

ÉTUDE DES POTENTIALITÉS
DU BASSIN CONVENTIONNEL
DU LAC TCHAD

HYDROBIOLOGIE

*Utilisation de la télédétection
pour l'évaluation des surfaces inondées*

AVERTISSEMENT

Ce rapport a été réalisé dans le cadre de l'accord intervenu entre le Ministère Français de la Coopération et l'ORSTOM en vue de la fourniture de la contribution française au Projet d'étude des stratégies de développement du Bassin Conventionnel du Lac Tchad entreprise sous l'égide du Programme des Nations-Unies pour le Développement, sur requête de la Commission du Bassin du Lac Tchad.

La rédaction de ce rapport est l'oeuvre de M. J.LEMOALLE

Les données fournies par les satellites d'observation de la terre, Landsat, sont utilisées pour délimiter les surfaces inondées du lac Tchad et des plaines d'inondation. Seules les données de télédétection étant utilisées, nous ne prétendons pas produire un atlas des zones inondables, mais uniquement décrire la situation à différentes périodes correspondant à ces données.

SOMMAIRE

- Les données Landsat et leur interprétation
- Le Lac Tchad
- Le grand yaéré
- Les autres zones inondées.

I - LES DONNEES LANDSAT ET LEUR INTERPRETATION.

LES DONNEES LANDSAT

Une carte des lignes et des rangs, qui définissent approximativement le centre des scènes observées par les satellites Landsat 1 et 2, est donnée figures 1 et 2. Nous avons attribué à chacun de ces points une lettre, de A à N, de façon à définir plus rapidement une région.

Dans le tableau A 1 sont indiquées les images Landsat existantes (.). Parmi celles-ci, certaines correspondent à une couverture nuageuse importante, d'autres sont trop rapprochées dans le temps pour permettre de distinguer une évolution du paysage. Nous mentionnons donc par ⊙ les scènes qui ont été utilisées dans cette étude (tableaux A 1 et A 2).

Les données Landsat se présentent également sous forme de bandes numériques, qui permettent un traitement plus fin et automatique, au moyen de programmes mis au point au bureau de télédétection de l'ORSTOM. Les bandes disponibles au nombre de 11 (liste A 3) concernent le lac Tchad et le grand yaéré du Nord Cameroun.

Rappelons ici brièvement les caractéristiques principales des données Landsat qui sont abondamment décrites par ailleurs (USGS ; Equipe Fralit, 1977 ; ORSTOM, 1977 et 1978).

Les Landsat ont une orbite quasi-circulaire à 920 km d'altitude. Ils couvrent toute la surface de la terre, à l'exception des zones polaires, en 18 jours ; l'orbite étant héliosynchrone, ils fournissent une vue de chaque point de la terre vers 9 H 30 locale. Chaque scène à environ 180 km de côté.

Le radiomètre à balayage (multispectral scanner, MSS) possède 4 canaux : MSS 4 (500 - 600 nm), MSS5 (600-700 nm) MSS6 (700-800 nm) et MSS7 (800-1100 nm) dans le proche infra-rouge. Le radiomètre enregistre dans les 4 canaux l'énergie lumineuse que lui envoie un élément de surface terrestre de 79 x 79 m, qui constitue la résolution au sol. Du fait du recouvrement latéral des éléments successifs, le point élémentaire de l'image (élément d'image ou pixel) correspond à 57 x 79 m. Une image est constituée de 2256 lignes de 3240 éléments chacune. L'énergie envoyée par un élément de résolution est sa luminance, qui est égale au produit de l'énergie incidente au sol par son coefficient de réflexion. Du fait de l'absorption et

de la diffusion par l'atmosphère, la luminance observée par le satellite est différente de sa luminance au sol.

Les données originales sont donc des données numériques, disponibles sur bandes magnétiques délivrées par les stations de réception. A partir de ces bandes, les images semblables à des photographies aériennes sont reconstituées, soit une image en noir et blanc par canal, soit une combinaison colorée des canaux 4, 5 et 7 (fausses couleurs). Nous avons principalement utilisé ce dernier type de document (composé au Bureau de Télédétection à partir des images positives, à l'échelle 10^{-6} , fournies par l'U.S. Geological Survey) en combinaison avec les images noir et blanc en canal 7 qui permettent de distinguer assez facilement les eaux libres.

INTERPRETATION DES DONNEES LANDSAT POUR L'ETUDE DES EAUX DE SURFACE ET DES ZONES INONDEES.

Les caractéristiques principales qui rendent les données Landsat particulièrement utiles pour l'étude qui nous intéresse ici sont :

- la couverture quasi synoptique de très grandes surfaces. Chaque scène couvre en effet 32400 km^2 , et il est parfois possible d'obtenir 4 scènes adjacentes en 2 jours consécutifs.
- la déformation géométrique relativement peu importante, ce qui permet de recaler facilement les images sur les cartes IGN à l'échelle 10^{-6} (carte internationale du monde, feuilles Garoua NC 33, Am Timan NC 34-35, Fort Lamy (N'Djaména) ND 33).
- la répétitivité des données, mise à profit pour évaluer les variations au cours du temps des surfaces en eau libre ou marécageuses.
- le caractère multispectral, qui est utilisé pour interpréter avec une bonne sécurité les images (soit canal par canal en noir et blanc, soit en combinaisons colorées) et les bandes numériques (procédure loterie, ORSTOM 1978).

Pour les eaux libres, la faible luminance de l'eau dans les canaux MSS6 et 7 est utilisée pour inventorier et délimiter les surfaces en eau. On utilise les différents canaux pour différencier les éléments du paysage dont les luminances sont voisines (sol humide, sols après les feux de brousse). Les zones humides (marécages ou végétation annuelle recouvrant un sol détrempé) sont caractérisées sur le terrain par une végétation dense, en bon état physiologique, verte, qui contraste facilement avec les terrains alentour, plus secs et couverts d'une végétation moins dense même durant les pluies.

Cependant, les données de terrain sont le plus souvent indispensables pour délimiter exactement les lignes de rivages, 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. Ces données de terrain ont été acquises en grand nombre lors de survols du lac Tchad, et ont permis une grande sécurité dans l'interprétation des données Landsat du lac, sur lesquelles les différences de luminance sont parfois très faibles. Il n'en n'est pas de même en ce qui concerne les plaines d'inondation du Logone et du Chari, et ceci d'autant plus que les événements politiques du début de 1979 ont empêché les vérifications a posteriori sur le terrain. La comparaison d'images successives d'une même région, jointe à la connaissance générale que nous avons de la dite région, limite cependant les risques d'erreur d'interprétation.

PRESENTATION DES RESULTATS

Les images utilisées ne présentent pas toutes le même intérêt, et ne sont donc pas toutes reproduites dans ce rapport, qui tend au contraire à fournir une synthèse de l'interprétation des documents disponibles.

Pour les surfaces en eau du lac Tchad, nous reproduisons donc un certain nombre d'images, soulignant différents aspects particuliers du lac, qui peuvent fournir des éléments de décision quant à la mise en valeur ou à l'aménagement de la région.

Pour le reste de la région étudiée, une fiche signalétique indique, pour la plupart des images, les principaux éléments intéressant directement notre étude. Il est évident qu'il y a là une sous exploitation des données quand on sait que chaque scène comprend $7,3 \cdot 10^6$ points élémentaires, définis par des valeurs de luminance (8 bits) dans 4 canaux. Un complément important d'information est donc disponible dans le stock de données ainsi constitué au Bureau de Télédétection de l'ORSTOM.

ECHELLE

Les images, à l'échelle 10^{-6} (1 cm = 10 km) ont été reportées sur les cartes internationales du monde (publiées par l'IGN), dont les références sont données plus haut. La toponymie est celle de ces cartes. Nous avons souvent remarqué l'excellente concordance entre la limite

d'extension maximale des lacs et des plaines d'inondation telles qu'elles sont définies sur ces cartes, et les limites observées sur les images Landsat.

Il serait possible, en limitant considérablement la zone d'étude, de définir plus précisément, à partir des mêmes images, les limites eau-terre et les lignes de rivage à une échelle plus grande.

Les données contenues sur bandes magnétiques permettent un traitement et une cartographie automatiques, lorsque les instructions convenables d'interprétation ont été introduites dans les programmes. Ces instructions sont spécifiques pour chaque bande (et pour chaque date) et tiennent compte de la connaissance du milieu. Nous pouvons alors obtenir des cartes plus détaillées, présentées ici à l'échelle $4 \cdot 10^{-6}$, et qui, pour des zones plus restreintes, peuvent être agrandies à l'échelle 10^{-5} (voir carte hors texte).

CLASSIFICATION

Dans ce travail, la distinction est faite entre les eaux libres, où il n'y a pas (ou très peu) de végétation aquatique émergente, et les zones de marécages. Ces dernières sont définies par une végétation émergente dense, sans que l'on puisse estimer la profondeur de l'eau, qui peut varier de 4 m (dans le lac, par exemple) à 0 cm quand le terrain est uniquement fortement détrempé. Certains auteurs ont pu distinguer des zones de marécage ou d'eau libre plus ou moins profondes. Cela est peut être possible dans des régions de petites dimensions où la qualité de l'eau est partout la même. Or nous savons que, dans le Bassin Tchadien, l'eau des mares peut aller de l'eau fortement colorée par la matière organique dissoute, jusqu'aux suspensions d'argile, avec tous les types intermédiaires. Une telle variété empêche toute conclusion quand à la profondeur réelle d'un plan d'eau à partir des données Landsat.

II - LE LAC TCHAD

La période pour laquelle les données Landsat sont disponibles (1972-76) correspond à une phase d'évolution rapide du lac Tchad qui peut se résumer par les événements suivants :

- 1973 - baisse importante du niveau dans les 2 bassins, 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
 1976-76 - retour à un niveau normal dans la cuvette sud,
 remises en eau périodiques de la cuvette nord
 lors de l'arrivée des crues du Chari.

L'évolution de la morphologie du lac au cours de cette période a été décrite en détail (Carmouze, Chouret, Durand, 1973 ; Chouret-Lemoalle 1974, 1975 ; Chouret, Franc, Lemoalle, 1974 ; Chouret, 1977 ; Fotius, Lemoalle, 1976).

Les données de terrain ainsi acquises sont utilisées pour l'interprétation des images Landsat, sur lesquelles les limites entre l'eau et le sédiment exondé peuvent être ainsi déterminées exactement.

Le niveau de l'eau dans les 3 régions principales du lac à Kalom (eaux libres de la cuvette sud), à Bol (archipel de l'est) et à Kindjéria (cuvette nord) ont été rapportés au nivellement général de l'IGN. (Chouret, 1977) (figure 3). Nous pouvons donc suivre l'évolution du lac en fonction du temps, mais aussi en fonction du niveau de l'eau, ce qui conduira à préciser la courbe bathymétrique des différents bassins.

LES DONNEES UTILISEES

Les tableaux A 1, A 2 et A 3 résument les données disponibles et les données utilisées dans cette étude.

Afin d'exploiter au mieux les images disponibles, dont le centre peut varier d'une scène à l'autre, le lac a été divisé en plusieurs secteurs arbitraires (figure 4). La cuvette nord comprend les zones N1, N2, N3, ainsi que la partie septentrionale GB1 de la Grande Barrière. La cuvette sud est divisée en deux parties : la portion est de la Grande Barrière ainsi que le sud du lac, GB2, et la partie est du lac, E2. Rappelons que cette division, arbitraire, a pour seul but d'exploiter au mieux les chevauchements des différentes images.

Bien que le lac doive être considéré dans son ensemble, nous examinerons successivement les lignes de rivage des deux cuvettes, puis l'évolution des surfaces en eau.

LES LIGNES DE RIVAGE DU LAC TCHAD AU COURS DE LA BAISSÉ DU NIVEAU

a) La cuvette sud (path 198 et 199, row 51).

Des modifications importantes apparaissent au début de 1973, avec exondation progressive de la zone des îlots-bancs, exondation qui est presque totale fin avril (figures 5, 6 et 7). Dans le même temps, les fonds de bras de l'archipel, isolés de leur alimentation, voient leur surface et leur niveau diminuer de façon sensible (exemple, figure 15, à Bol, d'après des photos prises au cours de survols). Des îles se soudent les unes aux autres, formant de longs cordons dunaires (Yakoua, la presqu'île Kouloudia-Mélia en sont des exemples).

La partie sud du lac et la Grande Barrière s'assèchent aussi progressivement. La presqu'île de Makari dépasse largement les limites de la carte IGN dès le 01.11.72. Elle reste cependant stable jusqu'au 07.03.73, tandis que, dans la même période, se poursuit l'assèchement de toute la région des îlots-bancs et de la bordure sud de l'archipel.

Sur l'image (avec une couverture nuageuse importante) du 30.04.73, l'exondation de la frange sud de l'archipel est complète, avec l'apparition de nouveaux îlots en pleine eau comme Kofia, et les satellites de Kalom qui avaient disparu quelques années auparavant. A cette date, les sédiments au nord de Makari forment un banc continu en direction du nord, coupant la cuvette en deux, tandis que la Grande Barrière, couverte d'îlots marécageux en janvier 1973, voit ceux-ci prendre de l'importance (08.03.73) pour atteindre l'exondation complète en avril 73 (observation de terrain).

Le tracé exact de portions de ligne de rivage effectué au cours de survols mensuels à basse altitude, permet d'interpréter efficacement les images Landsat, dont le traitement photographique donné ici représente l'eau en noir, et les terrains exondés en blanc (échelle 10^{-6}).

b) La cuvette nord (path 199, row 50 et 51)

La physionomie normale de la cuvette nord est donnée par l'image du 27.09.72, avec deux zones d'eau libre : l'une au sud de N'Guigmi, dans le nord ouest, et l'autre dans le centre-ouest de la cuvette (figure 8).

Si l'on compare successivement les images du 27.09.72, du 08.12.72, du 31.01.73 et du 08.03.73, il n'apparaît pas de différence notable. Cependant, une comparaison entre septembre 1972 et mars 1973 (figure 7) indique une augmentation progressive des dimensions des îles et l'apparition de bancs de sable dans les deux zones d'eau libre précédemment indiquées. Cette progression se poursuit (06.06.73 et 23.06.73) jusqu'en octobre (10.10.73) où l'ensemble de la cuvette est parsemé d'îles sableuses, avec exondation de la Grande Barrière où toute la zone GB2, à l'exception d'une poche sur la côte ouest, est à sec.

A l'inverse de la cuvette sud, (figure 3) la baisse de niveau s'est poursuivie dans le nord en 1974 et 1975.

La première image disponible, après 1974, est celle du 07.03.75 (figure 9). Nous constatons que les limites de la cuvette ont reculé de 20 km vers l'intérieur du lac dans le nord et l'est, et de près de 10 km de la côte ouest, tandis que le nombre et la surface des îles ont considérablement augmenté par rapport à 1972.

En juin 1975 (figure 10) il ne reste que quelques mares dans l'ouest de GB1, avec un assèchement marqué devant l'embouchure de la Yobé et dans l'archipel au sud est de Baga Kiskra. Enfin, le 09.10.75 (figure 11) il ne reste que quelques mares autour de Kindjéria et devant l'embouchure de la Yobé (en crue).

Fin octobre 1975, un survol en avion permettait de constater l'assèchement total de la cuvette nord.

LES LIGNES DE RIVAGE DU LAC TCHAD APRES LES MINIMUMS DE NIVEAU OBSERVES

Les macrophytes émergents se sont développés sur tous les sédiments de la cuvette sud exondés en 1973, et sur une partie des régions asséchées de la cuvette nord entre 1974 et 1976. La différence entre les 2 bassins consiste aussi en une densité beaucoup plus forte de la végétation marécageuse dans la cuvette sud et la Grande Barrière (GB1 + GB2).

Alors que les macrophytes étaient rares, depuis 1972, lors de la baisse du niveau de l'eau, ils prennent ensuite une importance notable dans les images Landsat sur lesquelles il faut distinguer les terrains secs, les surfaces d'eau libre et les surfaces d'eau recouvertes

de marécages. Quelques images (figure 15) représentent les surfaces en eau libre de la cuvette sud. Ce sont pourtant les lignes de rivage de l'ensemble du système inondé qu'il importe de définir.

Dans la cuvette nord, alimentée épisodiquement en 1976 par des infiltrations à travers la végétation de la Grande Barrière, la nappe d'eau forme le plus souvent un plan incliné, la ligne de rivage en déplaçant parfois de 5 à 10 km par jour vers le nord, lors des remises en eau. Bien que décrivant exactement le lac à un instant donné, les scènes correspondantes ne peuvent servir à relier les surfaces en eau au niveau de l'eau à Kindjéria qui ne représente pas alors le niveau moyen dans la cuvette.

LA CUVETTE SUD (1974-78)

Après l'étiage de mai-juin 1973, les premières images disponibles sont celles de mai et juin 1975 (figure 13). Les surfaces (22.06.75) en eau libre correspondent assez exactement à la situation de juin 1973, à la différence que l'eau est maintenant présente dans toute la région recouverte de végétation, et, au total, semblable à la situation de février 1973 (figure 5). Les surfaces en eau libre représentent donc tous les points les plus profonds de la cuvette.

En octobre (08.10.75 et 09.10.75) la situation a peu varié en ce qui concerne les eaux libres, à l'exception de quelques mares dans la végétation le long de la Côte ouest, au sud de Baga Kawa.

Par contre, les images correspondant à la pointe de crue lacustre dans cette région (01.12.75 et 06.01.76) sont intéressantes (figures 15 et 16), car elles correspondent à une extension de l'eau supérieure à celle de 1973 : l'eau libre apparaît entre les marécages et la terre ferme, permettant ainsi une délimitation précise du nouveau rivage, pour un niveau équivalent à celui de décembre 1971. Le rivage dans le sud du lac est le même que celui de la carte IGN, depuis la pointe sud du lac (Meinari), jusqu'à Kouloudia, y compris la région d'Hadjer el Hamis qui retrouve sa position de presqu'île (figure 16).

