395	15-24/12/1968	309	3-18/08/1969
1969-1970	360	29/12/1969	282	07/1970
		02/01/1968		05-07/08/1971
1970-1971	343	26/12/1970	256	
		12/01/71		28/08/1972
1971-1972	309	27/12/1971	221	14/09/1972
		04/01/1972		23/09/1973

Tableau 6.4 (suite)

Année hydrologique	Maximum		Minimum	
	Hauteur nette	Date	Hauteur nette	Date
1972-1973	227	01-15/10/1972	075	16-27/07/1974
1973-1974	187	07/12/1973	100	20-24/08/1975
1974-1975	316	01-04/12/1974	144	28-31/07/1976
1975-1976	352	14-20/12/1975	195	01-02/08/1977
1976-1977	309	13-17/12/1976	181	
1977-1978	227	24-19/12/1977		
1978-1979				
1979-1980				
1980-1981				
1981-1982	270			
1982-1983				
1983-1984				
1984-1985				
1985-1986				
1986-1987				
1987-1988			0	
1988-1989	248	28/11-5/12/1988	0	
1989-1990	162	5/12-15/12/1989	0	Sept 1989
1990-1991	57	21-24/12/1990	0	Juillet-Nov 1990
1991-1992	165	dec.1990		Février-Oct. 1991
1992-1993	>153			

Les hauteurs d'eau ont toutes été rapportées au zéro de l'échelle de Bol posée le 24 janvier 1967 (altitude 277,87 m - IGN 1956). A partir de 1968-1969, les hauteurs reportées dans ce tableau sont celles lues sur le limnigramme de Bol-Bérim en valeurs lissées. En italiques, les valeurs approchées ou reconstituées.

5. CHRONIQUES DES APPORTS FLUVIAUX

Celles-ci concernent essentiellement les débits du fleuve Chari observés à la station de N'Djaména. Cette station est observée à peu près régulièrement depuis 1932 (B. Billon et al., 1979), si l'on excepte de nombreuses lacunes entre 1947 et 1953 et surtout l'absence d'observations en 1980 et 1981.

Le tableau 6.5 présente les débits moyens mensuels du Chari à N'Djaména. Seules des informations globales nous sont parvenues pour les deux dernières années du tableau.

Cette chronique est complétée par le tableau 6.6 qui présente, en regard des modules annuels, les débits maximums de crue sur lesquels nous reviendrons dans les chapitres suivants.

A titre purement indicatif, nous avons également présenté dans les tableaux 6.7 et 6.8 les débits moyens mensuels de l'El Beïd à Fotokol et de la Komadouyou-Yobe à Gueskéro. Cette chronique est limitée aux données disponibles pour cette étude.

Tableau 6.5

Débits moyens mensuels et annuels en m³.s⁻¹ du Chari à N'Djaména

Années	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Modules
1932-33													1370
1933-34	170	235	470	913	2450	3830	3750	2440	1050	683	402	278	1390
1934-35	242	450	967	1990	3170	3950	3500	1710	905	588	358	282	1510
1935-36	258	308	738	1350	2240	3060	2980	1770	1020	657	407	284	1260
1936-37	270	210	520	1350	2810	4130	4060	2280	960	550	330	210	1480
1937-38	220	300	600	1120	2000	2290	2410	1200	635	388	238	153	1060
1938-39	144	218	478	1230	2740	4240	4170	1860	750	420	250	150	1390
1939-40	160	250	483	1020	1860	3030	3380	1960	940	544	322	209	1300
1940-41	183	262	479	1150	1800	2140	1840	869	440	246	136	90	805
1941-42	120	408	530	984	1880	1980	1450	728	357	200	124	84	739
1942-43	103	183	329	1220	2280	3190	2720	1160	562	301	168	122	1030
1943-44	107	186	401	1040	2390	3240	3310	1870	847	450	264	236	1200
1944-45	211	189	349	733	1930	2800	2870	1430	662	348	199	127	989
1945-46	150	190	359	1190	2180	3240	3210	1570	714	360	190	116	1130
1946-47	160	250	539	1550	2550	3790	4440	3120	1180	590	350	210	1570
1947-48													1290
1948-49					2840	3850			930	560	360	220	1400
1949-50						3210	3240	1740	730	440	280	160	1210
1950-51					3040	4030			1070	660	410	260	1510
1951-52													1100
1952-53						3380	3360	1630	750	420	240	140	1230
1953-54		255	514	1390	2260	3320	3520	1530	738	402	240	140	1210
1954-55	108	323	747	1440	2660	3910	4360	2840	1100	634	334	212	1560
1955-56	270	358	779	1570	2820	4100	4550	3130	1360	765	514	364	1720
1956-57	229	278	715	1520	2720	3810	4280	2560	1000	603	338	223	1530
1957-58	208	553	812	1270	2200	2640	2480	1570	747	420	240	144	1110
1958-59	171	313	754	1430	2440	2750	2590	1290	646	342	174	111	1090
1959-60	160	230	483	1260	2430	3610	3730	1800	772	446	219	132	1270
1960-61	204	240	576	1270	2300	3150	3880	2960	1140	603	334	174	1410
1961-62	182	190	703	1740	3040	4460	4850	2650	1070	638	399	353	1700
1962-63	355	392	796	1200	2460	4060	4520	2950	1280	785	490	320	1640
1963-64	424	460	615	1700	3130	3610	2980	1510	777	458	261	176	1340
1964-65	230	288	589	1390	2520	3580	3870	2280	994	566	323	213	1410
1965-66	186	237	590	1190	2190	2540	2170	904	442	266	148	96	916
1966-67	160	327	623	1190	2150	3070	2560	1470	645	365	220	130	1080
1967-68	115		466	1160	2300	3380	3590	1700		400			1030
1968-69	162	269	702	1500	2380	2690	2230	1050	536	312	217	216	1020
1969-70	159	276	601	1360	2260	2790	2550	1400	630	365	199	132	1060
1970-71	162	213	423	1280	2480	3640	3320	1310	629	350	181	131	1180
1971-72	115	126	403	1080	2200	3250	2490	956	491	265	143	100	969
1972-73	123	227	450	787	1330	1370	1120	527	254	132	76	52	539
1973-74	70	114	224	766	1550	1960	1190	521	247	116	65	43	574
1974-75	73	129	358	1020	2290	3090	2580	1060	506	258	135	91	968
1975-76	95	106	369	962	2180	3310	3690	1760	707	389	210	134	1160
1976-77	114	169	472	1020	1810	2640	2300	1180	548	312	174	109	907
1977-78	95	143	458	1060	1830	2650	1770	636	341	190	112	87	781
1978-79	158	190	546	1090	1960	2770	2670	1110	531	285	146	100	962
1979-80	132	165	528	985	1550	1680	1130	563	240	130	65	40	600
1980-81													730
1981-82													724

Tableau 6.5 (suite)

Années	M	J	Jf	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Modules
1982-83								575	249	136	68,4	42,7	670
1983-84	31,8	57,4	286	806	1430	1810	1190	418	182	96,1	55,8	36,9	533
1984-85	58,8	61	165	550	619	624	272	115	50,3	26,9	13,7	12,5	214
1985-86	13,7	24	347	1020	1600	1950	866	372	167	80,1	47,2	28,1	543
1986-87	22,1	23,1	163	877	1320	1710	1040	340	157	77,4	40,7	22,6	483
1987-88	12,5	63	194	402	1040	1100	464	181	86,5	45,8	18,6	8,53	301
1988-89	11,8	63,8	317	879	2100	3350	2690	757	330	179	93,7	60,3	903
1989-90	75	136	267	659	1244	1580	1100	484	277	149	77,7	42	508
1990-91	46,4	109	244	550	1030	1170	659	330	163	78,7	36,2	18	370
1991-92	43,8	106	299	998	1670	1980	1300	529	249	147	68,4	45	620
1992-93	40,8	80,7	270	852	1600	2180	1550	672	277	134	106	76,9	653
1993-94	32	77	308	834	1258	1527	530	415	246	108	48	26	480
1994-95	20	53	206	700	1480	2230	1956	723	300	141	62	38	660

Tableau 6.6

Débits moyens annuels et débits maximums en $m^3.s^{-1}$ du Chari à N'Djaména

Années	Modules	Qmax	Années	Modules	Qmax
1932-1933	1370	3970	1964-1965	1410	4070
1933-1934	1390	4140	1965-1966	916	2570
1934-1935	1510	4020	1966-1967	1080	3230
1935-1936	1260	3170	1967-1968	1020	3830
1936-1937	1480	4410	1968-1969	1030	3430
1937-1938	1060	2590	1969-1970	1060	3470
1938-1939	1390	4500	1970-1971	1180	3620
1939-1940	1300	3520	1971-1972	969	3380
1940-1941	805	2260	1972-1973	539	1430
1941-1942	739	2190	1973-1974	574	2130
1942-1943	1030	3400	1974-1975	968	3270
1943-1944	1200	3610	1975-1976	1160	3870
1944-1945	989	3120	1976-1977	907	2720
1945-1946	1130	3520	1977-1978	791	2840
1946-1947	1570	4510	1978-1979	962	3150
1947-1948	1290	3710	1979-1980	600	1780
1948-1949	1400	4050	1980-1981	730	1790
1949-1950	1210	3450	1981-1982	720	1360
1950-1951	1510	4400	1982-1983	670	2300
1951-1952	1100	3170	1983-1984	533	1950
1952-1953	1230	3520	1984-1985	214	785
1953-1954	1210	3780	1985-1986	543	2190
1954-1955	1560	4450	1986-1987	483	1810
1955-1956	1720	4700	1987-1988	301	1330
1956-1957	1530	4440	1988-1989	903	3470
1957-1958	1110	2690	1989-1990	508	1730
1958-1959	1090	2800	1990-1991	370	1310
1959-1960	1270	3910	1991-1992	620	2020
1960-1961	1410	4010	1992-1993	653	2360
1961-1962	1700	5160	1993-1994	480	1600
1962-1963	1640	4610	1994-1995	660	2350
1963-1964	1340	3670	1995-1996		

Tableau 6.7

Débits moyens mensuels de l'El Beïd à Fotokol en m³.s⁻¹

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septem.	Octobre	Novem.	Décem.	Janvier	Février	Mars	Avril
1953-1954	-	2.43	6.45	89.8	21.1	5.70	45.7	75.1	34.2	4.97	1.60	0.572
1954-1955	(0.1)	((1.))	(4.3)	70.1	113.	146.	175.	(263.)	183.	75.9	(14.4)	(2.)
1955-1956	(0.)	((1.))	((6.))	23.1	40.1	(48.6)	155.	(335.)	269.	84.3	(15.)	((2.))
1956-1957	(0.)	-	-	(68.5)	78.2	83.9	151.	(244.)	-	-	-	-
1957-1958	-	-	-	-	-	-	-	(76.4)	-	-	-	-
1958-1959	-	((1.))	((5.))	(11.5)	(13.6)	(5.65)	(26.6)	(87.6)	(65.1)	(11.5)	(3.28)	((1.5))
1959-1960	(0.)	-	-	((70.))	(51.6)	(20.9)	(60.6)	(171.)	-	-	-	-
1960-1961	-	-	-	-	-	-	(85.1)	(265.)	(165.)	(57.7)	(4.)	-
1961-1962	-	-	-	-	(98.0)	(93.1)	(260.)	(222.)	(100.)	(20.)	-	-
1962-1963	-	((0.))	((1.))	15.1	(14.5)	(5.53)	(43.6)	(251.)	(135.)	(23.9)	(9.8)	(4.22)
1963-1964	(1.)	-	-	-	(3.19)	(20.5)	(175.)	(215.)	-	-	-	-
1964-1965	-	-	-	-	22.2	22.9	64.6	147.	98.1	26.7	-	-
1965-1966	-	((1.))	((3.))	((8.))	28.0	33.8	50.6	71.2	26.9	5.85	2.35	1.14
1966-1967	(0.9)	1.53	1.70	3.40	6.05	3.52	24.5	127.	92.8	15.7	2.08	1.02
1967-1968	(0.59)	1.47	4.14	40.8	86.5	63.2	79.5	150.	107.	23.4	4.87	1.50
1968-1969	(0.61)	(0.96)	4.85	4.44	6.25	2.01	41.0	108.	60.4	6.11	1.03	(0.)

Tableau 6.8

Débits moyens mensuels de la Komadougou à Gueskéro en m³.s⁻¹

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septem.	Octobre	Novem.	Décem.	Janvier	Février	Mars	Avril
1957-1958	-	3.52	17.4	22.4	26.0	28.9	30.8	32.9	35.5	33.7	9.95	2.14
1958-1959	0.52	0.03	12.2	26.5	31.1	31.9	32.7	34.4	-	-	-	-
1960-1961	-	(0.)	5.89	19.0	27.0	-	30.3	31.1	-	-	-	-
1961-1962	-	(0.)	-	22.3	30.0	30.7	31.8	32.9	-	4.40	1.33	0.22
1962-1963	0.0	0.0	7.92	23.1	28.8	30.4	32.0	34.9	37.3	18.6	3.34	1.25
1963-1964	0.30	0.0	3.32	17.6	24.8	28.6	30.4	31.8	14.4	2.48	0.80	0.10
1964-1965	0.0	0.0	6.34	21.4	29.2	31.0	32.6	37.1	39.7	21.7	4.08	1.41
1965-1966	0.41	0.01	6.13	22.4	20.0	30.7	31.9	33.0	22.4	4.02	1.28	0.33
1966-1967	0.01	1.23	17.3	24.1	25.9	27.7	29.5	30.8	27.3	6.09	1.69	0.42
1967-1968	0.01	0.0	0.0	14.9	24.7	27.5	29.6	30.3	9.49	2.35	0.72	0.04
1968-1969	0.0	2.54	17.5	24.7	27.2	28.8	29.9	12.4	1.95	0.64	0.24	-
1969-1970	-	-	-	-	-	-	-	-	18.6	3.15	1.02	0.13
1970-1971	0.0	0.0	0.0	11.1	25.7	30.4	(33.7)	35.6	27.8	4.54	1.46	-
1971-1972	1.09	-	-	-	-	-	-	-	9.34	2.33	0.66	0.04
1972-1973	0.0	0.0	2.89	15.6	23.9	27.0	26.3	4.13	0.74	0.03	0.0	0.0
1973-1974	0.0	0.0	0.0	9.14	21.9	26.5	(12.4)	-	-	-	-	-
1974-1975	-	-	-	-	-	-	-	-	2.19	0.58	0.0	0.0
1975-1976	0.0	0.0	0.0	8.22	22.6	25.5	28.6	24.2	3.14	0.66	0.01	0.0
1976-1977	0.0	0.0	0.83	15.8	23.3	27.4	29.3	8.85	1.01	0.03	0.0	0.0

Bilan hydrologique et modélisation des hauteurs d'eau du lac Tchad

Chapitre 7

1. GENERALITES

Le bilan hydrologique du lac Tchad, en termes de volumes, a fait l'objet d'une évaluation au pas de temps annuel pour un « Moyen Tchad » à la côte 281, 5 m. Olivry (1984, 1987) a estimé les apports superficiels à 40 milliards de m³ en année moyenne (dont 37,8 km³ pour le Chari et 2,2 km³ pour l'El Beïd et la Komadougou). L'apport des pluies sur le lac est de 6 milliards de m³, l'évaporation représentant 95 % de ces pertes (environ 3 km³ de pertes par infiltration). La figure 7.1 rappelle ce bilan général en insistant sur le fonctionnement propre des tributaires tchadiens et camerounais du lac et leur bilan dans les vastes plaines d'inondation des Yayrés.

Mais le bilan hydrologique d'un lac est d'abord un problème de variations de son niveau, de suivi de son remplissage et de ses pertes; les développements qui suivent s'appuient sur les travaux que G. Vuillaume (1981) a réalisés à la demande de la Commission du Bassin du Lac Tchad. Celle-ci souhaitait que l'on puisse évaluer les conséquences des prises d'eau pour irrigation dans le Chari et dans le lac : conséquences sur le devenir hydrologique du lac, pérennité par atteinte d'un nouvel équilibre ou disparition pure et simple par excès de pompages.

Les conclusions de Vuillaume n'étaient pas alarmistes pour autant que l'on pouvait espérer, alors, que les conditions déficitaires qui prévalaient ne deviendraient pas la norme pour plus de deux décennies et que les prélèvements resteraient raisonnables. Mais nous reviendrons en fin de chapitre sur cet aspect finalisé de ses travaux et nous nous attarderons davantage sur l'élaboration du bilan hydrologique et la modélisation qui a été proposée.

2. BILAN HYDROLOGIQUE MENSUEL DU LAC

2.1. Les termes du bilan hydrologique

Le niveau du lac résulte à chaque instant d'un équilibre entre :

- les entrées dans le lac constituées, d'une part, par les apports de surface des tributaires (débit total q) et, d'autre part, par les précipitations reçues par le lac (p).
- les sorties du lac constituées par l'évaporation e (comprenant l'évapotranspiration de la végétation aquatique) et les infiltrations f .
- la variation du stock d'eau du lac, perte ou gain de volume (v) exprimée par dv/dt ou, pour se ramener aux données mesurables du niveau (H), SdH/dt , S étant la superficie correspondante du lac.

L'équation du bilan s'écrit : $q + p = e + f + SdH/dt$

Cette équation permet en principe d'évaluer à chaque instant les débits sortants ($e + f$) à partir des entrées ($q + p$) et des variations du niveau du lac.

Compte tenu de la précision des mesures (lissage des cotes du lac) et de l'intervalle de connaissance des précipitations, c'est au pas de temps mensuel qu'est intégrée l'équation du bilan.

Tous les termes du bilan doivent être exprimés en lames d'eau et en cm par référence aux niveaux du lac lus à l'échelle de Bol et exprimés en cm. Seuls les débits des tributaires du lac doivent être transformés : d'abord en volumes écoulés mensuels, puis en lames d'eau en rapportant ces volumes à la superficie du lac.

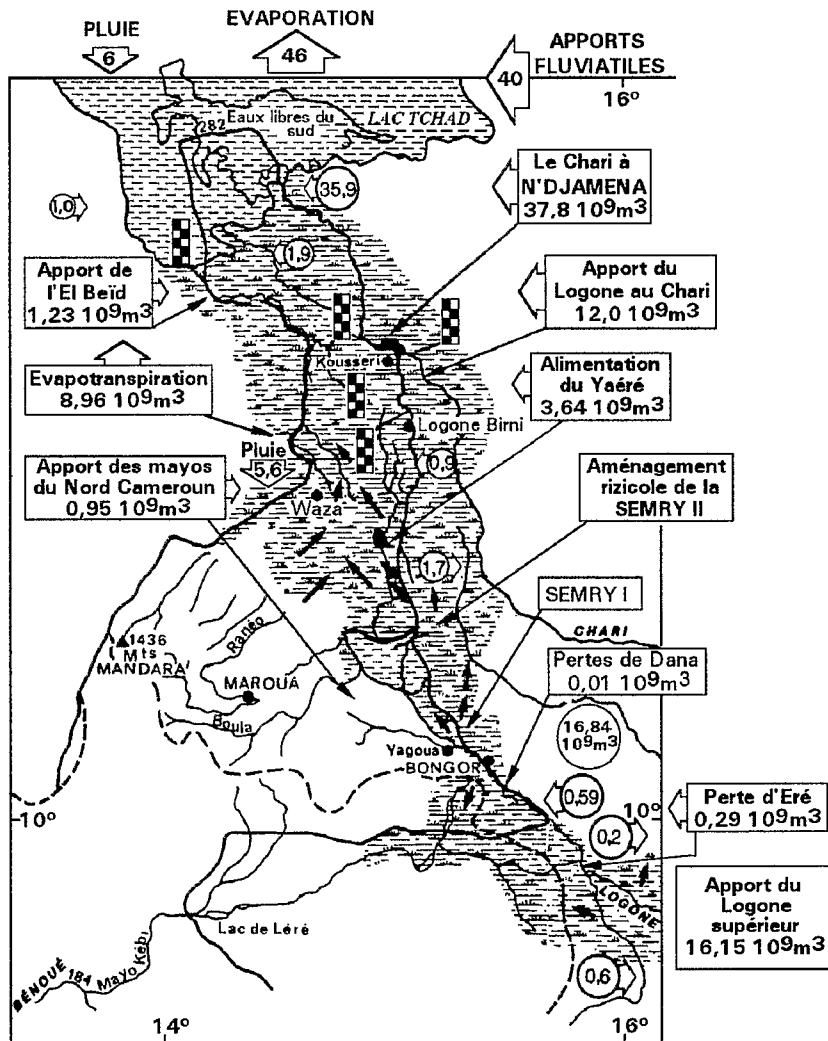


Figure 7.1

Bilan hydrologique annuel du lac Tchad et de ses tributaires tchadiens et camerounais (Olivry, 1986).

L'équation du bilan hydrologique mensuel s'écrit :

$$8,64 n \frac{Q}{S} + P = E + F + \Delta H$$

avec les notations suivantes :

- Q : débit moyen mensuel des apports de surface ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- S : surface du lac à la période de référence (le 1er du mois), en km^2
- n : nombre de jours pendant le mois considéré
- P : pluviométrie moyenne mensuelle sur le lac (cm)
- E : évaporation moyenne mensuelle (cm)
- F : pertes mensuelles par infiltration (cm) ; ce terme de « pertes » par infiltration doit être considéré au sens large puisqu'il peut être :
 - positif, par pertes réelles par infiltrations en profondeur et marginales, pour alimentation de la nappe ;
 - négatif, par retour de la nappe vers le lac.
- ΔH : variation de niveau du lac (cm) pendant le mois considéré.

2.2. Données disponibles

2.2.1. Période d'étude et données de base

L'antériorité des données connues sans lacune est arrêtée à mai 1954 ; les années hydrologiques vont du 1er mai au 30 avril ce qui correspond à l'année hydrologique du Chari, principale source d'apports au lac (82,3 % en année moyenne sur la période 1954-1968, contre 14 % d'apports météoriques et 3,6 % dus aux petits tributaires terrestres, (Komadougou et El Beïd principalement). Trois dates importantes apparaissent, en plus de 1954 qui marque le début de la simulation (fig. 7.2) :

- mai 1968, fin d'une partie d'un pseudo-cycle du lac où les niveaux retrouvent leur cote de mai 1954, soit après 14 ans ;
- avril 1973, où les deux cuvettes nord et sud sont pour la première fois séparées par exondation totale de la « Grande Barrière » (vers l'altitude 279 m) ;
- mai 1977, qui marque l'interruption des observations continues en raison des événements politiques affectant le Tchad.

Les données de base ont été produites dans les chapitres précédents. Pour les niveaux du lac du 1er jour de chaque mois, on se reportera au tableau 6.3 où les hauteurs sont données en valeurs nettes. Les débits moyens mensuels du Chari à N'Djaména sont donnés dans le tableau 6.5. Les données des autres tributaires (tableaux 6.7 et 6.8) serviront à relativiser leur importance dans le bilan ; le tableau 7.1 donne les pourcentages de leur contribution aux apports de surface.

La chronique des précipitations moyennes mensuelles reçues par le lac est donnée dans le tableau 5.9.

Enfin le tableau 4.11 donne l'évaporation moyenne mensuelle à Bol Matafo qui sera prise comme référence pour le lac (cf. plus loin).

La figure 7.2 regroupe sur la période d'étude les variations de ces différents paramètres.

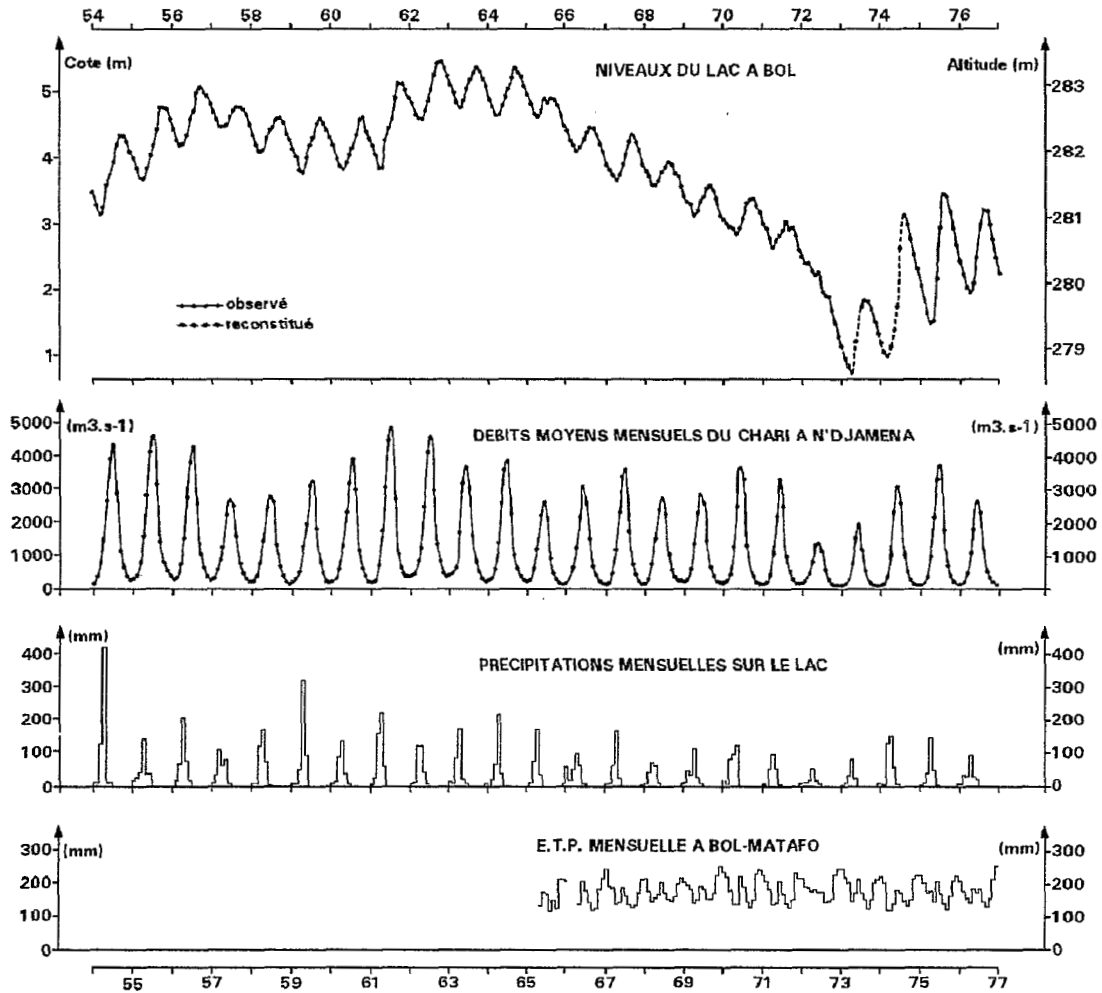


Figure 7.2

Principales observations sur le lac Tchad de 1954-55 à 1976-77.

Tableau 7.1

Participation des petits tributaires aux apports de surface du lac Tchad comparés à ceux du Chari.

Station	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déce.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Module (m ³ .s ⁻¹)	Volume (10 ⁹ m ³)
EL Beid à Fotocol	0	1	4	37	42	40	96	176	111	29	6	1	45,3	1,43
Komadougou à Gueskéro	0	1	9	22	28	30	31	31	23	10	3	1	15,6	0,49
Total	0	2	13	59	70	70	127	207	134	39	9	2	60,9	1,92
Chari à N'Djaména	211	307	663	1390	2520	3420	3500	2040	883	506	294	199	1330	41,9
Total	211	309	676	1440	2590	3510	3630	2250	1020	545	303	201	1390	43,8
%	0	0,6	1,9	4,1	2,8	2,0	3,5	9,2	13,1	7,2	3,0	1,0	4,4	-

2.2.2. Relations cotes du lac - volumes - superficie

Ces relations, fondamentales pour le passage des données de niveau du lac à celles de volumes et de superficie du plan d'eau, ont été développées au chapitre 1. Lors de l'isolement de Bol, des cotes équivalentes sont déterminées à partir de Kalom (Ch. 6). Dans la période de sécheresse de séparation des cuvettes sud et nord, l'établissement de relations de transition (Vuillaume, 1981) a été rendu nécessaire pour tenir compte des liaisons diffuses existant à travers la grande barrière.

Rappelons les faits suivants :

- L'échelle de Bol a été isolée des eaux libres de la cuvette sud de fin février à fin septembre 1973, puis pendant les basses eaux 1974 jusqu'à la mi-septembre de cette même année ; chaque remise en eaux a été brutale dès qu'à pu être franchi le seuil des îlots-bancs séparant le point bas où est installée l'échelle de la cuvette sud. Les observations manquantes ont été reconstituées à partir des niveaux enregistrés à l'échelle de Kalom (eaux libres de la cuvette sud) et de la corrélation entre les lectures à cette échelle et celles de Bol effectuées pendant les trois années « normales » suivantes.
- Le lac s'est scindé en deux bassins (nord et sud) en mai 1973 lorsque l'altitude du plan d'eau a été inférieure à 279 m. A partir de cette date, le niveau de la cuvette nord a baissé très rapidement en raison d'un très fort déficit évaporation-pluie et d'une alimentation en eaux réduite à la Komadougou. Les crues des années suivantes n'ont pas permis une réalimentation suffisante pour revenir à l'état antérieur, le franchissement de la « Grande Barrière » par les eaux de la cuvette sud étant freiné par une importante végétation.

La figure 7.3 rappelle le décalage des observations de cette période sur les 2 cuvettes. Si depuis mai 1973 jusqu'à la fin de la période considérée (avril 1977), le niveau de la cuvette sud avait été constamment inférieur à l'altitude 279 m, c'est-à-dire si les deux cuvettes avaient été continuellement indépendantes, il aurait été possible de ne plus considérer que le bilan hydrologique de la cuvette sud en utilisant les relations cote-surface-volume de celle-ci (J. Lemoalle, 1979).

En fait, la cuvette sud n'était pas alors une cuvette fermée puisqu'elle avait un émissaire constitué par la « Grande Barrière » ; les transferts à la cuvette nord constituaient une perte supplémentaire qui n'était due ni à l'évaporation, ni à l'infiltration, ce qui nécessitait d'établir de nouvelles relations cote-surface-volume qui intègrent cette perte.

Il a été choisi de les appeler « courbes de transition » entre l'état antérieur et un futur état qui serait le retour à cet état antérieur pour autant que l'hydraulicité des années suivantes soit suffisante.

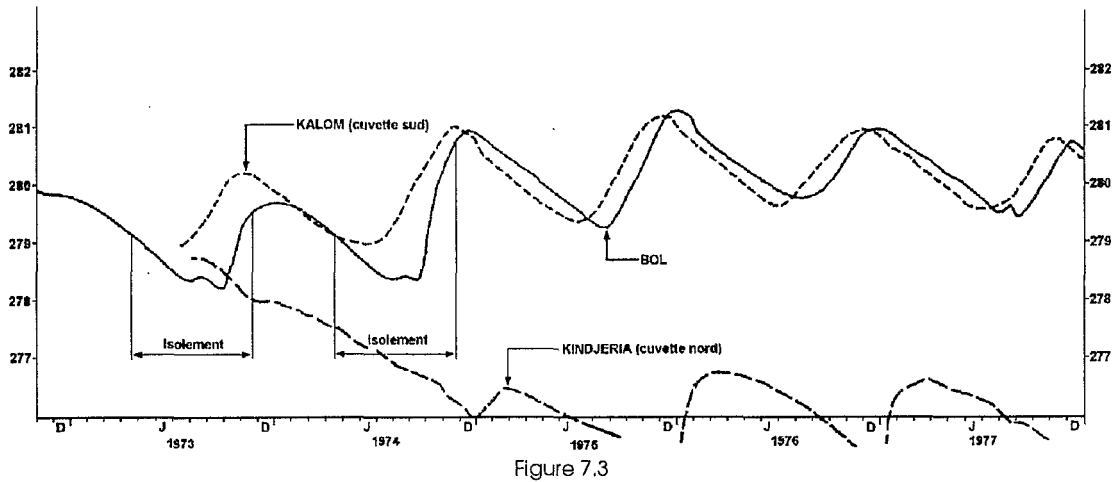


Figure 7.3
Observations limnimétriques à Bol Kalom et Kindjéria (Kalom).

Connaissant les volumes des apports de surface (limités au Chari), les hauteurs précipitées - en ne jugeant pas indispensable de modifier la péréquation entre postes - les cotes à l'échelle de Bol (observées ou reconstituées) et cinq valeurs de pertes spécifiques (pertes par unité de surface, assimilées à une lame d'eau) pour chacun des mois de l'année (calculs sur les années hydrologiques 1968-69 à 1972-73), les courbes de transition ont été établies par approximations successives en s'imposant que :

- la perte spécifique d'un mois donné de la période à fonctionnement perturbé soit du même ordre de grandeur que les pertes spécifiques calculées pour les cinq mois (correspondant aux cinq années) de la période à fonctionnement normal ;
- les deux courbes de transition aient un tracé plausible et régulier.

Il s'est agi véritablement d'approximations successives en raison des multiples recours à ces courbes pour un mois donné et de l'interdépendance entre la relation cote-surface et la relation cote-volume, interdépendance dictée par les impératifs fixés (perte spécifique « normale » pour le mois considéré et régularité de tracé).

Il est évident que ces courbes de transition sont des opérateurs de transfert qui n'ont de réalité physique qu'éphémère, attachée au contexte physique du lac à cette époque ; un nouvel épisode de sécheresse succédant à un rétablissement d'un niveau commun aux deux cuvettes n'engendrerait peut-être pas les mêmes courbes de transition pour de multiples raisons : végétation différente, remises en eau plus ou moins rapides, etc.

Quels que soient les arguments qui puissent lui être opposés, la méthode a au moins l'avantage d'être logique et de permettre d'exploiter tous les résultats incluant la période de sécheresse au lieu de l'arrêter à son instant critique.

Il n'y a pas de retour en mai 1977 à l'état antérieur mais il a été supposé que ce retour pouvait avoir lieu vers l'altitude 282 m, ce qui explique le tracé des courbes de la figure 7.4.

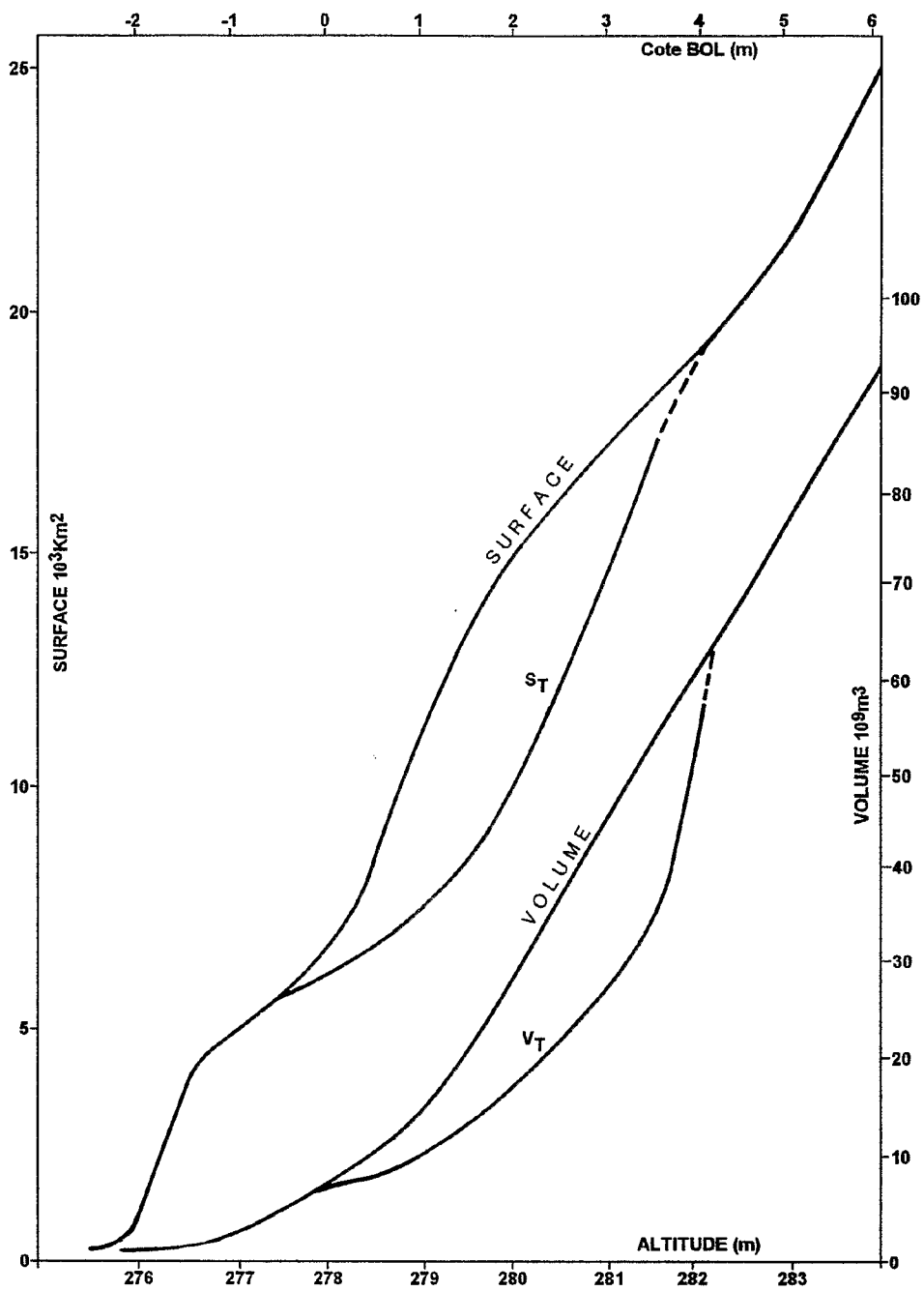


Figure 7.4

Superficie et volume du lac Tchad en fonction de l'altitude du plan d'eau.

2.3. Bilan mensuel et évaluation des pertes totales

Les pertes sont déduites de l'expression : $\text{pertes} = V_R + V_P - \Delta V$.

Les calculs ont été effectués sur l'intervalle 1968-1977 en années hydrologiques complètes avec comme données d'entrée :

V_R = somme des volumes écoulés dans le mois considéré aux stations du Chari à N'Djaména et autres tributaires.

V_P = précipitation moyenne sur le lac calculée par pondération des valeurs mensuelles observées aux postes de Bol, N'Guigmi, Gueskerou et N'Djaména.

ΔV = variation de volume du lac au cours du mois étudié obtenue par différence des volumes correspondant aux cotes de chaque début de mois ; les cotes sont les observations lissées à l'échelle de Bol ; les volumes sont tirés de la relation cote-volume (figure 7.4).

L'imprécision sur la répartition des pluies sur le lac au cours du mois ne permet pas de faire une intégration du bilan tout au long du mois et on suppose ici que les apports d'un mois se répartissent uniformément sur la surface correspondant à la cote lissée au premier jour de ce mois. Les surfaces relatives aux différentes cotes sont également tirées de la figure 7.4.

Les tableaux 7.2a à 7.2e présentent le détail de ces calculs. Mois par mois pour chaque année hydrologique, quatre colonnes indiquent l'état de remplissage du lac : cote lissée en m lue le 1er du mois à l'échelle de Bol (en italiques s'il s'agit d'une cote équivalente obtenue à partir de Kalom) et altitude IGN correspondante ; surface du lac en km^2 et volume en millions de m^3 . A partir de mai 1973, ces valeurs sont obtenues à partir des courbes de transition (figure 7.4).

