

ETUDE DU DELTA CENTRAL DU FLEUVE NIGER  
PROJET "SAPHYR" (SATELLITE PROJECT HYDROLOGY RESEARCH)

STUDY OF THE CENTRAL DELTA OF THE NIGER RIVER  
PROJECT "SAPHYR" (SATELLITE PROJECT HYDROLOGY RESEARCH)

M. Bied-Charreton, J. Cruette, G. Dandoy, G. Dubee, J.P. Lamagat, J. Noel  
Office de la Recherche Scientifique et Technique  
Outre-Mer, Paris

RESUME

Le projet "SAPHYR" a été établi en Octobre 1972 par la Direction Générale de l'hydraulique et de l'Energie de la République du Mali en association avec l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (Paris) et le Bureau pour le Développement de la Production Agricole (Paris).

Ce projet prévoit l'utilisation de la télédétection dans l'étude de deux problèmes qui intéressent au plus haut point les autorités du Mali.

- Etude du régime hydrologique de la zone d'inondation du Delta Central du fleuve Niger et recherche des causes des anomalies constatées dans le régime du fleuve.
- Etude de la végétation en général, en liaison avec les variations des zones inondées.

Ce projet couvre une surface très importante (50 000 km<sup>2</sup> en ne comptant que les zones inondables) et nécessite des observations sur l'ensemble de la zone régulièrement réparties dans le temps. Il s'appuie sur d'importants travaux de terrain effectués par une équipe de chercheurs basés à Bamako. De nombreuses observations hydrologiques sont faites sur vingt-neuf stations hydrométriques. Une campagne d'observation au sol s'effectue actuellement en utilisant une méthode adaptée aux conditions locales et en particulier aux grandes difficultés pour les déplacements.

Sur une zone aussi grande, le fait de vouloir suivre l'évolution de la végétation et des zones inondées suppose l'étude d'une quantité considérable de documents satellite.

Le travail commence par une analyse des images, canal par canal, et des compositions colorées établies à partir des canaux 4, 5 et 7.

L'analyse numérique est faite à partir des bandes magnétiques. Elle permet un travail plus fin sur de grandes surfaces et à plusieurs moments du cycle hydrologique. Le traitement est organisé pour produire une estimation chiffrée de la surface en eau libre et de la biomasse dans des zones de petite surface, définies par des carrés de 5' de côté en latitude et en longitude. On obtient ainsi un fichier magnétique qui permet de suivre l'évolution des deux thèmes à l'intérieur de chaque carré.

En établissant un tel fichier, la télédétection fournit aux hydrologues et aux agronomes un document qu'il n'est pas possible d'établir par d'autres méthodes.

ABSTRACT

Project "SAPHYR" was established in October 1972 by the Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Energie of the Republic of Mali in association with the Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (Paris) and the Bureau pour le Développement de la Production Agricole (Paris).

This project provides for the use of remote sensing in the study of two projects assigned high priority by the government of Mali.

- The study of the groundwater flow systems of the flood zone of the Central Delta of the Niger

"Presented to the 4th Canadian Symposium on Remote Sensing, Québec City, May 1977".

Ottawa, Institut aérospatial et spatial du Canada, (1578). 28 AOUT 1979  
O. R. S. T. O. M.

River and research on the causes of the anomalies observed in the river system.

- The study of the vegetation in general, in relation with the variations of the flooded zones.

This project covers a very extensive surface area (50 000 km<sup>2</sup> counting only the flood plains and necessitates regularly-phased multirate observations of the entire zone. Major field work carried out by a team of researchers based in Bamako supports this project. Numerous hydrological observations have been made on twenty-nine hydrometric stations. Field study is presently being carried out using a method adapted to local conditions and, more specifically, to the great difficulties of ground travel.

To seek to trace the evolution of vegetation and flooded zones over such an extensive area requires the study of a considerable quantity of satellite documents.

The first stage of the work involves a channel by channel analysis of the images and the colored configurations established from channels 4, 5 and 7.

Numerical analysis is conducted using the recording tapes. This enables more discriminating work over large surface areas and at multiple points of the hydrological cycle. Processing is structured to produce a numerical estimate of the free water surface area and of the biomass in the zones of small surface area defined as 5' squares bounded latitudinally and longitudinally. The magnetic file obtained in this manner makes it possible to monitor the evolution of the two themes within each square.

By enabling the establishment of a file of this kind, remote sensing provides hydrologists and agronomists documentation which is impossible to obtain by other methods.

## INTRODUCTION —

Le Niger est le plus grand fleuve de l'Afrique occidentale. Partant des montagnes de Guinée dans la direction nord-est, il décrit un grand arc de cercle et rejoint l'Océan Atlantique dans le Golfe du Bénin après un parcours de 4200 km à travers plusieurs états (Figure 1).

Une caractéristique importante de ce fleuve est de présenter un delta intérieur, ou delta central, entre les villes de Mopti et de Tombouctou. Cette zone correspond à une ancienne région lacustre, semblable à celle du lac Tchad, qui a été reliée à la mer, à la suite d'une capture réalisée par ce qui est maintenant le cours aval du fleuve (Figure 2).

Ce delta se situe en République du Mali. Il constitue un élément essentiel pour le développement économique du pays mais son aménagement pose de nombreux problèmes. Il est alimenté par un bassin versant d'une superficie de 280000 km<sup>2</sup> et reçoit en moyenne 80 000 000 000 m<sup>3</sup> d'eau par an mais la moitié seulement de ce volume se retrouve à l'exutoire du delta. En période de crue, 50 000 km<sup>2</sup> approximativement sont inondés. Cette surface varie considérablement d'une année à l'autre et ce phénomène a une importance économique considérable pour le pays car il conditionne le niveau de production végétale et également animale.

Sur un plan plus strictement pratique, le régime hydrologique de ce delta est très difficile à appréhender, en grande partie à cause de la difficulté de déplacement dans la zone d'inondation.

## LES ANOMALIES DU FLEUVE NIGER —

Les différentes mesures hydrologiques effectuées sur le réseau hydrographique du fleuve donnaient, jusqu'en 1960, des corrélations assez simples entre les hauteurs de l'eau et les débits, mesurés en différents points. La figure 3 représente les hydrogrammes établies à quatre stations hydrométriques ; de l'amont vers l'aval, Mopti, Dire, Tossaye et Niamey.

Le régime était considéré comme stable et un dispositif de prévision des crues avait été élaboré qui permettait d'annoncer les débits, les hauteurs d'eau et les dates des maximums à partir d'observations faites en amont, au niveau de Bamako, Ke-Macina, Koulikoro sur le Niger, Douna et Beneni-Kegny sur le Bani. Les mesures et observations de contrôle avaient été effectuées montrant que les points choisis pour faire les corrélations étaient représentatifs des débits entrant et sortant, montrant d'autre part que les anciens deltas de Niono et du Diaka ne jouaient pas un rôle perturbateur dans les corrélations.

A partir de 1960, une instabilité apparaît. Elle est illustrée sommairement par trois graphiques. Sur la figure 4, on montre l'évolution des débits maximums de chaque crue annuelle de l'amont vers l'aval à Mopti, Dire, Tossaye, Niamey et Mallanville avant 1961. La figure 5 montre la même évolution après 1960. On constate que la forme générale a considérablement changé et en particulier que la station de Dire présente des débits maximums nettement plus faibles.