L'image du 01.12.75 indique une région humide au sud de la ligne Kouloudia-Alkouk. Cette inondation passagère n'apparaît plus le 06.01.76 ni le 11.02.76. Par contre, nous constatons, entre décembre et janvier, une extension vers l'est de surfaces en eau libre dans l'archi-

pel à l'est de N'Garangou. Cette extension se stabilise entre janvier et février.

L'image du 29.05.76 (figure 17) indique bien la situation moyenne de la région en 1975-76, et permet, par le traitement effectué, de distinguer les eaux libres (permanentes), les zones de végétation (asséchées en 1973) et la ligne actuelle de rivage (limite entre le grisé et le blanc).

La dernière donnée disponible (08.08.78), bien que partiellement couverte de nuages, montre une constance de la surface des eaux libres de la cuvette sud, mais une diminution sensible de la densité des macrophytes aquatiques, diminution à peu près générale dans la cuvette. Enfin, sans doute à la suite de pluies abondantes et récentes, presque toute la surface comprise entre N'Djaména, Djermaya, Makari, Fotokol, et le sud de la route Kousseri-Fotokol, est inondée. Il n'y a pas de solution de continuité entre les eaux du nord du Yaéré et le lac Tchad.

LA CUVETTE NORD (1975-1976).

Après l'assec d'octobre 1975, la cuvette nord a été alimentée par les apports ayant percolé à travers la Grande Barrière. Le front des eaux avançant en direction du nord occupe une ligne reliant approximativement Malamfatori à Baga Kiskra, le 20.12.75. Une bande d'eau libre est visible le long de la côte ouest, tandis que les macrophytes de développent dans la zone inondée (07.01.76). Celle-ci progresse vers le nord au milieu de la cuvette et atteint 14°15' Nord le 25.01.76 (figure 12). L'avance des eaux se stabilise après le 19.03.76 (figure 13) la situation n'évoluant pas entre cette dernière date et le 24.04.76. A cette époque, les lignes de rivage et les surfaces en eau sont très sensiblement identiques à la situation du 07.03.75, au moins en ce qui concerne N1, N2 et N3. Nous pouvons donc considérer que la cuvette nord a effectué un cycle hydrologique en une année. Les observations ultérieures indiquent un assèchement en octobre 1976 semblable à celui qui avait été observé en 1975.

LES SURFACES EN EAU.

Le radiomètre multispectral du satellite Landsat ne permet pas toujours de distinguer de façon certaine les sédiments humides et les eaux turbides (Equipe Froilit, 1977). La connaissance du milieu, acquise au cours de missions fréquentes sur le terrain et par des sur-

vols mensuels à basse altitude, rend toutefois possible cette distinction qui porte sur de faibles différences de luminance en canal 7. Connaissant précisément une portion de ligne de rivage à une date donnée, nous avons ajusté l'exposition lors des tirages photographiques des images de façon à faire coïncider les rivages observés avec les rivages qui apparaissent sur les images présentées ici. Nous estimons que les risques d'erreur dans l'interprétation des images Landsat sont ainsi limités au maximum.

Un dernier ajustement a été fait lors du réglage de l'analyseur d'images, auquel on impose la limite entre la densité des gris des surfaces à mesurer et des surfaces à exclure. Il faut cependant remarquer que l'incertitude sur les surfaces en eau prend ici une importance particulière du fait du développement exceptionnel des lignes de rivage (îles comprises).

RESULTATS

La surface en eau des différentes zones du lac a été mesurée avec l'analyseur d'images Quantimet 720, qui paraît tout à fait adapté à ce problème. Les mesures ont été converties en km^2 au moyen d'une courbe d'étalonnage obtenue par la mesure de rectangles connus. Les résultats sont reportés dans le tableau A4 où sont également portés les niveaux moyens des différentes régions.

La figure 1§ représente les surfaces en eau en fonction du niveau dans les deux cuvettes nord et sud du lac Tchad, ainsi que leur volume (en pointillé) déterminé par planimétrie des courbes. La portion en tireté des courbes correspond aux évaluations faites lors de niveaux de l'eau plus élevés que ceux que nous avons observés (Toucheboeuf de Lussigny, 1969 ; Roche, 1973 ; Carmouze et al., 1973). La portion en trait plein représente le résultat des mesures effectuées ici.

Nous remarquons que la surface en eau totale (eau libre + marécages) le 29 mai 1976, dans la cuvette sud est de 5960 km^2 (mesurée en canal 5), soit sensiblement la même valeur, pour un niveau semblable, qu'en janvier 1973.

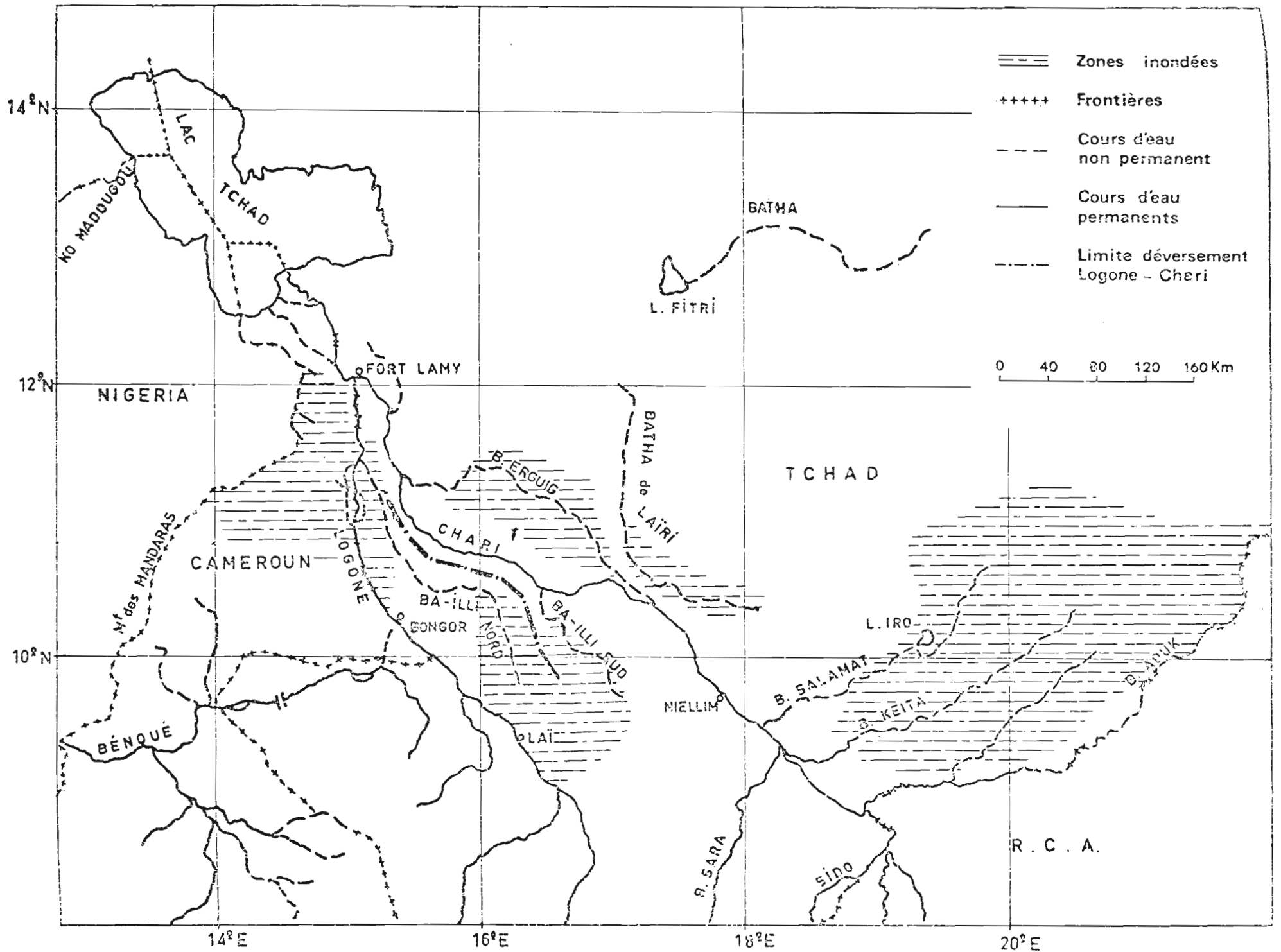
Les surfaces en eau, mesurées lors de la décrue du lac, sont dépourvues de végétation (Chouret, Lemoalle, 1974). Les données reportées ici correspondent donc aux surfaces vraies, à la différence des mesures obtenues plus tôt dans l'évolution du lac (Roche, 1973). D'autre part, on n'a pas tenu compte des scènes Landsat pour lesquelles le plan d'eau présente une pente importante (mars 1975 dans la zone GB1, au cours du déversement de la cuvette sud vers le nord) et occupe des surfaces sans rapport avec le niveau de l'eau. Il faut enfin souligner que les niveaux des deux cuvettes sont approximatifs du fait des vents et des crues fluviales : les vents saisonniers imposent à la surface des oscillations de période annuelle qui peuvent atteindre près des côtes une amplitude supérieure à 0,2 m (Roche, 1973 ; Chouret, Lemoalle, 1975 ; Chouret, 1977), la progression des ondes de crues des affluents (Chari, rivière Yobé) altèrent la planéité des surfaces d'eau.

La fréquence des données Landsat a été particulièrement utile pour suivre l'évolution des surfaces en eau après la sécheresse du Sahel en 1973 et 1975, période au cours de laquelle les variations ont été très rapides. Le rattachement des échelles au nivellement général (Chouret, 1977) permet de mieux définir les volumes et les surfaces d'eau pour les bas niveaux du lac. Il est notamment possible d'évaluer quels seraient les effets d'un transfert d'eau du sud au nord du lac lorsque les deux cuvettes sont séparées par l'exondation du seuil qui les sépare (ou par la végétation qui l'encombre), ou les effets de prélèvements d'eau pour l'agriculture.

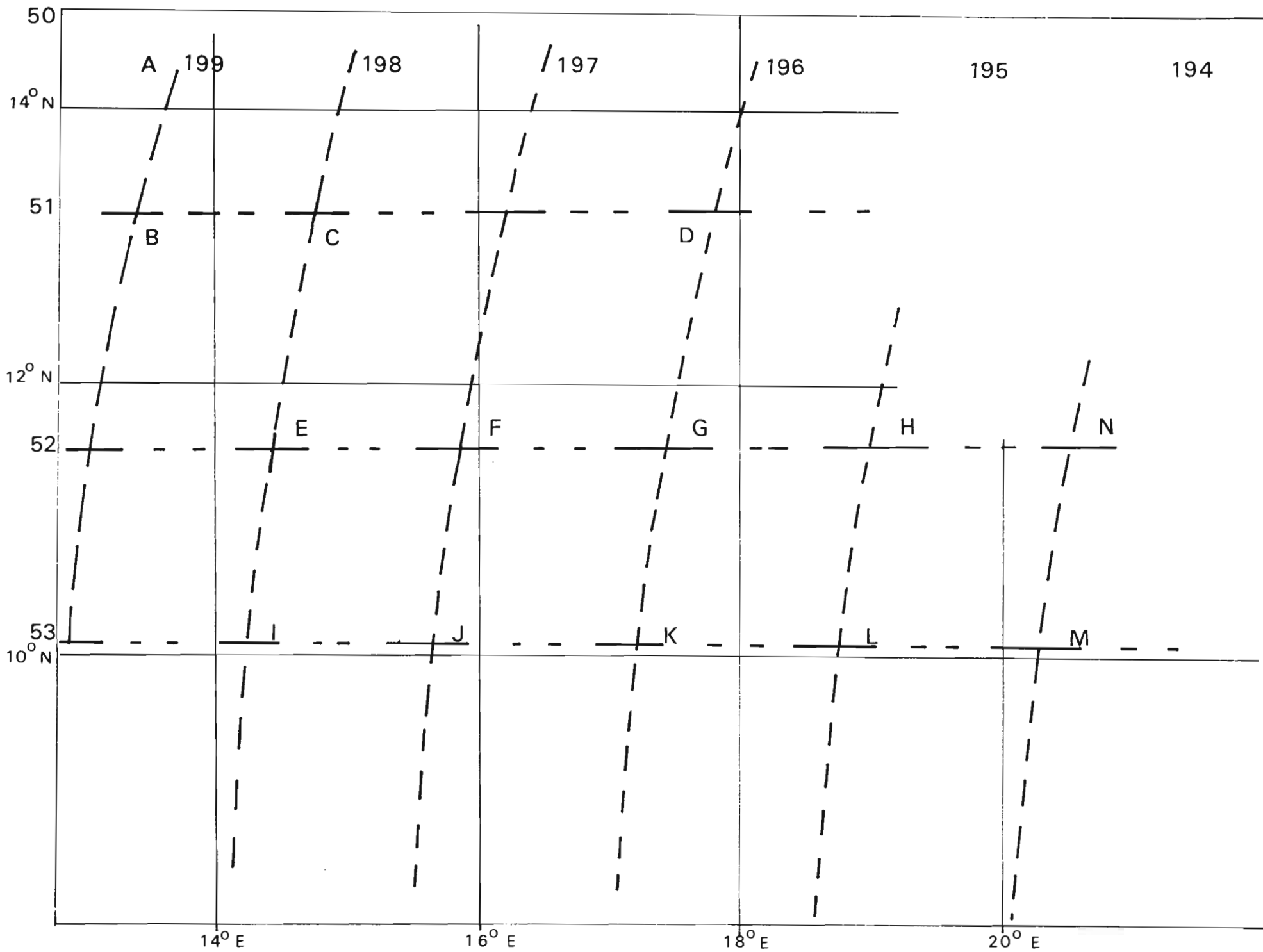
Il faut aussi tenir compte d'un fait nouveau dans l'utilisation prévisionnelle de la courbe bathymétrique : beaucoup de sédiments du lac (vases organiques, vases argileuses, argile molle), très riches en eau (Dupont, 1970) ont subi une rétraction de dessiccation importante lors de l'assèchement. Ainsi des affaissements locaux de l'ordre du mètre ont été observés dans les sédiments organiques de la région de Bol. Le phénomène n'étant que partiellement réversible (Dupont, 1970 ; Dupont, Fraquet, 1972), le niveau des fonds après la remise en eau est généralement plus bas qu'avant. Toutefois, sur l'ensemble de la cuvette sud et dans une grande partie de la cuvette nord, c'est précisément sur ces sédiments exondés qu'est apparue la végétation de macrophytes qui a modifié les passages du lac. A partir de 1976, la sédimentation et la décomposition de ces plantes contribue à relever ces fonds, compensant ainsi d'une façon mal connue l'affaissement constaté lors de l'assèchement.

FIGURES
CHAPITRE II. LE LAC TCHAD.

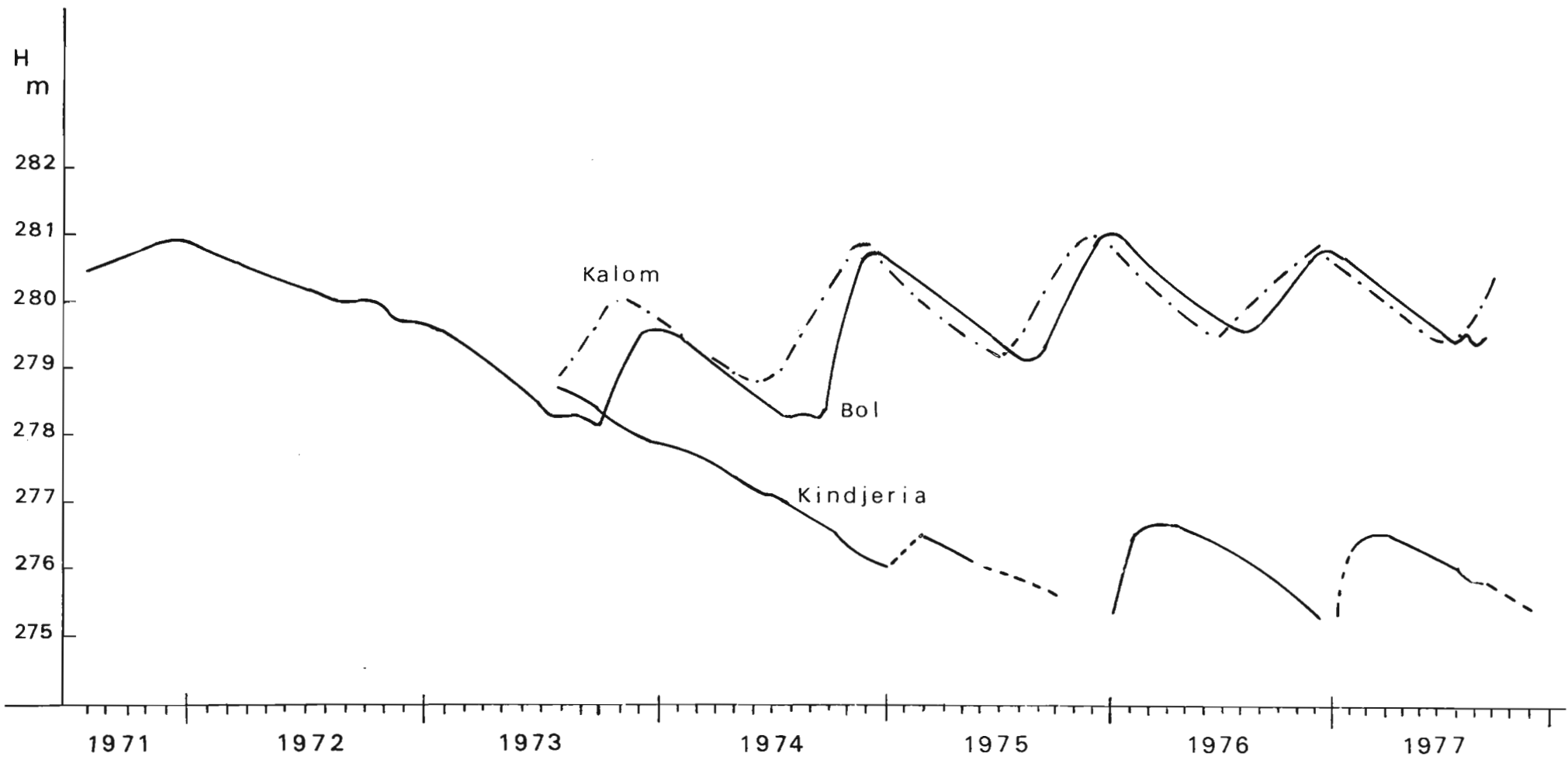
- 1 - Les grandes zones hydrographiques
- 2 - Centres des images Landsat, définis par leur trace (194 à 199) et leur rang (50 à 53).
- 3 - Niveau de l'eau dans les différents bassins du lac Tchad. Kalom : eaux libres de la cuvette sud ; Bol : archipel du sud-est ; Kindjéria : centre de la cuvette nord.
- 4 - Découpage du lac Tchad en secteurs arbitraires pour l'évaluation des surfaces en eau.
- 5 - Mosaïque d'images Landsat de janvier 1973. Echelle 10^{-6} .
- 6 - Cuvette sud le 17.02.73 (image Landsat)
- 7 - Mosaïque des surfaces en eau libre en mars 1973
- 8 - Eau libre dans le nord du lac le 27.09.72
- 9 - Partie occidentale du lac Tchad au 07.03.75
- 10 - Surfaces en eau libre du lac en juin 1975. la cuvette nord est en cours d'assèchement. Dans la cuvette sud, les marécages (non figurés) ont remplacé une grande part des surfaces qui étaient en eau libre en 1972.
- 11 - Mosaïque en octobre 1975. La cuvette nord est pratiquement à sec.
- 12 - Mosaïque en janvier 1976. Dans la cuvette sud, l'eau rejoint son rivage de 1972 en traversant les marécages. Dans la cuvette nord, le front de la crue progresse vers le nord.
- 13 - Nord et centre du lac le 19.03.76. La crue a gagné toute la cuvette nord, tandis que les marécages encombrant la partie méridionale de cette cuvette.
- 14 - Cuvette sud le 29.05.76. En noir les surfaces en eau libre, en grisé les marécages (qui correspondent à des surfaces inondées). Au total, la surface en eau est très semblable à ce qu'elle était en 1972. Les surfaces de marécages sont relativement stables et sont peu modifiées entre 1974 et 1979.
- 15 - Evolution de la surface en eau du bras de Bol, en 1973.
- 16 - Courbe bathymétrique du lac. En tireté, d'après les données de terrain disponibles. En trait plein d'après les données Landsat. En pointillé, volumes en eau estimés.