Les colonnes suivantes se rapportent au bilan mensuel.

La variation de volume ΔV en millions de m^3 est déduite de la différence de deux mois consécutifs, en valeur négative s'il y a baisse du lac.

Les pluies moyennes mensuelles sont d'abord exprimées en mm et ramenées à un volume d'apports météoriques en millions de m^3 , par produit avec la superficie du lac.

Les apports de surface ou débits sont indiqués en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ et ramenés à des volumes mensuels écoulés en millions de m^3 . Les deux dernières colonnes se rapportent aux pertes : d'abord aux pertes totales exprimées en millions de m^3 , puis en valeurs spécifiques exprimées en milliers de m^3 par km^2 et par mois ou en lames d'eau de pertes globales en mm par mois, en effectuant le quotient des pertes volumiques par la superficie du lac au début du mois.

Tableau 7.2a

Bilan hydrologique du lac Tchad des années 1968-1969 et 1969-1970

Mois	Cote à Bol	Etat de remplissage du lac			Δv	Apports				Vp+Vr- Δv =Perdes	
		Altitude IGN	Surface km ²	Volume 10 ⁶ m ³		Pluies mm	Vp 10 ⁶ m ³	Débit m ³ s ⁻¹	Vr 10 ⁶ m ³	Totales 10 ⁶ m ³	Spécifiques mm mois ⁻¹
5-68	3,82	281,69	18740	58960	-1330	8	149	162	433	1912	102
6-68	3,74	281,61	18570	57630	-2380	48	891	172	445	3716	200
7-68	3,6	281,47	18270	55250	0	8	1461	720	1928	3389	186
8-68	3,6	281,47	18270	55250	1030	96	1754	1525	4084	4808	263
9-68	3,66	281,53	18400	56280	2680	23	423	2407	6238	3981	216
10-68	3,82	281,69	18740	58960	670	1	18	2719	7282	6630	354
11-68	3,86	281,73	18820	59630	1540	0	0	2297	5953	4413	235
12-68	3,95	281,82	19020	61170	-510	0	0	1153	3088	3598	189
1-69	3,92	281,79	18950	60660	-2540	0	0	589	1577	4117	217
2-69	3,77	281,64	18630	58120	-490	0	0	316	791	1281	69
3-69	3,74	281,61	18570	57630	-2720	0	0	217	581	3301	177
4-69	3,58	281,45	18230	54910	-2680	5	91	216	559	3330	183
5-69	3,42	281,29	17890	52230	-1360	12	214	159	425	1999	112
6-69	3,34	281,21	17720	50870	-340	31	549	276	715	1604	90
7-69	3,32	281,19	17680	50530	-3180	35	618	608	1628	5426	307
8-69	3,13	281	17270	47350	1180	76	1312	1384	3706	3838	222
9-69	3,2	281,07	17420	48530	2680	31	540	2284	5920	3780	217
10-69	3,36	281,23	17760	51210	1020	8	142	2824	7563	6685	376
11-69	3,42	281,29	17890	52230	2350	0	0	2696	6988	4638	260
12-69	3,56	281,43	18190	54580	670	0	0	1674	4483	3813	209
1-70	3,6	281,47	18270	55250	-1350	0	0	753	2016	3366	184
2-70	3,52	281,39	18100	53900	-2000	0	0	392	948	2948	163
3-70	3,4	281,27	17850	51900	-4380	0	0	202	541	4921	276
4-70	3,14	281,01	17300	47520	-860	3	51	132	342	1253	72

Tableau 7.2b

Bilan hydrologique du lac Tchad des années 1970-1971 et 1971-1972

Mois	Etat de remplissage du lac				Apports					Vp+Vr- Δv=Pertes	
	Cote à Bol	Altitude IGN	Surface km ²	Volume 10 ⁶ m ³	Δv 10 ⁶ m ³	Pluies mm	Vp 10 ⁶ m ³	Débit m ³ s ⁻¹	Vr 10 ⁶ m ³	Totales 10 ⁶ m ³	Spécifiques mm mois ⁻¹
5-70	3,09	280,96	17190	46660							
					-1180	22	378	162	433	1991	116
6-70	3,02	280,89	17040	45480							
					-830	21	357	213	552	1739	102
7-70	2,97	280,84	16940	44650							
					-500	95	1608	423	1132	3240	192
8-70	2,94	280,81	16870	44150							
					-1200	110	1855	1291	3457	6512	386
9-70	2,87	280,74	16720	42950							
					1030	65	1086	2543	6591	6647	398
10-70	2,93	280,8	16850	43980							
					2850	0	0	3742	10022	7172	426
11-70	3,1	280,97	17210	46830							
					3200	0	0	3745	9707	6507	358
12-70	3,31	281,18	17650	50360							
					1200	0	0	1568	4199	2999	170
1-71	3,38	281,25	17800	51560							
					340	0	0	745	1995	1655	93
2-71	3,4	281,27	17850	51900							
					-1870	0	0	372	899	2769	155
3-71	3,29	281,16	17610	50030							
					-1670	0	0	184	492	2162	123
4-71	3,19	281,06	17400	48360							
					-3200	0	0	131	339	3539	203
5-71	3	280,87	17000	45160							
					-1010	3	50	115	308	1368	81
6-71	2,94	280,81	16870	44150							
					-2210	0	0	126	326	2536	150
7-71	2,81	280,68	16590	41940							
					-2680	58	962	406	1087	4729	285
8-71	2,65	280,52	16260	39260							
					2010	109	1771	1104	2956	2717	168
9-71	2,77	280,64	16510	41270							
					670	68	1122	2229	5777	6229	377
10-71	2,81	280,68	16590	41940							
					1360	0	0	3289	8809	7449	449
11-71	2,89	280,76	16770	43300							
					2680	0	0	2543	6591	3911	233
12-71	3,05	280,92	17100	45980							
					-2170	0	0	1067	2857	5027	294
1-72	2,92	280,79	16830	43810							
					670	0	0	526	1408	738	44
2-72	2,96	280,83	16910	44480							
					-2200	0	0	271	655	2855	169
3-72	2,83	280,7	16640	42280							
					-3540	0	0	145	388	3928	236
4-72	2,62	280,49	16190	38740							
					-1690	3	48	100	259	1997	123

Tableau 7.2c

Bilan hydrologique du lac Tchad des années 1972-1973 et 1973-1974

Mois	Cote à Bol	Etat de remplissage du lac			Apports					Vp+Vr- Δv=Pertes	
		Altitude IGN	Surface km ²	Volume 10 ⁶ m ³	Δv 10 ⁶ m ³	Pluies mm	Vp 10 ⁶ m ³	Débit m ³ s ⁻¹	Vr 10 ⁶ m ³	Totales 10 ⁶ m ³	Spécifiques mm mois ⁻¹
5-72	2,52	280,39	15980	37050							
					-2000	8	127	123	329	2456	154
6-72	2,4	280,27	15700	35050							
					335	26	408	227	588	661	42
7-72	2,42	280,29	15740	35385							
					-2715	52	818	453	1213	4746	301
8-72	2,26	280,13	15370	32670							
					-650	86	1321	804	2153	4124	269
9-72	2,22	280,09	15280	32020							
					820	20	305	1355	3512	2997	196
10-72	2,27	280,14	15390	32840							
					-5220	8	123	1397	3741	9084	590
11-72	1,95	279,82	14600	27620							
					-640	0	0	1146	2970	3610	247
12-72	1,91	279,78	14490	26980							
					-160	0	0	531	1422	1582	109
1-73	1,9	279,77	14460	26820							
					-5650	0	0	255	682	6332	269
2-73	1,69	279,56	13800	21170							
					-2810	0	0	132	330	3140	201
3-73	1,52	279,39	13160	18360							
					-1640	0	0	76	203	1843	229
4-73	1,3	279,17	12230	16720							
					-5240	0	0	52	134	5374	145
5-73	1,15	279,02	11540	11480							
					-1030	2	15	70	187	1232	163
6-73	0,95	278,82	7290	10450							
					-410	17	123	114	295	828	114
7-73	0,85	278,72	7130	10040							
					-380	25	178	224	599	1157	162
8-73	0,75	278,62	6980	9660							
					2080	89	621	766	2051	592	84
9-73	1,2	279,07	7680	11740							
					1640	24	184	1554	4027	2571	335
10-73	1,45	279,32	8160	13380							
					2200	0	0	1961	5252	3052	374
11-73	1,75	279,62	8910	15580							
					900	0	0	1191	3087	2187	246
12-73	1,86	279,73	9240	16480							
					-250	0	0	524	1403	1653	179
1-74	1,83	279,7	9150	16230							
					-890	0	0	247	661	1551	170
2-74	1,72	279,59	8820	15340							
					-1220	0	0	116	280	1500	170
3-74	1,56	279,43	8400	14120							
					-1075	0	0	65	174	1249	149
4-74	1,4	279,27	8040	13045							
					-1305	1	8	43	111	1424	177

Tableau 7.2d

Bilan hydrologique du lac Tchad des années 1974-1975 et 1975-1976

Mois	Cote à Bol	Etat de remplissage du lac			Apports					Vp+Vr- Δv=Perdes	
		Altitude IGN	Surface km ²	Volume 10 ⁶ m ³	Δv 10 ⁶ m ³	Pluies mm	Vp 10 ⁶ m ³	Débit m ³ s ⁻¹	Vr 10 ⁶ m ³	Totales 10 ⁶ m ³	Spécifiques mm mois ⁻¹
5-74	1,2	279,07	7680	11740							
					-780	12	92	73	195	1067	139
6-74	1,05	278,92	7440	10960							
					-250	10	74	129	334	658	89
7-74	1	278,87	7360	10710							
					770	93	684	364	974	888	120
8-74	1,15	279,02	7590	11480							
					1570	153	1102	1040	2785	2317	314
9-74	1,4	279,27	8040	13050							
					2530	26	209	2300	5961	3640	452
10-74	1,75	279,62	8910	15580							
					8120	7	62	3090	8276	218	25
11-74	2,65	280,52	12670	23700							
					5740	0	0	2625	6803	1063	84
12-74	3,13	281	15060	29440							
					-1980	0	0	1112	2978	4958	329
1-75	2,98	280,85	14310	27460							
					-2360	0	0	515	1379	3739	261
2-75	2,78	280,65	13310	25100							
					-2150	0	0	260	628	2778	209
3-75	2,58	280,45	12320	22950							
					-2520	0	0	135	361	2881	234
4-75	2,32	280,19	11080	20430							
					-2070	0	0	91	235	2305	208
5-75	2,09	279,96	10040	18360							
					-1880	1	10	95	254	2144	214
6-75	1,86	279,73	9240	16480							
					-1640	0	0	106	274	1914	206
7-75	1,66	279,53	8650	14840							
					-1060	91	786	361	966	2812	326
8-75	1,51	279,38	8290	13780							
					140	166	1375	943	2525	3760	454
9-75	1,53	279,4	8330	13920							
					5140	31	258	2214	5738	856	102
10-75	2,17	280,04	10390	19060							
					7740	0	0	3377	9044	1304	126
11-75	2,93	280,8	14060	26800							
					7700	0	0	4082	10580	2880	205
12-75	3,48	281,35	16800	34500							
					-600	0	0	2000	5356	5956	355
1-76	3,44	281,31	16600	33900							
					-3370	0	0	797	2134	5504	331
2-76	3,21	281,08	15460	30530							
					-3330	0	0	407	984	4314	280
3-76	2,96	280,83	14210	27200							
					-2970	0	0	214	573	3543	249
4-76	2,7	280,57	12920	24230							
					-2700	2	25	134	347	3072	238

Tableau 7.2e

Bilan hydrologique du lac Tchad des années 1976-1977

Mois	Cote à Bol	Etat de remplissage du lac			Δv $10^6 m^3$	Apports				Vp+Vr- Δv =Pertes	
		Altitude IGN	Surface km ²	Volume $10^6 m^3$		Pluies mm	Vp $10^6 m^3$	Débit $m^3 s^{-1}$	Vr $10^6 m^3$	Totales $10^6 m^3$	Spécifiques mm mois ⁻¹
5-76	2,44	280,31	11650	21530	-1920	4	46	114	305	2271	195
6-76	2,23	280,1	10670	19610	-1660	14	149	168	435	2244	211
7-76	2,04	279,91	9860	17950	-650	63	620	461	1234	2504	254
8-76	1,96	279,83	9560	17300	1230	87	831	1017	2723	2324	244
9-76	2,11	279,98	10120	18530	3470	27	273	1813	4699	1502	148
10-76	2,49	280,36	11890	22000	5840	34	404	2641	7073	1637	138
11-76	3,01	280,88	14460	27840	3130	0	0	2342	6070	2940	204
12-76	3,24	281,11	15610	30970	-440	0	0	1533	4105	4545	291
1-77	3,21	281,08	15460	30530	-3070	0	0	537	1438	4508	292
2-77	2,98	280,85	14310	27460	-2470	0	0	312	781	3251	227
3-77	2,77	280,64	13260	24990	-2880	0	0	174	466	3346	252
4-77	2,5	280,37	11930	22110	-2140	0	0	109	282	2422	203
5-77	2,27	280,14	10850	19970							

3. MODELISATION DES HAUTEURS D'EAU DU LAC

3.1. Recherche d'une simulation des niveaux du lac

L'examen des valeurs obtenues pour les pertes spécifiques mensuelles totales a montré (P. Touchebeuf et al., 1969) que les pertes totales tendent, à l'échelle annuelle, à augmenter lorsque le niveau moyen du lac décroît ; mais les auteurs n'ont pas tenté de mettre en évidence les tendances qui pouvaient se manifester au niveau mensuel et dont la somme conduit précisément à l'obtention de la tendance annuelle.

Afin de tenir compte de cette variabilité, il a fallu - pour reconstituer les niveau d'eau au pas de temps mensuel - introduire la notion d'algorithmes mensuels de pertes dans lesquels, pour chacun des mois, les pertes sont liées fonctionnellement à la cote du lac.

La résolution du problème s'est effectuée en trois étapes.

La modélisation est extrêmement simple puisqu'elle s'appuie sur le bilan hydrologique au pas de temps mensuel. Pour un mois donné, la variation de hauteur est donnée par :

$$\Delta H = \frac{\Delta V}{S} = \frac{V_R}{S} + P - p$$

relation dans laquelle :

S = surface du lac au premier du mois

V_R = volume du Chari transitant à N'Djaména au cours du mois

P = précipitation moyenne mensuelle sur le lac

p = perte spécifique globale relative au mois considéré et à la cote en début de mois lue à l'échelle de Bol.

Rappelons que cette perte spécifique, exprimée dans le bilan hydrologique en perte par unité de surface, correspond à une hauteur. Les valeurs obtenues dans ce bilan ont été utilisées pour effectuer un premier tracé des algorithmes mensuels destinés à une première tentative de reconstitution des hauteurs. Puis, par approximations successives, les douze algorithmes ont été « calés » de façon à ce que la courbe des niveaux simulés suive le plus possible la courbe des niveaux observés en limitant la comparaison aux dix-neuf années comprises entre mai 1954 et mai 1973, cette dernière date étant celle de la scission du lac en deux cuvettes distinctes.

L'analyse de cette première étape de simulation « à pertes globales » montre :

- que les variations des pertes spécifiques, en fonction de la cote à l'échelle, sont légèrement curvilignes;
- que la simulation n'est pas totalement satisfaisante puisqu'elle s'éloigne de la réalité lorsque les crues du Chari sont fortes (années 1954 et 55 notamment) et s'en rapproche lorsque ces mêmes crues sont faibles (années 1957 et 58 en particulier).

On notera que les algorithmes mensuels varient en cours d'année et que leur sens de variation peut s'inverser ; nous y reviendrons après avoir examiné les trois étapes de la simulation.

Dans une deuxième étape de simulation dite « à pertes partielles », le principe de modélisation est conservé mais un essai d'individualisation des pertes est tenté en acceptant de considérer que les pertes par évaporation sont égales aux évapotranspirations mesurées à Bol-Matafo.

Les observations à cette station n'étant continues que depuis septembre 1966, nous devons poser comme hypothèse que l'évapotranspiration moyenne de chacun des mois ne s'écarte pas trop des évaporations réelles subies au cours de la période 1954-1972. Pour conserver une certaine cohérence, nous utiliserons ces valeurs moyennes sur toute la période et non pas uniquement pour les mois sans observation ; Vuillaume (1981) a montré que cette méthode est sans influence sur la qualité des résultats.

Partant des algorithmes de la simulation précédente, nous avons d'abord soustrait l'évaporation moyenne supposée de chacun des mois, puis effectué un nouveau calage du modèle. L'analyse des résultats montre qu'il n'y a pas de gain sensible dans la simulation ; la divergence des tracés est semblable à celle qui a été constatée lors de la simulation « à pertes globales ».

En analysant cette divergence des tracés, nous avons déjà indiqué plus haut qu'elle semblait fortement liée à l'importance des débits du Chari à N'Djaména. Pour l'annuler, nous avons introduit une fonction d'écrêtement des crues (fig. 7.5), effective à partir d'un débit moyen mensuel de $2\,750\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, mais non totale en ce sens que l'on considère que 20 % des volumes écrêtés au cours d'un mois parviennent néanmoins au lac au cours du mois suivant ; il s'agit donc, d'une part, d'une perte par évaporation et infiltration (pour 80 %) et, d'autre part, d'un

freinage de l'onde de crue, deux phénomènes se produisant pour les forts débits dans la plaine d'inondation séparant N'Djaména du lac.

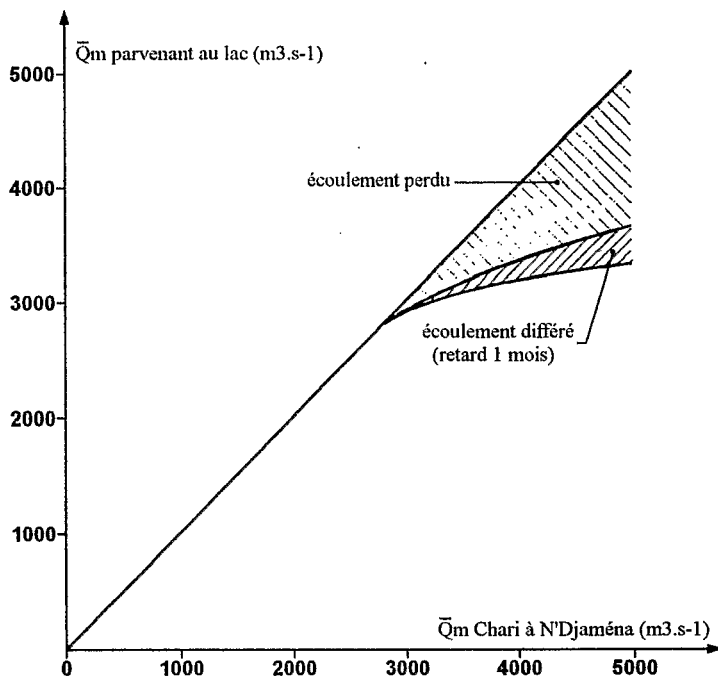


Figure 7.5

Fonctions d'écêtement des débits moyens mensuels du Chari à N'Djaména.

L'action de ces deux phénomènes est présentée dans le tableau 7.3. On remarquera que :

- seuls les mois de septembre à janvier sont concernés,
- cinq années ne subissent pas d'influence alors que cinq autres sont très affectées,
- la restitution des volumes stockés entraîne parfois un accroissement des modules calculés par rapport aux modules observés. Cette troisième étape de la simulation est dite « à pertes partielles avec écrêtement des crues ».

Dans un but de simplification, les nouveaux algorithmes mensuels de pertes partielles ont été linéarisés. Le calage a dû être entièrement repris puisque les précédents incluaient comme pertes du lac ce qui n'était peut-être que pertes antérieures à l'arrivée dans le lac, et qu'ils devaient être établis en sorte que la divergence provoquée par les forts débits soient annulée par la suite.

Les algorithmes sont donnés dans la figure 7.6 et les tracés graphiques sont présentés dans la figure 7.7. La divergence qui nuisait à la qualité des précédentes simulations a presque disparu ; elle subsiste, quoique amoindrie, par endroits, mais il ne nous a pas été possible de l'annuler totalement. Il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit d'une modélisation appuyée sur un bilan hydrologique simplifié à l'extrême par une suite d'hypothèses.

Tableau 7.3

Ecrêtement des crues du Chari (débits moyens mensuels en m³.s⁻¹)

	Septembre				Octobre				Novembre				Décembre				Janvier			
	QN	QP	QS	QL	QN	QP	QS	QL	QN	QP	QS	QL	QN	QP	QS	QL	QN	QP	QS	QL
1954-55	2 660	0	0	2 660	3 890	576	144	3 170	4 330	874	219	3 381	2 840	30	8	3 021	1 100	0	0	1 108
1955-56	2 820	24	6	2 790	4 090	707	177	3 212	4 560	1 034	259	3 444	3 130	145	36	3 208	1 360	0	0	1 396
1956-57	2 720	0	0	2 720	3 800	519	130	3 151	4 250	818	205	3 357	2 560	0	0	2 765	1 000	0	0	1 000
1957-58	2 200	0	0	2 200	2 640	0	0	2 640	2 470	0	0	2 470	1 570	0	0	1 570	747	0	0	747
1958-59	2 440	0	0	2 440	2 750	0	0	2 750	2 590	0	0	2 590	1 290	0	0	1 290	645	0	0	645
1959-60	2 430	0	0	2 430	3 620	411	103	3 106	3 730	477	119	3 237	1 810	0	0	1 929	772	0	0	772
1960-61	2 300	0	0	2 300	3 150	154	38	2 958	3 880	570	142	3 206	2 960	71	18	3 013	1 140	0	0	1 158
1961-62	3 040	103	26	2 911	4 470	971	243	3 282	4 850	1 236	309	3 548	2 650	0	0	2 959	1 070	0	0	1 070
1962-63	2 460	0	0	2 460	4 050	679	170	3 201	4 540	1 020	255	3 265	2 950	67	17	2 866	1 280	0	0	1 280
1963-64	3 130	145	36	2 949	3 610	406	101	3 139	2 980	78	19	2 984	1 510	0	0	1 529	777	0	0	777
1964-65	2 520	0	0	2 520	3 580	388	97	3 095	3 860	557	139	3 261	2 280	0	0	2 419	994	0	0	994
1965-66	2 190	0	0	2 190	2 540	0	0	2 540	2 170	0	0	2 170	904	0	0	904	441	0	0	441
1966-67	2 150	0	0	2 150	3 070	117	29	2 924	2 560	0	0	2 589	1 470	0	0	1 470	644	0	0	644
1967-68	2 290	0	0	2 290	3 370	267	67	3 036	3 570	382	95	3 160	1 700	0	0	1 795	732	0	0	732
1968-69	2 380	0	0	2 380	2 690	0	0	2 690	2 230	0	0	2 230	1 050	0	0	1 050	536	0	0	732
1969-70	2 260	0	0	2 260	2 790	14	3	2 773	2 550	0	0	2 553	1 400	0	0	1 400	630	0	0	630
1970-71	2 480	0	0	2 480	3 640	423	106	3 111	3 320	239	60	3 127	1 310	0	0	1 370	629	0	0	629
1971-72	2 200	0	0	2 200	3 250	200	50	3 000	2 490	0	0	2 540	956	0	0	956	491	0	0	491
1972-73	1 330	0	0	2 330	1 370	0	0	1 370	1 120	0	0	1 120	527	0	0	527	264	0	0	264

QN = observation à N'Djamena
QP = perte définitive

QS = stockage
QL = arrivée au lac

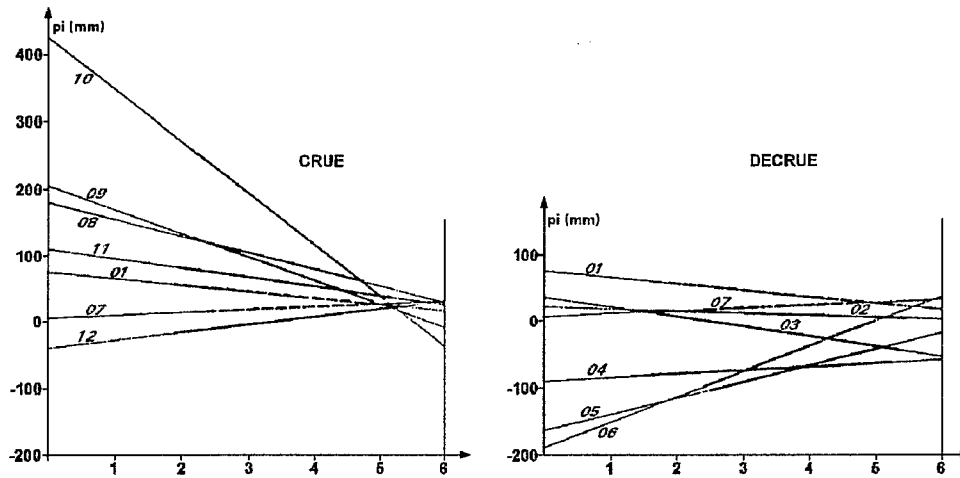


Figure 7.6

Algorithmes mensuels de pertes.

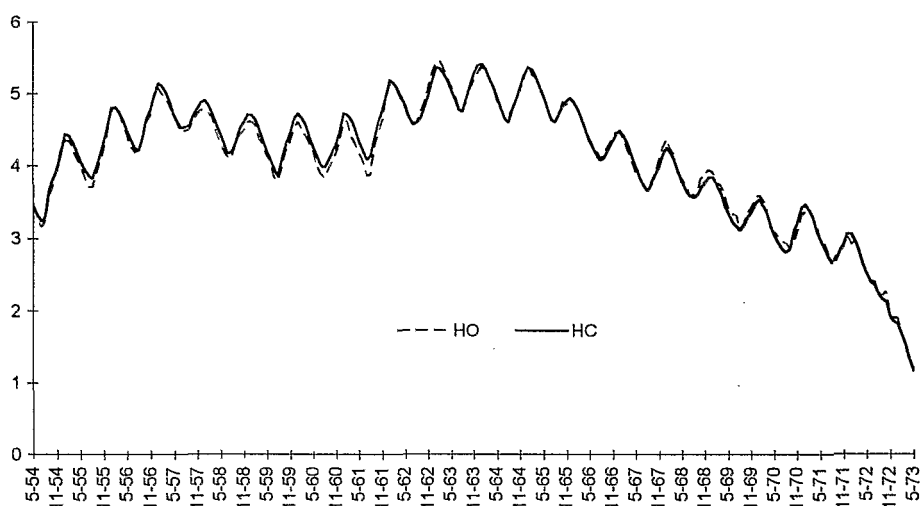


Figure 7.7

Comparaison des niveaux du lac Tchad reconstitués par simulation « à pertes partielles et écrêtement des débits » (Hc) et des niveaux observés (Ho).

Cette simplification du bilan hydrologique concerne notamment l'estimation des apports pluviaux sur le lac à partir des données recueillies à cinq postes situés hors du lac et affectés de coefficients de pondération constants, et il est possible que certaines anomalies de réponse des modèles proviennent d'erreurs d'estimation des précipitations. Les apports pluviaux ne représentent que 14 % des apports totaux en moyenne annuelle (calculée sur la période 1954-1968) mais la répartition à l'intérieur de l'année n'est pas la même que celle des apports fluviaux ; c'est ainsi qu'au plus fort de la saison humide, les pluies représentent près de la moitié des apports des mois de juillet et août, soit une lame d'eau de 26 cm (sur 54,5) supposée uniformément répartie sur une surface de 19 350 km². Or, la moyenne mensuelle des écarts absolus entre les ΔH observés et les ΔH calculés dans cette troisième simulation n'est que de 3,2 cm, c'est-à-dire qu'elle n'atteint que le quart de la moyenne pluviométrique de ces mois de juillet et août (et qu'elle n'est qu'à peine supérieure à la moyenne mensuelle - 2,7 cm - des précipitations annuelles). On conçoit donc aisément qu'une erreur modérée sur l'évaluation d'une précipitation mensuelle peut entraîner un comportement désordonné de la simulation.

Etant donné qu'il n'est pas possible d'améliorer la connaissance des précipitations et que les approximations sont déjà importantes, il n'était pas plus audacieux d'utiliser les observations de la seule station de Bol pondérées par les corrélations établies pour chacun des mois de la saison des pluies.

En effet, celles-ci établies sur la période 1954-1972 sont suffisamment étroites pour autoriser cette substitution :

Mai	$P_{lac} = 0,82 P_{Bol} + 1,6$	$r = 0,95$
Juin	$P_{lac} = 0,60 P_{Bol} + 4,4$	$r = 0,96$
Juillet	$P_{lac} = 0,77 P_{Bol} + 14,1$	$r = 0,89$
Août	$P_{lac} = 0,74 P_{Bol} + 26,5$	$r = 0,97$
Septembre	$P_{lac} = 0,67 P_{Bol} + 10,7$	$r = 0,97$
Octobre	$P_{lac} = 0,65 P_{Bol} + 0,6$	$r = 0,99$

Les essais de simulation obtenus à partir de la station de Bol donnent des résultats tout aussi satisfaisants.

Dans les algorithmes présentés dans la figure 7.6, les tracés en trait renforcé indiquent l'intervalle d'observation relatif à chaque mois ; les extrapolations de part et d'autre n'ont pas de justification expérimentale et n'ont servi qu'à paramétrer les courbes pour les calculs informatiques. Dans un souci de clarté, les algorithmes ont été répartis en deux groupes : « crue » et « décrue » du lac ; les mois où se situent en moyenne (de 19 ans) les étales de hautes et basses eaux apparaissent en pointillés dans les deux graphiques.

Ayant admis par hypothèse que l'évaporation mensuelle est exactement représentée par l'évapotranspiration moyenne mensuelle de la station de Bol-Matafo, les algorithmes représentent les pertes par infiltration, seul terme du bilan hydrologique à ne pas être connu. On remarquera que le terme π (que nous appellerons « infiltration », compte-tenu de l'hypothèse qui précède) peut être négatif. Il est positif lorsqu'il y a vraiment infiltration, c'est-à-dire perte d'eau par le fond ou par alimentation marginale de la frange lacustre de la nappe ; c'est le cas notamment de toute l'époque de montée du lac, de juillet à janvier. Il est négatif lorsqu'il y a retour de la nappe vers le lac, c'est-à-dire en période de décrue, en particulier de mars à juin.

Le sens de variation des algorithmes semble également lié au cycle hydrologique du lac ; on peut voir figure 7.6 que la pente des relations est généralement négative en période de crue et positive en période de décrue. On remarquera surtout qu'en période de très hautes eaux (cote de 5 m à l'échelle, soit à l'altitude 283), les pertes sont peu variables, alors qu'elles sont très dissemblables en période de très basses eaux (cote de 2 m à l'échelle, soit à l'altitude 280) ; cela tient peut-être à des pertes supplémentaires provoquées par les besoins d'une végétation aquatique dense qui se développe sur les fonds exondés ; c'est en tout cas l'explication déjà avancée. (P. Touchebeuf *et al.*, 1969).

Le mois d'octobre se caractérise par des pertes particulièrement sévères encore que la fonction d'écrêtement des crues les ait sensiblement atténuées en hautes eaux ; cette singularité peut s'expliquer par le fait que ce mois est celui du plus fort gradient de croissance du niveau du lac et par conséquent de plus grande surface latérale offerte à l'alimentation de la nappe. Le raisonnement vaut également pour les mois de mai et de juin : plus forts gradients de décroissance et plus grandes surfaces offertes aux retours de nappe.

3.2. Résultats de la modélisation et analyse du bilan hydrologique mensuel

L'ajustement assez satisfaisant du limnigramme établi par la simulation « à pertes partielles et écrêtement des crues » au limnigramme expérimental (fig. 7.7) nous autorise à reconsidérer le bilan hydrologique tel que nous l'avons présenté dans la deuxième partie de ce chapitre, d'une part, en n'utilisant comme apports de surface que ceux du Chari, d'autre part, en écrétant les fortes crues observées à N'Djaména. Nous nous attacherons à deux périodes.

3.2.1. Période totale 1954 -1972 (19 ans)

C'est la période limitée par le début des observations régulières, d'une part, et par l'apparition des anomalies liées à la sécheresse, d'autre part, (séparation des deux cuvettes, isolement de l'échelle de Bol) ; c'est aussi la période sur laquelle ont été calés les algorithmes mensuels de pertes relatifs aux trois méthodes de simulation.

Le tableau 7.4 donne le détail des pertes totales mensuelles en lames d'eau correspondant à des volumes par unité de surface d'eau libre du lac. Le bon ajustement de la simulation n'est pas un critère suffisant pour tenir comme absolument rigoureuses les moyennes mensuelles et annuelles obtenues ; il faut en effet tenir compte des erreurs à

craindre induites par celles qui sont attachées aux observations de débit, de cote, etc. P. Touchebeuf (1969) les a estimées à 25 cm à l'échelle annuelle et variant de 3 cm en avril à 8 cm en octobre.

Tableau 7.4

Pertes totales absolues (mm) ou spécifiques ($10^3 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$).

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déce.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Total
1954-55	163	194	143	304	244	281	240	287	149	159	173	115	2452
1955-56	183	204	152	230	241	354	245	164	178	103	201	167	2422
1956-57	163	116	143	284	220	351	180	274	190	123	120	136	2300
1957-58	123	187	197	218	249	274	260	200	134	104	175	134	2255
1958-59	143	132	207	192	297	325	234	152	140	187	90	139	2238
1959-60	112	227	141	293	251	333	248	189	181	134	104	108	2321
1960-61	209	141	222	217	252	317	266	197	135	250	128	114	2448
1991-62	129	222	269	103	286	314	189	208	139	138	132	121	2250
1962-63	171	108	141	162	228	264	242	253	136	147	151	119	2222
1963-64	149	189	206	292	234	297	282	116	134	136	107	164	2306
1964-65	115	158	140	184	232	303	266	165	188	92	150	116	2209
1965-66	139	138	206	253	155	359	210	129	134	140	132	101	2096
1966-67	174	122	222	199	251	313	261	203	168	168	133	183	2397
1967-68	72	106	198	260	202	288	269	136	213	125	236	90	2195
1968-69	98	204	172	224	197	350	226	175	210	68	177	179	2280
1969-70	110	104	301	254	209	364	239	169	166	160	275	70	2421
1970-71	108	83	177	369	441	325	265	140	76	152	122	203	2461
1971-72	79	150	278	151	324	403	233	277	38	168	236	120	2487
1972-73	151	22	265	232	186	579	243	108	269	201	229	146	2691
Moyenne	136	148	204	238	249	337	242	186	157	145	162	133	2340

Le tableau 7.5 est obtenu par simple soustraction des moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle observée à Bol-Matafo en admettant que celle-ci soit représentative de l'évaporation des eaux libres du lac. On notera qu'en moyenne les mois de février à juin sont caractérisés par des pertes négatives, c'est-à-dire en première analyse par une réalimentation du lac par la nappe. Il serait hasardeux d'analyser les résultats au niveau annuel en raison de l'influence possible de l'origine de l'année hydrologique ; rappelons que nous considérons l'année mai-avril qui correspond aux régimes du Logone et du Chari inférieurs, alors que le régime du lac est plutôt août-juillet.

Parmi les nombreuses recherches de corrélation, nous ne présentons, figure 7.8, que celle qui apparaît entre les pertes annuelles partielles et la cote moyenne du plan d'eau au cours de l'année hydrologique considérée ; les diverses explications des écarts à la régression linéaire observée (coefficient de corrélation = 0,81) ne sont pas suffisamment satisfaisantes pour retenir notre attention. Une translation de cette droite parallèlement à l'axe des pertes et d'une valeur égale à l'ETP annuelle (217 cm) permet d'obtenir la droite qui aurait été établie avec les valeurs du tableau 7.4. On constatera, sans pouvoir objectivement l'expliquer, que les pertes totales varient d'environ 220 à 260 cm lorsque l'altitude moyenne du plan d'eau passe de 283 à 280 m.

Tableau 7.5

Pertes autres que l'évaporation (infiltration, etc.) absolues (mm) ou spécifiques ($10^3 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$).

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déce.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Total
1954-55	-63	-7	-32	154	85	82	62	137	13	4	-39	-114	282
1955-56	-43	3	-23	80	82	155	67	14	42	-52	-11	-62	252
1956-57	-63	85	-32	134	61	152	2	124	54	-32	-92	-93	130
1957-58	-103	-14	22	68	90	75	82	50	-2				
1958-59	-83	-69	32	42	138	126	56	2	4	32	-122	-90	68
1959-60	-114	26	-34	143	92	134	70	39	45	-21	108	121	-151
1960-61	-17	-60	47	67	93	118	88	47	-1	95	-84	-115	278
1961-62	-97	21	94	47	127	115	11	58	3	-17	-80	-108	80
1962-63	-55	-93	66	12	69	65	64	103	0	-8	-61	-110	52
1963-64	-77	-12	31	142	75	98	104	-34	-2	-19	-105	-65	136
1964-65	-111	-43	-35	134	73	104	88	15	52	-63	-62	-113	39
1965-66	-87	-63	31	103	-4	160	32	-21	-2	-15	-80	-128	-74
1966-67	-52	-79	47	49	92	114	83	53	32	13	-79	-46	227
1967-68	-154	95	23	110	43	89	91	-14	77	-30	24	-139	25
1968-69	-128	3	-3	74	38	151	48	25	74	-87	-35	-50	110
1969-70	-116	-97	126	104	50	165	61	19	30	5	63	-159	251
1970-71	-118	-118	2	219	282	126	87	-10	-60	-3	-90	-26	291
1971-72	-147	-51	103	1	195	204	55	127	-98	13	24	-109	317
1972-73	-75	-179	90	82	27	387	65	-42	133	46	17	-83	521
Moyenne	-90	-53	29	88	90	138	64	36	21	-10	-50	-96	170

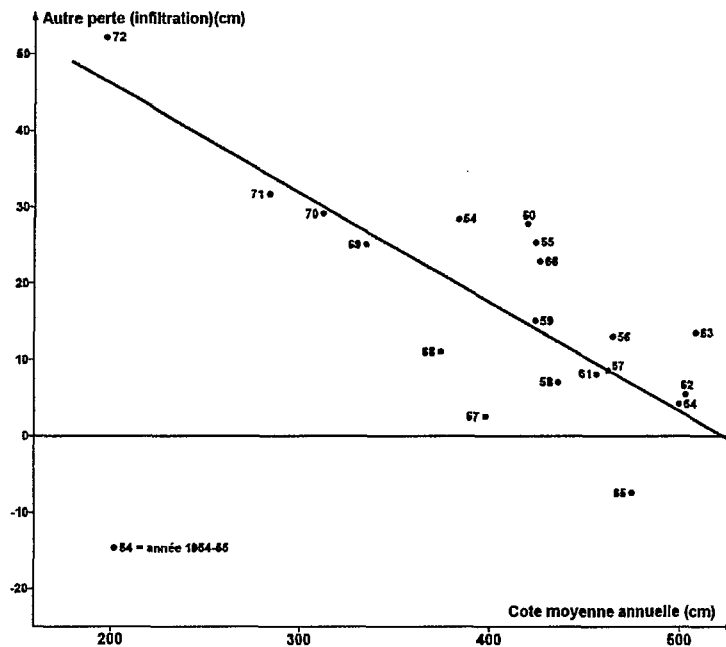


Figure 7.8

Corrélation des pertes annuelles partielles avec la cote moyenne du plan d'eau.

