

**Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours
d'une période de sécheresse (1973-1989)**

par J. LEMOALLE

novembre 1989

Référence

Lemoalle J., 1989 - Le fonctionnement hydrologique du Lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). Rapports ORSTOM Montpellier 89-03, 27 p., multigr.

Du fait de sa situation dans un bassin endoréique, le niveau du lac Tchad dépend étroitement du climat et des précipitations sur son bassin versant. Des variations de niveau de quelques mètres seraient sans grandes conséquences pour un lac profond comme le sont les grands lacs de l'Est africain. Dans le cas du lac Tchad, de grande surface et de faible profondeur, les variations de niveau ont des répercussions considérables en ce qui concerne les surfaces en eau, l'ensemble du fonctionnement écologique et les populations riveraines.

La position géographique du lac en Afrique constitue par ailleurs une raison d'instabilité : situé presque à la limite du déplacement de la zone intertropicale de convergence, il est particulièrement sensible aux variations interannuelles de celle-ci. L'image Météosat du début novembre 1988 (Météorologie Nationale/ORSTOM), où sont bien visibles la cuvette sud du lac et les plaines d'inondation du Chari-Logone est une bonne illustration de la position originale du lac dans une zone climatique peu propice à la pérennité des plans d'eau. Approximativement situé à la même latitude, le Delta Intérieur du Niger, au Mali, présente lui aussi de fortes variations interannuelles (figure 1).

Le lac Tchad "Normal", tel qu'il existait à la fin des années 1960, avait une surface de 19000 km² pour une cote du plan d'eau de 281,5 m (Carmouze *et al.*, 1972 ; 1983) et comportait alors un plan d'eau unique dont les contours sont représentés figure 2.

A la suite d'années successives de sécheresse sur les bassins versants du Chari et du Logone, le lac s'est scindé en compartiments aux comportements hydrologiques différents, avec exondation de hauts fonds dans la Grande Barrière entre Baga Kawa et Baga Sola, et entre les eaux libres du sud-est et les archipels de l'est et du sud-est. Un tel état du lac a été nommé "Petit Tchad" par Tilho (1928) qui l'avait observé au début du siècle.

Etude réalisée avec le concours de UTIS Dakar (données numériques Météosat 1988-89) de CMS/ORSTOM Lannion (images Météosat 1973-89), et du Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM, Montpellier (données hydrologiques du Chari).

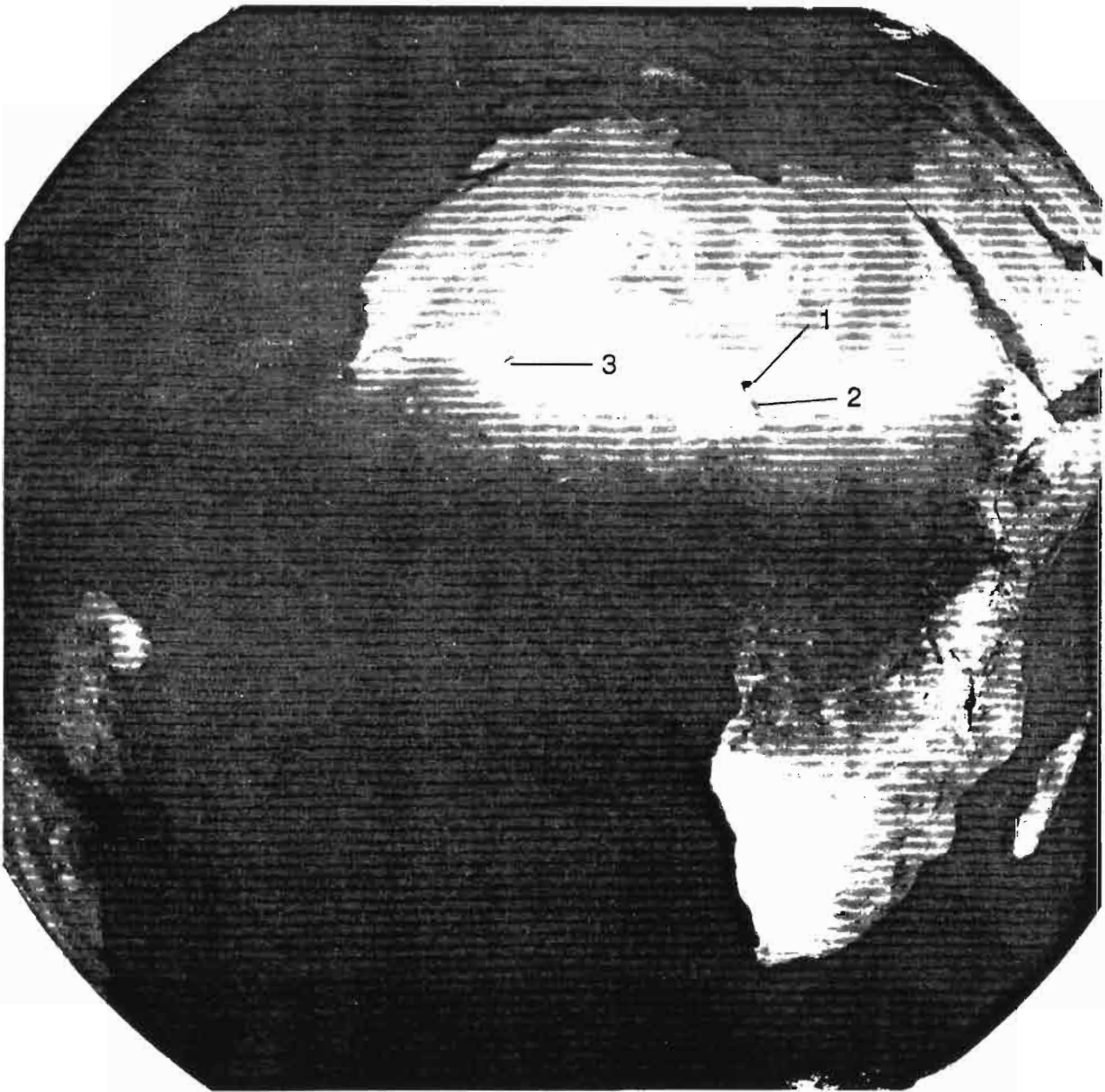


Figure 1 - Le lac Tchad en Afrique (synthèse thermique Météosat du 1-11-1988, d'après ORSTOM/CMS). 1 = cuvette sud du lac, la cuvette nord est sèche et invisible ; 2 = plaine d'inondation du Logone ; 3 = delta intérieur du fleuve Niger.

La description du passage de l'état "Tchad normal" à l'état "Petit Tchad" a été donnée par ailleurs en détail (Chouret *et al.*, 1974 ; Chouret, Lemoalle, 1974, 1975 ; Carmouze, Lemoalle, 1983 ; Lemoalle, 1979 ; Iltis, Lemoalle, 1983). Elle ne sera rappelée que brièvement, l'objet de cette note étant de décrire le fonctionnement hydrologique du lac pour la période de Petit Tchad 1973-1989, notamment en ce qui concerne les niveaux, les surfaces en eau et leur relation avec les apports du Chari au lac.

I. Les paysages et les grandes régions du lac Tchad

En période de Tchad Normal, au sens de Tilho (1928), le lac présente un seul plan d'eau, à une altitude supérieure à 280 m, avec deux grandes cuvettes, sud et nord, séparées par un étranglement. Un archipel, constitué par un erg fossile, s'enfonce progressivement dans le lac à partir du nord-est. L'archipel est prolongé vers l'intérieur du lac par des îles de végétation, appelées îlots-bancs, correspondant à des hauts fonds dunaires colonisés par des phanérogames aquatiques (figure 2). Le Tchad Normal est caractérisé par l'étendue des zones d'eau libre, par l'espace navigable entre les îles des archipels, et par une frange limitée de végétation le long des rives.

Conséquence des variations climatiques, les phases de Tchad Normal sont entrecoupées de phases de bas niveau ; trois phases de Petit Tchad sont intervenues depuis le début du siècle, la première (1904-1917) ayant été décrite en détail par Tilho (1910). La seconde, vers 1940, n'est documentée que par tradition orale. Le dernier passage à un Petit Tchad a eu lieu en 1973 et, depuis cette date, le lac fonctionne suivant un nouveau régime.

Les paysages actuels du lac Petit Tchad résultent de la topographie et de son histoire récente (figure 2) :

1. Les *zones d'eaux libres* de la cuvette sud correspondent aux régions les plus profondes de cette cuvette, qui n'ont pas été exondées au début de la période de sécheresse. Elles se répartissent en trois masses principales :

- Eaux libres du Sud Est, devant le delta du Chari
- Eaux libres du Sud, dans la partie sud-ouest de la cuvette

- Eaux libres du Sud-Ouest, entre Baga Kawa et Baga Sola, sur le versant méridional de la Grande Barrière.

