

H.G.LL/49/TRA.  
Original:français

COMITE NATIONAL POUR LE PROGRAMME HYDROLOGIQUE INTERNATIONAL

COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'HYDROLOGIE DES REGIONS PLATES  
11-20 Avril, 1983 - Olavarría - ARGENTINA

QUELQUES PROBLEMES HYDROLOGIQUES CONCERNANT  
LA CUVETTE LACUSTRE DU NIGER

Marcel F. ROCHE

Service Hydrologique de l'ORSTOM  
Bondy, France

## RÉSUMÉ

### Quelques problèmes hydrologiques concernant la cuvette lacustre du Niger

Marcel F. Roche

La sensibilité des régimes hydrologiques aux facteurs morphologiques se trouve considérablement amplifiée dans les régions plates. La cuvette lacustre du Niger en montre un exemple récent : une variation subite des conditions de propagation des crues dans le tronçon qui s'étend entre l'entrée de cette cuvette et le seuil de Tossaye au nord-est de la boucle. L'auteur a jugé bon, dans son exposé, de décrire avec quelques détails le contexte géographique avant d'en arriver à l'hydrologie proprement dite. Il profite également de l'occasion pour donner quelques informations qui n'ont pas de liaison directe avec le sujet principal mais présentent à son avis un intérêt majeur pour un éventuel aménagement des eaux dans le bassin du Niger : il n'est pas indifférent, par exemple, qu'en moyenne 46% des apports entrant dans la cuvette ne reparassent pas à la sortie.

## RESUMEN

### Algunos problemas hidrológicos relacionados con la cubeta lacustre del Níger

La sensibilidad de los regímenes hidrológicos a los factores morfológicos se encuentra considerablemente ampliada en las regiones llanas. La cubeta lacustre del Níger muestra un ejemplo reciente: una variación brusca de las condiciones de propagación de las crecidas en el tramo que se extiende entre la entrada de esa cubeta y el umbral de Tossaye al noreste del meandro. El autor ha juzgado oportuno describir en su trabajo, con ciertos detalles, el contexto geográfico antes de entrar en la hidrología propiamente dicha. Aprovecha también la ocasión para dar algunas informaciones que no tienen relación directa con el objeto principal, pero que, desde su punto de vista, presentan un interés mayor para un eventual ordenamiento de las aguas en la cuenca del Níger: no deja de ser llamativo, por ejemplo, que un término medio del 46% de los aportes que entran a la cubeta, no reaparezcan en la salida.

## ABSTRACT

### Some hydrological problems related with the lake basin of the Niger

The sensibility of the hydrological regimes and morphological factors are considerably enlarged in plain areas. The lake basin of the Niger shows a recent example: a sharp variation of the propagation conditions of overflows in the reach going between the basin entrance and the Tossaye threshold at the northeast of the meander. The author has considered convenient to describe in his work, somehow detailed, the geographic context, previously dealing with hydrology. He also gives some information having no direct relation with the main object, but, from his own point of view, has a major interest considering a possible arrangement of waters in the Niger basin. It is interesting, as example that a mean average of the 46% of the yielding inflows can not be recorded at the basin outlet.

## 1 - Un comportement curieux et la position d'un problème

En 1970, M. Chaperon, hydrologue de l'ORSTOM en poste à Niamey, procédant à une mise au point des données hydrologiques du pays, trouva que le débit maximal de la crue de 1968 était anormalement élevé pour le volume écoulé dans l'année. Il alerta M. Jaccon, son collègue de Bamako, qui se montra fort étonné car la crue du Niger à Koulikoro avait été très modérée cette année, la crue du Bani franchement déficitaire, de sorte que l'onde de crue du Niger s'était présentée à l'entrée dans la cuvette lacustre avec un maximum nettement inférieur à la moyenne. Une étude systématique des crues passées, basée essentiellement sur les hauteurs afin d'éliminer autant que possible l'influence d'un éventuel mauvais étalonnage des stations, sembla montrer que le comportement de la crue, dans son transfert de l'entrée de la cuvette à Niamey, semblait dans l'anarchie depuis 1962. Il se passait donc quelque chose.

Il fut décidé d'étudier le problème et un programme assez considérable fut mis en place avec pour premier objectif de cerner sinon les causes premières du phénomène, tout au moins leurs conséquences immédiates capables de l'engendrer, et en tout cas de localiser la région fautive pour autant qu'il y ait localisation.

Les premières hypothèses de travail envisagées concernaient une éventuelle modification morphologique de la cuvette et une influence des endiguements érigés à des fins agricoles. Une première phase, pendant laquelle de nouvelles stations hydrométriques ont été installées et de nouvelles mesures effectuées (campagnes 1975-1976 et 1976-1977 qui ont donné lieu à un premier rapport de synthèse par F. Moniod), n'a pas permis de résoudre le problème. Elle semblait toutefois avoir définitivement orienté les recherches vers une modification à l'intérieur de la cuvette lacustre bien que l'examen du terrain, l'examen détaillé des séries de photographies aériennes obtenues à différentes époques, l'interprétation de l'imagerie Landsat (télé-détection), qui ont fourni de précieux renseignements par ailleurs, n'aient rien donné quant à la solution du problème des anomalies.

Une deuxième phase d'études a été entreprise sous la direction de J.C. Klein, hydrologue ayant une formation de base géologique. Elle a recouvert la période 1977-1979 et la première campagne a donné lieu à un rapport intérimaire de Klein publié en avril 1979. Tout en continuant les observations hydrologiques, cette deuxième phase a vu un développement des recherches orientées vers la morphologie et la géologie, impliquant la participation de plusieurs disciplines. Le champ des causes a paru s'élargir aussi bien en ce qui concerne leur nature que leur localisation géographique. On a évoqué des facteurs tectoniques (micro-tectonique actuelle), déformations du socle à très grand rayon de courbure intéressant non seulement la cuvette lacustre mais, au-delà même de la boucle du Niger, le sillon sénégalais et le socle africain jusqu'à l'Ethiopie.

L'observation de nombreux indices (effondrements, fentes), dont l'évolution est actuellement perceptible, semble aller dans ce sens, de même que les résultats de quelques enquêtes concernant des bruits, des souffles qui seraient liés à des micro-séismes. Il a même été

envisagé de lancer une campagne de micro-seismicité. On a également envisagé les causes de ces causes qui ne seraient peut être pas toutes d'origine interne.

L'évolution de ce débat a quelque peu fatigué les bailleurs de fonds qui souhaitaient en revenir à des résultats plus directement utilisables pour la réalisation des aménagements. On envisageait en effet d'une part de construire un modèle mathématique d'hydraulique fluviale de la frontière de la Guinée (dans un premier temps) jusqu'à celle du Nigéria, d'autre part de mettre en place, sous les auspices du PNUD et de l'OMM, un système de prévision des hauteurs et des débits sur tout le bassin du Niger (projet HYDRONIGER). Sans mettre en doute l'intérêt des recherches sur les causes de l'anomalie constatée, les promoteurs de ces projets ne voyaient pas très bien comment on pourrait en pratique contrecarrer le travail de la nature et empêcher par exemple la croûte terrestre de bouger et de se courber, si tel était le cas. En termes clairs, les bailleurs de fonds voulaient qu'on leur dise s'il y avait des secteurs où l'on puisse localiser les principales causes des variations du régime et s'il était possible de mettre en oeuvre des modèles adaptables à ces variations, par exemple par auto-réglage progressif.

On a donc repris à la base l'ensemble de l'étude hydrométrique. La critique des données hauteurs d'eau d'abord : dans une zone aussi plate, les relations entre les hauteurs d'eau aux différentes stations limnimétriques constituent un niveau de très grande sensibilité. Mais pour que cet instrument puisse rendre des services, il faut que les relevés soient cohérents, c'est à dire que les zéros des échelles ne bougent pas ou que leurs variations soient bien connues, et que les observations soient bien faites par des observateurs compétents et consciencieux ; ces deux conditions sont rarement remplies de façon réellement satisfaisante et le *bruit de fond* engendré par ces erreurs peut masquer la réalité des phénomènes.

L'étalonnage des stations ensuite : il conditionne la connaissance des relations hauteurs-débits aux différentes stations et par suite celle de la dynamique de l'écoulement. En fait, c'est surtout l'évolution de ces relations dans le temps, associée aux corrélations inter-échelles, qui permet la localisation du processus de variation des régimes.

La mise en oeuvre de cette méthode patiente et laborieuse n'a certes pas permis d'élucider les causes profondes, mais elle a permis de répondre de façon à peu près satisfaisante aux besoins des aménageurs. Les études continuent, notamment sur le terrain, car bien des points demandent à être précisés.

## 2 - Le milieu physique

La *cuvette lacustre* ou *delta intérieur* du Niger constitue une entité géographique complexe qui, dans un environnement quasi désertique, a constitué le berceau de civilisations variées et le grand axe des échanges entre le nord et le sud de l'Ouest africain. On ne saurait mieux l'introduire qu'en citant la présentation de Claude Auvray dans la première version de la Monographie du Niger (ORSTOM) :

*" La cuvette lacustre c'est la tache bleue au centre de l'Afrique de l'Ouest. C'est le grand fleuve qui s'étale,*

transpire, s'apaise et imprègne le Sahel avant de regarder la mer. C'est le Niger qui s'endort à l'abri du vent sec, dans la fraîcheur des bourgoutières, et clapote au ras des dunes vives, sous les palmiers fourchus.

Un décor à la fois monotone et dur, des couleurs aveuglantes mais délicates au déclin du soleil, des images baroques : troupeaux, comme des mirages, coupés en deux par l'eau, baignant les poitrails, pirogues chargées à plein bord, glissant sur la plaine en dehors des eaux vives, un amas rocheux flottant au loin à l'entrée d'un grand lac.

Ajoutons le silence agréable des grandes étendues, la sécheresse extrême qui ouvre les poumons à l'odeur envahissante du poisson boucané.

Pays de contrastes qui ne se livre que lentement. D'abord l'enthousiasme, le miracle de l'eau ; l'eau, la terre et le soleil, la vieille trilogie de l'abondance, puis la prise de conscience du défaut chronique d'harmonie : les troupeaux efflanqués errant en mai, abreuvés à refus mais grattant le sable sec, et l'inverse au loin, dans les maigres pêturages d'hivernage d'où l'eau s'est retirée. C'est la marche continue entre la soif et la faim, sous le soleil devenu cette fois odieux et sans pitié.

*Nature impulsive et débridée, qui détruit elle-même ce qu'elle a trop généreusement donné. "*

D'une manière plus prosaïque, la cuvette apparaît comme intermède anastomosé dans le tracé relativement unidimensionnel du fleuve de sa source à son delta (le vrai, celui de l'embouchure), au lit majeur finalement assez peu développé comparé à celui du Sénégal, du Nil du Logone-Chari. Sa caractéristique morphologique essentielle est la platitude de son relief qui se traduit par des problèmes d'écoulement très particuliers, notamment dans les relations entre les hauteurs et les débits, et par l'extrême sensibilité du mode de propagation de ces débits à toute modification morphologique de la cuvette.

La figure 1 montre la zone géographique (partie hachurée) à l'intérieur de laquelle elle se situe.

## 2.1 Cadre géographique

### 2.1.1. Les limites de la cuvette (figure 2)

Comme c'est généralement le cas de ce type de formation morphologique, ses limites ne sont pas très précises et le passage d'un réseau hydrographique à lit majeur *normal* à la partie anastomosée où les zones inondées prennent une extension inhabituelle, est assez progressif. La délimitation comporte donc toujours une part d'arbitraire. Nous admettons ici les limites définies par Auvray, qui tiennent compte essentiellement des zones assez fréquemment inondées, lors de crues d'importance moyenne, en laissant de côté l'emprise des lacs latéraux, aussi bien de rive droite que de rive gauche. Le long du cours du Niger, cette zone est comprise entre Ké-Macina et Korioumé (au droit de Tombouctou) et comporte une surface inondable maximale de 80 000 km<sup>2</sup>.

Il va sans dire que la zone inondée proprement dite a des relations avec les lacs par l'intermédiaire de chenaux

dont les débits et finalement les volumes transités annuellement, ainsi que le taux de remplissage des lacs, dépendent du régime des crues du Niger pour chaque année et éventuellement de l'état *hydraulique* de ces chenaux.

### 2.1.2 La topographie

Les grandes lignes de la topographie de la cuvette sont actuellement assez bien connues. La figure 2 montre le tracé de la courbe de niveau d'altitude 270 m qui correspondrait approximativement à la cote d'inondation maximale, soit une surface de 80 000 km<sup>2</sup>. En hautes eaux, même pour une crue d'importance relativement faible, la moitié au moins de cette surface est inondée ; même lorsque l'eau n'est pas visible, la nappe est généralement affleurante sauf sur les petites hauteurs, *toguérés*, sur lesquelles sont rassemblés les habitats humains.

Les parties submergées sont couvertes en fait d'un mince film d'eau encombré par la végétation aquatique. Dans la partie lacustre de la cuvette, les limites du bassin ont été définies de manière arbitraire mais logique, en considérant l'ensemble de la zone d'expansion des eaux rattachée superficiellement au fleuve. Topographiquement ces limites perdent leur sens puisqu'elles se trouvent à une altitude inférieure à celle des eaux du Niger. Ce dernier apparaît, non plus classiquement comme collecteur drainant un bassin de réception mais plutôt comme un canal distributeur alimentant la cuvette. La notion habituelle de bassin versant ne pourrait s'appliquer que dans les zones présentant un relief et une couverture géologique qui permettent le ruissellement et par conséquent l'existence d'un réseau hydrographique normal. De telles zones existent à l'intérieur des limites du bassin ainsi définies mais elles alimentent souvent des émissaires ou des lacs éloignés et en contrebas, dont les eaux ne retournent jamais au cours principal. Seul le bassin de la Yamé issue du plateau Dogon contribue, pour une part d'ailleurs négligeable, à l'alimentation du Niger.