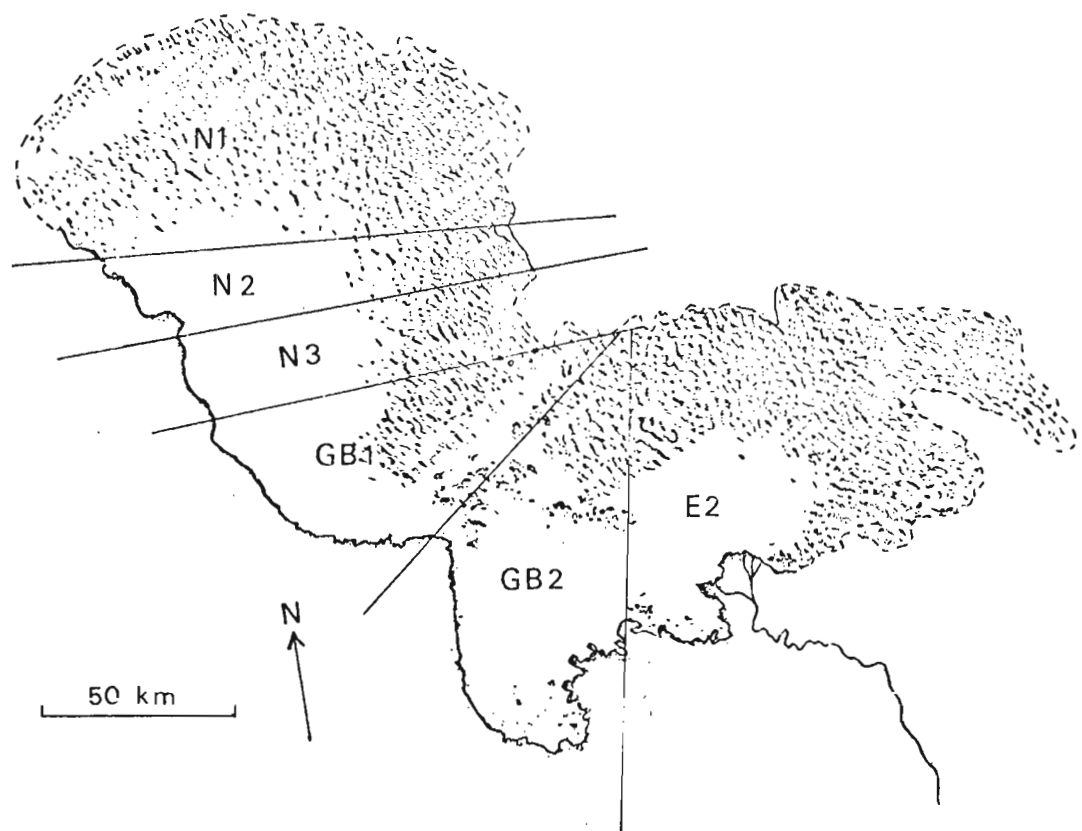


2) - Centres des images Landsat, définis par leur trace (194 à 199) et leur rang (50 à 53).



3) - Niveau de l'eau dans les différents bassins du lac Tchad. Kalom : eaux libres de la cuvette sud ; Bol : archipel du sud-est ; Kindjerai : centre de la cuvette nord.





4) - Découpage du lac Tchad en secteurs arbitraires pour l'évaluation des surfaces en eau.



5) - Mosaïque d'images Landsat de janvier 1973 - Echelle 10^{-6} .

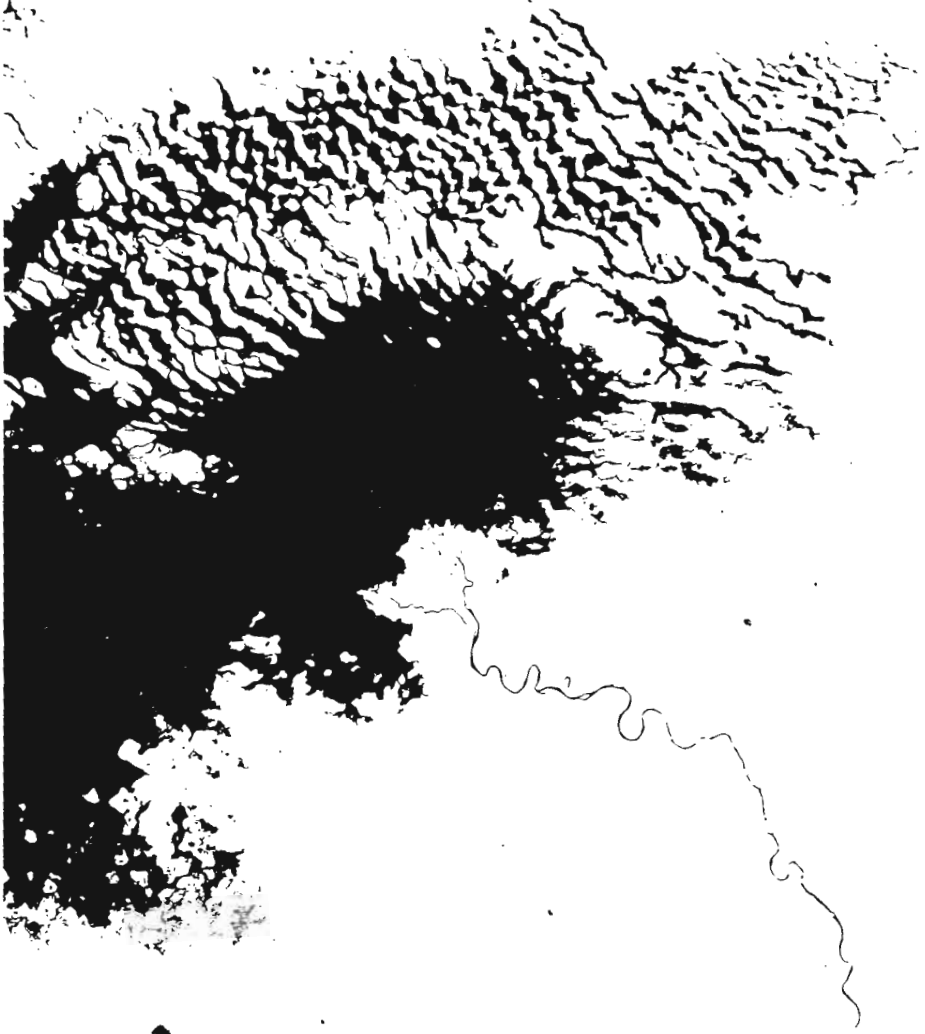
17FEB73 C N14-32/E015-15 N N14-28/E015-20 MSS 7 R SUN EL46 AZ125 188-2909-N-I-N-D-IL NASA ERTS E-1209-08512-7 02

E014-301
E014-301

IN014-00

E015-001

E015-301
[Redacted]



N13-06/E014-54 N N13-02/E014-59 MSS 7 R SUN EL46 AZ123 188-2909-N-I-N-D-IL NASA ERTS E-1209-08514-7 02

E014-301

IN012-30

E015-001

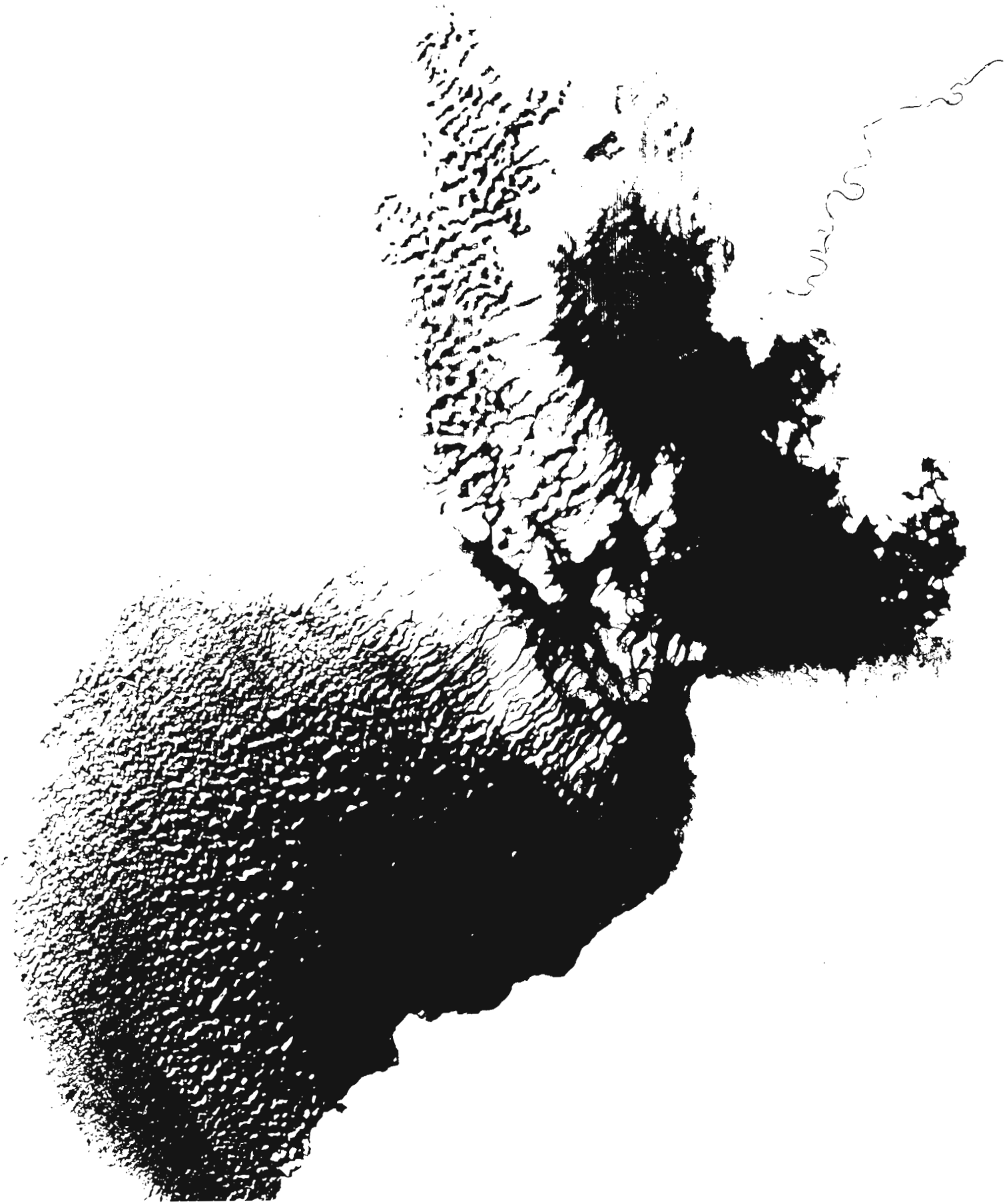
[Redacted]

6) - Cuvette sud le 17.02.73 (image Landsat)

20-0-001

20-0-001

20-0-001



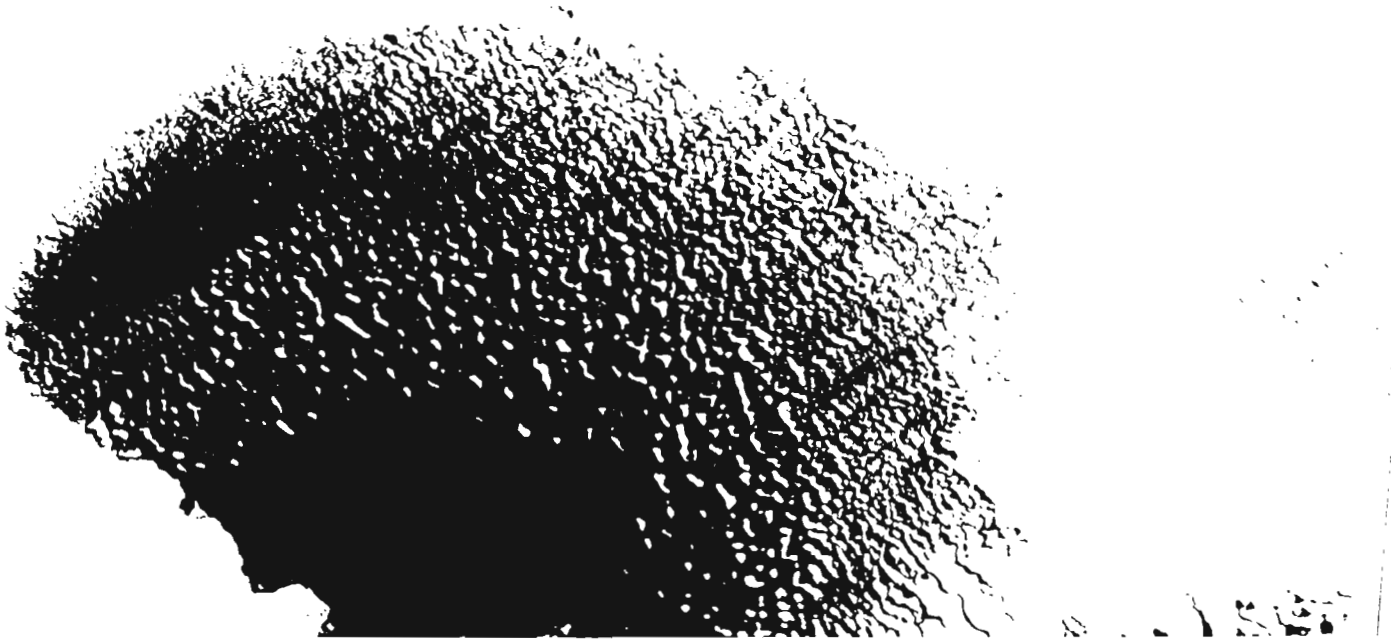
7) - Mosaïque des surfaces en eau libre en mars 1973.

