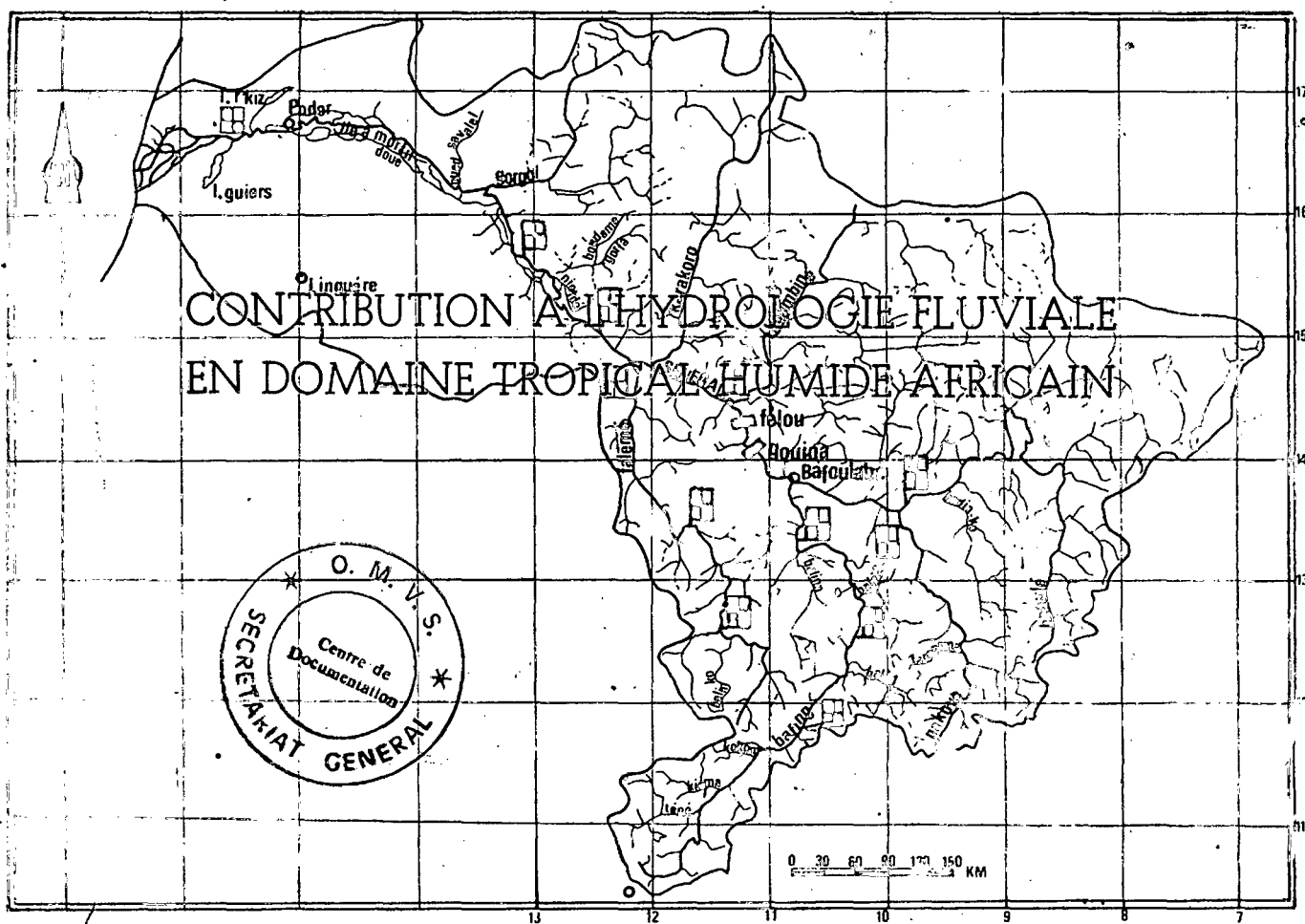
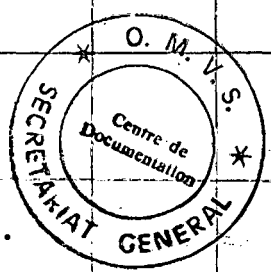


PLUIE ET ECOULEMENT FLUVIAL DANS LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL



CONTRIBUTION A L'HYDROLOGIE FLUVIALE
EN DOMAINE TROPICAL HUMIDE AFRICAIN



Amadou Abdoul SOW

Travaux du Laboratoire de Géographie Physique

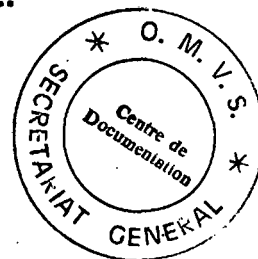
PLUIE ET ÉCOULEMENT FLUVIAL DANS LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

Contribution à l'hydrologie fluviale
en domaine tropical humide africain.

Amadou Abdoul SOW

THÈSE DE DOCTORAT DE 3^e CYCLE
DE GÉOGRAPHIE PHYSIQUE.

(sous la direction de René Frécaut)



JURY :

- M. J.C. BONNEFONT, *Président de l'Université de Nancy II*
- M. J. DION, *Professeur à l'Université de Nancy II*
- M. R. FRÉCAUT, *Professeur à l'Université de Nancy II (Rapporteur)*
- M. J.C. OLIVRY, *Directeur d'études à l'Office de Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-Mer à Montpellier*
- M. J. SIRCOULON, *Ingénieur en chef, Directeur des Services Techniques de l'Office des Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-Mer à Paris*
- M. J.F. ZUMSTEIN, *Ingénieur à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse à Metz*

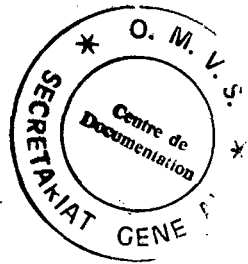
Octobre, 1984

A MON PERE

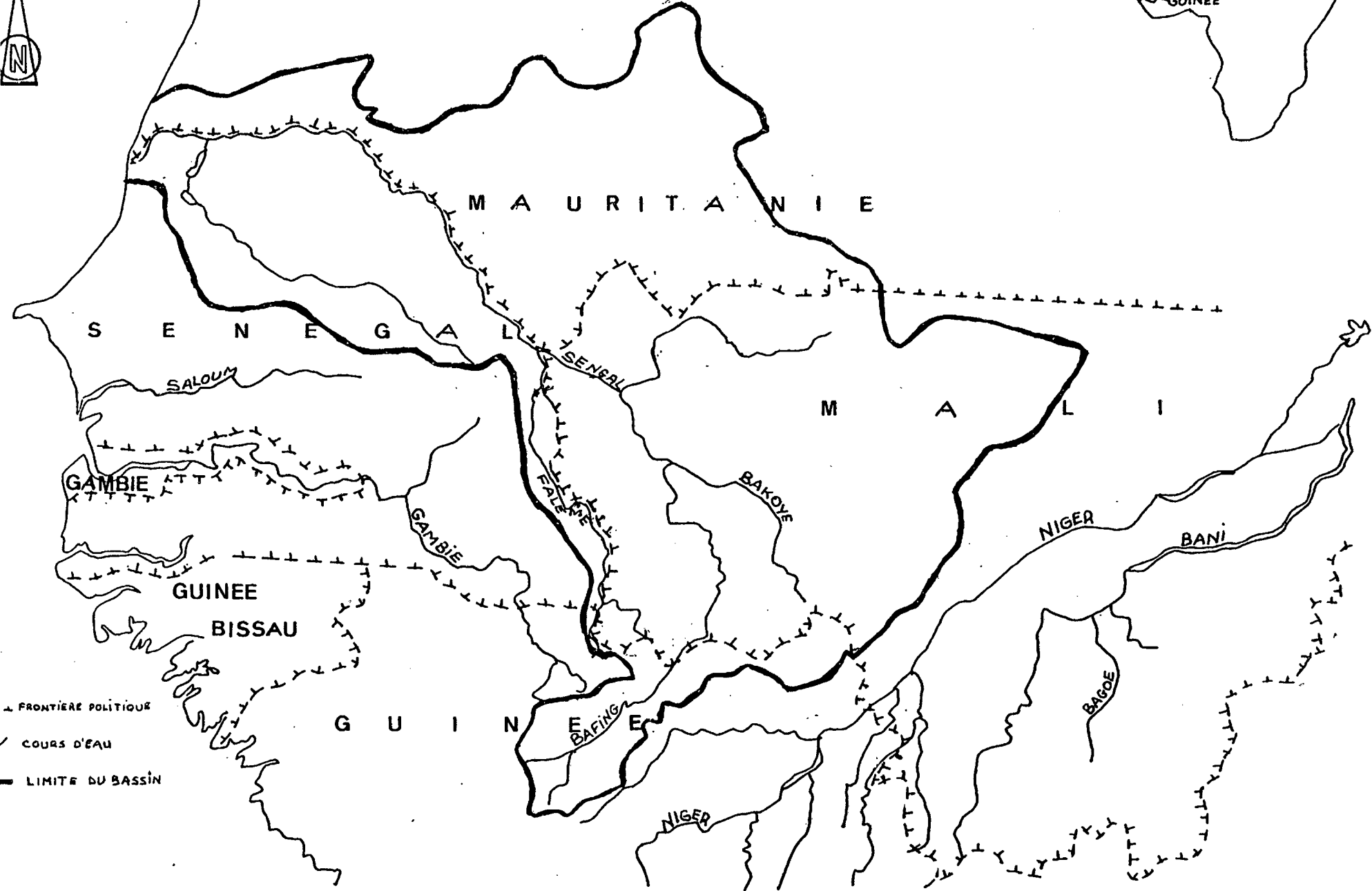
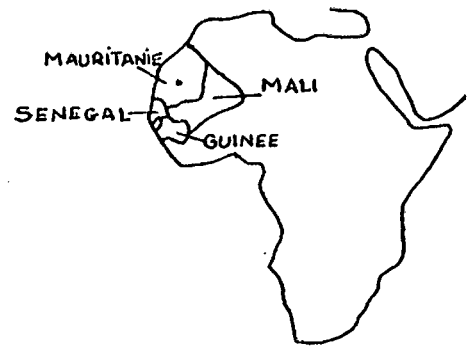
A MA MERE