Un observateur aérien survolant la cuvette entre Ségou et Diré au maximum de son remplissage contemple une immense étendue d'eau dont les différences de teintes permettent d'identifier assez facilement les bras principaux et secondaires, les émissaires, les chapelets de mares et les grands lacs, dont émergent les *toguérés* habités, quelques collines de dunes fixées, d'étroits bourrelets de rive, et où on distingue parfaitement les grandes *bourgoutières*, ces plaines profondément inondées couvertes de graminées aquatiques caractéristiques de la région.

En conséquence d'un relief très doux et d'une pente longitudinale presque inexistante, les vitesses superficielles sont en général extrêmement faibles, sauf dans les bras principaux où elles peuvent atteindre en crue 0,3 à 0,6 m/s, et dans les émissaires où elles peuvent être plus élevées.

### 2.2. La géologie (Fig. 3)

La cuvette lacustre définie par les limites d'Auvray commence au franchissement par le Niger et le Bani de la limite du faciès primaire gréseux recouvrant le socle ancien granitique imperméable, dont les affleurements ne sont visibles que très en amont de Bamako. La direction générale du socle ancien est SSO-NNE. Sur ce

socle, on trouve la succession classique des séries sédimentaires gréseuses ozoïques, appelées grès horizontaux. Les différentes couches apparaissent comme des sortes d'auréoles sensiblement concentriques, autour d'une cuvette beaucoup plus large dont le centre serait situé dans la région du HODH.

La cuvette lacustre se trouve dans le quart sud-ouest de cette cuvette ou fosse géologique et on y rencontre dans l'ordre, de bas en haut, les étages suivants :

- grès de Sotuba
- grès de Bobo-Dioulasso
- schistes gréseux, verts bleus et rouges
- grès de Koutiala
- grès de Bandiagara

Le pendage général de la fosse sous le delta central est dirigé approximativement vers le N-NO. Le fond primaire comporterait un certain nombre de plissements (rides) parallèles, orientés SO-NE ; les principaux, dont on peut voir des affleurements, étant les suivants :

- Anticlinal de Bandiagara (schistes visibles à Baboye),
- Anticlinal de Togo Débo (alignés sur l'affleurement gréseux de Diafarabé et les vestiges de grès constituant aux environs du Débo, les monts Guindio, le rocher Marie-Thérèse et le mont Saint-Charles, étage des grès de Bandiagara).
- Anticlinal de Néma constituant les collines barrant en partie la fenêtre du HODH.

Sans entrer dans les détails physiques des roches constituant les différents étages de la série primaire, indiquons seulement que les grès de Bandiagara sont plus puissants, plus silicifiés et moins poreux que ceux de Koutiala. La circulation des eaux y est importante par fissures et diaclases, mais les nappes inexistantes. Dans la cuvette lacustre, ils sont démantelés et n'apparaissent que très rarement ; au contraire l'étage inférieur (grès de Koutiala) en constitue le radier général et le toit de la nappe profonde. Au-dessous, les schistes verts forment souvent le mur de la couche aquifère et, peut-être, une zone de circulation profonde.

L'intérieur de cette dépression primaire s'est comblé principalement entre le Tertiaire moyen et le Quaternaire. Il ne resterait aucune trace des dépôts antérieurs.

Au tertiaire, il s'agirait de formations sédimentaires à caractère continental ou désertique comprenant :

- Le continental intercalaire (ou indifférencié) : grès, sables, argiles.
- Le continental terminal (au-dessus) : grès, argileux, ocres, bariolés rouges ou violets.

Ces deux étages sont puissants (jusqu'à 100 m), entièrement aquifères, et jouent un rôle fondamental dans l'hydrogéologie de la région.

Enfin, le Quaternaire est caractérisé par des sables, des sables grossiers, des graviers, des argiles (banco), des argiles

noires (fonds de mare ou sols hydromorphes), des diatomites dans le fond de certains lacs. En plus des dépôts d'origine fluviale, le relief est encombré d'apports éoliens (dus à l'harmattan, vent de saison sèche), constitués de sables fins et d'argiles poudreuses très colmatantes.

Il n'est pas possible d'entrer ici dans le détail de la géologie des différentes parties de la cuvette, ce qui ne serait pourtant pas sans intérêt pour le problème qui nous occupe. On pourra se reporter avec intérêt par la description qui en est faite dans la monographie du Niger.

Par contre, on ne peut guère se dispenser de résumer les opinions des spécialistes qui se sont penchés sur l'histoire du fleuve et notamment de la cuvette lacustre. Sans insister sur les importants travaux consacrés à cette question, notamment sur l'étude par Y. Urvoy des séquences sèches et humides et de leur influence sur la morphologie de la région, on exposera quelques données simples afin surtout d'évoquer le sens de variation future des phénomènes hydrologiques de la cuvette lacustre. Ce qui suit est tiré du texte d'Auvray.

On a tracé sur la carte de la figure 2 la courbe de niveau correspondant actuellement à la cote 270 m. La cote maximale des hautes eaux est de 255 m à Tossaye. Supposons que la cote 270 corresponde sensiblement au niveau maximal de la cuvette lacustre dans les temps anciens. Pour une telle cote à cette époque, le véritable fond de la cuvette se trouvait dans les lacs de l'Aklé ou d'Arouane. Elle était vraisemblablement alimentée par une série de bras situés beaucoup plus à l'ouest que le delta actuel, pourquoi pas, par exemple, le cours actuel du Fala, puis la chicane de Nampala, le fossé d'Quartemachet, le tracé actuel du Faguibine et la direction d'Arouane, en passant au nord du massif de Goundam. D'après P. Viguiier (rapport sur les lacs rive gauche de 1941), on trouverait, sous le fond actuel du Faguibine, des sables alluviaux non éoliens très différenciés; ainsi que des coques de mollusques bivalves indiquant une "submersion très prolongée et un courant d'écoulement assez puissant".

La surface d'évaporation créée par une telle couverture suffisait largement pour absorber les débits provenant des massifs de Guinée, même en admettant des périodes beaucoup plus humides qu'actuellement. Il n'est donc nullement nécessaire de faire appel à une évacuation possible vers la mer (notamment par la vallée du Serpent et le Sénégal).

Les mouvements d'ensablement ont ensuite comblé progressivement la partie la plus septentrionale de la cuvette et certainement colmaté les chenaux d'accès les plus importants. Dans le même temps, les pertes par évaporation diminuant, le niveau de l'eau dans la cuvette a eu tendance à monter.

Arrêté vers le nord, le plan d'eau s'est mis à déverser par-dessus le socle primaire aux environs de Tossaye. Parallèlement le delta a commencé vers l'Est une lente migration. L'érosion consécutive du seuil de Tossaye a entraîné un abaissement régulier du niveau maximal de la retenue et augmenté le volume évacué, res-



treignant la surface inondée. Des volumes de plus en plus importants ont emprunté l'ancienne vallée du Tilemsi en la recreusant et en modifiant son profil d'équilibre. De même, à partir du seuil érodé, le profil en long s'est affouillé par voie régressive vers l'amont et le niveau général de l'écoulement s'est abaissé dans le delta.

La fenêtre de Nampala étant bouchée, le Niger a délaissé son ancien bras et s'est tourné vers l'Est, vers la frange orientale de son ancienne cuvette. Les débits déversés par le seuil de Tossaye restant encore faibles, les inondations dans la zone marginale ont conservé une grande importance. Les grandes dépressions et l'ancien delta du Nord s'assèchant faute d'alimentation massive, les eaux d'inondation se sont mises à déverser à travers le massif de Goundam vers le lac Faguibine, créant ainsi l'aspect actuel de cette région. Sous l'ensablement, la cuvette Nord se réduisait de plus en plus : il n'en restait que le lac Faguibine et la dépression des Daounas protégée par le massif de Goundam. Les surfaces d'évaporation diminuant, le niveau a pu s'y exhausser et réalimenter à contre-sens le Tilemsi de Bassi Kounou en partant cette fois du lac Faguibine.

Les émissaires du massif de Goundam ont commencé à se colmater (argiles éoliennes), les bourrelets de berge du fleuve se sont engraisés par dépôts latéraux des eaux d'inondation, le fond du lit s'est affaissé inexorablement sous l'effet de l'érosion rapide du défilé de Tossaye (apparition du seuil de Tondifarma). Ces trois facteurs jouant dans le même sens ont concouru à diminuer les volumes déversés vers l'ancienne cuvette pourtant située nettement en contre-bas, son alimentation n'étant plus dès lors assurée qu'en période de crues et bientôt de fortes crues. L'intermittence de cet écoulement a évidemment accéléré le colmatage des émissaires.

A partir de ces faits et de ces hypothèses, comment entrevoir l'avenir de la cuvette à une échelle géologique des temps ?

- a. Une donnée sûre : *l'augmentation régulière du débouché du défilé de Tossaye*, d'où accroissement des débits à l'exutoire de la cuvette, diminution régulière des zones inondées, et recreusement régressif du profil d'équilibre.
- b. Des conclusions fort probables :
  - Les restes de la *grande cuvette Nord* (Faguibine et Daounas) sont *voués rapidement à l'assèchement total*.
  - Le réseau hydrographique s'acheminera vers la *suppression du delta* par pénurie grandissante d'eau destinée à l'évaporation (action se propageant d'ailleurs du Nord vers le Sud) et suivant le principe du trajet le plus court.
  - *Migration vers l'Est des chenaux principaux* - Abandon possible du Diaka - Emprunt éventuel d'un bras plus direct à l'aval du Débo (Bara Issa) permettant surtout de contourner le seuil de Tondifarma dont l'effet se fera de plus en plus sentir.
  - Fixation définitive du lit assurant le tracé le plus court et les moindres pertes.

- c. Conséquences possibles : *remise en eau* ou tout au moins amélioration temporaire du sort des lacs de la rive droite.

On ne parlera pas ici des caractères hydrogéologiques de la cuvette. On a vu que le fond est pratiquement colmaté : l'infiltration ne peut avoir quelque importance que lors de crues exceptionnelles sur les franges marginales des mares et des zones d'inondation. Il ne semble donc pas qu'il y ait d'interférence appréciable entre les eaux superficielles de la cuvette et celles des nappes souterraines.

### 2.3. Les sols et la végétation associée

La pédologie de la cuvette a été faite principalement par Dabin, pédologue de l'ORSTOM. Ce qui suit résume quelques unes de ses conclusions.

La presque totalité des sols de la cuvette ont une origine exogène et leurs caractéristiques dépendent essentiellement des conditions de dépôt des matériaux d'origine et de l'évolution qu'ils ont subie.

Lors des inondations, il se produit un triage des sédiments d'après leur grosseur, en fonction de la longueur du transport, de la rapidité du courant, de la profondeur à laquelle se fait le dépôt etc... C'est ainsi qu'à la sortie du lit mineur se forment des bourrelets de berge limono-sableux (*Danga Fing*), que se déposent ensuite des sols limoneux dans les zones plates et, en s'éloignant encore du fleuve, des sols argileux dans les thalwegs et les dépressions du lit majeur.

Dans les marges des zones d'inondation, on trouve la même succession des sols limoneux, limono-sableux, sableux, suivant le niveau relatif du sol. Lorsque les sols sont exondés, les eaux de ruissellement entraînent les éléments fins par érosion des points hauts vers les points bas, les sables grossiers restent en place pour être remaniés par le vent et former des lignes de dunes.

Dans les bas-fonds; lorsque l'hydromorphie est permanente ou prolongée, il se produit une accumulation de matière organique due à la fois à la masse importante d'herbe décomposée sur place et aux conditions permanentes d'humidité qui, en réduisant l'aération, ralentissent la minéralisation des matières organiques. C'est ainsi que se forment certains sols argileux humifères du delta vif (sols *Boi Fing*) ; lorsque les bas-fonds sont exondés durant une grande partie de la saison sèche, les eaux chargées de sels minéraux, qui s'écoulent dans ces bas-fonds en provenance des pentes avoisinantes, s'infiltrent et s'évaporent sur place provoquant par remontée une concentration d'éléments basiques ; le phénomène conduit à la formation de certains sols riches en calcium (argiles noires tropicales ou sols *Moursis*, à vocation cotonnière) qui, en revanche, n'ont qu'une teneur médiocre en matières organiques.

Dans les sols limoneux ou limono-argileux hydromorphes (*Danga Fing*), le taux de matière organique est un peu moins élevé que dans les sols *Boi Fing*, mais reste néanmoins assez bon. En pro-

fondeur on observe un horizon d'accumulation ferrugineuse, dû au balancement de la nappe phréatique, qui présente des taches ocres caractéristiques et une structure polyédrique.

Dans le delta mort, les sols, qui ont à l'origine une formation identique à ceux du delta vif, ne sont plus inondés périodiquement et évoluent vers des types subarides; seuls quelques bas-fonds imperméables constituent des mares temporaires en saison des pluies. Cette dessiccation des sols, amenant une diminution de la végétation herbacée et une aération du sol, a provoqué un abaissement général du taux de matière organique, les phénomènes d'érosion par l'eau et par le vent sont devenus plus importants, accentuant les phénomènes de transport d'éléments fins et de sels minéraux vers les bas-fonds ainsi que la formation des dunes. L'alternance des saisons humides et sèches a provoqué, par évaporation et concentration, la formation de nodules calcaires dans les argiles noires (*Moursis*) et le concrétionnement des oxydes de fer dans les sols limono-sableux.