E013-30 E014-001 E014-301 IN015-00
27SEP72 C N15-54/E014-20 N N15-53/E014-24 MSS 7 R SUN EL56 AZ118 188-0915-N-I-N-D-IL NASA ERTS E-1066-08553-7 1

E013-30

E014-001

E014-301



E013-301 E014-001 E014-301
27SEP72 C N14-28/E013-59 N N14-27/E014-03 MSS 7 R SUN EL56 AZ116 188-3915-N-I-N-D-IL NASA ERTS E-1066-08560-7 1

E013-00

E013-301

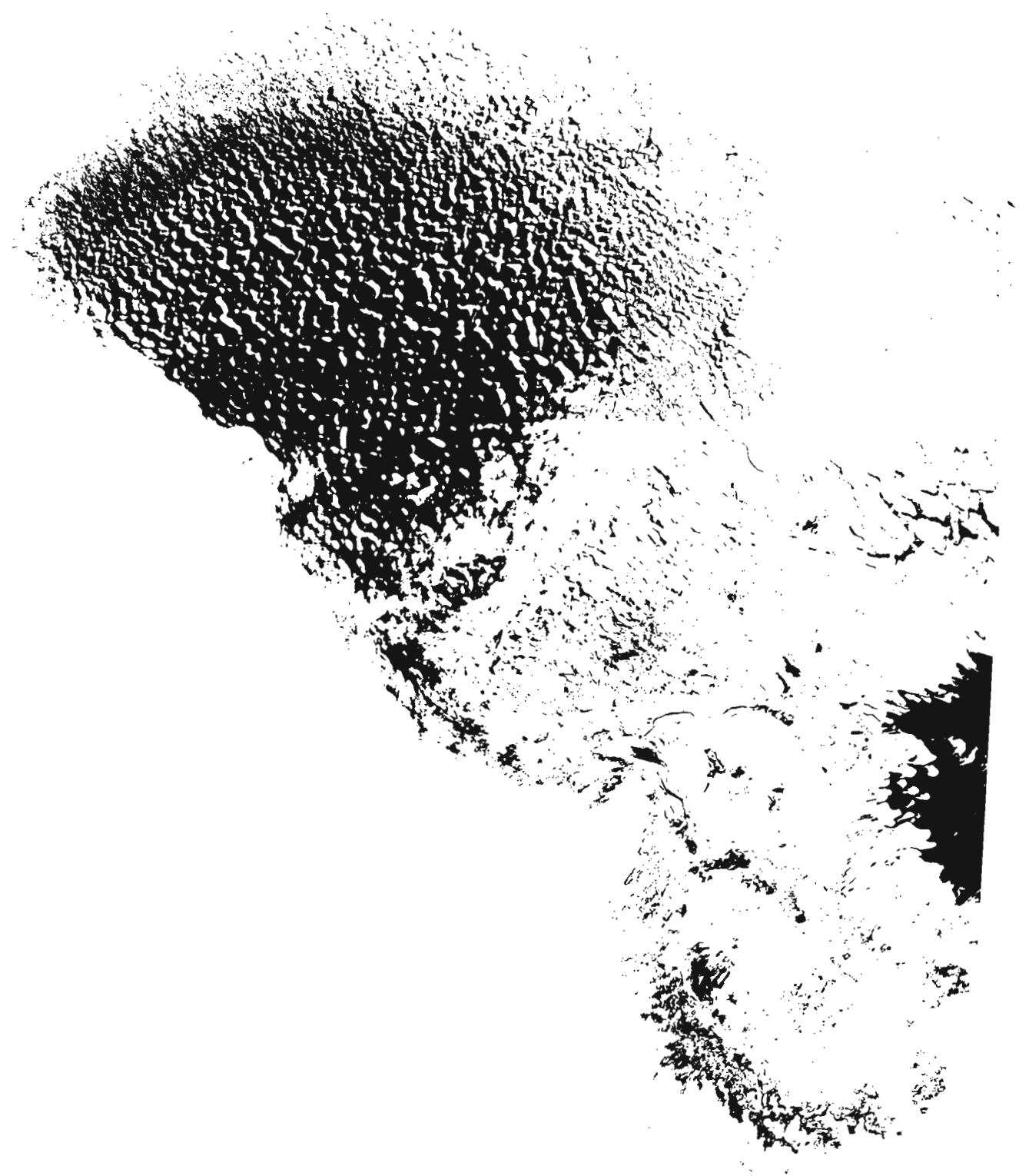
E014-001

E014-301

8) - Eau libre dans le nord du lac le 27.09.72

100-4-02-100-3-02

100-4-02-100-3-02



100-4-02-100-3-02

100-4-02-100-3-02

9) - Partie occidentale du lac Tchad au 07.03.75



10) - Surfaces en eau libre du lac en juin 1975. La cuvette nord est en cours d'assèchement. Dans la cuvette sud, les marécages (non figurés) ont remplacé une grande part des surfaces qui étaient en eau libre en 1972.

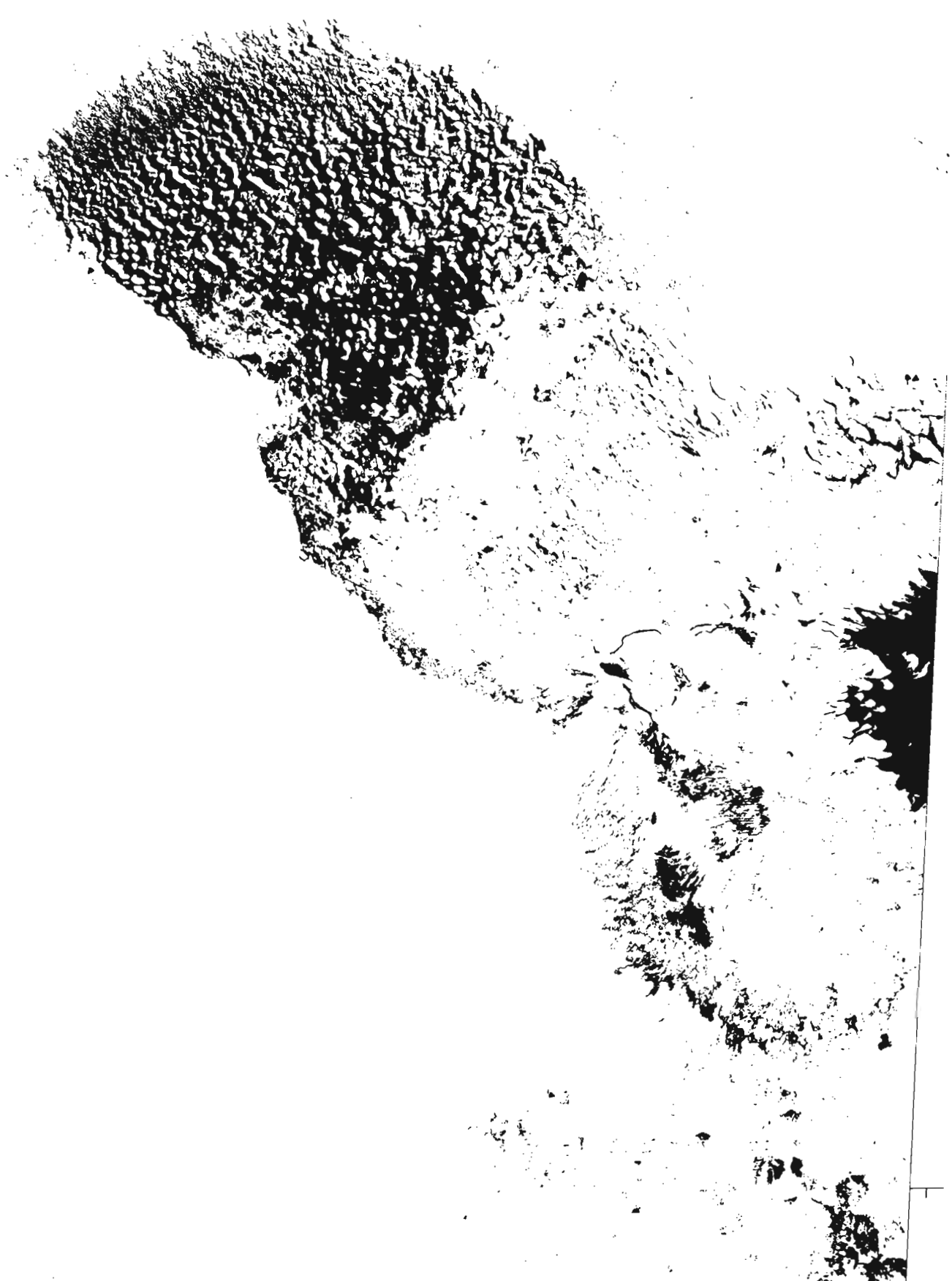


11) - Mosaïque en octobre 1975. La cuvette nord est pratiquement à sec.



12) - Mosaïque en janvier 1976. Dans la cuvette sud, l'eau rejoint son rivage de 1972 en traversant les marécages. Dans la cuvette nord, le front de la crue progresse vers le nord.

N 014 - 000



N 013 - 038

N 014 - 031

N 013 - 038

N 012 - 031

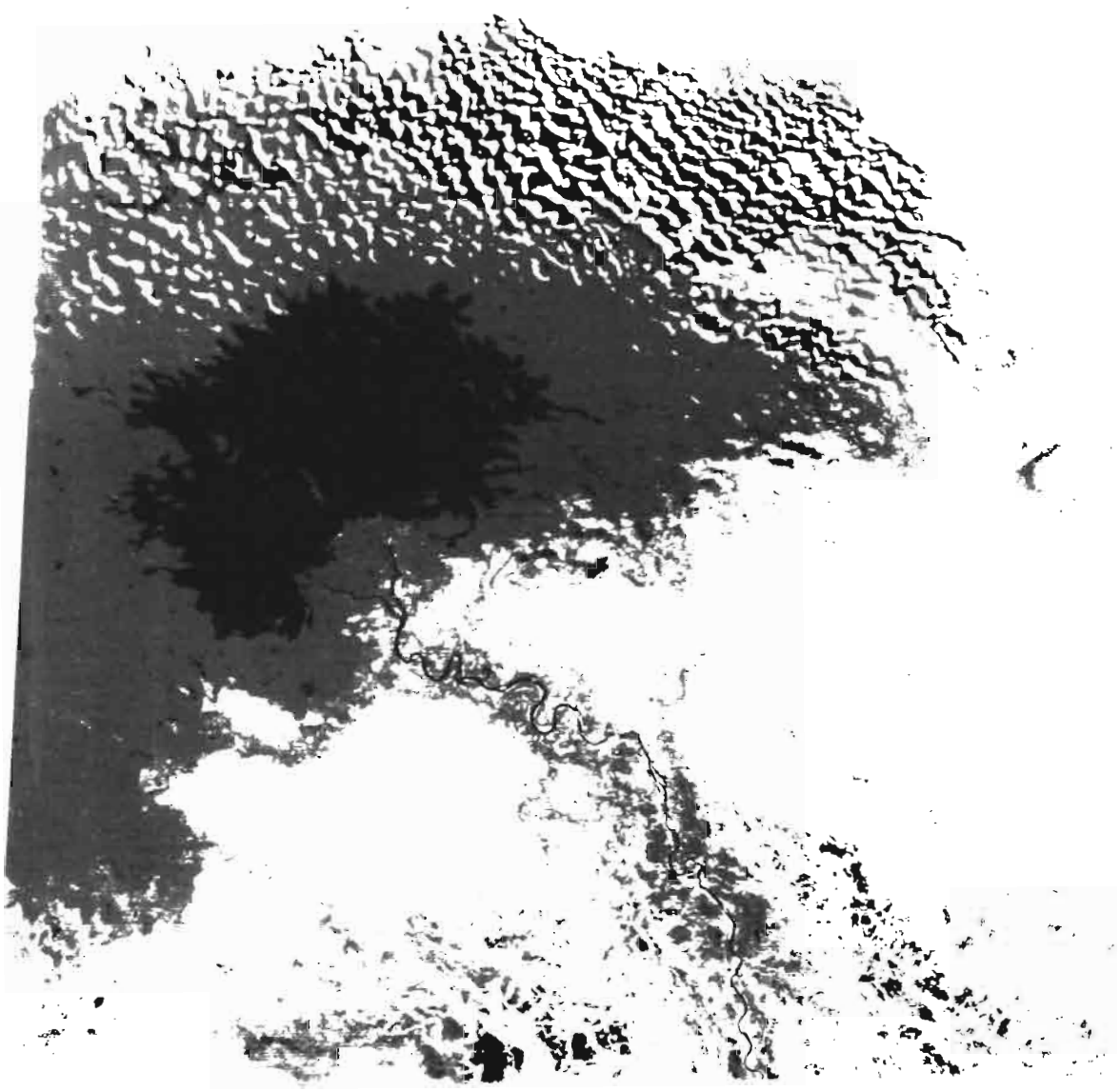
E013-001 ... E013-301 ... E014-001 ... 100-5070-G-1-N-D-11 ... NASA EPTS E-2422-08412-7 01

13) - Nord et centre du lac le 19.03.76. La crue a gagné toute la cuvette nord, tandis que les marécages encombrant la partie méridionale de cette cuvette.

1E014-30

E015-001

E015-301



1 N 0 1 3 0 0 8
1 N 0 1 3 0 0 1
1 8 0 1 N 0 0 1

1N012-30

E014-301

E015-001

E015-301

14) - Cuvette sud le 29.05.76. En noir les surfaces en eau libre, en grisé les marécages (qui correspondent à des surfaces inondées). Au total, la surface en eau est très semblable à ce qu'elle était en 1972. Les surfaces de marécages sont relativement stables et sont peu modifiées entre 1974 et 1979.

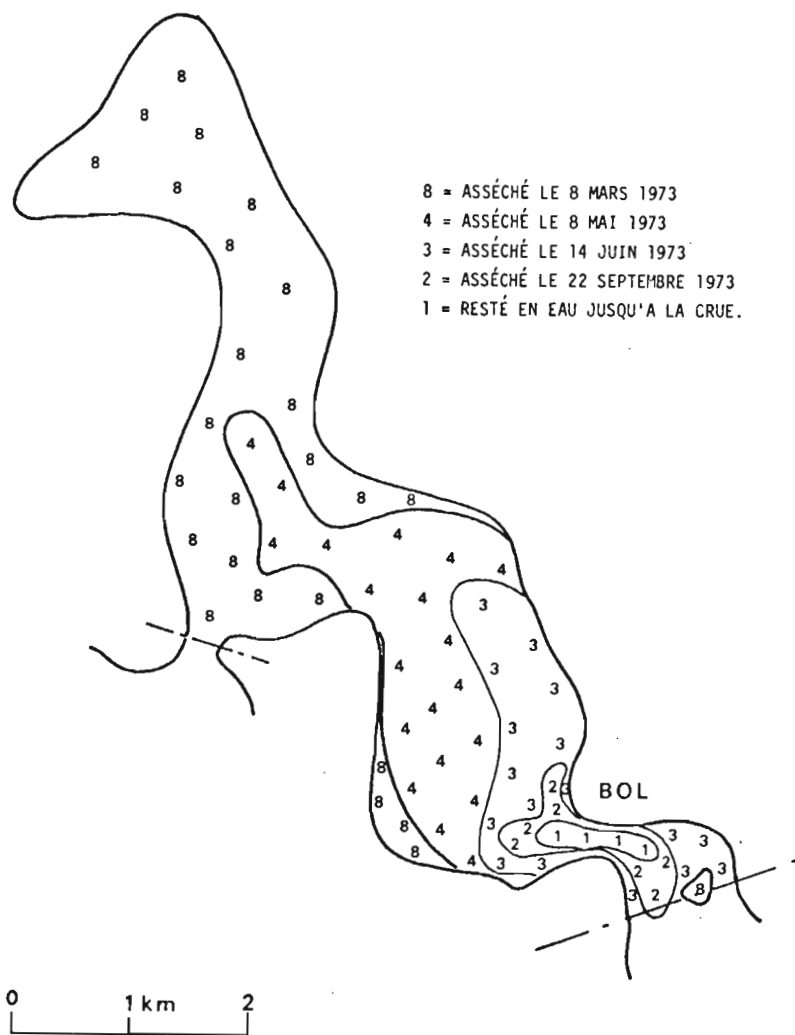
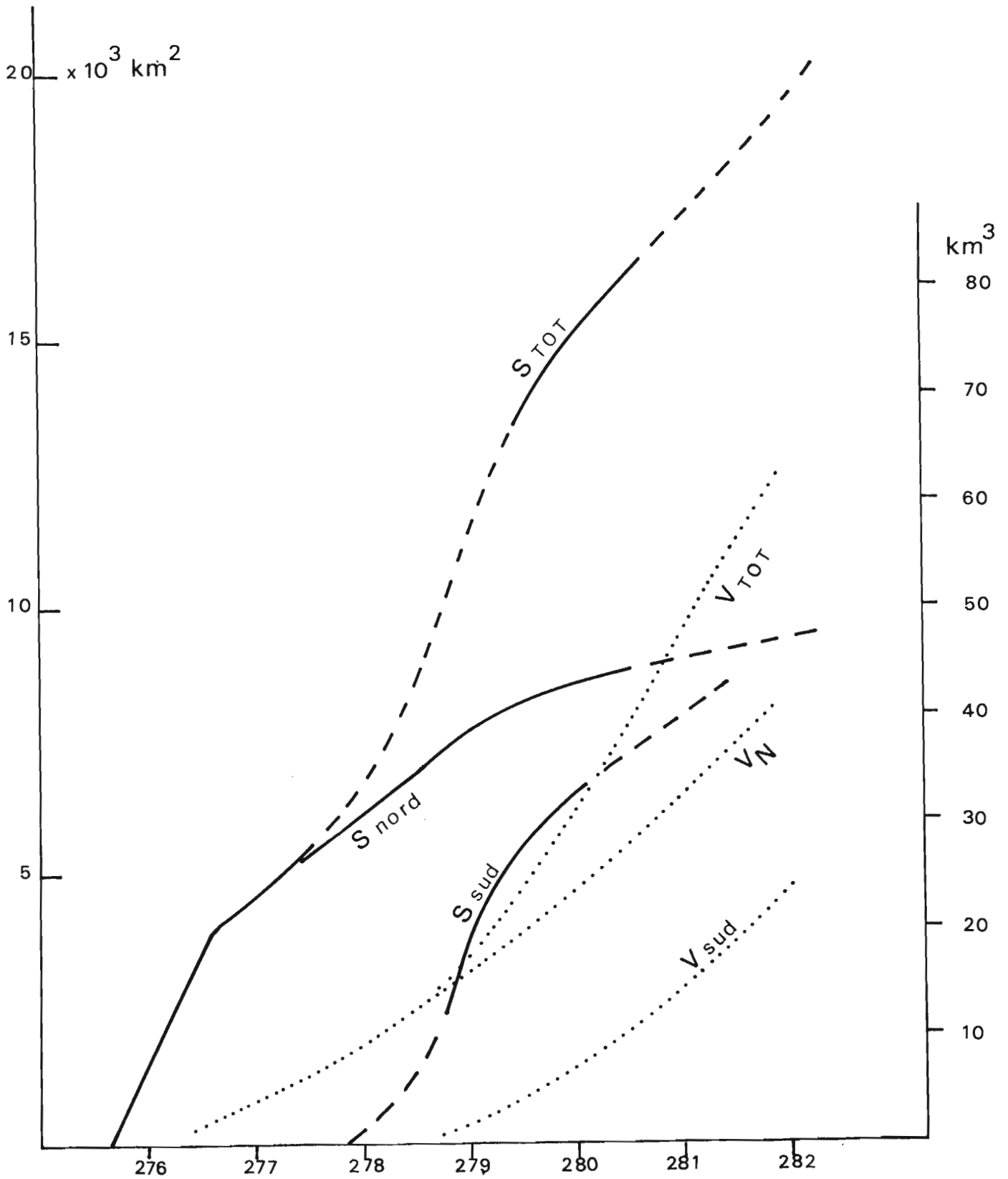


Figure 15 - Evolution des surfaces en eau dans le bras de Bol au cours de la baisse du niveau en 1973. Les lignes de rivage successives ont été déterminées lors de survols.