A LA MEMOIRE DE MON COUSIN

sadibou



LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL ET LES ETATS RIVERAINS (carte de situation)



- ▲- FRONTIERE POLITIQUE
- / - COURS D'EAU
- ——— LIMITE DU BASSIN

INTRODUCTION

Le Fleuve Sénégal, avec le Niger, constituent les deux plus grands fleuves d'Afrique Occidentale. Ils naissent tous les deux dans la région la plus élevée et la plus arrosée de l'Afrique Occidentale : la montagne du Fouta Djalon.

Le Sénégal ne mesure que 1 790 km (loin derrière le Niger, 4 200 km), mais il a toujours suscité un intérêt exceptionnel depuis l'époque des anciens colonisateurs, et à l'heure actuelle, de la part des responsables des états riverains qui cherchent à tirer parti de son immense bassin et des volumes d'eau importants qu'il roule vers l'océan.

Il tire une double originalité de :

- son bassin-versant de 290 000 km² environ partagé entre quatre états, le Mali (155 000 km²), la Mauritanie (75 500 km²), la Guinée (31 000 km²) et le Sénégal (27 500 km²), dernier état qui donne son nom au fleuve à partir de Bafoulabé ;

- sa seconde originalité réside dans le fait qu'il naît en Guinée dans le Fouta-Djalon à 7° de latitude Nord dans une région très arrosée pour se jeter dans l'Océan Atlantique à 16° 30' de latitude Nord dans une région en bordure du désert du Sahara.

Il traverse ainsi trois grands domaines climatiques Sud-soudanien, Nord-soudanien et sahélien et définit ainsi trois grandes régions naturelles : le Haut-Bassin, la Vallée et le Delta.

Ces deux grands traits se conjuguent dans un immense bassin définissant des caractéristiques très différentes :

- le tracé du réseau hydrographique et les caractéristiques physiques impriment au bassin une dualité entre le Haut-Bassin et le Cours Inférieur. L'ensemble des caractéristiques évoluant du Sud au Nord du bassin, on remarque que :

- le Haut-Bassin se situe dans une région de relief où les sommets à l'extrémité Sud du bassin dépassent souvent 1 000 m. Le Fouta-Djalon avec 1 538 m d'altitude domine de ses masses lourdes et sobres les pays environnants. Alors que cette région est densément boisée, le plateau Mandingue sur lequel se situe l'essentiel du réseau hydrographique est déjà clairsemé et l'extrême Nord du Haut-Bassin est dominé par une végétation de steppes buissonnantes.

En amont de la frontière entre le Mali et la Guinée, les pentes varient entre deux mètres par kilomètre et environ cinquante centimètres par kilomètre ;

- le Haut-Bassin se déroule sur les formations granitiques du socle, les pélites du Cambrien et sur les dolérites hercyniennes : un ensemble de séries imperméables, alors que le Cours Inférieur s'étend sur des régions sédimentaires secondaires et tertiaires argilo-calcaires. Le long de la vallée se succède un paysage de dunes longitudinales ;

- le tracé des isohyètes varie du Sud au Nord de 2 000 mm/an à 250 mm/an environ ;

- la dualité entre le Haut-Bassin et le Cours Inférieur et l'organisation du réseau hydrographique font que l'abondance moyenne annuelle augmente constamment de l'amont à l'aval et longtemps encore en domaine sahélien. Cette diversité sur le plan physique et l'optique dans laquelle nous menons le travail nous suggèrent un plan simple en deux grandes parties.

Ainsi nous étudions dans :

- la première partie les caractéristiques physiques du Bassin du Sénégal, facteurs de l'écoulement.

Cette partie procède d'abord de la description des caractères morphostructuraux, morphométriques, lithologiques, pédologiques et biogéographiques. Pour ce faire, la documentation est abondante (cf. bibliographie). Nous citons nos principales références, cependant cette description retient surtout en conclusion l'influence, le rôle de ces facteurs dans l'écoulement.

Nous avons surtout analysé les données pluviométriques et les facteurs thermiques, données pour lesquelles nous disposons de séries de plus de 60 ans d'observation.

Ainsi, la diversité climatique (chapitre VI) a fait l'objet d'un long développement nécessaire parce que la pluie est le seul mode d'alimentation de l'écoulement, nécessaire aussi parce qu'à l'instar de grandes régions du domaine tropical, le Bassin du Sénégal connaît encore le douloureux phénomène de la sécheresse. Nous avons consacré à cet aspect un développement particulier car nos données couvrent une période allant jusqu'en 1980, et même 1982 ;

- dans la seconde partie, nous étudions les bilans hydrologiques pour les périodes 1951 - 1980 et 1970 - 1980, les variations de l'abondance moyenne annuelle et les régimes fluviaux saisonniers pour la période 1903 - 1980, en somme les modalités de l'écoulement moyen annuel.

Ces régimes fluviaux étant autrement appelés régimes pluviaux tropicaux en raison de leur conformité avec les régimes pluviométriques, nous font penser qu'en domaine tropical, tout est relation pluies-débits en hydrologie : relation plus ou moins influencée par d'autres facteurs néanmoins.

Ainsi défini, ce travail n'intéresse que l'hydrologie de surface.

Cependant, nous sommes conscients que " l'étude d'un fait physique, considéré comme une fin en soi, sort du domaine de la géographie quel que soit son

importance " (P. GEORGE).

Ce travail aurait ainsi gagné à être complété par une partie consacrée à l'aménagement des ressources en eau.

Néanmoins, ce volet aménagement ne fait pas pour autant l'objet d'une étude.

Le Bassin du Sénégal fait l'objet en ce moment d'un programme d'aménagement dans le cadre de l'O.M.V.S.

La politique choisie vise à la régularisation du débit partout sur l'artère principale à 350 m³/s par la construction d'un barrage sur le site de Manantali au Mali. Elle prévoit la construction d'une usine hydroélectrique et l'irrigation de vastes étendues de terres cultivables, partagées entre le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. L'aménagement prévoit aussi la construction d'un barrage sur le site de Diama dans la Vallée du Sénégal afin d'arrêter la remontée des eaux salées en période de basses eaux.

Différents spécialistes de ces questions ont émis des jugements quant à l'intérêt de ce grand projet d'aménagement. (cf. annexe).

Quant à nous, inclure une partie aménagement aurait nécessité avant tout la description de la politique d'aménagement choisie par l'O.M.V.S., les moyens matériels et la finalité.

Ensuite seulement, nous aurions pu donner notre avis et surtout faire des propositions. Mais alors nous aurions largement dépassé les limites imparties à un travail de recherches de 3e cycle.

Les données d'étude de base de l'O.M.V.S. s'arrêtent en 1968 pour la pluviométrie et l'hydrométrie. Or c'est à partir de cette année que commence la sécheresse qui se prolonge encore. Tout semble montrer qu'il faut compter avec, dans toute politique d'aménagement et pour ce faire reconsidérer les études avec moins d'optimisme, réajuster les conclusions.