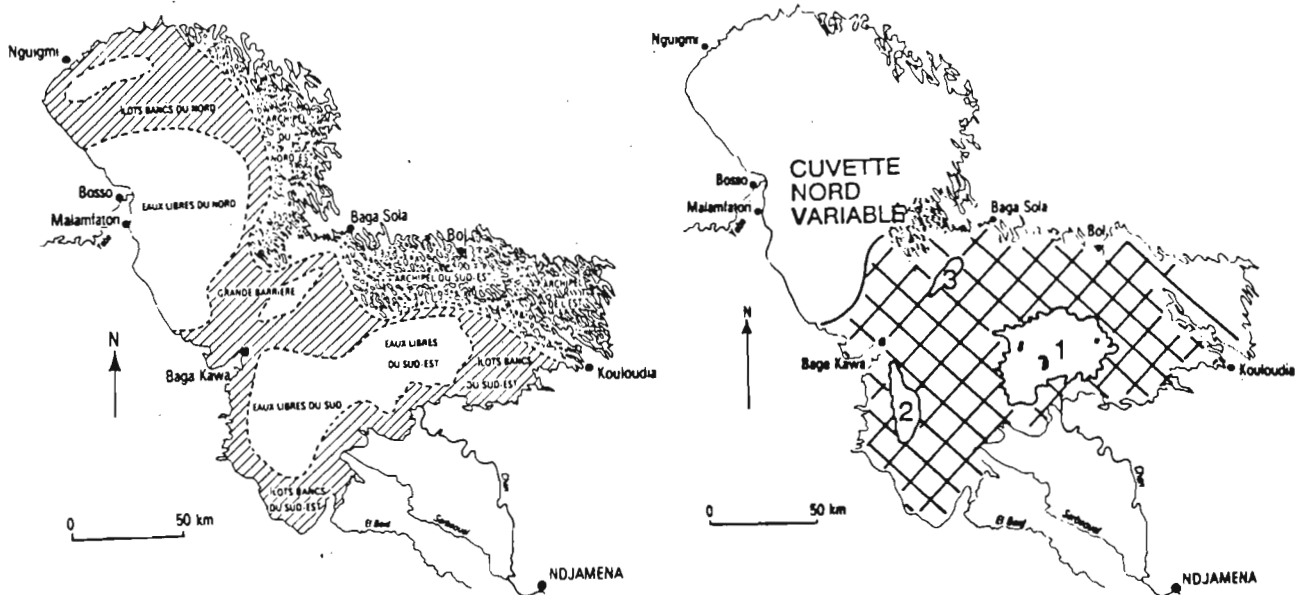


Figure 2 - Les grandes régions du lac Tchad normal (à gauche) et les régions du Petit Tchad (à droite). 1 = Eaux libres du Sud Est ; 2 = Eaux libres du Sud ; 3 = Eaux libres du Sud Ouest. En période de Petit Tchad, quelques zones d'eau libre de la cuvette sud sont entourées de vastes marécages plus ou moins inondés suivant la saison (trame croisée). La cuvette nord subit des remises en eau irrégulières.

2. Les zones couvertes de végétation marécageuse inondées saisonnièrement ou en permanence ; la densité de la végétation ne permet pas de distinguer la présence éventuelle de l'eau. Ces régions ont presque toutes été découvertes à l'étiage, au moins une fois, depuis 1973. Les marécages existent en bordure d'eau libre, dans l'archipel de la cuvette sud, et peuvent se développer dans les zones temporairement inondées de la cuvette nord.

3. Des archipels, qui correspondent au domaine dunaire de la bordure nord-est du lac. Les inters-dunes sont colonisés par les marécages dans la cuvette sud. Dans les deux cuvettes, ils deviennent de plus en plus étroits à mesure que l'on se rapproche des contours traditionnels du lac. Pour le satellite, ils deviennent alors peu perceptibles, qu'ils soient inondés ou non.

4. Des zones très irrégulièrement inondées de la cuvette nord qui présentent, suivant la saison ou l'année, un aspect très différent : végétation palustre, espaces cultivés ou steppe semi-désertique à *Callotropis*.

Ce sont principalement ces zones inondées de la cuvette nord qui présentent la plus forte variabilité, et qui ont été suivies à l'aide des données satellitaires.

Méthodes

Des survols réguliers à basse altitude, au cours de la période 1972-76, ont 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 (eau libre, marécages, terrains exondés) a pu alors être faite sur des données Landsat, basée sur les éléments précis relevés au cours des survols. Il en est résulté des représentations du type des figures 3 et 4 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, Troubat, 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.

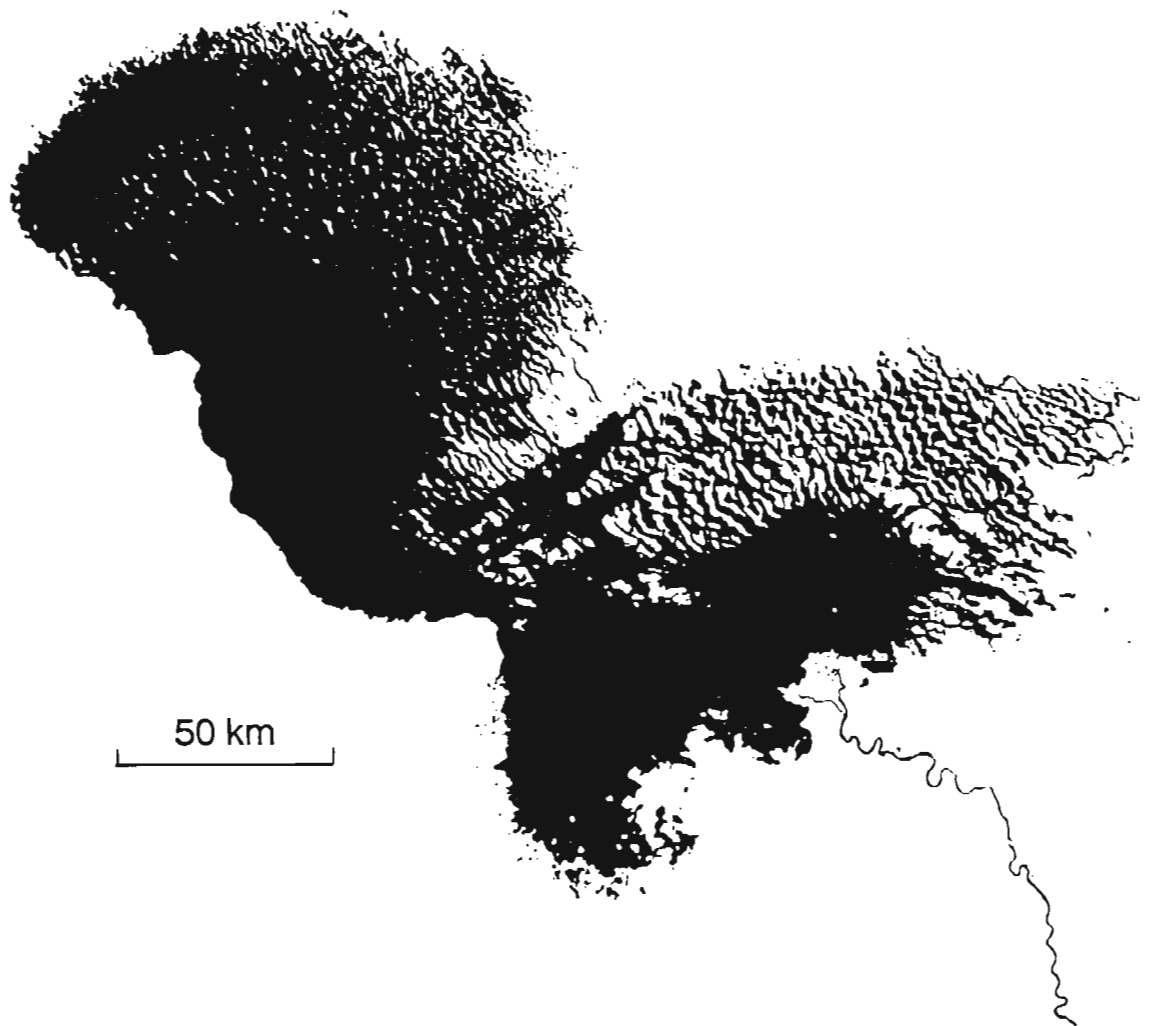


Figure 3 - Les zones en eau (en noir) du lac Tchad en janvier 1973 avant la transition à l'état Petit Tchad (montage J. Lemoalle d'après les données Landsat).