LAC TCHAD



16) - Courbe bathymétrique du lac. En tireté, d'après les données de terrain disponibles. En trait plein d'après les données Landsat. En pointillé, volumes en eau estimés. S = surface (km^2) des cuvettes nord, sud et totale. V = volume (km^3).

Tableau A 1

		1972					1973					1975					1976								
		J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
A	199 50		⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
B	199 51		⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
C	198 51				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
D	196 51		⊙	⊙			⊙			⊙								⊙							
E	198 52				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
F	197 52		⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
G	196 52		⊙	⊙			⊙			⊙								⊙	⊙						
H	195 52		⊙								⊙														
I	198 53		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
J	197 53		⊙				⊙			⊙				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
K	196 53		⊙	⊙			⊙											⊙	⊙						
L	195 53		⊙	⊙							⊙							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
M	194 53		⊙				⊙							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
N	194 52		⊙				⊙											⊙	⊙						

Les images disponibles (.) et les images utilisées ⊙

Tableau A 1

		1972					1973					1975					1976								
		J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
A	199 50		⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
B	199 51		⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
C	198 51				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
D	196 51		⊙	⊙			⊙			⊙									⊙						
E	198 52				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙					⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
F	197 52		⊙				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
G	196 52		⊙	⊙			⊙			⊙									⊙						
H	195 52		⊙							⊙															
I	198 53			⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙					⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
J	197 53		⊙				⊙			⊙				⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
K	196 53		⊙	⊙			⊙												⊙						
L	195 53		⊙	⊙						⊙				⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
M	194 53				⊙		⊙									⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
N	194 52				⊙		⊙												⊙						

Les images disponibles (.) et les images utilisées ⊙

Tableau A 2

LISTE des SCENES LANDSAT UTILISEES

Point	Path	Row	Identification	Date
A	199	50	81 066 085 605 N	27.09.72
			81 138 085 655 N	08.12.72
			81 192 085 645 A	31.01.73
			81 246 085 715 A	26.03.73
			82 044 084 515 N	07.03.75
			82 152 084 505 0	23.06.75
			82 260 084 335 0	09.10.75
			82 350 084 235 0	07.01.76
			82 368 084 225 0	25.01.76
			82 422 084 105 0	19.03.76
			82 458 083 955 0	24.04.76
			82 512 083 835 0	17.06.76
			B	199
81 138 085 725 A	08.12.72			
81 228 085 735 G	08.03.73			
81 444 085 505 A	10.10.73			
82 044 084 535 N	07.03.75			
82 134 084 525 0	05.06.75			
82 152 084 525 0	23.06.75			
82 170 084 515 0	11.07.75			
82 260 084 405 0	09.10.75			
82 332 084 315 0	20.12.75			
82 350 084 305 0	07.01.76			
82 422 084 125 0	19.03.76			
82 440 084 055 0	06.04.76			
C	198	51	81 101 085 125 N	01.11.72
			81 173 085 115 A	12.01.73
			81 209 085 145 N	17.02.73
			81 227 085 155 A	07.03.73
			81 281 085 155 N	30.04.73
			82 115 083 925 A	17.05.75
			82 151 083 945 A	22.06.75
			82 259 083 815 0	08.10.75
			82 313 083 735 0	01.12.75
			82 349 083 715 0	06.01.76

Point	Path	Row	Identification	Date
C	198	51	82 457 083 435 0	23.04.76
			82 493 083 345 0	29.05.76
			83 0156 08400	08.08.78
D	196	51	81 099 083 955 A	30.10.72
			81 189 083 955 N	28.01.73
			81 279 084 025 N	28.04.73
			82 023 082 825 N	14.02.75
			82 365 082 535 0	22.01.76
E	198	52	81 101 085 155 N	01.11.72
			81 173 085 135 A	12.01.73
			81 209 085 215 N	17.02.73
			81 227 085 215 A	07.03.73
			82 259 083 845 0	08.10.75
			82 313 083 805 0	01.12.75
			82 349 083 745 0	06.01.76
			82 385 083 715 0	11.02.76
			82 457 083 505 0	23.04.76
			82 493 083 405 0	29.05.76
			83 0156 08403	08.08.78
F	197	52	81 100 084 605 G	31.10.72
			81 172 084 555 A	11.01.73
			81 190 084 605 A	29.01.73
			81 208 084 625 A	16.02.73
			81 280 084 635 N	29.04.73
			82 024 083 435 A	15.02.75
			82 168 083 425 0	09.07.75
			82 294 083 235 0	12.11.75
			82 348 083 205 0	05.01.76
			82 456 082 915 0	22.04.76
G	196	52	81 099 084 025 A	30.10.72
			81 189 084 025 N	28.01.73
			81 279 084 045 N	28.04.73
			82 383 082 545 0	09.02.76
H	195	52	81 098 083 435 A	29.10.72
			81 278 083 505 N	27.04.73

Point	Path	Row	Identification	Date
I	198	53	81 101 085 215 N	01.11.72
			81 155 085 215 A	25.12.72
			81 173 085 205 A	12.01.73
			81 191 085 215 A	30.01.73
			81 227 085 245 A	07.03.73
			81 281 085 245 N	30.04.73
			82 259 083 905 0	08.10.75
			82 349 083 805 0	06.01.76
			82 403 083 705 0	29.02.76
			82 493 083 435 0	29.05.76
J	197	53	81 100 084 635 G	31.10.72
			81 172 084 615 A	11.01.73
			81 190 084 635 A	29.01.73
			81 280 084 655 N	29.04.73
			82 024 083 505 A	15.02.75
			82 276 083 315 0	25.10.75
			82 312 083 245 0	30.10.75
			82 348 083 225 0	05.01.76
82 456 082 945 0	22.04.76			
K	196	53	81 099 084 045 A	30.10.72
			81 189 084 045 N	28.01.73
			82 365 082 625 0	22.01.76
L	195	53	81 098 083 505 A	29.10.72
			81 116 083 515 A	16.11.72
			81 278 083 525 N	27.04.73
			82 130 082 315 N	01.06.75
			82 310 082 115 0	28.11.75
			82 346 082 055 0	03.01.76
			82 418 081 925 0	15.03.76
M	194	53	81 115 082 925 A	15.11.72
			81 205 082 935 A	13.02.73
			82 291 081 545 0	09.11.75
			82 345 081 515 0	02.01.76
			82 417 081 345 0	14.03.76
N	194	52	81 115 082 905 A	15.11.72
			81 205 082 915 A	13.02.73
			82 345 081 445 0	02.01.76

Tableau A 3
LISTE des BANDES NUMERIQUES DISPONIBLES

Path	Row	Point	Identification	Date
199	50	A	81 192 085 645 A000	31.01.73
199	51	B	81 192 085 715 A000	31.01.73
198	51	C	81 173 085 115 A000	12.01.73
			82 151 083 945 A000	22.06.75
			82 259 083 815 0000	08.10.75
			82 493 083 345 N000	29.05.76
198	52	E	81 101 085 155	01.11.72
			81 173 085 135	12.01.73
			81 209 085 215	17.02.73
			81 227 085 215	07.03.73
197	52	F	81 100 084 605	31.10.72

Tableau A4 - Surfaces en eau libre et niveaux moyens des différentes zones du lac.

Date	Surfaces						Niveaux	
	N1	N2	N3	G91	G82	S2	H nord	H sud
27. 9. 72	4010	1365	-	1900	-	-	280,3	280,1
8. 12. 72	3740	1365	1480	-	2780	-	280,0	279,8
12. 1. 73	-	-	-	-	-	3190	280,0	279,7
13. 1. 73	3815	-	-	-	-	-	280,0	279,7
31. 1. 73	-	1320	1500	1990	2875	-	279,7	279,6
17. 2. 73	-	-	-	-	-	2910	-	279,5
7. 3. 73	-	-	-	-	-	2625	-	279,3
8. 3. 73	-	1365	1290	1900	2350	-	279,5	279,3
26. 3. 73	3730	-	-	-	-	-	279,4	279,2
30. 4. 73	-	-	-	-	1100	2540	279,0	278,9
6. 6. 73	3280	-	-	-	-	-	278,6	278,7
10. 10. 73	-	-	1170	700	70	-	273,3	273,8
7. 3. 75	2670	790	710	(910)	1190	-	276,6	-
5. 6. 75	1685	280	140	45	140	-	276,0	-
22. 6. 75	-	-	-	-	-	1935	-	-
23. 6. 75	830	-	-	55	165	-	276,0	-
8. 10. 75	0	0	0	-	-	2220	275,7	-
9. 10. 75	0	0	0	45	270	-	275,7	-
1. 12. 75	-	-	-	-	-	2770	-	-
5. 1. 76	1125	-	-	-	-	-	-	-
11. 2. 76	-	-	-	-	-	2860	-	-
19. 3. 76	2920	-	900	470	1290	-	-	-
24. 4. 76	3580	-	-	-	-	-	-	-
29. 5. 76	-	-	-	-	-	2690	-	280,0

III - LES PLAINES D'INONDATION DU LOGONE.

Situation

Deux régions sont périodiquement inondées par les eaux du Logone : en aval de Laï, essentiellement sur la rive droite entre Chari et Logone, et en aval de Bongor, essentiellement sur la rive gauche. Cette dernière région constitue le Grand Yaéré du Nord Cameroun, et occupe aussi une certaine fraction du territoire Tchadien.

Ces plaines d'inondation sont recouvertes d'abord partiellement par les eaux de pluie, puis par les eaux de déversement des fleuves.

Les eaux du Chari restent presque entièrement contenues dans le lit majeur, car les berges sont élevées, avec un bourrelet bien marqué. Il ne crée donc pas de zone d'inondation au sens strict, mais par contre, le lit majeur atteint fréquemment 5 à 6 km de largeur.

Par contre, le mode d'écoulement du Logone inférieur est caractérisé par une dégradation du lit permettant des déversements latéraux et des émissions de défluents sur les deux rives. A la crue, le niveau des eaux du Logone est supérieur à celui des plaines avoisinantes, d'où des déversements quand les bourrelets de berge sont interrompus.

Sur la rive droite, (figure 1), les déversements ne sont notables que dans la région de Laï, et contribuent à l'inondation des plaines entre Logone et Chari. Ces eaux proviennent du Logone par le Ba - Illi du nord, qui prend naissance en aval de Laï, et des déversements latéraux le long du fleuve ; elles sont drainées par la N'Gourkoula qui rejoint le Logone à Logone Gana et contribue pour une part importante au débit du Logone en fin de crue. La Loumia et des bras secondaires font, par ailleurs, communiquer Chari et Logone mais les échanges d'eau sont négligeables.

Sur la rive gauche du Logone (figure 1), le défluent important est le Logomatia, qui se déverse dans le Grand Yaéré du Nord Cameroun et constitue l'essentiel de son alimentation fluviale. En moyenne, le Logomatia ne ramène au Logone que 25 des 140 m³/s qu'il y emprunte.

HYDROLOGIE DU GRAND YAERE

Les plaines à l'ouest du Logone sont, en année normale, alimentées successivement par les pluies, les mayos (ruisseaux) du versant nord-est du massif des Mandaras, et par les débordements du Logone. Sur la rive droite, seules les pluies et les débordements interviennent.

La plaine est extrêmement plate, interrompue seulement par des buttes, le plus souvent artificielles, sur lesquelles sont installés les villages Kotokos. Ces buttes et les bourrelets de berge portent les quelques arbres,

le reste de la végétation étant presque exclusivement herbacé. On trouve çà et là des dépressions qui restent en eau une partie de la saison sèche et qui, lors de l'inondation, restent dépourvues de végétation et représentent alors les voies de circulation possibles tandis que la plaine est encombrée d'herbes denses, et recouverte de 0,5 à 1 m d'eau.

Le régime d'inondation commence par les pluies, en moyenne en juillet ; un mois après, celles-ci ont fait monter le niveau de 20 à 30 cm. L'inondation du Logone ne se fait sentir que plus tard, en septembre - octobre. En décembre, les eaux se retirent, par l'El Beïd à l'ouest, par la N'Gourkoula à l'est, et en février les pistes sont à nouveau praticables.

L'El Beïd a un lit bien marqué, de 40 à 60 m de large, et ne contient à l'étiage que quelques mares (d'avril à juillet). En août et septembre parviennent les premiers ruissellements des yaérés. Le maximum de la crue se produit en décembre à Fotokol (poste frontière avec le Nigéria), à 20 km du lac. L'El Beïd déborde alors largement de son lit. La décrue dure alors jusqu'à la fin du mois de mars. D'après Billon (1965) "on peut estimer que sur une longue période les volumes annuels de l'El Beïd sont de l'ordre de $1,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ". Les apports des mayos du Nord Cameroun sont environ 10 fois moindres, ce qui est négligeable comparé aux déversements du Logone (10^9 m^3 environ) et surtout aux précipitations : 500 à 700 mm sur environ 5000 km^2 , soit environ $3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

LE GRAND YAERE EN 1972-73

La période 1972-73 correspond à une sécheresse particulièrement sévère, durant laquelle les précipitations, ainsi que les crues fluviales, ont été particulièrement faibles.

Début novembre 1972, la vallée du Logone entre Katoa et Logone Gana est inondée sur une largeur de 30 km environ. Vers le nord, l'inondation prend la direction de l'El Beïd. Des zones humides, résultant probablement des pluies, s'étendent à l'ouest jusqu'à Waza, et à l'est vers le Chari (figure 17).

En janvier, la zone humide (notée en noir figure 18) s'avance jusqu'à Tildé, sans toutefois se traduire par un écoulement notable dans le lit mineur de l'El Beïd. Les zones de végétation, encore humides, ne sont pas plus étendues qu'en novembre. L'ensemble de la région s'assèche ensuite rapidement, et il ne reste plus, le 17 février, qu'une faible surface encore verte, qui subsistera encore en mars (figure 19).

Nous pouvons considérer que la situation qui vient d'être décrite représente un cas extrême de sécheresse dans le Grand Yaéré. La zone vraiment inondée est limitée, dans son extension maximale, aux régions délimitées en noir et par (V + E) dans la figure 18 représentant la situation le 12.01.73.

LE GRAND YAERE EN 1975-76

Si l'on considère que les déversements du Logone vers les plaines d'inondation se produisent à partir de la cote 400 à l'échelle de Bongor, ces déversements ont eu lieu du 6 septembre 1975 au 30 octobre (figure 20).

La scène du 08.10.75 correspond donc à la phase remplissage du yaéré, après les pluies qui ont été marquées par un ruissellement de l'El Beïd à Fotokol, en septembre (figure 21).

La zone inondée au 08.10.75 est représentée figures 22 et 23. Une autre région de forte humidité, probablement également inondée, est située au Nigéria, autour du Yedseram, au nord de Dikwa. Cette scène pourrait être utilisée pour localiser un certain nombre de buttes dans les yaérés. On distingue en effet les buttes de Zina, Ngaouni, Hinalé, Tchédé, et de nombreuses autres.

La végétation herbacée couvre l'ensemble de la scène, à l'exception des régions au nord de N'Djaména et de Maltam, où les pluies semblent mieux drainées par les marigots résiduels de deltas anciens. Dans le yaéré, la végétation est peu dense.

A la date du 01.12.75, une bande de nuages sur l'axe N'Djaména - Maroua gêne un peu la détermination de la limite ouest du yaéré.

L'eau est arrivée au nord de celui-ci, coule par l'El Beïd qui limite l'extension vers le nord d'une grande zone marécageuse où les macrophytes sont relativement peu denses. La rive gauche du Chari présente des régions non inondées, tandis que la vallée centrale du Logone (de Katoa à Logone Gana, sur une trentaine de km, de largeur) est la zone où la végétation est plus dense (figure 24). Le marigot qui relie Logone Gana à Kalgoa, que nous appelons la Loumia (et qui n'a pas de dénomination sur la carte IGN), est bien marqué.

Début janvier 1976 (06.01.76), les régions inondées de l'El Beïd ont le même aspect, tandis que la végétation sur terrain humide semble un peu plus étendue vers l'aval, notamment dans la vallée de la Loumia (figure 25). Les fleuves ont regagné leur lit mineur.

En février (11.02.76) une bande nuageuse sur le Logone permet juste de constater un reste de végétation le long de l'El Beïd vers Fotokol, et dans la partie nord du yaéré, qui a été la dernière inondée.

L'image de mai 1976 (29.05.76) correspond à une période de couverture végétale minimale, sauf en quelques endroits où une végétation peu dense représente vraisemblablement l'effet de pluies récentes et localisées. Les données contenues dans cette scène pourraient sans doute permettre de préciser dans le détail les cartes pédologiques de la région.

CONCLUSION

Les images de 1975-76 permettent d'évaluer les limites d'extension maximale du yaéré en année normale. Du fait du déplacement de l'onde de

crue à travers cette grande étendue relativement plate, ces limites ne sont pas toutes atteintes au même moment. L'ensemble des zones inondables est donné figure 26. Remarquons que ce sont là les régions dont l'inondation est l'effet de la combinaison des pluies et des déversements fluviaux. Les zones qui sont inondées ou détrempées par les pluies s'étendent plus à l'ouest, mais n'ont pu être définies exactement faute de données. Nous pensons qu'au cours d'une année d'hydraulicité particulièrement forte, la chronologie de l'inondation serait modifiée, mais que son extension resterait sensiblement identique.