3.2.2. Période 1954-1968 (15 ans)

Cette période a été retenue pour effectuer un bilan moyen parce qu'elle constitue, au moins dans la période antérieure au Petit Tchad une partie du pseudo-cycle du lac où il y a presque égalité des cotes initiale et finale du plan d'eau, 345 cm le 1er mai 1954, 342 cm le 1er mai 1969, ceci alors que la limite de la période est incluse dans la phase d'assèchement que l'on peut considérer avoir commencé au début de l'année 1965 (cf. fig. 7.2).

Le tableau 7.6 expose ce bilan hydrologique mensuel moyen qui est représenté en figure 7.9. On notera particulièrement :

- la faible part prise par les pertes diverses (infiltration, etc.) en comparaison de celle attribuée à l'évaporation,
- la diminution importante de ces pertes diverses lorsque l'on réduit la période d'observation de 19 ans (tabl. 7.5) à 15 ans, c'est-à-dire lorsque l'on ne tient pas compte de la période correspondant à la transition entre les états « Moyen » et Petit Tchad ».

Tableau 7.6

Bilan hydrologique mensuel du lac Tchad (période 1954-1968).

		Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déce.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Totaux
Cotes moyennes	\bar{H} cm	436	422	410	409	423	439	452	468	478	473	463	449	
Superficies correspondantes	S_i km ²	19900	19600	19350	19340	19600	19970	20300	20700	21000	20850	20580	20240	
Modèles Chari écrêtés	\bar{Q}_i m ³ .s ⁻¹	211	307	663	1390	2490	2990	3000	2140	889	506	294	199	
Lames correspondantes	hQ cm	2.7	4.1	8.9	18.6	32.9	38.8	38.3	26.8	11.0	6.3	3.7	2.5	194.6
Apports pluviaux	P cm	0.7	1.3	8.4	17.7	4.3	0.5	0	0	0	0	0	0	32.9
Variations de cote du lac	ΔH cm	-13.5	-11.7	-1.7	14.5	16.1	12.6	15.7	10.9	-5.5	-10.1	-13.6	13.2	0.3
Evaporation (ETP)	cm	22.6	20.1	17.5	15.0	15.9	19.9	17.8	15.0	13.6	15.5	21.2	22.9	217.0
Autres pertes (infiltration, etc.)	cm	-5.7	-3.0	1.5	6.8	5.2	6.8	4.8	0.9	2.9	0.9	-3.9	7.2	+10.2

De meilleures illustrations du phénomène « pertes diverses » à l'échelle mensuelle sont données en figure 7.10 d'une part, en fonction de la cote moyenne du plan d'eau, et en figure 7.11, d'autre part, en fonction de la variation moyenne de cote au cours du mois. On retrouve la différenciation déjà exposée entre mois d'alimentation de la nappe (juillet à février) et mois de restitution de la nappe (mars à juin). Et comme précédemment, il n'existe pas d'explication satisfaisante des écarts à la courbe moyenne qui serait tracée dans le plan (autres pertes, ΔH) ; mais nous possédons, avec les algorithmes de la simulation « à pertes partielles et écrêtement des débits », un outil suffisamment performant pour nous en consoler.

A l'échelle annuelle, on retiendra les chiffres de la dernière colonne du tableau 7.6, apports de surface 195 cm, apports pluviaux 33 cm, pertes par évaporation 217 cm, pertes par infiltration 10 cm soit un total de pertes de 227 cm en moyenne pendant la période 1954 -1968. Ce résultat est presque égal à la moyenne de l'évaporation annuelle calculée par la formule de Penman pour la station de Bol (229 cm.an^{-1}) ; il est également très voisin de l'évaporation moyenne interannuelle donnée par le bac Colorado enterré de Bol, si on lui applique un coefficient de réduction de 0,70 qui paraît vraisemblable pour passer, en climat sahélien, de l'évaporation sur bac à l'évaporation sur grande nappe d'eau libre ($330 \times 0,7 = 231 \text{ cm an}^{-1}$). Les résultats donnés pour les infiltrations sont corroborés par ceux de l'étude de la régulation saline du lac (M.A. Roche, 1973).

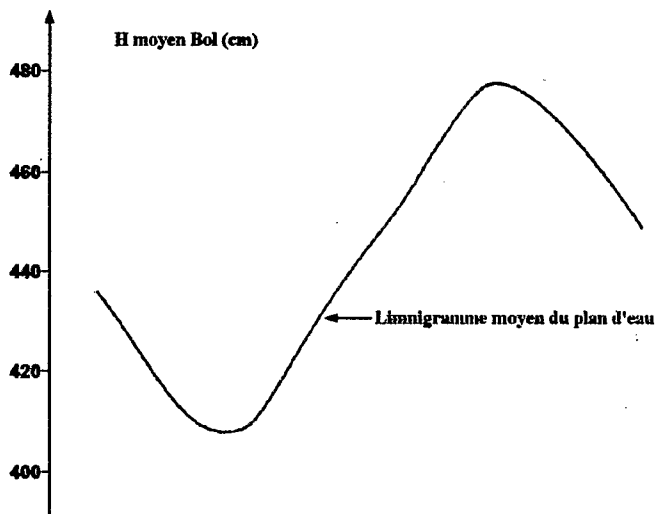
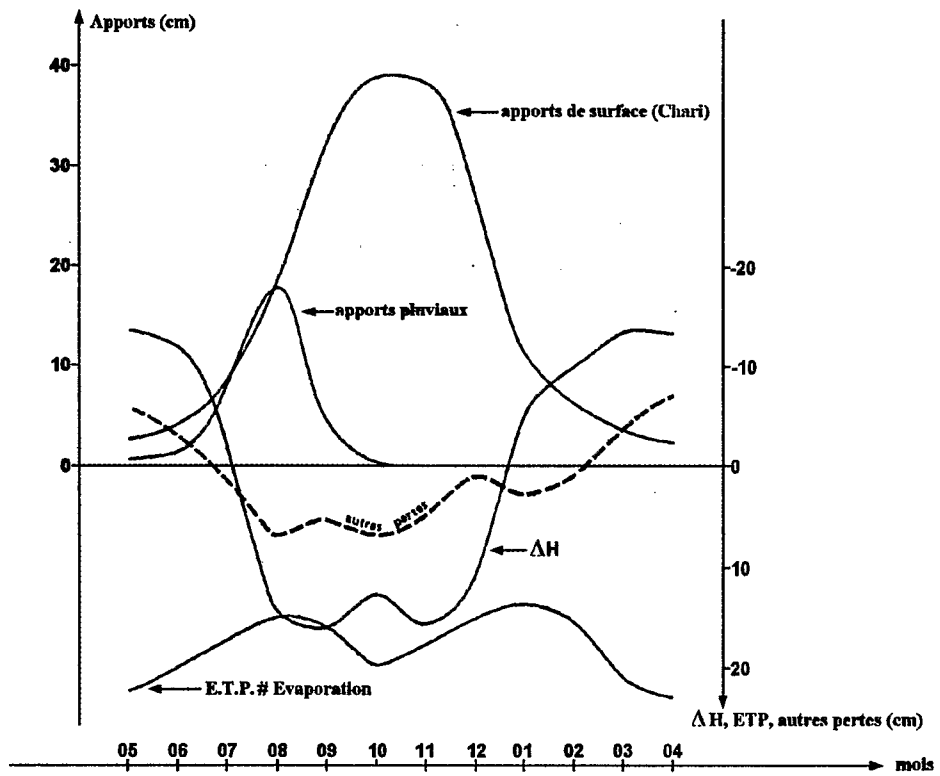


Figure 7.9

Bilan mensuel moyen du lac Tchad . Période 1954-1968

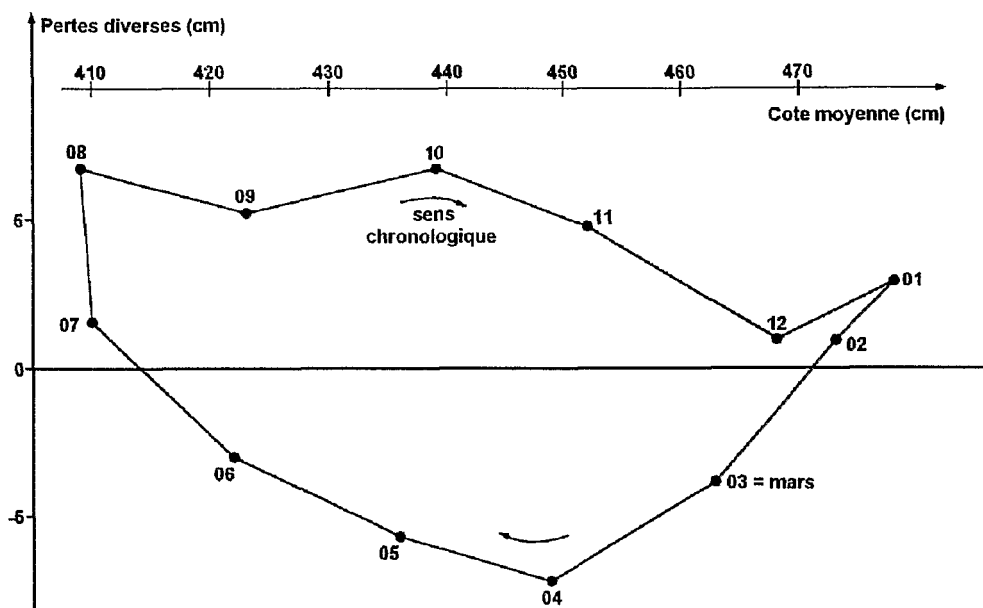


Figure 7.10

Cycle des pertes diverses (moyennes mensuelles) en fonction de la cote du plan d'eau (période 1954-1968).

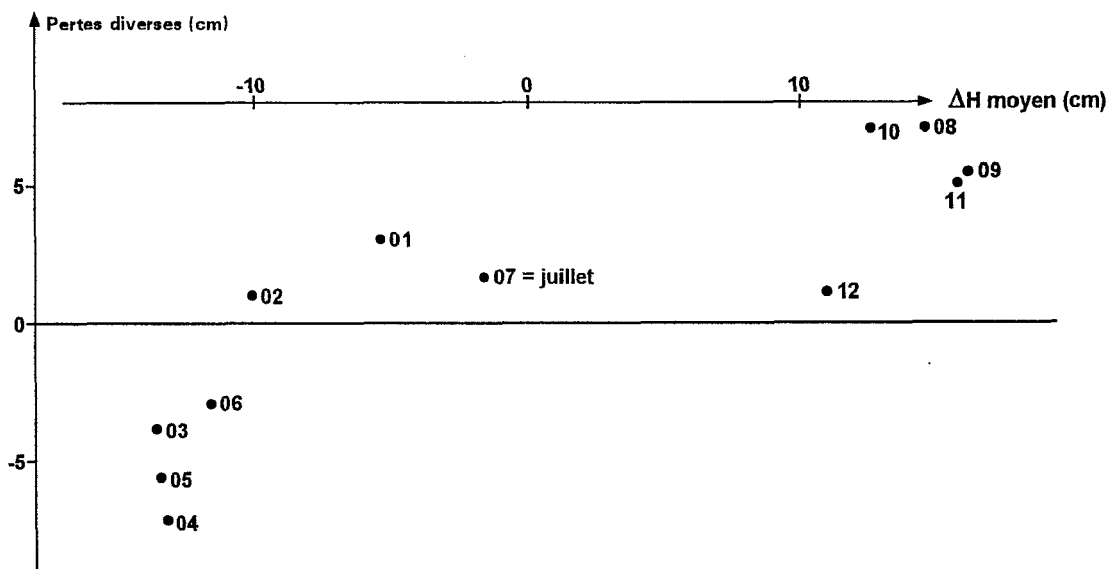


Figure 7.11

Pertes diverses (infiltration) en fonction de la variation moyenne du plan d'eau (période 1954-1968).

3.3. Un exemple d'application : influence des prélèvements pour irrigation

Vuillaume (1981) a étudié l'influence des prélèvements pour irrigation sur les niveaux du lac à partir de scénarios qui prévoient des retraits en plusieurs points du réseau hydrographique et dans le lac lui-même. Le volume total dépasse légèrement 2,5 milliards de m³ an⁻¹, soit environ 5 % des apports totaux au lac. Ce volume est réparti entre les douze mois de l'année suivant un système fixe sans considération de besoins spécifiques liés aux conditions climatiques de chaque année :

Mois	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Année
Vol. 10 ⁶ m ³	192	372	268	210	262	212	205	189	235	178	98	137	2558

Pour estimer l'impact de ces prélèvements, on a procédé de la même manière que pour le bilan hydrologique, à deux différences près :

- les apports sont diminués des prélèvements,
- l'inconnue est la variation de volume du lac ou, si l'on préfère, la variation de niveau.

Il existe bien une autre inconnue qui est la perte spécifique par évaporation et infiltration, inconnue qu'il faut connaître pour que le problème soit résoluble : nous admettons que pour chacun des mois de chacune des années la perte spécifique est la même, que les apports soient complets ou qu'ils soient diminués des prélèvements pour irrigation. Il s'agit donc d'une double hypothèse :

- constance de la perte spécifique d'un mois déterminé (juillet 1970, par exemple) quelle que soit l'altitude du plan d'eau,
- proportionnalité des pertes à la surface.

La première hypothèse n'est pas vérifiée dans la réalité puisqu'on a vu dans ce qui a précédé que les pertes spécifiques varient avec la cote du plan d'eau ; mais cette variation n'ayant pas le même sens suivant les mois, il peut y avoir à peu près compensation.

La seconde hypothèse se vérifie au moins pour ce qui concerne l'évaporation (plus de 90 % des pertes) et il est possible qu'elle soit vérifiée en partie pour l'infiltration.

L'étude a été faite sur la période 1968-1977 en recherchant l'influence des prélèvements sur les cotes puis sur les volumes du lac en les comparant à l'état réellement observé au cours de la période. Signalons qu'à partir de 1973, c'est-à-dire en période de très basses eaux, l'effet sur les hauteurs est beaucoup plus impressionnant (et donc inquiétant) que l'effet sur les volumes, ce qui tient à la forme de la relation cote-volume vers les basses altitudes. La figure 7.12 illustre les effets de l'irrigation sur les niveaux du lac.

On remarquera que la forte divergence entre les deux courbes (avec ou sans irrigation) n'est pas irrémédiable et qu'elle tend à s'amoinrir dès que l'alimentation devient moins déficitaire, c'est-à-dire depuis l'année hydrologique 1974-1975. Il s'agit en fait de l'obtention d'un nouvel état d'équilibre hydrologique : la diminution des apports entraîne une réduction des augmentations de niveau en montée de crue, un accroissement des baisses de niveau en décrue ; ces plus faibles niveaux occupent donc des surfaces moindres, ce qui réduit les pertes que nous avons supposées proportionnelles aux surfaces ; si la réduction des pertes est en moyenne, égale à la diminution des apports, nous avons effectivement atteint un autre état d'équilibre.

Pour s'en convaincre, on a effectué le même travail sur la période 1954-1977, c'est-à-dire sur 23 ans, en n'utilisant comme apports de surface que les débits connus du Chari à N'Djaména et en considérant les apports pluviaux calculés à partir de cinq postes. La réduction des apports à ceux du Chari entraîne l'obtention de pertes

spécifiques mensuelles légèrement différentes des précédentes. Nous présentons, figure 7.13, les influences de l'irrigation sur les hauteurs d'eau dans le lac ; on notera que la cote minimale atteinte est de - 0,37 m après 19 ans de prélèvements, alors qu'elle était de - 0,34 m après 5 années. Trois centimètres pour 14 années supplémentaires plaident en faveur de l'affirmation concernant l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre.

Il est cependant difficile d'imaginer que cet état d'équilibre aurait pu perdurer dans la décennie qui a suivi où le volume de prélèvements pour irrigation aurait représenté jusqu'au 1/3 des apports du Chari et dépassé les potentialités des étiages disponibles sur le réseau hydrographique.

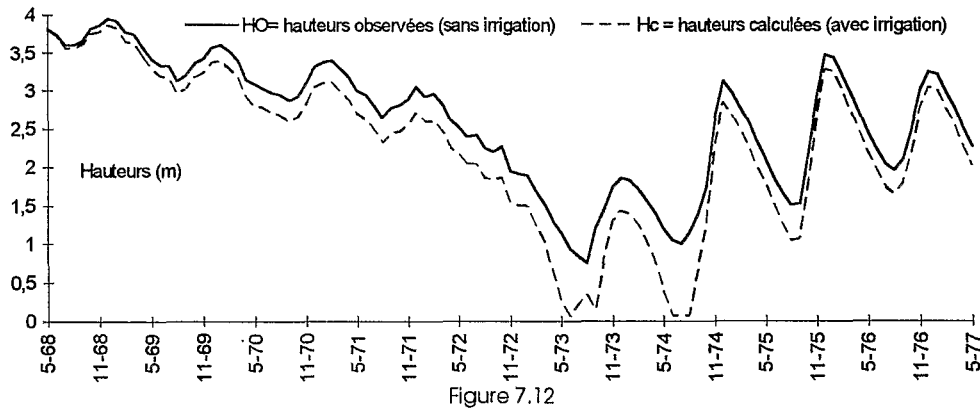


Figure 7.12
Simulation des effets de l'irrigation sur les hauteurs du lac Tchad de 1968 à 1997 (Hc) comparée aux niveaux observés (Ho). Prélèvement pendant 9 ans.

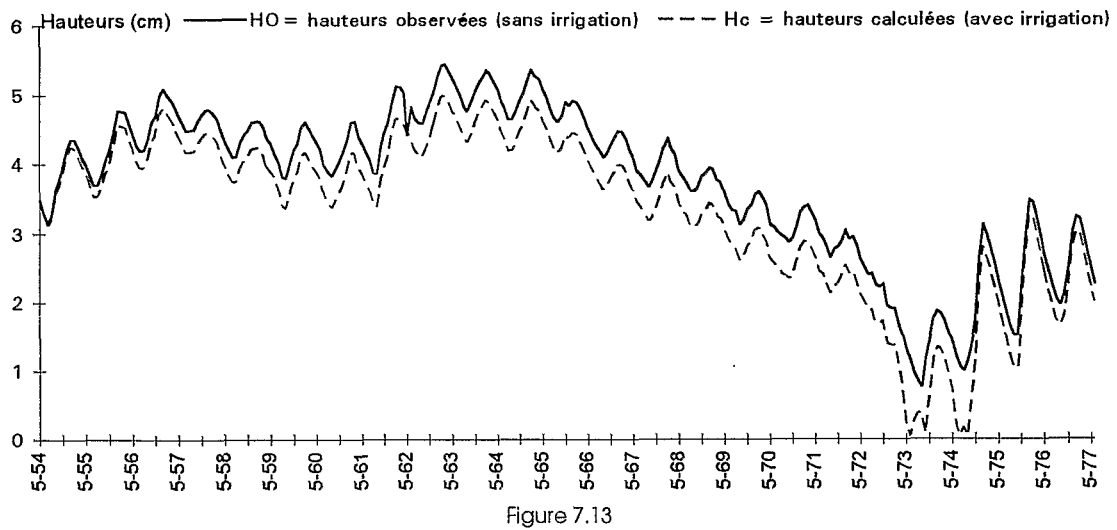


Figure 7.13
Simulation des effets de l'irrigation sur les hauteurs du lac Tchad de 1954 à 1997 (Hc) comparée aux niveaux observés (Ho). Prélèvement pendant 23 ans.

Crues et étiages du lac - prévision et prédétermination

Chapitre 8

1. RELATIONS ENTRE LES NIVEAUX EXTREMES DU LAC ET LES CRUES DU CHARI

Comme on l'a vu précédemment, le régime des variations de niveau du lac est essentiellement caractérisé par un maximum annuel (crue) qui se produit en décembre-janvier, et un minimum annuel (étiage) que l'on observe en juillet.

Les maximums (Hx) et minimums (Hn) annuels relevés à Bol seront étudiés conjointement car ils présentent entre eux des relations intéressantes du moins lorsque le niveau du lac ne descend pas trop bas, auquel cas, comme on l'a vu, on assiste à la scission du lac en deux cuvettes et à l'isolement de l'archipel de Bol. Nous allons examiner celles-ci en utilisant les données qui sont rappelées dans le tableau 8.1.

Pour chaque année hydrologique, qui s'étend approximativement sur douze mois d'un étiage à l'étiage suivant, on a indiqué :

- Hn_i niveau minimal du lac au début de l'année hydrologique considérée,
- Hx_i niveau maximal du lac pendant l'année hydrologique considérée,
- Hn_{i+1} niveau minimal du lac à la fin de l'année hydrologique considérée ou au début de l'année hydrologique suivante,
- $Hx_i - Hn_i$ montée du lac pendant la première partie de l'année hydrologique considérée,
- $Hx_i - Hn_{i+1}$ baisse du lac pendant la deuxième partie de l'année hydrologique considérée,
- $Hn_{i+1} - Hn_i$, variation de niveau entre deux étiages successifs,
- Qx_i débit maximal du Chari à N'Djaména pendant l'année hydrologique considérée, sans utilisation de la fonction d'écrêtement pour simplification,
- Qs_i débit moyen du Chari à N'Djaména, pendant le semestre qui s'étend entre le 1er janvier et le 30 juin de l'année hydrologique considérée.

Les relations présentées ici ont été établies par Touchebeuf *et al* (1969) et n'ont pas été réactualisées du fait des perturbations récentes de l'hydrosystème.

1.1. Relation entre le maximum annuel et le minimum précédent

Dans la figure 8.1a, on a porté les valeurs de Hx_i en fonction des valeurs correspondantes de Hn_i . Les points obtenus forment un nuage allongé, au milieu duquel on a tracé au jugé une courbe de relation moyenne. Cette courbe est rectiligne pour les valeurs de Hn supérieures à 300 cm. Pour les valeurs de Hn inférieures à 300 cm, la relation devient plus indécise ; ceci s'explique par l'influence de la "Grande Barrière" qui, lorsque le niveau du lac

est très bas, isole plus ou moins complètement sa partie Nord-Ouest de sa partie Sud-Est et modifie ainsi grandement le fonctionnement hydraulique du lac.

Tableau 8.1

Données relatives aux crues et aux étiages du lac

Année (i)	H _i (cm)	H _x (cm)	H _{n,i} (cm)	H _i -H _{n,i} (cm)	H _x -H _{n,i} (cm)	H _{n,i} -H _{n,i} (cm)	Q _x (cm)	Q _s (m ³ .s-1)
1906-1907	-	-	(200)	-	-	-	-	-
1907-1908	(200)	(287)	(210)	(87)	(77)	+(10)	-	-
1908-1909	(210)	(353)	(265)	(143)	(88)	+(55)	-	-
1911-1912	-	-	(280)	-	-	-	-	-
1912-1913	(280)	(384)	(280)	(104)	(104)	0	-	-
1913-1914	(280)	(293)	(207)	(13)	(86)	-(73)	-	-
1914-1915	(207)	(300)	(220)	(93)	(80)	+(13)	-	-
1915-1916	(220)	(315)	(237)	(95)	(78)	+(17)	-	-
1916-1917	(237)	(419)	(297)	(182)	(122)	+(60)	-	-
1917-1918	(297)	(419)	(310)	(122)	(109)	+(13)	-	-
1918-1919	(310)	(400)	(301)	(90)	(99)	-	-	-
1919-1920	(301)	(450)	-	(149)	-	-	-	-
1949-1950	-	-	(270)	-	-	-	3450	-
1950-1951	(270)	(405)	-	(135)	-	-	(4400)	-
1953-1954	(300)	390	310	(90)	80	+(10)	3780	(325)
1954-1955	310	440	368	130	72	+58	4450	484
1955-1956	368	479	(412)	111	(67)	+(44)	4700	585
1956-1957	(412)	509	445	(97)	64	+(33)	4440	487
1957-1958	445	479	408	34	71	-37	2690	339
1958-1959	408	465	375	57	90	-33	2800	277
1959-1960	375	465	381	90	84	+06	3910	335
1960-1961	381	464	385	83	79	+04	4010	438
1961-1962	385	515	455	130	60	+70	5160	534
1962-1963	455	545	477	90	68	+22	4610	627
1963-1964	477	537	457	60	80	-20	3670	366
1964-1965	457	537	460	80	77	+03	4070	420
1965-1966	460	493	(410)	33	(83)	-(50)	2570	240
1966-1967	(410)	450	366	(40)	84	-(44)	3230	-
1967-1968	366	437	360	71	77	-07	3830	-

Indépendamment de cet effet perturbateur, on conçoit qu'il ne puisse exister une relation véritablement fonctionnelle entre H_x et H_n, car il est bien évident que la montée du lac dépend de l'ampleur de la crue du Chari qui a provoqué cette montée. La crue du Chari ayant une forme régulière d'une année à l'autre, on peut caractériser son ampleur par le débit maximal Q_x observé à N'Djaména.

Un essai graphique a montré que H_x était lié plus étroitement à H_n, qu'à Q_x. C'est pourquoi ce dernier terme a été considéré comme un facteur secondaire. On a porté en fonction de Q_x, les écarts des points (H_x, H_n) par rapport à la courbe de relation moyenne obtenue précédemment et en avons déduit une courbe de correction moyenne (figure 8.1b). La dispersion des points est ainsi sensiblement réduite ; pour toutes les années d'observations postérieures à 1950, les valeurs de H_x peuvent être généralement reconstituées à moins de 10 cm près. L'écart maximal est de 16 cm, au lieu de 47 cm avant correction. Une deuxième correction a été tentée en

fonction de précipitations moyennes tombées sur le lac, mais elle n'apporte aucun gain de précision, ce qui n'est guère étonnant étant donné la détermination assez grossière de ces précipitations.

Si l'on veut déterminer H_n , en fonction de H_x , comme on le verra plus loin pour la reconstitution des anciens niveaux de crue et d'étiage, on utilisera la correction H_n , en fonction de Q_x , donnée dans la figure 8.1c.

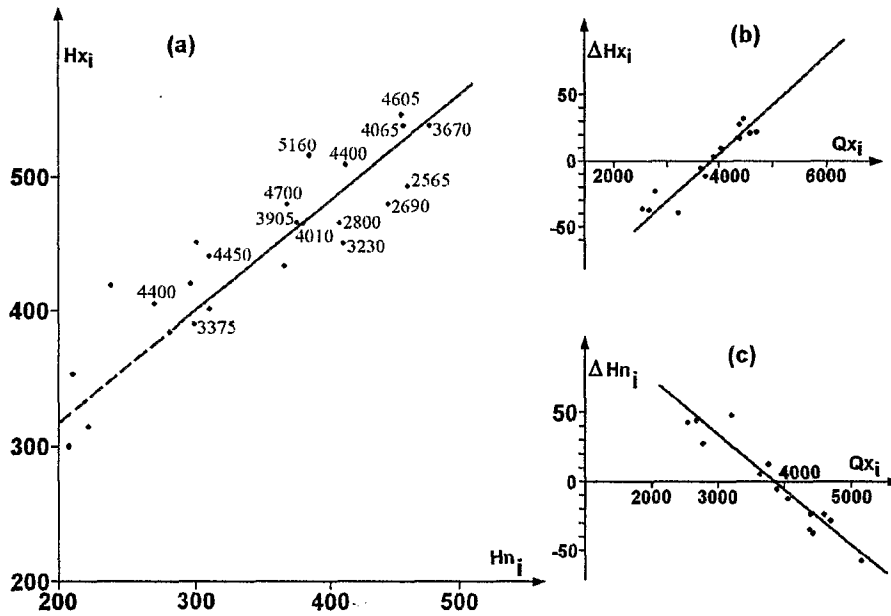


Figure 8.1

Relation entre les niveaux maximum annuel, (H_x) et minimum précédent H_n du lac (a) et corrections des écarts en fonction du débit maximum (Q_x) du Chari à N'Djaména (b). La correction donnée en (c) en fonction de Q_x est à utiliser dans la relation inverse $H_n = f H_x$ (reconstitution de données).

1.2. Relation entre le minimum annuel et le maximum précédent.

Dans la figure 8.2a, on a porté les valeurs de $H_{n,i+1}$ en fonction des valeurs correspondantes de $H_{x,i}$. Les points obtenus présentent une faible dispersion et permettent d'établir dans de bonnes conditions une courbe de relation moyenne.

On conçoit que la dispersion soit plus faible que dans le cas précédent, car la baisse du lac est essentiellement due à l'évaporation pendant la saison sèche, qui est un phénomène assez constant d'une année à l'autre.

La baisse du lac est cependant freinée par les apports du Chari qui ne sont pas complètement négligeables de janvier à juillet. Jusqu'en avril, les débits d'étiage du Chari dépendent assez étroitement du débit maximal de la crue observée au mois de novembre précédent. On a donc tenté d'introduire une correction en fonction de $Q_{x,i}$, mais cette correction n'apparaît pas très intéressante (figure 8.2b) et ne réduit pas beaucoup la dispersion. L'écart maximal sur H_n passe de 20 à 16 cm.

Une correction équivalente donnant $H_{x,i}$ en fonction de $Q_{x,i}$ est donnée sur le graphique 8.2c ; elle peut être utilisée pour reconstituer un maximum antérieur en cas de lacune, en déterminant $H_{x,i}$ en fonction de $H_{n,i+1}$.

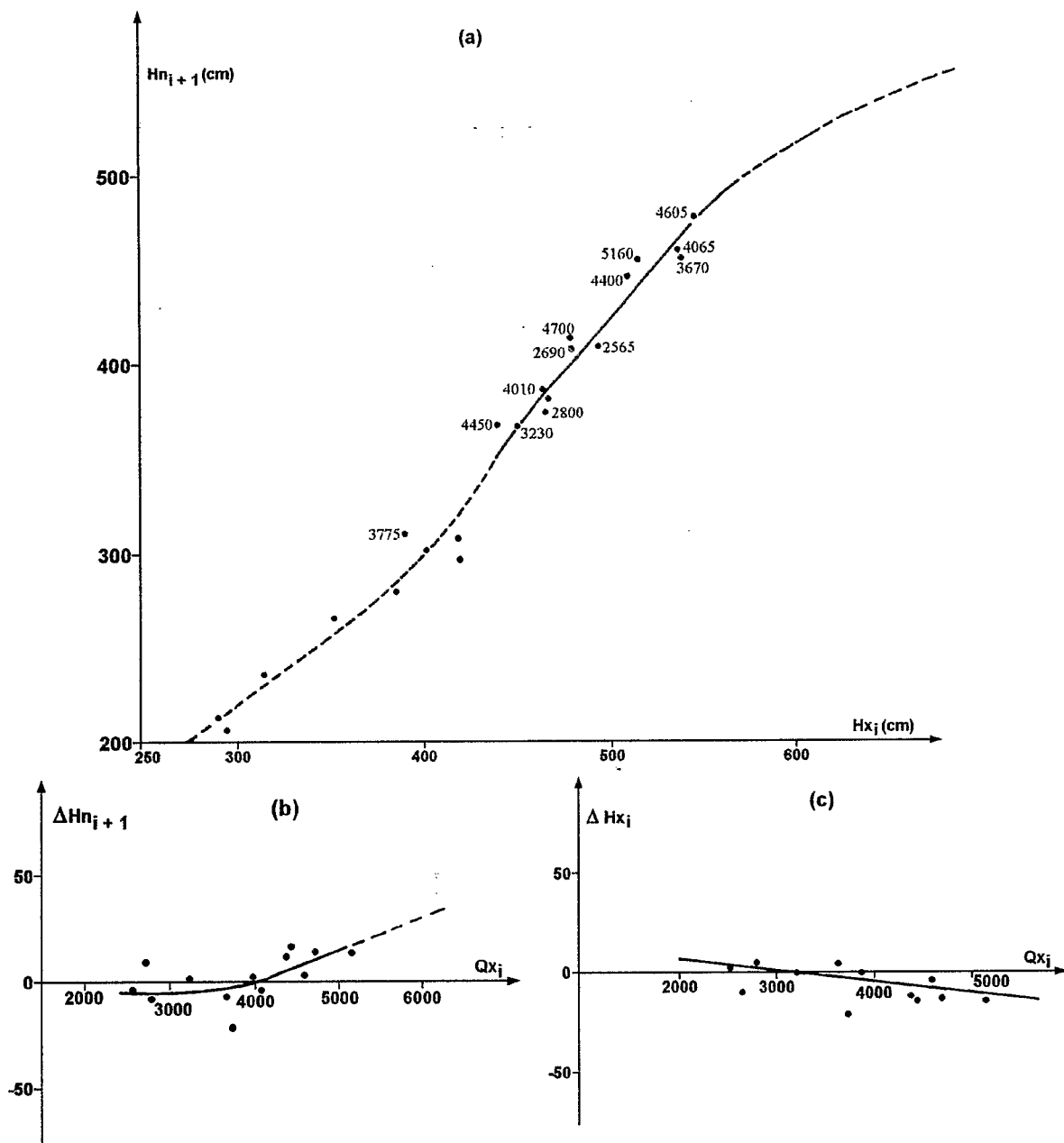


Figure 8.2

Relation entre les niveaux minimum annuel Hn_{i+1} et maximum précédent Hx_i du lac (a) et correction en fonction du débit maximum du Chari à N'Djaména Qx_i (b). En (c), correction à utiliser pour reconstitution du niveau maximum précédent.

1.3. Amplitude de la montée annuelle du lac.

D'après les données $Hx_i - Hn_i$ du tableau 8.1, on voit que l'amplitude de la montée annuelle a varié entre 13 et 182 cm sur 26 années. La série des valeurs observées peut être caractérisée comme suit :

- Moyenne : 92,25 cm
- Médiane : 90,0 cm
- Premier quartile : 67,0 cm
- Dernier quartile : 122,0 cm
- Ecart-type : 39,5 cm
- Coefficient de variation : 0,44

L'irrégularité interannuelle des montées du lac apparaît assez élevée en valeur relative.

Dans la figure 8.3a, on a cherché une relation entre l'amplitude de la montée annuelle du lac et l'importance de la crue du Chari caractérisée par son débit maximum Qx_i . Malgré une dispersion notable des points obtenus, on peut admettre une relation linéaire. Une correction en fonction du niveau d'étiage permet de réduire l'écart minimal de 35 à 17 cm. L'écart moyen devient inférieur à 10 cm (figure 8.3b).

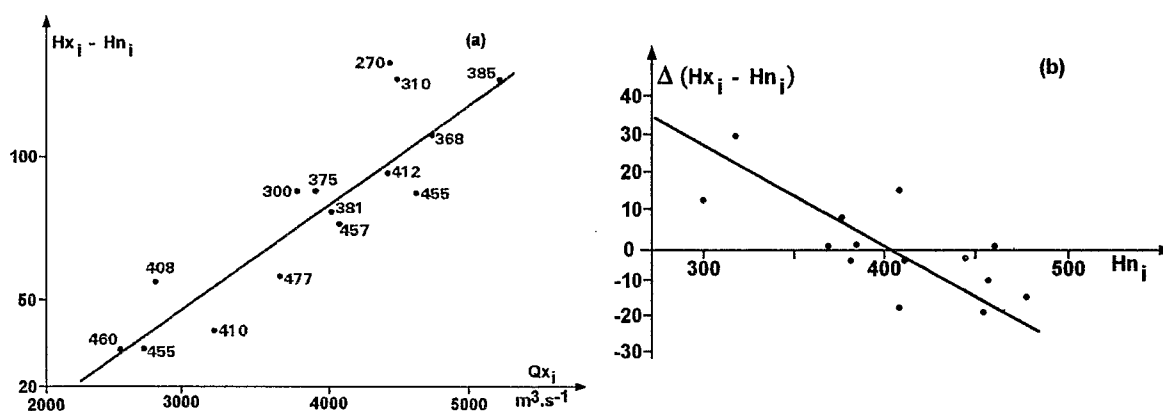


Figure 8.3

Relation entre la montée annuelle du lac ($Hx_i - Hn_i$) et le débit maximum du Chari à N'Djaména Qx_i (a) et correction en fonction du niveau d'étiage du lac (Hn_i) (b).

1.4. Amplitude de la baisse annuelle du lac

Sur 23 années, la baisse annuelle a varié entre 60 et 122 cm. Sa valeur moyenne est du même ordre que celle de la montée (sur une très longue période d'observation elle lui serait évidemment identique). Par contre la baisse annuelle est nettement moins irrégulière d'une année à l'autre que la montée, ce qui s'explique aisément étant donné que le facteur principal de la baisse est l'évaporation de janvier à juillet. En régime tropical sahélien, cette évaporation prélève chaque année une tranche d'eau relativement constante.

Les apports du Chari interviennent cependant de façon non négligeable pour freiner la baisse, comme le montre la figure 8.4 dans laquelle on a porté l'amplitude de la baisse annuelle en fonction du débit moyen du Chari à N'Djaména pendant le 1er semestre de l'année calendaire (Q_{S_i}). On note que la baisse du lac tend à diminuer légèrement lorsque les apports du Chari augmentent entre le 1er janvier et le 30 juin. On peut admettre une relation moyenne linéaire qui donne l'amplitude de la baisse à moins de 10 cm près. On a cherché à améliorer cette relation en introduisant des corrections en fonctions de H_x et de la pluie moyenne sur le lac, mais on n'a pas obtenu de résultats appréciables.

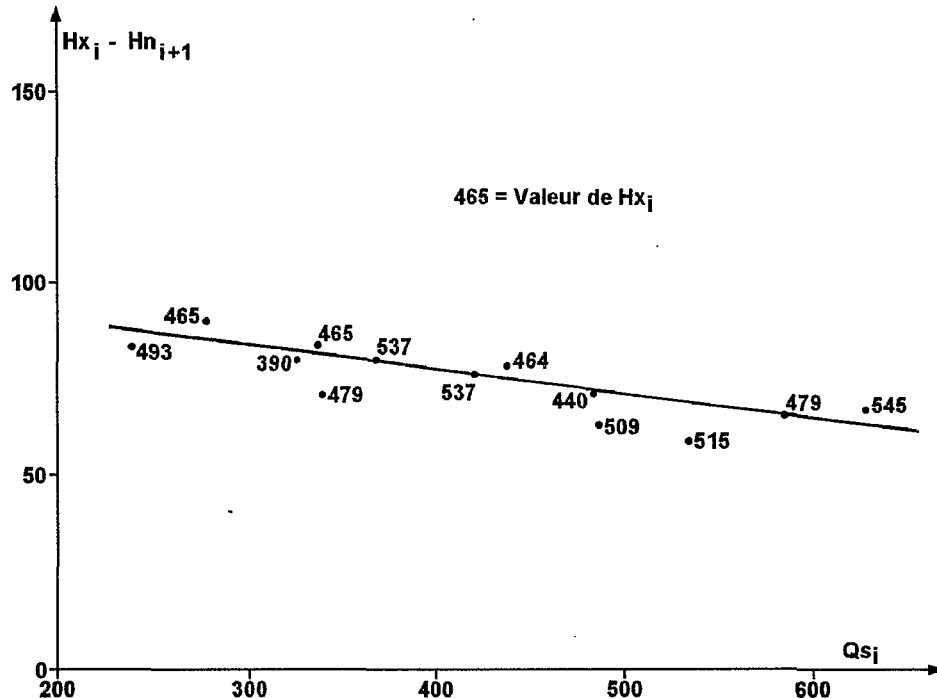


Figure 8.4

Relation entre la baisse annuelle du lac ($Hx_i - Hn_{i+1}$) et le débit moyen du Chari à N'Djaména entre le 1er janvier et le 30 juin de l'année $i+1$ (les valeurs indiquées se rapportent au niveau maximum).