La figure 6 montre l'évolution des volumes d'eau passant à Dire et Tossaye en aval. Avant 1961, le volume d'eau à Dire est toujours supérieur à celui de Tossaye. Après 1960, la relation s'inverse.

Enfin, le régime des crues en aval du delta central a également évolué ; pour un même volume d'eau, le débit maximum d'une crue est devenu plus important que par le passé.

Ces constatations remettent en cause les corrélations établies et remettent surtout en cause les projets d'aménagement dans le delta central et en aval. Des campagnes de mesures ont donc été organisées pour préciser la nature et l'origine des anomalies et pour essayer de savoir si on retrouve un nouveau régime stable ou si l'évolution doit se poursuivre. La question a alors été posée de savoir si la télédétection et plus particulièrement les données des satellites Landsat pouvaient apporter une aide dans cette recherche.

## UTILISATION DES IMAGES LANDSAT —

Dans un premier temps, quatorze scènes Landsat ont permis d'effectuer une mosaïque au 1/1 000 000 en utilisant les images du canal 7. La figure 7 donne la localisation approximative du centre des images. Sur la vue d'ensemble ainsi établie, on observe la complexité du réseau hydrographique avec une précision qu'aucun document topographique ne nous fournissait. Les grandes unités suivantes apparaissent :

- ancien delta de Niono à l'ouest,
- ancien delta du Diaka,
- delta actuel jusqu'au lac Debo,
- zone dunaire présentant un écoulement complexe en baïonnette,
- zone des lacs, à l'est et à l'ouest de la zone dunaire.

Les deux anciens deltas montrent que le lit du Niger s'est déplacé vers l'est en plusieurs étapes et que sa position actuelle est assez récente.

Si on observe plus en détail les compositions colorées et leur répétition dans le temps pour une même région on peut faire de nouvelles observations. Par exemple, on remarque, à l'est de Dire, qu'un réseau hydrographique actif existe et que son rôle ne doit pas être négligeable. Les débits passant dans les différents défluent de la rive droite peuvent peut-être expliquer les anomalies.

Malheureusement, il n'est pas possible de comparer ces documents à des documents semblables établis avant 1961, ce qui aurait été fort utile pour chercher ce qui a changé dans le réseau hydrographique.

Une tentative d'analyse plus fine a été effectuée. A partir des images du canal 7, on a fait, à l'échelle 1/200 000, une cartographie des zones inondées dans la région au nord du lac Débo, à plusieurs dates différentes. Les stations limnimétriques étant assez nombreuses dans cette région, on a essayé d'attribuer à chaque station une zone d'influence et on a étudié la relation entre la surface inondée dans cette zone avec le niveau de l'eau. Une représentation partielle des résultats obtenus est donnée sur les figures 8 et 9.

D'une façon générale, on constate un phénomène d'hystérésis où se distinguent nettement la période de la montée des eaux et la période de décrue. Mais on constate également que les stations à l'est du Niger ont une évolution conforme : la superficie inondée augmente quand le niveau de l'eau monte et vice-versa. Par contre, les stations à l'ouest du fleuve ont une évolution inverse : la superficie inondée diminue quand le niveau de l'eau monte. Schématiquement ceci permet peut-être de distinguer les régions où les cours d'eau alimentent la zone d'inondation des régions où la zone d'inondation alimente les cours d'eau.

Il demeure que le travail est très peu précis et qu'il est trop tôt pour conclure. En effet, la détermination des superficies inondées par l'emploi des seules images du canal 7 est sujette à caution. La présence de végétation aquatique constitue une gêne importante pour déterminer les limites des surfaces inondées. Enfin, l'attribu-

tion des zones d'influence à chaque station limnimétrique est assez arbitraire et seule une méthode par tâtonnement doit permettre de déterminer les zones de la façon la plus correcte.

Ces premiers essais nous ont cependant semblé prometteurs et ils ont servi d'exemple pour établir le programme de travail pour la campagne 1976-1977.

#### ORGANISATION DE LA CAMPAGNE 1976-1977 —

Le début de la montée des eaux se situant aux mois de juin et juillet, le programme d'une campagne sur le terrain doit pratiquement être fixé au mois d'avril afin que la mise en place du personnel et du matériel soit terminée avant que les déplacements ne soient trop difficiles. Le programme a donc été établi avant que nous ayons reçu les images de la fin de l'année 1975.

L'expérience acquise nous a cependant permis de préciser les mesures à effectuer et, en particulier, de déterminer les emplacements où il fallait commencer de nouvelles séries de mesures de débit. Il s'agit essentiellement de points choisis à l'aide des images Landsat, sur les défluent à l'est de Diré.

D'autre part, on a établi un protocole d'observation au sol, ces observations étant indispensables pour effectuer une bonne utilisation des données Landsat. Le dispositif est mis en place sur le terrain par un ingénieur qui détermine un certain nombre de points fixes et recherche pour chaque point un observateur local capable d'utiliser correctement une fiche d'observation (Figure 10) et de prendre des photographies en utilisant un appareil très simple. La fiche d'observation et le protocole doivent être aussi simples que possible étant donné qu'il n'est pas possible de rendre visite aux observateurs pendant toute la durée de la crue.

Les points choisis sont numérotés et leurs coordonnées, aussi précises que possible sont établies à la mise en place du réseau. Les observations sont faites systématiquement tous les quinze jours, à 10 h. L'observateur se place au point choisi et observe le paysage dans une direction donnée. Il doit porter sur la fiche la date, l'heure exacte et le numéro de la pellicule qu'il utilise ainsi que le numéro de la vue dans la pellicule.

Il doit ensuite décrire l'état du ciel en portant une croix dans la case la mieux adaptée à la situation. Il doit ensuite chercher, dans le paysage qu'il a sous les yeux, les trois objets qui occupent la plus grande surface au sol en essayant d'imaginer comment il verrait le sol s'il pouvait l'observer verticalement de haut. Il doit alors décrire le plus correctement possible les trois objets principaux dans les colonnes : objet principal, objet secondaire et objet tertiaire. Dans la première partie de la colonne, il doit porter une seule croix définissant ainsi la nature de l'objet. Dans la deuxième partie de la colonne, il doit indiquer par plusieurs croix les qualificatifs qui s'appliquent à l'objet observé.

Ce protocole conduit à des observations qui s'effectuent très rapidement lorsque le dispositif est en place. Il est à la fois très souple, puisque l'ingénieur responsable peut modifier tous les termes figurant sur la fiche pour les adapter aux conditions locales, et très strict, puisque l'observateur a un cadre de travail qui doit lui éviter les oublis.

#### PRÉPARATION A L'UTILISATION DES DONNÉES DE TÉLÉDETECTION —

En ce qui concerne des produits photographiques, plusieurs essais de traitement ont été effectués pour faciliter la délimitation des zones inondées. Les compositions colorées utilisant au départ les films noir et blanc négatifs et non pas positifs semblent très intéressantes par exemple. Cependant, le choix du meilleur procédé ne pourra être fait qu'en utilisant les fiches d'observation comme critère d'efficacité.

Notre préparation a également porté sur l'analyse numérique des données qui nous semble de beaucoup la voie la plus efficace pour résoudre nos problèmes.