Ces sols limono-sableux ont évolué soit vers des sols brun-rouge subarides, soit vers des sols ferrugineux tropicaux; sous l'influence de l'érosion, les horizons d'accumulation ferrugineux ont été amenés en surface avec, par endroits, apparition d'un revêtement superficiel de gravillons ferrugineux durcis. C'est ainsi que se sont formés les sols *Danga* (ou sols brun-rouge subarides) et les sols *Danga Blé* (sols ferrugineux tropicaux).

Ces considérations et l'étude des propriétés des sols provenant de ces différents modes de formation ont conduit Dabin à proposer la classification suivante :

**DANS LE DELTA MORT :**

- *Seno* : Sols ferrugineux tropicaux non lessivés, sols beiges sableux. Se rencontrent sur les hauteurs du relief, près des dunes.

*Végétation* : *Guiera senegalensis*, *Schonefeldia gracilis*, baobab (*Adamsonia digitata*), *Acacia tortilis*.

Sol à forte perméabilité, rétention d'eau et point de flétrissement très bas.

- *Danga* : Sols brun rouge subarides, ou sols ferrugineux peu lessivés et non érodés. On les rencontre dans les zones plates.

*Végétation* : *Guiera senegalensis*, *Combretum micranthum*, *Boscia senegalensis*, *Acacia tortilis*, *Pterocarpus lucens*, *Adamsonia digita*, *Commiphora africana*. Tapis herbacé de *Schonefeldia gracilis*, et *Pennisetum pedicellatum*.

Sols très peu perméables en surface, rétention d'eau moyenne. Ils se dispersent facilement quand il pleut ou après irrigation : ce sont des terres battantes.

- *Danga blé* : Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, plus ou moins érodés. Ces sols se distinguent par une couleur ocre assez franche sur l'ensemble du profil; leur texture peut passer de limono-sableuse à

limono-argileuse en surface, leur structure est grumeleuse à polyédrique, friable en surface ; ils peuvent devenir très compacts avec revêtement dense de gravillons ferrugineux durcis dans les zones très érodées.

*Végétation* : Identique aux Danga mais avec *Pterocarpus lucens* dominant.

Sols moyennement perméables en surface et en profondeur, rétention d'eau moyenne. L'infiltration des eaux y est possible et l'on observe souvent des zones privilégiées de l'écoulement en profondeur.

- *Dian* : Sol brun subaride. Il forme de larges zones plates uniformes entre les sols Danga et Moursi, entre lesquels il s'intercale dans le modelé.

*Végétation* : Steppe très claire, *Acacia seyal*, tapis de *Schonefeldia gracilis*. Sol très peu perméable (surface et profondeur), rétention d'eau et point de flétrissement élevés.

Sujet au ruissellement.

- *Moursi* : Argile tropicale - Sol de thalweg - Microrelief "Gilgai" (moutonnement superficiel dû à l'infiltration non uniforme).

*Végétation* : Assez dense, *Acacia arabica*, *Acacia seyal*.

Perméabilité élevée en surface, moyenne en profondeur, rétention d'eau et point de flétrissement élevés.

Même en plein hivernage, les sols Moursi ne ruissellent pas, l'eau s'y infiltre grâce à leur structure (richesse en Ca).

- *Boa* : Sols gris hydromorphes. Mares temporaires.

*Végétation* : *Anogeissus leiocarpus*, *Myragina inermis*, *Acacia pinnata*, *Acacia ataxacantha*.

Perméabilité nulle en surface, moyenne en profondeur.

#### DANS LE DELTA VIF :

- *Boa Fing* : Sol gris noir hydromorphe, à engorgement total prolongé.

*Végétation* : Dans les sols limoneux à engorgement de profondeur on a une végétation arbustive :

*Terminalia Macroptera*, *Bauhinia reticulata*, *Pseudocedrela Kotschii*.

Dans les sols à engorgement prolongé, seules les graminées se maintiennent : *Panicum anabaptistum*, *Andropogon amplexans*, *Vetiveria nigriflora*.

Dans les zones à engorgement semi-permanent : *Bourgout* (*Echinochloa stagnina*).

Ce sol est très répandu dans toute la zone d'inondation du delta vif. La perméabilité est moyenne à bonne en surface, moyenne à faible en profondeur suivant l'engorgement.

On rencontre également des sols de type *Boi* plus compacts.

- *Dang Fing* : En bordure des zones d'inondation, sol brun gris à hydromorphie temporaire de profondeur. C'est souvent le sol des bourrelets de berge.

D'un point de vue hydrologique, les sols réagissent à l'eau de pluie (ou d'irrigation) de 3 manières différentes.

L'eau en général :

- a) ruisselle sur les Danga, Danga-fing et Dian,
- b) stagne sur les Boa et Boa-fing qui se trouvent dans les bas-fonds,
- c) s'infiltré dans les Danga-blé, Moursi et Seno.

#### 2.4. Le climat

Du point de vue climatique, la cuvette lacustre du Niger est à cheval sur deux subdivisions climatiques au sens des hydrologues : régime sahélien et régime subdésertique. Tous deux appartiennent à la famille des climats tropicaux africains de l'hémisphère nord caractérisés par une saison sèche et une saison des pluies dont l'alternance est réglée par le déplacement du front intertropical, trace au sol de la zone intertropicale de convergence. Durant la saison sèche, hiver boréal, souffle l'harmattan, vent sec et chaud qui vient du secteur nord-est, tandis que la mousson d'Afrique, vent frais et humide de secteur sud-ouest, est prédominante durant la saison des pluies, ou hivernage, dont la durée diminue quand on va vers le nord.

Une description détaillée de ce climat n'est pas d'intérêt majeur pour notre propos. pour les températures il suffira de savoir que les moyennes annuelles varient de 28 °C dans le sud de la cuvette à un peu plus de 29 °C dans le nord : l'influence de la cuvette a un effet modérateur marqué. les plus faibles valeurs des maximums journaliers se produisent en janvier (29,8 °C à Mopti et 30,2 °C à Tombouctou) tandis que celles des minimums sont observées de décembre à avril (14,1 °C à Mopti, 12,8 °C à Tombouctou). Les plus fortes températures diurnes ont lieu en avril-mai dans le sud (Mopti 39,8 °C ) et en mai dans le nord (43 °C à Tombouctou).

Pour l'humidité relative, la moyenne des maximums journaliers varie de 75% à Mopti à 54% à Tombouctou et celle des minimums de 30% à 21%. Les valeurs extrêmes en fin de saison sèche sont en avril de 49% à Mopti et de 32% à Tombouctou pour les maximums et de 12% et 10% respectivement pour les minimums. En hivernage, on observe en août 95% (Mopti) et 90% (Tombouctou) pour les maximums et 60% (Mopti) et 40% (Tombouctou) pour les minimums.

Quant à l'évaporation annuelle sur les parties inondées de la cuvette lacustre, elle varie approximativement de 1800 mm dans le sud à 2200 mm dans le nord.

Le facteur le plus important pour notre propos reste la pluviométrie, la figure 4 montre le réseau des isohyètes interannuelles récemment mis à jour pour la région. on voit que la moyenne globale pour la cuvette se situe autour de 450 mm. Comme pour toutes les zones arides, le régime pluviométrique est très irrégulier.

### 3 - L'hydrologie

La figure 5 montre l'implantation actuelle des stations limnimétriques et des stations de jaugeages. Ce réseau a été complété par les hydrologues de l'ORSTOM et son exploitation est assurée par le service hydrologique national avec la collaboration de l'ORSTOM.

Les stations hydrométriques, c'est à dire celles auxquelles on observe des débits permettent :

- d'évaluer les entrées et les sorties dans ou hors de la cuvette,
- de préciser le fonctionnement des bras principaux et secondaires, ainsi que celui des exutoires-tributaires des lacs.

Les stations limnimétriques (hauteurs d'eau seulement) permettent, conjointement avec les précédentes, d'établir les variations du plan d'eau dans la cuvette et d'évaluer dans une certaine mesure les pentes de l'écoulement, ou au moins les variations de ces pentes.

### 3.1. L'étalonnage des stations

Toutes les stations dont les résultats sont utilisés pour les études hydrologiques dans la cuvette sont non univoques, c'est à dire qu'à une hauteur donnée ne correspond pas un débit mais une fonction-débit dont la valeur dépend de la pente de la ligne d'eau à l'instant considéré. Comme il n'est guère possible d'effectuer en réseau des mesures de pente en même temps que des mesures de hauteurs d'eau, que d'autre part ces pentes sont très faibles et que les évaluations qu'on pourrait en faire auraient une précision très nettement insuffisante, il a été nécessaire de mettre au point des méthodes de calcul particulières. Pour les stations du Niger la méthode est basée sur les principes suivants :

En régime uniforme, pour une hauteur  $H$  à l'échelle on a un débit  $Q_0$  avec une vitesse moyenne  $V_0$  dans la section : selon Chézy

$V_0 = K(H) I_0^{1/2}$  (1),  $K$  dépendant de la rugosité (en principe constante) et de la section mouillée (qui dépend de  $H$ ) ;  $I_0$  est la pente de la ligne d'eau en régime uniforme, égale à la pente moyenne du radier.

Quand le débit varie, pour la même hauteur  $H$  :

$$V = K \cdot I^{1/2} \quad (2) \quad \text{où } I \neq I_0$$

Si le régime est graduellement varié, ce qui est toujours le cas ici, pendant un temps  $Dt$  on observe une variation de hauteur  $DH$  et une variation de pente  $DI = DH/Dx$ ,  $Dx$  étant la longueur parcourue en  $Dt$  par l'onde de crue. on a alors successivement ( $U$  étant la célérité de cette onde) :

$$\begin{aligned} Dx &= U \cdot Dt \\ DI &= DH/U \cdot Dt \end{aligned}$$

comme  $I = I_0 + DI$ ,  $V = K (I_0 + DI)^{1/2}$  ou encore, en tenant compte de (1) :  $V^2/V_0^2 = 1 + (I_0 \cdot U)^{-1} DH/Dt$

On pose  $y = V/V_0 = Q/Q_0$  et, sans entrer dans le détail des calculs, on obtient l'équation :

$$y = (1 + k \cdot G)^{1/2} \quad \text{ou } y^2 - 1 = k \cdot G \quad (2)$$

où  $G$  représente  $DH/Dt$  mais exprimé en cm/jour au lieu de m/s, et

$k = (8,64 \cdot 10^6 \cdot I_0 \cdot U)^{-1}$ . Pour  $G$  petit :  $y = 1 + \frac{1}{2} k G$ .

On trouvera en annexe la manière pratique de procéder (d'après un texte de Lamagat). Outre les problèmes de calcul, l'étalonnage des stations non univoques exige, pour une même précision, un nombre de mesure bien plus important que pour une station univoque. Les choses se compliquent encore du fait que cet étalonnage n'est pas toujours permanent mais peut dériver dans le temps. C'est ainsi que la station de Diré a subi un détarage entre les années 1966 et 1974. Les séries de mesures effectuées de 1951 à 1969, puis de 1975 à 1981 permettent d'obtenir deux courbes moyennes nettement distinctes alors que la droite de correction de gradient est la même, phénomène qu'on observe pour toutes les stations qui ont subi un détarage sauf pour Tonka (fig. 6).

### 3.2. Les débits

Les courbes d'étalonnage ainsi établies ont servi à transformer en débits les hauteurs relevées aux différentes stations hydrométriques de la cuvette ainsi qu'à son entrée (Koulikoro et Douna ou Ké Macina et Bébéni Kegny) et à sa sortie (Tossaye). Les valeurs de base sont des débits moyens journaliers, qui ont servi notamment aux études des anomalies des crues, dont on tire les débits moyens mensuels et les débits moyens annuels, éléments du bilan de la cuvette. Un autre paramètre intéressant est le débit maximal annuel : dans le cas de stations non univoques, il ne correspond pas à la hauteur maximale annuelle mais la précède de quelques jours. A titre d'exemple, le tableau 1 donne les débits moyens et maximaux annuels des principales stations depuis le début des observations jusqu'à 1979.

Les échantillons de ces différents paramètres font l'objet d'études statistiques, sans oublier la distribution statistique des niveaux aux différentes stations qui est d'un intérêt tout particulier dans ce genre de région très plate. La figure 7 donne en exemple la distribution statistique des débits moyens annuels à Diré. Le graphique est présenté en abscisses gaussiennes et on remarquera l'allure hypo-gaussienne de la courbe, caractéristique des fleuves à vastes zones d'inondations, le prélèvement par évaporation étant d'autant plus important que l'année est plus abondante : on aurait la même tendance avec les débits maximaux annuels, par suite de l'écrêtement des crues dans les zones inondées.

### 3.3. Bilan hydrologique de la cuvette

Ce bilan peut s'établir globalement pour une année en comptabilisant les entrées : apports amont et précipitations et les sorties : évaporation et volumes écoulés à l'exutoire de la cuvette.

Ce dernier terme est le plus accessible. Si on ajoute à la cuvette proprement dite, limitée à Tombouctou, le bief Tombouctou-Tossaye pour lequel les pertes, sans être négligeables, sont très inférieures à celles de la cuvette, ces volumes peuvent être calculés à partir des observations faites à Tossaye.