FIGURES

CHAPITRE 3 - LE GRAND YAERE

- 17 - Le grand yaéré le 01.11.1972. H indique les zones humides sans végétation bien développée. V et E indiquent les régions de végétation et d'eau libre. Echelle 10^{-6} .
- 18 - Le grand yaéré le 12 janvier 1973. La zone en noir indique une forte humidité sans végétation. Les zones humides se sont étendues par rapport à novembre 1972.
- 19 - Les fleuves sont peu marqués. Seule une végétation subsiste dans les zones indiquées.
- 20 - La crue du Logone à l'échelle de Bogor pour les deux périodes étudiées.
- 21 - Le niveau de l'El Beïd à Fotokol (frontière Cameroun-Nigéria).
- 22 - Zones en eau (noir) et inondées (pointillé) le 8 octobre 1975. Le Chari occupe son lit majeur.
- 23 - Image Landsat (négatif, canal MSS7) montrant les zones d'inondation où l'eau est peu encombrée de végétation.
- 24 - Zones en eau libre (noir) et inondées (gros t eté). Il reste des zones hors d'eau sur la rive gauche du Chari (S), tandis que la moyenne vallée du Logone est fortement inondée, avec de la végétation (pointillé fin)
- 25 - Début janvier 1976, la zone de forte végétation s'étend tandis que les eaux continuent de gagner le lac.
- 26 - Les zones inondables du grand yaéré. S indique les zones qui restent hors d'eau.

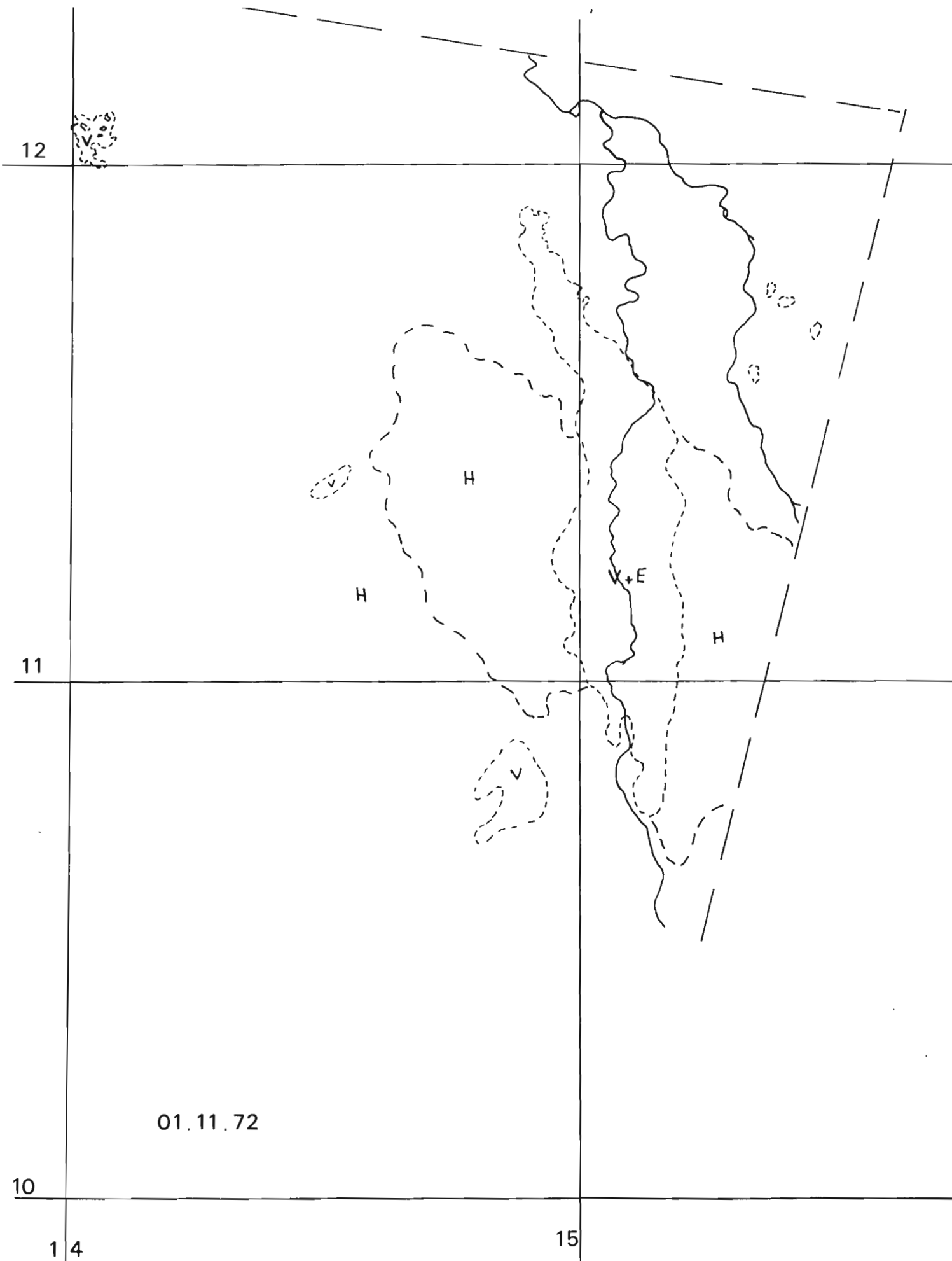


FIGURE 17

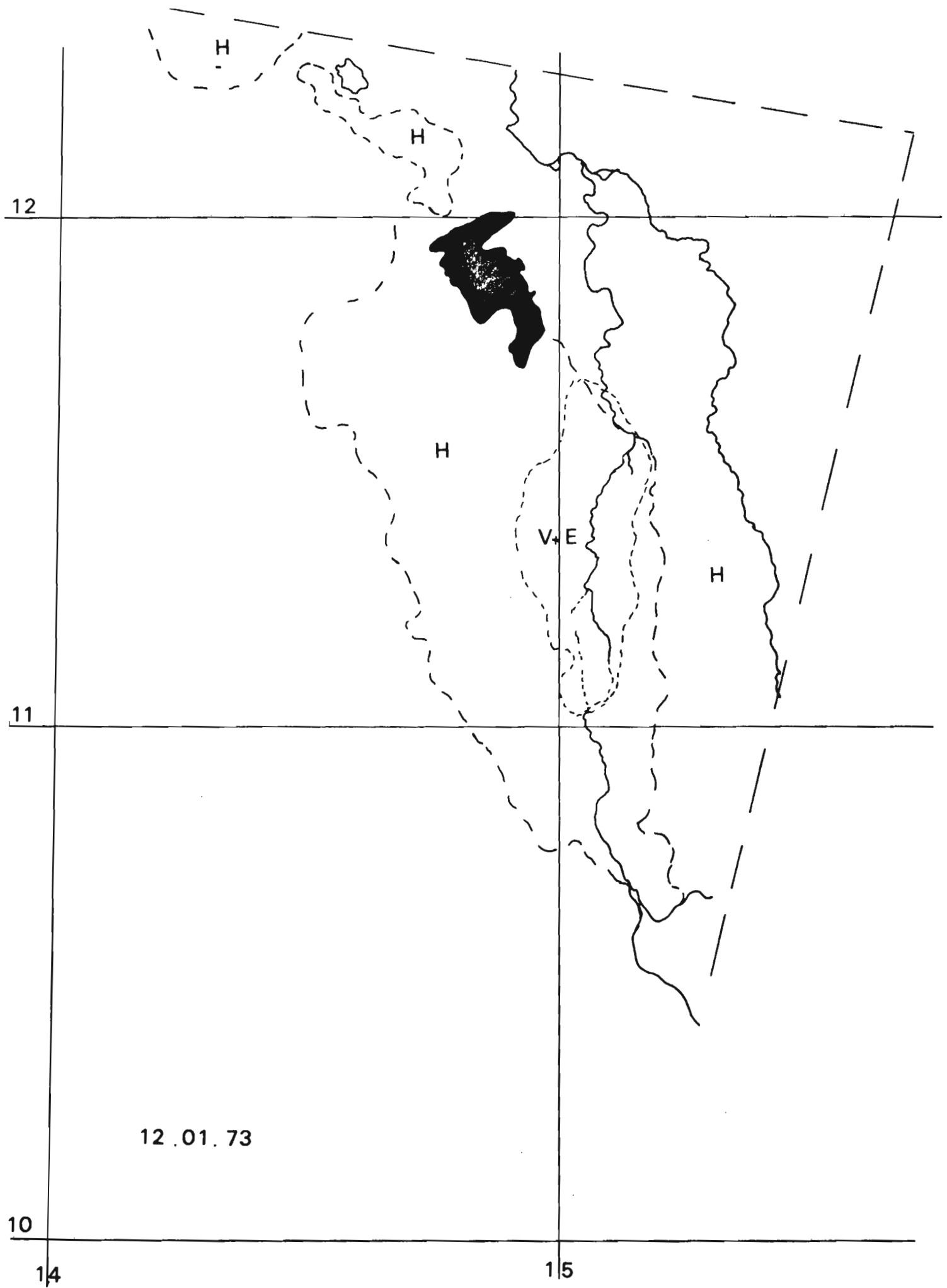


FIGURE 18

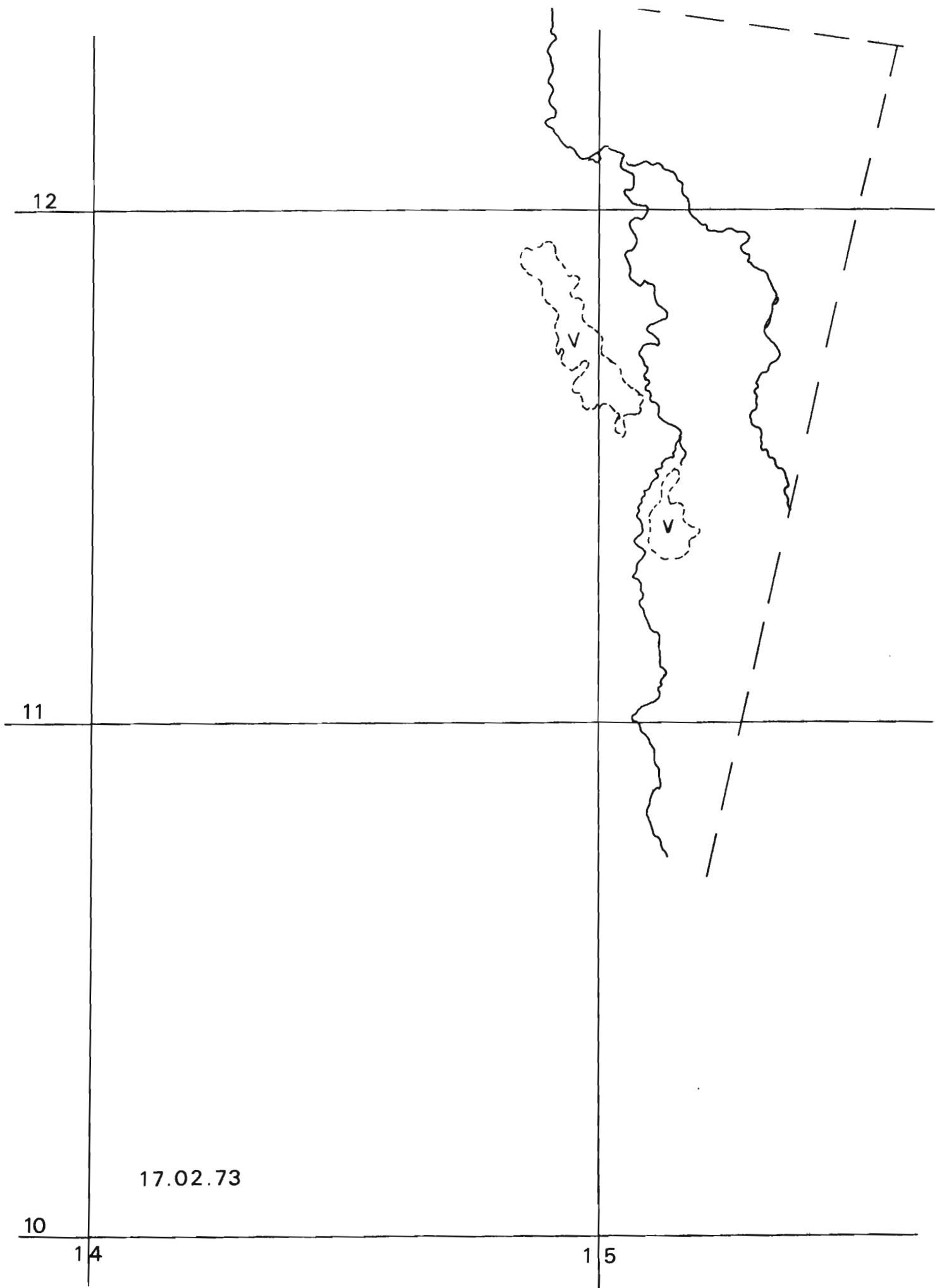
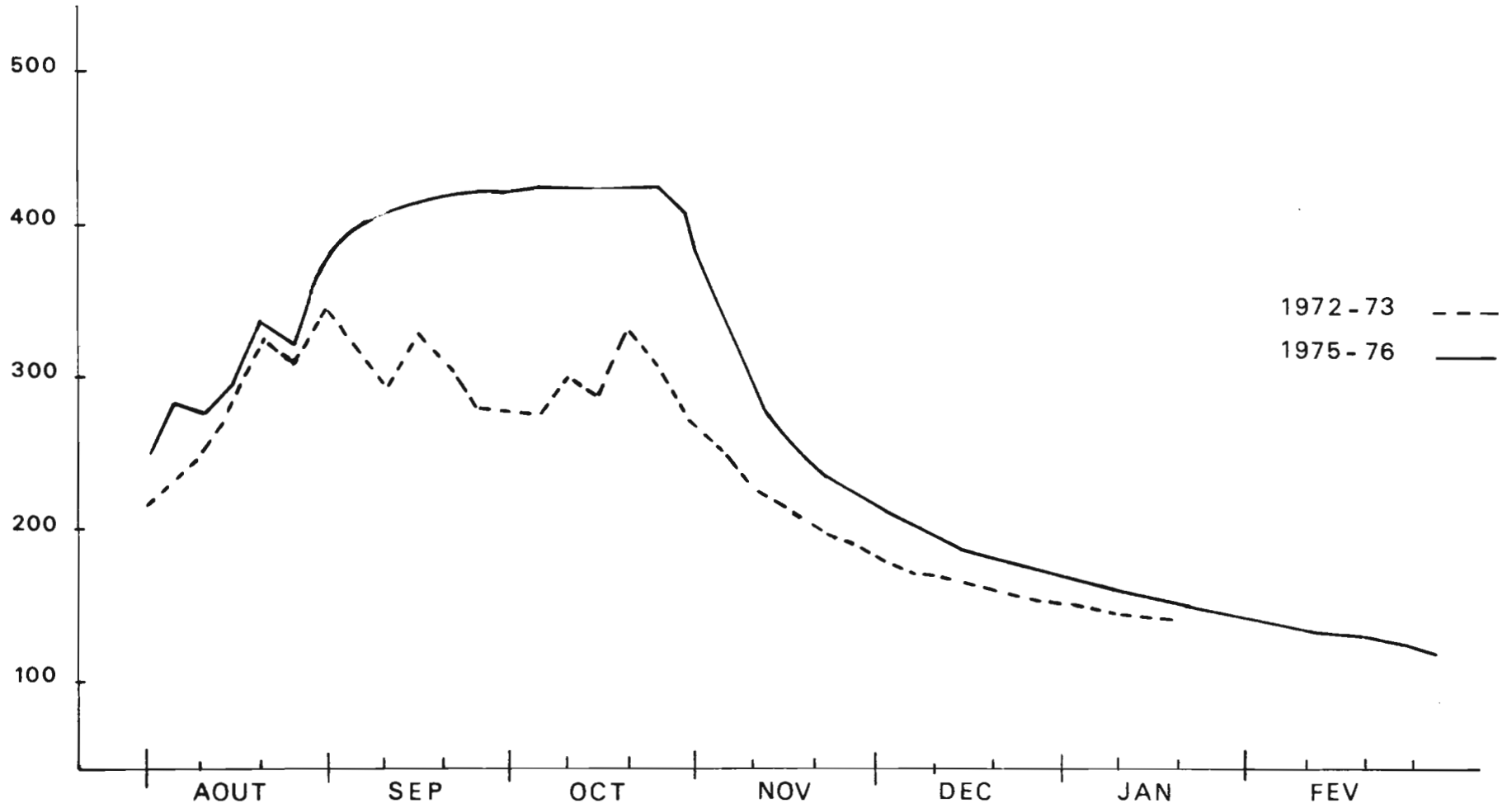


