

Hydrologie et physico-chimie des eaux de la plaine d'inondation du Nord-Cameroun

Vincent BENECH, Jacques QUENSIERE et Guy VIDY
Chargés de recherche à l'ORSTOM, 24, rue Bayard,
75008 Paris

RÉSUMÉ

Sur la rive gauche du Logone, les eaux de crue inondent la plaine nord-camerounaise appelée Grand Yaéré (fig. 1). On aborde ici l'hydrologie et la physico-chimie des eaux du Yaéré et de ses deux drains principaux (El Beïd et Logomatia) pour une meilleure compréhension de l'influence de cette plaine inondée tropicale sur la croissance et les migrations des jeunes poissons. On complète dans ce but les travaux antérieurs par l'exploitation de séries de mesures sur l'El Beïd et le Logomatia, et par l'interprétation de documents de télédétection LANDSAT. Ces données nouvelles concourent à préciser la dynamique de l'inondation du Yaéré et ses modalités en fonction de l'importance de la crue du Logone; elles se résument ainsi :

— Il existe deux voies de pénétration des eaux du Logone dans le Yaéré : un axe nord orienté SE-NW et un axe sud parallèle au précédent, séparé de lui par une bande de hauts fonds passant par Hinalé (fig. 2).

— Le seuil d'inondation de l'axe nord est relativement plus bas et permet une inondation à partir d'un débit de 700 m³/s à Bongor. L'axe sud se remplit plus tardivement lorsque le débit dépasse 1 200 m³/s.

— Le Yaéré est largement inondé lorsque le débit du Logone atteint 1 500 m³/s à Bongor. Au-dessous de ce débit, l'onde de crue n'atteint pas l'El Beïd. La part des débits du Logone supérieure à 1 500 m³/s constitue un bon indice de l'intensité de l'inondation traduite par le volume des écoulements de l'El Beïd.

— Plus la crue est forte, plus les déversements directs augmentent entre le Guerléou et le Logomatia, plus l'étalement de hautes eaux se prolonge au niveau du Logomatia et plus la surface inondée du Yaéré est grande.

— A la décrue, une quantité d'eau relativement fixe de la frange orientale du Yaéré retourne au Logomatia, le reste des eaux d'inondation rejoint le lac Tchad par l'El Beïd dont la décrue est d'autant plus lente que la surface inondée est grande.

— Les eaux de crue s'écoulant par l'El Beïd proviennent d'abord du Logome « directement », par le réseau de drains ; elles sont ensuite relayées par les eaux d'inondation des plaines adjacentes aux axes dépressionnaires.

— Après une crue moyenne, des mares résiduelles subsistent pendant la saison sèche dans la plaine, le lit du Logomatia, de l'El Beïd et de la Kalia.

— Les caractéristiques annuelles de la crue jouent un rôle prépondérant dans l'hydrologie du Yaéré; toutefois, les précipitations locales et la précrue qui en résulte dans l'El Beïd peuvent influencer l'évolution de certains facteurs environnementaux.

ABSTRACT : Hydrology and physical chemistry of the flooded plain waters of northern Cameroons

On the left bank of the Logone, the flood waters cover the plain called Grand Yaéré in the Northern Cameroons (fig. 1). The hydrology and the physico-chemistry of the Yaéré waters and its two main drains (the El Beïd and the Logomatia) are studied here in order to reach a better understanding of the influence of this tropical flooded plain on the growth and migrations of the young fish. For this purpose, the previous works are supplemented with the analysis of successive measurements made on the El Beïd and the Logomatia and with the interpretation of LANDSAT remote sensing documents. These new data contribute to specify the dynamics of the Yaéré flooding and its conditions as influenced by the importance of the Logone flood and can be summed up as follows :

— The Logone waters can enter the Yaéré through a northern axis oriented SE-NW and a southern axis parallel to the previous one and separated from it by a stretch of shallows which passes through Hinalé (fig. 2).

— The flooding limit of the northern axis is rather lower and allows the occurrence of a flooding from a discharge of 700 m³/s at Bongor. The southern axis is flooded later on when the discharge exceeds 1200 m³/s.

— The Yaéré is highly flooded when the Logone discharge reaches 1500 m³/s at Bongor. Below this discharge, the flood wave does not reach the El Beïd. The portion of the Logone discharges which is higher than 1500 m³/s represents a good index of the intensity of the flooding revealed by the volume of the El Beïd flows.

— The higher the flood, the higher the increase in the direct overflows between the Guerleou and the Logomatia, the more the slack of high waters extends at the level of the Logomatia and the larger the flooded zone of the Yaéré is.

— During the recession, a rather stable amount of water in the eastern fringe of the Yaéré returns to the Logomatia, the remaining flooding waters connect with Lake Chad through the El Beïd whose recession is all the slower as the flooded zone is large.

— The flood waters flowing through the El Beïd come «directly» from the Logone through the network of drains; then they are replaced by the flooding waters of the plains bordering the line of the depressions.

— After a mean flood, some residual ponds are still in existence in the plain, the bed of the Logomatia, the El Beïd and the Kalia during the dry season.

— The annual characteristics of the flood play a leading part in the Yaéré hydrology; however, the local precipitations and the resulting pre-flood in the El Beïd can influence the evolution of some environmental factors.

INTRODUCTION

L'hydrologie et la physio-chimie des eaux du Yaéré et de l'El Beïd ont été étudiées dans le cadre de travaux globaux, soit du bassin du Logone (Bouchardeau, 1968), soit du bassin Tchadien tout entier (Touchebeuf, 1969; Roche, 1973; Gac, 1979). Ces auteurs se sont principalement intéressés, dans leurs études du Yaéré, à définir les caractéristiques moyennes et les relations globales avec le reste du réseau hydrographique. L'écologie des peuplements ichtyologiques de la plaine et la compréhension des mouvements migratoires demande à prendre davantage en compte la variabilité interannuelle des composantes hydrologiques et physico-chimiques. C'est essentiellement cette variabilité que nous nous proposons d'aborder ici, à la lumière des travaux précédents, par l'analyse de séries de mesures effectuées sur l'El Beïd et le Logomatia, ainsi que par l'interprétation des documents de télédétection fournis par le satellite LANDSAT.

Dans une première partie, après avoir situé le Yaéré dans le bassin Tchadien par quelques rappels hydrographiques et hydrogéochimiques, nous détaillerons la chronologie des événements qui conduisent à la mise en eau puis à l'assèchement du Yaéré, en mentionnant les différentes modalités que ces événements peuvent revêtir en fonction de la variabilité des crues du Logone.

Au cours d'une seconde partie, l'étude des variations intra et inter-annuelles de certains paramètres physico-chimiques tels que la transparence et la conductivité nous permettront de mieux préciser le mouvement des masses d'eau à l'intérieur de la plaine inondable.

1. HYDROLOGIE

1.1. HYDROGRAPHIE ET BILAN HYDROLOGIQUE DU YAÉRE : RAPPELS

Le Logone pénètre au niveau de Lai dans une vaste plaine sédimentaire sans relief, ancienne cuvette du Paléotchad (Pias, 1969; Servant, 1973). La dégradation du réseau hydrographique est alors systématique : de Lai à Bongor la largeur moyenne du lit varie entre 3 et 9 km. De Katoa à Logone-Gana les berges sont presque totalement estompées; on est alors en présence d'une plaine d'inondation de quelques 70 km de large (fig. 1).

Sur la rive droite, les déversements inondent, entre Logone et Chari, une bande de terrain dont la largeur ne dépasse pas 25 km. Les eaux d'inondation drainées par la N'Gourkoula rejoignent le Logone au niveau de Logone-Gana.

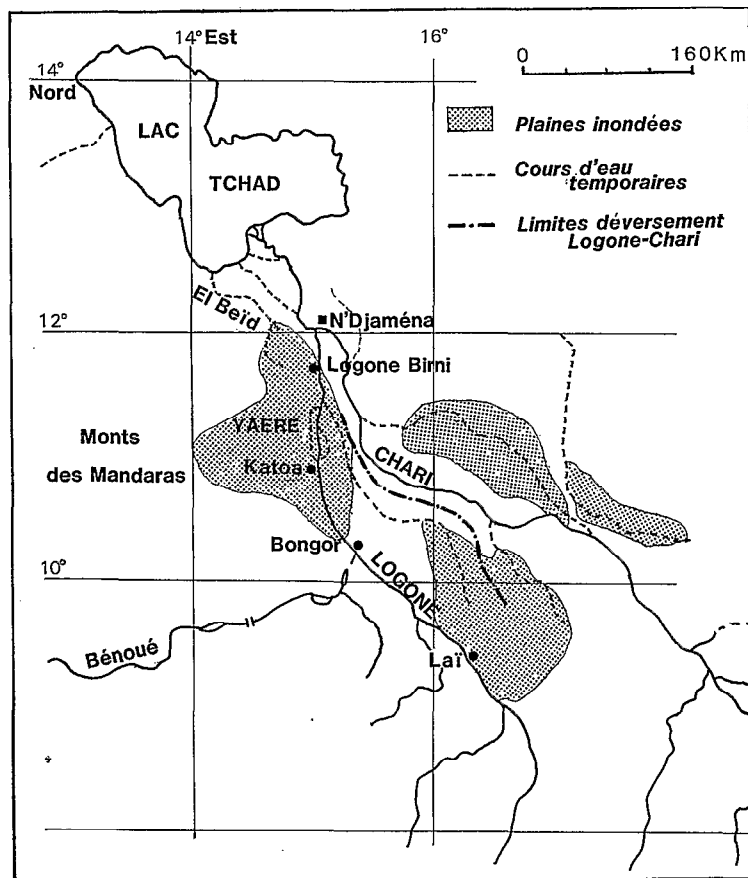


Fig. 1. — Situation géographique du Grand Yaéré

Sur la rive gauche, les eaux de crue inondent la plaine d'inondation du Nord-Cameroun ou Grand Yaéré. D'une superficie maximale de 800 000 hectares, le Grand Yaéré (fig. 2) est délimité au sud-ouest par les contreforts des monts des Mandara, à l'ouest par une route surélevée qui relie Tildé au parc national de Wasa, au nord-est par les bourrelets de berge du Logone qui réapparaissent au niveau de Logone-Birni. A son extrémité nord-ouest cette plaine d'inondation est drainée par l'El Beïd jusqu'au lac Tchad.

Le Yaéré reçoit au sud des petites rivières torrentielles appelées « mayos » qui descendent du massif des Mandara ; leurs lits se dégradent et se perdent dans la plaine.

Les apports du Logone s'effectuent principalement par deux effluents : le Guerléou et le Logomatia (fig. 2).

Au cœur du Yaéré, l'écoulement est très diffus et le réseau hydrographique mal organisé. On observe de nombreux petits bras sinueux, mal calibrés et enchevêtrés qui canalisent plus ou moins l'écoulement et s'estompent souvent avant d'avoir rejoint un affluent plus important (Touchebeuf, 1969). Dans la suite du texte, nous évoquerons ce réseau par le terme général de « réseau de drainage ».

Au cours de la décrue, la marge orientale de la zone inondée restitue une partie des eaux du Logone par l'intermédiaire du Logomatia. Plus en aval un drainage partiel s'effectue directement vers le Logone. L'exutoire principal, l'El Beïd, prend naissance au nord de la plaine ; après un parcours d'une quinzaine de kilomètres, il reçoit en rive gauche son principal affluent, la Kalia. Celle-ci, plus étroite, est issue de deux branches qui prennent naissance à la limite du parc national de Wasa : la Kouloum Douma et la Koutelaha Dourma (fig. 2).