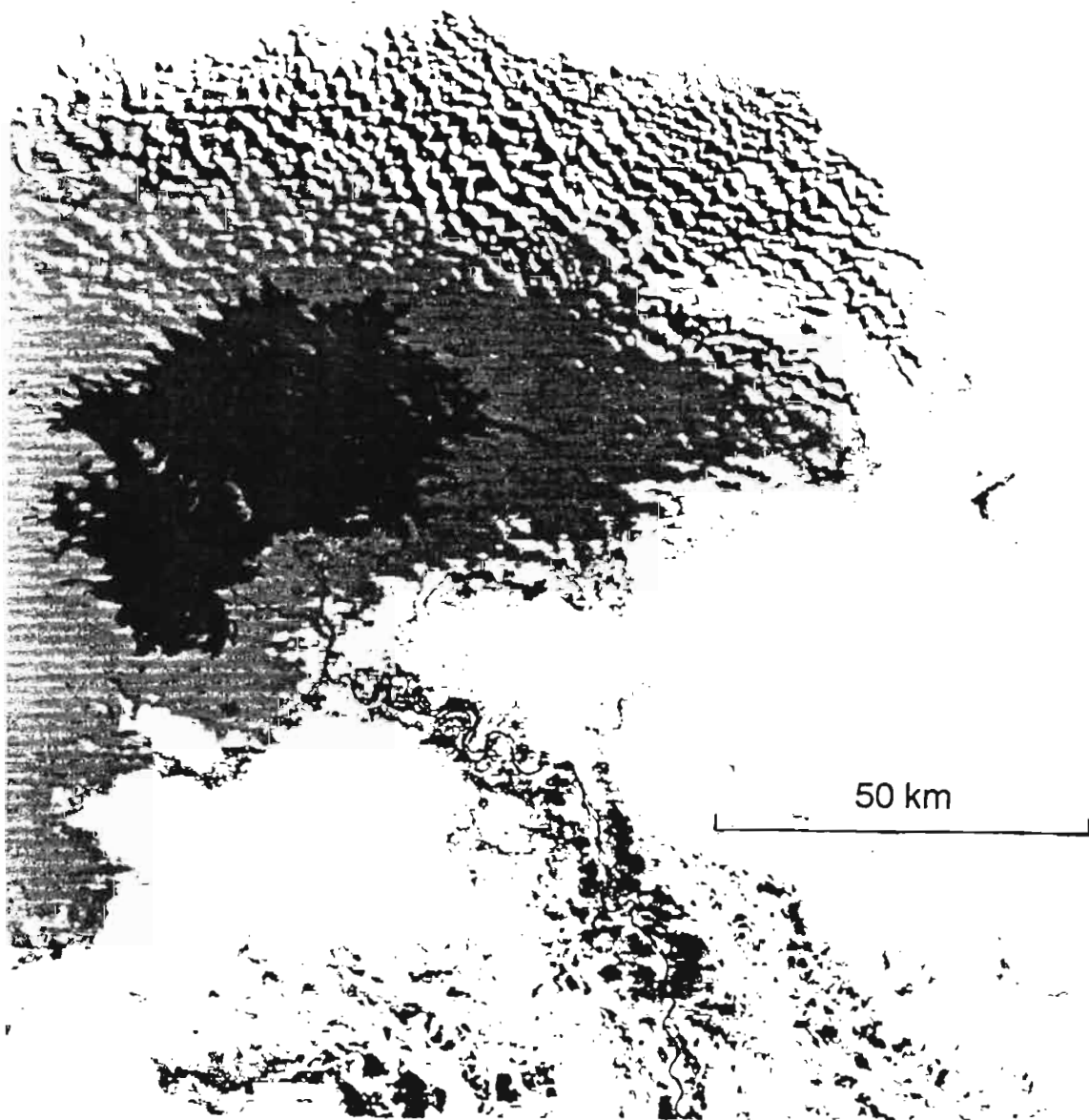


Figure 4 - La cuvette sud du lac en période de Petit Tchad (montage J. Lemoalle d'après les données Landsat du 29 mai 1976). En gris les zones de végétation aquatique, en noir les zones d'eau libre, en blanc les terres émergées à végétation clairsemée.

Résultats

Les niveaux de l'eau

Jusqu'à fin 1972, le limnigraphe installé à Bol est représentatif du niveau général du lac (figure 5). Par la suite, les enregistreurs installés dans les différentes régions du lac rendent compte du passage de l'état Tchad Normal à l'état Petit Tchad (Chouret, 1977). Ce sont les stations de :

Kalom pour les Eaux libres de la cuvette sud

Bol pour l'archipel du sud-est (ou archipel de Bol)

Kindjeria pour la cuvette nord

dont les niveaux évoluent différemment (figure 6).

La crue du Chari, du type tropical pur, présente un seul pic bien marqué dont le maximum se situe vers fin octobre à N'Djaména. Ce pic de crue se retrouve en décembre à Kalom, et environ un mois plus tard à Bol et à Baga Kawa.

En 1972, la crue très faible du Chari n'a pas sensiblement interrompu la baisse du niveau résultant du déséquilibre entre l'évaporation et les apports : le lac s'est scindé en 3 parties en mars 1973, avec l'exondation des seuils isolant l'archipel du sud-est et la cuvette nord. En juillet 1973, la végétation s'est développée sur tous les sédiments exondés, et la crue du Chari a d'abord rempli la région des eaux libres de la cuvette sud, puis l'archipel de Bol. Le niveau atteint n'a pas permis un passage notable d'eau vers la cuvette nord à travers la Grande barrière (figure 6). La Grande Barrière constitue alors un double obstacle. Il y a d'une part le seuil lui-même, constitué par la topographie des fonds (qui s'est légèrement modifiée par la dessiccation des sédiments) mais il y a également toute la végétation, dense, qui s'oppose au passage de l'eau sur une profondeur de 50 km.

Cette végétation est essentiellement constituée de *Cyperus papyrus*, *Aeschynomene elaphroxylon*, *Vossia cuspidata*, *Ipomea aquatica*, *Vallisneria*, *Pistia*...

La crue du Chari de 1974 est arrivée, dans la cuvette sud, dans un environnement semblable à celui de juillet-août 1973. Il y a eu d'abord remplissage de la cuvette sud (zone des eaux libres) puis de l'archipel de Bol. Mais cette nouvelle crue, supérieure à la précédente, a fourni en trop-plein un faible volume d'eau à travers la Grande Barrière à la cuvette nord. Celle-ci insuffisamment alimentée, s'est complètement asséchée vers juillet 1975.

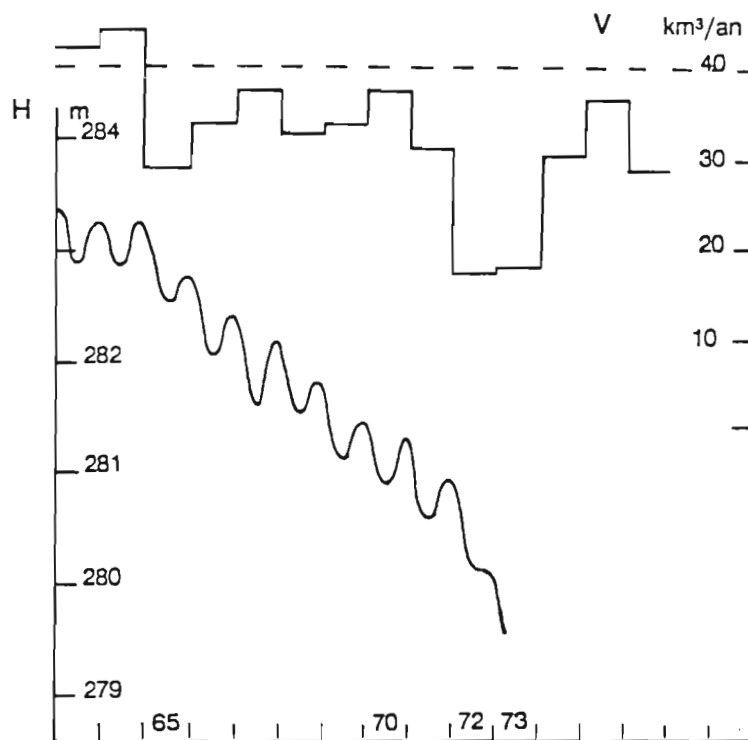


Figure 5 - Evolution du niveau du lac Tchad et modules annuels du Chari à N'Djaména. Le lac présente un plan d'eau unique jusqu'à avril 1973 (d'après les données Hydrologie ORSTOM).