Une figure analogue (8.5) a été établie en faisant intervenir non pas Q_{S_i} , mais Q_{X_i} , ces deux débits étant liés assez étroitement puisque le débit maximal du Chari commande en partie la courbe de tarissement qui lui fait suite jusqu'en avril ou mai. On obtient une relation linéaire satisfaisante pour les valeurs de Q_{X_i} supérieures à 3 000 $m^3.s^{-1}$, mais pour les valeurs inférieures la relation devient indécise ; l'utilisation à la place de Q_{X_i} du débit maximal moyen mensuel écrété (cf. chapitre 7) donne une relation linéaire mais avec une plus forte dispersion.

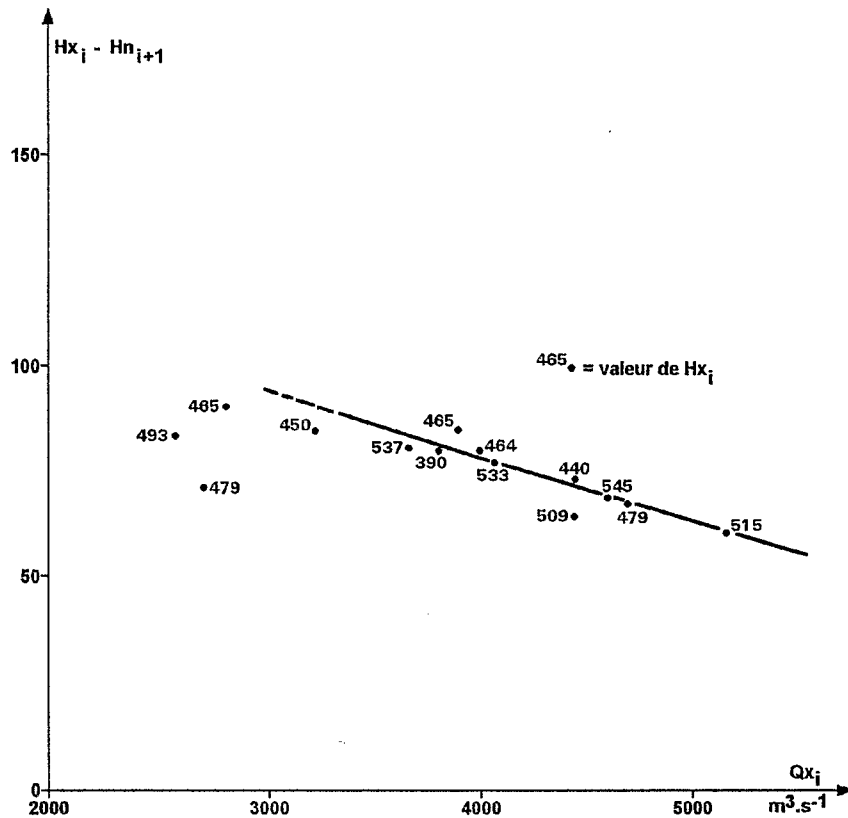


Figure 8.5

Relation entre la baisse annuelle du lac et le débit maximum du Chari à N'Djaména avec indication du niveau maximum.

1.5. Relation entre l'écart de deux étiages successifs et le débit maximal du Chari à N'Djaména

La différence de niveau entre deux étiages successifs du lac dépend principalement de l'ampleur de la crue du Chari qui s'est produite dans l'intervalle et que l'on peut caractériser par son débit maximal. Sur la figure 8.6a, les points représentatifs des valeurs de $H_{n_{i+1}} - H_{n_i}$ en fonction de Q_{x_i} permettent d'établir une relation moyenne qui est sensiblement linéaire, tout au moins pour les valeurs de Q_{x_i} supérieures à $3\,800\,m^3 \cdot s^{-1}$. Une correction de cette relation en fonction du niveau du premier étiage (figure 8.6a) permet de réduire la dispersion des points représentatifs. L'écart maximal tombe de 25 à 12 cm et l'écart moyen devient égal à environ 5 cm.

En utilisant les deux courbes précédentes (figure 8.6a et b), il est possible de déterminer pour une valeur donnée de Q_{x_i} la valeur de H_{n_i} telle que la différence $H_{n_{i+1}} - H_{n_i}$ soit nulle. Autrement dit, on obtient le niveau d'équilibre auquel se maintiendrait l'étiage du lac, si le débit maximal de la crue du Chari prenait une valeur identique pendant plusieurs années consécutives.

En utilisant maintenant les courbes des figures 8.1a et b, on peut à partir du niveau d'équilibre d'étiage déterminer le niveau d'équilibre de la crue du lac correspondant à une valeur donnée de Q_{x_i} . Les figures 8.2 et b permettent d'ailleurs une vérification du niveau d'étiage (vérification à quelques centimètres près, à cause d'une certaine imprécision des courbes de relations).

Les courbes donnant les niveaux d'équilibre d'étiage et de crue du lac, en fonction de Q_{x_i} , sont données dans la figure 8.6c. Elles ne peuvent être établies que pour une gamme assez étroite de valeur de Q_{x_i} .

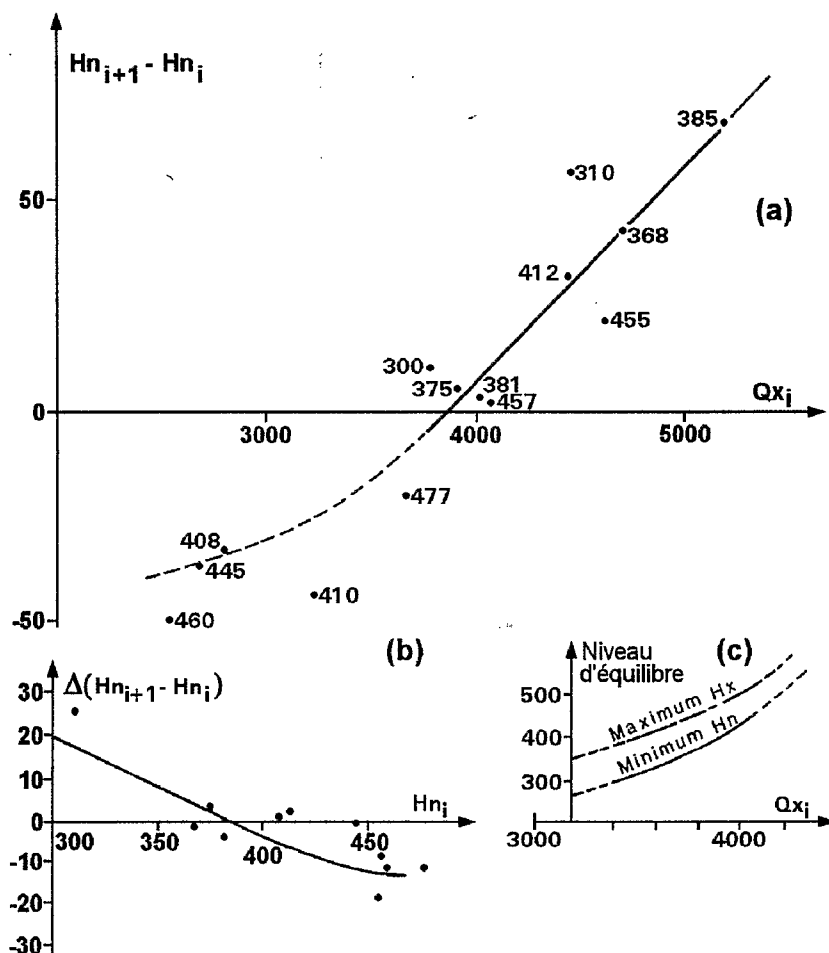


Figure 8.6

Relation entre l'écart des niveaux de deux étiages successifs du lac et le maximum de la crue intermédiaire du Chari à N'Djaména (a) avec correction en fonction du premier minimum annuel (b). Le graphe (c) donne les courbes des niveaux d'équilibre en cm à l'échelle de Bol des maximums et minimums annuels du lac suivant le maximum de crue du Chari.

1.6. Prédiction des crues et des étiages du lac.

Les possibilités de prévoir plusieurs semaines ou même plusieurs mois à l'avance les crues et les étiages du lac présentent un intérêt pratique certain, tout particulièrement dans les cas critiques : niveau du lac très bas susceptible d'entraver gravement la navigation, ou au contraire niveau très élevé risquant de provoquer des submersions de zones habitées ou cultivées et d'endommager des ouvrages comme les digues des polders de la région de Bol.

La prédiction des étiages peut se faire dans des conditions satisfaisantes en utilisant les relations de la figure 8.2.

$$H_{n,i+1} = f(Hx_i) \text{ et } \Delta H_{n,i+1} = g(Qx_i)$$

Le niveau de l'étiage de juillet peut être déterminé à environ 10 cm près, dès que le maximum précédent est connu, c'est-à-dire au plus tard à la fin de janvier, donc avec quelque six mois d'avance.

En outre, la relation entre $(H_{n,i+1} - H_{n,i})$ et Qx_i de la figure 8.6 permet de supputer un an à l'avance, en fonction de la probabilité de non dépassement des débits de crue du Chari, les risques pour que l'étiage tombe au-dessous de tel ou tel niveau. Lorsque le lac tend vers un nouvel assèchement aussi sensible que celui des années 1906 à 1908 ou 1973 et suivantes, de telles évaluations faites un an à l'avance sont précieuses pour prendre en temps utile les mesures nécessaires pour parer aux conséquences éventuelles d'un arrêt plus ou moins complet de la navigation.

La prédiction des crues du lac peut être établie à quelque 10 cm près en utilisant les relations :

$$Hx_i = f(Hn_i) \text{ et } \Delta Hx_i = g'(Qx_i)$$

de la figure 8.1, mais le délai de la prédiction est généralement inférieur à deux mois puisqu'il faut connaître le débit de la pointe de crue du Chari qui arrive à N'Djaména en octobre ou plus souvent en novembre.

Pour augmenter d'environ trois semaines le délai de la prédiction du maximum du lac sans perdre trop de précision, on peut, comme l'a suggéré B. Billouir (1965), faire intervenir les débits de pointe du Chari à Sahr ($Q'x$) et du Bahr Sara à Manda ($Q''x$), compte-tenu du fait que les débits de crue du Logone inférieur sont sensiblement constants d'une année à l'autre à cause des débordements, et que les crues des autres branches du Chari sont relativement peu importantes. On a dans ce cas intérêt à considérer la montée du lac, non pas à partir du minimum précédent, mais à partir d'une date de référence fixée au 1er octobre. Le niveau du lac à cette date est désigné par Hr .

Le tableau 8.2 rassemble toutes les données d'observation permettant d'étudier la relation entre $(Hx - Hr)$ et $(Q'x + Q''x)$. La figure 8.7 montre que cette relation est assez étroite ; les écarts des points d'observation par rapport à la courbe moyenne adoptée sont en moyenne inférieurs à 5 cm et n'exèdent jamais 12 cm. Une correction en fonction de Hr permet d'ailleurs de réduire quelque peu ces écarts. Cette relation permet de prévoir le niveau de la crue du lac dans le courant d'octobre ou au plus tard début novembre, c'est-à-dire en général de deux à trois mois à l'avance.

Des prévisions nettement moins précises, mais non dénuées d'intérêt dans certains cas critiques, peuvent être établies beaucoup plus longtemps à l'avance en utilisant la relation $Hx_i = f(Hn_i)$ de la figure 8.1. Il suffit de connaître la valeur de Hn_i , laquelle peut être soit observée directement en juillet, soit elle-même prédéterminée à partir de Hn_{i-1} et Qx_{i-1} . L'erreur maximale à craindre est d'environ 50 cm mais une correction aléatoire peut être évaluée par la relation $Hx_i = g'(Qx_i)$ en tenant compte de la fréquence de dépassement de Qx_i (voir Monographie du Chari). On peut ainsi avec une approximation raisonnable supputer près d'un an à l'avance les risques de voir la crue du lac atteindre tel ou tel niveau jugé dangereux.

On ne devra pas oublier que toutes les prévisions dont il a été question ici se rapportent à des hauteurs d'eau "lissées". Or les hauteurs d'eau réellement observées montrent toujours des fluctuations non négligeables par

rapport aux limnigrammes lissés, comme on l'a vu au chapitre 6. Rappelons que la fluctuation maximale que l'on peut observer une fois tous les dix ans en décembre ou janvier a été évaluée à 20 cm en moyenne pendant 24 heures et à 25 cm pendant une heure ou deux (non compris l'effet de la houle).

Tableau 8.2

Relation entre la montée du lac à partir du 1^{er} octobre et la somme des débits de crue de Sarh et Manda

ANNEE	H _x	H _r	H _x -H _r	Q' _x	Q'' _x	Q' _x +Q'' _x
1953-1954	390	355	35	1 440	1 410	2 850
1954-1955	440	375	65	1 470	2 660	4 130
1955-1956	479	405	74	1 600	3 670	5 270
1956-1957	509	461	48	1 460	2 640	4 100
1957-1958	479	463	16	626	1 260	1 885
1958-1959	465	443	22	623	1 490	2 115
1959-1960	465	421	44	987	2 590	3 575
1960-1961	464	405	59	1 130	2 350	3 480
1961-1962	515	445	70	2 090	3 170	5 260
1962-1963	545	487	58	1 650	2 840	4 490
1963-1964	537	507	30	962	1 830	2 792
1964-1965	537	493	44	1 280	1 960	3 240
1965-1966	493	489	04	590	1 320	1 910
1966-1967	450	428	22	786	(1 700)	2 485
1967-1968	437	(390)	47	1 080	2 280	3 360

H_r = Hauteur d'eau nette du lac (à l'échelle de Bol) le 1^{er} octobre de l'année hydrologique considérée (en cm).

Q'_x = Débit de pointe de la crue du Chari à Sahr (en m³.s-1).

Q''_x = Débit de pointe de la crue du Bahr Sara à Manda (en m³.s-1).

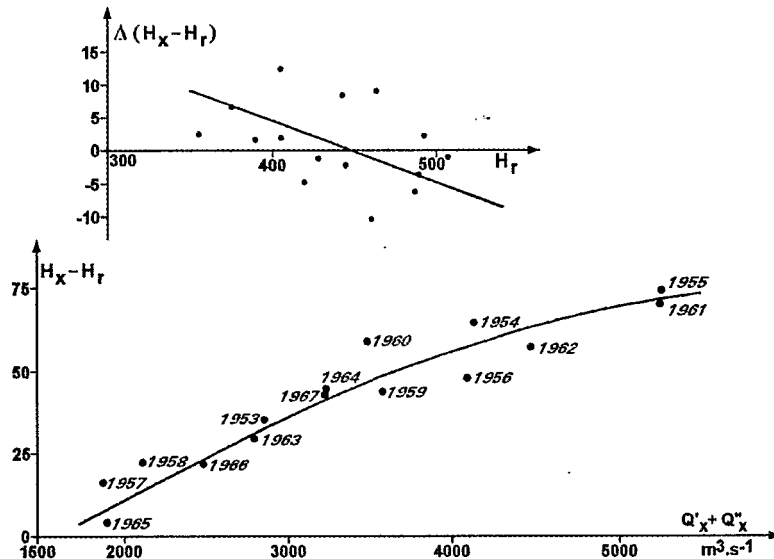


Figure 8.7

Prévision de la crue du lac en fonction des débits maximum cumulés du Chari à Sahr (Q'_x) et du Bahr-Sara à Manda (Q''_x). La prévision du niveau maximum du lac (H_x) est obtenue par rapport au niveau du lac observé le 1^{er} octobre (H_r), paramètre intervenant comme facteur correctif.

2. RECONSTITUTION DES CRUES ET ETIAGES DU LAC

Les relations précédentes permettent en principe de reconstituer les niveaux de crues et d'étiages du lac pour les années où ces niveaux n'ont pas été observés mais où l'on connaît au moins approximativement les débits de crue du Chari à N'Djaména. En 1967, B. Billon dans une note inédite a fait une tentative intéressante en s'appuyant, comme A. Bouchardeau l'avait déjà fait dans la première monographie du lac, sur une corrélation entre les débits du Chari et ceux du Nil. Nous avons fait une nouvelle tentative en nous inspirant largement des idées de B. Billon. Comme on va le voir, cette tentative aboutit à des résultats peu rigoureux mais non dénués d'intérêt.

2.1. Corrélation Chari - Nil

Le Nil est le fleuve africain sur lequel on dispose des données d'observation les plus anciennes. On connaît notamment avec une bonne précision les volumes annuels écoulés à Assouan depuis 1870 jusqu'à 1958. On pouvait penser à priori qu'il existait une certaine parenté entre les régimes du Nil et du Chari puisque leurs bassins sont contigus et sont soumis en grande partie à un climat tropical assez similaire. On a donc recherché s'il existait une corrélation entre les débits de crue (y) du Chari à N'Djaména (connus depuis 1932) et les apports annuels (x) du Nil à Assouan (figure 8.8).

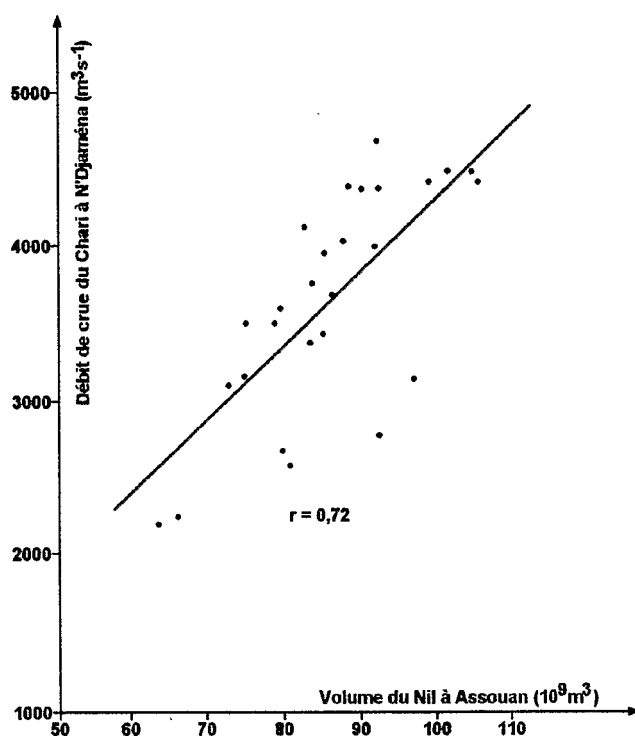


Figure 8.8

Corrélation entre les débits de crue du Chari à N'Djaména et les apports annuels du Nil à Assouan.

Les données ont été reportées dans le tableau 8.3 Sans être très étroite, la corrélation apparaît nettement significative avec un coefficient de 0,72 (le test de Student donne un coefficient de 0,48 pour un niveau de signification de 0,01). La droite de régression de y en x est donnée par l'équation : $y = 48,4 x - 481$

On en a déduit les valeurs approximatives des débits de crue du Chari à N'Djaména depuis 1870 jusqu'à 1931, valeurs qui sont données dans le tableau 8.4.

Tableau 8.3

Corrélation entre les débits de crue du Chari à N'Djaména (Y) et les apports annuels du Nil Assouan (X)

ANNEE	Apports ASSOUAN (x) $10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$	Débit max. N'DJAMENA (y) $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	ANNEE	Apports ASSOUAN (x) $10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$	Débit max. N'DJAMENA (y) $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1932	85,0	3970	1946	104,0	4540
1933	82,4	4140	1947	86,0	3710
1934	91,6	4020	1948	87,4	4050
1935	90,9	3170	1949	84,8	3450
1936	88,2	4400	1950	89,9	(4400)
1937	80,6	2590	1951	74,4	3170
1938	101,0	4520	1952	74,9	3520
1939	75,0	3520	1953	83,3	3780
1940	66,1	2260	1954	105,0	4450
1941	63,4	2190	1955	91,8	4730
1942	83,3	3400	1956	98,6	4440
1943	79,3	3610	1957	79,7	2690
1944	72,7	3120	1958	92,3	2800
1945	78,5	3520			

On remarque que les apports du Nil de 1870 à 1900 sont dans l'ensemble nettement plus élevés que ceux observés depuis 1900. D'après divers témoignages on a de bonnes raisons de penser que l'hydraulicité de toute la zone tropicale boréale de l'Afrique a été à la fin du siècle dernier particulièrement forte. Il reste néanmoins assez étonnant que la moyenne des apports du Nil soit passée de 107 km^3 pour la période 1870-1901 à 83 km^3 pour la période 1902-1953, comme l'a fait remarquer Abdel Aziz Ahmed (1960). Celui-ci indique que l'on n'a pas encore trouvé d'explication absolument concluante pour justifier un tel écart, mais il avance l'hypothèse que la création du premier barrage d'Assouan¹, qui remonte à 1902, aurait détourné d'importantes quantités d'eaux souterraines qui, autrefois, contribuaient à l'alimentation du fleuve. L'accroissement des débits observés dans les oasis du désert libyen étayerait cette hypothèse. Il est probable que cet effet s'est ajouté à celui d'une diminution d'hydraulicité. Olivry et Chastanet (1986, 1989) notent pour le fleuve Sénégal une hydraulicité globalement plus élevée dans la seconde moitié du XIXe siècle, sur la base de corrélations « historico-hydrologiques ». La baisse d'hydraulicité au XXe siècle est sans doute générale pour l'Afrique intertropicale. Quoi qu'il en soit, nous retiendrons que les débits de crue du Chari calculés par corrélation avec le Nil sont sans doute pour les années antérieures à 1902 entachés en moyenne d'une erreur par excès qui doit être de l'ordre de 10 à 15%. Il s'y ajoute évidemment les erreurs propres à l'imperfection de la corrélation.

¹ Selon V.M. Yevdjevich cite par V.D. Langreta ("Hydrological Bench Marks" - report n°8 on WHO/IHD Project), la courbe d'étalonnage du Nil à Assouan a été établie après la construction du barrage. Or la construction de celui-ci aurait eu pour conséquence une érosion du lit à l'aval qui aurait modifié sensiblement les conditions d'écoulement. L'étalonnage adopté s'appliquerait donc mal à la période antérieure à la construction du barrage, ce qui expliquerait l'écart entre les deux séries de débits

Tableau 8.4

Débits de crue du Chari à N'Djaména déterminés par corrélation avec les apports annuels du Nil à Assouan

ANNEE	Apports NIL 10 ⁹ m ³ .an-1	Crue CHARI m ³ .s ⁻¹	ANNEE	Apports NIL 10 ⁹ m ³ .an-1	Crue CHARI m ³ .s ⁻¹
1870	128,8	5720	1900	84,0	3580
1871	112,0	4940	1901	87,4	3750
1872	116,0	5130	1902	69,4	2880
1873	96,3	4180	1903	94,0	4070
1874	121,0	5380	1904	82,7	3520
1875	116,0	5130	1905	70,1	2980
1876	116,0	5130	1906	91,7	3960
1877	81,3	3450	1907	69,0	2860
1878	123,0	5470	1908	102,0	4460
1879	137,0	6150	1909	105,0	4600
1880	114,0	5040	1910	96,8	4200
1881	99,5	4340	1911	82,7	3520
1882	93,5	4040	1912	70,9	2950
1883	111,0	4890	1913	45,5	1720
1884	99,4	4330	1914	84,1	3590
1885	102,0	4460	1915	69,2	2870
1886	96,0	4160	1916	113,0	4990
1887	118,0	5230	1917	111,0	4890
1888	79,9	3390	1918	81,0	3440
1889	95,8	4160	1919	77,1	3250
1890	114,0	5040	1920	82,2	3500
1891	110,0	4840	1921	76,5	3220
1892	121,0	5380	1922	84,9	3630
1893	115,0	5080	1923	86,5	3710
1894	125,0	5570	1924	86,4	3700
1895	126,0	5620	1925	67,7	2800
1896	122,0	5420	1926	84,4	3600
1897	103,0	4500	1927	72,9	3050
1898	110,0	4840	1928	79,0	3340
1899	77,4	3260	1929	103,0	4500
			1930	73,9	3100
			1931	77,1	3250

2.2. Méthode de reconstitution

La reconstitution peut être faite soit dans le sens chronologique, soit dans le sens inverse en remontant dans le temps.

Pour opérer dans le sens chronologique, on part d'une année ($i = 0$) pour laquelle on connaît, au moins approximativement, le débit de crue du Chari Q_{X_0} et le niveau soit du maximum du lac, H_{X_0} , soit du minimum précédent, H_{N_0} . Si c'est le maximum que l'on connaît, on utilise les relations :

$$H_{N_{i+1}} = f(H_{X_i}) \text{ et } \Delta H_{N_{i+1}} = g(Q_{X_i})$$

de la figure 8.1 pour déterminer H_{N_i} en fonction de H_{X_0} et Q_{X_0} .

Pour l'année suivante ($i = 1$) on utilise les relations

$$Hx_i = f(Hn_i) \text{ et } \Delta Hx_i = g'(Qx_i)$$

de la figure 8.2 pour déterminer Hx_i , en fonction de Hn_i , et de Qx_i , etc... On peut ainsi progresser d'année en année aussi longtemps que l'on connaît les valeurs de Qx_i . Le processus est identique, si au départ c'est Hn_0 que l'on connaît à la place de Hx_0 , sauf que l'on utilise en premier lieu les relations f et g' .

Si l'on doit opérer dans le sens inverse du sens chronologique, on part encore d'une année ($i = 0$) pour laquelle on connaît Qx_0 et Hx_0 (ou Hn_0) et l'on utilise alternativement les fonctions inverses de f et g pour déterminer successivement $Hn_0 - Hx_1, Hn_1, Hx_2$, etc. sans oublier d'apporter les corrections

$$\Delta Hn_i = h(Qx_i) \text{ et } \Delta Hx_i = h'(Qx_i)$$

Le tableau n° 8.5 donne à titre d'exemple le détail des calculs effectués sur une vingtaine d'années, en opérant dans le sens chronologique normal à partir de l'année hydrologique 1872-1873 ($Qx_0 = 5\ 130$, $Hx_0 = 558$).

Tableau 8.5

Reconstitution des maximums et minimums du lac (Exemple de calcul pour la période 1872-1892)

Année hydrologique	i	Qxi	Rni	Hxi (valeur brute)	ΔHxi	Hxi (valeur corrigée)	Hni+1 (valeur brute)	$\Delta Hni+1$	Hni+1 (valeur corrigée)
1872-1873	0	5130	-	-	-	558	487	+14	501
1873-1874	1	4180	501	557	+13	570	497	+3	500
1874-1875	2	5380	500	557	+54	611	523	+17	540
1875-1876	3	5130	540	578	+45	623	529	+14	543
1876-1877	4	5130	543	579	+45	624	530	+14	544
1877-1878	5	3450	544	579	-12	567	495	-3	492
1878-1879	6	5470	492	552	+57	609	522	+18	540
1879-1880	7	6150	540	578	+80	658	543	+29	572
1880-1881	8	5040	572	590	+42	632	533	+13	546
1881-1882	9	4340	546	590	+18	608	521	+4	525
1882-1883	10	4040	525	570	+8	578	503	+8	504
1883-1884	11	4890	504	559	+37	596	515	+11	526
1884-1885	12	4330	526	571	+18	589	511	+4	515
1885-1886	13	4460	515	565	+27	587	509	+6	515
1886-1887	14	4160	515	566	+12	578	503	+3	506
1887-1888	15	5230	506	560	+49	609	522	+15	537
1888-1889	16	3390	537	576	-14	562	490	-3	487
1889-1890	17	4160	487	549	+12	561	490	+3	493
1890-1891	18	5040	493	552	+42	594	513	+13	526
1891-1892	19	4840	526	571	+35	606	520	+10	530
1892-1893	20	5380	530	573	+54	627	531	+17	548
etc.									

2.3. Critique des résultats

Les hauts niveaux du lac et les forts débits de crue du Chari pendant la fin du siècle dernier ont conduit à des extrapolations hardies des relations entre H_x , H_n et Q_x . Si l'on porte sur un graphique l'ensemble des résultats obtenus comme il vient d'être dit à partir du maximum de 1872-1873, il n'est donc pas très surprenant de constater des écarts de près d'un mètre entre les niveaux ainsi reconstitués et ceux assez rares qui ont pu être déterminés approximativement d'après des documents anciens.

Dans les premières années du siècle, on sait de façon certaine que les niveaux du lac sont tombés très bas. Il est impossible de reconstituer une baisse aussi importante avec les débits de crue du Chari tels qu'ils ont été déterminés. La corrélation Chari-Nil donne certainement de mauvais résultats pour ces années là. L'écart entre niveau reconstitué et niveau observé atteint, en effet, environ 1,75 m pour l'étiage de juillet 1907.

Pour ne pas faire peser cet écart sur la reconstitution des années suivantes, on a repris à partir de 1907 une nouvelle série de calculs s'appuyant sur l'étiage supposé réel cette année ($H_n = 200$ cm).

La synthèse des résultats obtenus à partir des deux modes de reconstitution et des niveaux réellement observés est reportée dans la figure 8.9. Pour les années où elle peut être contrôlée par des observations directes, l'écart dépasse assez rarement 20 cm et n'atteint jamais plus de 50 cm.

Une première remarque s'impose immédiatement. Nous savons d'après Tilho que l'étiage de juillet 1914 a été peut-être plus sévère que celui de 1907. Le lac aurait été coupé en deux comme nous l'avons observé depuis les étiages de 1973 et 1974. Des témoignages plus récents font également état d'une autre coupure du lac dans les années 1942 et 1943 où il a été possible de traverser le lac à pied entre Baga-Kawa et Baga-Sola. Or la période de reconstitution n'indique jamais un niveau inférieur à 200 cm.

En résumé, le manque de précision des débits de crue du Chari, évalués par corrélation avec les apports du Nil, et le caractère peu rigoureux des relations entre H_x , H_n et Q_x , extrapolés de façon assez osée, font que ces reconstitutions ne peuvent donner une image très exacte des variations de niveau depuis 1870. Elles donnent cependant un aperçu intéressant sur l'allure générale probable des fluctuations du lac au cours des cent vingt dernières années. En outre cette expérience a permis de démystifier un peu ce type de démarche, dont l'intérêt qualitatif est indéniable mais le gain en informations précises tout à fait illusoire.

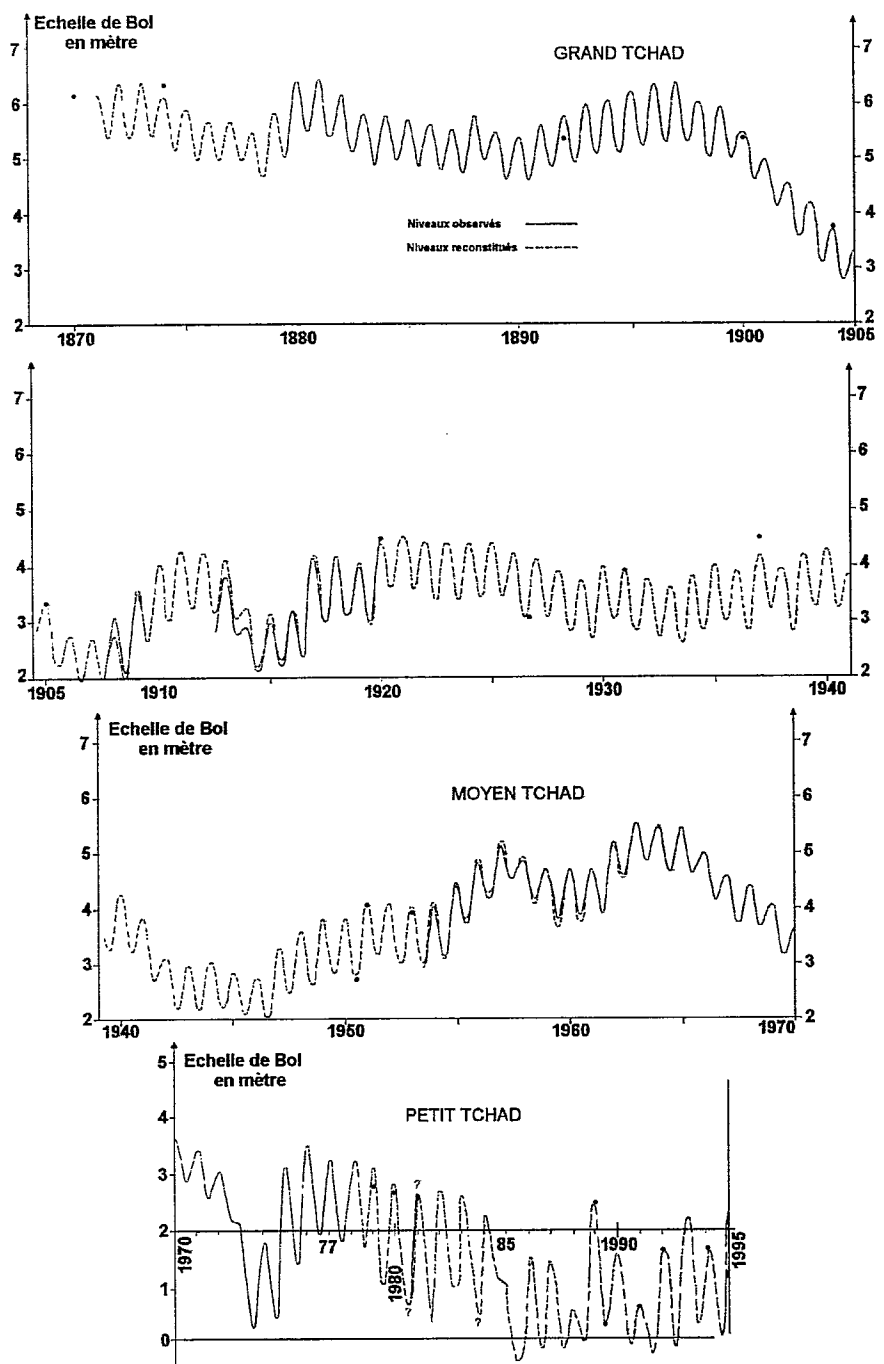


Figure 8.9
Reconstitution des niveaux observés du lac Tchad.

3. ETUDE STATISTIQUE DES CRUES ET DES ETIAGES

3.1. Auto-corrélation des niveaux extrêmes annuels du lac

Aux époques normales, le stock d'eau contenu dans le lac joue un rôle régularisateur non négligeable d'une année sur l'autre. Il en résulte que le niveau de crue atteint une année donnée n'est pas totalement indépendant du maximum observé l'année précédente. Il y a un effet de "persistance" qui joue également pour les étiages successifs et qui fait, par exemple, qu'à une crue forte, il y a plus de chance de voir succéder l'année suivante une crue forte qu'une crue faible.

Cet effet de persistance peut se caractériser numériquement en calculant le coefficient d'auto-corrélation entre les valeurs de Hx_i et Hx_{i+1} . Ce calcul conduit à un coefficient de corrélation $r = 0,85$ qui est très significatif. (Le test de Student pour un niveau de signification de 0,05 donne un coefficient de corrélation de 0,42). La figure 8.10 montre la droite de régression de Hx_{i+1} en Hx_i , ainsi que les droites encadrant les intervalles de confiance à 50 et 90%. On voit, par exemple, que pour une crue de 500 cm il y a 50 chances sur 100 que la crue suivante soit comprise entre 467 et 519 cm et 90 chances sur 100 qu'elle soit comprise entre 415 et 572 cm.

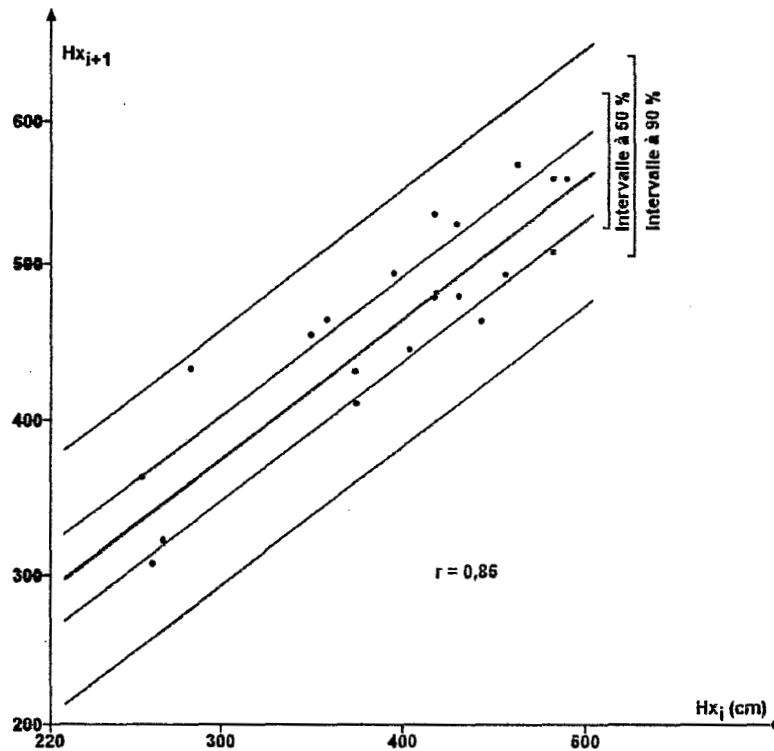


Figure 8.10

Autocorrélation des maximums annuels successifs.

Les maximums du lac sur deux années consécutives sont liés aux apports de deux crues annuelles du Chari. La différence entre deux minimums consécutifs du lac est liée assez étroitement, comme on l'a vu précédemment, aux apports d'une seule crue du Chari. On peut donc s'attendre à ce que l'auto-corrélation des étiages du lac soit encore plus serrée que celle de ses crues. Le calcul (figure 8.11) montre, en effet, que le coefficient d'auto-corrélation s'élève à 0,91 au lieu de 0,85. Les équations des droites de regression sont les suivantes :

- $Hx_{i+1} = 0,779 Hx_i + 104$
- $Hn_{i+1} = 0,864 Hn_i + 52,5$

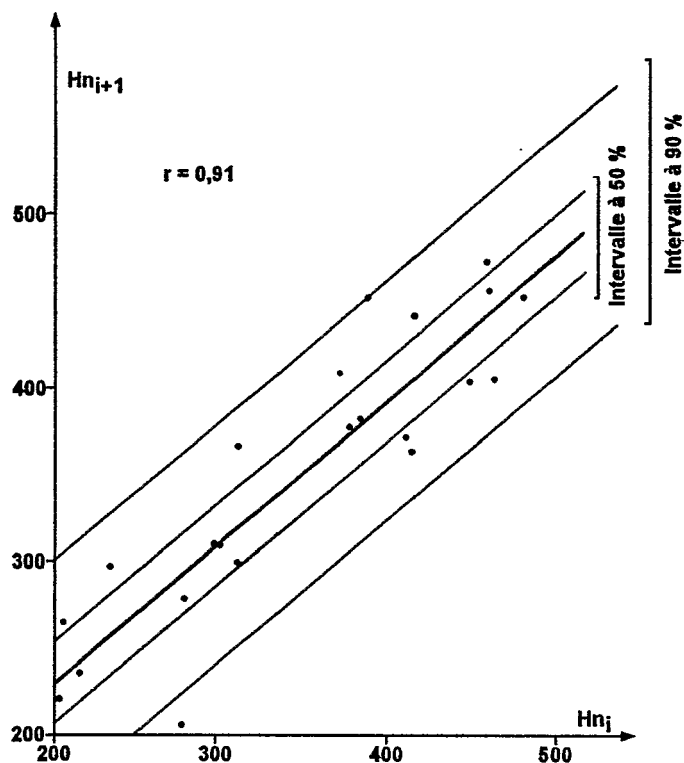


Figure 8.11

Autocorrélation des minimums annuels successifs.