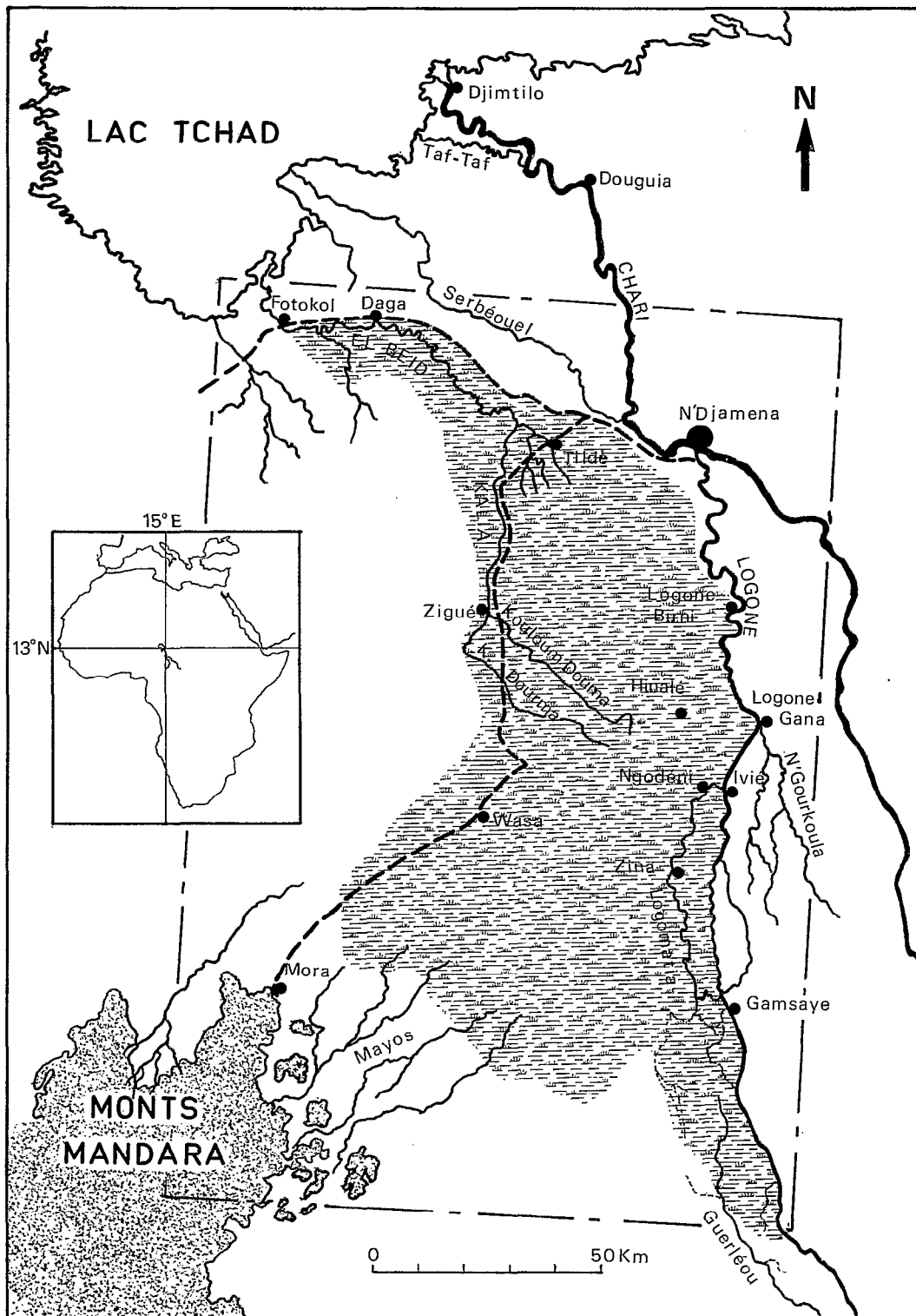


Fig. 2. — Carte de situation du Yaéré et de l'El Beïd

- route sur digue
- repérage de la couverture satellite (cf. fig. 5, 6, 8, 11)
- ▨ zone inondable

D'après les mesures effectuées par les hydrologues de l'ORSTOM (Billon, Carré, Roche, Chouret, ...) en année moyenne $1,15 \times 10^9 \text{ m}^3$ d'eau rejoignent le lac Tchad par l'El Beïd (Gac, 1979). Les eaux de pluie participent à l'écoulement pour $0,13 \times 10^9 \text{ m}^3$. Cette précrue est observée entre août et septembre (fig. 3). Après une baisse de débit fin septembre, la crue proprement dite débute fin octobre début novembre. Son maximum se situe entre la fin novembre et le début décembre. Les apports du Logone prédominent ($1,02 \times 10^9 \text{ m}^3$) et correspondent à un déversement initial de $3,2 \times 10^9 \text{ m}^3$; les deux tiers des eaux d'inondation sont perdues par évaporation et par évapotranspiration. L'étiage est atteint en février.

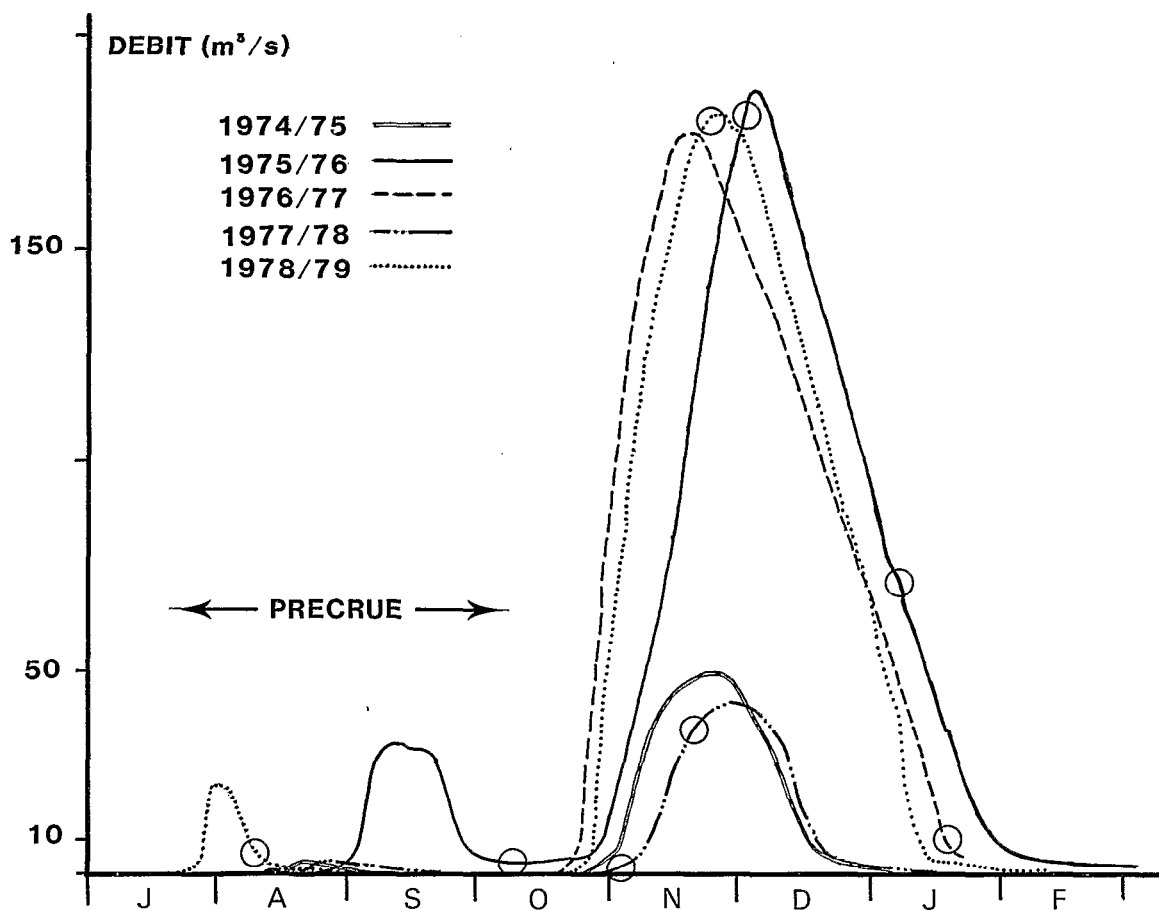


Fig. 3. — Débits de l'El Beïd à Tildé de 1974 à 1978 (données hydrologiques ORSTOM)
○ dates des photos LANDSAT utilisées dans l'étude

Enfin, il convient de rappeler que le Yaéré, à l'instar des autres plaines inondables du bassin, est le siège d'une importante sédimentation des déversements. Lemoalle (1974) a montré, par la mesure des débits en fer du Logone, que, les années de faible crue, on enregistre environ deux fois plus de matière en suspension apportée par le Logone au Chari (102 000 T de fer en 1972-73) que les années où la crue est suffisante pour mettre en eau les plaines latérales du bassin (46 000 t et 51 000 t de fer respectivement en 1970-71 et 1971-72). D'après Gac (1979) le Yaéré reçoit un stock annuel — pour une année hydrologique moyenne — de 870 000 t de minéraux essentiellement argileux et n'en restitue que 27 000 t. La sédimentation concerne 853 000 t soit 97% de la charge solide initiale de l'eau du Logone.

1.2. PRÉCIPITATIONS ET PRÉCRUE DE L'EL BEID

Les pluies, ainsi que l'ensemble du climat, sont régentés par les balancements du front inter-tropical (F.I.T.) qui délimite les masses d'air tropicales continentales (harmattan) et équatoriales océaniques (mousson). La remontée du F.I.T. vers le nord marque le début de la saison des pluies. Celle-ci débute généralement dans le courant du mois d'avril par des précipitations de faible importance. Le maximum des pluies se situe entre juillet et septembre (fig. 4). Le F.I.T. redescend ensuite vers le sud et la saison sèche se réinstalle vers la mi-octobre.

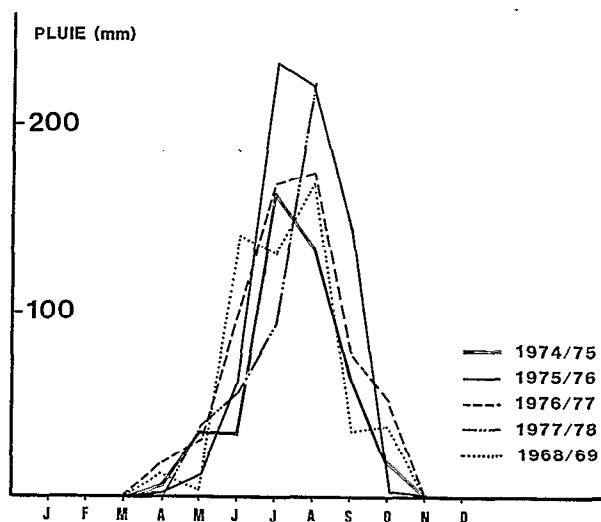


Fig. 4. — Pluviogramme correspondant à la région du Yaéré (moyennes des stations de N'Djaména et Mandélie, d'après les données du service hydrologique de l'ORSTOM)

Les premières pluies sont rapidement absorbées par les argiles gonflantes recouvrant la plaine. Vers le mois de mai le développement de la végétation démarre sur des sols qui sont déjà saturés. Une part importante des précipitations est évapotranspirée, le reste s'accumule dans les dépressions après ruissellement.

Pendant la période de précipitation maximale la plaine subit une première inondation. Le cliché LANDSAT du 8-8-78 permet d'en apprécier l'extension (fig. 5). Cette première inondation n'est pas entièrement évacuée par l'El Beïd, seule la région à l'est de Tildé est drainée par cet exutoire, comme l'indiquent les débits et la composition chimique des eaux (Roche, 1973). Cette précrue, généralement de faible importance ($1 \text{ m}^3/\text{s}$ de débit maximum), peut, certaines années de forte pluviosité, atteindre des débits de 20 à $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Il a même été observé en 1953 (Touchebeuf, 1969) des débits de précrue supérieurs à ceux de la crue.