C'est surtout cela, et parce que nos données pluviométriques et hydrométriques couvrent largement les années de sécheresse que nous avons choisi l'optique physique et afin de connaître pour comprendre, les modalités de l'écoulement en domaine tropical humide africain, dans son évolution récente

L'analyse a été faite à partir de tableaux, de figures et de cartes. C'est nous qui les établissons ou nous les empruntons à des travaux antérieurs ou alors nous les composons à partir de travaux afin de mieux faire ressortir l'aspect qui nous intéresse.

Toutefois nous donnons toujours nos sources. Les cartes sont à l'échelle 1 / 300 000 e et sont réduites ensuite à la photocopie pour retenir un format adéquat. Nous avons utilisé des cartes topographiques au 50 000 e et les cartes administratives (cf. annexe).

Enfin, nous illustrons par des photos du Bassin du Sénégal et par des coupures de journaux relatant les problèmes de l'eau dans les différents pays concernés.

PREMIERE PARTIE

LES CARACTERES PHYSIQUES DU BASSIN DU FLEUVE SENEGAL.

LES FACTEURS DE L'ECOULEMENT

Les modalités de l'écoulement fluvial sont le résultat d'interaction de facteurs divers, et c'est le bassin fluvial qui offre le meilleur cadre pour " une meilleure compréhension de l'interaction des facteurs morphologiques, litho-pédologiques, climatiques et biogéographiques " (R. FRECAUT, 1983).

Il nous est ainsi tout naturel d'évoquer ces facteurs au début de ce travail, à savoir :

- la diversité des paysages naturels ;
- le réseau hydrographique et le bassin du Sénégal ;
- les données morphométriques du bassin du Sénégal ;
- les facteurs lithologiques ;
- les facteurs pédologiques et biogéographiques ;
- la diversité climatique du bassin du Sénégal ;
- les caractères exceptionnels de la pluie dans le bassin ;
- et les facteurs déterminants de l'écoulement moyen annuel.

CHAPITRE I

LA DIVERSITE DES PAYSAGES
DU BASSIN DU SENEGAL

En étudiant les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, P. MICHEL (1973) évoque la monotonie des paysages traversés, mais qui présentent malgré tout " ... une gamme ... relativement riche et variée ".

Cette monotonie s'explique par la vieillesse du CONTINENT AFRICAÏN, (berceau de l'humanité) pays de vieilles plate-formes.

Deux plate-formes ou boucliers sont reconnus en Afrique Occidentale :

- au Nord, la plate-forme Saharienne qui affleure en Mauritanie ;
- au Sud, la plate-forme Ouest-africaine.

C'est à l'intérieur de cette deuxième plate-forme que se situe le Bassin du Fleuve Sénégal et dans laquelle se distribuent ses principales unités de relief.

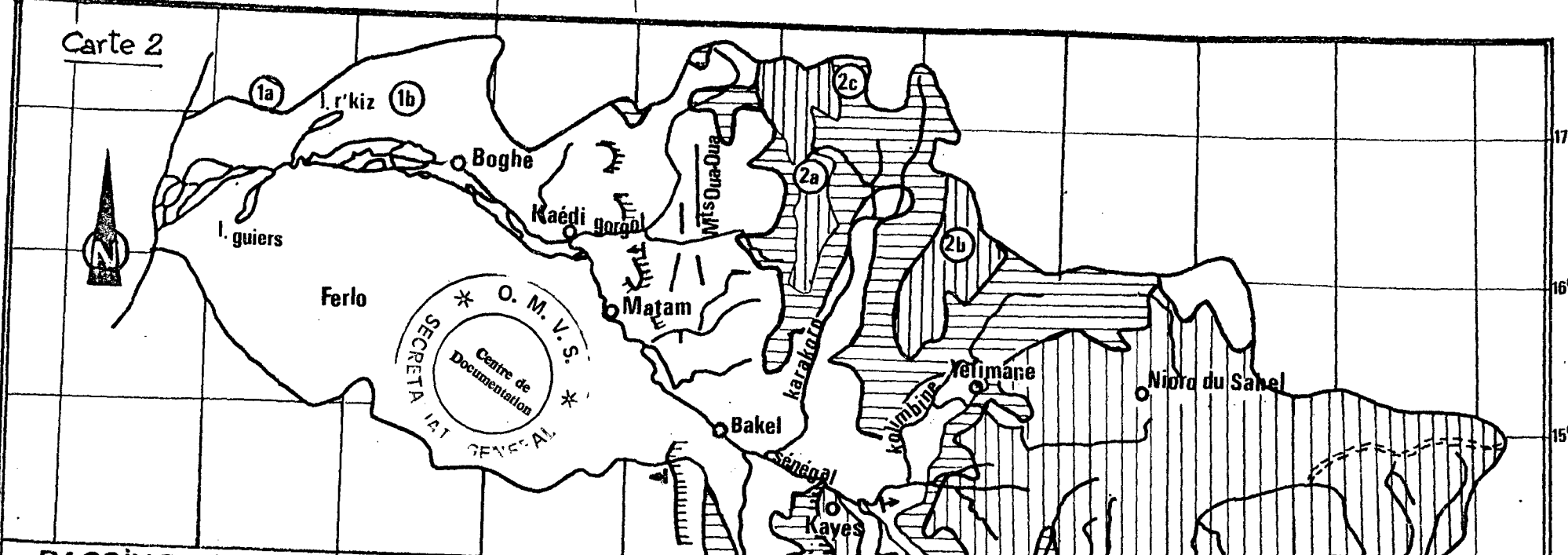
LES PAYSAGES DU BASSIN

Deux grandes régions naturelles se distinguent pour le Bassin du Sénégal (carte n° 2) :

- le Haut-Bassin : c'est toute la partie orientale du Bassin, limitée approximativement par une ligne Nord-Sud passant par la ville de Bakel ;
- le Cours Inférieur que l'on appelle aussi la Vallée, qui s'allonge de Bakel à l'embouchure du fleuve.

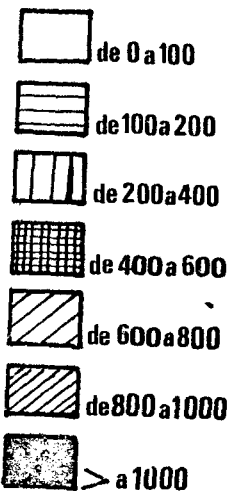
Bien que le delta du Sénégal constitue une " province particulière ", nous retiendrons cette division naturelle, qui est par ailleurs commode, et situerons les divers paysages dans ces deux régions. La carte n° 2 montre qu'elles sont de grandeur très inégale.

Carte 2



**BASSIN DU SENEGAL CARTE N°2
HYSOMETRIE ET CADRE STRUCTURAL**

altitude m



structure

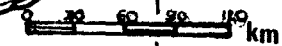
- ① Dunes
- ② Bas Plateaux
- ③ Hauts Plateaux
- ④ Montagnes

relief

- 1a Trarza
- 1b Brakna
- 2a Assaba
- 2b Affolé
- 2c Tagant
- 3a Fantofa
- 3b Pt Mandingue
- 3c Mts Mandingues
- 4 Fouta Djalon

escarpements

crêtes



Sources: C. Rochette 1974 & P. Michel 1973

carte simplifiée

A.A.S 1984

17° 16° 15° 14° 13° 12° 11° 10°

17° 16° 15° 14° 13° 12° 11°

1. Le Haut-Bassin

C'est la région où les principaux affluents, qui constituent le fleuve Sénégal à partir de Bafoulabé, prennent naissance. Il s'agit de la Falémé, du Bafing (le bras principal), du Bakoye, du Baoulé, du Kolimbiné et du Karakoro. Les principales unités et formes de relief sont : le massif du Fouta-Djalon, le plateau Mandingue, les massifs septentrionaux, les surfaces d'aplanissement, les glacis et les terrasses.

a) Le massif du Fouta-Djalon

Ce vaste massif atteint 1 538 m au Mont-Loura et 1 425 m au Massif du Mali. C'est en fait une région de crêtes séparées par des bassins, de surfaces étagées en gradins, de plateaux qui se terminent par des corniches de grès quartzites ou de dolérites.

Dans la région située entre Labé et Pita se trouvent les hautes terres entre 1 000 et 1 100 m d'altitude. Elles ne sont plus qu'entre 800 et 850 m d'altitude dans la région de Tougué et du Dongol-Sigon. Les plateaux latéritiques du Fantofa (carte n° 2) à 550-660 m entre les rivières Gambie et Bafing constituent les contreforts septentrionaux de ce vaste massif.