Les débits en entrée, assurés par le Niger et le Bani, peuvent être évalués de plusieurs manières. Pour le Niger, on peut faire appel aux stations de Koulikoro, de Sofara ou de Ké Macina ; pour le Bani, on a le choix entre Douna et Bébéni-Kegny. En fait, les périodes d'observations à ces différentes stations sont rarement

STATIONS PRINCIPALES DU DELTA INTERIEUR

Débits maximaux et modules (exprimés en m<sup>3</sup>/s)

| ANNEES | MOPTI |       | DIRE  |       | TOSSAYE |       | ANSONGO |         | NIAMEY |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|---------|---------|--------|-------|
|        | Q     | Qmax  | Q     | Qmax  | Q       | Qmax  | Q       | Qmax    | Q      | Qmax  |
| 1924   |       |       | 1.410 | 1.680 |         |       |         |         |        |       |
| 25     |       |       | 1.500 | 2.730 |         |       |         |         |        |       |
| 26     |       |       | 1.080 | 2.220 |         |       |         |         |        |       |
| 27     |       |       | 1.370 | 2.580 |         |       |         |         |        |       |
| 28     |       |       | 1.410 | 2.730 |         |       |         |         |        |       |
| 29     |       |       | 1.460 | 2.720 |         |       |         |         |        |       |
| 1930   |       |       | 1.270 | 2.430 |         |       |         |         |        |       |
| 31     |       |       | 1.140 | 2.250 |         |       |         |         |        |       |
| 32     |       |       | 1.200 | 2.330 |         |       |         |         |        |       |
| 33     |       |       | 1.200 | 2.340 |         |       |         |         |        |       |
| 34     | 1.135 | 3.160 | 950   | 2.120 |         |       |         |         |        |       |
| 35     | 1.285 | 3.390 | 1.050 | 2.230 |         |       |         |         |        |       |
| 36     | 1.490 | 3.610 | 1.260 | 2.420 |         |       |         |         |        |       |
| 37     |       |       | 910   | 2.060 |         |       |         |         |        |       |
| 38     |       |       | 1.050 | 2.260 |         |       |         |         |        |       |
| 39     |       |       | 995   | 2.120 |         |       |         |         |        |       |
| 1940   |       |       | 810   | 1.860 |         |       |         |         |        |       |
| 41     |       |       | 852   | 1.950 |         |       |         |         |        |       |
| 42     |       |       | 750   | 1.820 |         |       |         |         |        |       |
| 43     | 956   | 3.040 | 850   | 2.040 |         |       |         |         |        |       |
| 44     | 805   | 2.720 | 700   | 1.850 |         |       |         |         |        |       |
| 45     | 1.170 | 3.340 | 960   | 2.120 |         |       |         |         |        |       |
| 46     | 1.275 | 3.400 | 1.090 | 2.240 |         |       |         |         |        |       |
| 47     | 895   | 2.970 | 790   | 1.950 |         |       |         |         |        |       |
| 48     | 1.040 | 2.940 | 987   | 2.120 |         |       |         |         |        |       |
| 49     |       |       | 921   | 2.040 |         |       |         |         |        |       |
| 1950   | 1.270 | 3.520 | 1.140 | 2.370 | 1.080   | 2.030 |         |         |        |       |
| 51     | 1.580 | 3.560 | 1.415 | 2.540 | 1.310   | 2.230 | 1.296   | 2.110   |        |       |
| 52     | 1.480 | 3.640 | 1.320 | 2.530 | 1.240   | 2.260 | 1.230   | 2.140   | 1.200  | 1.670 |
| 53     | 1.560 | 3.800 | 1.420 | 2.580 | 1.300   | 2.230 | 1.302   | 2.110   | 1.250  | 2.050 |
| 54     | 1.700 | 3.800 | 1.520 | 2.680 | 1.460   | 2.380 | 1.428   | 2.280   | 1.320  | 2.100 |
| 55     | 1.620 | 3.790 | 1.480 | 2.670 | 1.410   | 2.350 | 1.368   | 2.230   | 1.300  | 2.170 |
| 56     | 1.160 | 3.270 | 1.060 | 2.260 | 1.030   | 1.980 | 1.012   | 1.930   | 966    | 1.720 |
| 57     | 1.545 | 3.790 | 1.440 | 2.660 | 1.370   | 2.230 | 1.289   | 2.150   | 1.210  | 2.060 |
| 58     | 1.430 | 3.460 | 1.320 | 2.350 | 1.240   | 2.110 | 1.250   | 2.030   | 1.200  | 1.830 |
| 59     | 1.220 | 3.385 | 1.110 | 2.300 | 1.070   | 2.070 | 1.082   | 2.014   | 1.020  | 1.850 |
| 1960   | 1.295 | 3.390 | 1.170 | 2.370 | 1.120   | 2.090 | 1.083   | 2.000   | 1.040  | 1.870 |
| 61     | 1.170 | 3.415 | 1.050 | 2.360 | 965     | 1.980 | 997     | 1.890   | 943    | 1.760 |
| 62     | 1.350 | 3.490 | 1.280 | 2.520 | 1.180   | 2.210 | 1.170   | 2.080   | 1.140  | 2.060 |
| 63     | 1.182 | 3.275 | 1.090 | 2.320 | 1.010   | 2.070 | 984     | 1.930   | 951    | 1.870 |
| 64     | 1.455 | 3.605 | 1.320 | 2.550 | 1.220   | 2.220 | 1.205   | 2.140   | 1.200  | 2.050 |
| 65     | 1.250 | 3.265 | 1.190 | 2.390 | 1.120   | 2.150 | 1.128   | 2.040   | 1.090  | 1.950 |
| 66     | 1.145 | 3.270 | 1.080 | 2.320 | 1.020   | 2.160 | 977     | (2.070) | 944    | 1.970 |
| 67     | 1.395 | 3.665 | 1.340 | 2.710 | 1.240   | 2.420 | 1.194   | (2.280) | 1.240  | 2.340 |
| 68     | 1.100 | 2.925 | 1.120 | 2.280 | 1.030   | 2.080 | 996     | (2.000) | 966    | 1.920 |
| 69     | 1.325 | 3.260 | 1.320 | 2.610 | 1.230   | 2.390 | 1.230   | (2.250) | 1.210  | 2.360 |
| 1970   | 948   | 3.070 | 914   | 2.130 | 893     | 1.990 | 845     | (1.920) | 804    | 1.820 |
| 71     | 866   | 2.925 | 893   | 2.220 | 851     | 1.930 | 820     | (1.860) | 796    | 1.820 |
| 72     | 689   | 2.190 | 793   | 1.890 | (860)   | 1.700 | (720)   | 1.670   | 711    | 1.560 |
| 73     | 562   | 3.210 | 625   | 1.700 | 596     | 1.550 | 589     | 1.540   | 586    | 1.460 |
| 74     | 894   | 2.915 | 946   | 2.340 | 867     | 2.050 | 838     | 1.950   | 871    | 1.980 |
| 1975   | 982   | 3.055 | 1.040 | 2.390 | 969     | 2.160 | 946     | 2.070   | 936    | 2.030 |
| 76     | 954   | 2.665 | 1.070 | 2.260 | 981     | 2.080 | 893     | (1.970) | 931    | 1.940 |
| 77     | 551   | 2.205 | 647   | 1.810 | 593     | 1.590 | 562     | 1.580   | 565    | 1.400 |
| 78     | 858   | 2.650 | 962   | 2.180 | 873     | 1.910 | 853     | 1.890   | 828    | 1.750 |
| 79     |       |       |       | 2.300 |         | 2.000 |         |         |        | 1.510 |



complètes et de la même durée ; d'autre part elles n'ont pas une situation identique par rapport à l'entrée réelle dans la cuvette. Pour les calculs de bilan, on a finalement choisi Ké-Macina et Bénéni-Kegny, quitte à utiliser les relations avec les autres stations pour compléter les séries. Les pertes globales dans la cuvette ont ainsi pu être estimées de 1954 à 1978 suivant le tableau ci-dessous

| ANNEES | MODULES ENTREE<br>(en m <sup>3</sup> /s) | PERTES EN DEBITS<br>(en m <sup>3</sup> /s) | PERTES EN VOLUMES<br>(10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ) |
|--------|--|--|--|
| 1954   | 2.753                                    | 1.296                                      | 40,9   |
| 55     | 2.682                                    | 1.274                                      | 40,2   |
| 56     | 1.796                                    | 770  | 24,9   |
| 57     | 2.620                                    | 1.300                                      | 41,0   |
| 58     | 2.207                                    | 962  | 30,3   |
| 59     | 1.943                                    | 871  | 27,5   |
| 1960   | 2.140                                    | 1.024                                      | 32,3   |
| 61     | 1.783                                    | 818  | 25,8   |
| 62     | 2.256                                    | 1.076                                      | 33,9   |
| 63     | 1.942                                    | 929  | 29,3   |
| 64     | 2.344                                    | 1.125                                      | 35,5   |
| 65     | 1.945                                    | 823  | 26,0   |
| 66     | 1.849                                    | 845  | 26,6   |
| 67     | 2.400                                    | 1.164                                      | 36,7   |
| 68     | 1.783                                    | 750  | 23,7   |
| 69     | 2.431                                    | 1.197                                      | 37,7   |
| 1970   | 1.578                                    | 685  | 21,6   |
| 71     | 1.580                                    | 729  | 23,0   |
| 72     | 1.194                                    | 334  | 10,5   |
| 73     | 985                                      | 399  | 12,6   |
| 74     | 1.594                                    | 727  | 22,9   |
| 75     | 1.732                                    | 763  | 24,1   |
| 76     | 1.585                                    | 604  | 19,0   |
| 77     | 883                                      | 295  | 9,3  |
| 1978   | 1.424                                    | 551  | 17,4   |

Les résultats sont portés sur la figure 8.

La régression peut être considérée comme linéaire :

$$\text{Pertes} = 0.555 \quad Q \quad - 195.4$$

(m<sup>3</sup>/s)                      entrée (m<sup>3</sup>/s)

avec un coefficient de corrélation de 0.989. La courbe en tireté donne les pentes en pourcentage du débit moyen annuel d'entrée. Ce dernier ressort, pour la période de 25 ans à 1987 m<sup>3</sup>/s avec un écart-type de 497 m<sup>3</sup>/s, soit un coefficient de variation de 0.263 et un coefficient d'assymétrie négatif qui traduit le caractère hypogaussien de la distribution. La moyenne des pertes, calculée d'après l'échantillon est de 870 m<sup>3</sup>/s soit 46% des entrées.

#### 3.4. Les anomalies (ou variations du régime du Niger)

On a décrit les déboires de Chaperon et indiqué les mesures qui ont été prises pour tenter d'éclaircir le mystère. Dès le début des investigations, il a paru assez clair qu'une dérive

des conditions de transfert de la crue avait commencé en 1962 pour trouver un nouvel état d'équilibre en 1966.

Il n'était guère possible d'aller beaucoup plus loin sans travailler sur les débits. On s'est aperçu très vite que les données qui les concernaient étaient douteuses pour certaines périodes : entre autres, il y avait une lacune à peu près totale dans les jaugeages de 1960 à 1975. D'autre part, il paraissait évident que, durant cette période, l'étalonnage d'un certain nombre de station avait changé et que le bruit de fond engendré par les erreurs correspondantes masquait le phénomène qu'on cherchait à étudier.

L'étalonnage de toutes les stations de la cuvette a donc été repris dès 1975. On s'aperçut alors que toutes les stations du Niger à l'amont de et y compris Niafunké sur le Bara-Issa et Saraféré sur l'Issa-Ber étaient restées stables entre 1960 et 1975 et que toutes les stations aval, au moins jusqu'à Tossaye s'étaient détachées. En outre, alors que généralement la correction de gradient ne varie pas quand la station se détache, pour la seule station de Tonka on a des courbes de correction différentes pour chacune des périodes. Si l'on admet que cette correction est liée entre autre à la pente du cours d'eau, sa variation pourrait être l'indice d'une variation de pente localisée à Tonka.

A partir des nouveaux étalonnages et en s'appuyant sur les stations à étalonnage constant, il a été possible par corrélation inter-stations et en utilisant la méthode des doubles cumuls de reconstituer les débits de la période 1960-1975.

Avec ces données revalorisées, on a pu reprendre l'étude des anomalies à partir des débits. Pour une onde de crue aussi régulière que celle du Niger, le rapport du débit maximal de l'année au débit moyen annuel  $Q_{max}/Q_{moy}$  a paru un critère suffisant. Après avoir vérifié qu'il n'y avait aucune modification des relations entre les débits moyens annuels à l'amont de la cuvette et aux différentes stations situées à l'aval (exemple de la figure 9), on a porté en graphique, de Mopti jusqu'à Niamey, le débit moyen en regard du débit maximal.

On donne ici :

|         |           |
|---------|-----------|
| Mopti   | figure 10 |
| Diré    | " 11      |
| Tossaye | " 12      |
| Niamey  | " 13      |

Ces graphiques montre à l'évidence que

- pour Mopti l'ensemble des données est homogène ce qui tend à indiquer qu'il n'y a pas eu de modification de la forme de crue ;
- pour Diré, on distingue très nettement deux groupes de points correspondant bien aux deux périodes avant et après la modification : l'écart est encore modéré ;
- à Tossaye l'écart devient très important ce qui se confirme à Niamey ; les résultats ne permettent pas toutefois de conclure qu'il y a eu également modification entre Tossaye et Niamey.

Ces constatations, jointes aux conclusions qui ont pu être tirées des campagnes de jaugeages sur les modifications d'étalonnage des stations, font penser à une érosion du fond du lit qui se serait produite de 1960-62 à 1965-66, son point de départ paraissant être l'aval immédiat du seuil de Tondifarma (ou juste à l'amont de Tonka). Cette érosion se serait propagée jusqu'à Tossaye où la modification du seuil aurait été très modérée, ainsi que le confirme l'importance limitée du détarage.