1.3. DYNAMIQUE DES DÉVERSEMENTS DU LOGONE DANS LE YAÉRÉ

Des observations de terrain effectuées au niveau du Logomatia ainsi que les photos du satellite LANDSAT permettent de préciser le déroulement des débordements du Logone vers le Yaéré.

En juin, le Logomatia ne présente qu'un chapelet de mares résiduelles grossies par les précipitations. La mise en eau du Logomatia s'effectue simultanément par ses deux extrémités (fig. 2). Elle débute assez régulièrement aux environs de la seconde semaine de juillet alors que les débits du Logone atteignent $400 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bongor. Les deux courants se rencontrent à Zina dans les derniers jours du même mois. L'arrivée de l'eau à Zina coïncide avec une rupture de pente de la courbe de crue à Logone-Gana, indice de pertes importantes par le fleuve à cette époque. Le débit du Logone à Bongor est alors aux environs de $700 \text{ m}^3/\text{s}$.

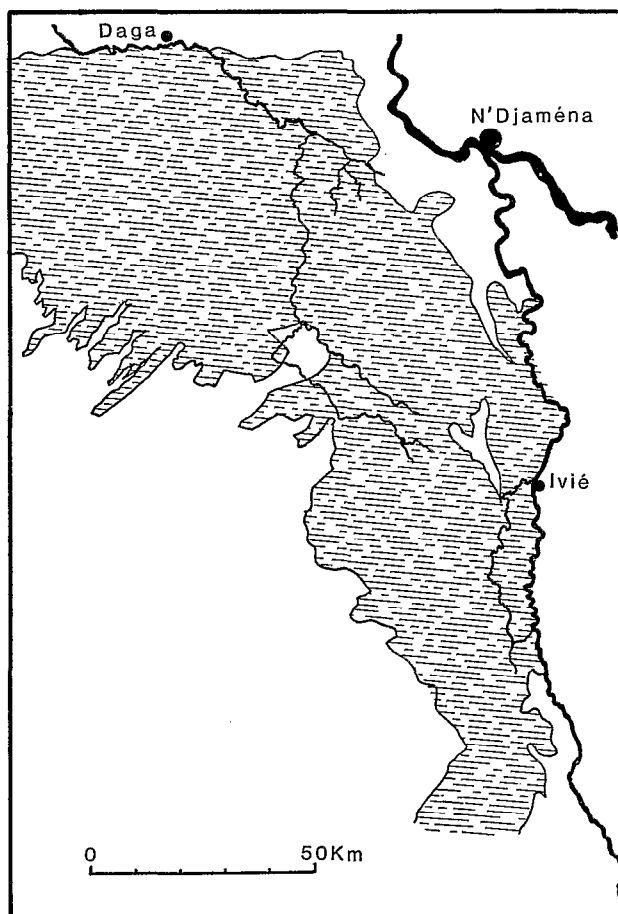


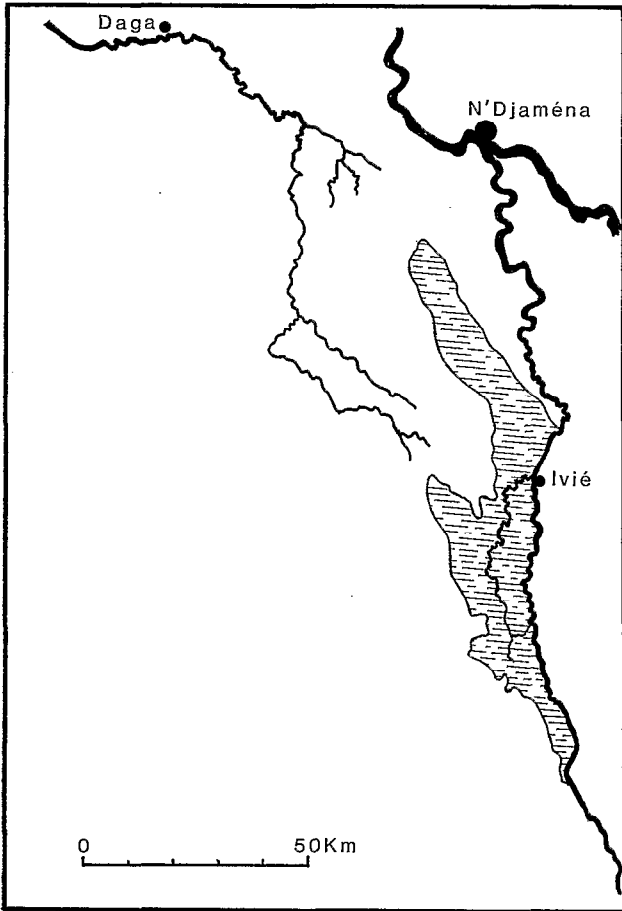
Fig. 5. — Zones du Grand Yaéré inondées par les pluies, d'après un document LANDSAT du 8 août 1978 (cf. fig. 2)

Après la jonction, à Zina, le courant du Logomatia s'oriente sud-nord, sauf près d'Ivié où le Logone continue à se déverser dans le Logomatia. Le lieu de rencontre des eaux venant du sud par le Logomatia et de celles issues directement du fleuve se situe au niveau d'un large drain débutant un kilomètre environ à l'ouest d'Ivié. Toute l'eau pénétrant dans le Logomatia à cette époque est ainsi évacuée dans le Yaéré. Cette phase initiale de l'inondation, très fugace pour une crue normale, est mise en évidence par une photo LANDSAT du 1-11-72. Le schéma correspondant (fig. 6A) montre l'extension du déversement des eaux de crue par les dépressions en relation avec le Logomatia pour des débits maximum du Logone à Bongor de l'ordre de $1\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ (fig. 7).

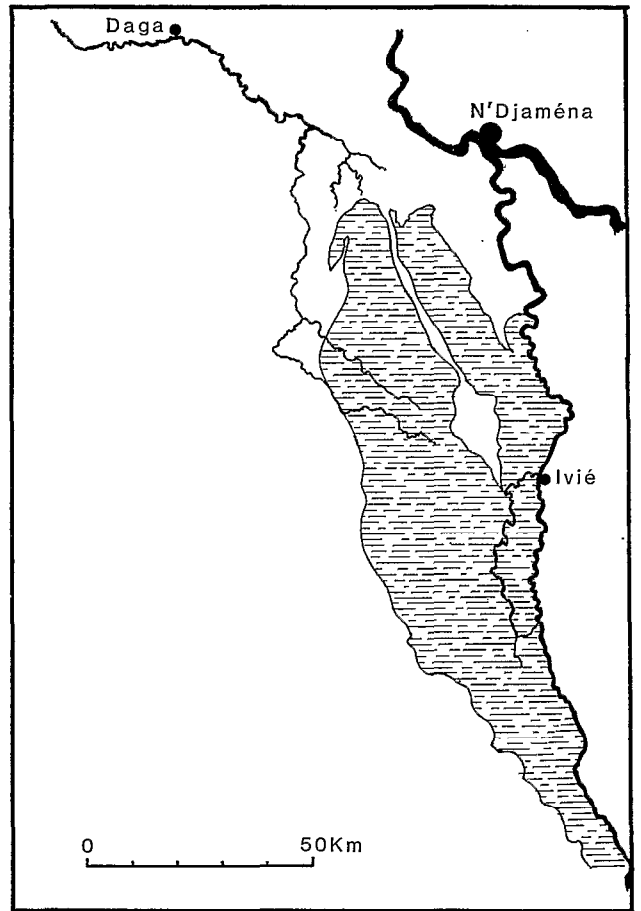
Entre $700\ \text{m}^3/\text{s}$ et $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ les eaux de crue du Logone remplissent la totalité du lit du Logomatia ainsi que les dépressions et drains artificiels creusés par les pêcheurs. Au-dessus de $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ le flot de crue déborde du lit mineur pour inonder la plaine, mais l'onde ne parvient à l'El Beïd que lorsque les débits atteignent et dépassent $1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ à Bongor. Ainsi, en 1972 et en 1973, aucun écoulement ne s'est produit dans l'El Beïd. Ce débit de $1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ correspond à la cote 280 de l'échelle de Zina (fig. 9) et semble marquer, à la crue, la limite de niveau entre les plaines inondables et le fleuve.

On distingue donc deux zones de pénétration des eaux de crue dans le Yaéré. La première correspond à la portion du Logomatia en aval de N'Godéni et plus particulièrement au drain évoqué plus haut. De là le front d'inondation progresse selon un axe dépressionnaire orienté SE/NW que nous qualifierons d'axe nord par opposition à l'axe sud, second axe dépressionnaire parallèle au premier et séparé de lui par une bande de terrain légèrement surélevée. Cette zone de séparation s'élargit vers le sud, à la hauteur de Hinalé (fig. 2), en un losange pratiquement exondé pendant toute la période d'inondation (fig. 6B), elle est caractérisée par une savane arborée; ailleurs le Yaéré est dépourvu d'arbres.

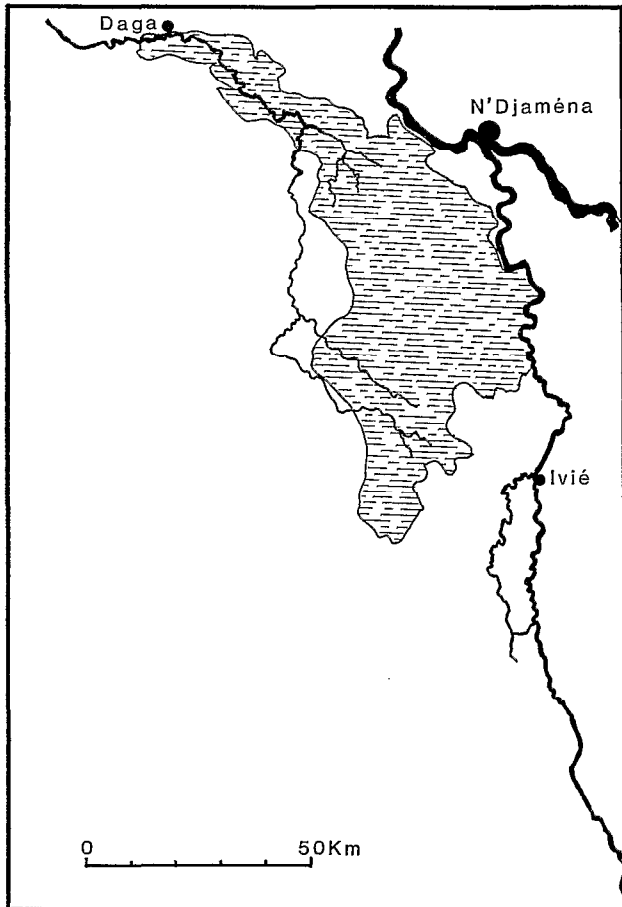
A. — 1^{er} novembre 1972



B. — 8 octobre 1975



C. — 24 novembre 1978



D. — 17 janvier 1979

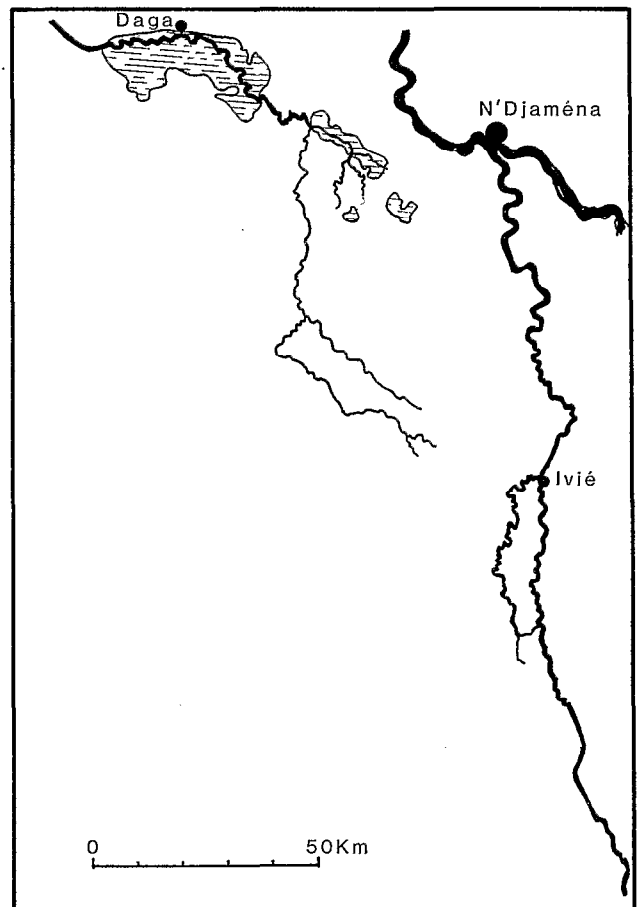


Fig. 6.