L'ensemble constitue la région la plus élevée de l'Afrique Occidentale. Cet ensemble est entaillé par les rivières qui coulent dans des vallons larges et peu profonds et qui doivent franchir une série de rapides, de cascades et de barres de roches dures. Les grands fleuves y ont creusé de vastes bassins.

b) Le plateau Mandingue (1)

Il fait suite au Fouta-Djalon vers le Nord-est et apparaît plutôt comme un moutonnement de plateaux latéritiques. Les altitudes sont variables et la

(1) Les Mandingues constituent une ethnie de vieille civilisation qui se développe dans la région vers le XIII^e siècle, période où l'empire connaît son apogée avec le règne du souverain SOUNDIATA KEITA.

partie la plus élevée est à 800 m d'altitude, près du rebord méridional.

Du Sud au Nord, on distingue :

- au Sud : des plateaux latéritiques entre 550 et 700 m d'altitude, avec des versants à pente douce (15°- 20°) ;
- au centre dans la région de Bafoulabé se dresse un massif, dominant les vallées du Bakoye et du Kolimbiné à plus de 300 m d'altitude ;
- vers le Nord du bassin, jusqu'à Yélimane et Niore du Sahel, les altitudes inférieures à 400 m se succèdent en crêtes et hauts-reliefs (carte n° 2)
- au Nord-ouest vers la confluence de la Falémé et du Sénégal, les altitudes restent inférieures à 100 m. Le modelé est plat ;
- à l'Ouest, en dehors des Monts-Bassaris et des petits massifs au Nord-ouest de Kédougou (entre 300 et 400 m d'altitude), le paysage est déjà monotone et les altitudes restent inférieures à 150 m : c'est le pays de la Falémé.

En fait, le plateau Mandingue n'est homogène que dans ses bordures occidentales où il se termine par la falaise de Tambaoura (carte n° 2) au dessus de la plaine de la Falémé et dans ses bordures méridionales où il se termine par les Monts Mandingues au dessus du bassin de Siguiri (carte n° 2).

c) Les massifs septentrionaux

Il s'agit de l'Affolé, qui commence au Nord de Kayes, et de l'Assaba qui s'étire vers le Nord sur environ 180 km de long et 25 km de large. Ces deux massifs sont séparés entre eux par le Karakoro, et du plateau Mandingue Nord, par le Kolimbiné (carte n° 2).

A l'Ouest de ces deux massifs, les Monts Oua-Oua apparaissent comme des chaînons parallèles. Ils dominent des plateaux étagés qui se terminent par des corniches au dessus des entailles des oueds (1).

Près de Bakel se dessine un paysage de nombreuses buttes et collines.

(1) Oued : terme arabe désignant une dépression occupée de l'eau.

d) Les surfaces d'aplanissement

Ce sont des surfaces étagées. On distingue :

- la surface de Labé (1) : quelques lambeaux de cette surface subsistent jusqu'à 1 300 m d'altitude dans le Massif du Mali et jusqu'à 1 400 m dans le plateau de Dalaba ;
- la surface du Dongol Sigon (2) : elle se développe sur le plateau Mandingue et sur les contreforts du Fouta Djalou ;
- la surface du Fantofa (3) : elle se situe entre 500 et 700 m d'altitude et cerne les massifs du pays de la Falémé.

e) Les glacis et terrasses

P. MICHEL (1973) distingue pour le bassin du Sénégal trois glacis se raccordant à leurs terrasses (Fig. n° 1) :

- le haut-glacis qui jalonne les cours supérieurs du Bafing, du Bakoye et du Tiokoy. Il se raccorde à une haute terrasse ;
- le moyen glacis : il se développe le long du cours moyen du Sénégal jusqu'à Bakel et le long des affluents de droite, le Karakoro et le Kolimbiné ;
- le bas glacis se trouve dans le cours inférieur du Sénégal près de Matam et Kaédi.

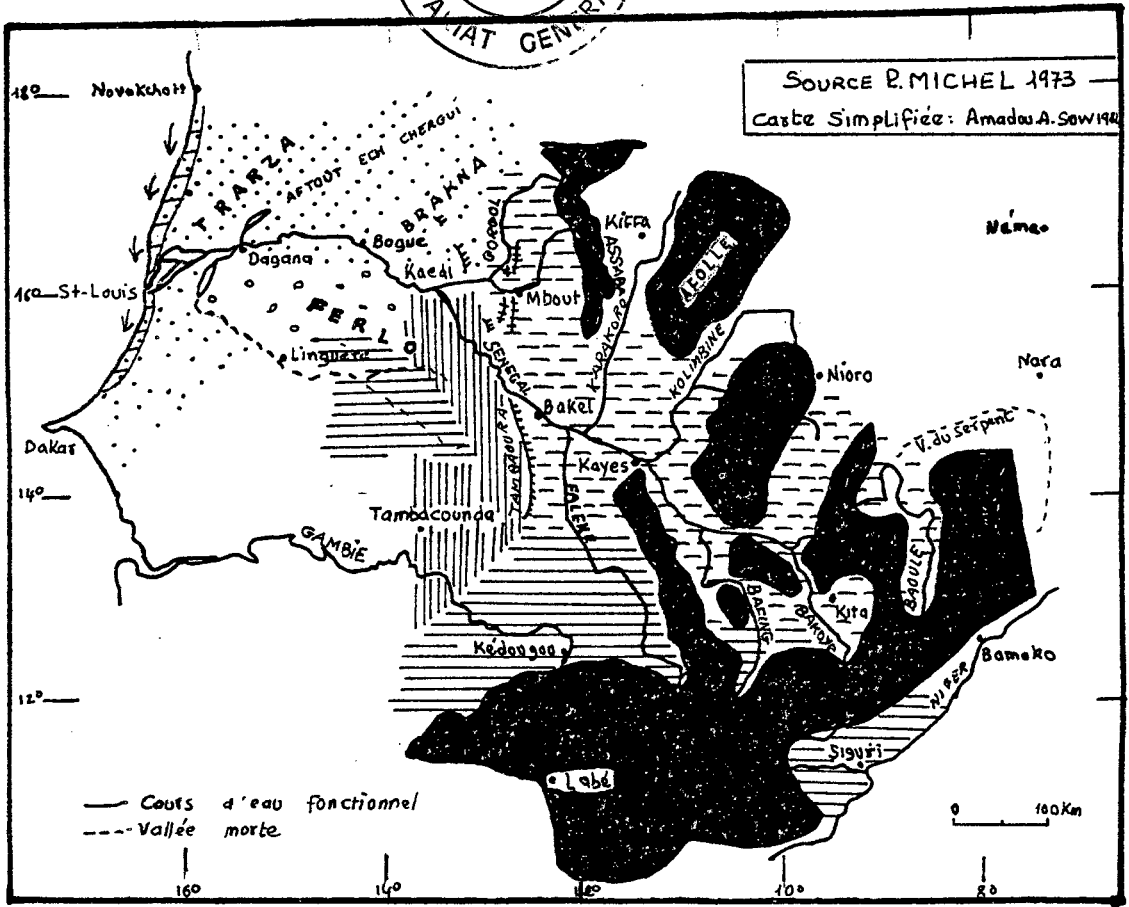
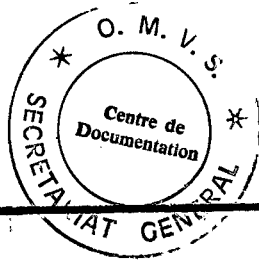
2. La Vallée ou Cours Inférieur

Moins étendu, le Cours Inférieur du Sénégal s'allonge de Bakel à l'embouchure, englobant des régions situées de part et d'autre du fleuve.

a) La Vallée du Sénégal

De Bakel à l'embouchure, sur plus de 400 km, le lit majeur du Sénégal, de 2 à 3 km de large près de Bakel, dépasse 25 km de large à la hauteur de Kaédi.

(1), (2), (3) : ces surfaces ont été étudiées et nommées ainsi par P. MICHEL.



- PRINCIPAUX RELIEFS
- HAUT GLACIS MOYEN GLACIS BAS GLACIS
- GRANDS ERGS DUNES LITTORALES JAUNES SABLE DE COUVERTURE
- CUESTAS CRETES DIRECTION DE LA DERIVE LITTORALE

FIG. 1 PAYSAGES DU BASSIN DU SENEGAL

De direction Sud-est - Nord-ouest, la vallée passe à une orientation Est-Ouest à partir de Boghé. Le Sénégal se divise alors en plusieurs bras et alimente des défluent sur ses deux rives.

Le delta commence à Richard-Toll avec un front de 100 km.

b) Le ferlo central et septentrional

C'est un plateau incliné vers le Nord en direction de la vallée et dont l'altitude moyenne est d'environ 50 m. Il est recouvert par un manteau sableux (carte n° 2).

c) Les dunes de sables

Elles sont édifiées par les vents locaux (alizés continentaux) ou par une déflation à partir des hautes plaines.