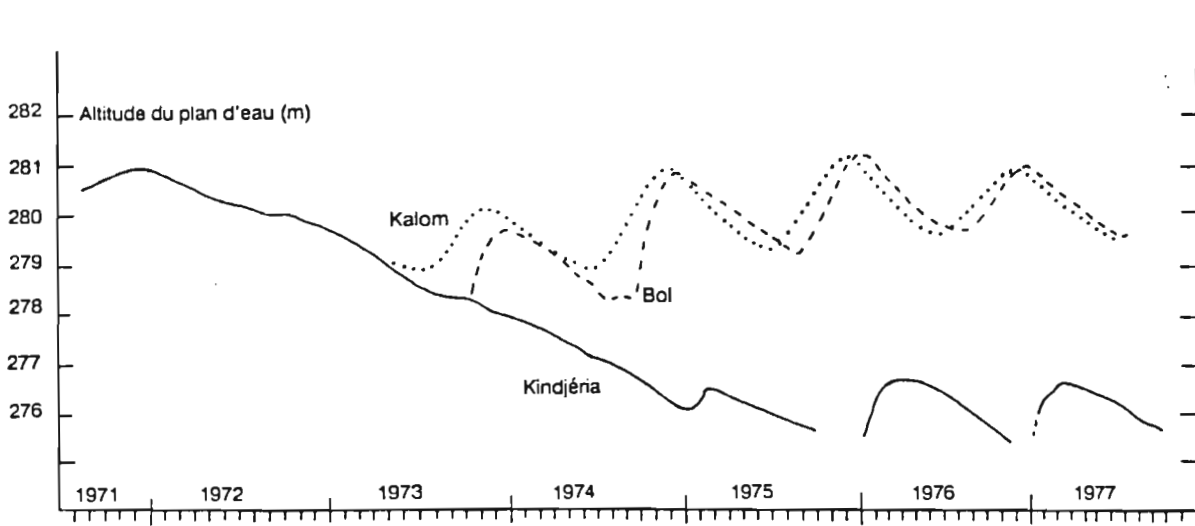


Figure 6 - Evolution des niveaux de l'eau en période de Petit Tchad où 3 plans d'eau principaux évoluent séparément à partir d'avril 1973 : la cuvette nord (Kindjéria), les eaux libres de la cuvette nord (Kalom) et l'archipel de Bol (Bol). D'après Chouret 1977.

Ce schéma de fonctionnement pour 1974-75 est celui du Petit Tchad ; il s'est reproduit les années suivantes ; nous y reviendrons plus loin.

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).

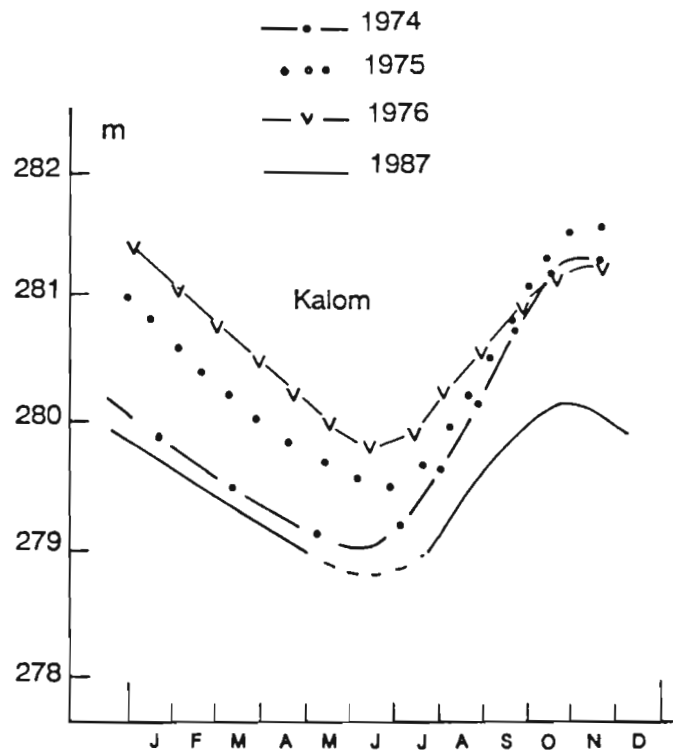


Figure 7 - Niveau des eaux libres de la cuvette sud en période de Petit Tchad. Que les apports soient extrêmement déficitaires (1986-87) ou proches de la normale (1976), le cycle annuel est relativement peu modifié.

Les faibles crues du Chari de 1986 et 1987, se sont traduites par des crues lacustres particulièrement faibles en décembre 1986 et décembre 1987 (comm. pers. DRE Tchad) (figure 7). 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.

Les surfaces en eau

A. 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 représenté figure 4.

B. Cuvette nord

La totalité des informations disponibles (observations par survol aérien, données Landsat, mais surtout images Météosat) a été utilisée dans la figure 8 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 et 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.

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, Troubat, 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 km/jour. 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 km² par jour entre le 11 novembre et le 22 décembre. La surface inondée maximale atteinte est de 3375 km². La figure 9 rend compte plus en détail de la cinétique de l'inondation.

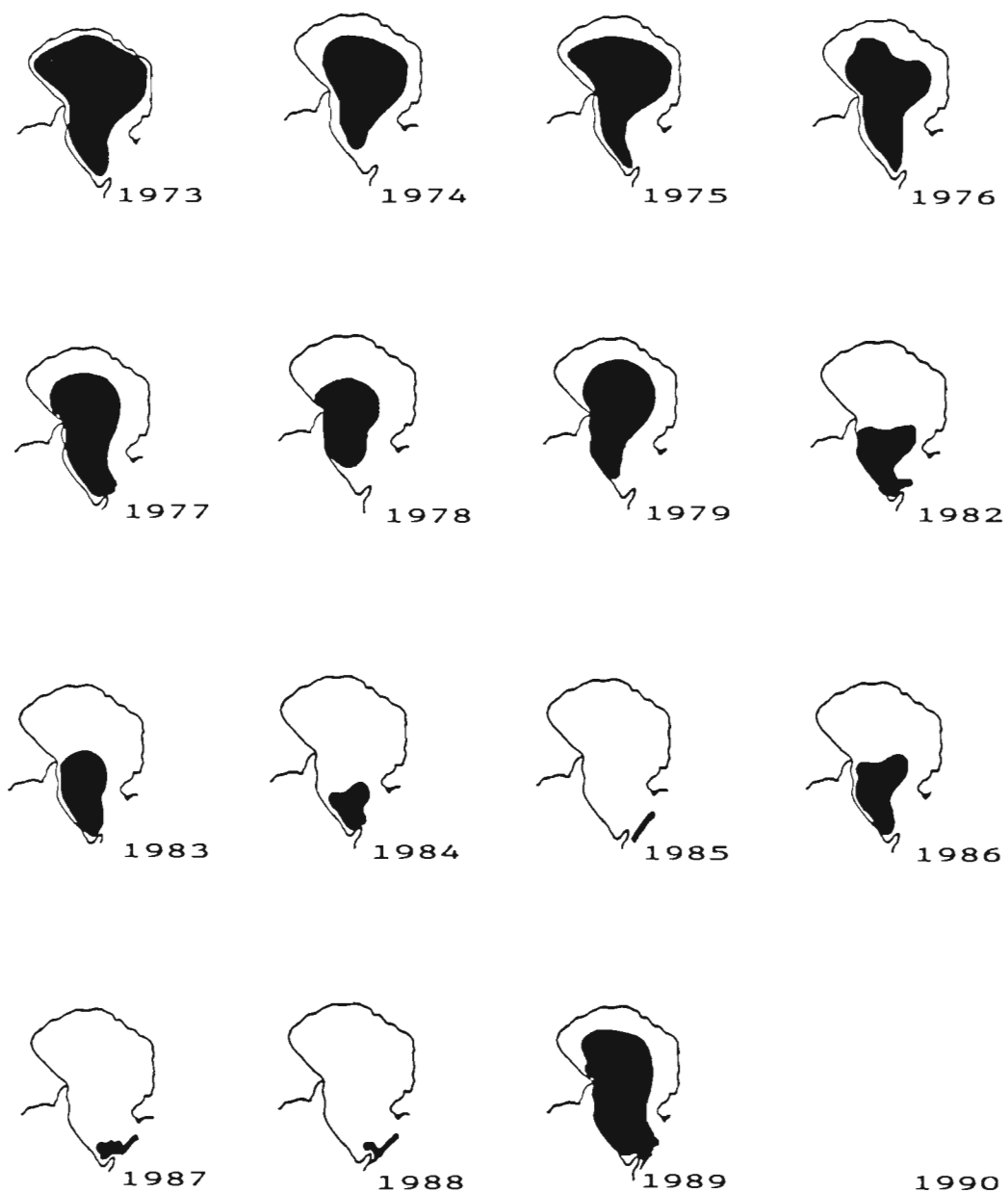


Figure 8 - Les surfaces inondées de la cuvette nord à la fin de janvier (approximativement le maximum de l'inondation) de chaque année. Voir le tableau I pour l'origine des données.