Les eaux d'inondation de l'axe sud proviennent de la partie amont du Logomatia, ainsi que du Guerléou et des débordements directs du Logone entre Guerléou et Logomatia comme nous le verrons plus loin (§ 2.2).

L'importance relative des deux bras d'inondation diffère en début de crue selon l'abondance des déversements. Pour une crue très faible comme 1977 (fig. 8) on note une meilleure inondation du bras nord marquée par une plus grande largeur et une avancée des eaux plus rapide. Pour une crue forte comme 1975, on observe une prédominance du bras sud. Les débordements d'amont s'intensifient lorsque la crue est forte alors que les débordements d'aval restent sensiblement constants. L'axe nord semble plus encaissé que l'axe sud, qui, à son début, est moins limité dans son extension latérale vers l'ouest.

L'épaisseur de la couche d'eau qui se déverse dans le Yaéré au maximum de la crue paraît indépendante de l'importance de celle-ci. La courbe de niveau à Zina (fig. 9) atteint le même maximum en 1977 et en 1978 bien que la seconde crue soit très supérieure à la première (tableau I). La constance du niveau d'étalement est d'ailleurs un phénomène bien connu des habitants de Zina. Quelle que soit la crue elle est écrêtée d'amont en aval à des niveaux fixes ce qui réalise une régularisation progressive du débit.

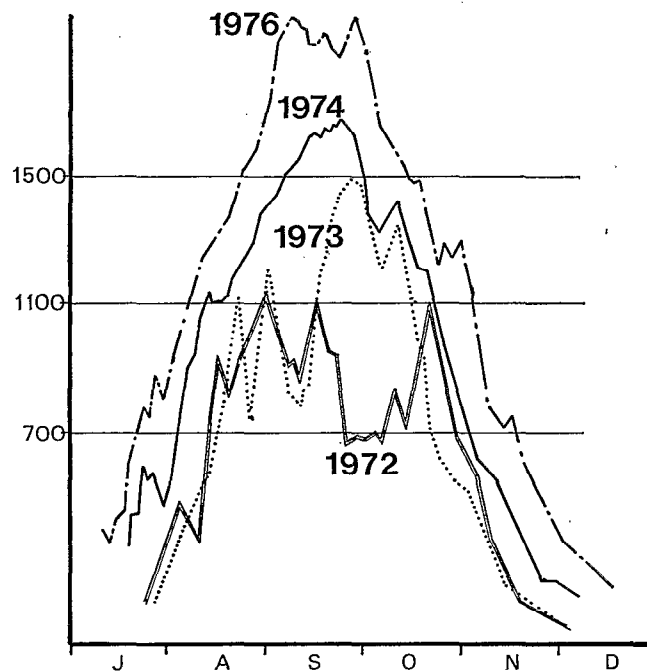


Fig. 7. — Débits du Logone à Bongor exprimés en m^3/s

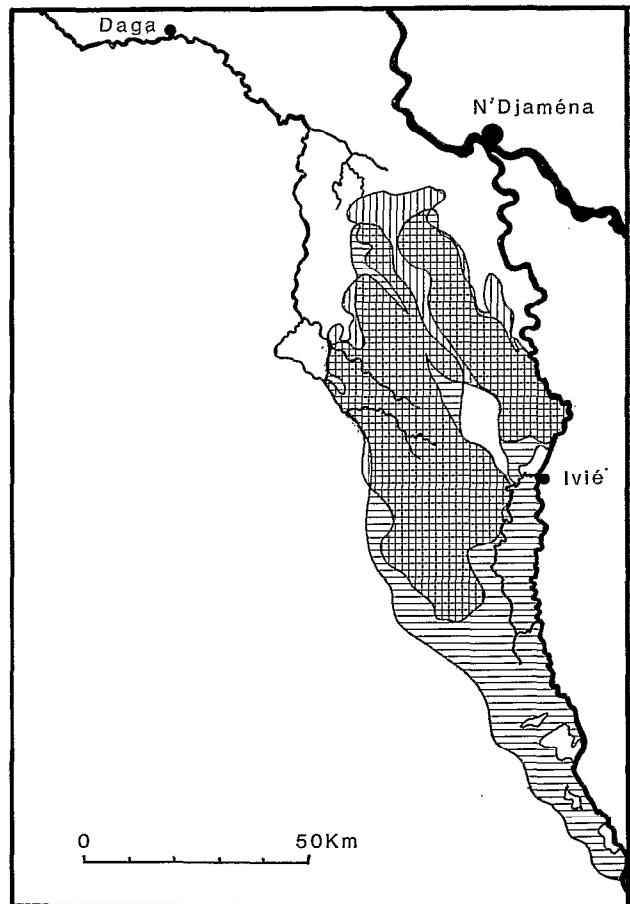


Fig. 8. — Comparaison de la dynamique de l'inondation du Yaéré pour une crue forte (hachures horizontales) et une crue faible (hachures verticales)
Ces schémas sont établis à partir des documents LANDSAT du 8 octobre 1975 pour la crue forte et du 2 novembre 1977 pour la crue faible (cf. fig. 2 et 3)

← Fig. 6. — Schémas représentant différentes phases de l'inondation et de la vidange du Yaéré d'après les documents LANDSAT correspondant aux dates indiquées (cf. fig. 2 et 3)

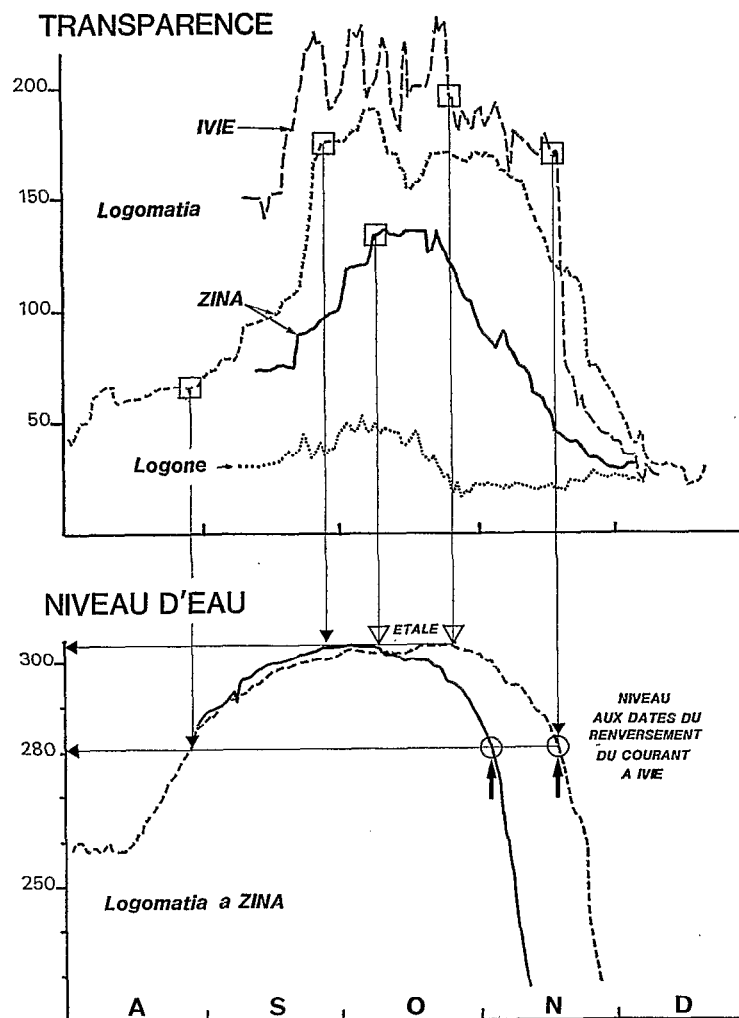


Fig. 9. — Correspondances entre les variations de la transparence et du niveau d'eau du Logomatia en 1977 (trait plein) et 1978 (tireté)

- Transparence du Logone en 1978
- points remarquables (voir explications dans le texte)
- ▽ dates de début de décrue
- dates du renversement du courant à Ivié

1.4. DYNAMIQUE DE LA DÉCRUE

Sur le Logomatia, le premier signe de décrue est une baisse lente de niveau enregistrée en octobre dans le cours médian, à Zina (fig. 9). Pendant ce temps, les apports du Logone par Ivié se poursuivent, bien que la décrue du fleuve soit déjà amorcée. Il semble donc qu'à cette époque, les déversements sur l'axe nord vers le Yaéré soient supérieurs aux apports du Logone car certaines zones inondées en amont de N'Godéni restituent déjà leurs eaux au Logomatia.

Les déversements du Logone par la portion aval du Logomatia s'interrompent en 1977 comme en 1978 pour une même cote du niveau d'eau à Zina, cote qui correspond à un débit approximatif de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bongor. La vidange du Logomatia est ensuite très rapide; elle débute par un renversement du courant entre Ivié et l'entrée de l'axe nord et se solde par un retour des eaux vers le Logone.

Les parties descendantes des courbes de niveau de l'échelle de Zina en 1977 et 1978 sont très semblables (fig. 9). Le volume des eaux de drainage est donc le même et doit correspondre à une surface drainée constante.

Comme lors de l'inondation, on retrouve à la décrue deux temps successifs dans l'hydrologie du reflux ; ils correspondent aux différences de niveau des seuils de déversement propres à chacune des deux voies de pénétration de l'eau dans le Yaéré. L'axe nord, dont l'entrée se trouve à une cote plus basse, reste en communication plus longtemps que l'axe sud avec le réseau fluvial.

Au cours de son extension vers l'ouest et le nord-ouest, l'onde de crue recouvre les branches de la Kalia mais les écoulements vers l'El Beïd par ces chenaux sont négligeables. La route surélevée par rapport à la plaine freine probablement l'extension vers l'ouest et le drainage par la Kalia dont le rôle avant la construction de la route actuelle devait être plus important comme en témoigne la largeur du lit.

Au niveau de l'El Beïd, la vidange du Yaéré s'amorce par l'arrivée dans les drains supérieurs des deux bras d'inondation, qui se sont rejoints en poursuivant leur progression vers le nord (fig. 6C). Le maximum de la crue est atteint à Tildé vers la fin novembre alors que l'onde de crue a déjà largement inondé le lit majeur de la rivière (fig. 3 & 6C). Une dizaine de jours plus tard, le maximum s'est déplacé à Daga alors que l'onde de crue continue sa progression dans le lit majeur. En janvier, des zones inondées subsistent à l'extrémité des bras de l'El Beïd entre Tildé et la confluence El Beïd-Kalia et dans le lit majeur entre Daga et Fotokol (fig. 6D). Elles sont progressivement drainées, puis l'écoulement s'interrompt vers la fin du mois de février.