FIGURE 19

Echelle de crue - BONGOR

FIGURE 20



Echelle de crue - EL BEID

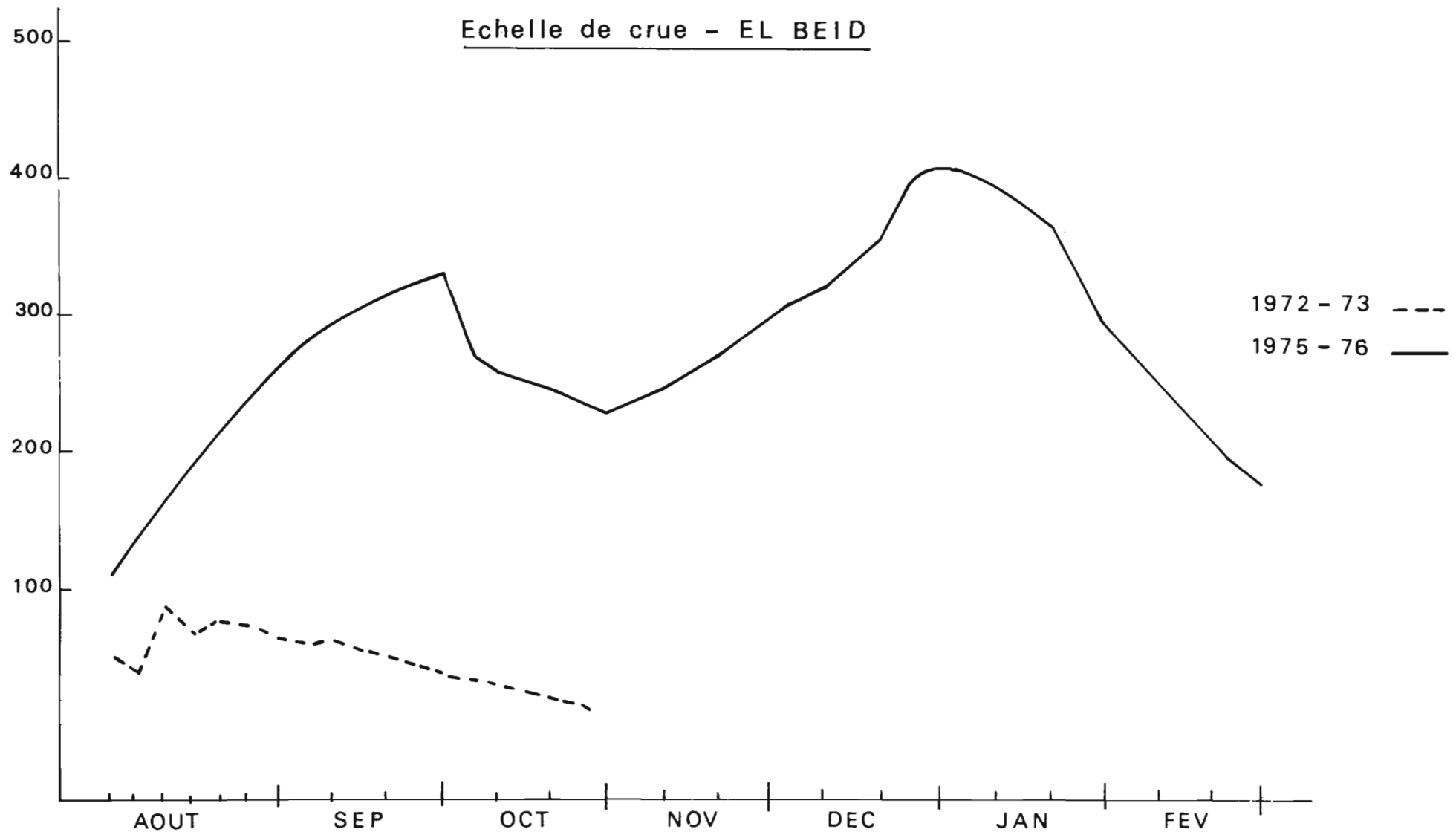


FIGURE 21

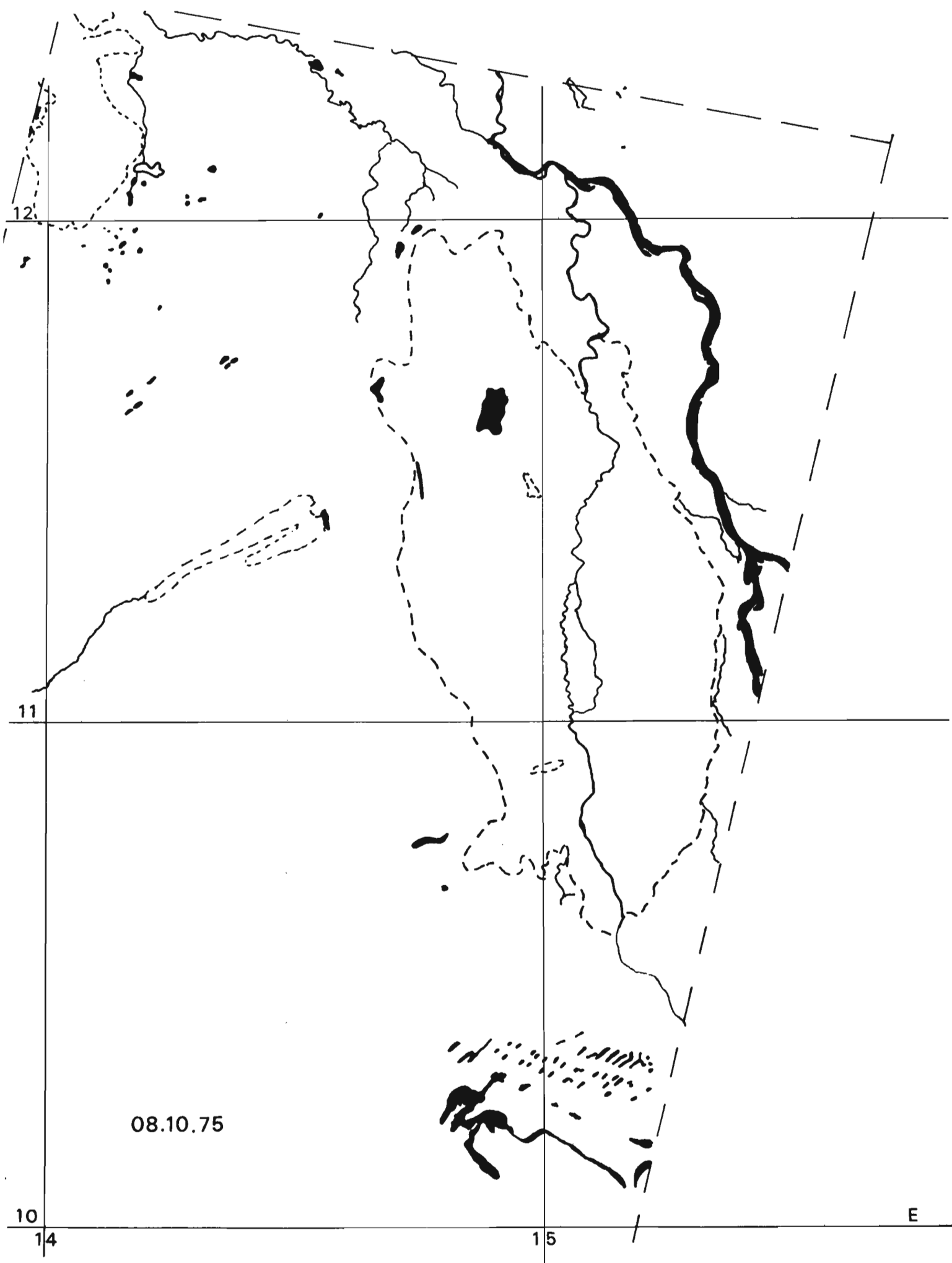
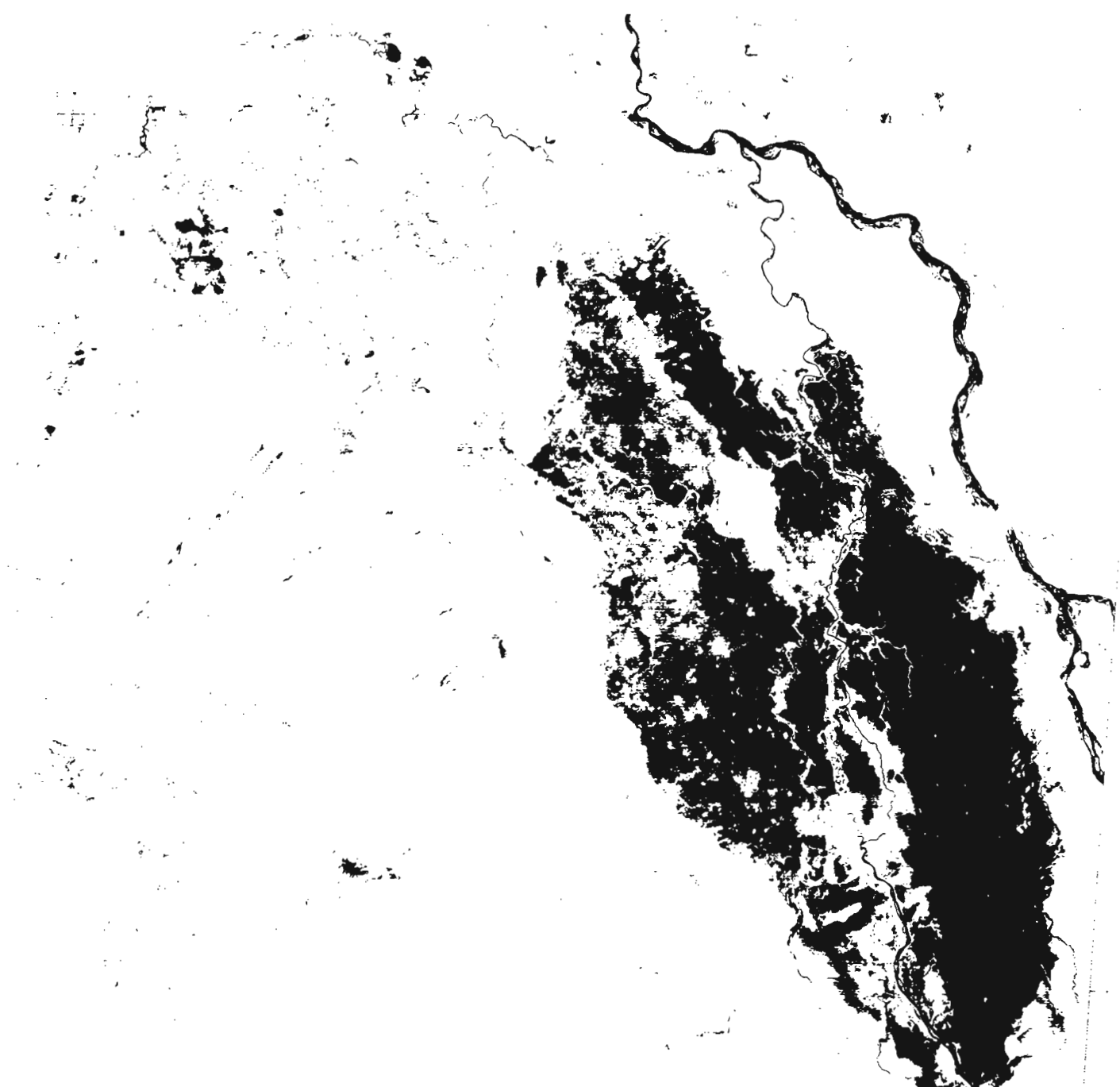