3.2. Etude fréquentielle des maximums et minimums du lac

Sur une série d'observations suffisamment longue, il n'est pas impossible, en faisant totalement abstraction de l'ordre de succession chronologique, de considérer l'effet de persistance comme un facteur aléatoire supplémentaire qui intervient dans la genèse des crues et des étiages du lac. On peut donc tenter à leur sujet une étude classique de distribution fréquentielle. Celle-ci a été faite sur 35 valeurs observées à Bol y compris celles de 1972 à 1977. Les courbes d'ajustement des distributions des maximums et des minimums sont présentées respectivement dans les figures 8.12 et 8.13.

La première de ces figures montre que l'on peut ajuster une droite de Gauss aux hauteurs de crues observées. L'ajustement est très satisfaisant, excepté pour les valeurs extrêmes. Mais la dispersion des valeurs extrêmes est un fait habituel, sans doute un peu aggravé dans le cas présent par l'effet de persistance.

L'ajustement de Gauss conduit aux résultats suivants :

- Crue médiane (F = 50%) = 405 cm
- Crue décennale sèche (F = 90%) = 285 cm
- crue centennale sèche (F = 99%) = 185 cm
- Crue décennale humide (F = 10%) = 525 cm
- crue centennale humide (F = 1%) = 615 cm

On notera qu'à 30 cm près la hauteur de crue centennale humide correspond au plus haut niveau (644 cm en 1895 et 1896) des crues qui ont pu être reconstituées depuis une centaine d'années.

On pouvait difficilement espérer une meilleure concordance étant donné l'imprécision des reconstitutions anciennes et la petite taille de l'échantillon des crues directement observées. Par contre, pour les bas niveaux la reconstitution est ici en défaut (290 cm en novembre 1907 au lieu de 185 cm, hauteur de la crue centennale sèche). Nous pourrions ci-après faire la même remarque en ce qui concerne les minimums. Comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe 2.3 (critique des résultats), il convient de rappeler ici encore que cette reconstitution ne peut prétendre donner une image très exacte des variations de niveau depuis 1870.

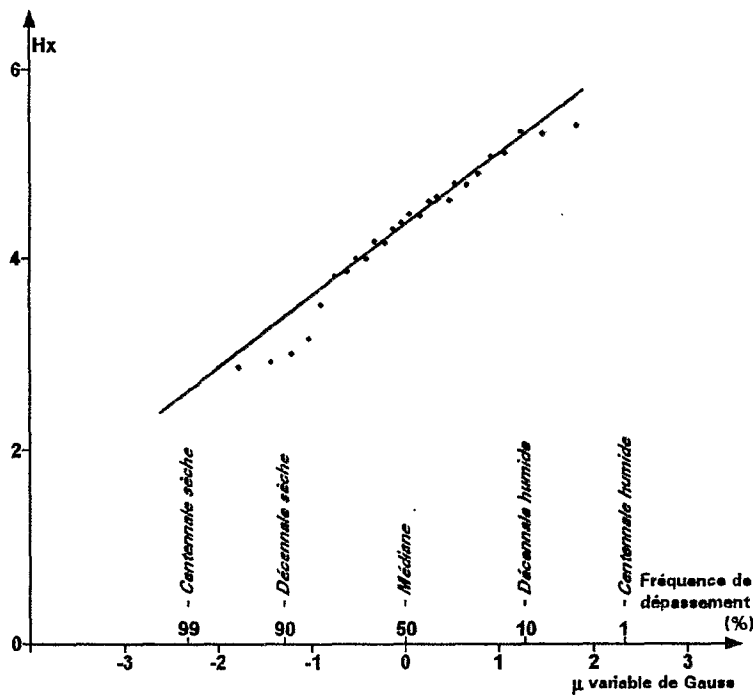


Figure 8.12

Distribution statistique des maximums annuels à l'échelle de Bol (échantillon de 35 valeurs antérieures à 1977).

Dans la figure 8.13 relative aux minimums annuels, l'effet de persistance apparaît plus nettement que sur le graphique précédent et la répartition des points est de ce fait plus discontinue. On peut cependant leur ajuster une droite de Gauss dans des conditions encore assez satisfaisantes. Cette droite conduit aux résultats suivants :

- Fréquence 50% = 310 cm
- Fréquence 90% = 175 cm
- Fréquence 99% = 60 cm
- Fréquence 10% = 445 cm
- Fréquence 1% = 555 cm

Les mêmes remarques concernant la précision de la reconstitution s'appliquent ici encore. Ainsi en 1896, l'étiage lacustre le plus haut reconstitué (555 cm) correspond à la valeur de la fréquence centennale humide.

Les étiages les plus faibles obtenus par les calculs de la reconstitution ne descendent jamais au-dessous de 200 cm alors que la valeur de la fréquence centennale sèche est de 60 cm, ce qui est en accord avec les observations effectuées au cours de la sécheresse.

De même, le Bureau d'Etudes "MRT Consulting Engineers" (1975) dans le cadre des études nécessitées par le "South Chad Irrigation Project", Ngala (Nigeria), s'est livré à une estimation des niveaux du lac de 1933 à 1954 à partir des débits du Chari, connus depuis 1933, et du modèle établi pour le bilan du lac.

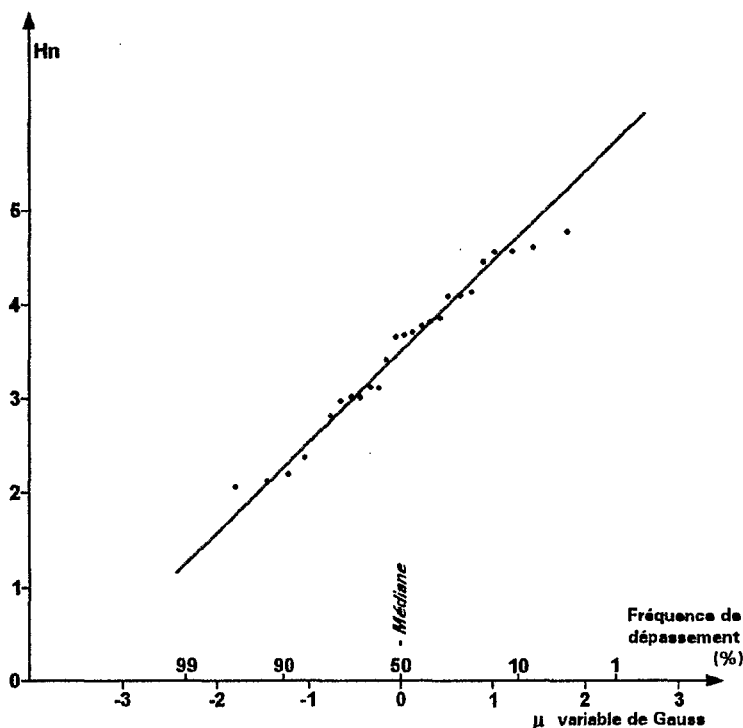


Figure 8.13

Distribution statistique des minimums annuels à l'échelle de Bol (échantillon de 35 valeurs antérieures à 1977).

Les résultats obtenus montrent que le niveau d'étiage serait resté inférieur à 200 cm sur la période 1942 à 1946. En 1943, il aurait avoisiné 150 cm. Il faut rappeler qu'à partir de 160 cm à l'échelle de Bol (279,47 m IGN 56) l'archipel sud-est est isolé de la partie principale du lac et la station limnimétrique n'enregistre alors que des variations locales du niveau.

Que ce soit pour les maximums ou les minimums, les valeurs déterminées pour des fréquences rares de période sèche ne sont pas vraiment significatives de ce qui a été observé au cours des deux dernières décennies. La réduction drastique du lac et un effet de persistance accru montrent les limites des analyses fréquentielles des niveaux (voir paragraphe 3.4).

3.3. Dates d'apparition des maximums et des minimums annuels

On sait déjà que le maximum et le minimum du lac se produisent tous les ans à des saisons bien déterminées. Nous allons maintenant examiner plus en détail leur fréquence d'apparition au cours des saisons.

La figure 8.14 montre à quelles dates se sont produits les 20 maximums annuels qui ont été observés avec précision et à des époques où la station de Bol était bien représentative du niveau du lac. On remarque que ces maximums se sont prolongés sur des périodes variant entre 1 à 15 jours, avec une valeur moyenne de 6 jours. Dans la figure 8.14a, le milieu de chaque période a été marqué par un point que nous considérerons comme la date du maximum pour simplifier notre étude.

Les maximums observés sont tous compris entre le 22 novembre et le 27 janvier. Sur un total de 25 maximums, 6 se sont produits en novembre, 12 en décembre et 7 en janvier. L'histogramme mensuel présente donc une pointe très nette en décembre, mois pour lequel la fréquence d'apparition de la crue annuelle est proche de 50% (fig. 8.14).

Un histogramme plus détaillé peut être établi par décades en s'appuyant sur les 20 années. Cet histogramme présente assez curieusement deux pointes qui encadrent le mois de décembre : 25% des maximums se situent en effet dans la décade 20-30 novembre (tous relatifs à la période 1912-1918) et 25% également dans la décade 30 décembre - 9 janvier. L'histogramme présente une pointe secondaire entre le 10 et le 20 décembre, décade où apparaissent 15% des maximums observés.

La date du maximum du lac dépend de celle de la pointe de la crue du Chari à N'Djaména et de l'importance de cette crue, mais il n'est pas possible d'établir une relation bien définie entre ces différents éléments. On peut seulement dire qu'en gros le maximum du lac est d'autant plus tardif que la crue du Chari est elle-même tardive et que son débit est élevé.

La figure 8.15 est analogue à la précédente mais se rapporte aux minimums annuels. Ceux-ci se produisent toujours entre la fin de juin et le début d'août. Sur les limnigrammes "lissés" le minimum absolu se prolonge chaque année sur une période qui varie entre 1 et 13 jours et dure en moyenne 4,5 jours. Si l'on adopte comme date du minimum de chaque année le milieu de cette période, on constate que les dates extrêmes des étiages observés sont comprises entre le 26 juin et le 6 août. L'histogramme mensuel montre que sur 25 étiages, un seul s'est produit en juin, 22 en juillet et 2 en août. Il ya donc à peu près 90 chances sur 100 pour que l'étiage apparaisse en juillet.

Si l'on ne retient que les minimums annuels dont la date est connue avec précision, on peut établir un histogramme par période de 5 jours. Celui-ci a une forme assez régulière avec une pointe entre le 15 et le 20 juillet. On constate que 70% des étiages absolus se situent entre le 10 et le 30 juillet.

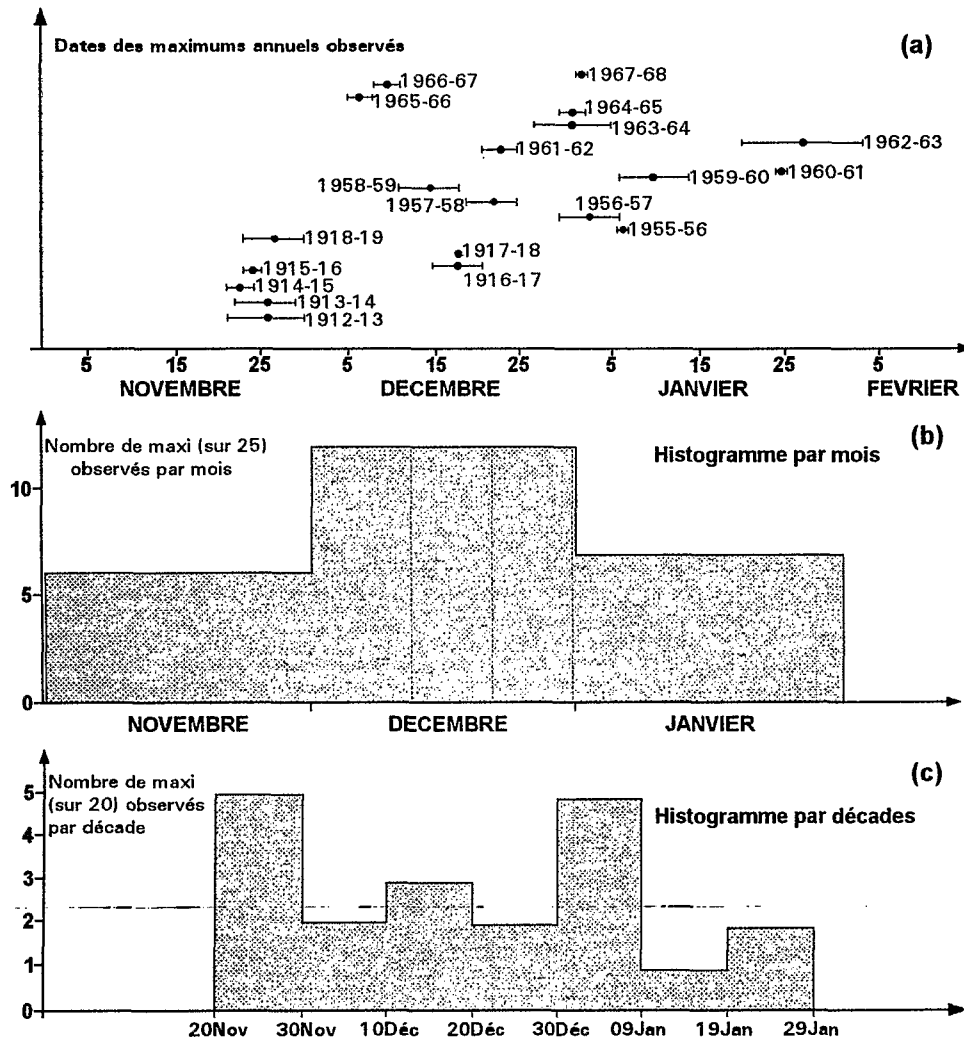


Figure 8.14

Dates d'apparition des maximums annuels observés (a) et histogrammes des fréquences d'apparition par mois (b) et par décades (c).

La date du minimum annuel dépend des débits journaliers du Chari de la fin juin au début d'août, ainsi que des précipitations qui tombent directement sur le lac, mais là encore il n'est pas possible d'établir une relation bien définie. On note seulement qu'à la date du minimum du lac le débit du Chari à N'Djaména est compris entre 250 et 900 m³ s⁻¹.

Ces conclusions ne sont évidemment valables que pour le stade « Tchad normal » ou « Grand Tchad d'autant que ces calculs ont été faits à partir des données de la station de Bol-Nouss avons déjà rappelé qu'à certaines époques de très bas niveaux du lac, cette station est isolée et ne représente plus alors que la variation locale du niveau ;

ainsi en 1973 et 1974, l'étiage à Bol a eu lieu fin août ou en septembre, les maximums sont cependant apparus à la fin décembre. Les dates d'apparition des maximums dans la cuvette nord, actuellement plus tardives lors des remises en eaux épisodiques, ne représentent que les difficultés de pénétration du flot lacustre à travers la Grande Barrière. De plus, dans la période actuelle d'assèchement du « Petit Tchad », la notion de période d'étiage devient très extensible.

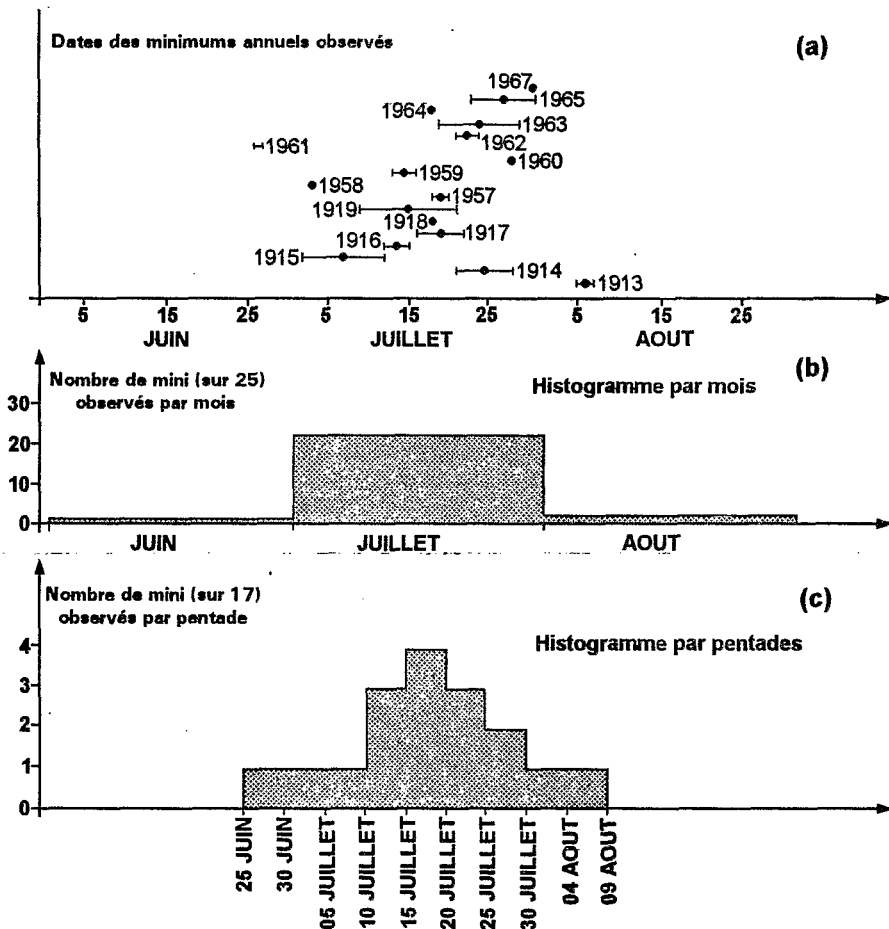


Figure 8.15

Dates d'apparition des minimums annuels observés (a) et histogrammes de fréquence d'apparition par mois (b) et par pentades (c).

3.4. Etudes fréquentielles actualisées

La prise en compte des données récentes dans l'échantillon des niveau maximums annuels du lac conduit à un nouvel ajustement fréquentiel. La loi de distribution retenue est une loi de Gumbel à 3 paramètres (loi de Jenkinson).

Nous donnons ci-après les valeurs de crues pour différentes fréquences au non dépassement (f %) et les périodes de retour correspondantes T en années.

f %	Maximum annuel de crue du lac								
	1	5	10	20	50	80	90	95	99
T années	100	20	10	5	2	5	10	20	100
H max Boi (cm)	52	172	215	266	365	463	515	557	637
Altitude IGN arrondie au ½ dm	278,4	279,6	280	280,55	281,5	282,5	283	283,45	284,25

Bien évidemment, pour les mêmes fréquences de retour d'années sèches, les niveaux de crue ont considérablement baissé. La crue centennale sèche a perdu 133 cm, la décennale sèche 70 cm ; l'écart avec la médiane est de - 40 cm. La crue décennale humide est à un niveau à peine inférieur (10 cm) aux prédéterminations antérieures.

Une autre démarche a consisté à prendre, pour données de départ des études de prédétermination, les séries de modules et de maximums de crue du Chari.

Afin de tenter d'éliminer la persistance propre à l'effet de régularisation du lac, nous avons dans un premier temps cherché quelle était la meilleure regression entre le niveau maximal du lac et les moyennes mobiles, calculées sur 2 et 3 ans, des crues maximales et des modules annuels du fleuve Chari. 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. La figure 8.16 donne la 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 Boi et Q en m³ s⁻¹.

Le tableau 8.6 résume l'analyse fréquentielle faite suivant des lois de Jenkinson des différents paramètres hydrologiques du Chari pris en compte ici.

Tableau 8.6
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 confirment les résultats acquis dans l'analyse fréquentielle effectuée directement sur les valeurs de Hx. Il doivent cependant être considérés avec réserves pour les niveaux les plus bas, la persistance des comportements déficitaires de l'hydrologie de la région dans la période actuelle venant infirmer l'existence d'une série de variables indépendantes.

Le Petit Tchad des vingt-cinq dernières années

Chapitre 9

1. EVOLUTION RECENTE DU LAC TCHAD

1.1. La sécheresse des années 1970

Depuis 1973, de nombreuses notes, préparées souvent en collaboration avec les hydrobiologistes du Centre ORSTOM de N'Djaména, ont fait le point détaillé sur l'assèchement du lac Tchad, par la description précise de l'assèchement de la cuvette sud au cours de l'étiage 1973, puis de l'exondation de la Grande Barrière suivie de l'isolement de la cuvette nord avec des périodes cycliques d'assèchement total et de remise en eau de très courte durée (Chouret, Lemoalle 1974, 1975, Chouret *et al*, Chouret 1977).

1.1.1. La sécheresse de 1968 à 1973

Dans ses grandes lignes, l'effet de la sécheresse sur le niveau du lac a été le suivant :

Après une montée de son plan d'eau de 1953 à 1963, le lac connaît dès 1964 une baisse continue qui s'est aggravée depuis 1968, les apports ayant tous été déficitaires de 1965 à 1974 inclus.

Si l'on prend comme référence la station de Bol, suivie par l'ORSTOM depuis 1956, on peut évaluer en janvier 1963 la surface en eau du lac à 23 200 km² et le volume des eaux stockées à 86 milliards de m³ pour une cote moyenne un peu supérieure à 283 m. A partir de 1964, le plan d'eau commence à baisser d'environ 0,30 m entre maximums annuels successifs. Après la crue de 1967, la baisse s'amplifie et au minimum de 1971, la cote du plan d'eau à Bol n'est déjà plus que de 280,5 m. La surface du lac a diminué de 30% et le volume des eaux stockées de 55%.

En 1972 et 1973, la baisse s'accélère encore et atteint près d'un mètre par an, le déficit des apports étant énorme. La figure 9.1 montre les zones en eaux du lac en janvier 1973, avant la transition à l'état de Petit Tchad d'après un montage de Lemoalle (1978). Le Chari à N'Djaména présente le maximum le plus faible jamais observé encore à cette époque avec 1 430 m³s⁻¹, valeur centennale (volume apporté au lac : 17,5 milliards de m³).

En juillet 1973 (fig. 9.2), le lac est scindé en deux cuvettes après exondation de la Grande Barrière, dès avril-mai, et isolement de l'archipel de Bol, réduit à quelques mares. Grâce à l'exploitation de l'imagerie LANDSAT par Lemoalle (1979), à la demande de la Commission du Bassin du lac Tchad (CBLT), on peut évaluer alors la surface en eau à 10 000 km² et le volume stocké à une dizaine de milliards de m³ ; c'est alors le commencement de l'assèchement de la cuvette nord.

En 1973, le débit maximal du Chari à N'Djaména atteint 2 130 m³s⁻¹ mais le volume apporté au lac n'est que de 18 milliards de m³, soit à peu près la même valeur qu'en 1972.

Pendant l'hivernage 1973, seule la cuvette est alimentée et en juillet 1974 on retrouve une situation identique à celle de 1973, aggravée par le fait que sur les vastes zones exondées dès 1973 une importante végétation palustre s'est développée, en particulier avec l'installation d'une forêt d'ambatchs (*Aeschynomene elaphroxylon*) sur la Grande Barrière.

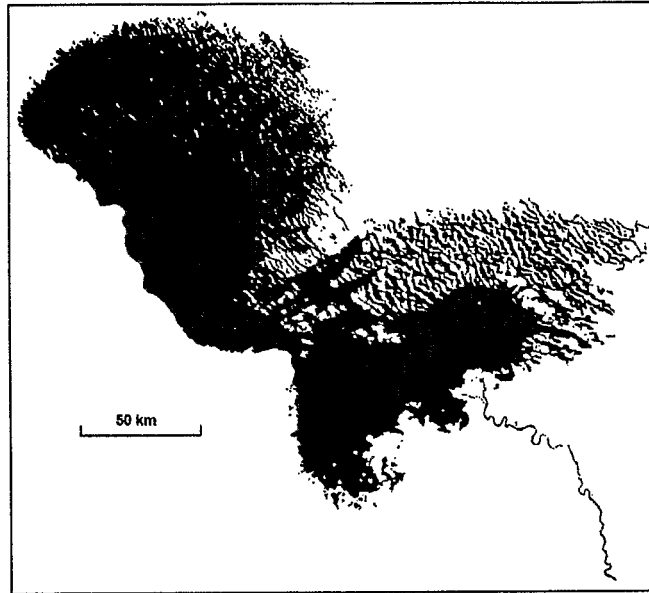


Figure 9.1

Les zones en eau (en noir) du lac Tchad en janvier 1973 avant la transition à l'état Petit Tchad (montage J. Lemoalle d'après les données Landsat).

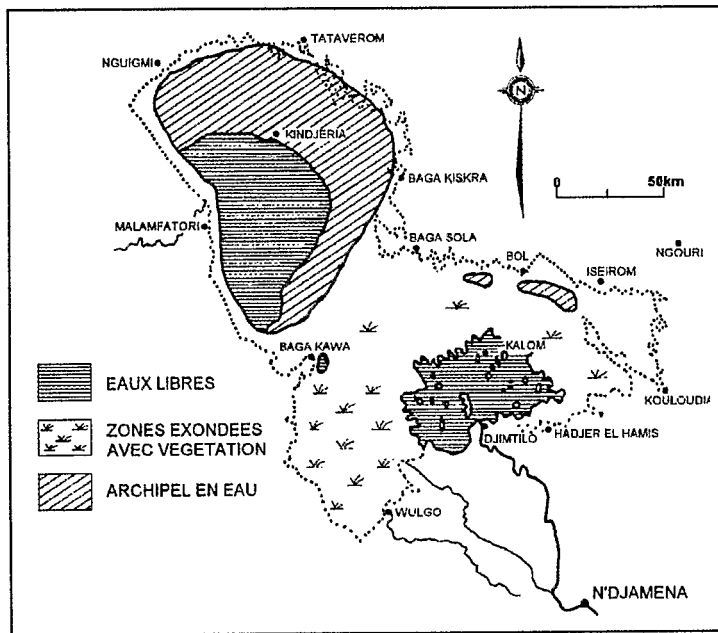


Figure 9.2

Le lac Tchad en juillet 1973 (d'après Chouret et Lemoalle, 1974).

L'assèchement de la cuvette nord est déjà bien amorcé et on note la disparition de la zone d'eaux libres où émergent de très nombreuses îles, et qui est presque devenue un nouvel archipel. Plus près de la côte, dans l'archipel traditionnel, de multiples seuils exondés relient les îles entre elles.

1.1.2. La situation de 1974 à 1979

Les années 1974 et 1975 montrent une amélioration de la situation hydrologique.

Après une année 1974 encore assez médiocre, le maximum de la crue du Chari n'étant que de $3\,270\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (contre $3\,690\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en année moyenne¹) et le volume des apports que de 30,5 milliards de m^3 , le maximum de novembre 1975 atteint $3\,870\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, valeur qui depuis novembre 1964 n'avait plus été observée sur le Chari à N'Djaména. Cependant, les apports restent légèrement inférieurs ($36,6\text{ km}^3$) à la médiane.

Les crues du Chari en 1974 et surtout en 1975, en se rapprochant des valeurs moyennes, permettent une remise en eau à peu près normale de la cuvette sud. Toutefois, l'important couvert végétal (ambatches en particulier) ne permet le passage vers la cuvette nord que de faibles quantités liquides insuffisantes pour compenser l'évaporation annuelle qui, elle, reste constante et de l'ordre de 2,2 m par an. Ainsi en novembre 1975 et 1976, on peut constater l'assèchement total de la cuvette nord (fig. 9.3). La remise en eau partielle de fin 1976 - début 1977 n'a que peu d'effet et est de très courte durée (quelques mois).

Les conditions climatiques sévères sont de retour en 1976 et 1977.



Figure 9.3

Le lac Tchad en novembre 1975 (d'après Chouret et Lemoalle, 1974).

¹ Valeur médiane calculée sur une période d'observation ne tenant pas compte des années exceptionnellement sèches de 1972 et 1973.

Après les années exceptionnellement déficitaires de 1972 et 1973, le retour à des crues du Chari, proches ou égales à la médiane, pouvait laisser espérer un nouveau "cycle" d'hydraulicité normale.

En fait, c'est au phénomène inverse que l'on assiste avec la crue de 1976. Alors que sur le bassin du Logone, la crue 1976 est moyenne et égale à celle de 1975, sur le bassin du Chari, l'hydraulicité est de nouveau très faible sans atteindre cependant les caractéristiques catastrophiques de la sécheresse 1972-1973¹.

Le débit maximal observé sur le Chari à N'Djaména n'est que de $2\,720\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; le volume total apporté au lac, sur l'année hydrologique 1976-1977 est égal à $28,7\text{ km}^3$, valeur encore faible.

Ces apports fluviaux sont donc nettement insuffisants pour permettre une remise en eau durable sauf dans la cuvette sud ; en effet, les apports liquides freinés par l'intense végétation palustre établie sur la Grande Barrière restent en majeure partie dans la zone sud du lac qui est revenue à un cycle annuel normal. Le niveau maximum atteint à Bol est de 325 cm.

Si l'on peut constater la disparition de nombreux ambatches autour de la poche des eaux libres du sud par suite de l'invasion fluviale et de l'élévation du plan d'eau, par contre ceux de la face nord de la Grande Barrière, ayant poussé plus tard persistent toujours et sont un frein au passage des eaux vers la partie nord (Fotius, 1976).

Il est à noter sur les différentes cartes schématiques du lac que la superficie de la zone des eaux libres du sud, déterminée à partir de la couverture photographique aérienne de la CBLT ou des documents de la NASA (programme LANDSAT) varie peu depuis 1973 et est de l'ordre de $1\,600$ à $1\,800\text{ km}^2$. Ceci est à mettre en relation avec l'intense végétation qui l'entoure. On observe par contre entre 1973 et 1977, une submersion importante des îles au sein de cette poche d'eaux libres.

Dans la cuvette nord, on observe un nouvel assèchement presque total dès le mois d'août 1977 (fig. 9.4), les quelques mares restant autour de l'île de Kindjéria n'étant qu'un marécage de très faible profondeur ($0,50\text{ m}$ à 1 m de moyenne) en voie de disparition. Par contre, dans la cuvette sud, on note l'apparition de grandes zones d'eaux libres au milieu des marécages en face de Baga-Kawa et vers le sud.

La crue du Chari à N'Djaména en 1977 a un maximum de $2\,840\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, valeur qui, bien que légèrement supérieure à celle de l'année précédente, est encore très faible. La décrue est très rapide et le volume total apporté au lac, sur l'année hydrologique 1977-1978, ne dépasse pas les 30 milliards de m^3 , soit 75% seulement des apports en année normale. Ces apports restent en majeure partie dans la cuvette sud dont le niveau maximal en décembre 1977 est voisin de celui de l'an passé. On note une extension des zones d'eaux libres en face de Baga-Kawa et dans la région SSW. Le niveau maximum atteint à Bol est de 324 cm.

Les franchissements à travers la Grande Barrière sont de peu d'ampleur et la remise en eau d'une partie seulement de la cuvette nord, sous une lame d'eau très faible, n'est que de courte durée.

Les années 1978 (avec 30 km^3 d'apports) et 1979 (seulement 20 km^3) semblent pérenniser le schéma déficitaire de l'alimentation du lac Tchad.

¹ Par suite des débordements et des déversements dans les plaines d'inondations du Nord-Cameroun, principalement en aval de Bongor Lai, les apports du Logone, sauf en cas d'années exceptionnelles, sont toujours sensiblement les mêmes au niveau du confluent avec le Chari à N'Djaména.

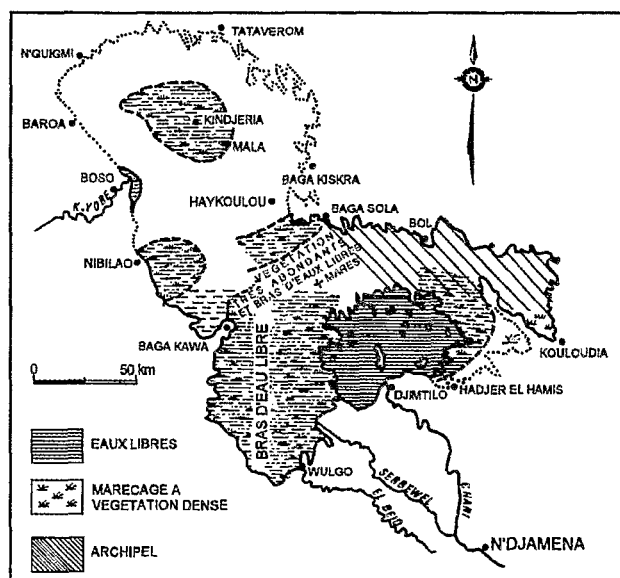


Figure 9.4

Le lac Tchad en septembre 1977

1.2. Persistance de la sécheresse dans les années 80.

Pendant les années 1980 et 1981, l'absence complète d'observations du fait des graves troubles politiques qu'a connus le pays ne permet pas de faire de diagnostic sur l'évolution du lac Tchad. On se situe toujours dans le même contexte déficitaire propre aux régions soudano-sahéliennes. A. Chouret retrouvera en 1983 les niveaux des plus hautes eaux à Bol à $H = 2,70\text{m}$ pour 1981 et à $H = 2,60\text{m}$ pour 1982.

L'année 1982-83 est de nouveau particulièrement alarmante. Les apports du Chari avec un maximum d'environ $2300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($H = 5,85 \text{ m}$ à N'Djaména) totalisent pour l'année environ 20 km^3 . La cuvette nord n'est pratiquement pas alimentée. D'ailleurs, depuis 1975, à l'exception de quelques débordements épisodiques et de courte durée vers la cuvette nord, le lac peut être considéré comme réduit à la seule cuvette sud. Un survol effectué par A. Chouret, le 5 mars 1983, a permis d'établir la carte schématique du lac. Le plan d'eau à Bol, en communication avec la cuvette sud est à cette date à la cote $279,96 \text{ m}$ ($H = 2,09$) (figure 9.5).

En 1983-84, les apports du Chari tombent à moins de 17 km^3 ; l'assèchement du lac ne fait qu'empirer. Mais c'est, entre toutes, l'année 1984-85 qui est la plus dramatique pour l'ensemble des régions du Sahel. L'hydrogramme du Chari est complètement tronqué et le maximum n'atteindra pas $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ avec arrêt du débit du Chari à Chagoua! Le volume annuel parvenant au lac Tchad n'est que de $6,7 \text{ km}^3$, le 1/6 de l'apport médian!

"En ce qui concerne le lac Tchad, je vous apprendis qu'il s'est asséché dans toutes les stations de contrôle de Bol Dune, Bol Bérin, Ile de Kindjéria, Ile de Kalom. A Bol, la station était à sec en juin 1984 et l'eau s'est retirée à environ 40 km des stations. Et elle y est revenue le 2 septembre 1985 à la cote de 0,70 m... quant à l'île de Kalom, elle était aussi à sec; l'échafaudage du limnigraphe installé par l'ORSTOM (détruit) se trouvait sur le banc de sable à 30 m de l'eau en juillet 1985. Le service hydrologique national y a installé un limnigraphe sur une gaine de 2 m contre l'échafaudage renversé. L'eau était venue au pied de la gaine en août 1985 à la cote de 0,80 m. Selon les renseignements reçus sur la partie Nord du lac Tchad, il y a eu jusqu'en janvier 86 et début février une lame d'eau de 50 cm autour de 14° N."

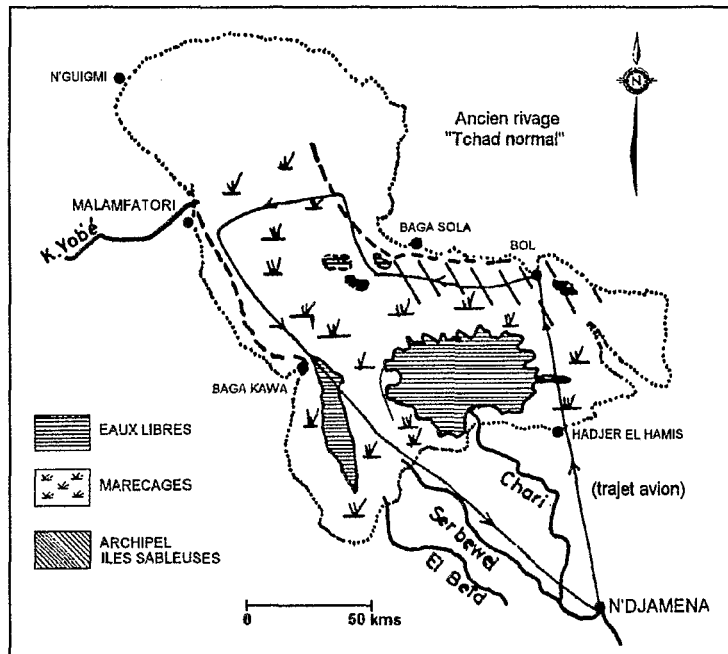


Figure 9.5

Carte schématique du lac Tchad le 05 mars 1983

Cette communication du 19 mars 1986 faite par la Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie illustre, si besoin est, la pauvreté de l'information disponible sur les stations hydrométriques du lac le plus souvent exondées. Par contre, on dispose d'une bonne évaluation des apports du Chari. La remise en eau partielle de la cuvette nord qui est signalée en janvier 86 correspond à la crue 1985 du Chari qui a amené 17 km^3 au lac.

La crue de 1986 n'apporte au lac que $15,9 \text{ km}^3$ avec un maximum à N'Djaména de $1810 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; la cuvette nord n'est pratiquement pas inondée en janvier 1987. Le déficit s'accroît pendant l'année 1987-1988. Les apports du Chari n'atteignent pas 10 km^3 . C'est le plus faible apport après celui de 1984 (maximum de crue à N'Djaména de $1330 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Le cumul de ces années déficitaires entraîne un assèchement majeur du lac en 1988. Fort heureusement, la crue de 1988 marque un répit dans la série déficitaire. Le maximum atteint à N'Djaména est de $3470 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; l'apport du Chari totalise $28,4 \text{ km}^3$ et le niveau maximum du lac à Bol est de 248 cm, ce qui reste peu important mais permet une remise en eau de la cuvette nord jusqu'à la latitude de Bosso. La télédétection donnera d'autres informations mentionnées plus loin. Les apports du Chari en 1989 sont de nouveaux très faibles avec seulement $15,9 \text{ km}^3$ et un niveau maximum à Bol limité à 162 cm.

1.3. Le début des années 1990

La décennie 1990 commence mal ; la crue du Chari à N'Djaména avec $1310 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ est la plus faible jamais observée après celle de 1984. Les apports au lac totalisent, en 1990-1991, $11,6 \text{ km}^3$ (troisième valeur la plus faible de la série après 1984 et 1987). Le niveau maximum du lac a atteint la cote 057 à Bol. Il n'y a pas d'inondation dans la cuvette nord.

Les années suivantes 1991, 1992, 1993 apportent au lac des apports toujours très déficitaires avec respectivement 19,7, 20,5 et 15,1 km³. Les niveaux maximums atteints à l'échelle de Bol sont supérieurs à 150 cm en janvier 1992 et 1993. L'inondation de la cuvette nord reste très faible ou nulle.

L'année 1994, abondamment pluvieuse dans la frange soudano-sahélienne (fréquence décennale humide des précipitations à N'Djaména), ne tient pas ses promesses au niveau des apports hydrologiques. Le maximum de crue du Chari n'est que de 2350 m³ s⁻¹ et les apports au lac ont été estimés à 21 km³. Ce volume est toutefois suffisant pour permettre en janvier 1995 une remise en eau de la cuvette nord jusqu'à la latitude de Boso.

2. LE PETIT TCHAD ET LA TELEDETECTION

Les travaux de télédétection ont déjà été évoqués en complément des observations hydrologiques. Nous avons en particulier mentionné, ci-dessus et dans la première partie de l'ouvrage, l'exploitation des données Landsat faite par Lemoalle (1978).