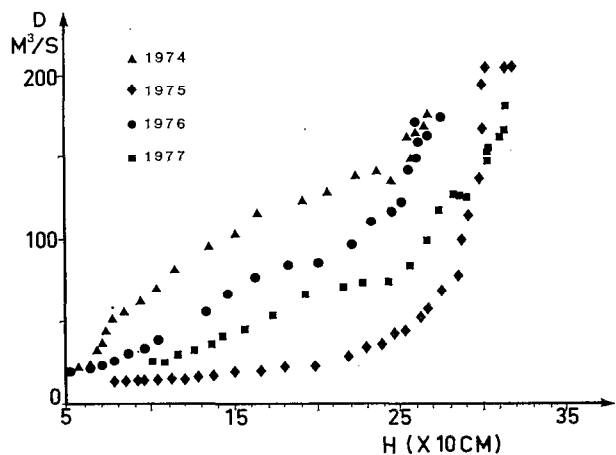


Fig. 10. — Relations entre les débits du Logone à Bongor (D) et les hauteurs d'eau à Daga 72 jours plus tard (H) suivant l'importance de la crue

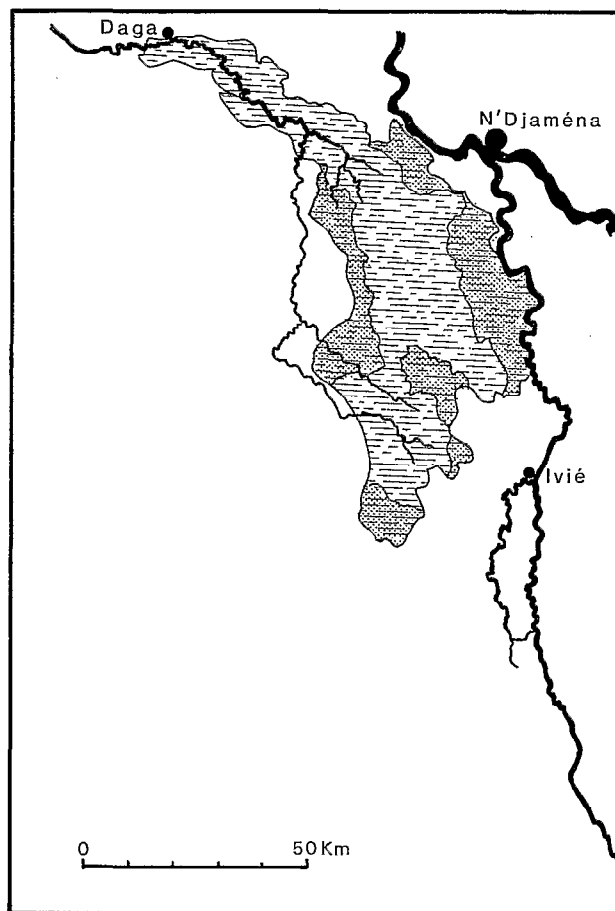


Fig. 11. — Comparaison des surfaces inondées du Yaéré en 1978, année de faible crue et en 1975 année de crue moyenne (cf. fig. 2 et 3)
Les zones surchargées en pointillés indiquent la différence d'extension des deux inondations

Les données hydrologiques recueillies entre 1974 et 1978 permettent de constater que, pour la période de décrue, la relation entre les débits du Logone à Bongor et les hauteurs d'eau de l'El Beïd à Daga 72 jours plus tard (temps moyen de transit entre les deux stations), varie avec l'importance des déversements (fig. 10). Les différentes formes de la relation illustrent le rôle de goulot d'étranglement de l'El Beïd au cours de la vidange du Yaéré et l'étalement des eaux de ce dernier qui devient un réservoir d'autant plus grand que la crue est abondante. Les fortes inondations se traduisent en effet par un allongement de la phase de décrue lente à Daga. Touchebœuf (1969) avait également remarqué qu'à Fotokol la décrue de janvier est d'autant plus rapide que la crue est moins forte. On peut procéder à une comparaison assez rigoureuse de l'extension de la zone d'inondation en fonction du volume déversé dans le Yaéré grâce aux deux documents LANDSAT du 1/12/75 et du 24/11/78. En 1978 la crue est plus précoce d'une semaine et on estime les déversements un tiers inférieurs à ceux de 1975 (Tableau I). D'après les hydrogrammes de Tildé (fig. 3) on constate qu'aux dates mentionnées l'El Beïd présente la même phase hydrologique proche de l'étalement. On en conclut que, dans le Yaéré, en amont de cette station, l'inondation atteint à ces dates-là les limites extrêmes de son avancée septentrionale. La superposition des surfaces inondées des deux années (fig. 11) montre qu'une crue plus forte (1975) inonde mieux ou plus longtemps les régions nord-est du Yaéré autour de Logone-Birni. L'inondation persiste également plus longtemps dans les régions méridionales au sud et à l'ouest du Logomatia. Ainsi, l'importance de l'inondation du Yaéré se traduit à la fois en surface et en durée.

A la fin de la décrue, seules persistent dans le Yaéré des mares d'eaux résiduelles dont le niveau ne cessera de baisser jusqu'aux premières pluies ; elles s'agrandissent alors à la suite du ruissellement des eaux météoriques.

1.5. EVALUATION DES DÉVERSEMENTS

L'évaluation des volumes déversés est difficile sans mesures à proximité du Yaéré. Gac (1979) a établi le bilan hydrologique de cette plaine en estimant que les déversements du Logone correspondent aux deux tiers du volume d'eau relatif au dépassement d'un débit de $1\ 100\ m^3/s$ à Bongor. Nous avons repris sa formule pour calculer les déversements D de 1968 à 1978 et les comparer aux écoulements de l'El Beïd V pendant la même période (tableau I).

La figure 12 montre que la relation entre V et D n'est plus linéaire au delà de $D = 4 \times 10^9\ m^3$ environ. On peut apporter deux explications à cela. A partir d'une certaine importance de la crue, le Yaéré peut être alimenté différemment, de nouveaux seuils de déversement sont atteints et le mécanisme d'inondation amplifié. En complé-

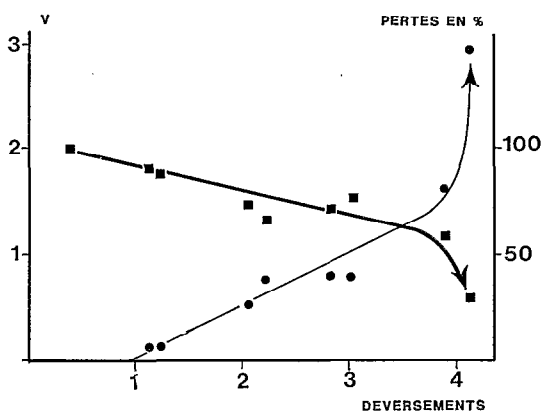


Fig. 12. — En trait fin, relation entre les écoulements de l'El Beïd (V) et les volumes estimés déversés par le Logone dans le Yaéré (déversements).

Les deux variables sont exprimées en $10^9\ m^3$

- estimations des déversements d'après le seuil de débit $1\ 100\ m^3/s$ (voir explications dans le texte)

En trait épais, relation entre les pertes d'eau (en % des déversements)

et les déversements du Logone (cf. tableau I)

ment, on peut supposer qu'à partir d'un déversement de 4×10^9 m³ l'eau recouvre toute la surface inondable, l'excédent entraîne une élévation de niveau mais la surface demeurant constante, les pertes par évaporation sont relativement moins importantes. Pour la période 1968-1978 considérée, seule l'année 1970 se situe en dehors de la relation linéaire dont l'équation de régression est la suivante ;

$$V = 0.49 D - 0.47 \quad r = 0.956$$

Nous pouvons interpréter la constante de l'équation comme étant la fraction des déversements qui reste dans les dépressions du Yaéré (mares) ou qui retourne au Logone. Cette masse d'eau, indépendante de l'importance de la crue, correspond à un déversement initial de 0.97×10^9 m³ qui, en année moyenne, représente un peu moins d'un tiers des déversements du Logone (3.2×10^9 m³, Gac, 1979). L'équation ci-dessus peut aussi se traduire en disant que l'évaporation « consomme » la moitié de la couche d'eau qui s'étale sur le Yaéré ($V = \frac{1}{2} D - 0.47$).

La mise en relation des débits du Logone (fig. 7) et des écoulements de l'El Beïd a permis de constater que la vidange du Yaéré par l'El Beïd ne se réalise que pour des crues dépassant 1 500 m³/s de débit à Bongor. A partir de cette observation nous avons établi un indice d'inondation I que nous utiliserons par la suite dans un but ichtyologique. Il était préférable que cet indice soit rattaché aux caractéristiques du Logone car, dans l'avenir, les crues de ce fleuve pourraient être modifiées par des aménagements. Nous caractérisons l'importance de l'inondation par le volume d'eau du Logone correspondant aux débits supérieurs à 1 500 m³/s. L'écoulement de l'El Beïd (V) est directement proportionnel au volume ainsi défini :

$$V = \frac{1}{2} I \quad r = 0.981$$

Ces principes généraux de fonctionnement hydrologique du Yaéré peuvent être précisés par l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux. Parmi les paramètres qui ont été systématiquement observés la conductivité et la transparence fournissent à ce sujet de précieux renseignements.

TABLEAU I

INDICE DE CRUE, ESTIMATION DES VOLUMES D'EAU DÉVERSÉS PAR LE LOGONE
DANS LE YAÉRÉ, ÉCOULEMENTS DANS L'EL BEÏD
ET PERTES PAR ÉVAPOTRANSPIRATION.
(EXPLICATIONS DANS LE TEXTE)

$$D = \frac{2}{3} \Sigma (\text{Débit journalier} - 1\,100) \times 86\,400$$

$$I = \Sigma (\text{Débit journalier} - 1\,500) \times 86\,400$$

D, I et V sont exprimés en 10⁹ m³

| Année | Déversements (D) | Indice de crue (I) | Écoulements de l'El Beïd (V) | Pertes en % de D |
|-------|---------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|
| 1968 | 2,11 | 1,02 | (0,60) | (72) |
| 1969 | 3,89 | 3,08 | 1,62 | 58 |
| 1970 | 4,13 | 3,79 | 2,93 | 29 |
| 1971 | 2,07 | 1,09 | 0,52 | 75 |
| 1972 | 0,02 | — | 0,00 | — |
| 1973 | 0,41 | — | 0,00 | — |
| 1974 | 1,24 | 0,23 | 0,14 | 89 |
| 1975 | 2,84 | 1,95 | 0,79 | 72 |
| 1976 | 3,03 | 1,38 | 0,77 | 75 |
| 1977 | 1,12 | 0,26 | 0,11 | 90 |
| 1978 | 2,22 | 1,31 | 0,76 | 66 |

2. PHYSICO-CHIMIE DE L'EAU

2.1. CONDUCTIVITÉ ET SELS DISSOUS

La conductivité a été mesurée au laboratoire à 25 °C, à partir d'échantillons d'eau prélevés à 10 centimètres de profondeur dans le lit mineur de l'El Beïd à Daga. Les valeurs oscillent entre 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 175 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mais la plupart varient dans une fourchette plus étroite (100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, fig. 13). La conductivité des eaux de l'El Beïd subit des variations saisonnières (fig. 14) dont l'évolution correspond à l'histoire des différentes masses d'eau qui s'individualisent dans le Yaéré puis se succèdent dans la rivière. La conductivité est en quelque sorte un marqueur pour chacune d'elle. Des études hydro-géochimiques effectuées par Roche (1973) pour une année moyenne ont conduit au schéma évolutif suivant.