Nous disposons d'une procédure très souple qui doit nous permettre de déterminer sans ambiguïté les zones en eau libre. Son exploitation est basée sur le fait que l'on dispose des observations au sol nous permettant de localiser avec une très bonne précision les limites des zones inondées.

Une fois connues les zones inondées, nous savons faire apparaître un découpage de ces zones qui respecte les différentes couleurs de l'eau. La distinction entre les eaux du Niger et les eaux du Bani est très nette et se prolonge très loin après la confluence de ces deux cours d'eau. Cet outil doit pouvoir être utilisé pour tenter une distinction entre les différentes origines des eaux de surface : eau du Niger, eau du Bani, mais aussi eau de pluie accumulée localement et eau de la nappe phréatique apparaissant dans des zones basses. Cette classification des eaux d'après leur couleur conduira peut-être à la différenciation des régions où les cours d'eau alimentent les zones inondées de celles où les zones inondées alimentent les cours d'eau.

Enfin, un effort a été fait pour la localisation géographique des images. La mise en place des méridiens et des parallèles est effectuée par l'ordinateur. La précision de ce quadrillage dépend essentiellement de la précision d'un point de référence situé le plus près possible du centre de l'image. Là encore, les points des observations au sol sont indispensables. Nous sommes donc théoriquement capables de découper chaque scène Landsat en petits carrés, définis en latitude et longitude, et non pas en lignes et colonnes. Ces carrés sont donc superposables d'un passage à l'autre des satellites sur une même région. Pour chaque carré, on peut établir, en pourcentage, la superficie occupée par de l'eau libre.

Si chaque carré a 10 minutes de côté, on réduit ainsi le volume de l'information contenue dans une vue (30 000 000 de nombres) en environ 8 000 nombres exprimant des surfaces. On peut alors entreprendre l'étude des relations superficie inondée/niveau de l'eau dans de bien meilleures conditions.

- la détermination de l'eau libre doit être plus précise,
- la détermination des zones d'influence des stations limnimétriques peut être refaite autant de fois qu'il le faut, par ordinateur et non manuellement.

Les mêmes outils mis en place peuvent être utilisés pour d'autres analyses. On a déjà cité la classification des zones inondées d'après la couleur de l'eau. Un travail semblable peut être fait sur la végétation et en particulier sur la végétation aquatique.

Parallèlement à cette préparation, on a procédé à l'achat d'un nombre assez important de données. Pour les cinq scènes les plus importantes, on dispose de 60 compositions colorées et de 15 bandes magnétiques.

## BILAN PROVISOIRE -

La campagne d'observation au sol s'est déroulée d'une façon correcte. Douze points d'observation ont été mis en place et une fiche d'observation a été établie tous les quinze jours entre juin 1976 et mars 1977. L'utilisation doit en être faite avec une certaine prudence car ce type de travail, nouveau pour tous, laisse encore la place à des interprétations personnelles.

Par contre, lorsque nous avons demandé la liste des documents satellite établis pendant cette campagne de terrain, la réponse a été profondément décevante : il n'y en a aucun. Nous avons donc des documents satellite avant les observations au sol et des observations au sol sans document satellite correspondant.

Nous pensions exploiter les documents satellite 1976-1977 dans de bonnes conditions et tenter de remonter dans le temps pour exploiter les documents satellite plus anciens. Notre situation est maintenant beaucoup plus inconfortable. Il nous faut exploiter les documents les plus anciens en faisant appel à la mémoire des quelques rares personnes qui étaient sur place. La compilation des carnets de tournée des agents hydrologues a commencé. Il demeure que les résultats ne pourront pas être très précis et que dans beaucoup de cas nous ne pourrions pas répondre à la question fondamentale : sommes-nous en présence de plantes aquatiques avec de l'eau ou sans eau ? Si la réponse à cette question est fautive, toutes les autres considérations sont sans fondement.

# BASSIN DU NIGER

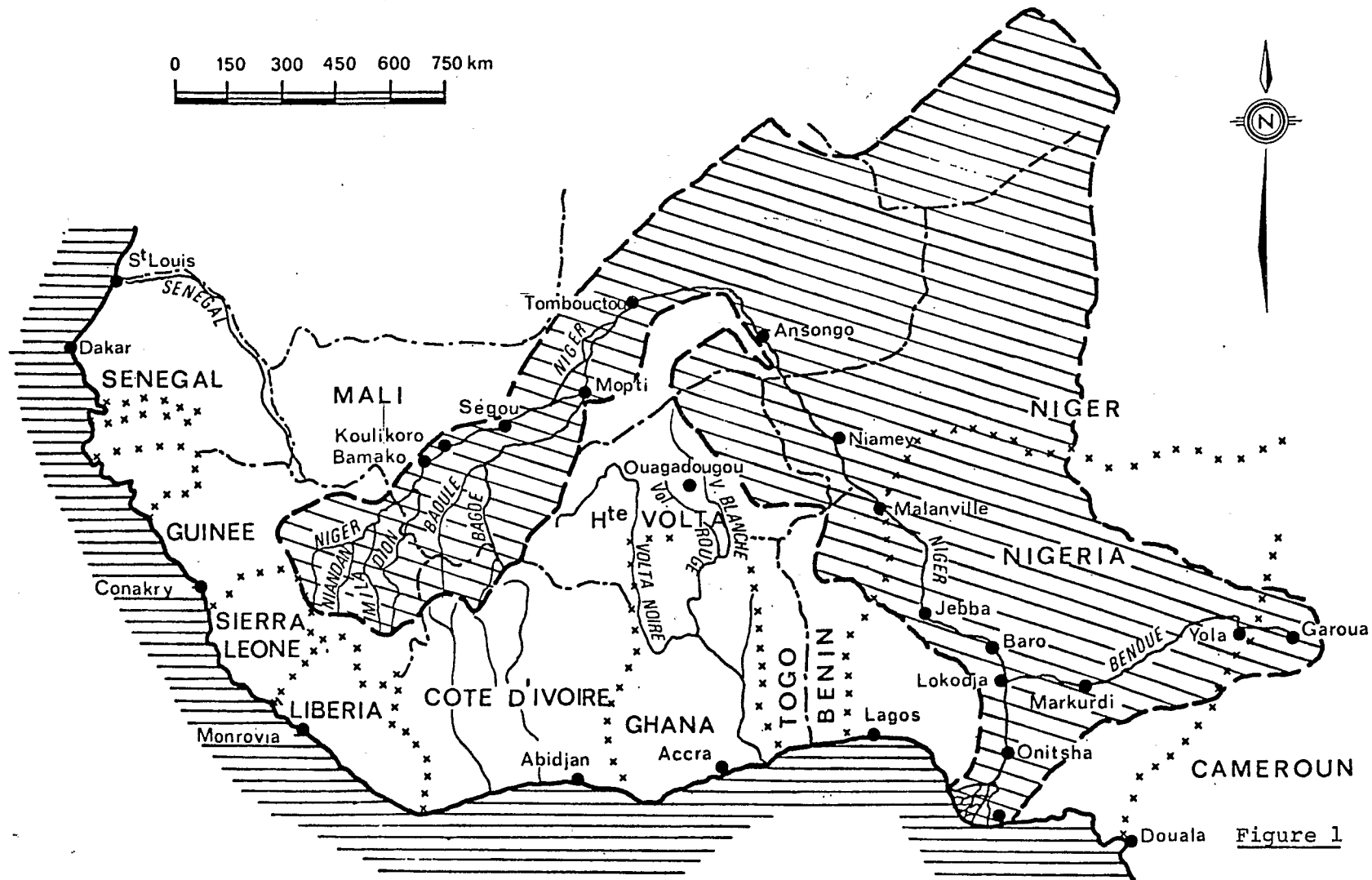
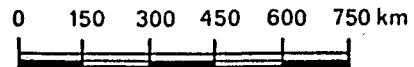