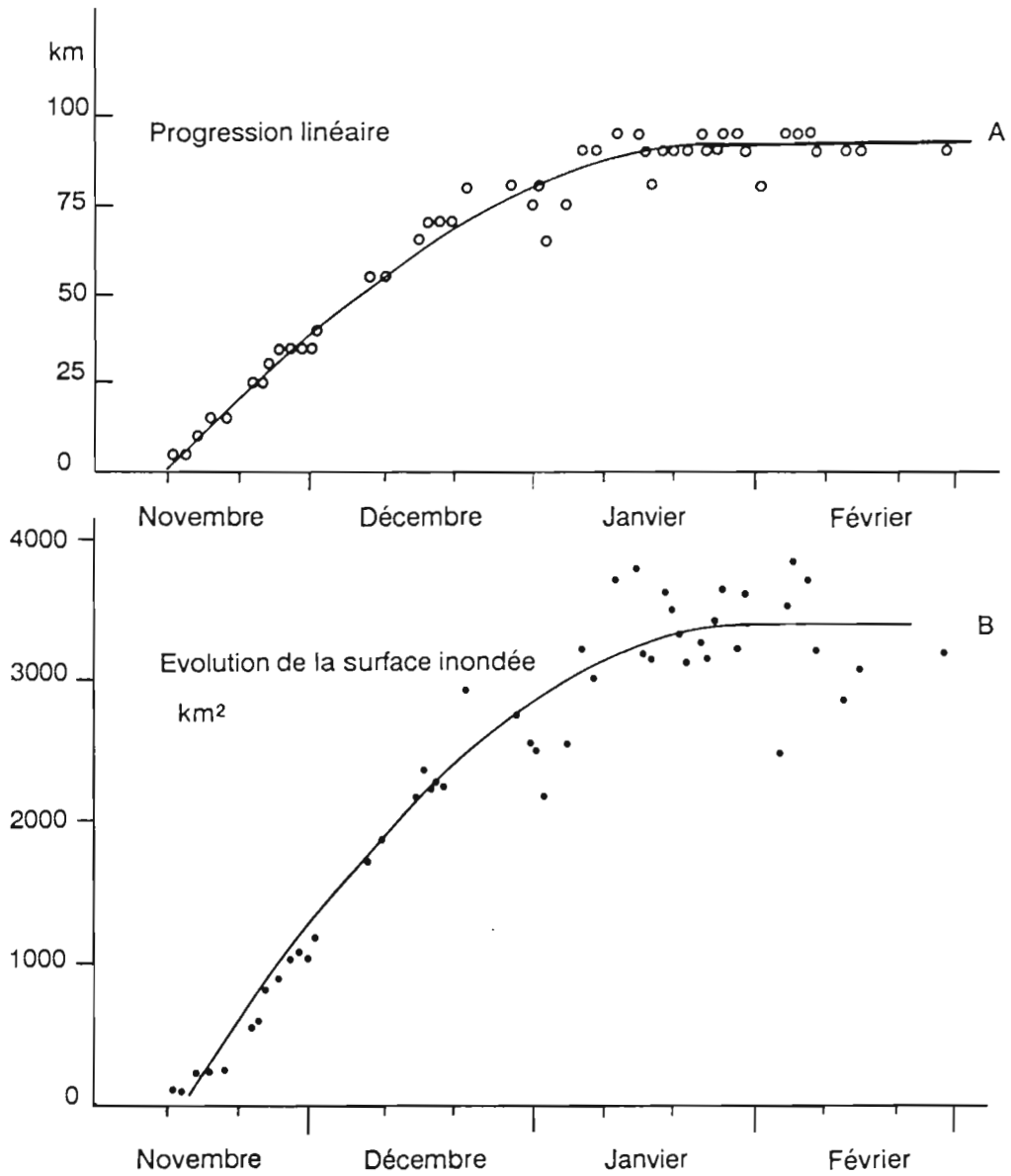


Figure 9 - Progression en distance (A) et en surface (B) de l'inondation de la cuvette nord entre novembre 1988 et février 1989. Analyse des données Météosat (d'après Lemoalle, Troubat 1989). Chaque point correspond à une scène.

Schéma du fonctionnement

La morphologie du lac

Les diverses observations effectuées par les hydrologues et hydrobiologistes de l'ORSTOM sur les niveaux et les surfaces en eau (Chouret, 1977 ; Lemoalle, 1978) permettent de définir les différents bassins du lac et leur topographie.

Trois bassins peuvent être individualisés (figure 10a) :

- la cuvette des eaux libres du sud et du sud-ouest
- l'archipel de la cuvette sud
- la cuvette nord

Ces bassins sont séparés par des seuils :

- les îlots bancs de la cuvette sud
- la Grande Barrière

Schématiquement, ces régions correspondent à une coupe transversale du fonctionnement hydrologique du lac (figure 10b).

Le premier bassin alimenté est celui des Eaux Libres de la cuvette sud dont le fond est à 278,2 m.

Le seuil, vers 279,3 m, qui isole l'archipel de Bol est le plus souvent submergé, sauf lors d'années particulièrement déficitaires.

La Grande Barrière a une altitude de 279,3 m également, mais l'eau ne la traverse de façon sensible que lorsque son niveau dans la cuvette sud est de 280,5 m, ce qui représente son niveau fonctionnel pour la période 1975-89. La végétation de la Grande Barrière constitue donc l'équivalent d'un seuil de plus d'un mètre.

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

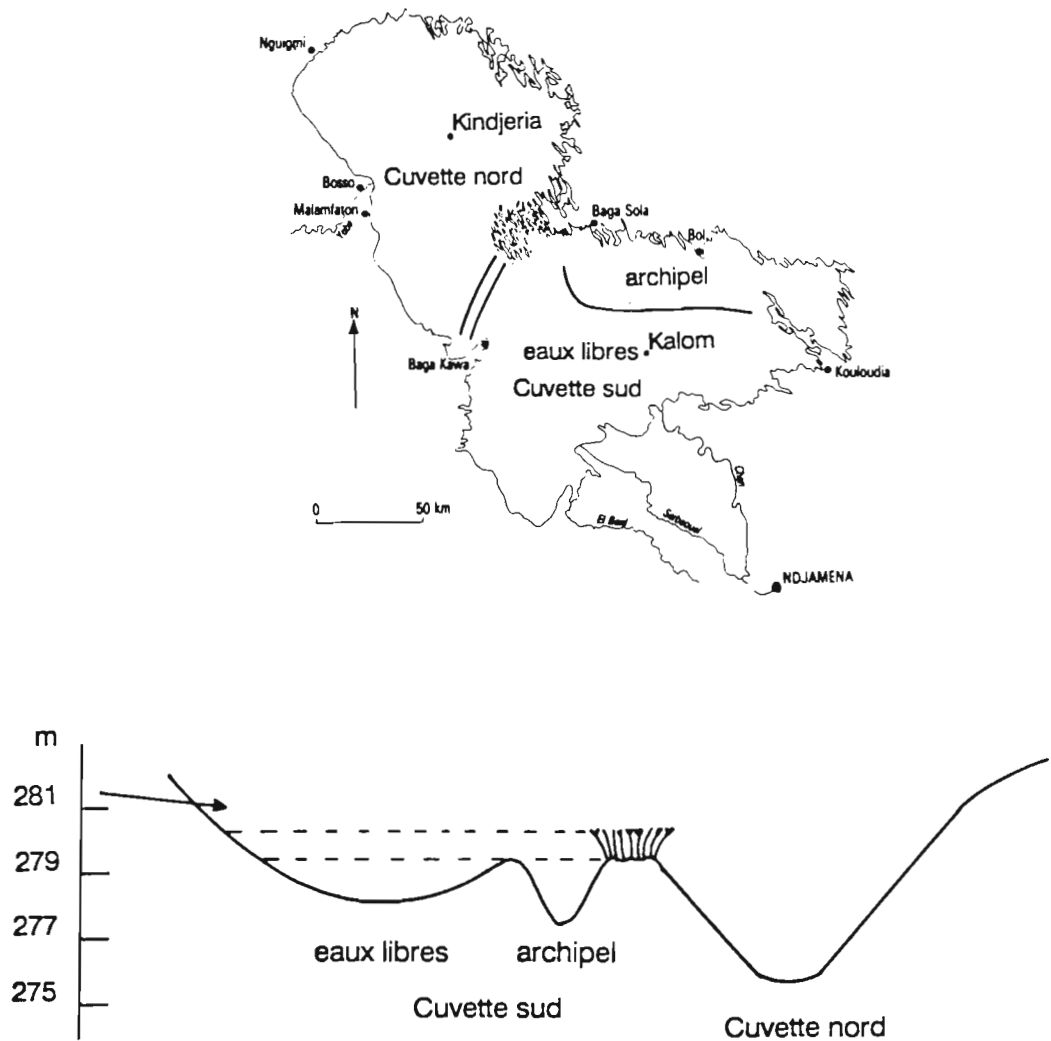


Figure 10 - a) Représentation schématique des seuils et des bassins du lac en période de Petit Tchad, avec la situation des trois limnigraphes. b) Coupe schématique S.E. - N.W. expliquant le fonctionnement hydrologique du lac, avec l'effet de seuil dû à la végétation dans la Grande Barrière.