Lemoalle a complété ces travaux au cours des dernières années. Nous reprenons quelques éléments de la synthèse proposée.

Des survols réguliers à basse altitude, au cours de la période 1972-76, avaient permis de suivre l'évolution générale des surfaces, d'une part, et de cartographier exactement le contour de certaines portions du rivage, d'autre part.

Une classification supervisée des différents éléments du paysage (eaux libres, marécages, terrains exondés) avait pu alors être faite sur des données Landsat, basée sur les éléments précis relevés au cours des survols. Il en est résulté des représentations où les surfaces en eau apparaissent en noir (Lemoalle, 1978).

Plus récemment, les données numériques du domaine visible du satellite Météosat ont été utilisées. Ces données, qui ont une moins bonne résolution spectrale et spatiale (5 x 5 km) que celles de Landsat, sont cependant suffisantes pour suivre les grands événements qui se produisent dans le lac; Le seuillage utilisé pour distinguer les zones en eau a été fait en attribuant aux eaux libres du sud-est du lac, devant le delta du Chari, une surface constante (Lemoalle, 1989).

Enfin, les images Météosat produites par le centre de Météorologie Spatiale de Lannion ont également été utilisées, et interprétées en fonction des connaissances acquises précédemment.

Le schéma de fonctionnement de l'époque actuelle est celui du Petit Tchad.

L'amplitude de variation du niveau dans la cuvette sud (eaux libres du sud-est à Kalom) reste comprise entre 1,3 et 2 m, et son niveau moyen interannuel reste proche de 280,5 m (par référence au niveau IGN 1956).

Les faibles crues du Chari de 1986 et 1987 se sont traduites par des crues lacustres particulièrement faibles en décembre 1986 et décembre 1987. Ces hauteurs de crue lacustre, un peu plus faibles que celles de décembre 1973, sont juste suffisantes pour alimenter l'archipel de Bol, mais tout à fait incapables d'alimenter la cuvette nord.

Dans la cuvette nord, le cycle normal de la profondeur et de la surface inondée est un assèchement plus ou moins prolongé entre septembre et décembre, avec extension maximale de la surface inondée en janvier. Les profondeurs maximales observées à ce moment sont de l'ordre du mètre au centre de la cuvette. Devant l'estuaire de la rivière Yobé, un marécage est remis en eau, avec la crue de la rivière en septembre. Ce schéma est cependant susceptible de fortes altérations : l'inondation de la cuvette est nulle, moyenne ou totale selon les années.

2.1. Les surfaces en eau du Petit Tchad

2.1.1. La cuvette sud

Le niveau moyen de cette cuvette étant de 280,5 m (IGN, 1956) environ, la surface inondée correspondante est de 7500 km² si l'on prend la ligne Baga Kawa-Baga Sola comme limite entre les cuvettes nord et sud (Lemoalle, 1978).

Les valeurs minimales extrêmes telles qu'observées aux étiages de 1974 et 1987 sont de l'ordre de 4000 km² pour une cote de 279 m. Les valeurs maximales approchent 9000 km² lors des crues lacustres à la cote 281 m.

Il s'agit là de surfaces inondées où sont comprises à la fois les surfaces en eau libre et les surfaces de marécages. Au cours de l'année, ceux-ci sont plus ou moins inondés, leur extension correspondant approximativement aux surfaces inondables. L'observation des niveaux de l'eau permet d'estimer les surfaces totales inondées, en utilisant les relations établies antérieurement. L'utilisation des données satellitaires Météosat ne permet de déterminer avec sécurité que les surfaces en eau libre :

- environ 1700 km² pour les eaux libres du sud-est, de façon permanente
- environ 775 km² pour les eaux libres du sud-ouest
- environ 1550 km² pour les eaux libres situées juste au sud de la Grande Barrière sur la ligne Baga Kawa-Baga Sola, durant la crue de décembre 1988 - février 1989.

La situation générale de la cuvette sud est bien représentée par le traitement des données Landsat du 29 mai 1976, présenté figure 9.6.

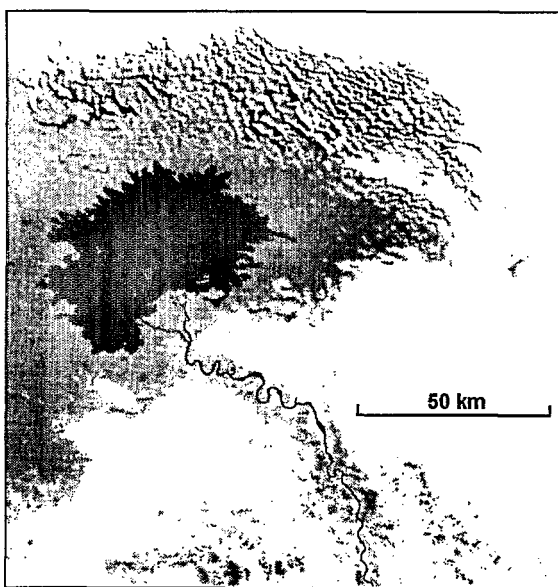


Figure 9.6

La cuvette sud du lac en période de Petit Tchad (montage J. Lemoalle d'après les données Landsat du 29 mai 1976). En gris les zones de végétation aquatique, en noir les zones d'eau libre, en blanc les terres émergées à végétation clairsemée.

2.1.2. La cuvette nord

La totalité des informations disponibles (observations par survol aérien, données Landsat, mais surtout images Météosat et données numériques) a été utilisée dans la figure 9.7 qui représente, pour la cuvette nord, les surfaces inondées à la fin du mois de janvier de chaque année de 1973 à 1989 (sauf 1980 à 1981 où le satellite n'a pas fonctionné).

Fin janvier correspond à la période d'extension maximale de l'inondation de la cuvette perceptible par le satellite Météosat ; en cas de forte crue, l'eau peut progresser plus tard entre les îles de l'archipel du nord, mais le phénomène n'est pas perceptible, les surfaces en eau des chenaux entre les îles étant très faibles par rapport au signal des îles elles-mêmes, plus étendues et à forte réflectance.

Le maximum annuel de surface en eau de la cuvette nord est donc compris entre 0 et 7000 km² suivant les années au cours de la période 1975-1989.

Le minimum annuel de surface en eau pour la même période est régulièrement compris entre 0 et 100 km², le premier assèchement complet s'étant produit en juin-juillet 1975.

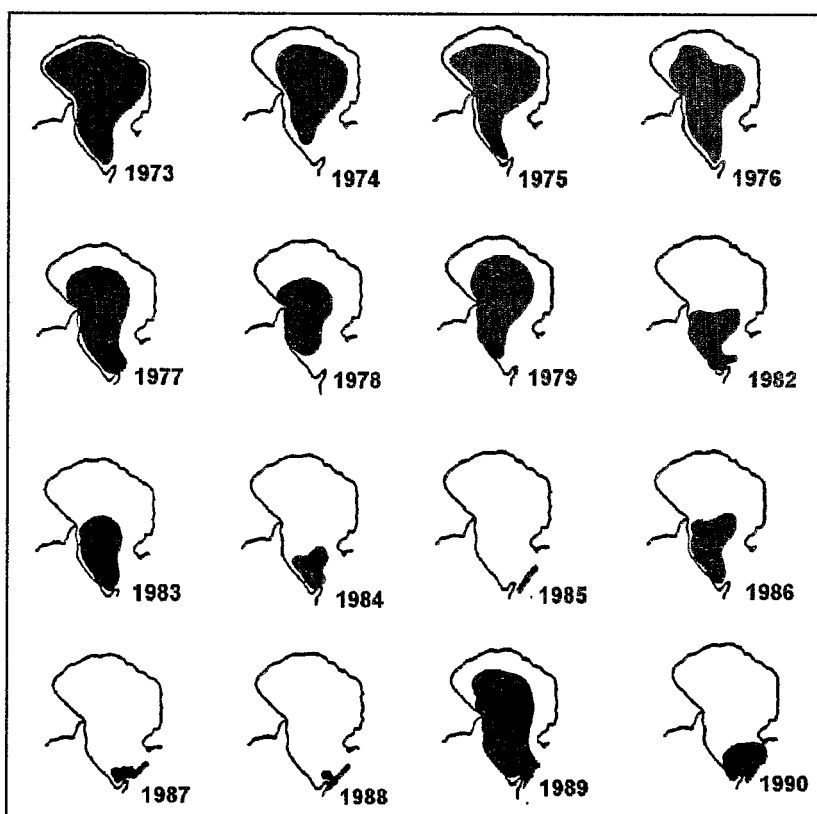


Figure 9.7

Les surfaces inondées de la cuvette nord à la fin de janvier (approximativement le maximum de l'inondation) de chaque année. Voir le tableau 9.1 pour l'origine des données.

2.1.3. Suivi de la crue 1988 - 1989

La vitesse de propagation de l'inondation a été suivie au cours d'une crue moyenne 1988-89 qui a couvert la plus grande partie de cette cuvette nord (Lemoalle, 1989). Pour ce faire, 51 scènes Météosat entre le 11 novembre 1988 et le 28 février 1989 ont été utilisées (transmises par le laboratoire UTIS de Dakar, Citeau 1988) selon la méthodologie indiquée plus haut.

La progression linéaire de la crue, suivant une ligne sud-nord, est de 75 km entre le 11 novembre et le 22 décembre soit $1,8 \text{ km j}^{-1}$. L'extension maximale observée se situe à 125 km au nord de Baga Kawa vers le 10 janvier 1989.

En surface, l'inondation de la cuvette nord est tout aussi impressionnante, avec une progression de 70 km^2 par jour entre le 11 novembre et le 22 décembre. La surface inondée maximale atteinte est de 3375 km^2 . La figure 9.8 rend compte plus en détail de la cinétique de l'inondation.

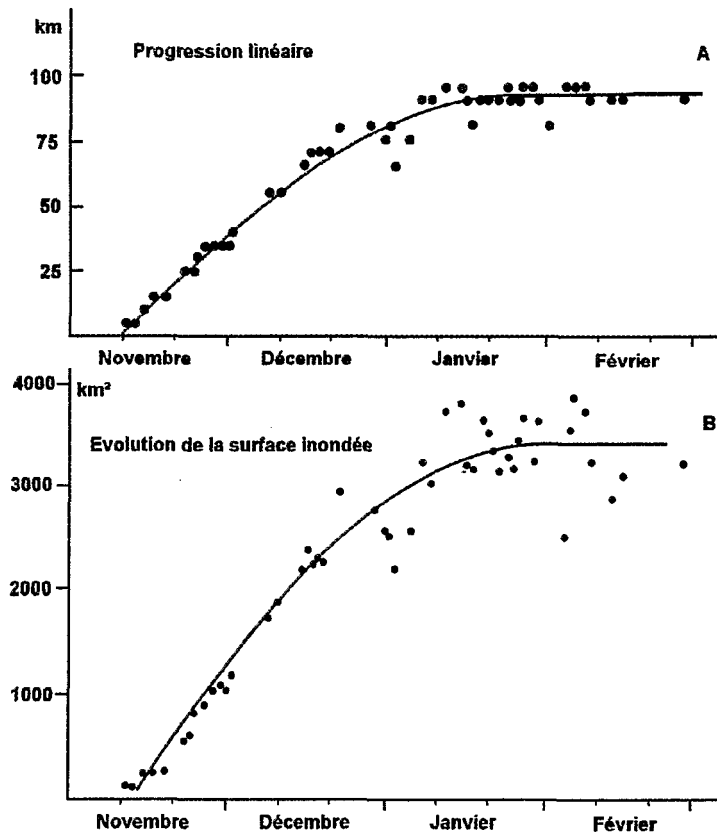


Figure 9.8

Progression en distance (A) et en surface(B) de l'inondation de la cuvette nord entre novembre 1988 et février 1989. Analyse de données Météosat (d'après Lemoalle, 1989). Chaque point correspond à une scène.

Des planches couleurs données en fin d'ouvrage illustrent le traitement des données METEOSAT. De son côté Rigal (1989) a suivi la même crue en utilisant les données AVHRR du satellite NOAA 11 que le centre Agrhymet acquiert en routine opérationnelle. Il aboutit sensiblement aux mêmes résultats en calculant, pour chacune des images reproduites dans les figures 9.9 et 9.10, l'index de végétation normalisé et l'indice de présence d'eau à partir d'une composition des canaux 5 (infrarouge thermique) et 2 (proche infrarouge).

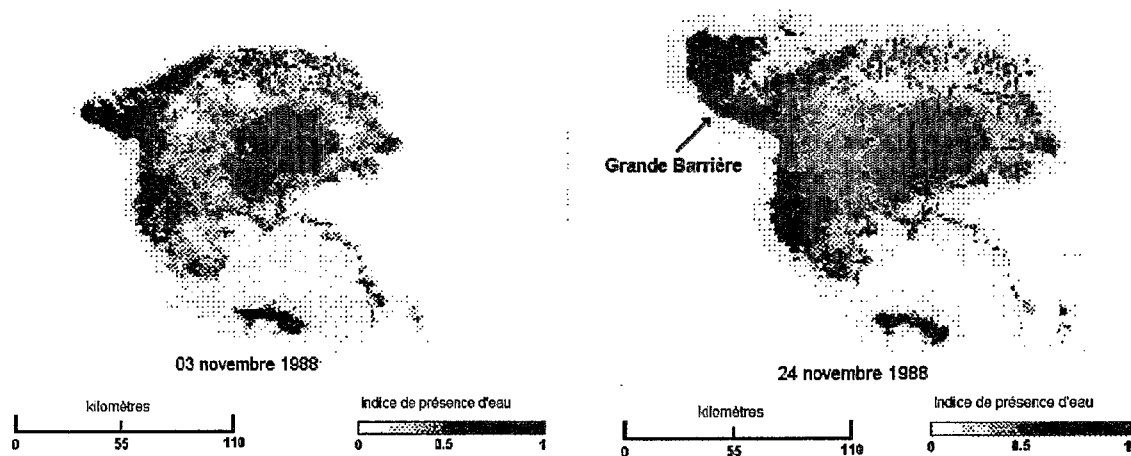


Figure 9.9

Zones d'inondation du lac en novembre 1988 (d'après Rigal, 1989).

Le 3 novembre 1988, le début de crue lacustre se manifeste par un remplissage de toute la surface de la cuvette sud jusqu'à la Grande Barrière. Le défluent, dont les plaines d'inondation sont bien marquées, est l'El Beïd qui contribue peu, par rapport au Chari. Les surfaces en eau visible de l'ouest de la cuvette sud sont des surfaces peu encombrées de végétation : l'eau a percolé à travers les marais de la cuvette sud.

Le 24 novembre 1988 la crue a progressé d'environ 45 km vers le nord (1 pixel = 1,7 km). Ceci est en relation avec l'augmentation du niveau de l'eau dans la cuvette sud que l'on peut déduire de l'élargissement des nappes d'eau profonde et de la diminution en nombre et en superficie des zones exondées (en blanc).

L'image du 5 décembre 1988 est perturbée par la présence d'une importante couverture nuageuse liée à un jet d'altitude ; inutilisable pour la cuvette sud, elle révèle cependant une progression très importante de la crue jusqu'à l'embouchure de la Komadougou, soit un gain d'environ 20 km par rapport à l'image précédente.

L'image du 14 février 1989, d'échelle plus grande que les précédentes (1 pixel = 0,86 km), correspond au maximum de la crue. Elle montre une nouvelle progression des zones inondées vers le nord, en direction de N'Guigmi, de l'ordre de 50 km. On observe, particulièrement au nord, une alternance de bas fonds inondés et de zones exondées, révélatrice d'une topographie de type dunaire. Dans la cuvette, le remplissage est également à son point maximum si l'on en juge d'après la superficie des îles, en diminution considérable par rapport à l'image du 24 novembre. Cependant, certains indices montrent que la phase d'alimentation est déjà tarie (la vallée du Chari est moins nettement marquée, la plaine d'inondation du Logone n'apparaît plus sur l'image).

Le 14 mars 1989, le processus d'assèchement est déjà très avancé. Il est marqué dans la cuvette nord par l'éclatement de la nappe d'eau libre en de nombreuses mares en fonction de la topographie. La cuvette sud se retrouve dans une situation très voisine de celle observée au début de la crue, le 3 novembre 1988 ; la vallée du Chari n'est plus décelable.

Le 11 avril 1989, la situation a encore bien évolué sous l'influence d'une évaporation de plus en plus intense à l'approche du mois de mai ; les zones asséchées l'emportent sur les surfaces en eau.

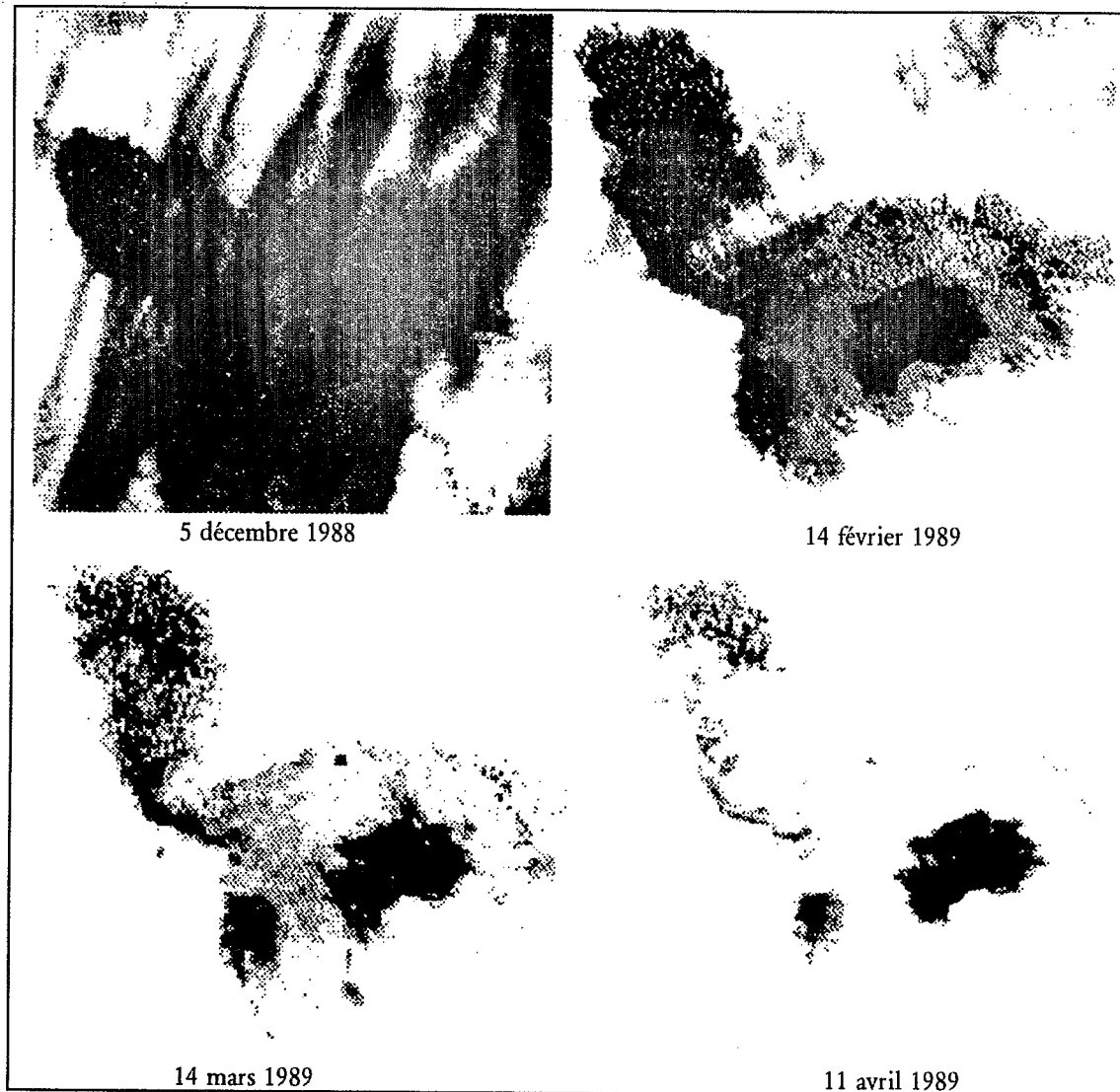


Figure 9.10

Evolution de l'inondation du lac de décembre 1988 à avril 1989 (d'après Rigal, 1989).

2.1.4. 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 replacées dans la figure 9.11 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 (Yayré) 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.

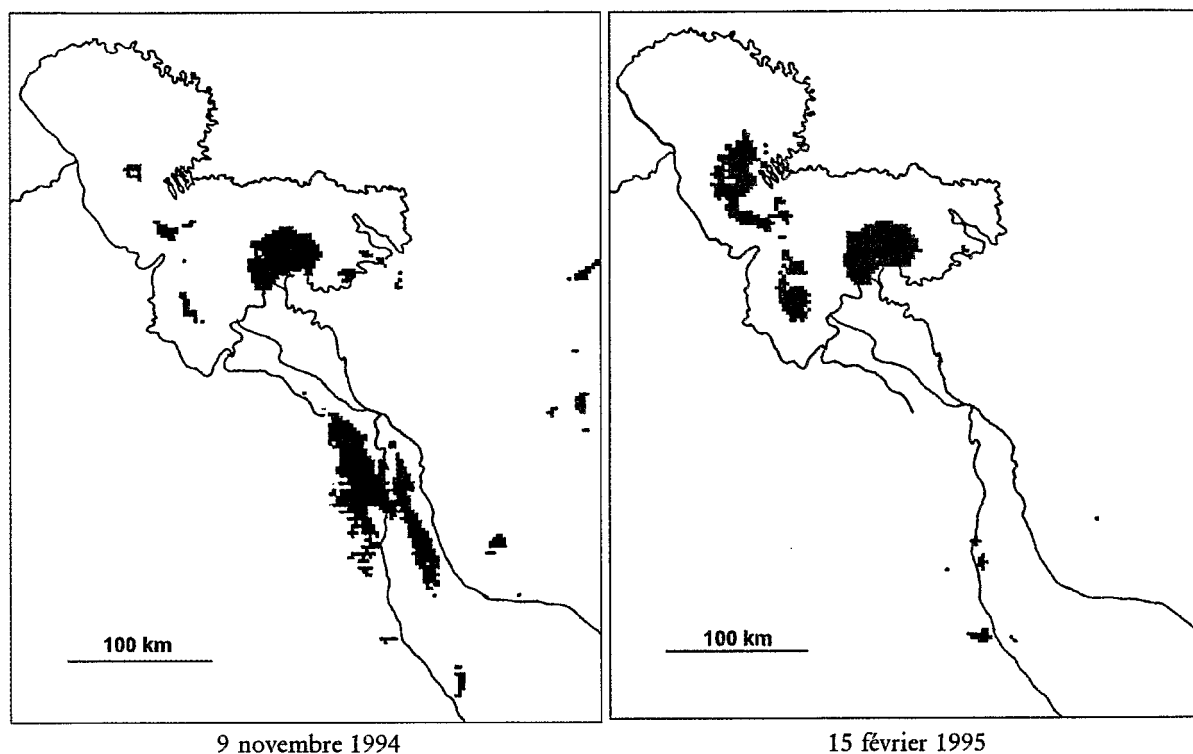


Figure 9.11

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

2.2. 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) (fig. 9.7) 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 (figure 9.12) 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.

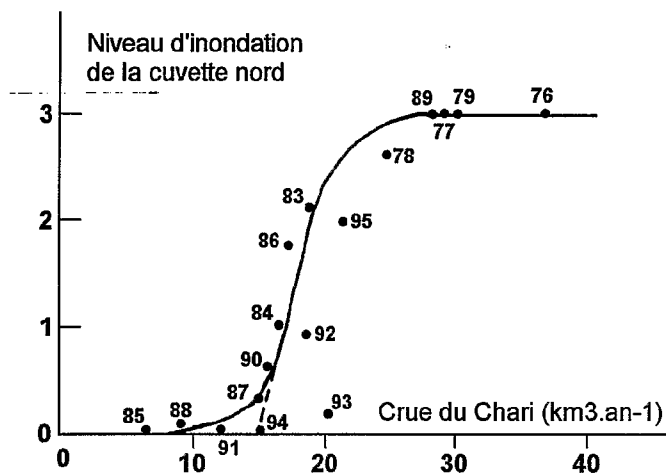


Figure 9.12

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.

Tableau 9.1

Débits annuels du Chari à N'Djaména (Q), importance de l'inondation de la cuvette nord (i), et sources d'information concernant cette inondation.

Année	Q (km ³)	i	Sources d'information sur l'inondation
1972-1973	17,2		Landsat et survols
1973-1974	18,9		Survols personnels
1974-1975	30,8		Landsat et survols
1975-1976	36,9	3	Landsat et survols
1976-1977	29,4	3	Survols
1977-1978	24,9	2+	Météosat
1978-1979	30,1	3+	Météosat
1979-1980	19,7	-	Pas de données
1980-1981	-	-	Pas de données
1981-1982	-	2	Météosat
1982-1983	(20)	2+	Météosat et survol
1983-1984	16,8	1	Météosat
1984-1985	6,7	0	Météosat
1985-1986	17,1	2	Météosat
1986-1987	15,3	0	Météosat
1987-1988	9,4	0	Météosat
1988-1989	28,4	0	Météosat
1989-1990	15,9	0+	Météosat
1990-1991	11,6	0	Météosat
1991-1992	19,7	1-	Météosat
1992-1993	20,5	0+	Météosat
1993-1994	15,1	0	Météosat
1994-1995	21	2	Météosat

3. LE FLEUVE CHARI ET LE LAC TCHAD

3.1. Les débits du Chari

Nous avons vu au chapitre 8 que le remplissage du lac Tchad était 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 $m^3 s^{-1}$	5070	4400	4960	3670	3540	3500	3670	3380	3790	4060	2820	1870	1930

Le maximum de crue interannuel est de $3660 m^3 s^{-1}$ sur 125 ans. L'appauvrissement durable 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 $18,4 km^3 an^{-1}$, soit moins de la moitié de l'apport interannuel calculé sur la période d'observation.

Les figures 9.13 et 9.14 illustrent bien cette évolution des modules et maximums de crue du fleuve Chari. La figure 9.15 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.

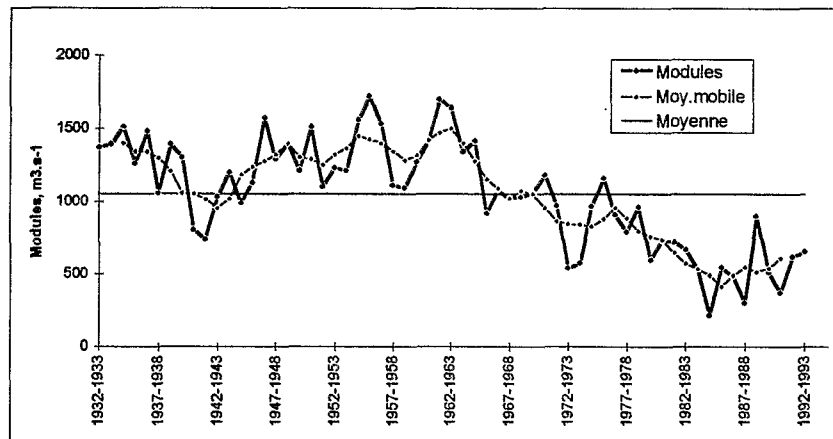


Figure 9.13

Variation annuelle des modules du Chari à N'Djaména

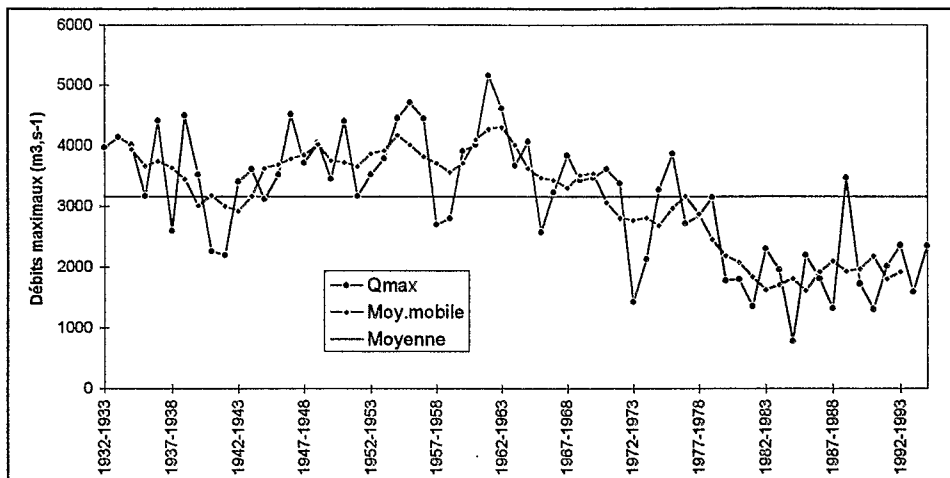


Figure 9.14

Variation des débits maximaux du Chari à N'Djaména

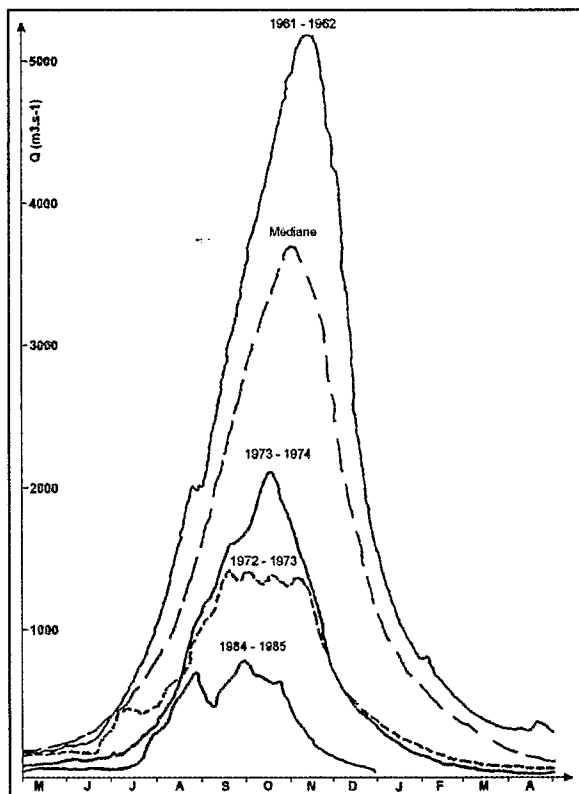


Figure 9.15

Hydrogrammes de crue du Chari à N'Djaména

3.2. Le contexte déficitaire régional

3.2.1. 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).

3.2.2. 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.

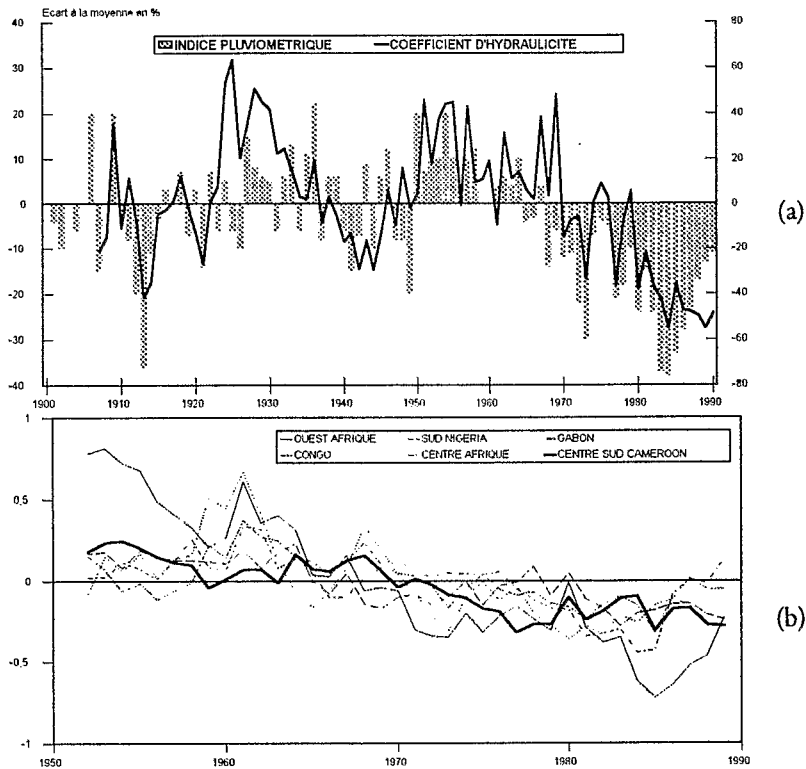


Figure 9.16

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 :

$$Q_i = Q_0 e^{-\alpha(t_i - t_0)}$$

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, 1993 a).

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 j^{-1} , en moyenne 0,02 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.

3.2.3. 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.

Les coefficients de pointe, évalués ici comme le rapport du débit maximum au module annuel, montrent que la tendance générale de la période actuelle est caractérisée par des hydrogrammes de crue plus étroits. Ainsi par rapport à la moyenne de ce coefficient calculé sur les 40 dernières années, on observe des coefficients moyens qui augmentent sur les deux dernières décennies.

La mise en régression des variables, modules/maximum annuel sur l'ensemble de la période d'observation du Chari, avec deux séries bien individualisées (avant et après 1970), aboutit à de bonnes relations globales (figure 9.17).

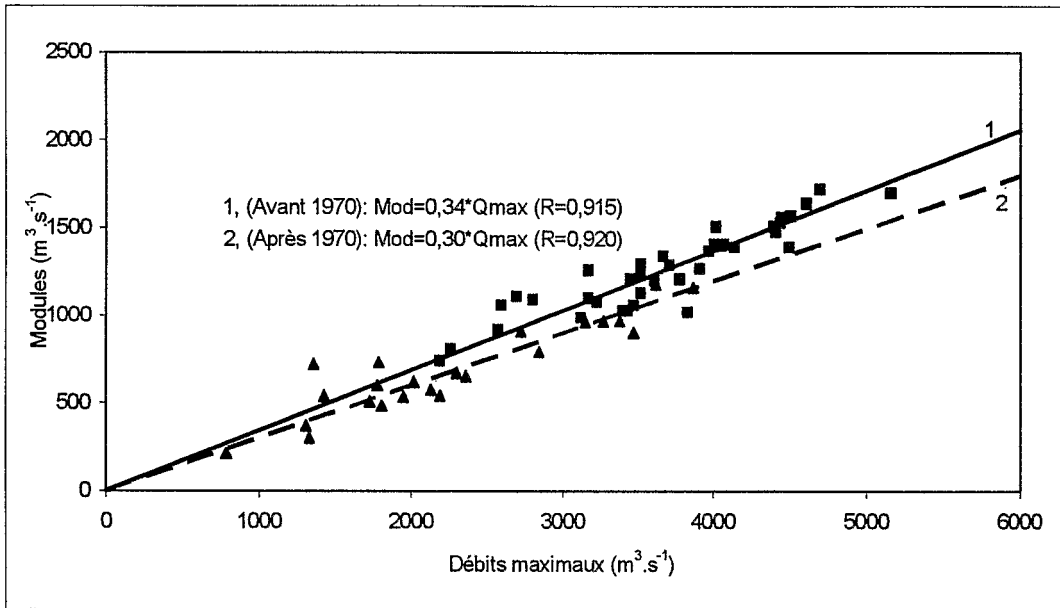


Figure 9.17

Régression entre les débits maximaux et les modules du Chari à N'Djaména

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 quelques événements pluviométriques journaliers intenses, dont certains de fréquence décennale, et des conditions générales de genèse des crues sans modification significative par rapport aux observations effectuées une trentaine d'années auparavant (Joignerez et Olivry, 1992). Pour de nombreux auteurs, il arrive même parfois, en zone soudano-sahélienne, que la dégradation du milieu ait entraîné de meilleures conditions de ruissellement et des

débits de pointe de crue plus élevés pour le même type d'averse. 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'amointrissement 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.

Conclusions



LE LAC TCHAD EST-IL CONDAMNÉ À DISPARAITRE ?

Au terme de cet ouvrage, nous avons repris la question posée en 1988 par la Commission du Bassin du Lac Tchad lors du séminaire international sur les ressources en eau organisé à N'Djaména. La participation de l'Orstom à ce séminaire (Pouyaud et Colombani, 1988) a bien montré que vouloir prédire l'avenir du lac Tchad, c'était d'abord prétendre estimer les apports à venir du Chari et donc prévoir l'hydraulicité de ce fleuve, c'est-à-dire l'avenir de la pluviométrie de son bassin.

Aucune considération scientifique ne peut pour l'instant permettre de voir la « fin » de la sécheresse ou le retour à des pluviométries « normales » ; les avis des scientifiques sont même très partagés : s'agit-il d'un avatar passager de la climatologie ou d'un bouleversement durable de la circulation atmosphérique à l'échelle du continent ou de la planète ? L'étude des changements globaux du climat qui mobilise la communauté scientifique internationale apportera peut-être des réponses, mais quelles que soient celles-ci, il restera à concevoir les modèles d'une gestion optimale des ressources en eau du monde du XXI^e siècle.

Dans le cas concret du lac Tchad, les analyses proposées dans cet ouvrage, les données les plus récentes, sur lesquelles s'appuient les travaux de J.C. Olivry évoqués plus haut sur les « fleuves malades d'Afrique », permettent de situer le devenir de l'hydrosystème à trois niveaux :

- Le premier niveau est celui de la mémoire du lac qui est de quelques années. S'il faut plusieurs années déficitaires pour arriver à son quasi-assèchement, et qu'une seule année très déficitaire ne suffise pas pour conduire à la situation récente, à l'inverse, quelques années moyennes des apports du Chari ou deux années exceptionnelles consécutives suffiraient en termes de volumes du bilan hydrologique à redonner au lac la physionomie que l'on a connue jusqu'en 1970.

Dans le cas d'un « moyen » Tchad, la relation entre la variation interannuelle des niveaux maximums du lac et les apports du Chari montre que l'on a stabilisation du niveau, situation d'équilibre, pour un apport du Chari de 42,5 km³.

Mais le retour à un Tchad « normal » nécessite une hydraulicité relativement exceptionnelle, où la crue du Chari serait sensiblement renforcée par des pluies directes abondantes sur le lac lui-même. Pour obtenir un plan d'eau unique en janvier (pic de crue lacustre) il faudrait une crue du Chari de l'ordre de 52 km³, équivalente à celle de 1955-1956 ou 1961-1962 ; pour que ce plan d'eau unique persiste toute l'année (cote supérieure à 280,8 m en janvier), deux crues importantes successives du Chari sont nécessaires. Une telle remise en eaux s'est déjà produite à deux reprises depuis le début du siècle et reste toujours possible. 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 ; les précipitations déficitaires sur le bassin du Chari vont-elles devenir la règle ? Y a-t-il eu rupture climatique durable ? C'est bien évidemment l'évolution climatique des prochaines décennies qui constitue le moteur principal de l'évolution possible du lac. Le regain des précipitations dans les années les plus récentes paraît indiquer que le pessimisme n'est pas de rigueur, mais encore faudra-t-il que ce renversement de tendance se confirme.
- Le troisième niveau est celui de la « mémoire du fleuve ». Sans revenir sur la troisième partie du dernier chapitre, rappelons que nous avons montré, à travers l'étude du fleuve Chari, que l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique intertropicale résultait à la fois de la crise climatique subie par le continent africain et de l'effet cumulé des déficits pluviométriques. La persistance de déficits hydriques

aigus, au delà des crises majeures des précipitations, indique que les fluctuations hydrologiques ne peuvent être traitées au seul pas de temps annuel. L'implication des aquifères des bassins - leur épuisement, la réduction de leur extension - à travers la contribution des écoulements de base conduit à une minoration durable de l'abondance de la ressource hydrologique dans la région.