Figure 1 - Bassin du Niger

Figure 1

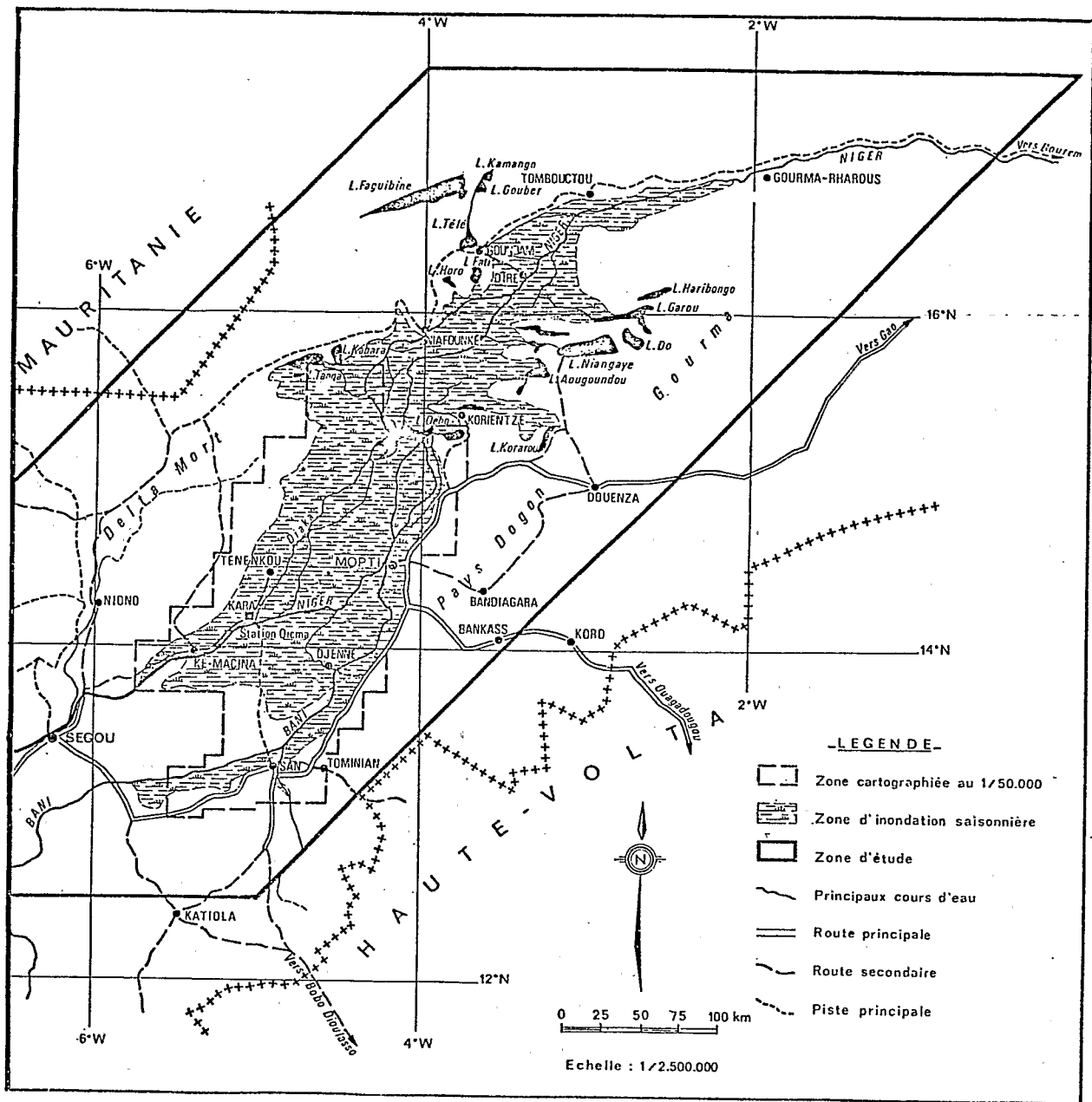
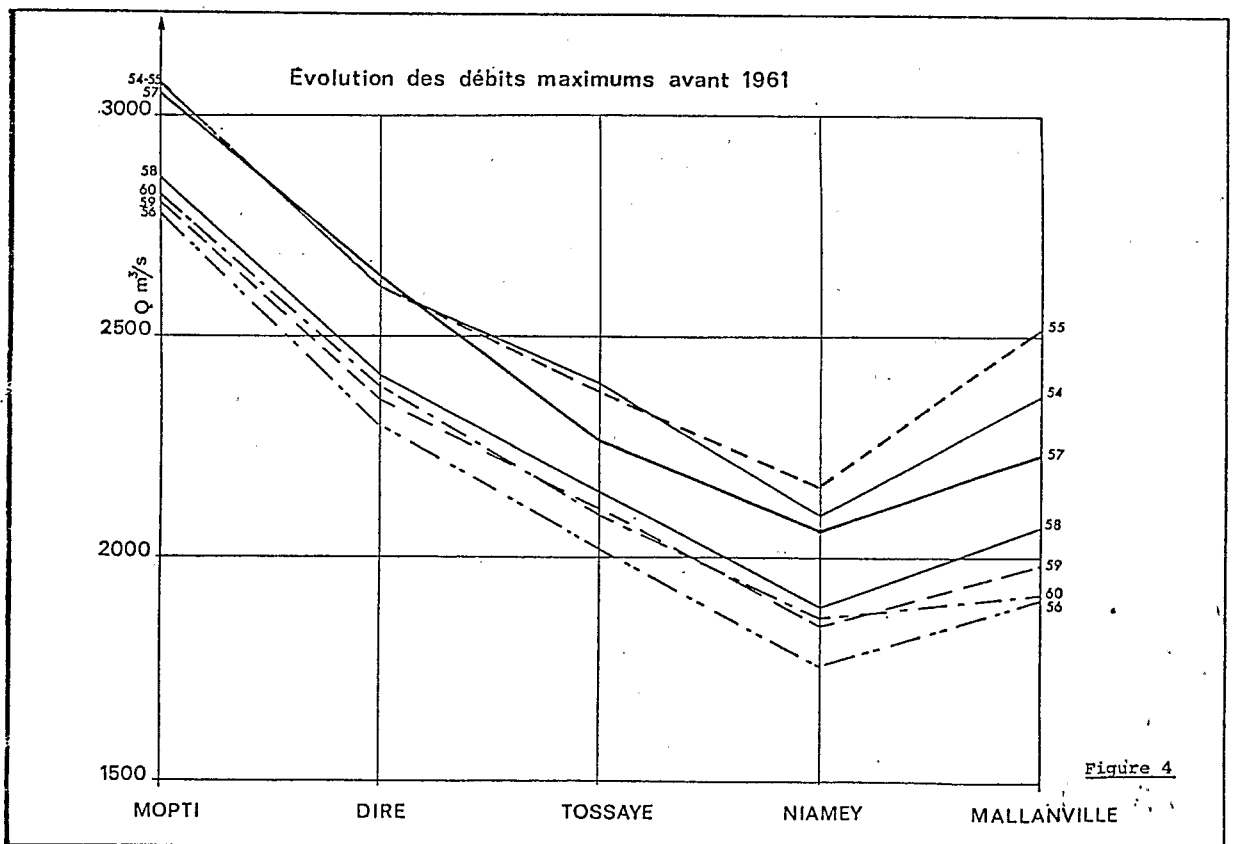
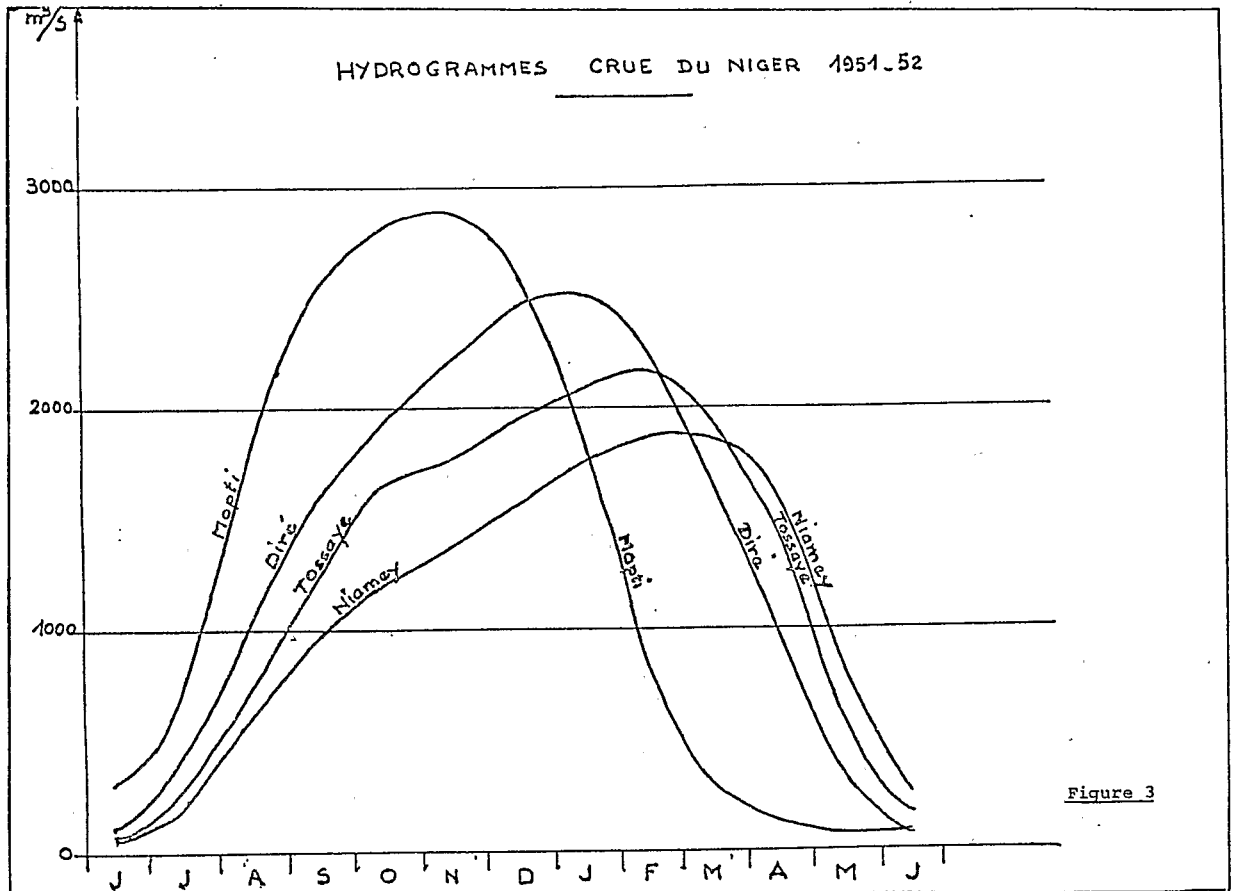