Cette topographie dunaire se différencie nettement au Nord de la vallée et sur les franges maritimes (Fig. n° 1). On distingue :

- les dunes rouges : ce sont des ergs vifs édifiés au Sud de la Mauritanie (erg du Trarza et erg du Brakna pour le bassin du Sénégal) et qui ont une direction longitudinale Nord-est - Sud-ouest (Fig. n° 1) ;
- les dunes littorales sont des cordons sableux successifs édifiés sous l'effet de la houle de Nord-ouest à partir d'une dérive littorale. On y distingue des dunes jaunes semi-fixées, à l'arrière des dunes vives, blanches.

Ces différents ensembles physiques s'échelonnent du Sud au Nord, occupent l'Est et l'Ouest du bassin du Sénégal avec des altitudes variables. Or les modalités de l'écoulement fluvial sont en partie expliquées par l'influence du relief, notamment pour l'intensité des précipitations, par l'exposition des versants face aux vents pluvieux. Les montagnes sont ainsi plus arrosées que les plaines environnantes, et les rivières en sont mieux alimentées.

Mais le relief, par les pentes, peut aussi favoriser un ruissellement rapide des eaux vers le drain principal, ce qui atténue l'efficacité de l'évaporation.

Enfin, le relief, par les pentes, a une influence importante sur l'efficacité de l'érosion hydrique. Ainsi l'évolution des versants, par l'accumulation des agents de transport, l'accélération des vitesses d'évacuation de la charge fournie par les versants, sont fonction du relief et des pentes.

De ces facteurs, en plus de la compétence des cours d'eau, résulte une importante activité érosive, dont le rôle est capital pour le réseau hydrographique par le creusement des lits et la détermination des profils. Les régimes des cours d'eau sont en partie liés à ces facteurs.

Cependant, les paysages que nous venons de décrire constituent avant tout un cadre de réception des eaux précipitées. Comment le fleuve Sénégal et ses principaux affluents organisent-ils leur tracé à travers ce " panorama " ?

CHAPITRE II

LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET LE BASSIN DU SENEGAL

Le bassin-versant constitue " l'espace géographique alimentant un cours d'eau et drainé par lui " (J. DEMANGEOT, 1984). C'est de son étendue que dépend la quantité de pluie reçue et donc la lame d'eau écoulée. Le relief y conditionne le tracé du réseau hydrographique et la nature des terrains traversés permet ou interdit l'infiltration des eaux.

Ces différents facteurs font du bassin-versant une région naturelle, animée d'une forme de vie, que nous décrirons à travers le réseau hydrographique, la géologie et les héritages du passé, qui sont déterminés par une longue évolution qui se poursuit encore à l'heure actuelle dans le bassin.

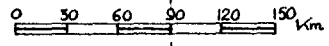
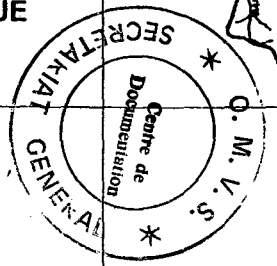
A/ LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le fleuve Sénégal est constitué par les rivières du Bafing et du Bakoye. Ces deux cours d'eau se rejoignent à Bafoulabé, et le Sénégal prend forme et constitue la frontière entre les états de la Mauritanie et du Sénégal (carte n° 3).

Le Bafing (fleuve noir en langue locale) est la branche principale. Il prend sa source dans les montagnes du Fouta-Djalou à 16 km au Nord-ouest de Mamou. De direction Nord-est, après 150 km de parcours, le Bafing reçoit la Téné, le Kioma, et le Kokoum sur sa rive gauche. Son cours devient sensiblement Sud-Nord et il reçoit sur sa rive droite deux affluents, le Balé 1 et le Balé 2. En aval de la confluence du Balé 2, le Bafing décrit un coude vers la gauche et reçoit un autre affluent, le Balinn-Ko à Dibia (657 km de la source). A la confluence avec le Bakoye, le Bafing a parcouru 750 km.



CHEVELU HYDROGRAPHIQUE
 ——— chutes



A.A.S 1984

Le Bakoye (fleuve blanc), lui, prend sa source aux Monts-Ménien, sur les contreforts du plateau Mandingue (cartes n° 2 et 3). Sa direction est sensiblement proche de Sud-ouest - Nord-est. Ses principaux affluents sont le Dainko, le Faragama sur la rive gauche, le Darouma et le Kouaga sur la rive droite.

Son affluent le plus important est le Baoulé, long de 445 km, qui, après un parcours sinueux, grossit le Bakoye à Siramakana (carte n° 3). A la confluence avec le Bafing, le Bakoye a déjà parcouru 560 km.

A Bafoulabé, le Sénégal est constitué et est distant de la mer de 1 050 km. Il a une direction Sud-est - Nord-ouest et reçoit deux affluents venus du Nord sur sa rive droite, le Kolimbiné et le Karakoro. Sur sa rive droite, il reçoit la Falémé venue du Sud du bassin. A Bakel, 810 km de l'embouchure, la direction Sud-est - Nord-ouest se maintient encore, cependant Bakel constitue la limite entre le Haut-Bassin et le Cours Inférieur. Le Sénégal reçoit encore d'autres affluents, souvent des oueds, sur sa rive droite, en aval de Bakel : le Niorde, l'oued Ghorfa, le Gorgol et l'oued Savalel (carte n° 3). Le fleuve décrit une boucle à la hauteur de Kaédi et reprend sa direction Sud-est - Nord-ouest. De Kaédi à Dagana, le Sénégal a un second bras, le Doué, qui lui est parallèle et délimite une île appelée " Ile à Morfil ".

Le long de la vallée, il existe de nombreux défluent peu importants : le Ngalanka, le Koundi ... Il remplit deux lacs : le lac Rkiz (au Nord en territoire mauritanien) et le lac de Guiers (en territoire sénégalais).

Le delta commence à Richard-Toll. Après la ville de Rosso, le Sénégal se divise en plusieurs bras, alimente des mares et finit par se perdre dans l'Océan Atlantique selon une direction Nord-est - Sud-ouest. La longueur totale du fleuve (plus le Bafing, branche mère) est de 1 790 km environ.

Bien qu'important, il se situe loin derrière l'Amazone (7 025 km), le Nil (6 700 km), le Congo (4 650 km) et même loin de son voisin d'Afrique Occidentale, le Niger (4 200 km). Mais il est plus grand que sa voisine sénégalienne, la Gambie (1 150 km de long).

B/ LE BASSIN DU SENEGAL

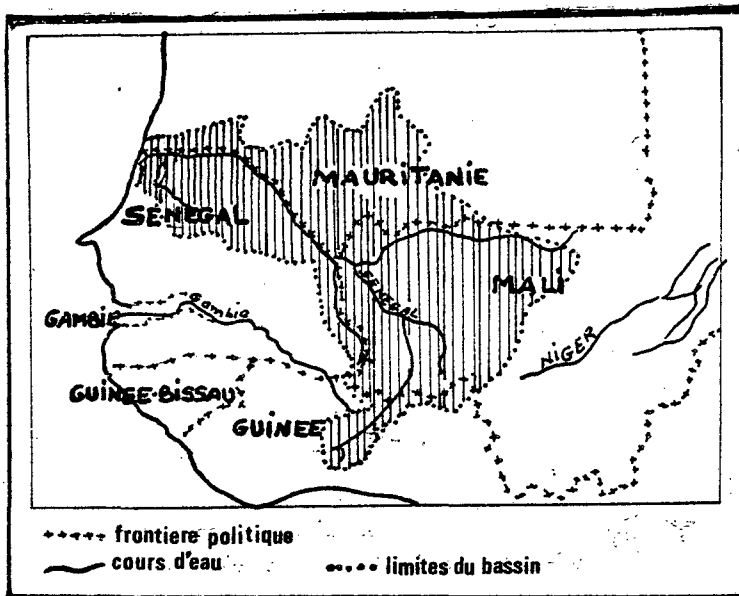


Fig. n° 2. Etats riverains du Bassin du Sénégal.

Le bassin du Sénégal est partagé entre les quatre républiques du Mali, de la Guinée, de la Mauritanie et du Sénégal (Fig. n° 2).

De forme ovoïde, il s'étend selon un axe Sud-ouest - Nord-est, entre les latitudes $10^{\circ}20'$ Nord et 17° Nord et il est compris entre les méridiens 7° et $12^{\circ}20'$ de longitude Ouest. La partie méridionale est située dans une région de montagnes et de plateaux, et l'altitude moyenne dépasse 1 000 m. Le point le plus élevé du bassin est à 1 330 m. Au Sud de 15° de latitude Nord, le bassin est bien drainé par les principaux affluents et les nombreuses rivières qui les grossissent (carte n° 3).