FIGURE 22

1500 N 02
1000 N 02
500 N 02



E014-001
2800775 C N 32/E014-41 N N 32/E014-45 MSS

E014-301
7 R SUN EL53 RZ116 188-3606-N-1-N-D-IL NASA ERTS E-2259-08384-7 01

E015-001



FIGURE 23

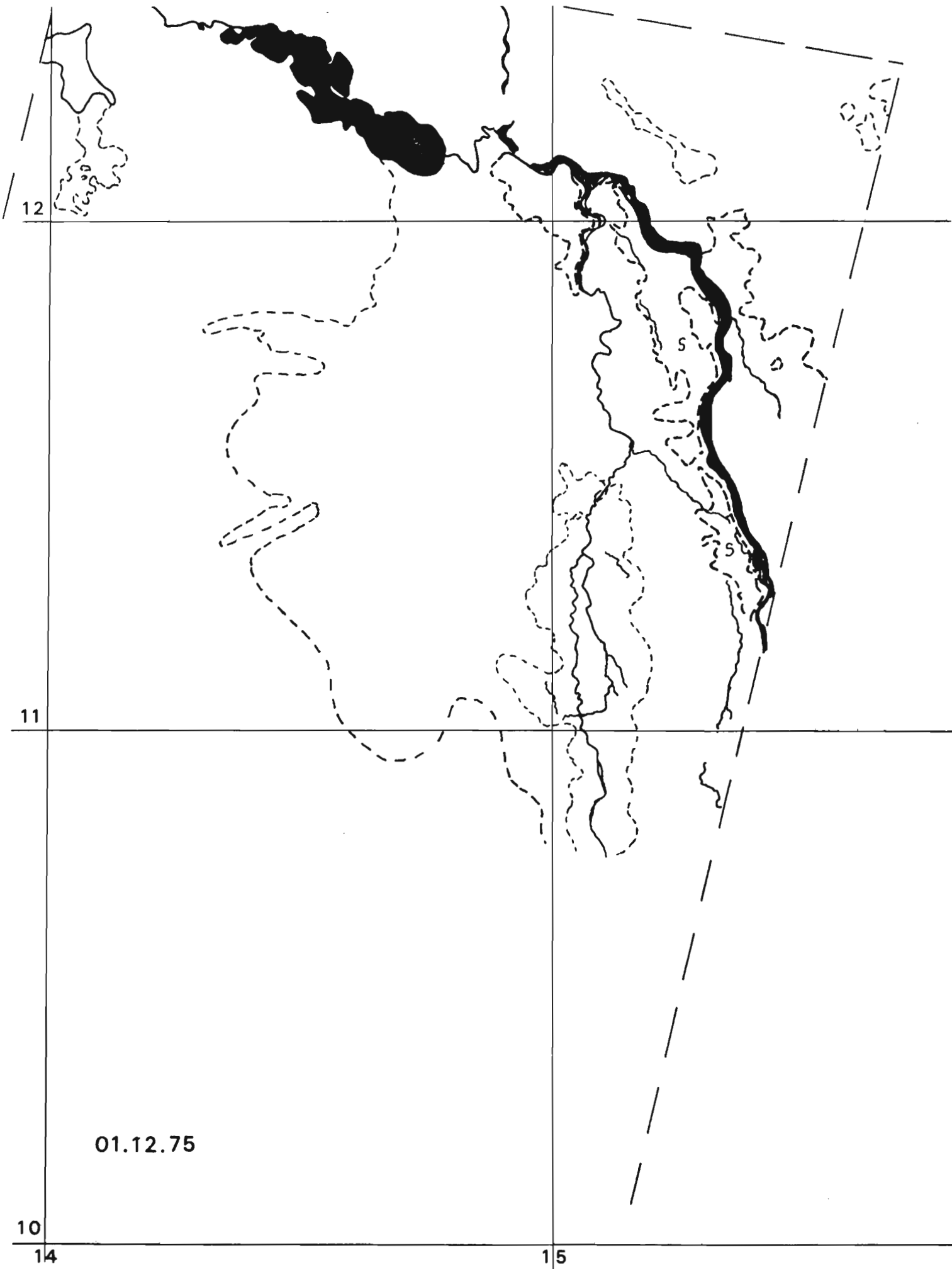


FIGURE 24

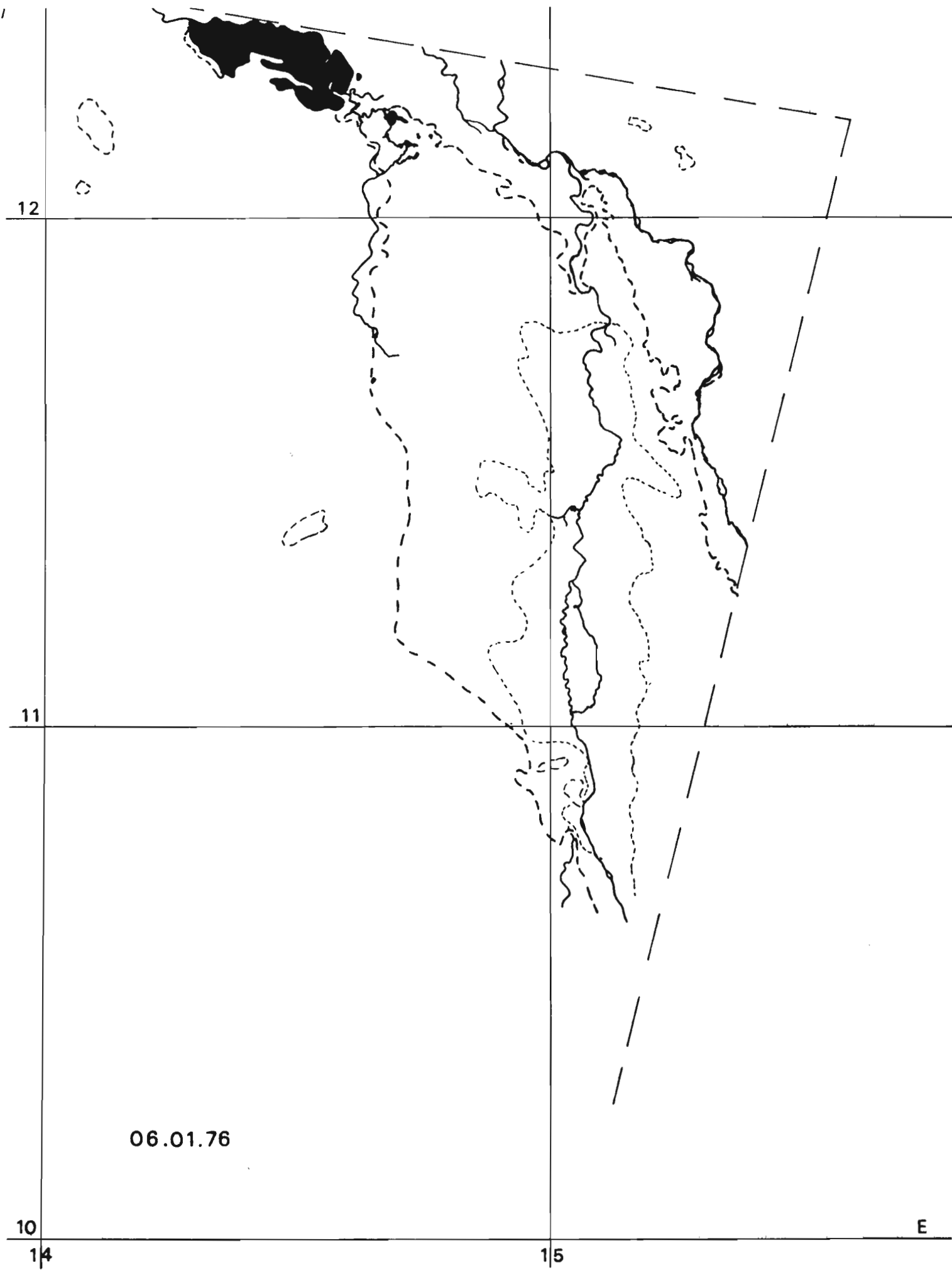


FIGURE 25

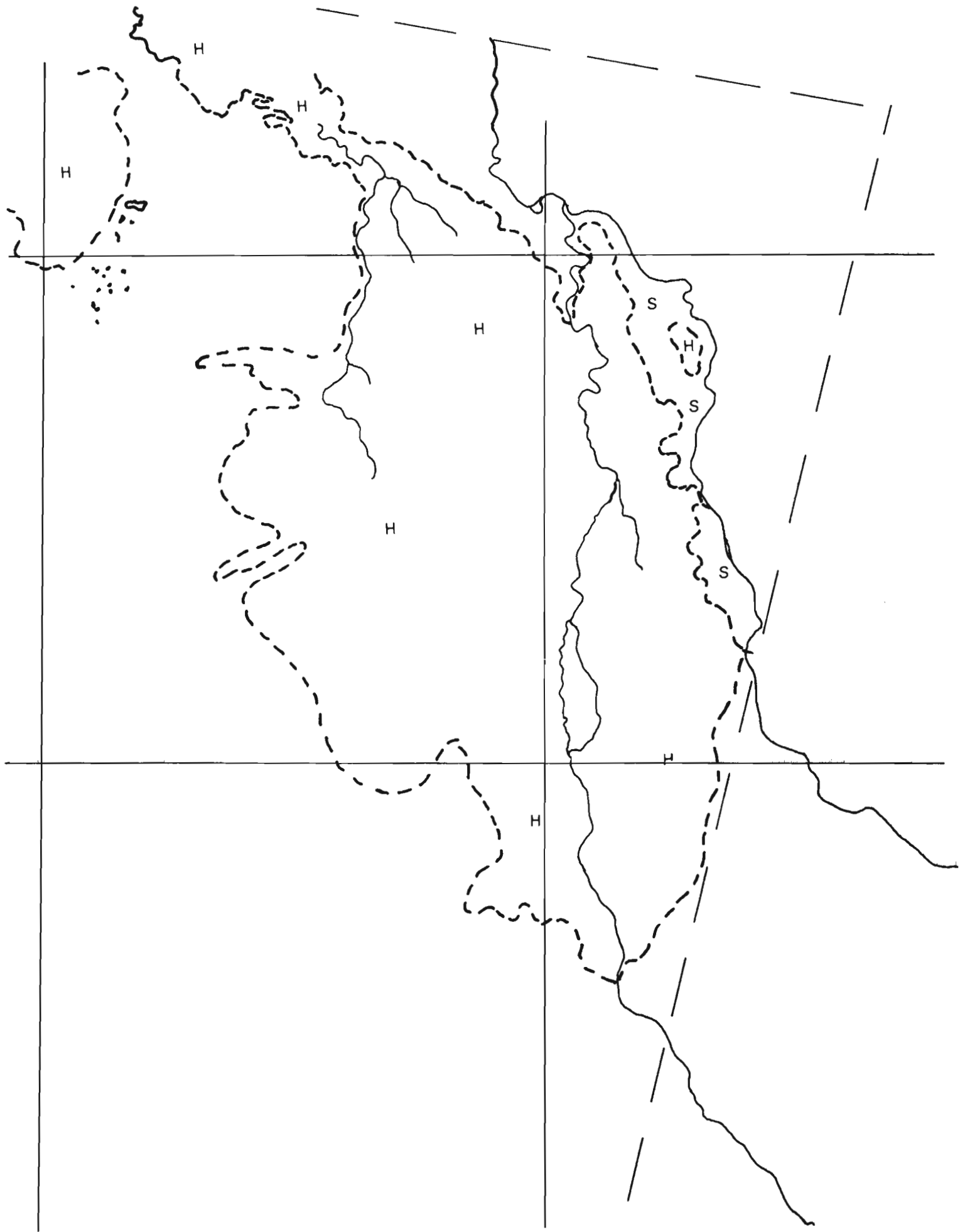


FIGURE 26

IV - LES AUTRES ZONES INONDEES

A - LE LAC FITRI (12°50 N, 17°30 E)

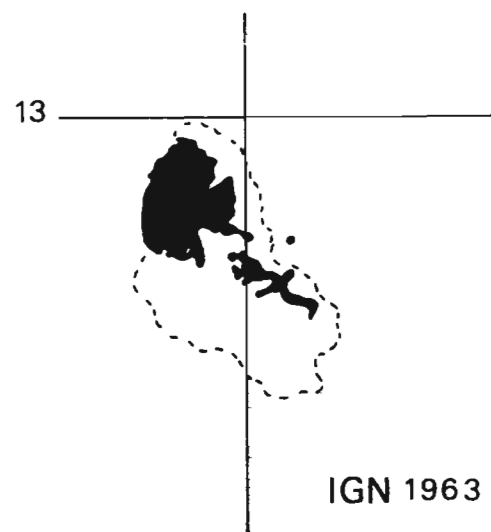
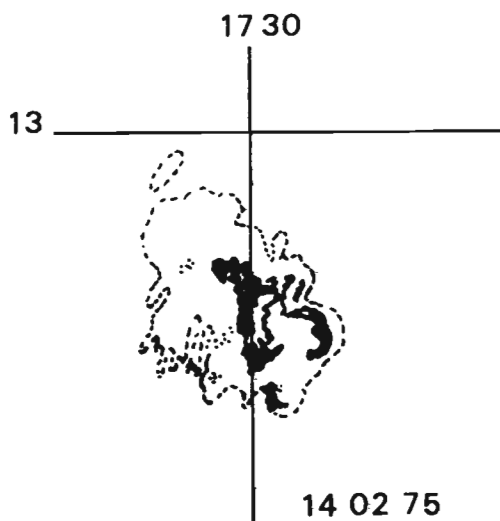
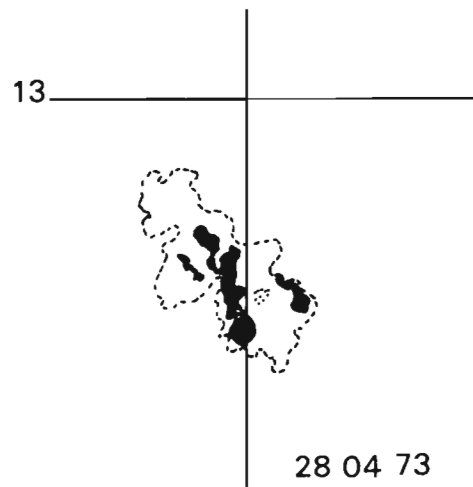
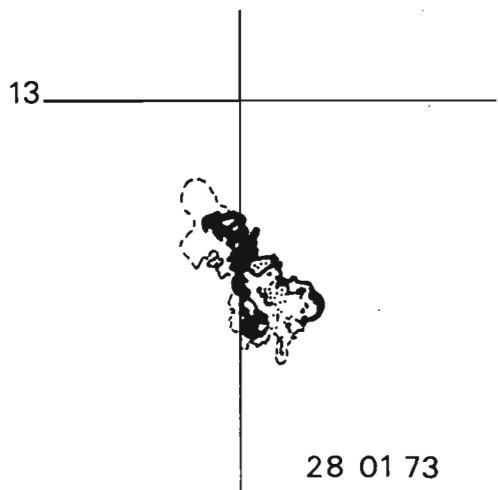
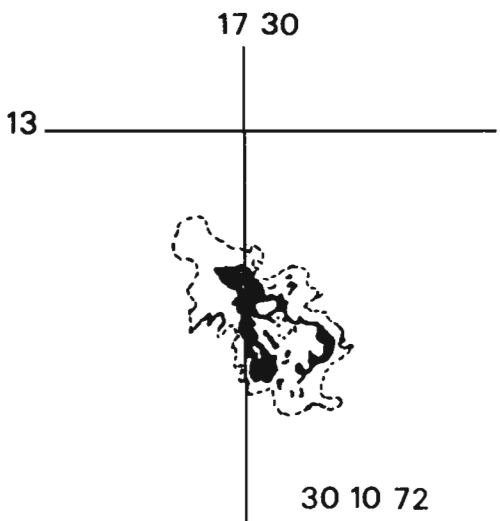
Le lac Fitri est alimenté par le Batha et par les précipitations. Les zones en eau et les marécages pour 1972-1973 et 1975-1976 sont représentées figure 27, de même que le lac tel qu'il est représenté sur les cartes IGN (1963). Nous constatons que ce lac normal a disparu en 1972-1973. Une mission effectuée sur le terrain en décembre 1973 confirme l'observation que les seules zones d'eau libre, de dimensions réduites, se trouvent au sud du lac figure sur les cartes : les eaux libres sont limitées à la région deltaïque près de l'embouchure du Batha, et encombrées de nombreuses îles (en pointillé sur la figure). Cette situation est identique à ce qui a été observé dans la cuvette nord du lac Tchad en 1975, à l'embouchure de la Yobé.

En 1975 et 1976, pour des dates proches des hautes eaux du lac, et alors que la pluviométrie a repris des valeurs plus proches de la normale, la surface classique du lac est occupée par des marécages, tandis que l'eau s'étend au-delà des marécages habituels (comme dans la cuvette sud du Tchad en janvier 1976) et forme une frange d'eau libre.

B - DESCRIPTION SUCCINTE DES AUTRES IMAGES ETUDIEES.

Les images sont référencées par la lettre qui caractérise leur centre (figure 2) et par leur date.

FIGURE 27 - Evolution au cours du temps des surfaces d'eau libre (noir) et marécageuses (tireté) du lac Fitri. Comparaison avec la carte IGN (1963).



DÉSCRIPTION SUCCINTE DES PRINCIPALES
IMAGES UTILISEES.

Les images sont référencées par la lettre qui caractérise leur centre (figure 2) et par leur date.

30.10.72

28.01.73

28.04.73

09.02.76

Région de Ngama, Melfi, Bitkine.

30.10.72. Le Batha de Laïri est en eau jusqu'à 11° N, et paraît sec ensuite. Les monts de Melfi, Matara et Bitkine sont couverts d'une végétation verte.

La plaine d'inondation à l'est de Massenya est humide et recouverte par endroits de végétation verte. La région de Ngama est sèche.

28.01.73. Des nuages rendent l'interprétation difficile. Les marigots sont secs. La région de Ngama semble aussi relativement sèche.

28.04.73. Ngama se trouve maintenant au centre d'une région quasi désertique, seules les galeries le long des marigots comportent une végétation discernable. Cette région de sécheresse particulière correspond aux plaines les moins inondables de la scène considérée ici .

09.02.76. Si nous comparons cette image avec la date correspondante de 1973 (28 Janvier), nous constatons une humidité plus nette qu'en 1973 dans le Bahr Erguig, et le long des autres marigots (Batha de Laïri).

29.10.72

27.04.73

Région d'Abou Deïa. - Mongo

La qualité des images disponibles ne permet pas d'interprétation en ce qui concerne les surfaces humides. Les régions montagneuses semblent plus vertes que la plaine en octobre 72.

01.11.72

25.12.72

02.01.73

30.01.73

07.03.73

08.10.75

06.01.76

29.02.76

29.05.76

Région de Maroua - Yagoua - Léré (le bec de canard),
située à l'amont du Grand Yaéré du Nord Cameroun.

1972-73. Les lacs de Léré, Tikem et Gourmey ont leurs dimensions normales, alors que le lac de Tréné est réduit à la moitié de sa surface habituelle.

01.11.72. Les nuages recouvrent la région qui nous intéresse. On note une zone très verte en aval des lacs de Léré et Tikem.

25.12.72. Végétation au S et au N W de Yagoua. Le Logone est en décrue. Inondation sur sa rive droite au N de Mogodi, et dans le yaéré Guirieo.

02.01.73 et 30.01.73. Zones humides sur les rives du Logone en aval de Mogodi, et dans le yaéré Guirieo.

1975-76.

08.10.75. Tous les mayos sont en eau. Les quatre lacs (Léré, Tréné, Gourmey, Tikem) ont des surfaces en eau libre plus grandes que la normale (carte I G N). Toutes les zones inondables sont occupées en moyenne partie par des eaux libres ou peu encombrées de végétation, y compris la dépression Toubouri jusqu'au confluent du Mayo Louti et du Mayo Oulo.

06.01.76. Sur le mayo Kebi, les lacs ont repris leur dimension normale. Le reste des eaux libres de la scène précédente est en végétation marécageuse. Les mayos des montagnes sont asséchés.

Pratiques agricoles dans le yaéré Guirio. De part et d'autre du Logone au N de Vélé, zones de végétation humide, correspondant aux eaux libres de la scène précédente.

29.02.76. Végétation et eaux libres de la dépression Toubouri semblable à l'image précédente.

Par contre, dans la portion de yaéré le long du Logone, la végétation verte est considérablement réduite en extension.

29.05.76. Elle réapparaît cependant sur ces mêmes zones avec les premières pluies.

30.10.72

28.01.73

22.01.76

La scène K englobe la région entre Chari et Logone définie approximativement par les villes de Laï, Bousso et Goundi.

30.10.72. Comme pour la scène L du 29.10.72, l'image correspond à une humidité relativement peu importante de la région ; les endroits un peu surélevés, ou relativement perméables, se distinguent bien des zones qui conservent une humidité de surface. Quelques routes (Bousso-Manda, Tchaguin Golo - Laï) sont visibles.

Au nord du Chari, le Batha de Laïri et le Bahr Erguig inondent leur lit majeur. Au sud, le Ba Illi et ses affluents constituent la limite septentrionale d'une zone humide qui descend jusqu'au Logone. Les seuls endroits relativement secs sont situés au sud d'une ligne passant par Goundi, et sur des bourrelets au nord de Laï, comme ceux sur lesquels passent les routes Laï - Banga - Tchagin Diolo ou Ninga - Narégué à l'est de Laï.

28.01.73. Par opposition à la scène précédente, seul le Chari, en décrue, reste visible, et les pratiques culturelles occupent l'ensemble des zones précédemment inondées ou humides.

22.01.76. Le Chari est mieux marqué qu'en janvier 1973. Les pratiques culturelles (brulis ou défrichement) occupent notamment la zone comprise entre la route Bousso - Sahr, et la région située au sud des plaines d'inondation.

La région située au N et au N W de Laï, est encore recouverte de végétation correspondant à une humidité importante. De même le lit majeur du Bahr Erguig.

29.10.72

16.11.72

01.06.75

28.11.75

03.01.76

15.03.76

Ces images complètent la série M, centrée sur le lac Iro. Elles sont situées à l'ouest de M, et au nord de Sahr (Fort Archambault).

- 29.10.72. Le Chari, en décrue, occupe tout son lit mineur. Les vallées du Bahr Salamat et du Bahr Keita sont inondées. Au S W du lac Iro, les marécages du lac Iro atteignent le Bahr Bola. Au sud du Salamat, les zones humides ou inondées coïncident exactement avec celles de l'I G N, dans la région Boum Kabir - Moufa - Balekoutou - Kyabé.
- 16.11.72. La zone marécageuse au S W du lac Iro se prolonge jusqu'à Aleko, le long du Bahr Salamat, avec de la végétation bien marquée jusqu'à Balekoutou. Le Chari est moins large qu'en octobre.
- 01.06.75. Nuages sur les rivières. Le Chari n'occupe que son lit mineur.
- 28.11.75. Les fleuves Chari, Bahr Salamat, Bahr Keita, occupent leur lit majeur. La plaine autour de Dongo est inondée (voir scène M). Les marécages du lac Iro s'étendent jusqu'à Aleko dans la vallée du Salamat.
- 03.01.76. La zone marécageuse du lac Iro est limitée au sud par le Bahr Tafo. La région de Kyabé entre Bahr Salamat et Bahr Keita est sèche. La vallée du Bahr Salamat est bien visible, en végétation.
- 15.03.76. Végétation notable dans le lit majeur du Bahr Salamat, limitée par la route Balekoutou - Moula au nord. En amont, les cours du Salamat et du Bahr Bola sont encore riches en végétation. Les marécages du lac Iro sont réduits à moins de 10 km. de large et environ 30 km. de long.

M Lac Iro.

15.12.72

13.02.73

09.11.75

02.01.76

14.03.76 nuages

Les images de novembre correspondent à la fin de la saison des pluies. La végétation est intense partout. Ce qui correspond à la fin d'un hivernage où la circulation est probablement impossible.

Le lac Iro garde une surface en eau libre rigoureusement constante sur les 5 images, et celle-ci est plus grande que celle notée sur la carte I G N : il y a augmentation du rayon du lac vers l'est et vers l'ouest de 1 à 2 km. Le rivage est très près de Boum Kabir, au nord.

La plaine d'inondation au S W du lac ne varie pas sur les 2 images.

Le Bahr Keita est mieux représenté en 75 qu'en 72. Il en est de même du Bahr Aouk qui occupe son lit majeur en 1957, d'environ 5 à 6 km. de large.

Plaine d'inondation (75 et non en 72) au S du lac Iro, entre le Bahr Salamat et le Bahr el Hadid (Lola).

Le 2 janvier 76 (et le 13.02.73) les cultures envahissent l'ensemble de l'image à l'exception des marécages au S W du lac Iro et de la majeure partie de la plaine d'inondation qui vient d'être décrite.

15.11.72

13.02.73 (nuages)

02.01.76

Région nord d'Am Timan

15.11.72. Les cultures se trouvent presque exclusivement au nord de la route Am Timan - Goz Reida.

Trois zones humides à cette date : El Ogha, Am Habilé et Al Biéré, sans qu'apparaissent cependant des eaux libres.

02.01.76. Même remarque que précédemment pour les zones cultivées. Les cours d'eau et mares permanentes sont moins bien représentés que sur la scène précédente. Les vallées des marigots sont fréquemment dépourvues de cultures ou de végétation.