2.1.1. Stockage des sels en saison sèche

Pendant la saison sèche, les eaux résiduelles piégées dans les dépressions se concentrent par évaporation. L'évolution de la minéralisation de ces eaux dépend du temps écoulé entre l'isolement des mares et l'arrivée des premières pluies, et également de la nature du sol. On a tout lieu de penser qu'une partie des ions, principalement le Potassium et le Calcium, est absorbée par les argiles et participe à des néoformations argileuses. Par ailleurs, il est probable que :

- les sels cristallisent à la surface du sol par remontée capillaire,
- la masse végétale, surtout celle brûlée par les feux de brousse, représente un stock d'éléments minéraux mobilisables par la crue suivante,
- les déjections d'animaux contribuent aux apports en ions et en matière organique.

2.1.2. Rôle des précipitations

Lors des premières pluies, une partie des sels est fixée par la végétation qui commence son développement. Les sels restants sont dissous et drainés par les eaux météoriques, plus ou moins complètement selon l'importance des précipitations. Habituellement, l'abondance des eaux de pluie est tout juste suffisante pour balayer vers le lac les eaux résiduelles du lit de l'El Beïd. Il ne se crée pas alors de liaison entre le tributaire et le réseau de drains de la plaine.

2.1.3. Rôle des déversements du Logone

Les eaux résiduelles et pluviales regroupées dans le réseau de drains sont chassées vers l'El Beïd par l'arrivée des déversements du Logone. Elles constituent les premières eaux de crue du tributaire, fortement chargées en sel mais également en matière organique comme en témoigne leur coloration brunâtre.

Pendant toute la montée des eaux, la salure globale diminue dans l'El Beïd. Ce phénomène est attribué à la dilution croissante des solutions car les débits fluviaux augmentent tandis que les stocks résiduels de sel et d'eau diminuent.

2.1.4. Vidange du Yaéré

Dès le début de la décrue les phénomènes deviennent plus complexes. Pour les expliquer Roche distingue deux masses d'eau selon leur répartition pendant l'inondation de la plaine. La première gagne l'El Beïd par un parcours plus ou moins direct (le réseau de drains), en diluant les sels préexistants. La seconde contribue à l'inondation des régions marginales et n'est restituée avec les eaux résiduelles qu'à la décrue.

Les eaux de décrue de l'El Beïd correspondent au mélange de ces deux masses d'eau, la seconde étant notablement plus minéralisée parce qu'issue de zones non encore drainées et sujettes à une évaporation plus importante. Au fur et à mesure que la décrue s'avance, l'importance des eaux de drainage grandit dans le mélange, l'influence de l'évaporation également et la salure des eaux de l'El Beïd croît progressivement ou par paliers successifs (fig. 15).

2.1.5. Discussion des variations inter-annuelles

Les eaux des mares résiduelles, les eaux de pluie et les eaux de déversement du Logone sont les trois composantes des écoulements dont les proportions variables déterminent les fluctuations interannuelles.

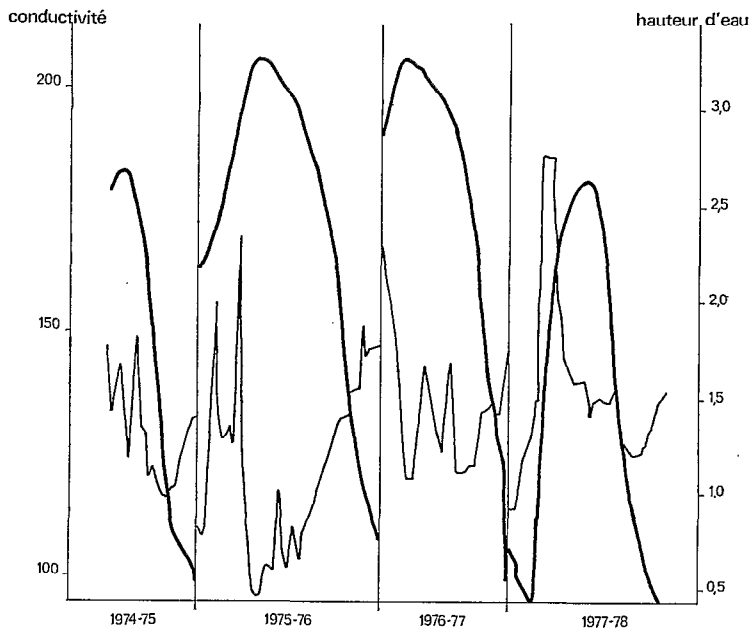


Fig. 13. — Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (trait fin) et niveau d'eau en mètre (trait épais) de l'El Beid à Daga

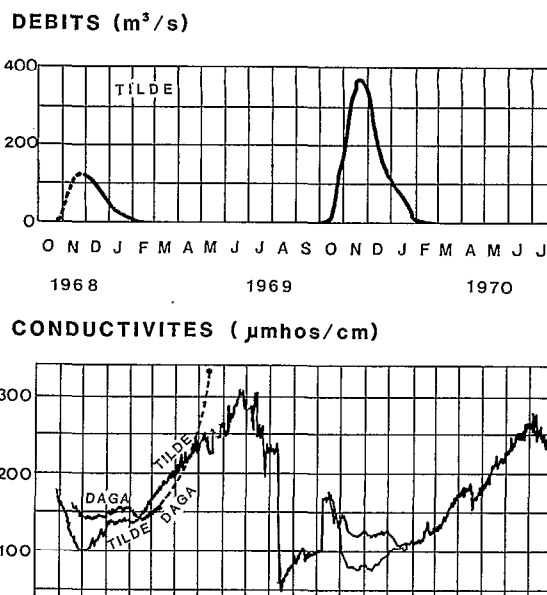


Fig. 14. — Variation des débits et des conductivités des eaux de l'El Beid à Tildé et Daga (d'après Roche, 1973)

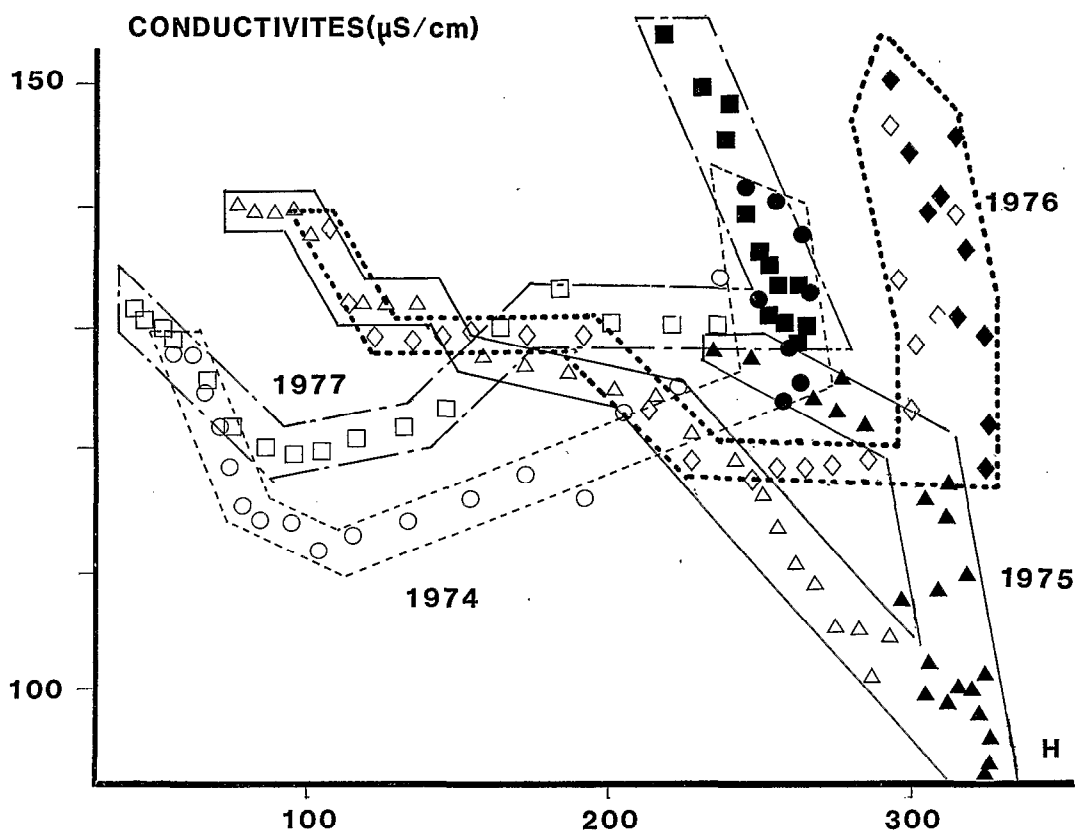


Fig. 15. — Relation entre la conductivité et la hauteur d'eau (en cm) à Daga pour différentes crues
 Figurés noirs : phase de crue
 Figurés blancs : phase de décrue

Pour les périodes de forts débits, la qualité chimique des eaux de l'El Beïd ne change pas au cours des trois cycles étudiés par Gac ; 1974-75, 1975-76 et 1969-70 (données recueillies par Roche). Au maximum de la crue on observe une salinité minimum contrôlée par la composition chimique des eaux du Logone et par l'intensité de l'évaporation pendant le transit dans le Yaéré.

Pour les crues faibles, le minimum de conductivité se produit bien après le maximum de la crue de l'El Beïd (fig. 15). Tout se passe comme si la masse d'eau déversée n'était pas suffisante pour permettre un balayage complet des sels stockés pendant la saison sèche.

A l'inverse, en 1975-76, le minimum observé à la pointe de la crue est significativement inférieur aux valeurs habituellement observées et ne peut être expliqué uniquement par l'importance des déversements. Exceptionnellement cette année-là, les précipitations furent à la fois très abondantes et proches des déversements (30 jours entre le pic de précrue et le début de la crue au lieu de 60-65 jours habituellement observés (fig. 3)). Il en résulta une précrue anormalement forte qui provoqua non seulement un balayage des sels de l'El Beïd mais également d'une partie de ceux du Yaéré, d'où une salinité plus faible des eaux de crue.

Ces quelques exemples permettent d'établir qu'il n'existe pas de relation stable entre les phases de crue et l'évolution saisonnière de la conductivité des eaux de l'El Beïd. Cependant, bien qu'elles n'aient pas été observées par l'auteur ces variations inter-annuelles restent cohérentes avec le schéma de Roche (1973).

Par ailleurs, la distinction de deux masses d'eau proposée par Roche est également cohérente avec l'évolution des eaux d'inondation dans le Yaéré telle qu'elle peut être décrite à partir des photos LANDSAT. La masse d'eau d'écoulement direct correspond aux masses d'eau évoluant le long des axes dépressionnaires précédemment décrits et qui, seuls, sont inondés les années de faible crue. La masse d'eau d'inondation des régions marginales correspond à l'extension de l'inondation les années de forte crue. Extensions qui se situent principalement au sud de Hinalé (fig. 2) pour l'axe sud et au nord de Logone-Gana pour l'axe nord (fig. 11).

2.2. TRANSPARENCE

2.2.1. *Transparence dans le Logomatia*

Pendant les cycles de crue de 1977 et 1978, la transparence a été mesurée régulièrement dans le cours moyen du Logomatia à Zina et dans son cours inférieur à proximité d'Ivié, juste en amont de l'entrée de l'axe nord, ainsi que dans le Logone (fig. 9).