Au Nord de cette latitude, le réseau est beaucoup plus lâche et l'extrême Nord-est du bassin connaît un endoréisme marqué.

Mais le bassin est aussi occupé par des mares et des lacs.

1. Les eaux stagnantes

Ce sont des mares qui naissent à la faveur de la stagnation ou de l'infiltration des eaux de pluie dans des zones endoréiques ou des terrains perméables. Ces mares finissent par disparaître avec l'évaporation en saison non pluvieuse. En revanche, les crues du fleuve alimentent deux lacs importants qui subsistent.

a) Le lac de Guiers

Il a été bien étudié par Y. HENRI (1918). Il est situé au Sud de la basse vallée du Sénégal et se raccorde au Sénégal par la Taoué, un marigot de 25 km de long. Le lac occupe la dépression du Guiers (carte n° 3). C'est un réseau de vallées mortes qui commence à 80 m d'altitude au Sud-ouest de Bakel. Après la jonction des différentes branches, après la ville de Linguère, la vallée du Bounoum se forme et débouche dans la dépression de Guiers. L'importance du remplissage dépend de la hauteur de la crue annuelle à Richard-Toll.

b) Le lac R'Kiz

Il se localise dans l'ancien erg du Trarza dans une dépression appelée Aftout Ech Chergui. Ce lac a une orientation Sud-ouest - Nord-est et mesure environ 35 km. Il est situé au Nord de la vallée (rive droite) à la hauteur de la ville de Podor et est relié à la vallée alluviale par des marigots dont les principaux sont le Laouwaya et le Sokam. Il est aussi rempli par la crue annuelle du Sénégal.

*

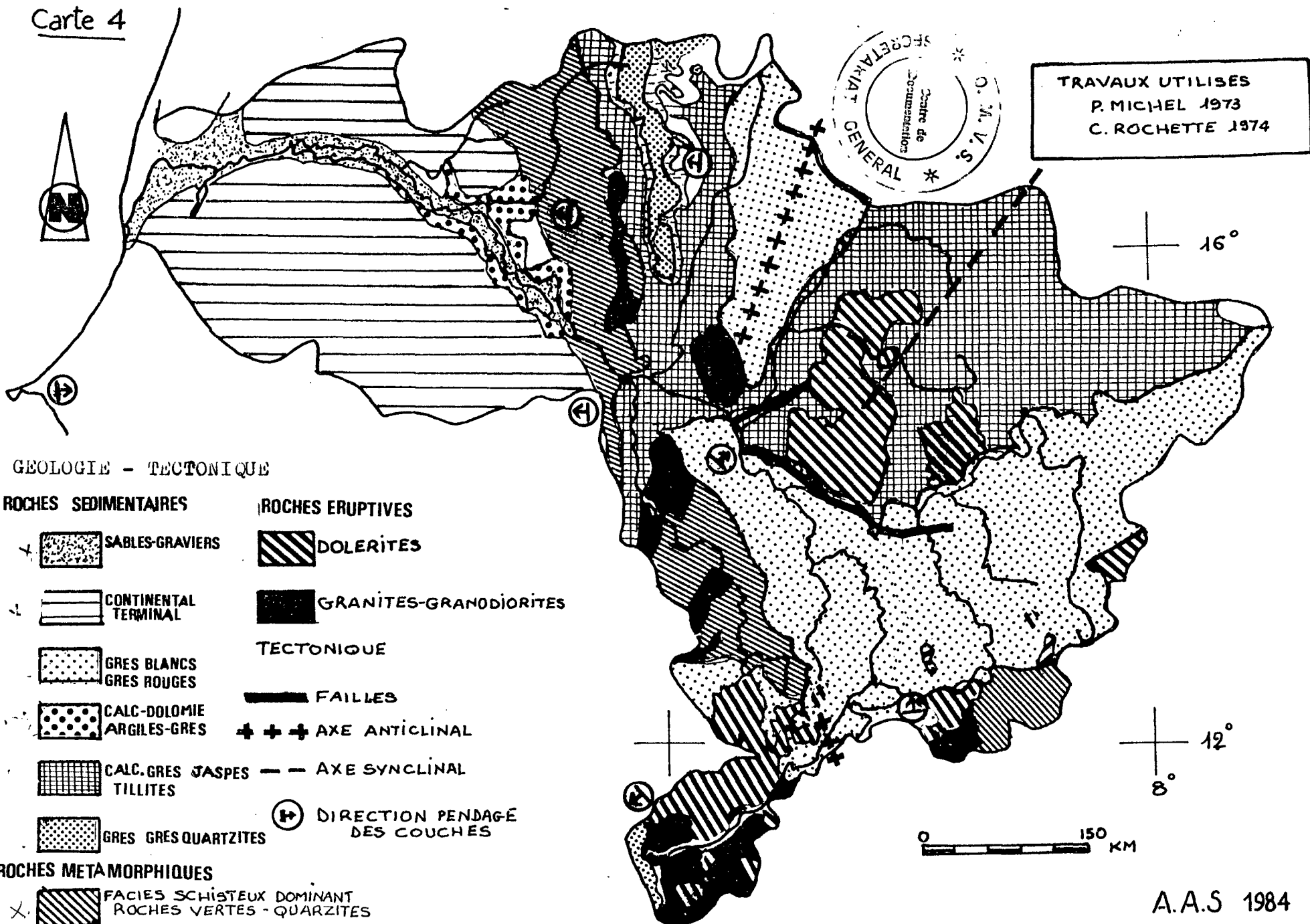
*

*

Le Fleuve Sénégal, ses principaux affluents et ses tributaires déterminent ce vaste bassin-versant de 290 000 km² environ, dont le Haut-Bassin à Bakel fait 218 000 km².

Dans cette vaste région naturelle, les reliefs variés, le tracé du réseau

Carte 4



TRAVAUX UTILISES
 P. MICHEL 1973
 C. ROCHETTE 1974

O. M. V. S.
 Centre de
 Documentation
 GENERAL

GEOLOGIE - TECTONIQUE

ROCHES SEDIMENTAIRES

- SABLES-GRAVIERS
- CONTINENTAL TERMINAL
- GRES BLANCS
GRES ROUGES
- CALC-DOLOMIE
ARGILES-GRES
- CALC. GRES JASPES
TILLITES
- GRES GRES QUARTZITES

ROCHES ERUPTIVES

- DOLERITES
- GRANITES-GRANDIORITES

TECTONIQUE

- FAILLES
- AXE ANTICLINAL
- AXE SYNCLINAL
- DIRECTION PENDAGE
DES COUCHES

ROCHES METAMORPHIQUES

- FACIES SCHISTEUX DOMINANT
ROCHES VERTES - QUARTZITES

PS: QUAND IL EXISTE EST FORME D'ARGILES ET DE MARNES

hydrographique s'expliquent par les données géologiques, la tectonique et par l'évolution passée et présente du bassin.

2. La géologie et les héritages du passé

C'est surtout aux travaux de P. MICHEL (1973) et ceux de M. SALL (1978) que nous ferons de larges emprunts pour comprendre la formation et l'évolution du bassin du Sénégal.

a) La géologie

Le bassin se situe dans une région de socle constitué de roches très anciennes, sédimentaires, plissées, injectées de granites et métamorphisées. Ce socle est recouvert en discordance par des séries diverses, de natures différentes :

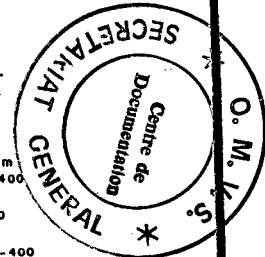
- les séries sédimentaires du Paléozoïque ;
- les séries détritiques du Continental Intercalaire ;
- les séries marines du Secondaire et du Tertiaire ;
- les séries détritiques du Continental Terminal.