Figure 2 - Delta central du Niger





Evolution des débits maximums après 1960

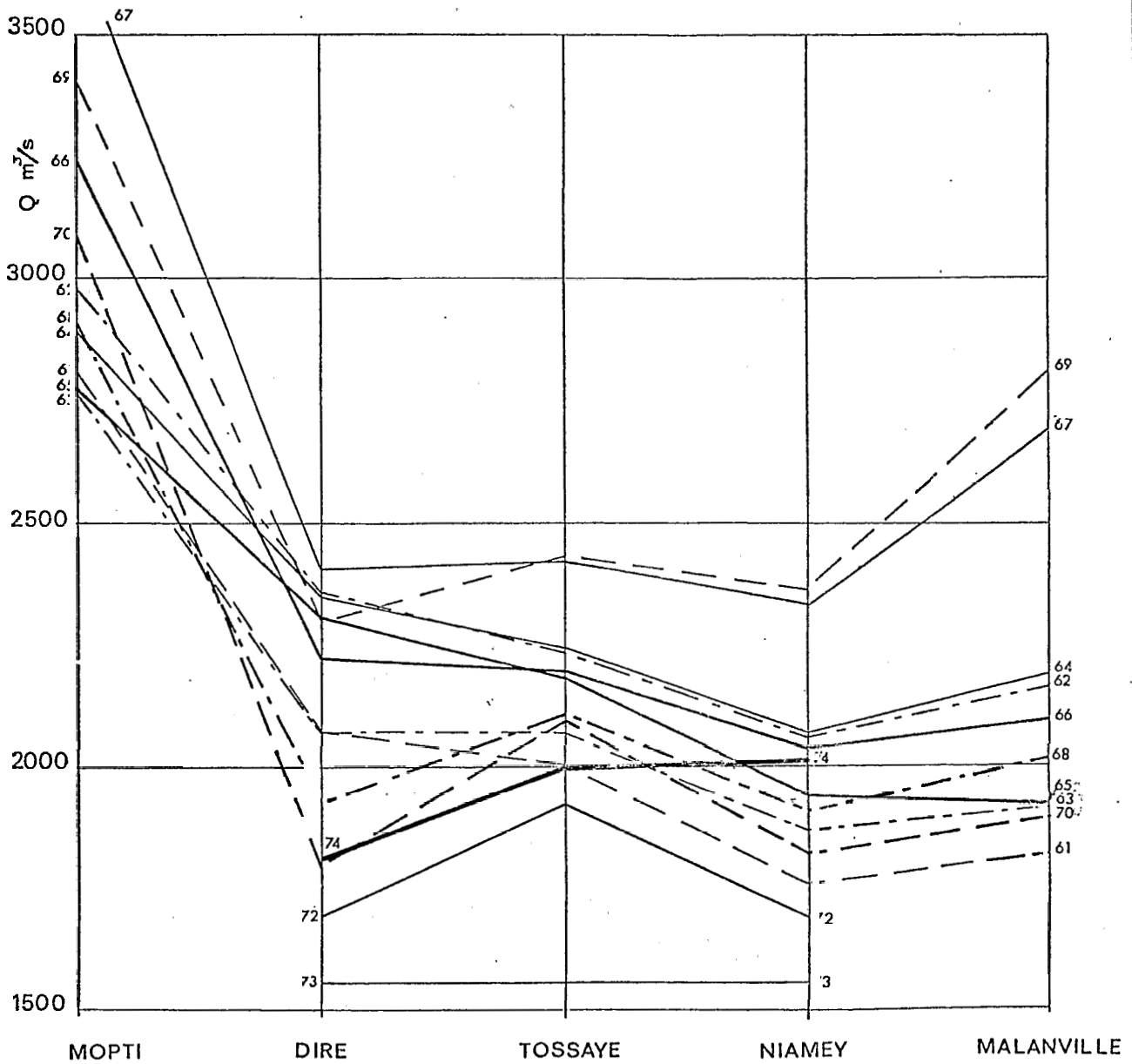


Figure 5