Quant à l'origine de cette phase d'érosion, on fera bien de s'en tenir à une prudente réserve. On peut considérer que le départ de la phase d'érosion a peut-être son origine dans un mouvement tectonique localisé dans la région de Tonka. Cela n'a rien à voir avec l'hypothèse émise par Auvray dans les années 1950, d'une usure continue du seuil de Tossaye, entretenant une érosion régressive sur tout le haut de la boucle et dans la cuvette. L'hypothèse de Klein, plus générale, d'une déformation du socle à grand rayon de courbure ne peut non plus être exclue à ce stade de l'étude, mais demanderait à être confirmée.

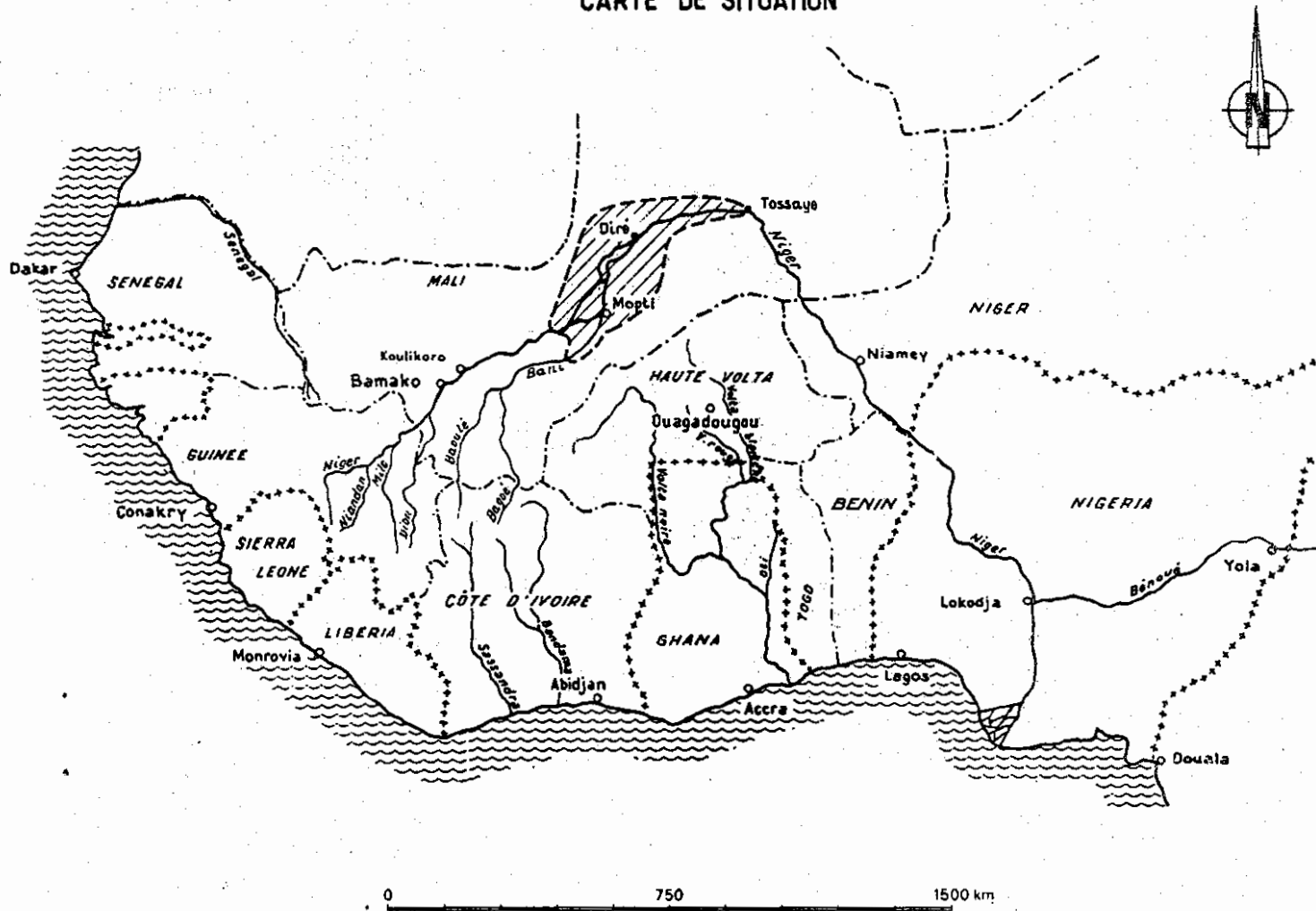
#### CONCLUSION

Nous avons voulu donner dans cet exposé une idée des problèmes qui peuvent se poser à l'hydrologue dans une région africaine très plate, d'assez grande dimension, et dont on peut trouver d'autres exemples sur ce continent. Pour s'en tenir à l'Afrique au nord du Sahara, trois grandes zones fluviales présentent quelques analogies ; en plus de la cuvette lacustre du Niger : le Bahr el Ghazal et la plaine de Kongor dans le bassin du Nil, le cours inférieur du Logone-Chari. On pourrait y ajouter la très large vallée du Sénégal dont le lit majeur constitue un système très complexe de chenaux anastomosés et qui a aussi ses lacs latéraux : région du lac Maggi et de la Kolimbiné, lacs interdunaires du R'Kiz et de Guiers.

Mais on ne peut pas dire qu'il s'agisse là de formations hydrologiques sans réseau organisé. Pour anastomosés que soient les chenaux principaux et secondaires, ils ont malgré leurs faibles pentes un écoulement très caractérisé quoique souvent difficile à évaluer et un tracé assez net et continu. Rien à voir donc avec des zones à caractère arhéique bien marqué. De telles zones existent aussi en Afrique mais on les rencontre sur des surfaces peu étendues : quelques dizaines, rarement quelques centaines de km<sup>2</sup>. En Afrique tropicale, elles sont typiques des régions sahéliennes et subdésertiques ; on les trouve aussi aux frontières sud de l'Afrique du Nord.

# Bassin du NIGER - La cuvette lacustre

## CARTE DE SITUATION



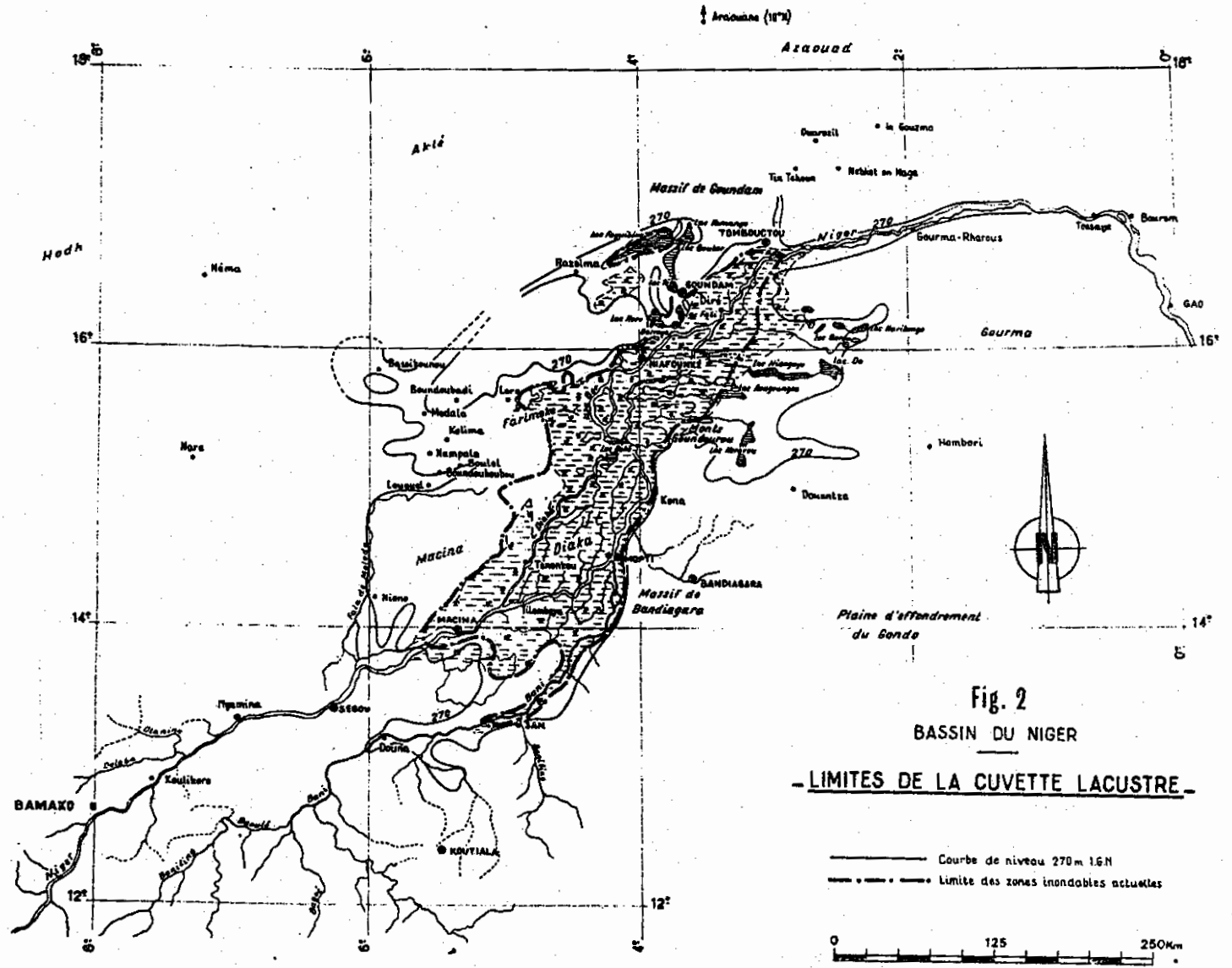
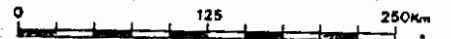
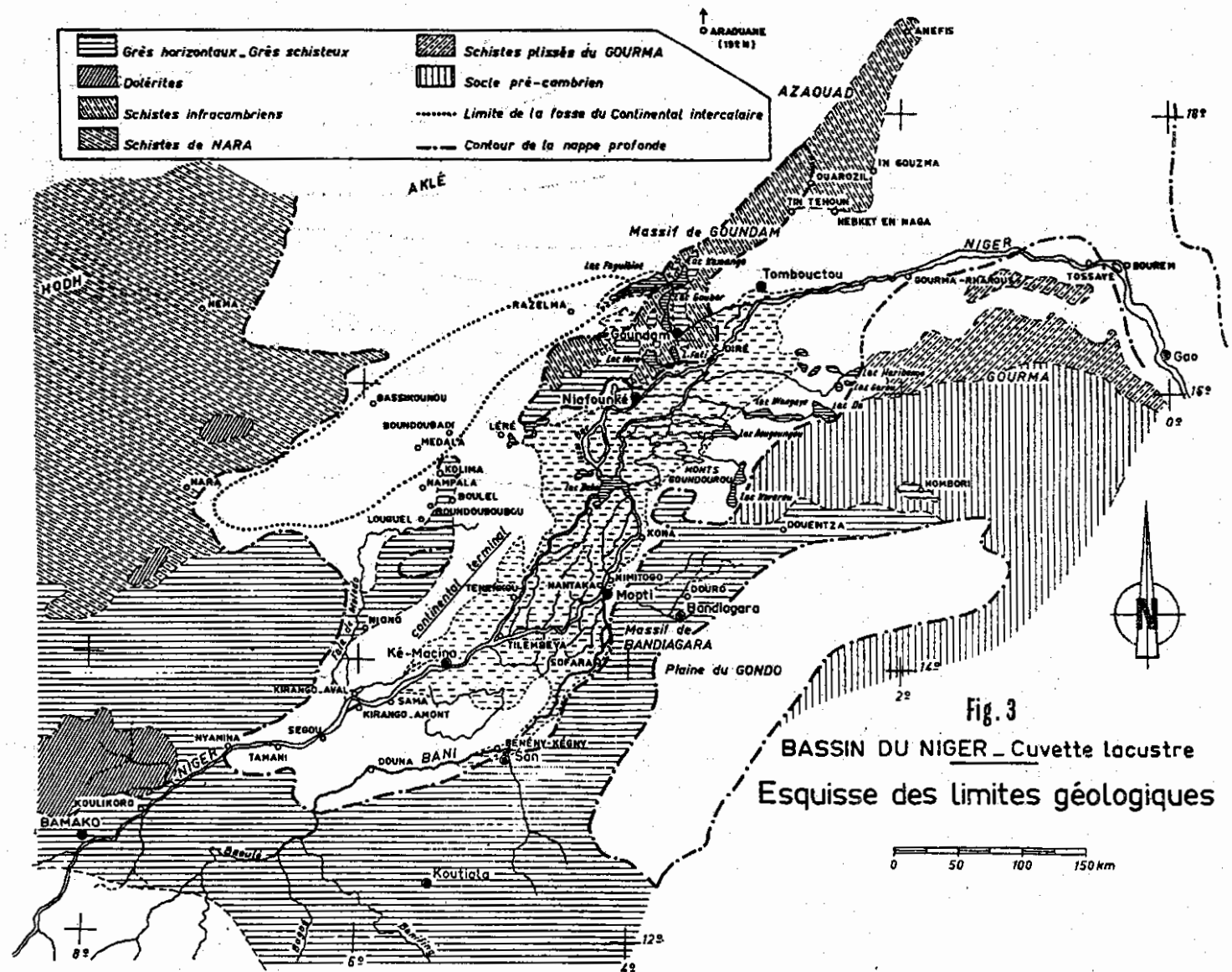