C'est la conjugaison de ces deux derniers niveaux qui est déterminante sur le devenir hydrologique du fleuve Chari et, par suite, du lac Tchad.

Plusieurs scénarios sont possibles :

- poursuite ou aggravation de l'état de sécheresse : les processus mis en évidence sont exacerbés ; les fleuves cesseront assez rapidement d'être pérennes en saison sèche par suite de l'épuisement des réserves. C'est le schéma qui conduit au régime des cours d'eau sahéliens et subdésertiques et, à long terme, aux réseaux hydrographiques fossiles du Sahara.
- 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 en eau dans ces régions au terme de dix ou quinze ans dans le contexte actuel (modules et crues).
- reprise momentanée de la pluviosité excédentaire (moins de dix années consécutives) : on observera une légère amélioration, mais le retour aux basses eaux antérieures sera interrompu par de nouveaux épisodes secs ; de la durée de ceux-ci dépendra l'évolution future du régime des cours d'eau. Alternant avec des épisodes humides, ce scénario conduit à une stabilisation des coefficients de tarissement à un niveau supérieur à celui observé lors des décennies antérieures à 1975, et donc à un appauvrissement durable des ressources de saison sèche et plus globalement des modules et crues.

Sans s'attarder aux conséquences du scénario le plus pessimiste, il convient de souligner que l'occurrence d'une situation climatique 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 l'actuelle sécheresse se feront encore sentir pendant plusieurs années (Olivry *et al.*, 1992). Un éventuel retour à des conditions de précipitations excédentaires devra être soutenu sur plusieurs années pour permettre la reconstitution des aquifères et un retour à des conditions hydrologiques « normales ».

Pour les régions soudano-sahéliennes, les « fleuves malades de l'Afrique sèche » et le lac Tchad, il semble qu'un minimum de dix années de bonnes conditions climatiques soit nécessaire pour cette « normalisation ». Dans l'attente d'un changement climatique favorable, l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique sèche a donc toutes chances de rester une constante de l'hydrologie régionale jusqu'à la fin du XXe siècle.

En conclusion, rien dans le contexte actuel ne permet d'être optimiste sur l'évolution prochaine du lac Tchad. Mais rien n'indique non plus qu'il soit condamné à court terme. En effet, si le lac Tchad devait un jour disparaître de façon durable cela voudrait dire que ses tributaires, et en particulier le Chari, auraient vu auparavant leur hydrologie tellement bouleversée que toute l'activité humaine des peuples de la région aurait été totalement perturbée par une désertification sans précédent historique. De telles modifications, si elles devaient survenir, ressortent plus probablement d'une échelle de temps géologique que de l'échelle de temps de quelques générations.

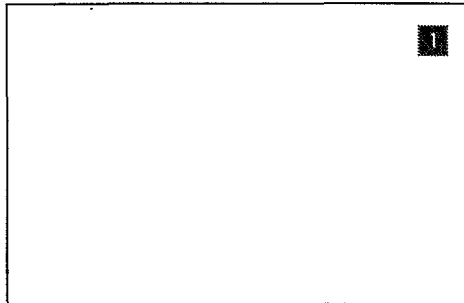
Il reste aujourd'hui que les grandes politiques d'aménagements et de développement de l'irrigation dans les zones strictement riveraines du lac sont en panne. Les prélèvements actuels sur les fleuves Chari et Logone ne constituent encore qu'une partie mineure de leurs apports annuels tout en représentant une partie importante des débits d'étiage, surtout dans les années sèches. Mais on peut très bien imaginer que les projets d'irrigation se développent considérablement, bien au sud des zones péri-lacustres, et privent le lac, comme c'est déjà le cas pour

la Komadougou au Nigeria, d'apports essentiels, surtout si ces projets prévoient la construction de grands barrages réservoirs en cascade sur le Chari et le Logone supérieurs. La survie du lac exige donc aussi une politique globale de gestion de la ressource permettant à tous les utilisateurs potentiels de satisfaire leurs besoins vitaux. C'est bien là la mission et la raison d'être de la Commission du Bassin du Lac Tchad et on doit pouvoir compter sur la CBLT, ses experts, les États et les bailleurs de fonds pour ne pas reproduire les erreurs de la mer d'Aral et du détournement de l'Amou Daria.

Des spécialistes proposent de prélever une partie des eaux de l'Oubangui par canaux et pompes pour soutenir les débits du Chari et alimenter le lac Tchad (projet TRANSAQUA). Mais, s'il n'y a pas de risque d'affecter de manière notable les importantes ressources en eau du bassin congolais, on imagine bien que ces eaux amenées à grands frais n'ont pas pour vocation d'être gaspillées par l'évaporation d'un plan d'eau revenu au stade d'un Tchad moyen et que d'importantes mutations socio-économiques accompagneraient le projet. Enfin, pour séduisants que puissent apparaître ces grands travaux, ces solutions d'envergure ne peuvent être envisagées avec réalisme par les États membres de la CBLT, la République Centrafricaine et le Zaïre, qu'à long terme dans un contexte économique favorable.

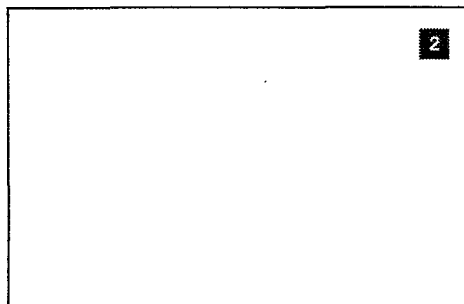
Il y a aujourd'hui plus urgent à faire et à des niveaux plus modestes. La prise en compte de mesures de protection s'impose en limitant la pression des prélèvements dans le lac et la nappe phréatique, et la surexploitation halieutique. L'adaptation à la sécheresse des populations riveraines, et notamment celle des pêcheurs qui ont dû se reconverter à des activités d'élevage ou de culture, a entraîné une certaine colonisation des terres exondées en particulier dans la cuvette nord. Cette occupation reste très vulnérable, une forte crue du Chari pouvant progresser rapidement à travers le lac détruisant cultures et villages ; seul un service de prévision et d'annonce des crues, avec messages radio en langues locales, peut prévenir les conséquences catastrophiques au plan humain d'un tel événement. Il faut aussi ménager l'avenir : la situation du lac Tchad en bordure du désert est exceptionnelle et il faut, pour protéger ce milieu original et la diversité de sa faune et de sa flore, en classer une partie en réserve naturelle. Ce sanctuaire de la biodiversité, dans l'esprit du Sommet de Rio en 1992, sera le garant d'un retour à des ressources renouvelées dans un lac Tchad revenu à des conditions environnementales plus conformes à l'épanouissement et au développement des populations riveraines. Bref, agir dans le sens d'une gestion conservatoire.

En souhaitant que cet ouvrage puisse servir à ceux qui ont à cœur cet épanouissement et ce développement des peuples de la région du lac Tchad, nous reprenons en conclusion de cette contribution celle que proposait notre illustre prédécesseur, Jean Tilho, en 1928 : « Pour le moment nous devons borner nos ambitions [...] à conserver pour la grande cuvette du Centre-africain les approvisionnements d'eau qui en font *une des plus fertiles contrées de la terre*, suivant l'appréciation du grand Barth, le prince des explorateurs africains ».



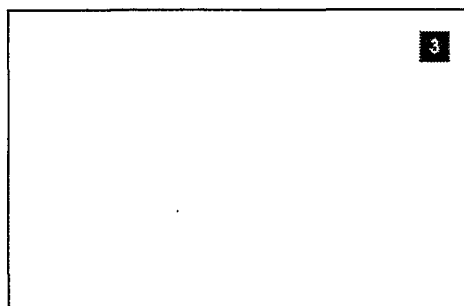
En période de moyen Tchad, les îles de l'archipel du Sud-Est sont bordées par une frange de plusieurs mètres de large de végétation aquatique. Celle-ci est essentiellement constituée de *Cyperus papyrus*, *Vossia cuspidata* et *Phragmites australis*.

Cliché Christian CADOU, fin de saison des pluies, septembre 1971.



Les effets combinés du vent, des vagues et des variations de niveau peuvent arracher une partie de la frange végétale qui se transforme alors en amas flottant qui erre au gré des courants et des vents, localement appelé kirta.

Cliché C. DEJOUX, mai 1968.

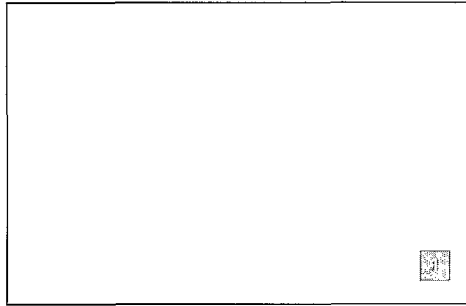


Les kirtas peuvent bloquer les embarcations en obstruant les passages entre les Ses. Un aléa, parmi d'autres, des campagnes à bord de la pinasse Nausicaa (à gauche) ou du Jacques Daget (à droite), les deux embarcations de l'Orstom.

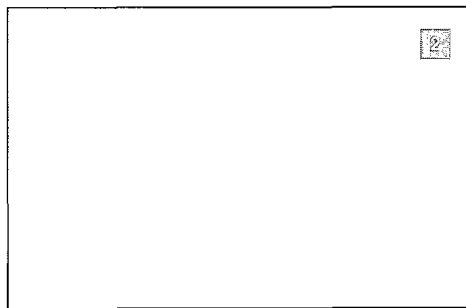
Cliché Christian LÉVÉQUE.



Planche IX

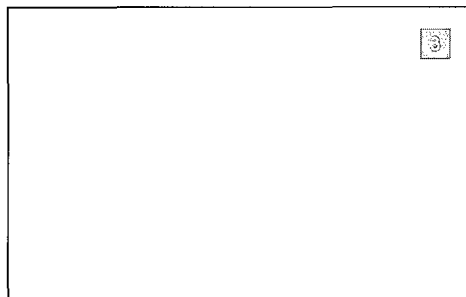


La baisse de niveau du lac se manifeste par l'émergence des sommets de dunes précédemment immergés dans la cuvette nord...



... puis par l'assèchement complet de cette cuvette.

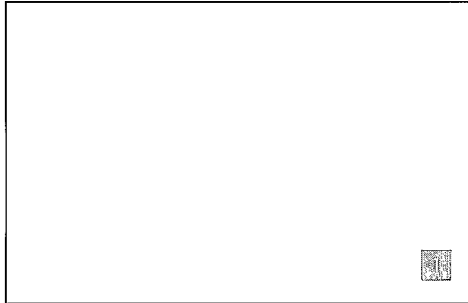
Clichés J. LEMOALLE, juin 1975.



Le relief dunaire qui se manifeste en période de moyen Tchad dans l'archipel de Bol, devient alors visible sur l'ensemble du lac.

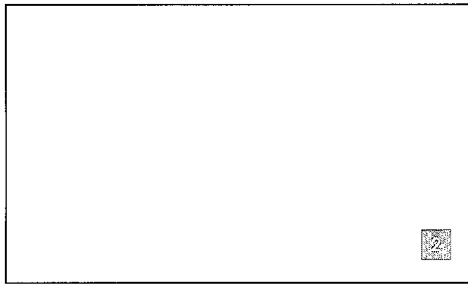
Cliché CADOU, 1971.



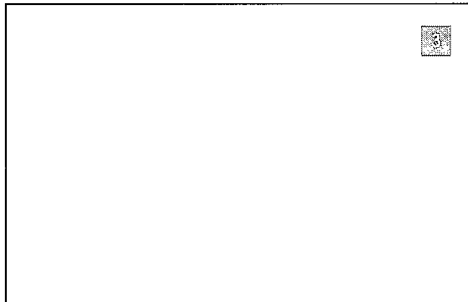


Une période d'assèchement, suivie de pluies et d'une remise en eau partielle du lac, a provoqué la germination des graines enfouies, parfois depuis longtemps, dans le sédiment lacustre. C'est notamment le cas pour l'ambatch, *Aeschynomene elaphroxylon* autour du limnigraphe de BolBérim. Cette légumineuse a une croissance exceptionnelle qui atteint 7 à 8 mètres en une année.

Cliché J. LEMOALLE, 1974.



D'autres plantes comme *Sesbania* sp., ou *Vossia cuspidata* ont également profité de la remise en eau...

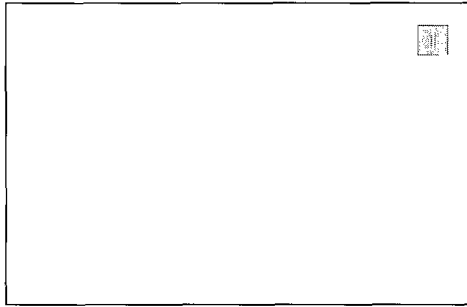


... pour coloniser de vastes espaces de la cuvette sud.

Clichés J. LEMOALLE et J. QUENSIÈRE, 1989.

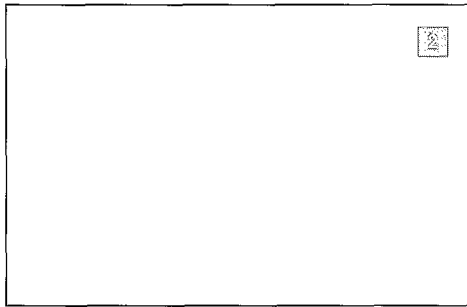


Planche XI



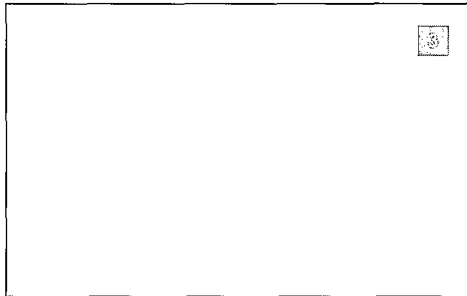
Dans tout le lac, la baisse de niveau de 1972-73 a été trop rapide pour que la végétation aquatique des rivages puisse s'adapter. Les franges littorales ont complètement disparu, comme autour du limnigraphe de Bérim en mars 1973. Cette image est à comparer au cliché 1 de la planche XI, du même site mais sous un angle différent.

Cliché Claude DEJOUX.



Avec la sécheresse, beaucoup d'éleveurs ou de cultivateurs se sont reconvertis dans la pêche. C'est probablement le cas pour une partie des habitants de cette ville nouvelle qui s'est installée sur la rive camerounaise au sud du lac.

Cliché Jacques QUENSIÈRE, 1989.



Ailleurs, d'autres mettent à profit les variations de niveau pour pratiquer des cultures de décrue sur les fonds du lac.

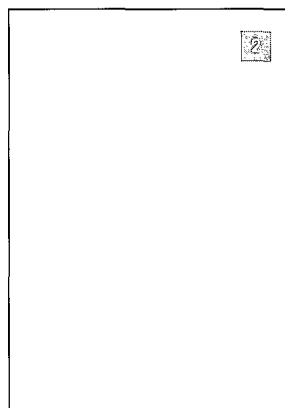
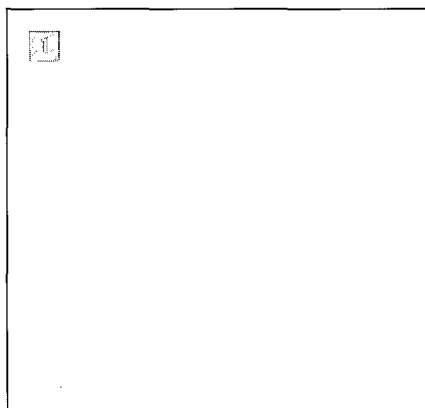
Cliché Claude Dejoux, mai 1973.



Planche XII

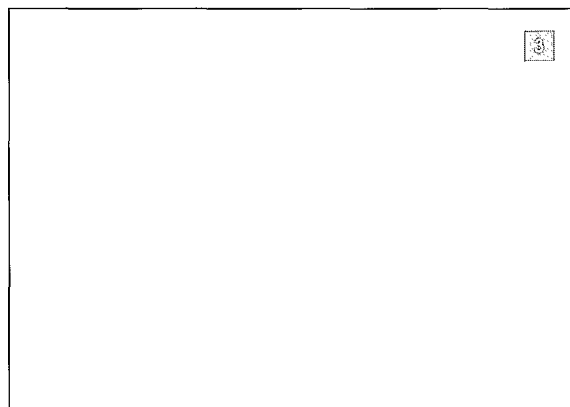
Dans ces conditions
changeantes,
il convient
de s'adapter
pour suivre le niveau,
comme à la station
de Kindjeria,
au centre
de la cuvette nord
en novembre 1975 ou
en septembre 1977
juste avant un nouvel
assèchement, mais
avec une végétation
régénérée.

Cliché A CHOURET.



Quelques travaux
sont nécessaires
pour raccorder lecture
au limnigraphe...

Cliché A CHOURET.



... et niveau à l'échelle.

Cliché A CHOURET.

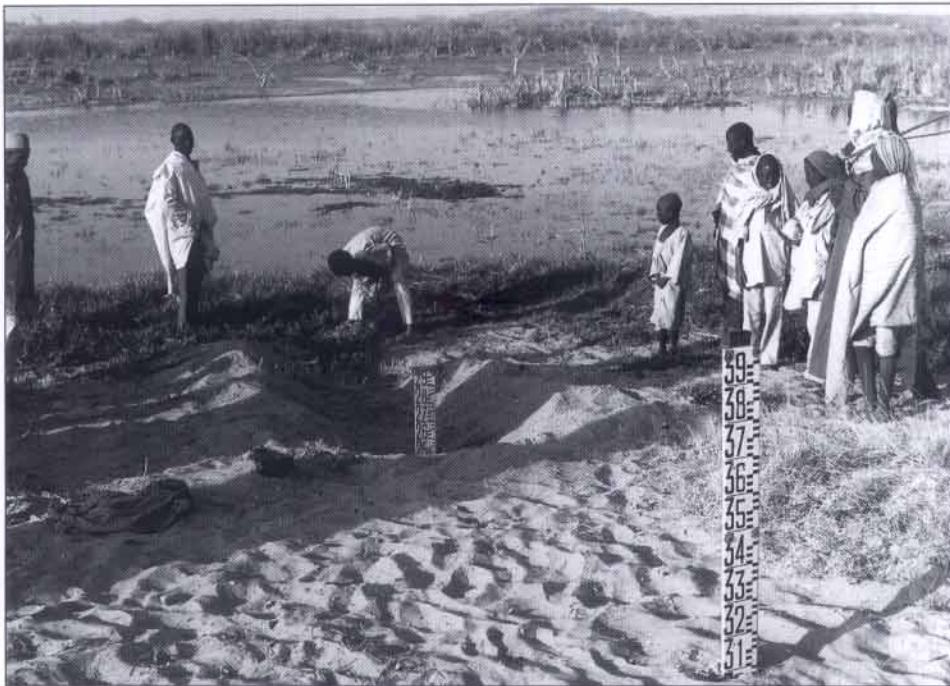
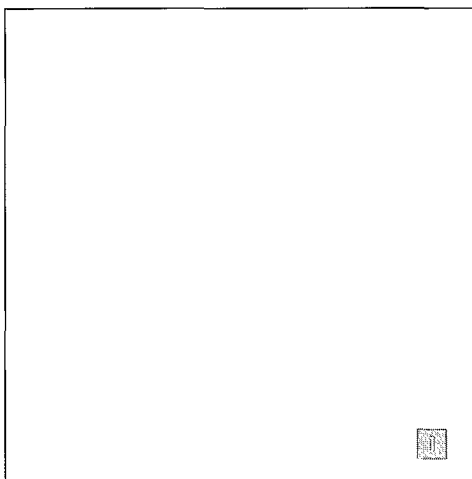


Planche XIII



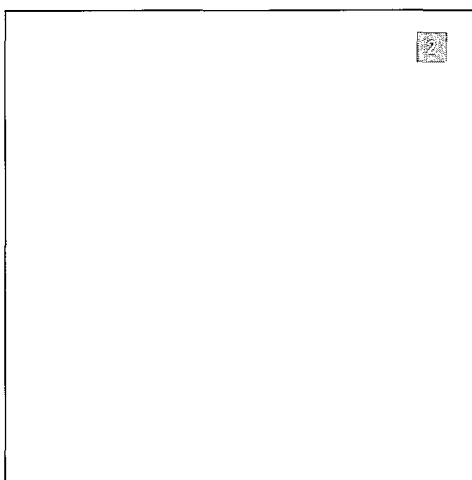
Une étude des données quotidiennes fournies par le satellite Météosat (données fournies par UTIS-Dakar) permet de suivre l'extension des zones en eau libre du lac, ici représentées en vert et bleu clair au cours de la crue annuelle.

Quatre zones ont été définies:

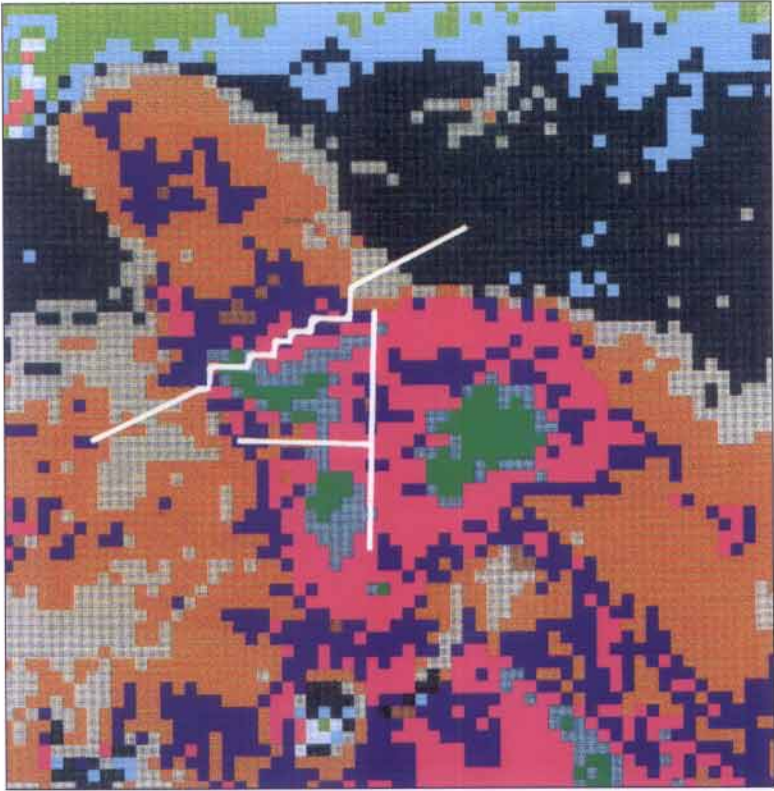
- les eaux libres du sud-est devant le delta du Chari, qui ont une surface quasi-constante,
- les eaux libres du sud,
- les eaux libres au sud de la Grande Barrière,
- les eaux libres de la cuvette nord.

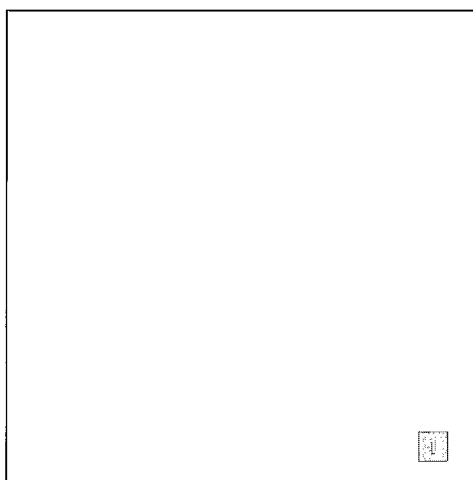
Chaque élément d'image représente un carré de 5 km de côté.

Le 12 novembre 1988, l'eau n'a pas encore traversé la Grande Barrière...



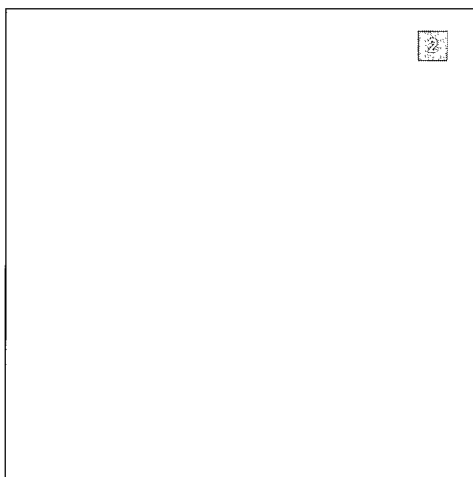
... alors qu'elle atteint la latitude de Boso le 17 décembre.



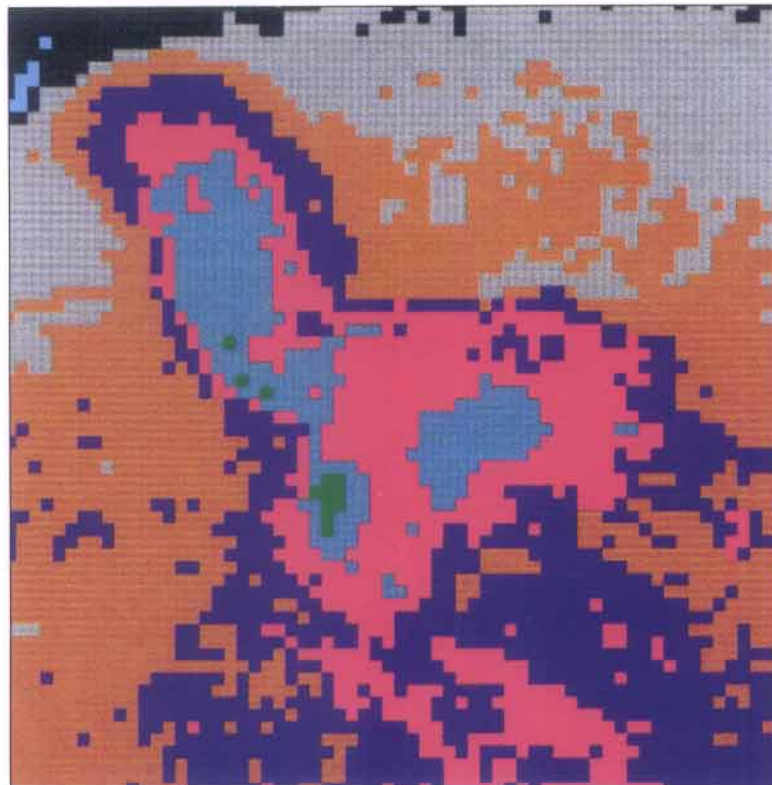


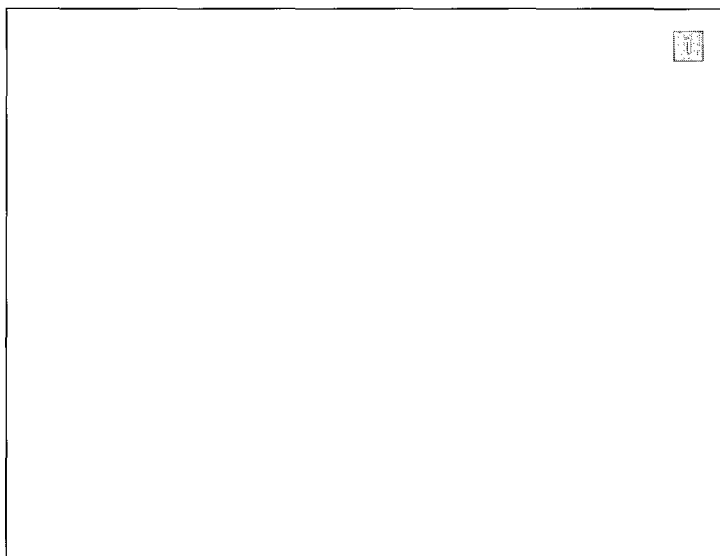
Suite de la planche XIV
Chaque élément d'image représente
un carré de 5 km de côté.

L'extension maximale de l'inondation
est atteinte vers le 15 janvier 1989...



... et reste stable pendant environ un mois
(image du 13 février) avant de régresser
jusqu'à l'assèchement en octobre-novembre 1989.

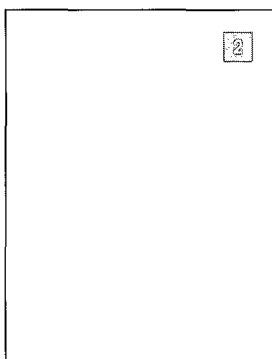




1829

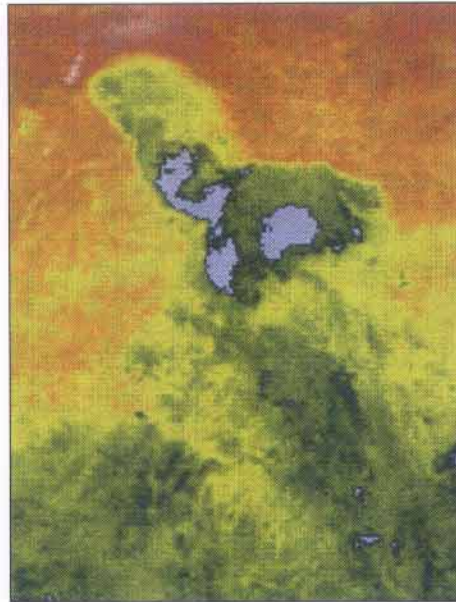
Une des plus anciennes représentations, à peu près fidèle, du lac Tchad, extraite d'une carte d'Afrique dressée par M. Lapie, premier Géographe du Roi, dans son Atlas Universel de Géographie Ancienne et Moderne, publié à Paris en 1829 chez Eymery, Fruger et Cie, éditeurs, (coll. priv. J. C. OLIVRY).

Le lac Tchad est inscrit entre les parallèles 10 et 15° N et les méridiens 10 et 15° E du méridien de Paris.



1996

Une des images les plus récentes du lac Tchad, montrant les surfaces en eau en janvier 1996 (crue de 1995). Données Météosat fournies par UTIS-Dakar, traitement ELGUERRO-LEMOALLE à Montpellier.



Références bibliographiques





BIBLIOGRAPHIE

- Anonyme - 1974 - Données climatiques mensuelles. Stations de Bol-Dune, Matafo, Ba-Illi, Bédédjia, N'Djaména. Années 1964 à 1973. Orstom, Bureau central hydrologique Paris et centre de N'Djaména.
- ADEFOLALU (D.) et ASPLIDEN (C.I.), 19 - The mean troposphere of West Africa. *J. Appli. Met.*, 15 : 705-716
- BILLON (B.) et BOULIN (E.), 1962 - Navigation entre Fort-Lamy et les cuvettes lacustres. Fort-Lamy, Orstom, 57 p..
- BILLON (B.), 1963 - Navigabilité du Chari et du lac Tchad. Serv. hydrol. Orstom 70 p.
- BILLON (B.), CALLEDE (J.) et SABATIER (P.), 1963 - Etude hydro-climatologique des polders de la région de Bol. Orstom, Fort-Lamy, 69 p.
- 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.
- BILLON (B.), 1968 - Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). *Cah.Orstom, sér.Hydrol.*, 5 (2) : 3-13.
- BILLON (B.), GUISCAFRE (J.), HERBAUD (J.) et OBERLIN (G.), 1969 - Le bassin du fleuve Chari. Orstom, Paris, 450 p.
- BILLON (B.), GUISCAFRE (J.) HERBAUD (J.) et OBERLIN (G.), 1974 - Monographie hydrologique du Chari. Paris, Orstom, 610 p., 142 fig., 480 tab..
- BOUCHARDEAU (A.) et LEFEVRE (R.), 1957 - Monographie du lac Tchad. Paris, Orstom et Commission Scientifique du Logone et du Tchad. Edition provisoire, 122 p..
- BOUCHARDEAU (A.), 1958 - « Le lac Tchad ». Section Hydrologie Orstom, Paris. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer, année 1956, pp. 9-26.
- BOUCHARDEAU (A.) et al., 1967-1968 - Monographie hydrologique du Logone. Orstom, Paris, 6 parties en 8 vol., 770 p.
- BRGM, 1987 - Actualisation des connaissances sur les ressources en eau souterraine de la République du Tchad. 2ème partie : Synthèse des données hydrogéologiques et carte au 1/1 500 000; BRGM/Rép. du Tchad, 105 p. + annexe.
- BRGM, 1992-93 - Suivi et gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad : - Actualisation des données et mise en place d'un système de surveillance des aquifères ; Rapport intermédiaire -Cartographie des aquifères et gestion de la ressource en eau, Rapport final.

- CADET (D.L.), 1988 - Prévision du temps : une éclaircie sous les tropiques. *La recherche*, 19 (195) : 118-120.
- CARMOUZE (J.P.), 1968 - Ions majeurs, phosphates et silicates dans le lac Tchad en avril 1968. Orstom, centre de Fort-Lamy, 18 p.
- CARMOUZE (J.P.), 1969 - Salures globales et spécifiques des eaux du lac Tchad en 1968. *Cah. Orstom, sér. Hydrobiol.*, vol. III, n o 2, pp. 3-14.
- CARMOUZE (J.P.), 1971 - Circulation générale des eaux dans le lac Tchad. *Cah. Orstom, sér. Hydrobiol.*, vol. V, n o 3-4, pp. 191-212.
- CARMOUZE (J.P.), 1972 - Originalité de la régulation saline du lac Tchad. C.R. Acad. Sc. Paris, 275, pp. 1871-1874.
- CARMOUZE (J.P.), 1976 - La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Contribution à l'analyse biodynamique d'un système endoréique en milieu continental. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 58, 418 p..
- 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.), DEJOUX (C.), DURAND (J.R.), GRAS (R.), ILTIS (A.), LAUZANNE (L.), LEMOALLE (J.), LEVEQUE (C.), LOUBENS (G.) et St JEAN (L.), 1972 - Grandes zones écologiques du lac Tchad. *Cah. Orstom, sér. Hydrobiol.*, vol. VI, n o 2, pp. 103-169.
- CARMOUZE (J.P.), CHOURET (A.), DURAND (J.R.), 1973 - Données récentes sur l'évolution du lac Tchad en 1972-1973. Sect. hydrol. Orstom, 11 p.
- CARMOUZE (J.P.), CHEVERRY (C.), GAC (J.Y.), ROCHE (M.A.), et MAGLIONE (G.), 1975 - Aspects sédimentologiques actuels d'un bassin continental endoréique : le bassin Tchadien. IXe Congr. Int. de Sédimentologie, Nice, 5 (1) : 133-139.
- CARMOUZE (J.P.), GOLTERMAN (H.L.) et PEDRO (G.), 1976 - The neoformation of sediments in lake Chad ; their influence on the salinity control. In : Interactions between sediments and freshwater, B.L. Golterman ed., Junk Publ. La Haye : 33-39.
- CARMOUZE (J.P.), PEDRO (G.) et BERRIER (J.), 1977 - Sur la nature des smectites de néoformation du lac Tchad et leur distribution spatiale en fonction des conditions hydrogéochimiques. C.R. Acad. Sci., Paris, sér. D. p. 615-618.
- CARMOUZE (J.P.), DURAND (J.R.) et LEVEQUE (C.), 1983 - Lake Chad Monogr. biologicae, vol 53, Junk, La Haye, 575 p.
- CARRE (P.), 1972 - Quelques aspects du régime des apports fluviaux des matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah.Orstom, sér.Hydrobiol*, 9 (1) : 19-46.
- CHEVERRY (C.), 1965 -Essai de caractérisation des sols des polders de Bol (rive du lac Tchad). Sect. Pédo. Orstom, Fort-Lamy, 120 p.

- CHEVERRY (C.), 1967 - Salinisation et alcalinisation des sols des polders de Bol. Conséquences sur la fertilité de l'aptitude à l'irrigation des sols. N'Djaména, Orstom, 110 p.
- CHEVERRY (C.), 1969 - Salinisation et alcalinisation des sols des polders de Bol. Conséquences sur la fertilité de l'aptitude à l'irrigation de ces sols. Sect. Pédo Orstom, Fort-Lamy, 110 p.
- CHEVERRY (C.), 1971 - Les premières étapes de la poldérisation sur les bordures Nord-Est du lac Tchad. Sect. Pédo Orstom, Fort-Lamy, 38 p.
- CHEVERRY (C.), 1974 - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse doct. ès-sci., Univ. Strasbourg, Orstom, 275 p.
- CHOURET (A.), 1973 - Etude des transports solides en suspension au Tchad (campagne 1971-1972). N'Djaména, Orstom, 11 p.
- CHOURET (A.), 1975 - Etude des transports solides en suspension au Tchad. Bilan de sept années d'observation (1968-1974). N'Djaména, Orstom, 24 p..
- CHOURET (A.), 1977 - Régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *A.I.S.H.*, 122, p.126-133.
- CHOURET (A.), 1977 - La persistance des effets de la sécheresse sur le lac Tchad. Orstom, N'Djaména, 10 p.
- CHOURET (A.) et DURAND (J.R.), 1972 - Note sur la crue exceptionnellement faible du Chari à Fort-Lamy en 1972 et ses incidences sur le niveau du lac. Orstom, centre de Fort-Lamy, 7 p.
- CHOURET (A.) et LEMOALLE (J.), 1974 - Evolution hydrologique du lac Tchad de juillet à décembre 1973. N'Djaména, Orstom, 12 p..
- CHOURET (A.) et *al.*, 1974 - Les effets de la sécheresse actuelle en Afrique sur le niveau du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XI, n°1, pp. 35-45.
- CHOURET (A.) et LEMOALLE (J.), 1975 - Evolution hydrologique du lac Tchad (juillet 1974 - octobre 1975). Orstom, N'Djaména, 6 p.
- CHOURET (A.) et MATHIEU (P.), 1975 - Etude des nappes phréatiques à la périphérie du lac Tchad. Centre Orstom de N'Djaména.
- CHOURET (A.) et MATHIEU (P.), 1978 - Etude de la nappe phréatique à la périphérie du lac Tchad en territoire tchadien. N'Djaména, Orstom, 57 p., 21 fig..
- CHUN-ZHEN (L.), 1991 - « The impact of climate change and human activity on the hydrological cycle in north China ». In F.H.M. VAN DE VEN, D. GUTKNECHT, D.P. LOUCKS et K.A. SALEWICZ éd. : *Hydrology for the water management of large river basins*. Publ. AISH n°201. Congrès AISH, Vienne, Autriche, 13-15 Août 1991 : 149-152.