Le fonctionnement hydrologique

L'évolution interannuelle du lac dépend du bilan entre les apports (fleuves, pluies) et les pertes (évaporation, infiltrations). Dans ce bilan, les apports du Chari représentent 83 % des apports totaux (Toucheboeuf de Lussigny, 1969). En première approximation, les apports annuels du Chari mesurés à NDjamena peuvent donc être considérés comme un bon indicateur des apports totaux. La relation entre ces apports du Chari et les différentes situations lacustres est examinée ci-dessous.

a) Lac Tchad Normal

A partir des données existantes (Hydrologie ORSTOM), la relation entre les variations interannuelles du niveau du lac et les apports annuels du Chari (figure 11) permet d'estimer à $42 \pm 2 \text{ km}^3$ un apport annuel d'équilibre moyen. La valeur exacte est évidemment fonction du niveau moyen du lac dont dépendent les pertes par évaporation et infiltration.

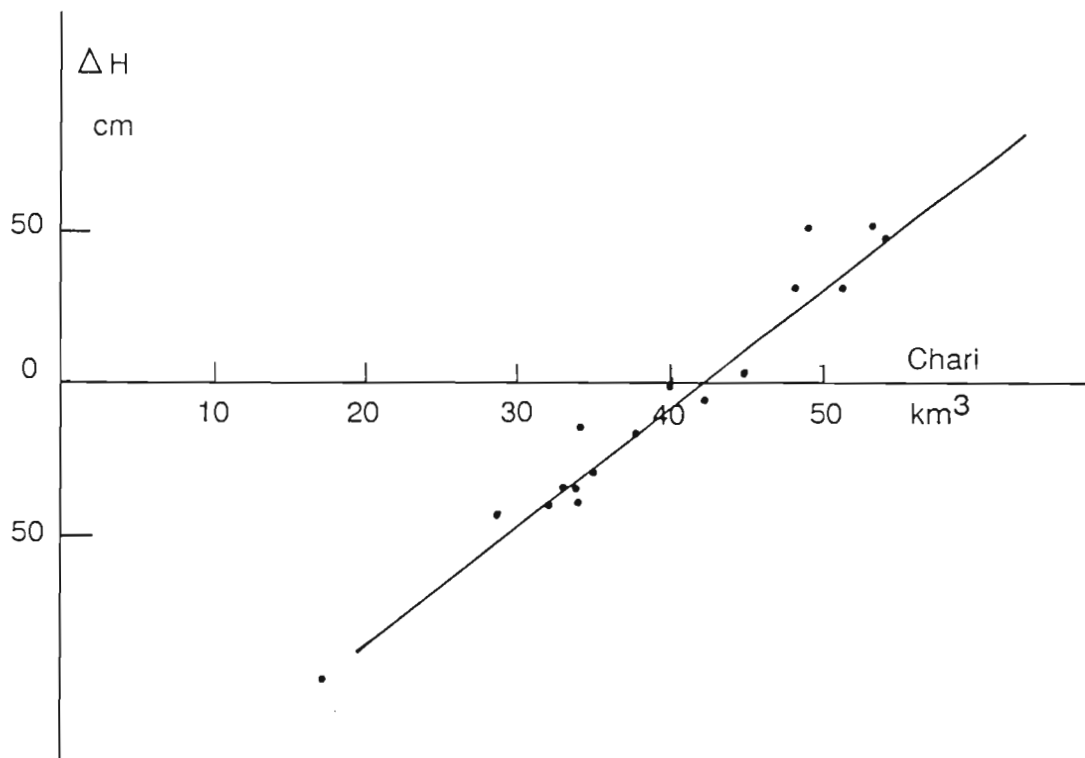


Figure 11 - Variations interannuelles du niveau en période de Tchad Normal en fonction du module annuel de la crue du Chari. Le volume d'équilibre est de l'ordre de 42 km^3 pour la période 1953-73.

b) 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 ($9,4 \text{ km}^3$ en 1987-88 par exemple) et une année proche de la normale ($36,9 \text{ km}^3$ en 1975-76) étant de l'ordre de 1 m (figure 7).

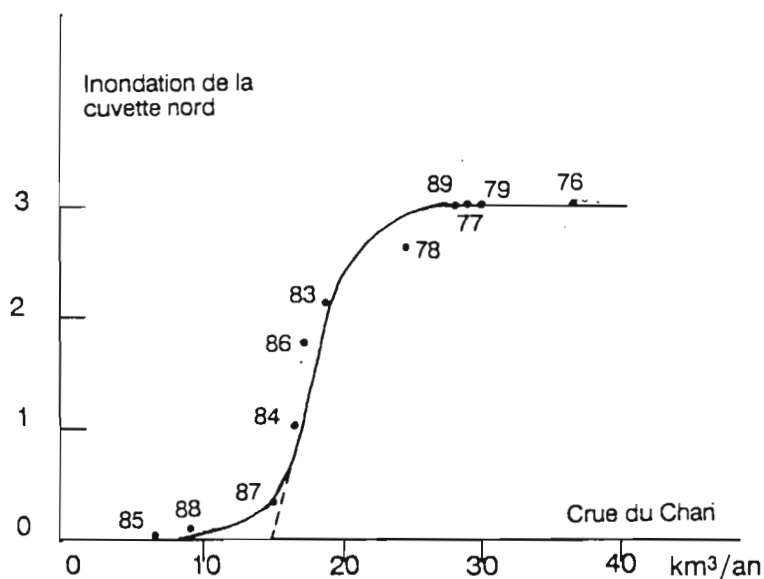


Figure 12 - Importance de l'inondation de la cuvette nord (suivant des unités arbitraires) en fonction du module annuel du Chari au cours de la période de Petit Tchad. Chaque point correspond à l'année indiquée.

L'inondation de la cuvette nord en fin janvier de chaque année (extension maximale annuelle) (figure 8) 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 représentée par une courbe sigmoïde (figure 12) où :

- le module nécessaire à un cycle annuel normal de la cuvette sud seule, sans débordement, est de 15 km^3
- le module permettant une inondation complète de la cuvette nord est de 28 km^3
- un apport compris entre 15 et 28 km^3 se traduit par une inondation partielle de la cuvette nord.

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.

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 20000 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 dans cette étude, les surfaces de marécages n'ont pas une évaporation sensiblement différente de surfaces équivalentes d'eau libre.

Tableau I : Débits annuels du Chari à NDjamena (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
1972-73	17,2		Landsat et survols
73-74	18,9		Survols personnels
74-75	30,8		Landsat et survols personnels
75-76	36,9	3	Landsat et survols personnels
76-77	29,4	3	Survol Chouret
77-78	24,9	2+	Météosat
78-79	30,1	3+	Météosat
79-80	19,7	-	Pas de données
80-81	-	-	Pas de données
81-82	-	2	Météosat
82-83	(20)	2+	Météosat
83-84	16,8	1	Météosat
84-85	6,7	0	Météosat
85-86	17,1	2	Météosat
86-87	15,3	0	Météosat
87-88	9,4	0	Météosat
88-89	28,4	3	Météosat
89-90			

Conclusion

Les données satellitaires peuvent être mises à profit pour suivre les surfaces en eau du lac ; Landsat et Météosat ont été utilisés ici, avec chacun leurs avantages, résolution spatiale et spectrale pour Landsat, répétitivité et temps quasi-réel pour Météosat. Les Nimbus-NOAA ont également prouvé leur utilité (Rigal, 1989). Météosat et Nimbus peuvent être valablement utilisés pour suivre en temps réel les phénomènes rapides d'inondation (Delta intérieur du Niger, plaines d'inondation du Chari-Logone) notamment à partir des stations de réception africaines (Dakar,

Niamey pour le Sahel) et rendre possible une meilleure prévision et gestion des ressources en eau.

En ce qui concerne le lac Tchad, les relations qui ont été décrites plus haut sont basées sur le module annuel du Chari à NDjamena pour l'année hydrologique qui va du 1er mai au 31 avril de l'année civile suivante. Il est en général possible d'estimer ce module annuel dès le pic de la crue à NDjaména en novembre.

En période de Tchad Normal, on peut donc, à partir de cette estimation de crue du Chari à NDjaména en novembre d'une année, estimer les variations de niveau du lac pour l'année suivante.

En période de Petit Tchad, la même estimation de crue du Chari faite en novembre permet de prévoir l'inondation de la cuvette nord du lac en décembre et janvier suivant. Cette information est importante pour tous les cultivateurs qui ont pris l'habitude de s'installer dans les bas-fonds de la cuvette nord, d'autant plus que la propagation de l'inondation peut être rapide (1,8 km par jour en décembre 1988-janvier 1989) :

module annuel $< 15 \text{ km}^3$: pas d'inondation de la cuvette nord
 module annuel autour de 18 km^3 : inondation jusqu'à la latitude de Boso.
 module annuel $> 28 \text{ km}^3$: inondation possible de toute la cuvette.