Figure 5 - Évolution des débits maximums après 1960

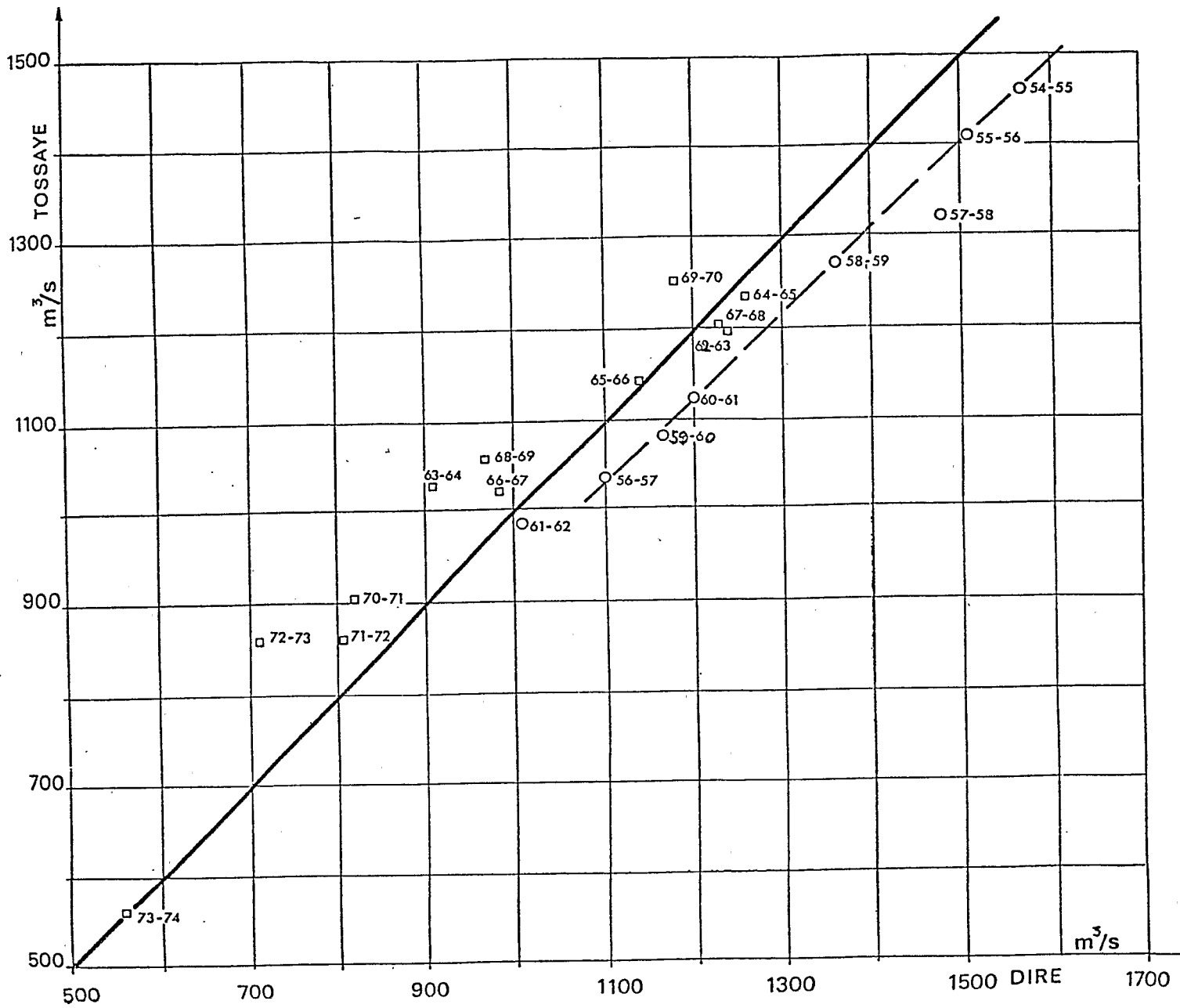
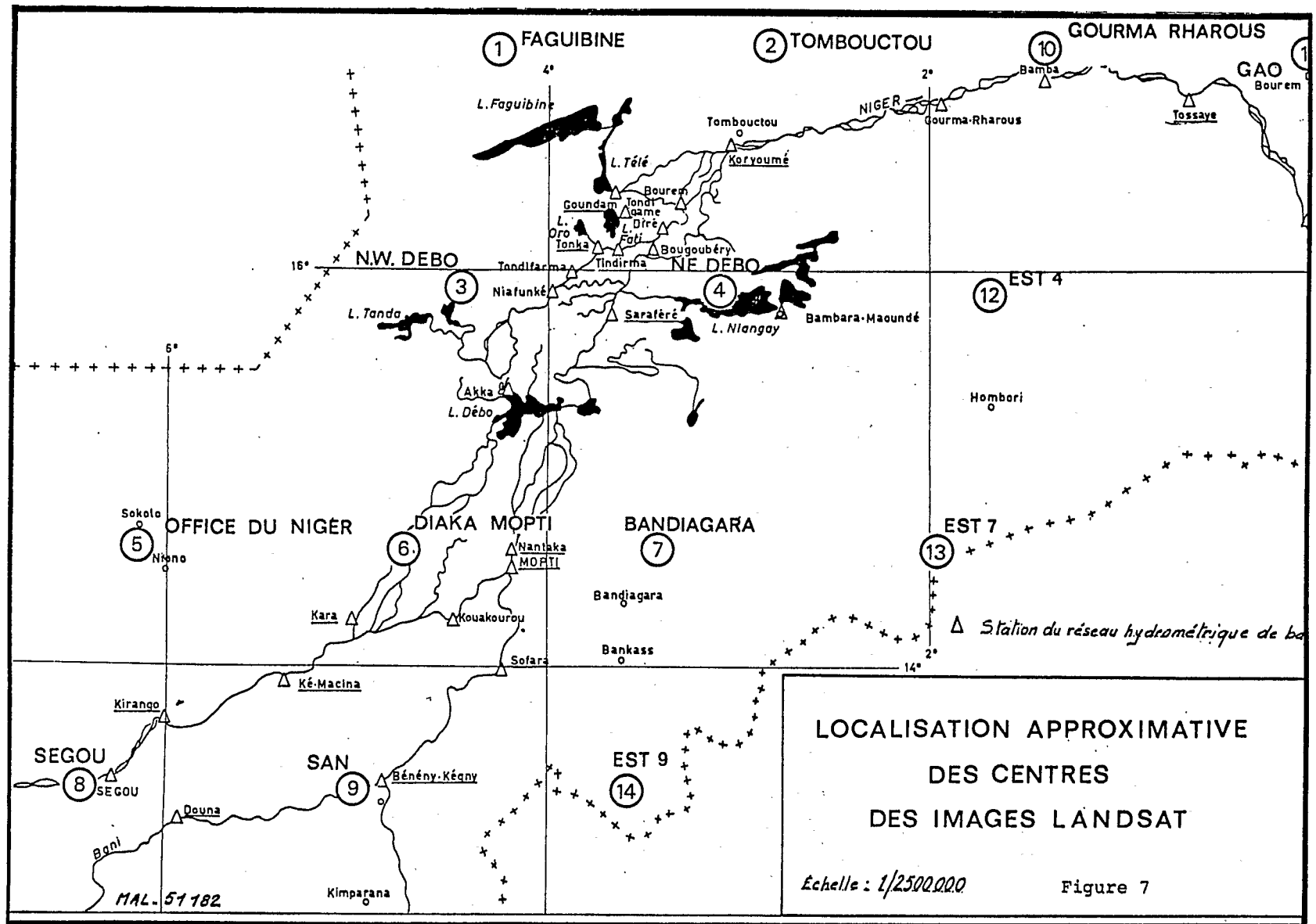