- CITEAU (J.), BERGES (J.C.), DEMARCQ (H.) et MAHE (G.), 1988 - The watch of ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean as an indicator in drought forecast over sahelian areas. *Trop. Ocean Atmos. Newsletter*, 45 : 1-3.
- CITEAU (J.), DEMARCQ (H.) et MAHE (G.), 1988a - Position de la zone intertropicale de convergence le long de 28° W. Index de précipitation de Lamb et débit du fleuve Sénégal. *Veille climatique satellitaire* n° 22 : 3-5.
- CITEAU (J.), FINAUD (L.), CAMMAS (J.P.) et DEMARCQ (H.), 1989 - Questions relative to ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean, sea surface temperature and Senegal River runoff. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 41 : 181-190
- COLOMBANI (J.), BRUNET-MORET (J.Y.), VUILLAUME (G.) et LAFFORGUE (A.), 1979 - Etude des potentialités du bassin conventionnel du lac Tchad (Hydrologie), Paris, *Orstom*, 32 p., 668 tab..
- COLOMBANI (J.), VUILLAUME (G.), LAFFORGUE (A.) et FRANQUIN (P.), 1979 - Etude des potentialités du lac Tchad. Hydrologie Orstom, *Ministère de la Coopération*, Paris.
- COURTET (H.), 1995 - Les sels de la région du Tchad. C.R. Ac. Sc. Paris, pp. 316-318.
- DHONNEUR (G.), 1985 - Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale. Direction de la météorologie. Paris 151 p..
- DIAGNE (M.), LAMARRE (D.) et PAGNEY (P.), 1984 - Remarques sur la convergence intertropicale, l'exemple de l'Atlantique. *Le courrier du CNRS*, Paris, 57 : 64-67.
- DORIZE (L.), 1974 - L'oscillation pluviométrique récente sur le bassin du lac Tchad et la circulation atmosphérique générale. *Rev. Géogr. Phys. & Géol. Dyn.*, 16, 4 : 303-420.
- DUPONT (B.), 1967 - Etude des formations sédimentaires du Kanem. Fort-Lamy, *Orstom*, 150 p..
- DUPONT (B.), 1968 - Premières données sur les apports éoliens à Fort-Lamy (Tchad). Sect. géol. Orstom, Fort-Lamy, 2 p.
- DUPONT (B.), 1968 - Etude sédimentologique du lac Tchad. Premiers résultats. Orstom, Fort-Lamy, 76 p.
- DUPONT (B.), 1970 - Distribution et nature des fonds du lac Tchad (nouvelles données). *Cah. Orstom, sér. Géol.*, 2 (1) : 9-42.
- DUPONT (B.) et LEMOALLE (J.), 1971 - Les oolithes et pseudo-oolithes ferrugineuses du lac Tchad. C.R. Soc. Géol. Fr., 4, p. 309.
- DURAND (A.) et MATHIEU (P.), 1979 - Le Quaternaire supérieur sur la rive sud du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, Vol. XI, n°2 : 189-203.

- DURAND (A.), LANG (J.), MOREL (A.) et ROSET (J.P.), 1983 - Evolution géomorphologique, stratigraphique et paléoclimatique au Pléistocène supérieur et à l'Holocène de l'Air Oriental (Sahara méridional, Niger). *Revue Géol. Dyn. & Géogr. Phys.*, 24 (1) : 47-59.
- DURAND (A.), FONTES (J.C.), GASSE (F.), ICOLE (M.) et LANG (J.), 1984 - Le nord-ouest du lac Tchad au Quaternaire : Etude de paléoenvironnements alluviaux, éoliens, palustres et lacustres. *Palaeoecology of Africa*, 16 : 215-243.
- ERHART (H.), 1953 - Sur la nature minéralogique et la genèse des sédiments de la cuvette tchadienne. C.R. Acad. Sc., Paris, 237, pp. 400-403.
- FAURE (H.), 1959 - Etude hydrogéologique de la nappe du continental intercalaire du Niger oriental. Serv. géol. et prosp. min. Haut commissariat général à Dakar.
- FAURE (H.), 1966 - Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Quaternaria*, 8, p.167-176.
- FAURE (H.), 1967 - Une importante période humide du Quaternaire supérieur du Sahara. Bull. IFAN, 29, 2, p. 851.
- FLOHN (H.), 1965 - Tropical circulation pattern. *Bonn. met. Abb.* 15:55.
- FONTAINE (B.), 1989 - Les moussons pluvieuses dans l'espace africano-asiatique : Afrique Occidentale et Inde. Thèse d'Etat, Université de Bourgogne. 2 tomes : textes et tableaux, 414 p.; figures, 277p..
- FONTAINE (B.), 1991 - Variations pluviométriques et connexions climatiques: l'exemple des aires de mousson indienne et ouest-africaine. *Sécheresse*, 4,2 : 259-264.
- FONTAINE (B.) et BIGOT (S.), 1991 - Modes de sécheresse ouest-africains et températures de surface océanique. *Veille climatique satellitaire*, 38 : 37-49.
- FONTES (J.C.), et GONFIANTINI (R.), 1967 -Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens. *Earth and Planet. Sc. Lett.*, 3, 3, déc. 67, pp. 258-266 et vol. 3, 386.
- FONTES (J.C.), MAGLIONE (G.) et ROCHE (M.A.) - 1969 - Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est, *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, Vol. VI, n°1, pp. 17-34.
- FONTES (J.C.), GONFIANTINI (R.) et ROCHE (M.A.), 1970 - Deutérium et oxygène 18 dans les eaux du lac Tchad. Coll. sur les isotopes en Hydrologie, AIEA, Vienne, pp. 387-404.
- FONTES (J.C.), MAGLIONE (G.) et ROCHE (M.A.), 1970 - Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad, Serv. Hydrol. Orstom (1969) 12 p. Utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques en Afrique (C.R. Coll. Kinshasa, 1969), AIEA, Vienne, pp. 209-19.
- FONTES (J.C.) et GASSE (F.), 1986 - PALHYDAF : état d'avancement, novembre 1985. In : INQUA: 1986 Dakar Symposium "Changements globaux en Afrique". Orstom éd., pp. 149-152

- FONTES (J.C.) et GASSE (F.), 1991 - PALHYDAF (Palaeohydrology in Africa) program : objectives, methods, major results. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 84 : 191-215.
- FOTIUS (G.), 1974 - Problèmes posés par l'évolution de la végétation liée à la baisse du lac Tchad. N'Djaména, Orstom, 30 p..
- FOTIUS (G.) et LEMOALLE (J.), 1976 - Reconnaissance de l'évolution de la végétation du lac Tchad entre janvier 1974 et juin 1976. N'Djaména, Orstom, 13p..
- FREYDENBERG (H.), 1908 - Le Tchad et le bassin du Chari. Thèse Fac. Sci. Paris n° 41 série A 38. Paris, F. Schmidt Ed., 187 p.
- GAC (J.Y.), 1980 - Géochimie du bassin du lac Tchad. *Bilan de l'altération, de l'érosion et la sédimentation*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 123, 251 p..
- GAC (J.Y.) et CALLEDE (J.), 1970 - Les transports solides de l'Ouham à Batangafo., Bangui, Orstom.
- GAC (J.Y.), DROUBI (A.), FRITZ (P.) et TARDY (Y.), 1977 - Geochemical behaviour of silica and magnesium during the evaporation of waters in Chad. *Chem. Geol.*, 10: 215-228.
- GIBBS (W.J.), 1987 - Définition du climat. *Bull. de l'O.M.M.*, 36 (4) : 316-322.
- GRUBËR (A.), 1972 - Fluctuations in the position of the ITCZ in the Atlantic and Pacific ocean. *J. Atmos. Sci.* : 193-197.
- GUICHARD (E.), 1957 - Eaux du lac Tchad et mares permanentes au nord d'Ira. Comm. Sc. du Logone et du Tchad. Sect. Pédo. Orstom, Fort-Lamy.
- GUICHARD (E.), 1957 - Sédimentation du lac Tchad. Comm. Sc du Logone et du Tchad. Sect. pédol. Orstom, 46 p.
- GUILCHER (A.), 1965 - Précis d'hydrologie marine et continentale. *Masson*, Paris, 389 p..
- HASTENRATH (S.) et LAMB (P.J.), 1977a - Some aspects of circulation and climate over the eastern equatorial Atlantic. *Mon. Weath. Rev.*, 105 (8) : 1019-1023.
- HOBBS (J.E.), 1974 - A complex intertropical convergence zone. Some examples from the Indian ocean. *Weather* (GB), 29 (4) : 122-143.
- ILTIS (A.) et ROCHE (M.A.), 1967 - Compte-rendu de mission sur le lac Tchad. Sect. hydrol. et Sect. hydrobiol. Orstom Fort-Lamy, 8 p., 1 carte.
- ILTIS (A.), 1974 - Le phytoplancton des eaux natronées du Kanem (Tchad). Influence de la teneur en sels dissous sur le peuplement algal. Orstom, Paris, 271 p.
- JACQUES-FELIX (J.H.), 1947 - La vie et la mort du lac Tchad. S.T.A.T., Paris, *Bull. agron.*, n° 3, 96 p.
- JANICOT (S.), 1989 - 2ème partie. Article 1 : *Climatologie descriptive des précipitations en Afrique de l'Ouest*. Thèse de doct., univ. Paris-VI, 93 p..

- JANICOT (S.), 1990a - Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. 1ère partie - Synthèse. Thèse de doct., univ. Paris-VI, 178 p. + annexes.
- JANICOT (S.), 1990b - Deux facteurs principaux impliqués dans la sécheresse au Sahel. *Veille climatique satellitaire*, n° 32 : 24-33.
- LACROIX (M.A.), 1905 - Résultats géologiques et minéralogiques de récentes explorations dans l'Afrique Occidentale Française et dans la région du Tchad. *Rev. Coloniale, nouvelle sér.*, 25, avril 1905, pp. 205-223.
- LAMB (P.J.), 1978a - Case studies of tropical Atlantic surface circulation patterns during recent sub-saharan weather anomalies : 1967 and 1968. *Bull. Am. Met. Soc.*, 106 : 482-491.
- LAMBERT (G.), 1987 - Le gaz carbonique dans l'atmosphère. *La Recherche*, 189 : 778-787.
- LANGE (D.), 1977 - Le Diwan des sultans du Kanem-Bornou. Chronologie et Histoire d'un Royaume Africain. *Studien z Kulturkunde*, Wiesbaden, 42, 174 p..
- LEFEVRE (A.) et KINER (A.), 1995 - Lac Tchad : la grande sécheresse. In *Sciences et Avenir*, avril 1995 pp. 58-60.
- LEMOALLE (J.), 1969 - Premières données sur la répartition du fer soluble dans le lac Tchad. *Sect. Hydrobiol. Orstom, Fort-Lamy*, 10 p.
- LEMOALLE (J.), 1974 - Bilan des apports en fer au lac Tchad (1970-1973) *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.* VIII, 1 pp. 35-40.
- LEMOALLE (J.), 1979 - Application des données Landsat à la carte bathymétrique du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, 12 (1) : 83-87.
- LEMOALLE (J.), 1979 - Etude des potentialités du bassin du lac Tchad. Hydrologie - Utilisation de la télédétection pour l'évaluation des surfaces inondées. Paris, Orstom
- LEMOALLE (J.), 1989 - Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). Rapport Orstom Montpellier 89-03, 27 p..
- LEONARD (J.), 1968 - Complément au chapitre 1 de la monographie du lac Tchad ; aperçu sur la végétation. N'Djaména, Orstom, 11 p..
- LEROUX (M.), 1980 - *Le climat de l'Afrique tropicale*. Dakar. Thèse Doct. ès Sci., univ. Dijon, 3 tomes, 1427p..
- LEVEQUE (C.), 1972 - *Mollusques benthiques du lac Tchad; écologie, production et bilans énergétiques*. Thèse univ. Paris VI. Orstom, Paris, 225 p. multigr.
- LOUIS (P.), 1970 - Contribution géophysique à la connaissance géologique du bassin du lac Tchad. Paris, *Mém. Orstom* 42, 311 p..

- MAGLIONE (G.), 1969 - Nouvelles données sur le régime hydrogéochimique des lacs permanents du Kanem. *Cah. Orstom, sér. hydrobiol.* III, 1, pp.121-141.
- MAGLIONE (G.), 1976 - *Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Les dépressions interdunaires du Tchad, Afrique.* Thèse Doct. ès Sci., univ. Paris VI, Paris, Orstom, 331 p..
- MAHE (G.), 1993 - *Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes.* Paris, Orstom, coll. *Etudes et Thèses*, 438 p..
- MAHE (G.), DELCLAUX (F.) et CRESPIY (A.), 1994 - Elaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin-versant de l'Ogooué au Gabon). Soumis à *Hydrologie Continentale*, en relecture, 38 p.
- MAHE (G.) et L'HOTE (Y.), 1994 - Carte des pluies annuelles moyennes en Afrique de l'Ouest pour la période 1970-1989. Participation à un poster en collaboration avec le Laboratoire d'Etudes Agraires de l'Orstom Montpellier : « L'Afrique de l'Ouest à une saison des pluies, du pasteur sahélien au producteur de coton. » In : « Les paysans du monde », Exposition permanente d'Agropolis Museum - Montpellier.
- MAHE (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 pp. 109-117.
- MALEY (J.), 1972 - La sédimentation pollinique actuelle dans la zone du lac tchad (Afrique Centrale). *Pollen Spores*, 14, p. 263-307.
- MALEY (J.), 1973 - Les variations climatiques dans le bassin du Tchad durant le dernier millénaire ; essai d'interprétation climatique de l'Holocène africain. *C. R. Ac. Sc. Paris*, 276 : 1673-1675.
- MALEY (J.), 1980 - Les changements climatiques de la fin du Tertiaire en Afrique : leur conséquence sur l'apparition du Sahara et de sa végétation. In M.A.J. William & H. Faure, *The Sahara and the Nile*. Rotterdam : Balkema. p. 63-86.
- MALEY (J.), 1981 - *Etudes palynologiques dans le bassin du lac Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique Nord Tropicale, de 30 000 ans à l'époque actuelle.* Thèse Sc., univ. Montpellier. Paris, Orstom, *Coll. Trav. et Doc.*, 129 : 586 pp.
- 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-Sabel Nord*", Cent. Cult. Franç. Abidjan, p. 53-57.
- MALEY (J.), 1989 - 20 000 ans d'évolution des climats du Sahara Central aux Savanes tropicales humides, in « *Sud-Sahara-Sabel Nord* », Cent. Cult. Franç. Abidjan, p. 34-52
- MARTIN (D.), 1962 - Etude pédologique des rives Camerounaises du lac Tchad. IRCAM, Yaoundé.

- MATHIEU (P.), 1978 - Découverte d'oolithes ferrugineuses en stratigraphie sous le delta actuel du Chari (Tchad). *Cah .ORSTOM, sér. Géol.*, 10 : 203-2107.
- NOUVELOT (J.F.), 1972 - Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. *Cah .ORSTOM, sér. Hydrol.*, 9 (1) : 47-74.
- OLIVRY (J.C.), 1976 - Transports solides en suspension au Cameroun. ONAREST, Yaoundé, 19 p.
- OLIVRY (J.C.), HOORELBECKE (R.), 1976 - Etude hydrologique du Haut-Bassin du Mayo Tsanaga à Mokolo. Rapport définit. Orstom-ONAREST, Yaoundé, 93 p. + figures.
- OLIVRY (J.C.) , 1977 - Transports solides en suspension au Cameroun. Acte du colloque de Paris sur l'Erosion et les transports solides dans les Eaux Continentales. *AISH* Pub. n° 122, pp. 134-141.
- 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.) et CHASTANET (M.), 1986 - Evolution du climat dans le bassin du fleuve Sénégal (Bakel) depuis le milieu du XIXème siècle. (Extension de la période d'observations hydropluviométriques à partir de données historiques). INQUA, Symposium « Changements globaux en Afrique », Dakar.
- 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, pp. 501-512.
- OLIVRY (J.C.) et NAAH (E.), 1989 - Transports solides et qualité des eaux au Cameroun in 4èmes Journées Hydrologiques de l'Orstom à Montpellier. Sept. 1988. Colloques et Séminaires. Ed. Orstom, Paris, pp. 163-173.
- 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 - Evolution 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 - pp. 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 MAHE (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 pp. 66-78.

- OLIVRY (J.C.) et NAAH (E.), 1995 - Notice hydroclimatique de l'Atlas régional du Nord-Cameroun (éditeur C. SEIGNOBOS), (sous presse).
- ORSTOM 1974 -Données climatologiques mensuelles. Station de bol dune 1965-1970, Station de N'Djaména 1964 -1973. Orstom, N'Djaména, 24 - 52 p.
- PALMEN, 1950, 1951 - in Dhonneur.
- PALMER (H.R.), 1928 - The Kanem Wars. In *Sudanese Memoirs* vol 1 pp. 67-69.
- PIAS (J.), 1963 - Les sols du moyen et bas Logone, du bas Chari, des régions riveraines du lac Tchad et du Bahr-el Ghazal. *Mém. Orstom* 2, 438 p.
- PIAS (J.), 1970 - Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent. Paris, Orstom, *Mém. Orstom* 43, 407 p..
- P.N.U.D., 1980 - « Bureau pour l'Exécution de projet. Etude du développement du bassin du lac Tchad ». Rapport final (Minute). DHV, GFCC et SOGREAH - Amersfoort (Pay-Bas), Harrisburg (USA), Grenoble (France).
- POCHARD (P.), 1943 - Contribution à l'étude des eaux souterraines, des sels et des natrons de la région du Tchad. Rev. Sc. Med. Pharm. et Véter. de l'Afri. Fr. L., mars 1943.
- PREEZ (J.W.) et du BARBER (W.), 1965- The distribution and chemical quality of ground-water in Northern Nigeria. *Geol. Survey of Nigeria Bull*, 36, pp. 1-93.
- 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 Nord-est brésilien.* Thèse de Doc. es Sci., univ. de Paris-XI. Paris, Orstom, coll. *Etudes et Thèses*, 254 p., 85 fig., 112 tab..
- RAMPINO (M.) et SELF (S.), 1984 - Les effets atmosphériques de l'éruption d'El Chichon. In « Les Volcans ». Paris, *Bibliothèque Pour la Science*, Belin, p. 96-106.
- RAYNAL-ROQUES (A.), 1980 - Les plantes aquatiques. In J.R. DURAND et C. LEVEQUE éd. : « Flore et faunes aquatiques de l'Afrique Sahélo-Soudanienne ». Paris, Orstom, IDT n° 44, p. 136.
- RIOU (C.), 1972 - *Evaporation en Afrique Centrale (Tchad, République Centrafricaine, Congo) et contribution à la connaissance des climats.* Thèse de Doct. es Sci., univ. Paris V, Paris, Orstom, 216 p., 97 fig..
- ROBINSON (A.), 1968 - Notes on diurnal and seasonal changes in temperature and oxygen regimes in lake Chad. In : Annual Report 1966-67, Feb. Fish. Services, Lake Chad Res. St. Malamfatori, Nigeria, : 26-34.
- ROCHE (M.), RODIER (J.A.), BILLON (B.) et BOUCHARDEAU (A.), 1967 - Monographie hydrologique du Logone. Paris, Orstom, 787 p., 196 fig., 14 car., 329 tab..

- ROCHE (M.A.), 1968 - Premières estimations des apports en sels au lac Tchad par le Chari, *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. V, n°1, 1968, pp. 55-89.
- ROCHE (M.A.), 1969 - Evolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du lac Tchad d'après les résultats de 1908, 1957, 1962 à mars 1968. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. VI, n°1, pp. 35-74, 20 fig.
- ROCHE (M.A.), 1970 a - Hydrogéologie des côtes du lac Tchad à No, Tchingam et Soro (Kanem). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. VII, n°3, pp. 89-116.
- ROCHE (M.A.), 1970 b - Evaluation des pertes du lac Tchad par abandon superficiel et infiltrations marginales. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, Vol. II, n°2, pp. 67-80.
- ROCHE (M.A.), 1971 - Géographie et éléments numériques sur la surface et la bathymétrie du lac Tchad. Orstom, centre de Fort-Lamy 7 p.
- ROCHE (M.A.), 1972 - Traçage hydrochimique naturel du mouvement des eaux dans le lac Tchad. Sect. Hydrol. Orstom, Paris octobre 1972. 10 p., 5 fig., note présentée au Symposium sur l'Hydrologie des lacs. AIHS. Helsinki (1973) pp. 18-27.
- ROCHE (M.A.), 1973 - *Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du Lac Tchad.* Thèse de Doctorat es Sciences. Univ. Paris VI, Orstom. 398 p., 131 fig..
- ROCHE (M.A.), 1980 - *Traçage naturel isotopique et salin des eaux du système hydrologique du Lac Tchad.* Travaux et documents Orstom n°117, Paris, 383 pages, 103 fig., 11 photos.
- RODIER (J.), 1963 - Données hydrologiques essentielles concernant le Niger. Deuxième réunion du comité du Niger. Niamey, 19-21 fév., 19 pp..
- RODIER (J.), 1964 - Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo. Orstom, Paris.
- RODIER (J.), 1971 - Hydrologie superficielle du Tchad. Orstom, Paris, 4 pp..
- SCHNEIDER (J.L.), 1966 - Carte hydrogéologique au 1/500 000. In Rapport de synthèse de la feuille de Mao et Fort-Lamy. République du Tchad .BRGM LAM.67.A4
- SCHNEIDER (J.L.), 1967 - Relation entre le lac Tchad et la nappe phréatique (République du Tchad). *A.I.H.S., Symposium de Garda, Publ. n° 70*, .pp. 122-131.
- SCHNEIDER (J.L.), 1969 - Evolution du dernier lacustre et peuplements préhistoriques aux Pays-Bas du Tchad Bull. Dakar, *Inst. Fr. Afr. Noire*, série A, 31 : 259-263.
- SCHNEIDER (J.L.), 1994 - Le Tchad depuis 25 000 ans. Géologie, archéologie, hydrogéologie. Masson, Paris, 134 p..
- SEMENOV (E.K.), 1977 - Features of intertropical convergence zone cloud clusters of the Indian ocean basin. *Meteorologiya. Gidvologiya*, 6 : 99-109.
- SERVANT (M.), SERVANT (S.) et DELIBRIAS (G.), 1969 - Chronologie du quaternaire récent des basses régions du Tchad. CR Acad. Sci., Paris, 269, pp. 1603-1606, 29 octobre 1969.

- SERVANT (M.), 1970 - Données stratigraphiques sur le Quaternaire supérieur et récent au nord-est du lac Tchad. Viè congr. Panafr. de Prehist. et Quatern., Dakar et *Cah. Orstom, sér. Géol.* Vol. II, n°1, pp. 95-114.
- SERVANT (M.) et SERVANT (S.), 1970 - Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. *Rev. Géogr. Phys. & Géol. Dyn.*, 2è sér., 12, 1.
- SERVANT (S.), 1970 - Répartition des Diatomées dans les séquences lacustres holocènes du nord-est du lac Tchad. Premières observations et perspectives de recherches. *Cah. Orstom, sér. Géol.* Vol. II, n°1, pp. 115-126.
- SERVANT (M.), 1973 - *Séquences continentales et variations climatiques. Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïde supérieur.* Thèse Doct., univ. Paris VI, Paris, Travaux et Documents Orstom, n° 159, 573 pp..
- SERVANT-VILDARY (S), 1973 - Stratigraphie et néotectonique du Plio-Pléistocène ancien du Tchad d'après l'étude des diatomées. *C.R.Ac.Sc.*, Paris, 276 : 2633-2636.
- SERVANT-VILDARY (S), 1978 - Etude des diatomées et paléoclimatologie du bassin tchadien au Cénozoïque supérieur. Travaux et Documents de l'Orstom, 84, 2 tomes.
- STOMMEL (H.) et STOMMEL (E.), 1983 - *Volcano Weather (the story of the year without a summer 1816).* Sevenses Press New-Port, 1983, Rhode Island, 172 pages.
- Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad. Rapport technique présentant les principaux résultats des opérations. UNESCO, Paris, 1969.
- TILHO (J.), 1910 - Documents scientifiques de la mission Tilho (1906-1909). Imprimerie Nationale, Paris, 1910, en 2 volumes. 2038 pages, photos, graphiques.
- TILHO (J.), 1925 - Sur l'ordre de grandeur des variations de profondeur et d'étendue du lac Tchad. *C.R. Ac., Sc. Paris*, 180, pp. 1233-1236.
- TILHO (J.), 1928 - Variations et disparition possible du Tchad. *Annales de Géographie*, pages - 238-260, Tome 37. Paris, 1928
- TOUCHEBEUF de LUSSIGNY (P.), BILLON (B.), BOUCHARDEAU (A.), CHEVERRY (C.), DUPONT (B.), LAMAGAT (J.P.), MAGLIONE (G.), RIOU (C.), SERVANT (M.), ROCHE (M.A.) et SCHNEIDER (J.L.), 1969 - Monographie hydrologique du lac Tchad. Paris, Orstom, 226 p., 99 fig. et 123 tab..
- TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY (P.) et *al.*, 1969 - Monographie hydrologique du lac secondaire : l'El Beid et la Komadougou - Yobe. Sect. Hydrol. Orstom, Paris, 57 p.
- VUILLAUME (G.), 1981 - Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du Lac Tchad. *Cah Orstom, sér. Hydrol.*, Vol. XVIII, n°1, Paris, 1981, P. 23-72.

- WACHENIER (P.), 1961 - Mission de recherche de bauxite au Logone et au Mayo Kébi (Tchad).
Bull. Inst. Equat. Rech. Et. Géol. Min., 14 : 37-41.
- WHITE (R.M.), 1986 - Les variations climatiques. *Bull. de l'O.M.M.*, 35,1 : 30-33.
- XU QUN. ., 1987 - The significant influence of the annual variation of direct solar radiation on the summer monsoon climates of China and Tropical Africa. 19ème assemblée générale de l'union géodésique et géophysique internationale (UGGI). Vancouver. Canada. International Association of Meteorology and Atmospheric Physics (IAMAP). M7-28.
- ZELTNER (J.C.), 1980 - Pages d'histoire du Kanem, *Librairie l'Harmattan*, Paris, 278 pp.

Table des matières

Sommaire.....	5
Introduction.....	6
Le cadre physique du lac Tchad.....	9
Première partie	
Morphologie du lac Tchad.....	11
Chapitre 1	
1. SITUATION ET CARTOGRAPHIE.....	11
2. DESCRIPTION GENERALE DU LAC.....	14
2.1. Le lac lui-même.....	14
2.2. Les côtes.....	16
2.3. Le Bahr El Ghazal.....	16
2.4. Les polders des rives nord-est du lac Tchad.....	18
2.5. Les dépressions interdunaires de la bordure septentrionale du lac Tchad.....	18
3. SUPERFICIE DU LAC.....	20
4. RELATIONS ENTRE LE NIVEAU ET LA SUPERFICIE DES EAUX.....	24
4.1. Utilisation des documents cartographiques.....	24
4.2. Utilisation de l'imagerie satellitaire.....	26
5. ALTITUDE DES FONDS ET PROFONDEUR DES EAUX.....	28
6. CONDITIONS DE NAVIGATION.....	32
Géologie générale du lac Tchad.....	35
Chapitre 2	
1. LE CADRE GEOLOGIQUE.....	35
2. PALEO GEOGRAPHIE DU LAC TCHAD.....	37
2.1. La Cuvette Lacustre de l'Oligo-Miocène au Plio-Pléistocène.....	37
2.2. Le Paléo-Tchad du Pléistocène terminal et de l'Holocène (12 000 ans BP à actuel).....	39
2.3. L'évolution du lac Tchad au cours du dernier millénaire.....	44

3. SEDIMENTOLOGIE DES FONDS DU LAC	46
3.1. Nature des fonds du lac	47
3.2. Distribution des fonds du lac Tchad	48
4. APPORTS SEDIMENTAIRES AU LAC TCHAD	50
4.1. Les apports fluviaux	50
4.2. Apports météoriques de poussières	55
5. GEOCHIMIE DES EAUX DU LAC TCHAD	55
5.1. Les apports dissous au lac	55
5.2. Composition chimique des eaux du lac	57
6. HYDROGEOLOGIE GENERALE DU LAC TCHAD	62
6.1. Rappel des travaux effectués	62
6.2. Conditions de gisement de la nappe phréatique	62
6.3. Piézométrie de l'aquifère	64
6.4. Fluctuations de la piézométrie	67
6.5. Les études isotopiques	67
6.6. La régulation hydrochimique du lac Tchad	69
6.7. Conclusions sur les études de la nappe phréatique	71

Végétation du lac Tchad

73

Chapitre 3

1. APERCU SUR LA VEGETATION DE 1964 à 1968	73
1.1. Principaux types de milieux et considérations phytogéographiques	73
1.2. Les facteurs écologiques	75
1.3. Les regroupements végétaux	76
1.3.1. Végétation aquatique des eaux calmes douces	76
1.3.2. Végétation des bords des mares temporaires d'eau douce	78
1.3.3. Végétation des bords des eaux natronées	78
1.3.4. Végétation des sables fluviaux et lacustres périodiquement inondés-exondés	78
1.3.5. Végétation nitrophile des vases exondées	78
1.3.6. Végétation herbacée semi-aquatique	78
1.3.7. Végétation arbustive périodiquement inondée-exondée	79
1.4. Dynamique de la végétation du lac	80
2. APERCU SUR LA VEGETATION DE 1974 à 1976	80

Deuxième partie

Mécanismes du climat et données climatologiques 85

Chapitre 4

1. LES MECANISMES DU CLIMAT	85
1.1. La Circulation atmosphérique	85
1.1.1. Les schémas de circulation générale	85
1.1.2. Le facteur thermique	88
1.2. Eléments de météorologie	89
1.2.1. Les centres de pressions	89
1.2.2. Les vents	90
1.2.3. Les perturbations tropicales et les facteurs inhibiteurs de pluies	92
1.3. Conclusion	93
2. DONNEES CLIMATOLOGIQUES	94
2.1. Les vents	94
2.2. Température de l'air	99
2.2.1. Température moyenne mensuelle	100
2.2.2. Ecart diurne moyen mensuel	100
2.3. Humidité de l'air	101
2.3.1. Humidité relative	101
2.3.2. Tension de vapeur	103
2.4. Insolation et rayonnement	104
2.4.1. Insolation	104
2.4.2. Rayonnement	107
2.5. Evaporation	108
2.5.1. Evaporation Piche	108
2.5.2. Evaporation sur bac	110
2.5.3. Application de la formule de PENMAN	113

Etude des précipitations 117

Chapitre 5

1. PRECIPITATIONS ANNUELLES	119
1.1. Hauteurs de précipitations annuelles	119
1.2. Répartition statistique des pluies annuelles	122

1.3. Irrégularité locale des précipitations	124
1.4. Moyenne des précipitations annuelles sur le lac	124
2. PRECIPITATIONS MENSUELLES	126
2.1. Hauteurs de précipitations mensuelles	124
2.2. Moyenne des précipitations mensuelles sur le lac	128
3. Précipitations journalières	129
4. Hauteurs des précipitations et variations climatiques	130
4.1. Généralités	130
4.2. La normale et l'événement anormal	131
4.3. Cas de la Région du lac Tchad	131

Hydrologie du lac Tchad 135

Troisième partie

Données limnimétriques et hydrologiques 137

Chapitre 6

1. HISTORIQUE DES OBSERVATIONS ANCIENNES	137
1.1. Les niveaux du Lac	137
1.2. Pénétration des eaux du lac dans le Bahr El Ghazal	138
2. EQUIPEMENTS ET OBSERVATIONS LIMNIMETRIQUES	142
2.1. Station de Bol	142
2.2. Station de N'Guigmi	145
2.3. Stations diverses	145
2.4. Stations nouvelles créées pour suivre l'évolution hydrologique du lac pendant la phase de sécheresse	146
2.4.1. Station de Malamfatori	146
2.4.2. Station de Baga-Kawa	147
2.4.3. Station de Kindjéria	148
2.4.4. Station de Kalom	149
2.4.5. Station de Baga-Kiskra	149
2.4.6. Station de Haykoulou	149
2.4.7. Stations diverses	150
2.4.8. Note sur le calage des zéros des échelles limnimétriques nouvelles installées en 1973	150
3. ASPECT DES VARIATIONS DU NIVEAU DU LAC	152
3.1. Fluctuations saisonnières et rapides	152
3.2. Fluctuations interannuelles	154

4. HAUTEURS LIMNIMETRIQUES OBSERVEES	157
5. CHRONIQUES DES APPORTS FLUVIAUX	161

Bilan hydrologique et modélisation des hauteurs d'eau du lac Tchad 165

Chapitre 7

1. GENERALITES	165
2. BILAN HYDROLOGIQUE MENSUEL DU LAC165	
2.1. Les termes du bilan hydrologique	165
2.2. Données disponibles	167
2.2.1. Période d'étude et données de base	167
2.2.2. Relations cotes du lac - volumes - superficie	169
2.3. Bilan mensuel et évaluation des pertes totales	172
3. MODELISATION DES HAUTEURS D'EAU DU LAC	177
3.1. Recherche d'une simulation des niveaux du lac	177
3.2. Résultats de la modélisation et analyse du bilan hydrologique mensuel	182
3.2.1. Période totale 1954 -1972 (19 ans)	182
3.2.2. Periode 1954-1968 (15 ans).....	185
3.3. Un exemple d'application : influence des prélèvements pour irrigation	188

Crues et étiages du lac - prévision et prédétermination 191

Chapitre 8

1. RELATIONS ENTRE LES NIVEAUX EXTREMES DU LAC ET LES CRUES DU CHARI191	
1.1. Relation entre le maximum annuel et le minimum précédent	191
1.2. Relation entre le minimum annuel et le maximum précédent	193
1.3. Amplitude de la montée annuelle du lac	195
1.4. Amplitude de la baisse annuelle du lac	195
1.5. Relation entre l'écart de deux étiages successifs et le débit maximal du Chari à N'Djaména	197
1.6. Prévision des crues et des étiages du lac	199
2. RECONSTITUTION DES CRUES ET ETIAGES DU LAC	201
2.1. Corrélation Chari - Nil	201
2.2. Méthode de reconstitution	203
2.3. Critique des résultats	205
3. ETUDE STATISTIQUE DES CRUES ET DES ETIAGES.....	207
3.1. Auto-corrélation des niveaux extrêmes annuels du lac	207
3.2. Etude fréquentielle des maximums et minimums du lac	208

3.3. Dates d'apparition des maximums et des minimums annuels	211
3.4. Etudes fréquentielles actualisées	214

Le Petit Tchad des vingt-cinq dernières années 217

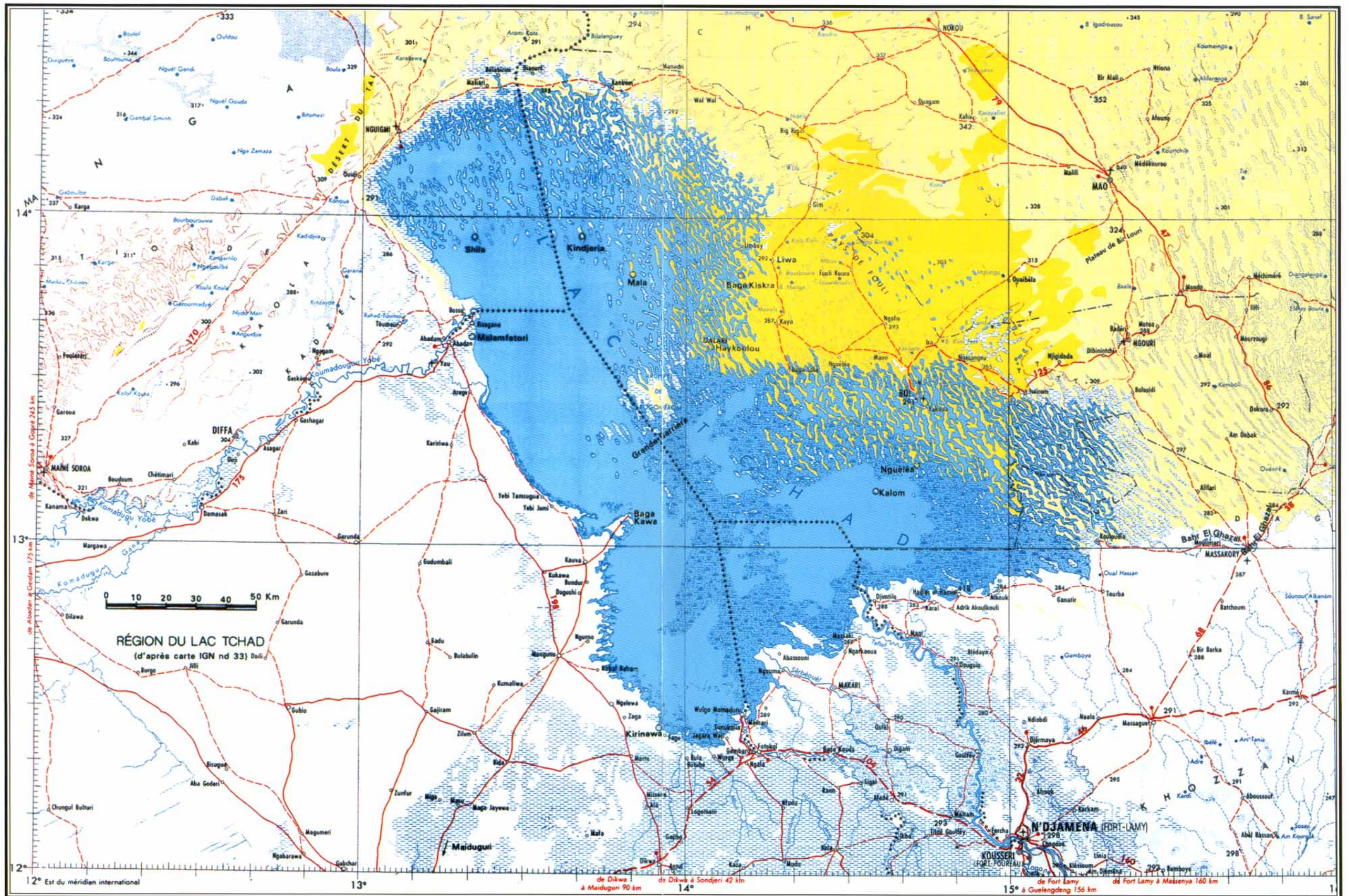
Chapitre 9

1. EVOLUTION RECENTE DU LAC TCHAD	217
1.1. La sécheresse des années 1970	217
1.1.1. La sécheresse de 1968 à 1973.....	217
1.1.2. La situation de 1974 à 1979	219
1.2. Persistance de la sécheresse dans les années 80	221
1.3. Le début des années 1990	222
2. LE PETIT TCHAD ET LA TELEDETECTION	223
2.1. Les surfaces en eau du Petit Tchad	224
2.1.1. La cuvette sud	224
2.1.2. La cuvette nord	225
2.1.3. Suivi de la crue 1988 - 1989	226
2.1.4. La crue 1994-1995.....	229
2.2. Le fonctionnement hydrologique du Petit Tchad	230
3. LE FLEUVE CHARI ET LE LAC TCHAD	232
3.1. Les débits du Chari	232
3.2. Le contexte déficitaire régional	234
3.2.1. L'évolution récente des précipitations et des écoulements	234
3.2.2. La maladie des basses eaux et l'hypertarissement	234
3.2.3. Evolution de la puissance des maximums de crue annuels	236
Conclusion	239
Le lac Tchad est-il appelé à disparaître ?	239
Références bibliographiques	247
Table des matières	261

Planches photographiques hors-texte

planches 1 à 8	entre les pages 81 et 83
planches 9 à 16	après la page 243

ORSTOM éditions
Traitement numérique des planches photos : imprimerie Bondy
Dépôt légal : décembre 1996



RÉGION DU LAC TCHAD
(d'après carte IGN nd 33) D'ouli



12° Est du méridien international 13° 14° 15°

de Maiduguri à Ghat 265 km
de Abouakou à Ghat 175 km
de Dikwa à Maiduguri 90 km
de Dikwa à Sondjeri 42 km
de Fort Lamy à Guelgeng 156 km
de Fort Lamy à Massénya 160 km

ORSTOM éditions
213, rue La Fayette
F-75480 Paris Cedex 10

Diffusion
32, avenue Henri Varagnat
F-93143 Bondy Cedex

ISSN : 0335-6906
ISBN : 2-7099-1353-4

Photographie de couverture :
Pêcheurs dans la cuvette sud du lac Tchad.
Cliché : Christian LÉVÉQUE