A plus long terme, le retour à un état Tchad Normal nécessite une hydraulicité relativement exceptionnelle, où la crue du Chari serait sensiblement renforcée par des pluies directes sur le lac lui-même. Pour obtenir un plan d'eau unique en janvier (pic de crue lacustre) les courbes surfaces-volumes permettent d'estimer qu'il faudrait une crue du Chari de l'ordre de 52 km^3 , équivalente à celle de 1955-56, 1961-62 ou 1962-63. Mais ce plan d'eau unique ne serait alors que de faible durée. Pour obtenir un plan d'eau unique persistant toute l'année, qui est la caractéristique d'un Tchad Normal, (cote $> 280,8$ en janvier), deux crues importantes successives du Chari seraient nécessaires. Une telle remise en eau s'est déjà produite à deux reprises depuis le début du siècle et reste toujours possible.

Dans l'état actuel de Petit Tchad, l'environnement et donc le fonctionnement écologique global du système est extrêmement variable. Cette variabilité ne s'applique cependant pas également aux deux cuvettes sud et nord. La cuvette sud, constituée de zones d'eaux libres et de vastes marécages, suit un cycle annuel

relativement reproductible depuis 1973, avec un niveau moyen et des surfaces (eaux libres et marécages) stables. Les trop-pleins de la cuvette sud, quand ils existent, inondent plus ou moins la cuvette nord, et pour des durées variables. C'est dans cette cuvette nord que se trouve reportée la variabilité classiquement associée à l'ensemble du lac.

Références

Carmouze (J.P.), Dejoux (C.), Durand (J.R.), Gras (R.), Ittis (A.), Lauzanne (L.), Lemoalle (J.), Lévêque (C.), Loubens (G.) et Saint-Jean (L.), 1972 - Grandes zones écologiques du lac Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol. 6, 2 : 103-169.

Carmouze (J.P.), Durand (J.R.) et Lévêque (C.), 1983 - Lake Chad, Monog. Biologicae vol. 53, Junk, The Hague, 575 p.

Carmouze (J.P.), Lemoalle (J.), 1983 - The lacustrine environment. pp. 27-64 in Lake Chad, Carmouze J.P., Durand J.R. et Lévêque C. (eds), Monog. Biologicae vol. 53, Junk, The Hague, 575 p.

Chouret (A.), 1977 - La persistance des effets de la sécheresse sur le lac Tchad. ORSTOM, Centre de NDjamena, 10 p.

Chouret (A.), Franc (J.), Lemoalle (J.), 1974 - Evolution hydrologique du lac Tchad de juillet à décembre 1973. ORSTOM, Centre de NDjamena, 9 p.

Chouret (A.), Lemoalle (J.), 1974 - Evolution hydrologique du lac Tchad durant la sécheresse 1972-74. ORSTOM, Centre de NDjamena, 12 p.

Chouret (A.), Lemoalle (J.), 1975 - Evolution hydrologique du lac Tchad (juillet 1974-octobre 1975). ORSTOM, Centre de NDjamena, 11 p.

Citeau (J.), Demarcq (H.), Mahé (G.) et Franc (J.), 1988 - Une nouvelle station est née. Veille Climatique Satellitaire (ORSTOM ed.) 25 : 23-30.

Ittis (A.), Lemoalle (J.), 1983 - The aquatic vegetation of Lake Chad, pp. 125-143 in Lake Chad, Carmouze J.P., Durand J.R. et Lévêque C. (eds), Monog. Biologicae vol. 53, Junk, The Hague, 575 p.

Lemoalle (J.), 1978 - Application des images Landsat à la courbe bathymétrique du lac Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol. 12, 1 : 83-87.

Lemoalle (J.), 1979 - Biomasse et production phytoplanctoniques du lac Tchad (1968-1976). Relation avec les conditions de milieu. ORSTOM, Paris, 287 p.

Lemoalle (J.), Troubat (J.J.), 1989 - Application des données satellitaires à l'hydrologie du lac Tchad : année 1988-89. Rapports ORSTOM, Montpellier 89-02, XX p., multigr.

Rigal (D.), 1989 - Crue et décrue au lac Tchad. Veille climatique satellitaire, ORSTOM/CMS, 27 : 71-76.

Tilho (J.), 1910 - Documents scientifiques de la mission Tilho (1906-1909). Imprimerie Nationale, Paris, Tome I : 412 p., Tome II : 598 p.

Tilho (J.), 1928 - Variations et disparition possible du lac Tchad. Ann. Géogr. Fr. 37 : 238-260.

Toucheboeuf de Lussigny (P.), 1969 - Monographie hydrologique du lac Tchad. ORSTOM, Paris, 169 p.

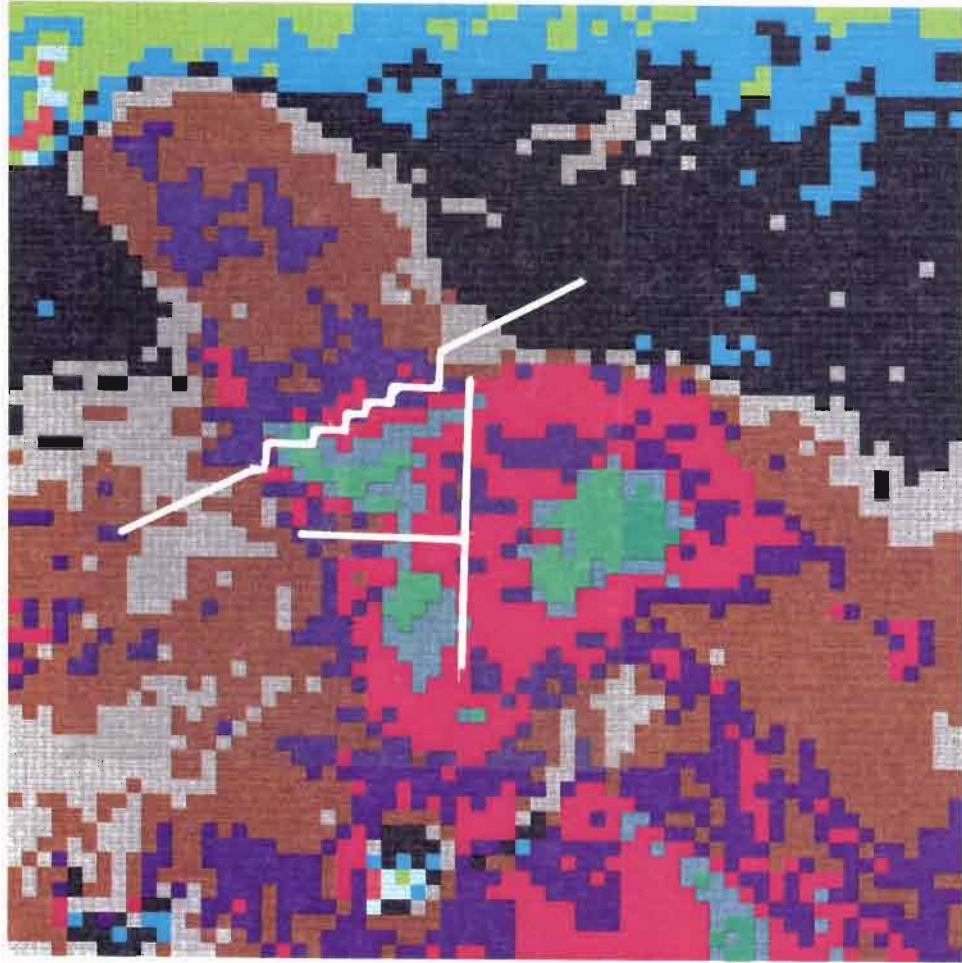
Annexe - Différentes étapes de l'inondation de la cuvette nord au cours de la crue lacustre 1988-89, obtenues par traitement des données Météosat (d'après Lemoalle, Troubat 1989).

- Image du 12 novembre 1988. Les lignes blanches indiquent les limites choisies pour séparer les différentes zones en eau. Les zones en eau libre sont figurées en bleu et vert. On reconnaît aisément les contours approximatifs du lac. L'eau arrive à peine à la limite méridionale de la cuvette nord.