Figure 6 - Corrélation des modules annuels à Diré et Tossaye

Figure 7 - Localisation des centres des images Landsat



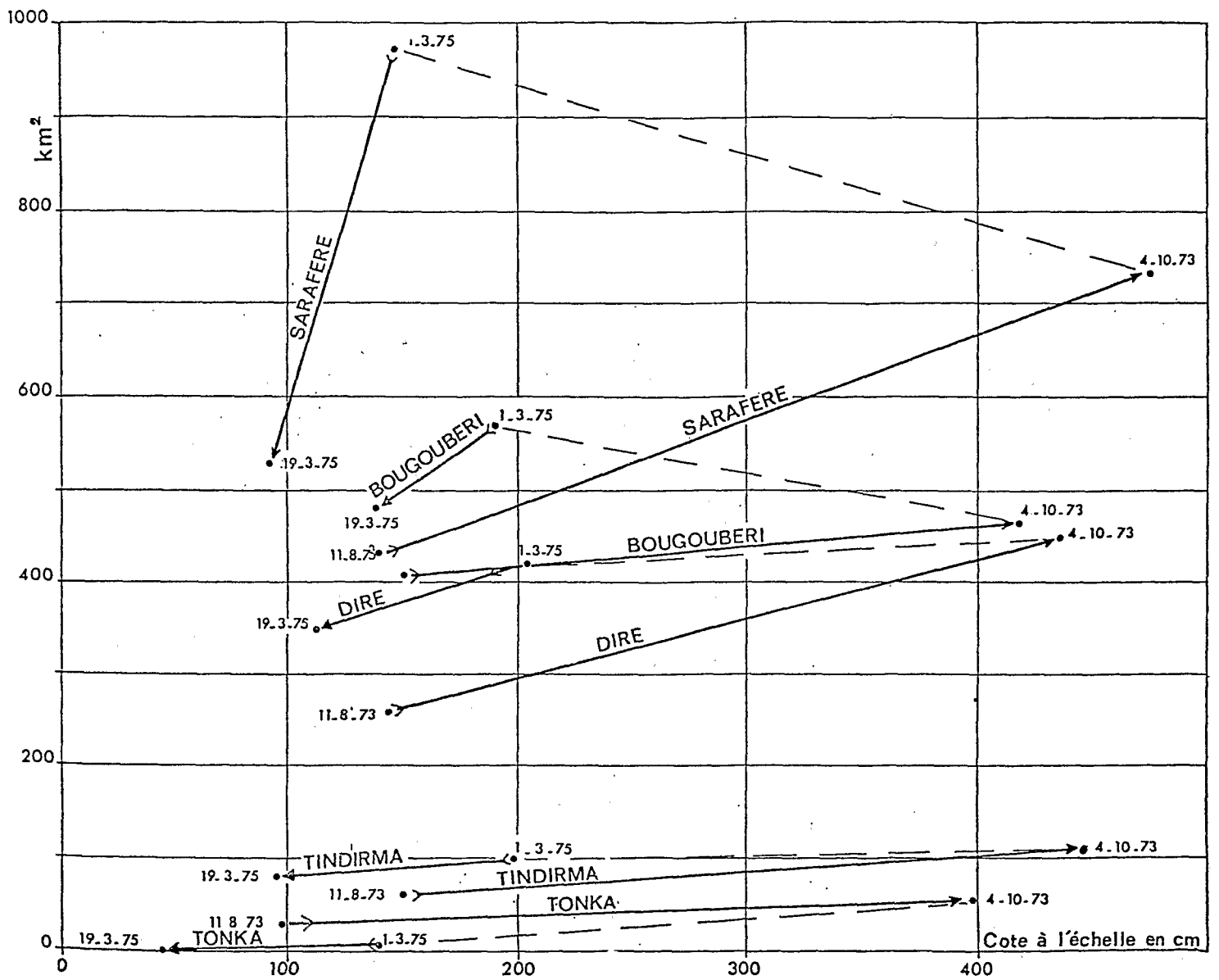
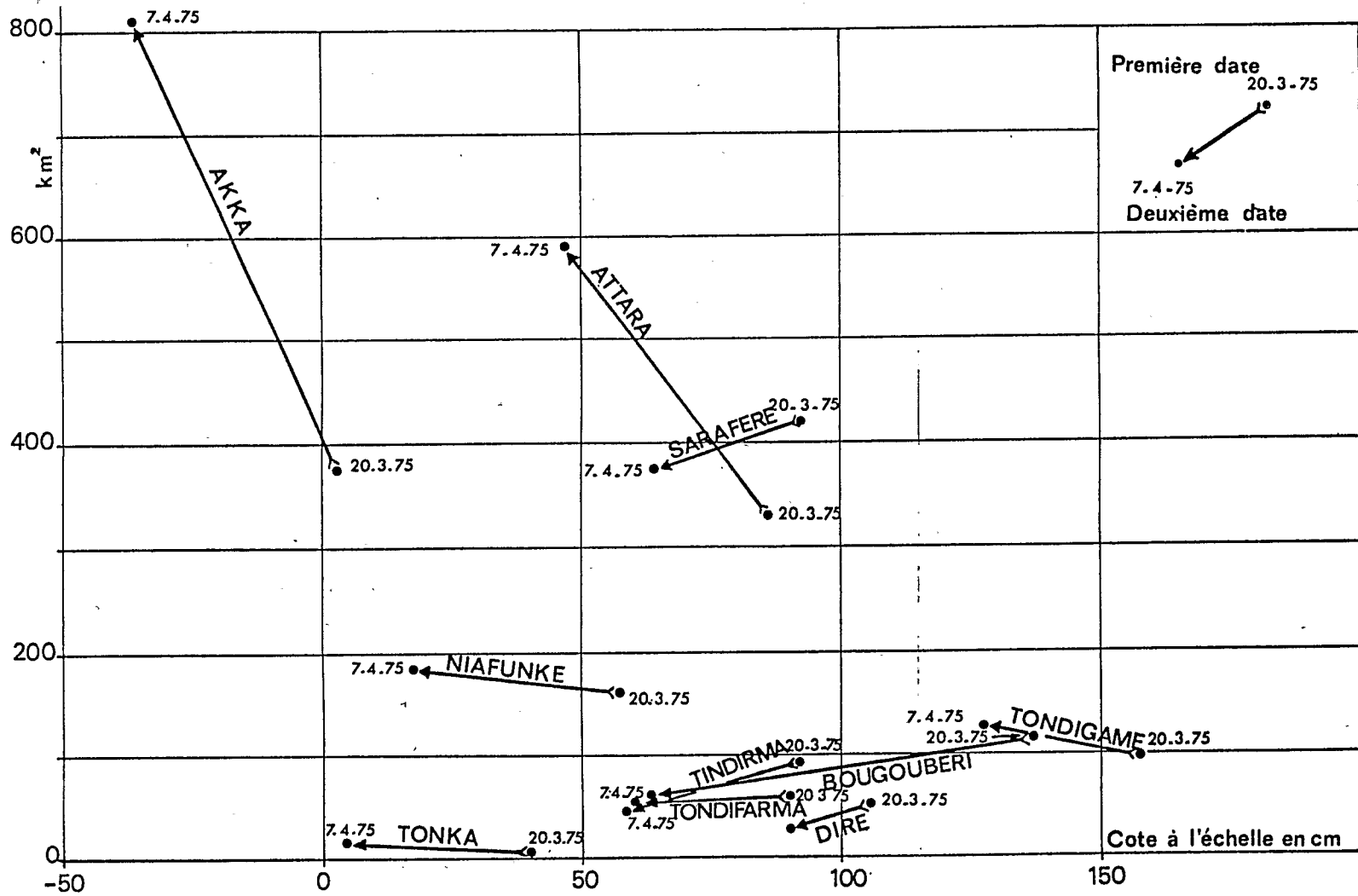