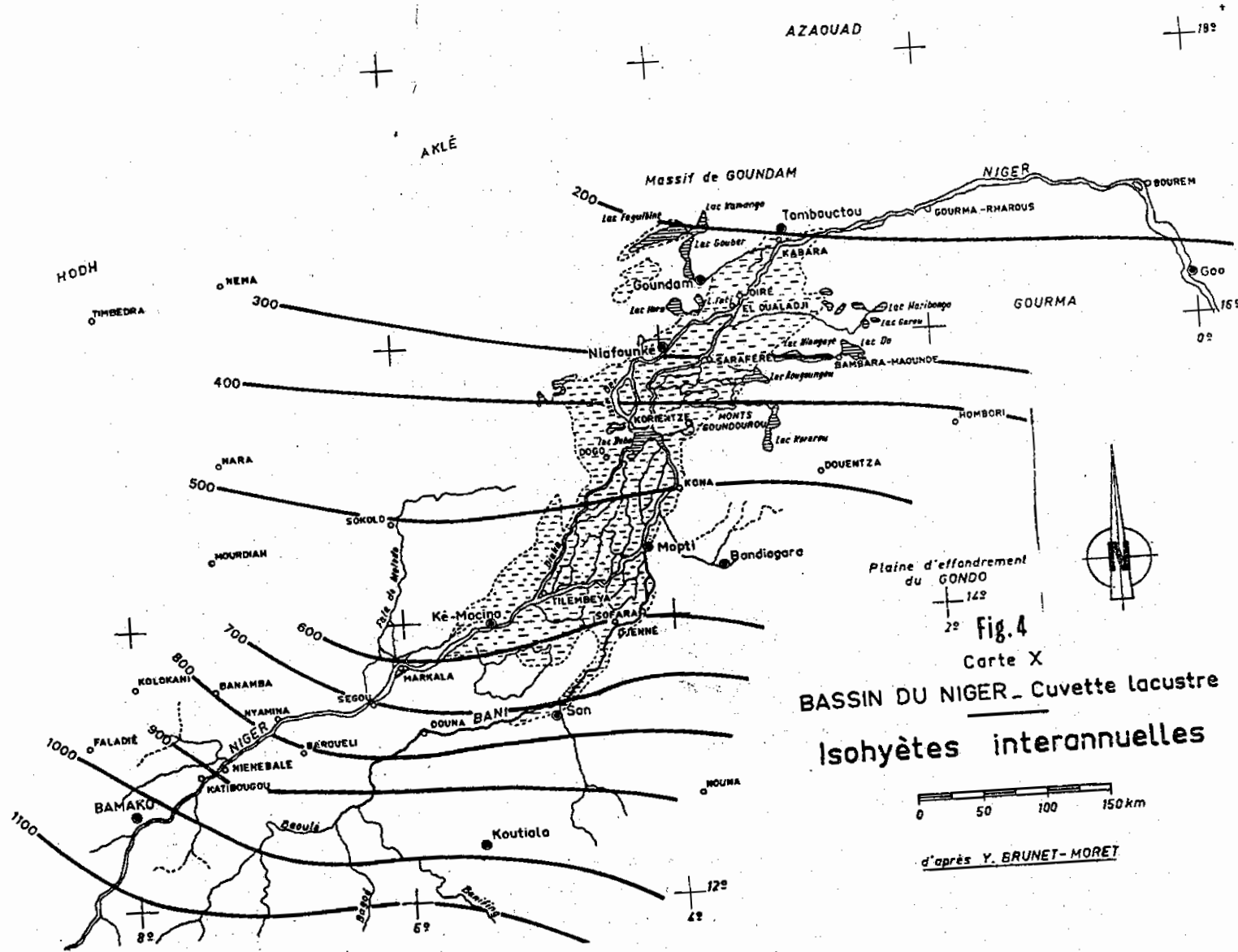
Fig. 2  
BASSIN DU NIGER

LIMITES DE LA CUVETTE LACUSTRE

- Courbe de niveau 270 m 1.6N
- - - - - limite des zones inondables actuelles







AZAOUAD

HODH  
TIMBEDRA

Plaine d'effondrement  
du GONDO

Fig. 4  
 Carte X  
 BASSIN DU NIGER - Cuvette lacustre  
 Isohyètes interannuelles



d'après Y. BRUNET-MORET

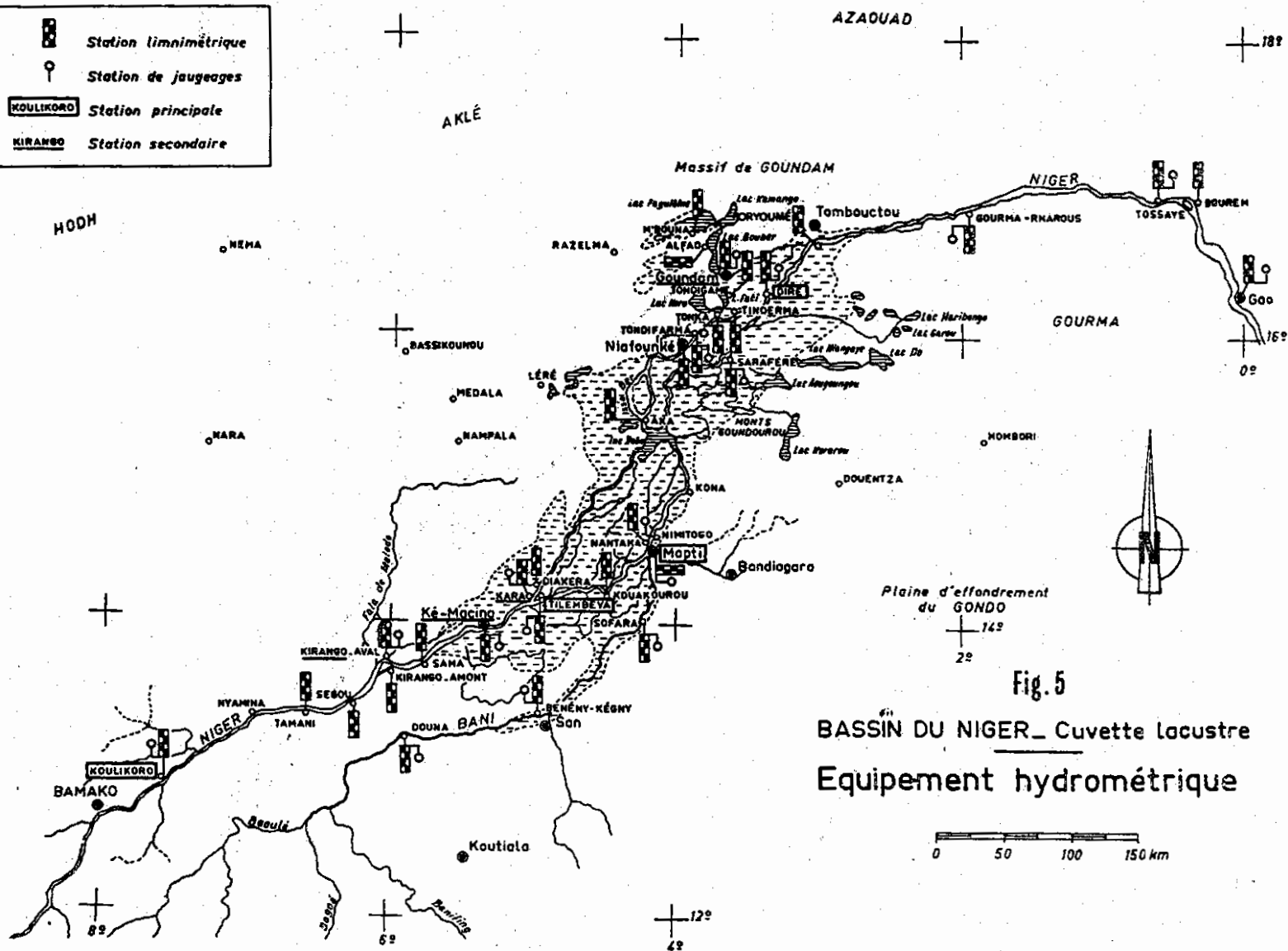
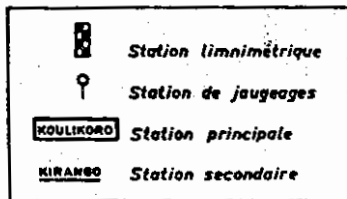
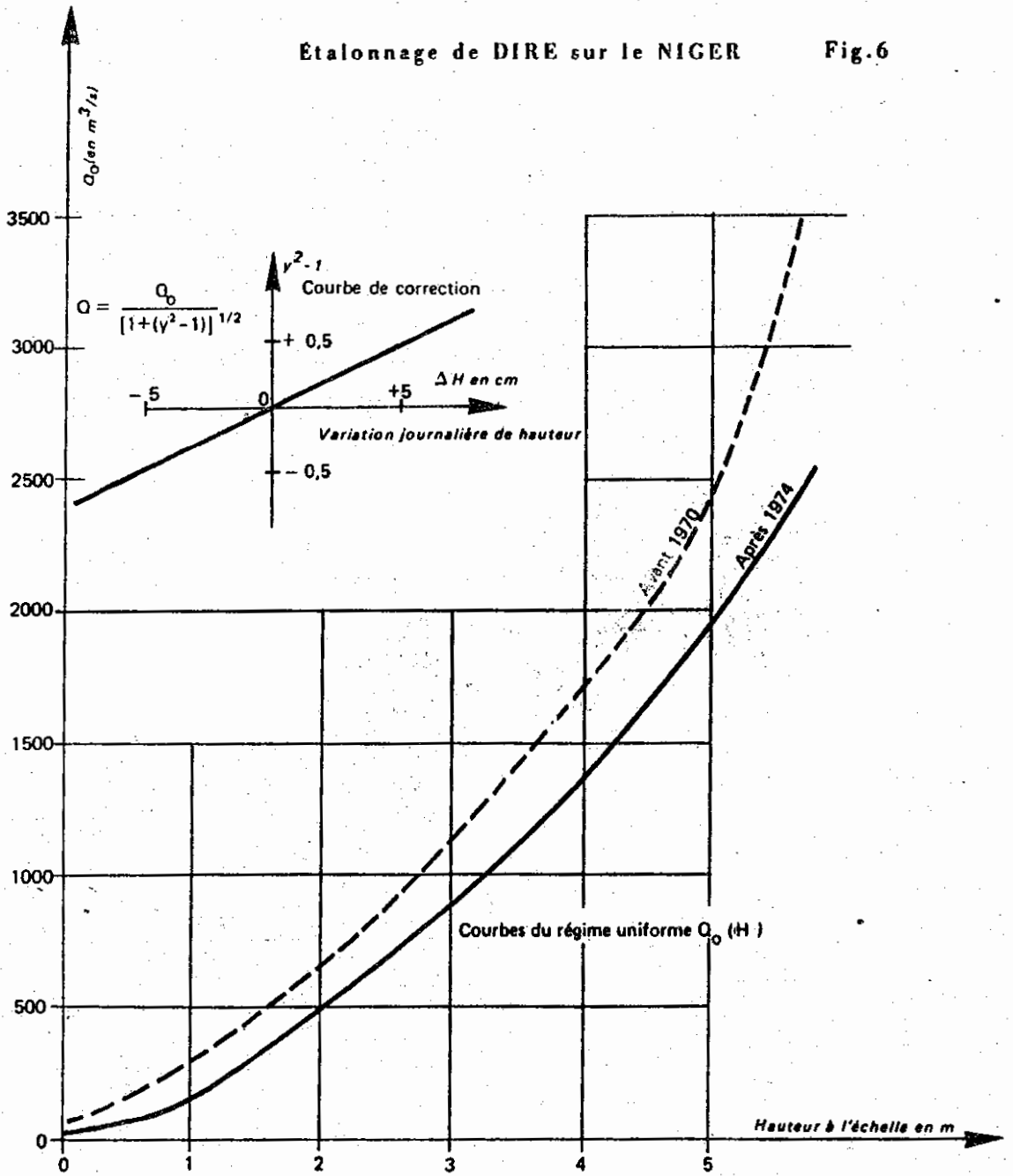
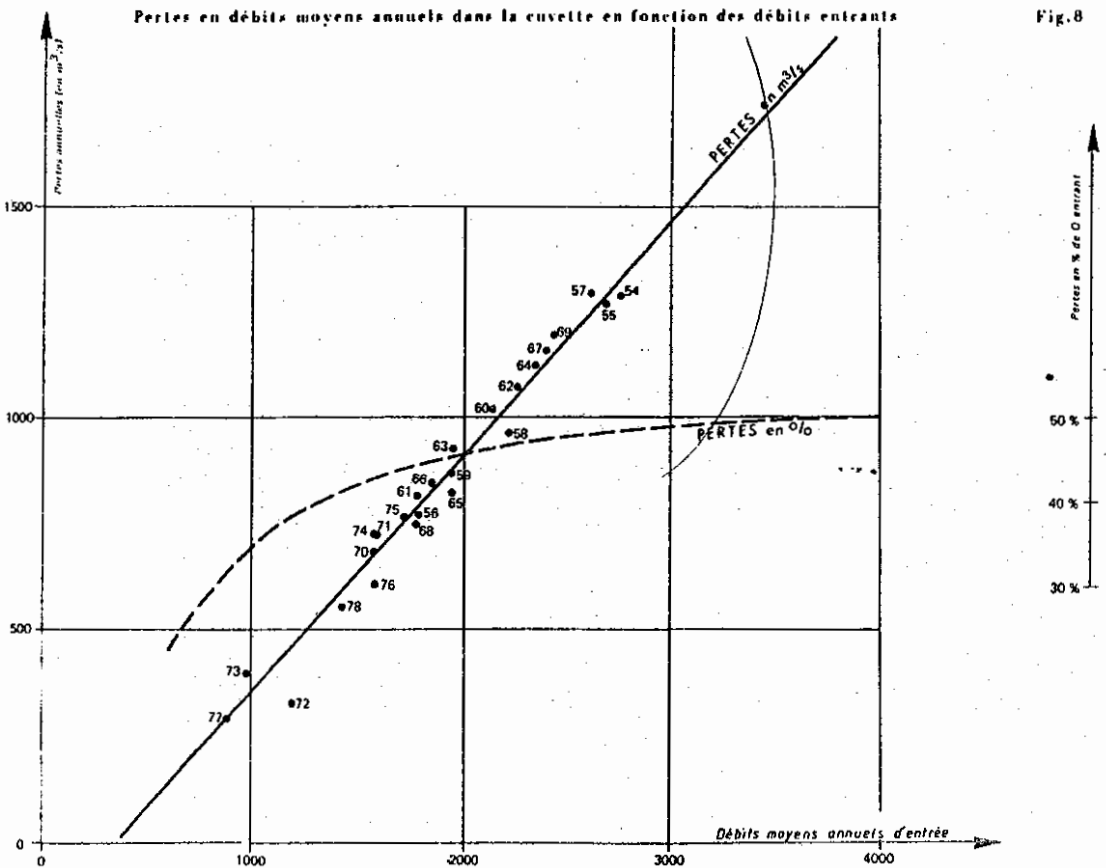
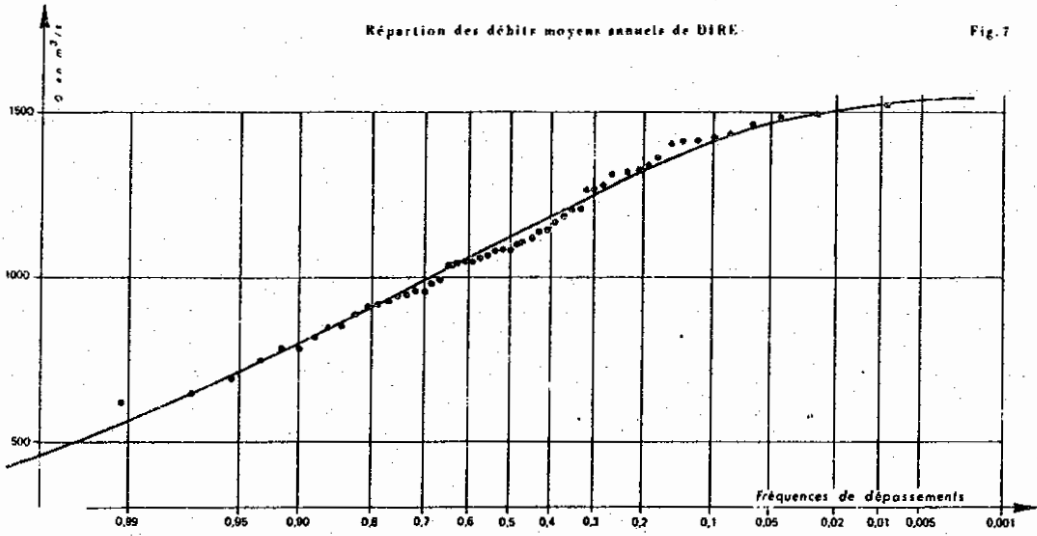