Les formations du socle

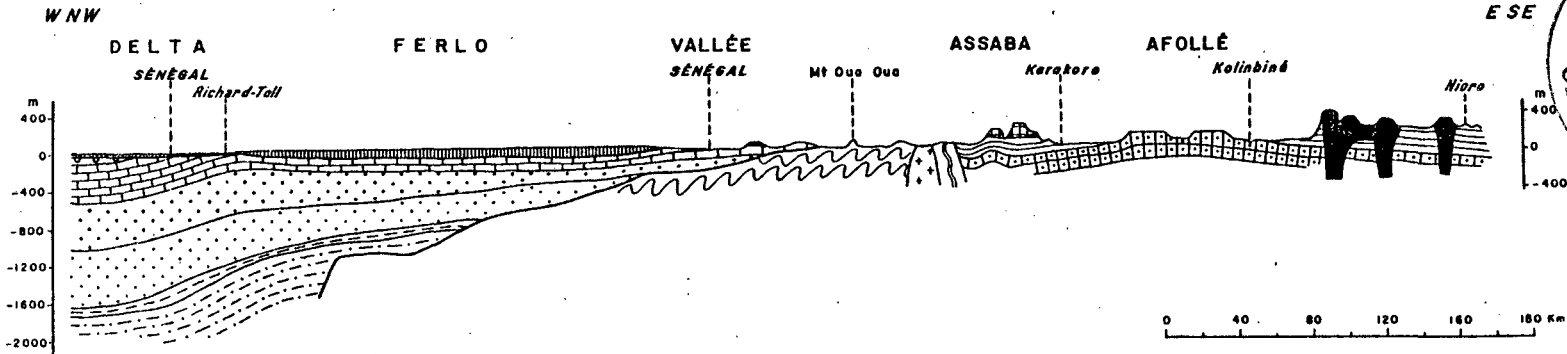
Elles sont essentiellement constituées de formations métamorphiques, avec un faciès schisteux dominant des quartzites et des grès feldspathiques. Ces formations associent des tufs, des grauweekes, des jaspes et des argiles faiblement métamorphisées, ce que les géologues appellent complexe vulcano-sédimentaire. On retrouve ce complexe dans le bassin de la Falémé et au Nord de Kayes. Il est plissé et a une direction Nord-est - Sud-ouest. Ces formations du socle constituent de vastes ensembles que l'on retrouve en divers endroits du bassin du Sénégal et de ses principaux affluents : Falémé, Bafing, Bakoye, Baoulé, en leur cours supérieur. (carte n° 4 et Fig. n° 3).

Mis en place, cet ensemble a été traversé par les venues granitiques, des intrusions qui donnent naissance à des massifs suivant la direction Nord-est - Sud-ouest (massif de Saraya) ou à des massifs circulaires, passant souvent à des granodiorites ou à une diorite (granite de Guidimaka à

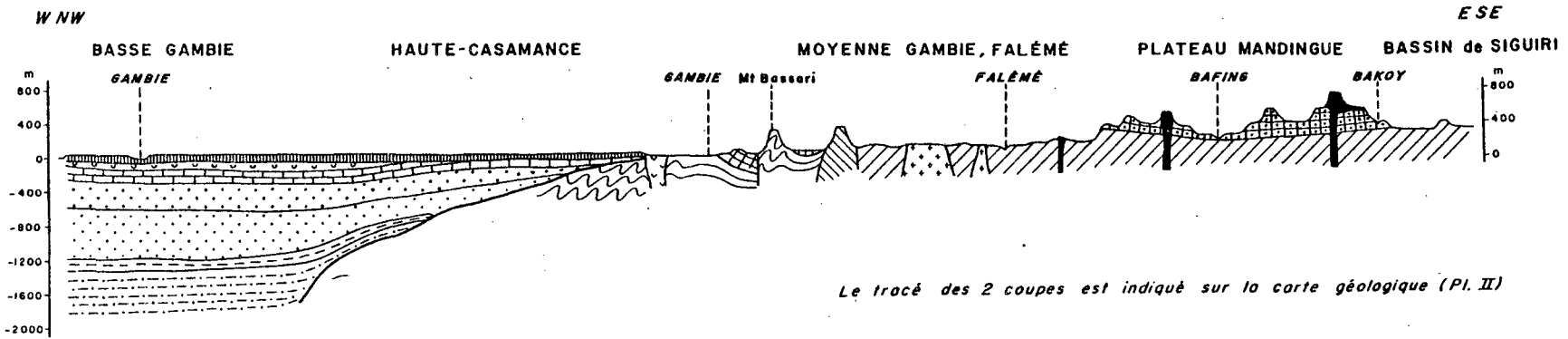
FIG. 3



A - RÉGIONS SEPTENTRIONALES



B - RÉGIONS MÉRIDIIONALES



Le tracé des 2 coupes est indiqué sur la carte géologique (Pl. II)

- | | | | | |
|----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Quaternaire récent | Maastrichtien | Ordovicien et Cambrien supérieur | Série de Bakel-Mbout | Birrimien: métabosites |
| Continental terminal | Sénonien | Cambrien inférieur | Dolérites intrapaléozoïques | Birrimien: faciès schisteux |
| Miocène marin | Turonien | Infracambrien | Rhyolites du Cambrien | Granites birrimiens |
| Éocène | Cénomaniien supérieur | | Complexe de serpentinites | |

Coupes géologiques à travers les bassins du Sénégal et de la Gambie.

P. MICHEL, 1973

à l'Ouest du massif de l'Assaba). Dans le bassin supérieur du Gorgol, elles constituent un complexe de serpentines (Fig. n° 3).

Dans l'ensemble, on distingue le granite de Saraya, le granite du Sud-est de Kidira, le massif au Nord de Kayes, les batholithes de granites du bassin de la Falémé. " L'ensemble des roches métamorphiques d'origine sédimentaire ou éruptive et la plupart des massifs granitiques qui les traversent ont été attribués au Birrimien (1) " (P. MICHEL, 1973).

Les séries sédimentaires du Paléozoïque

Elles vont de l'Infracambrien à l'Ordovicien et occupent la majeure partie du bassin, le plus souvent sous le faciès gréseux.

Ces couches gréseuses se retrouvent dans le massif de l'Affolé, le plateau Mandingue, le Nord-est du Fouta-Djalou et dans le massif du Mali. Ici elles datent du Cambrien Inférieur et sont surtout schisto-dolomitiques alors qu'elles sont recouvertes par les grès Cambrien Supérieur ou Ordovicien sur le plateau de Labé et dans l'Assaba (carte n° 2). A l'Ouest de l'Assaba, les grès sont plissés et deviennent métamorphiques. C'est la série de Bakel-Mbout (fig. n° 3).

P. MICHEL note ici deux phases de plissement dont la dernière serait due à l'orogénèse hercynienne. A cette époque, d'importants sillons de dolérites se sont mis en place. Ils sont épais et très étendus sur les couches des pélites du massif de Bafoulabé et dans la région de Tougué. Les niveaux gréseux se retrouvent enfin à l'Est de Kayes et dans la Falaise de Tamboura qui termine le plateau Mandingue à l'Ouest (carte n° 2).

Les séries marines et détritiques du Secondaire et du Tertiaire

Elles se sont déposées à la faveur d'une sédimentation fine qui débute au Crétacé Supérieur. Les étages vont du Jurassique Supérieur à l'Eocène Moyen (Fig. n° 3). La sédimentation englobe l'Ouest et le Sud-ouest de la Mauritanie, l'Ouest et le Centre du Sénégal (état) et le Nord-ouest de la

(1) Le Birrimien désigne l'Antécambrien moyen. Birrim vient du nom de la rivière du même nom au Ghana (C. ROCHETTE, 1974).

Guinée-Bissau.

Elle débute par des niveaux détritiques (le Maestrichien sableux puis gréseux). Une tectonique cassante donne alors naissance à des horst et des graben. Sur les parties hautes, la sédimentation est davantage chimique avec prédominance de calcaires, marnes et argiles de l'Eocène Supérieur à l'Eocène Moyen (Fig. n° 3).

L'épisode transgressif qui a entraîné ces dépôts se termine à la fin de l'Eocène et une évolution à l'air libre lui succède : c'est le Continental Terminal qui se dépose de l'Oligocène au Pliocène et qui affleure dans le lit majeur près de Matam. Il est recouvert, dans la région du Ferlo, par un manteau sableux.

*

* *

On comprend aisément la différenciation dans le bassin entre deux régions. Cette dualité Haut-Bassin et Cours Inférieur ou Vallée s'explique par les paysages, le réseau hydrographique et les données géologiques.

Le Haut-Bassin est une région de montagnes, de hauts et bas plateaux qui se situent essentiellement sur les formations du socle et du Paléozoïque. Le Cours Inférieur, à partir de Bakel, est une région de bas plateaux, de plaines où l'on retrouve les séries sédimentaires et détritiques du Secondaire et du Tertiaire.

Cependant la mise en place de ces paysages et les dépôts de ces séries diverses, de même que le tracé du réseau hydrographique, sont le fait d'une évolution longue et complexe qui n'a pas été sans bouleversements.

b) Les héritages du passé

Le passé a laissé dans le bassin des accidents visibles, des formes caractéristiques, tributaires de l'histoire tectonique, de l'évolution anté-quaternaire et quaternaire. En se combinant avec le régime du fleuve, ils

expliquent le façonnement du bassin à l'heure actuelle.