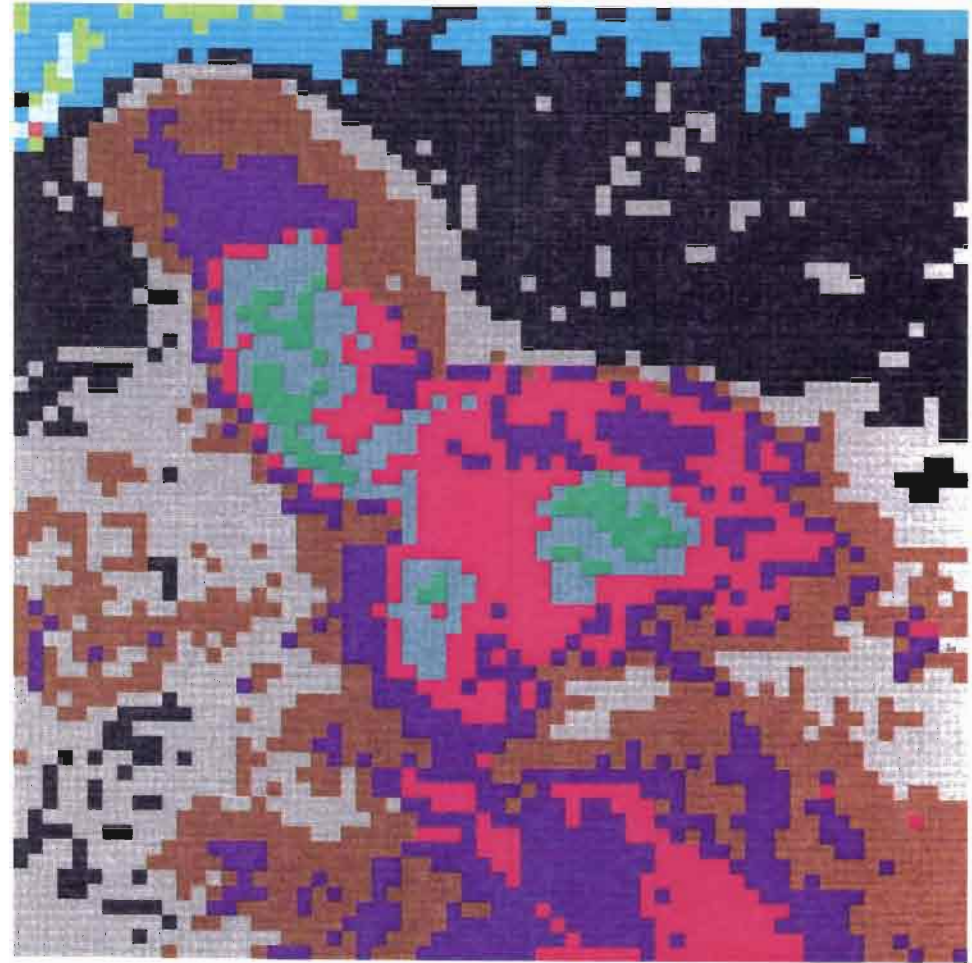
- Image du 17 décembre 1988. L'eau a envahi une portion significative de la cuvette nord. Chaque carré élémentaire de l'image mesure 5 x 5 km.

- Image du 15 janvier 1989. L'eau a atteint son maximum d'extension.

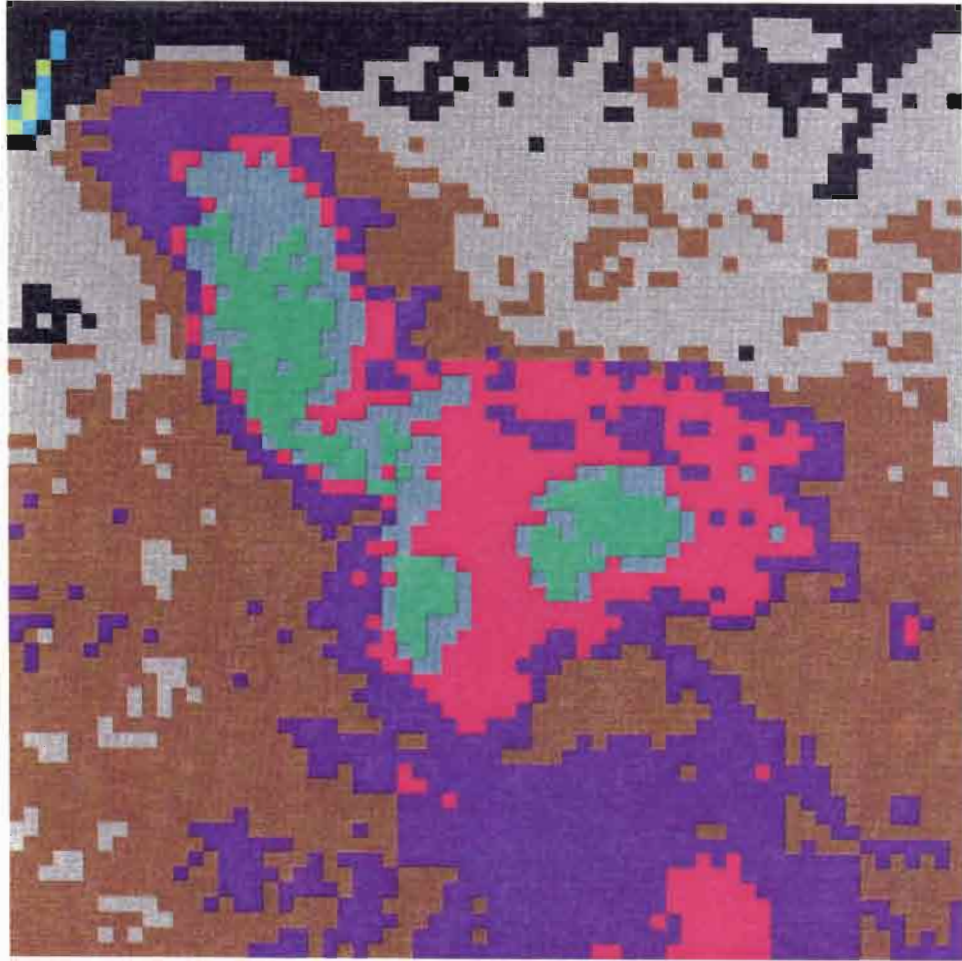
- Image du 13 février 1989. La situation s'est stabilisée. Au total 3400 km² ont été recouverts par l'eau dans la cuvette nord.



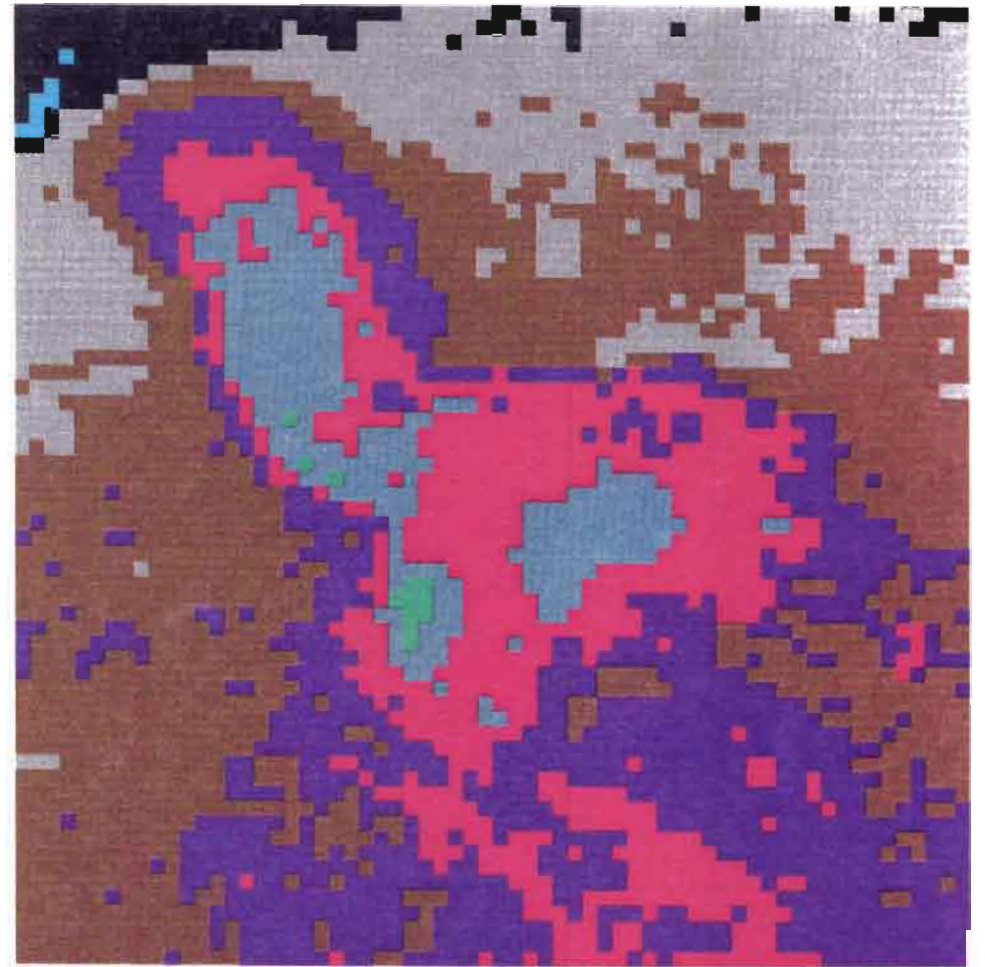
12 novembre 1988



17 décembre 1988



15 janvier 1989



13 février 1989