Fig. 5  
 Bassin du Niger - Cuvette lacustre  
 Equipement hydrométrique



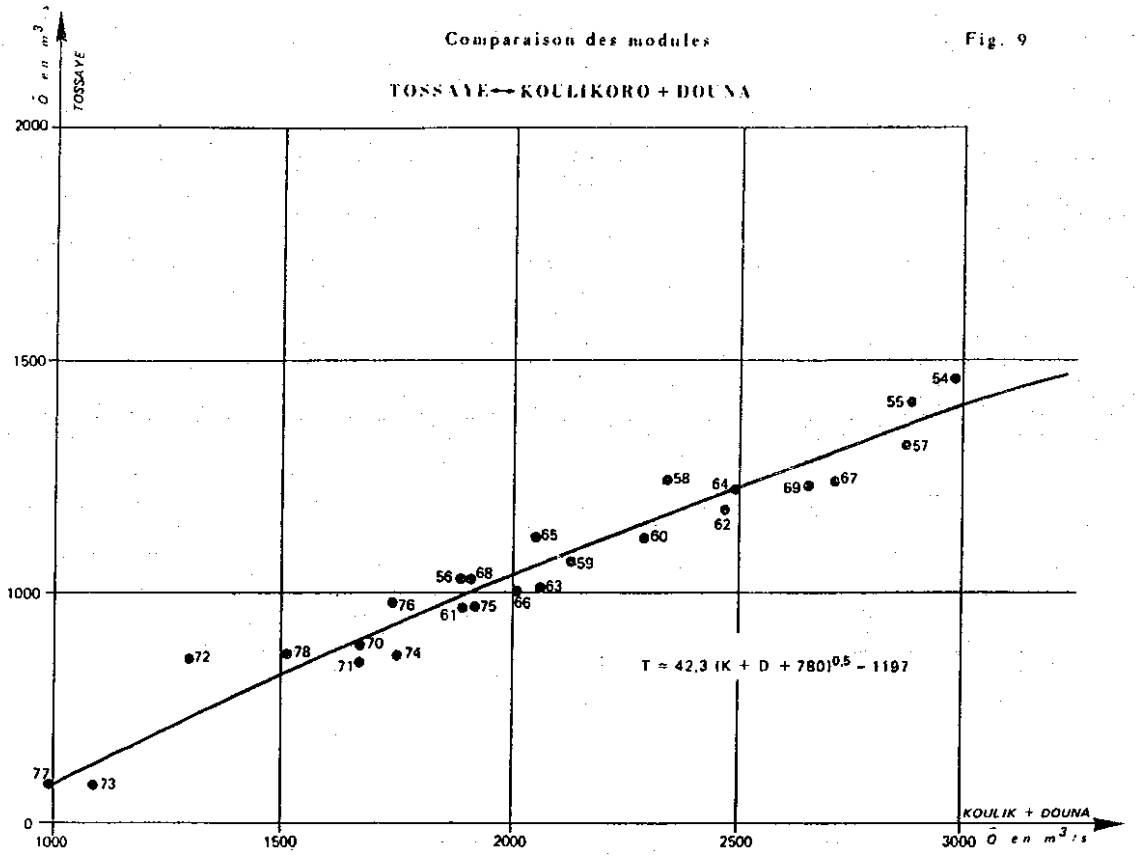




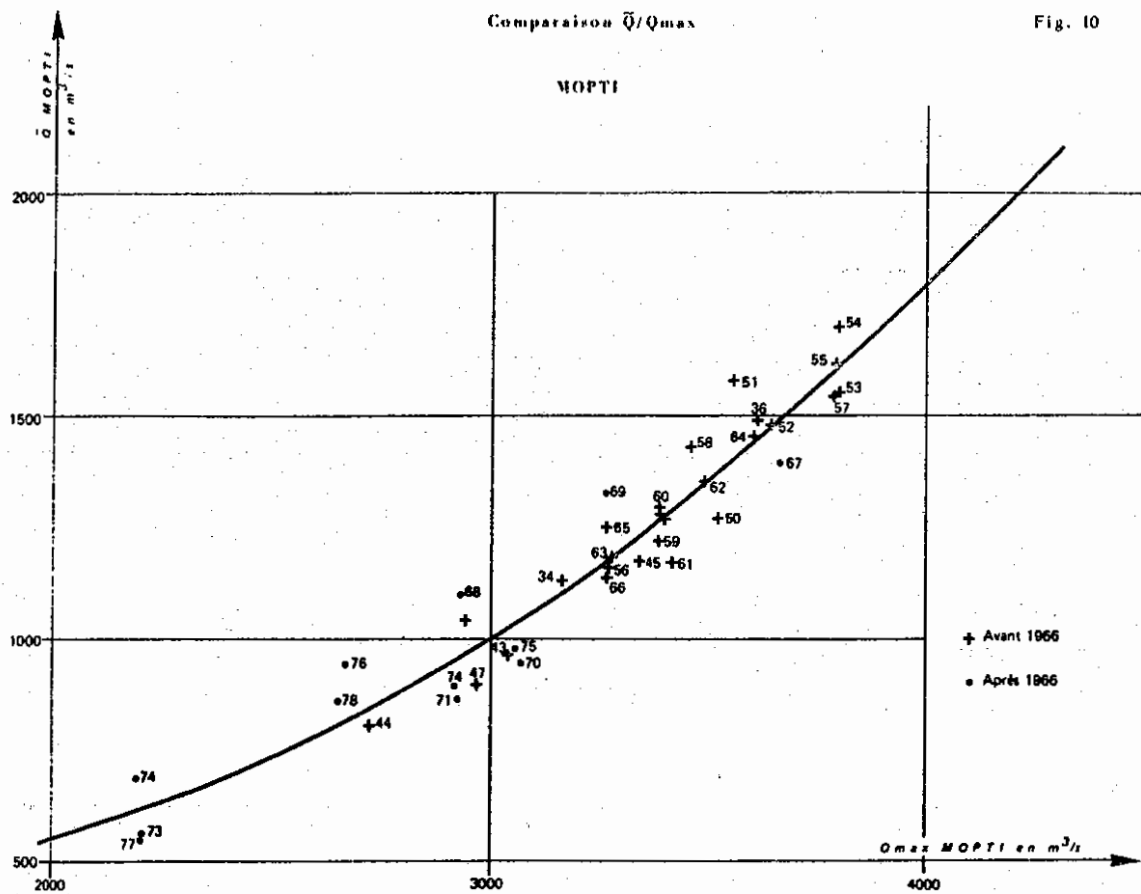
Comparaison des modules

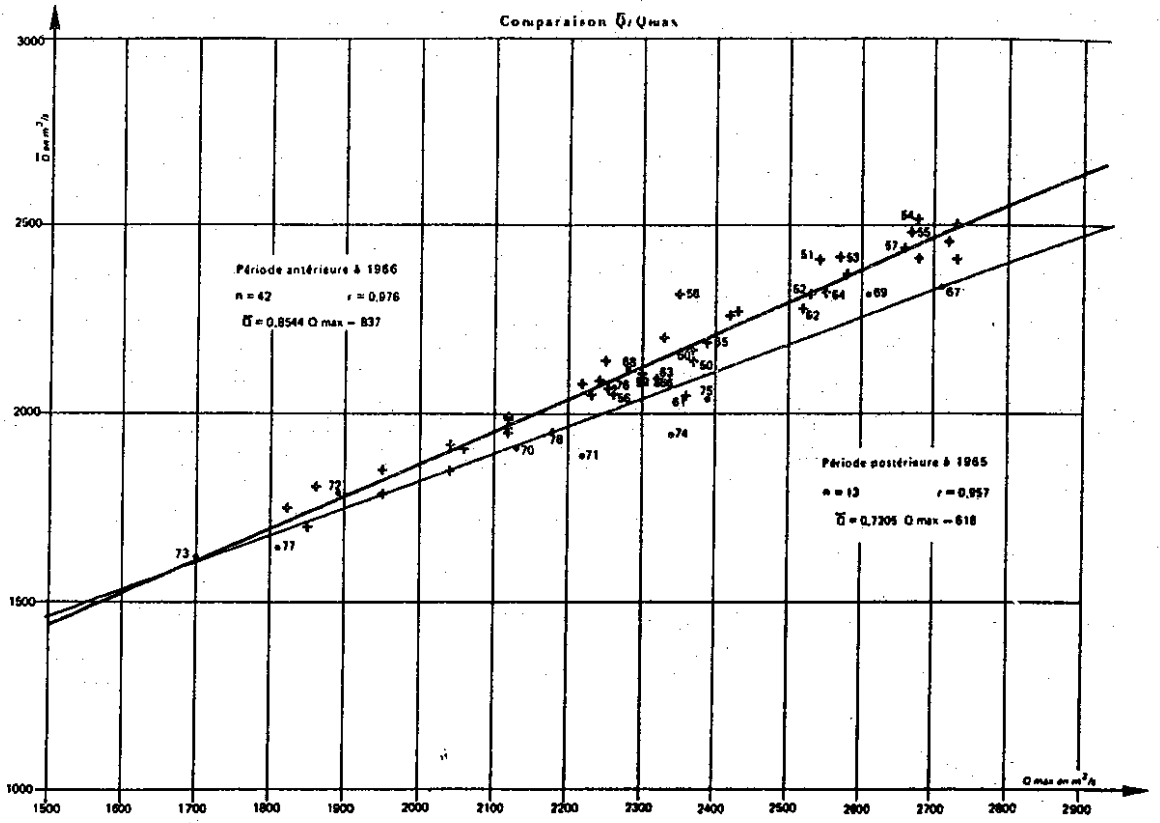
Fig. 9

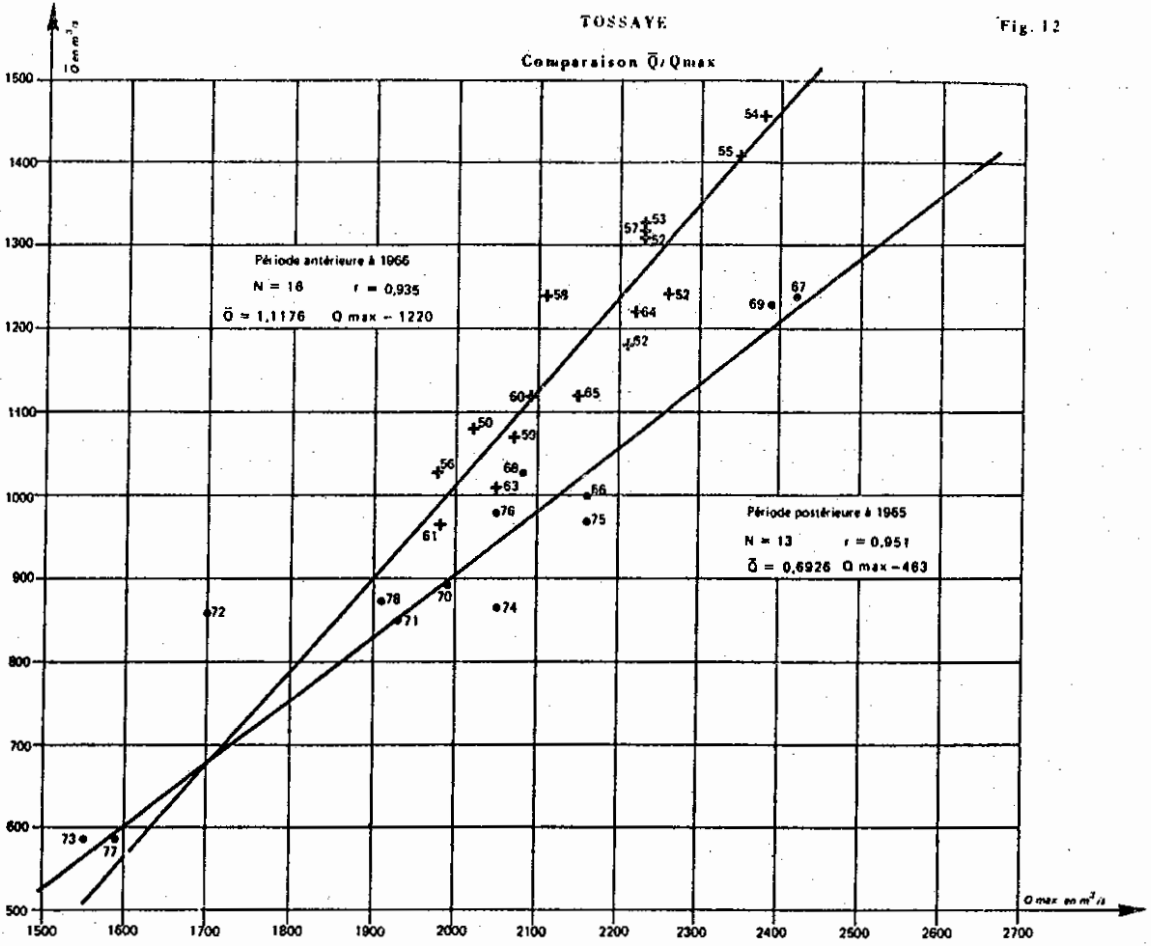
TOSSAYE ↔ KOULIKORO + DOUNA

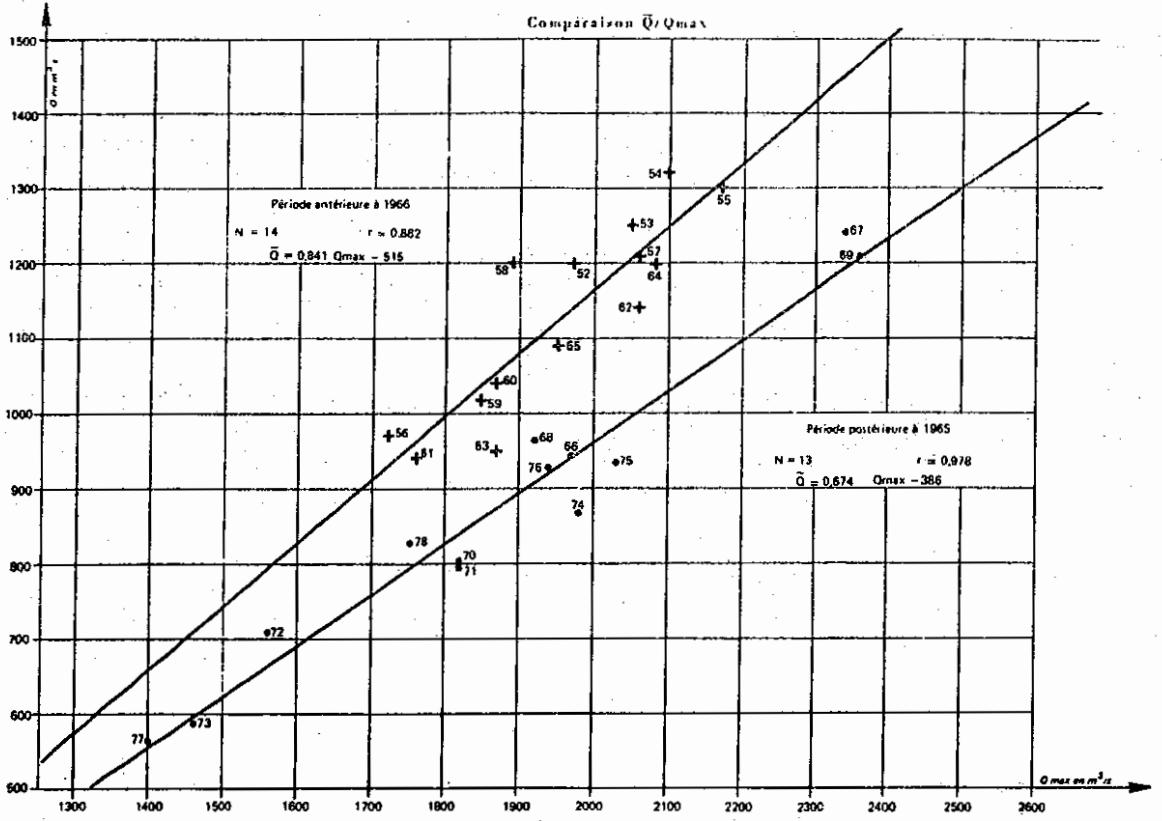


MOPTI









- ANNEXE -

Pratique de la méthode utilisée pour l'étalonnage des stations univoques du Niger

On utilise l'équation de correction de gradient sous la forme  $y^2 - 1 = kG$ . L'application n'est pas simple car les paramètres intervenant dans l'analyse sont connus avec une précision très souvent insuffisante. Les deux séries de valeurs nécessaires pour établir la courbe d'étalonnage sont :

- Hauteurs à l'échelle au moment du jaugeage et des jours qui le précèdent et le suivent (évaluation du gradient),
- débit mesuré réel, qui n'est pas toujours connu avec une précision inférieure à 4%, ceci en raison des mauvaises conditions de travail (vent, etc...), où de l'expérience insuffisante des hydrométristes.

Pour réduire les erreurs provenant de l'incertitude des hauteurs, dans la phase traitement automatique on pondère les lectures d'échelle dans la période entourant le jour où la mesure a été effectuée, en utilisant la formule :

$$G = \frac{1}{200} \left( \sum_{i=-4}^{-1} \frac{H_{j+i} - H_j}{i} (5 + i)^3 + \sum_{i=4}^1 \frac{H_{j+i} - H_j}{i} (5 - i)^3 \right) \quad (1)$$

G est exprimé en cm/jour.

Lors de l'analyse on prend :

$$G = (H_{j+1} - H_{j-1})/2 \quad (2)$$

Les paramètres à évaluer sont  $Q_0$  et  $k$ . On utilise :

$$y^2 - 1 = k.G \quad \text{ou} \quad Q_0 = Q/(1 + k.G)^{1/2} \quad (3)$$

et on procède de la façon suivante :

- 1- On porte sur papier millimétré : en abscisse les cotes des mesures et en ordonnées les valeurs des débits mesurés,
- 2- on trace une courbe moyenne passant sensiblement au milieu des points de crue et de décrue,
- 3- cette courbe fournit une première valeur du débit "pseudo-univoque" avec lequel on calcule les valeurs de :  $y^2 - 1$  qu'on porte en fonction de G calculé par (2) sur graphique millimétré,
- 4- sur ce graphique on trace la droite de correction qui fournit une première régression de  $y^2 - 1$  en G, : k est la pente de la droite.



- 5- On calcule les valeurs de  $Q_0$  à l'aide de l'équation (4) et de la valeur estimée de  $k$ ,
- 6- les valeurs de  $Q_0$  ainsi calculées sont reportées en fonction de  $H$  et on trace une courbe correspondant au régime uniforme :  $Q_{01} = f(H)$  (4)
- 7- On répète l'opération jusqu'à ce que la somme des écarts entre débits corrigés et débits fournis par la fonction (4) soient minimisée.
- 8- On dispose alors de la valeur de  $Q_0$  en fonction de  $H$ , et connaissant la valeur  $H_j$  de la cote à l'échelle le jour  $j$  ainsi que la valeur du gradient  $G_j$  calculée à l'aide de l'équation (1), on peut calculer le débit réel :

$$Q_j = Q_0 j. (1 + k. G_j)^{1/2} \quad (5)$$

L'équation (4) ayant fourni dans sa version définitive la valeur de  $Q_{0j}$  :  $Q_{0j} = f_n (H_j)$  (6)

L'indice  $n$  correspondant au nième essai qui est en même temps celui de la courbe adoptée.

#### Phase de traitement automatique

On utilise une relation linéaire entre les termes :

$$(Q_0 / Q)^2 - 1 \text{ et } k.G$$