Figure 8 - Relation entre la cote à l'échelle et la surface inondée (Image 4)

Figure 9 - Relation entre la cote à l'échelle et la surface inondée (Image 3)



Numéro du point.		-Date.		-Heure.		-Observateur.	
PHOTO: numéro de la pellicule.				-Numéro de la vue.			
<u>ETAT DU CIEL</u>		<input type="checkbox"/> Clair	<input type="checkbox"/> Brume	<input type="checkbox"/> Poussière	<input type="checkbox"/> Harmattan		
<i>(Une seule croix)</i>		<input type="checkbox"/> 4/4 nuages	<input type="checkbox"/> 3/4 nuages	<input type="checkbox"/> 2/4 nuages	<input type="checkbox"/> 1/4 nuage	<input type="checkbox"/> Vert+Sable	
<u>OBJET PRINCIPAL</u>		<u>OBJET SECONDAIRE</u>		<u>OBJET TERTIAIRE</u>			
<i>(Une seule croix)</i>		<i>(Une seule croix)</i>		<i>(Une seule croix)</i>			
<input type="checkbox"/> EAU <input checked="" type="checkbox"/> ARBRES <input type="checkbox"/> Baobabs <input type="checkbox"/> Acacia <input type="checkbox"/> Tamarinier <input type="checkbox"/> ARBUSTES <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> BUISSONS <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> PLANTES AQUATIQUES <input type="checkbox"/> Bourgou <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> CULTURES <input type="checkbox"/> Riz <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> SOL NU		<input type="checkbox"/> EAU <input type="checkbox"/> ARBRES <input type="checkbox"/> Baobabs <input type="checkbox"/> Acacia <input type="checkbox"/> Tamarinier <input type="checkbox"/> ARBUSTES <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> BUISSONS <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> PLANTES AQUATIQUES <input type="checkbox"/> Bourgou <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> CULTURES <input type="checkbox"/> Riz <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> SOL NU		<input type="checkbox"/> EAU <input checked="" type="checkbox"/> ARBRES <input type="checkbox"/> Baobabs <input type="checkbox"/> Acacia <input type="checkbox"/> Tamarinier <input checked="" type="checkbox"/> ARBUSTES <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> BUISSONS <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> PLANTES AQUATIQUES <input type="checkbox"/> Bourgou <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> CULTURES <input type="checkbox"/> Riz <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> SOL NU			
<u>QUALIFICATIF</u>		<u>QUALIFICATIF</u>		<u>QUALIFICATIF</u>			
<i>(Une ou plusieurs croix)</i>		<i>(Une ou plusieurs croix)</i>		<i>(Une ou plusieurs croix)</i>			
<input type="checkbox"/> Coloré <input type="checkbox"/> Clair <input type="checkbox"/> Foncé <input type="checkbox"/> Jaune <input type="checkbox"/> Rouge <input type="checkbox"/> Vert <input checked="" type="checkbox"/> Noir <input type="checkbox"/> Avec feuilles <input type="checkbox"/> Sans feuille <input type="checkbox"/> Très sec <input type="checkbox"/> Sec <input type="checkbox"/> Mouillé <input type="checkbox"/> Détrempe <input type="checkbox"/> Haut <input type="checkbox"/> Bas <input type="checkbox"/> Hauteur moyenne		<input type="checkbox"/> Dunaire <input type="checkbox"/> Dense <input type="checkbox"/> Clairsemé <input type="checkbox"/> Granuleux <input type="checkbox"/> Lisse <input type="checkbox"/> Pierreux <input type="checkbox"/> Rocheux <input type="checkbox"/> Sableux <input type="checkbox"/> Poudreux <input type="checkbox"/> Latéritique <input type="checkbox"/> Profond >1m <input type="checkbox"/> Peu profond <input type="checkbox"/> Stagnant <input type="checkbox"/> Courant <input type="checkbox"/> Local <input type="checkbox"/> Fluvial		<input type="checkbox"/> Coloré <input type="checkbox"/> Clair <input type="checkbox"/> Foncé <input type="checkbox"/> Jaune <input type="checkbox"/> Rouge <input type="checkbox"/> Vert <input type="checkbox"/> Noir <input type="checkbox"/> Avec feuilles <input type="checkbox"/> Sans feuille <input type="checkbox"/> Très sec <input type="checkbox"/> Sec <input type="checkbox"/> Mouillé <input type="checkbox"/> Détrempe <input type="checkbox"/> Haut <input type="checkbox"/> Bas <input type="checkbox"/> Hauteur moyenne			
				<input type="checkbox"/> Dunaire <input type="checkbox"/> Dense. <input type="checkbox"/> Clairsemé <input type="checkbox"/> Granuleux <input type="checkbox"/> Lisse <input type="checkbox"/> Pierreux <input type="checkbox"/> Rocheux <input type="checkbox"/> Sableux <input type="checkbox"/> Poudreux <input type="checkbox"/> Latéritique <input type="checkbox"/> Profond > 1m <input type="checkbox"/> Peu profond <input type="checkbox"/> Stagnant <input type="checkbox"/> Courant <input type="checkbox"/> Local <input type="checkbox"/> Fluvial			

HAL 51484

Figure 10 - Fiche d'observation au sol