On ne dispose pas d'observations sur l'hydrologie de la partie amont du Logomatia ni même sur celle du Logone aux environs de Gamsaye (fig. 2). Pour tenter de comprendre l'évolution de la transparence des eaux du Logomatia on est donc conduit à formuler des hypothèses sur leurs origines. La plus simple est de considérer que les eaux observées à partir de Zina sont les eaux du Logone qui ont pénétré par l'entrée amont du Logomatia et ont suivi le lit du tributaire. Dans cette hypothèse, l'éclaircissement des eaux se produirait par décantation dans le lit du Logomatia. Il en résulte qu'une fois la circulation établie l'épuration des eaux devrait être sensiblement constante pour une portion donnée du cours. Effectivement à Ivié (fig. 9), en amont de l'entrée de l'axe nord, les eaux du Logomatia sont plus claires qu'à Zina, et, si l'on néglige la variabilité des observations d'Ivié (probablement due à la proximité du point de mélange des eaux provenant respectivement du nord et du sud de la rivière), la différence de transparence entre les deux stations est sensiblement constante.

La transparence des eaux du Logone étant sensiblement la même d'une année à l'autre et le remplissage du lit mineur du Logomatia s'effectuant de façon comparable en 1977 et en 1978, l'évolution de la transparence à Zina ainsi que les niveaux de transparence maximale devraient être également comparables. Ceci est bien loin d'être observé (fig. 9). On doit en conclure que les eaux de Zina proviennent non seulement d'apports directs du Logone mais aussi de certaines zones inondées limitrophes. Il peut s'agir des zones comprises entre Logone et Logomatia mais également des zones inondées situées en aval du Guerléou et dont l'extension dépend de l'importance de la crue (fig. 6A & 6B). En effet, ces régions plates, couvertes d'une végétation graminéenne dense, constituent un décanteur très efficace d'une part en provoquant la diminution de la vitesse du flot de débordement par étalement des eaux sur une grande surface et par freinage du courant dans la végétation ; d'autre part en présentant l'énorme surface de dépôt des tiges et feuilles immergées.

Ces remarques faites, il est possible de tenter d'interpréter l'évolution de la transparence à Zina ainsi que ses variations inter-annuelles (fig. 9). En août 1978, la transparence se situe vers 60 cm. Elle s'élève progressivement pendant le remplissage du lit mineur parallèlement à la transparence des eaux du Logone. Lorsque le niveau d'étalement est pratiquement atteint une brusque clarification se produit (110 à 170 cm). La transparence se stabilise pendant l'étalement et la décrue lente pour décroître ensuite dès l'amorce de la décrue rapide.

A partir de la cote 280, les débordements directs du Logone vers la plaine deviennent importants. L'accroissement de la transparence résulte d'une proportion grandissante de ces eaux dans le Logomatia. La montée brusque

de la transparence et sa relative stabilité pendant toute la période d'étalement doit être interprétée comme le signe d'une alimentation essentiellement faite par le drainage des régions amont inondées soit directement par le Logone soit par l'intermédiaire du Guerléou.

A la décrue, la diminution progressive de la transparence est l'indice de la diminution des eaux de drainage des régions amont. Cette diminution résulte du rétrécissement de la zone de déversement entre Bongor et Gamsaye du fait de la progression de la décrue vers l'aval. Survient ensuite le renversement du courant à Ivié qui marque le début de la vidange du Logomatia. L'accroissement rapide de la turbidité résulte d'un phénomène de chasse provoqué par la rapidité de cette vidange. Phénomène qui favorise la remise en suspension des sédiments déposés auparavant dans le lit mineur mais également sur les tiges et feuilles des végétaux de la portion de plaine drainée. Ce phénomène a en effet été observé dans les plus petits drains rayonnant dans la plaine à partir du Logomatia qui s'insèrent dans les graminées (Roche, communication personnelle).

L'évolution de la transparence au cours de la crue faible de 1977 présente sensiblement les mêmes phases mais la montée de la courbe est plus tardive et la décroissance plus précoce tout comme la courbe de hauteur d'eau cette année-là à Bongor. En outre, les transparences maximales se stabilisent à un niveau nettement inférieur à celui de 1978 car la faiblesse de la crue induit un retard à l'inondation des régions amont et des déversements plus brefs et moins importants.

2.2.2. Transparence de l'El Beïd

D'une façon générale, on observe un accroissement de la transparence pendant la montée des eaux. Elle atteint un maximum, variable selon les années quelque 0,2 à 0,3 m avant la pointe de la crue. Elle décroît ensuite rapidement pour se situer, lorsque le niveau est redescendu de 0,2 à 0,3 m, vers des valeurs de 20-25 cm (fig. 16). La transparence maximale des eaux de l'El Beïd est environ de moitié inférieure à celle des eaux du Logomatia (fig. 9 et 17). Après une clarification observée à proximité des zones de déversement il se produit une mise en suspension de particules pendant la traversée du Yaéré par les eaux d'inondation comme le montrent les analyses minéralogiques effectuées par Roche (1973) et par Gac (1979).

La comparaison des courbes de conductivité et de transparence montre que le pic de conductivité précède toujours celui de la transparence, il n'y a jamais coïncidence (fig. 17). En outre, on constate qu'à l'échelle inter-annuelle il n'existe pas de relation simple entre ces deux paramètres. Les eaux claires de l'El Beïd ne sont donc probablement pas composées essentiellement d'eaux résiduelles comme le suggère Roche mais pourraient résulter d'une interaction physico-chimique entre les eaux de l'onde de crue et les stocks de substances résiduelles qu'elles lessivent. Les eaux les plus claires de l'El Beïd présentent toujours une forte charge en composés humiques susceptibles de provoquer la floculation des argiles, le décalage entre pic de conductivité et pic de transparence pourrait être imputé à un décalage entre la mobilisation des stocks résiduels de sels et de substances humiques. L'abaissement ultérieur de la transparence devrait être alors interprété comme le signe de l'épuisement du stock de matière humique mobilisable par les eaux de crue.

A l'échelle inter-annuelle on constate pour la période 1974-1978 une forte liaison entre la transparence maximale observée sur l'El Beïd et l'importance de la crue :

$$DS_{\max} = 19,48 D + 67,42 \quad r = 0,964$$

L'eau est d'autant plus claire que la crue est forte.

2.3. TEMPÉRATURE

Dans l'El Beïd, deux relevés de température des eaux de surface ont été effectués quotidiennement, l'un à 7 h, l'autre à 16 h, donnant respectivement une estimation du minimum et du maximum thermique.

L'évolution générale de la température moyenne est assez constante d'une année à l'autre (fig. 18). Supérieure à 23 °C jusqu'à la fin novembre, elle baisse au cours de la première quinzaine de décembre qui coïncide avec le maximum de la crue. Elle oscille ensuite entre 20° et 23 °C jusqu'en février. Le minimum est généralement atteint en janvier et se trouve nettement plus accusé les années de faible crue. A partir de la fin de la décrue la température moyenne remonte, en mars elle dépasse 25 °C.

L'évolution thermique résulte des variations saisonnières de la température et du volant thermique de la masse d'eau. Le rôle de ce dernier apparaît nettement lorsqu'on considère l'amplitude des variations quotidiennes de température (fig. 19). Plus la couche d'eau est épaisse plus son volant thermique est grand. Pour une même phase hydrologique, l'amplitude thermique quotidienne est plus réduite les années de forte crue que les années de faible crue.

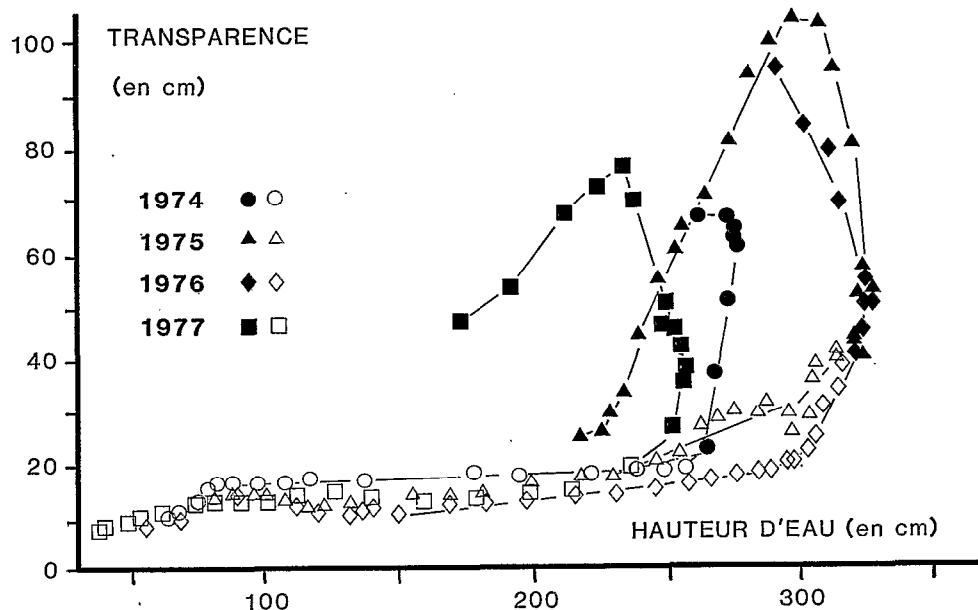


Fig. 16. — Relation entre la transparence et la hauteur d'eau (en cm) à Daga pour différentes crues
Figurés noirs : phase de crue
Figurés blancs : phase de décrue

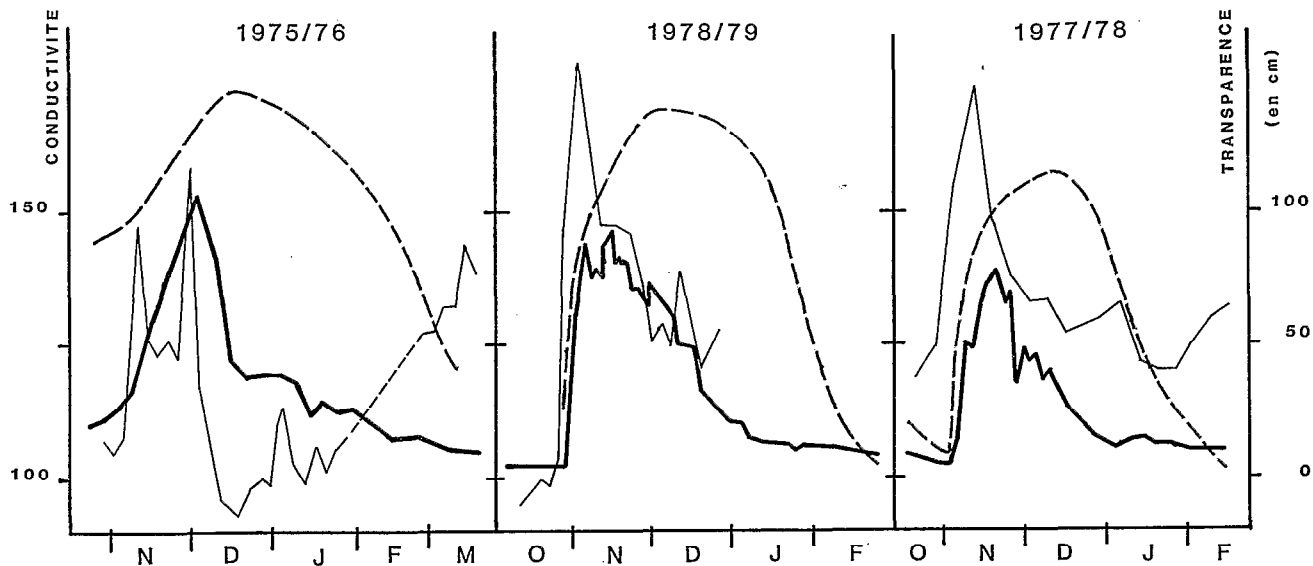


Fig. 17. — Variation de la transparence (trait fin), de la conductivité (trait épais), et du niveau d'eau (tireté) au cours de trois crues d'importances décroissantes à Daga