Lorsque  $G$  diminue en décrue, il apparaît sur les graphiques représentant la relation que le premier terme tend vers une limite inférieure, difficile à déterminer car on possède pas ou peu de mesures pour les valeurs très faibles de  $G$ . Ces valeurs n'interviennent d'ailleurs que très rarement, pendant une période bien délimitée de la décrue et pendant un temps assez court.

Afin de ne pas introduire de valeurs nulles qui seraient non conforme à la réalité, le débit ne pouvant en aucun cas s'annuler du fait que l'écoulement est continu jusqu'au tarissement (vidange d'un réservoir avec déversoir fixe à l'aval) et le terme  $(1 + k.G)^{1/2}$  ne pouvant être négatif, on a introduit une valeur inférieure limite pour le terme  $k.G$ . Dans les programmes de calcul automatique, cette limite inférieure est appelée ACO. Lorsque  $G$  devient inférieur à  $ACO/k$  la valeur de  $k.G$  dans l'équation de traduction des hauteurs en débits est remplacée par la valeur limite ACO.

Le tableau suivant donne les valeurs retenues pour ACO à chaque station non-univoque du DELTA CENTRAL du NIGER :

| STATIONS     | ACO    | k      | G min.(cm/j) | Q/Q <sub>0</sub> minimal |
|--------------|--------|--------|--------------|--------------------------|
| BENENI KEGNY | - 0,50 | 0,0255 | - 20         | 0,707                    |
| SOFARA       | - 0,50 | 0,0387 | - 13         | 0,707                    |
| MOPTI        | - 0,50 | 0,0300 | - 17         | 0,707                    |
| KE MACINA    | - 0,50 | 0,0420 | - 12         | 0,707                    |
| DIRE         | - 0,50 | 0,0924 | - 5,5        | 0,707                    |
| TONKA        | - 0,70 | 0,1645 | - 4,5        | 0,548                    |
| TONKA        | - 0,70 | 0,0852 | - 8,5        | 0,548                    |
| TOSSAYE      | - 0,50 | 0,0460 | - 11         | 0,707                    |
| SARAFERE     | - 0,85 | 0,1660 | - 5,1        | 0,387                    |

- BIBLIOGRAPHIE -

- ORSTOM - *Monographie du fleuve Niger (Réédition) - 3 volumes*  
ORSTOM-Paris, mai 1970
- MONIOD F. - *Détermination des causes des anomalies des crues du Niger - Rapport de synthèse 1975-1977*  
ORSTOM-Paris, novembre 1977
- KLEIN J. C. - *Détermination des causes des anomalies des crues du Niger - Rapport intermédiaire de la seconde phase de l'étude (1977-1979)*  
ORSTOM-Paris, avril 1979
- LAMAGAT J.P. - *Variations du régime des crues du Niger (sous presse)*
- ORSTOM - *Monographie du fleuve Niger (entièrement refondue) - (sous presse)*

# Hidrología de las grandes llanuras

*Actas del Coloquio de Olavarría*

*Volumen III*

*Abril 1983*

# Hydrology on large flatlands

*Proceedings of the Olavarría Symposium*

*Volume III*

*April 1983*

# L'hydrologie des régions plaines

*Actes du colloque d'Olavarría*

*Volume III*

*Avril 1983*

Una contribución al  
Programa Hidrológico Internacional  
Segunda Fase - Proyecto A.1.12

A Contribution to the  
International Hydrological Programme  
Second Phase - Project A.1.12

Une contribution au  
Programme Hydrologique International  
Deuxième Phase - Projet A.1.12

*Editado por*  
*Edited by*  
*Edité par*

*Mario Claudio Fuschini Mejía*

UNESCO

Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional  
Secretaría de Recursos Hídricos - Ministerio de Obras y Servicios Públicos  
República Argentina