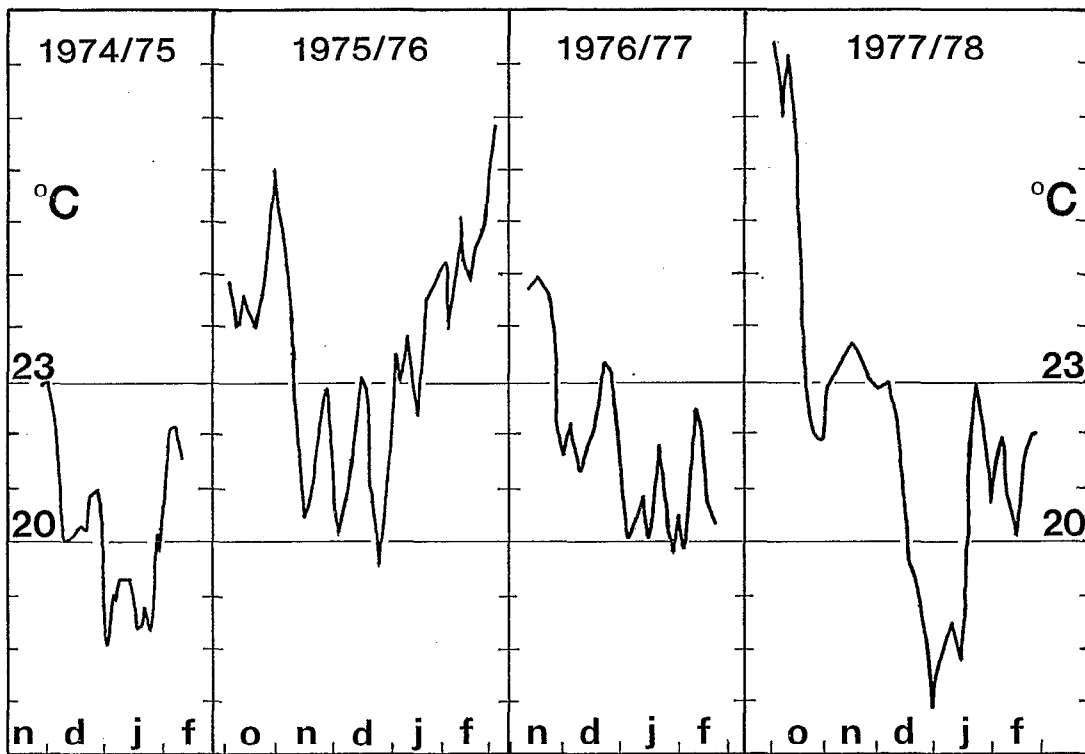


Fig. 18. — Températures moyennes quotidiennes de l'eau de l'El Beïd à Daga

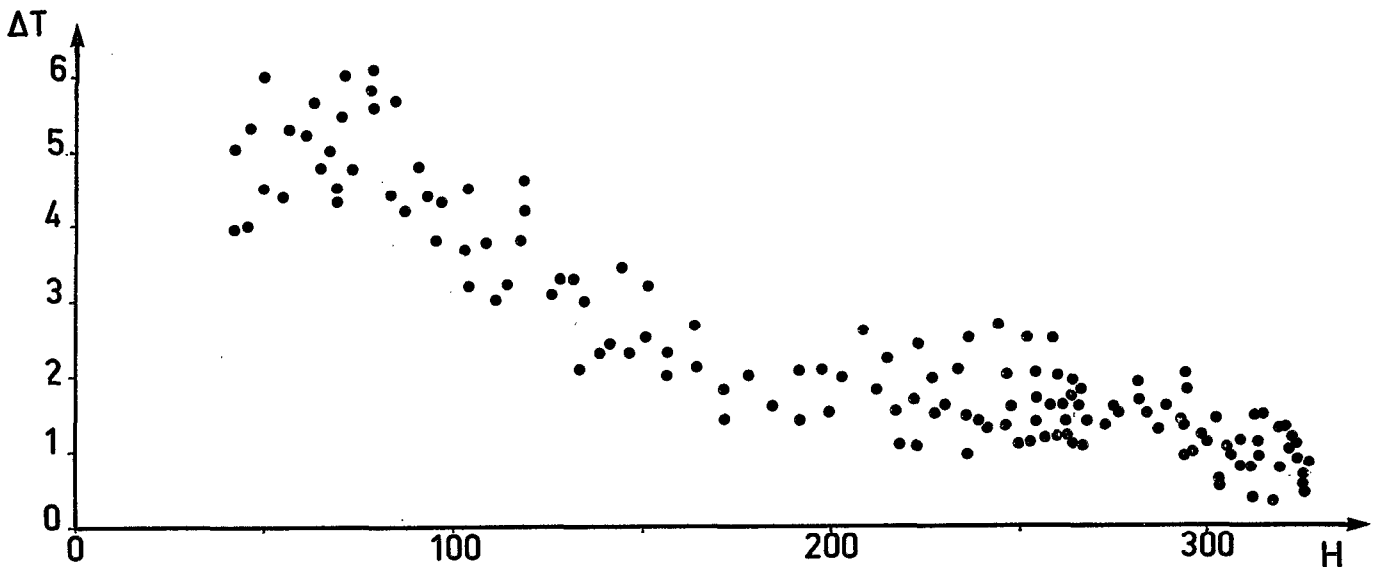


Fig. 19. — Relation entre les écarts journaliers de la température (ΔT en degrés Celsius) et la hauteur d'eau de l'El Beïd à Daga (H en cm)

Dans le Logomatia, à partir de la phase de décrue, l'évolution de la température est comparable à celle de l'El Beïd. En pleine saison d'inondation, de la mi-septembre à la mi-octobre (en 1977), la température est élevée et stable (30-32 °C). Cette température du Logomatia au cours de la crue est représentative de celle des eaux de la plaine inondée en bordure du Logomatia. Par contre, l'amplitude thermique augmente lorsqu'on s'éloigne vers l'ouest à l'opposé de la zone de déversement, la couche d'eau y est moins épaisse. Ainsi avec des maximums comparables, les écarts journaliers sont de 1-2 °C près du Logomatia et de 5 °C à l'ouest du Yaéré.

3. CONCLUSIONS

L'observation hydrologique et physico-chimique du Yaéré lui-même est difficilement réalisable du fait de l'absence de voies de pénétration. L'observation de ses tributaires et de son exutoire est, par contre, plus aisée. Les informations apportées par les caractéristiques hydrologiques et physico-chimiques (essentiellement la transparence et la conductivité) des eaux de débordement avant et après leur séjour dans le Yaéré, ainsi que celles apportées par les évolutions saisonnières et inter-annuelles de ces paramètres, permettent par recoupement avec les connaissances antérieures et les données LANDSAT de mieux comprendre les modalités de l'inondation. Nous apportons ainsi quelques éléments clarifiant des mécanismes qui, du point de vue ichtyologique et halieutique, sont d'une grande importance.

Pour un bilan global du rôle hydrologique du Yaéré, les deux points importants sont l'évapotranspiration et la sédimentation. Gac (1979) illustre l'ampleur de l'évapotranspiration en soulignant qu'elle soustrait l'équivalent en eau de la totalité des apports météoriques et 60% des apports fluviaux lors d'une crue moyenne, mais il est à noter que les pertes deviennent relativement moins importantes lorsque les déversements augmentent. Le rôle de bassin de décantation que joue la plaine est parfaitement illustré par les travaux de Lemoalle (1974) sur les apports au lac en fer réactif.

En ce qui concerne les modalités de l'inondation nous retiendrons essentiellement :

— Qu'il existe deux voies distinctes de pénétration des eaux du Logone : l'axe nord, canalisé entre les restes des bourrelets de berge du Logone et la bande de hauts fonds passant par Hinalé, et l'axe sud se développant parallèlement au premier à l'ouest de la bande de hauts fonds ;

— que l'entrée de l'axe nord, relativement basse, permet son inondation dès que les débits du Logone atteignent et dépassent 700 m³/s alors que l'axe sud se remplit plus tardivement, lorsque les débits de crue dépassent 1 200 m³/s à Bongor ;

— que le remplissage du Yaéré ne s'effectue correctement que lorsque les débits du Logone dépassent 1 500 m³/s à Bongor. En dessous de ce seuil l'onde de crue n'atteint pas l'El Beïd, au-delà les déversements directs des eaux de crue entre Guerléou et Logomatia deviennent prépondérants ;

— que plus la crue est forte plus l'étale de hautes eaux est prolongé sur le Logomatia et plus la surface inondée est grande. Les eaux quittent les axes dépressionnaires pour s'étendre dans les plaines latérales, principalement en amont de Hinalé pour l'axe sud et en aval de Logone-Gana pour l'axe nord ;

— qu'au moment de la décrue une quantité relativement constante d'eau d'inondation retourne au Logomatia. Le reste des eaux de l'axe sud ainsi que la majorité de celles de l'axe nord rejoignent directement le lac par l'El Beïd dont la décrue est d'autant plus lente que la surface inondée est grande ;

— que les eaux s'écoulant par l'El Beïd sont tout d'abord des eaux provenant « directement » du Logone par le réseau de drains et que ces eaux sont ensuite progressivement relayées par les eaux d'inondation des plaines latérales aux axes dépressionnaires ;

— qu'en année hydrologique moyenne, pendant la saison sèche, des mares résiduelles subsistent dans les dépressions de la plaine ainsi que dans le lit du Logomatia, de l'El Beïd et de la Kalia.

L'évolution saisonnière du Yaéré, bien que présentant une certaine répétitivité inter-annuelle, présente une variabilité à la fois qualitative et quantitative qui dépend de l'importance des déversements du Logone. Cependant, les précipitations sur la plaine et la précrue qui en résulte peuvent également jouer un rôle important dans l'évolution de certains facteurs environnementaux.

Touchebeuf (1969) a effectué l'étude de la distribution statistique des crues de l'El Beïd à Fotokol. La période qui nous intéresse (1968-1978) représente un bon échantillonnage de l'éventail des « possibilités » hydrologiques de cette rivière et, par extension de l'ensemble du Yaéré. 1969 et 1970 se situent parmi les fortes crues. A l'opposé, 1974 et 1977 constituent des crues faibles. 1975, 1976 et 1978 sont proches de la médiane et enfin 1972 et 1973 sont exceptionnellement faibles et ne donnent lieu à aucun écoulement.

Pour les crues faibles et moyennes qui ont été échantillonnées d'un point de vue ichtyologique (1968, 1974, 1975, 1976, 1977 et 1978) l'intensité de l'inondation, traduite par le volume des écoulements de l'El Beïd, présente une bonne corrélation avec le volume d'eau correspondant à la part du débit du Logone à Bongor au-dessus de 1 500 m³/s.

4. BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHARDEAU (A.) *et al.* - 1968 - Monographie hydrologique du Logone. *ORSTOM, Sect. Hydrol.*, Paris, 6 parties, 8 vol., 770 p.
- GAC (J. Y.) - 1979 - Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Thèse Univ. de Strasbourg, 249 p.
- LEMOALLE (J.) - 1974 - Bilan des apports en fer au lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. VIII, n° 1 : 35-40.
- PIAS (J.) - 1969 - Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent. *Mém. ORSTOM*, 43, 407 p.
- ROCHE (M. A.) - 1973 - Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse Univ. Paris VI, 398 p.
- SERVANT (M.) - 1973 - Séquences continentales et variations climatiques : évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Thèse Univ. Paris VI, 348 p.
- TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY (P.) - 1969 - Note hydrologique sur l'El Beïd et la Komadougou-Yobé. *ORSTOM, sér. Hydrol.*, 57 p.