La tectonique

L'orogénèse date du Birrimien et est suivie de petits mouvements verticaux venant du socle et affectant les unités géologiques jusqu'à la fin du Primaire. L'orogénèse progresse selon une direction Nord-ouest - Sud-est et de cette histoire tectonique, il résulte un certain nombre de bouleversements :

- le dégagement de l'immense synclinal guinéen d'âge Post-Cambrien : il est orienté Nord-est - Sud-ouest et est limité par deux affleurements du socle, à l'Ouest dans le cours de la Falémé et à l'Est dans le cours du Bafing (carte n° 4).
- le plissement (tantôt évoqué) des séries orientées Nord-est - Sud-ouest et les pendages des couches souvent inclinés (carte n° 2 et 4).

De petits mouvements par la suite se sont produits, affectant l'Infracambrien et le Cambrien. Il en résulte :

- la formation du Fouta-Djalon venue avec d'importantes intrusions volcaniques qui caractérisent une région de montagne avec les massifs et plateaux, décrits dans les paysages : massif de Saraya, du Mali, plateau de Labé, de Dalaba, région de Tougué, etc ... ;

- le grand accident de Kayes-Toukoto : c'est une faille normale, témoin visible de ces mouvements (carte n° 4).

* le bloc Nord-est de la faille s'est affaissé par rapport au bloc Sud-ouest et donne le synclinal de Taoudéni, mettant en regard les grès et les schistes de l'Infracambrien et du Cambrien. Au Sud de Kayes, l'accident forme deux branches. La branche principale se poursuit au Sud, s'incurve et traverse le Bakoye à Oualia. Avant Toukoto, elle prend une direction Est-Ouest et n'est plus reconnue après cette ville.

- une dernière conséquence de la tectonique est la situation du Bassin du

Sénégal en bordure de deux cuvettes : celle de Taoudéni au Nord-est et celle de Basse Guinée.

*

* *

Il existe des preuves morphologiques de mouvements récents d'âge quaternaire mais trop faibles pour provoquer des bouleversements. Cependant on peut considérer la région comme étant stable, n'ayant connu aucun bouleversement depuis la fin du Paléozoïque.

Mais aussi d'autres formes de relief sont le fait de l'évolution antéquaternaire et quaternaire du bassin.

L'évolution passée du bassin

J. VOGT (1959) et P. MICHEL (1973) distinguent deux phases d'évolution pour la mise en place du relief, reliefs qui sont pour nous les héritages du passé.

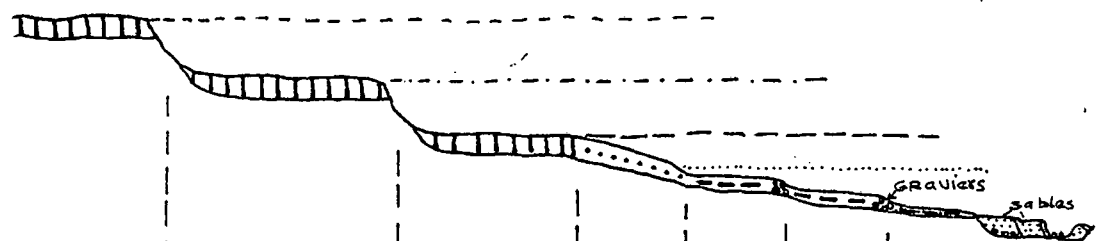
- L'évolution antéquaternaire : elle s'est faite au Secondaire et au Tertiaire et consacre la formation des trois surfaces d'aplanissement : du Labé, du Dongol Sigon et du Fantofa (Fig. n° 4). Ces surfaces sont mal conservées, elles sont disloquées par des mouvements hépirogéniques et ne subsistent qu'en lambeaux correspondant à des Bowé (1). On rencontre ces surfaces héritages du passé dans le Haut-Bassin sur le massif du Mali et le plateau de Dalaba pour la première, la seconde surface se trouve sur le plateau Mandingue et sur les contreforts du Fouta-Djalou. La troisième surface se retrouve dans le pays de la Falémé.

- L'évolution au Quaternaire ancien a favorisé la formation du système de glacis précédemment décrits dans les paysages du Haut-Bassin. Ces glacis

(1) Bowé: singulier: Bowal : terme d'origine peul : lambeaux de relief cuirassés.

se raccordent à leur terrasse (Fig. n° 4).

Les surfaces d'aplanissement et les glacis sont souvent cuirassés. Du rest le cuirassement et la latérisation sont des formes que revêtent certains paysages du bassin, formes sur lesquelles nous reviendrons.



1° S.A.	2° S.A.	3° S.A.	R. I	HG	M.G	B.G	1°	2°	L	Le
LABE	DONGOL SIGON	FANTOFA		H.T.	MT	BT	R	R	M	
A G E	Jurassique moyen?	CRÉTACE (ALBIEN)	EOCENE INF.	PLIOCENE	QUATERNAIRE ANC. et Moy		Quat. Récent			

CROQUIS SIMPLIFIÉ Amadou A. SOW 1984

Abreviations: S.A: surface d'aplanissement R.I: Relief Intermédiaire H: haut(e)
M: moyen(ne) B: bas(se) G: glacis T: terrasse R: remblai LM: lit mineur
Le: Levée

Fig. n° 4. Surfaces d'aplanissement - glacis et terrasses.

D'après P. MICHEL (1973).

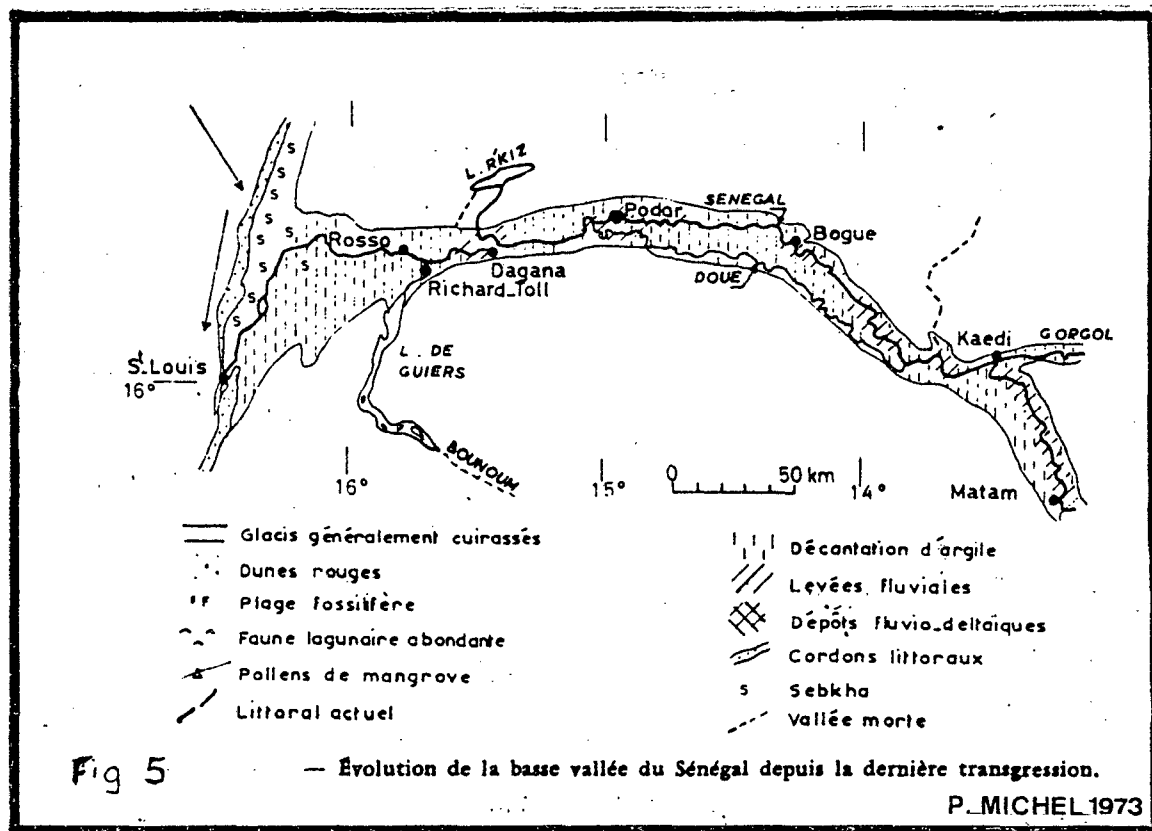
- L'évolution au Quaternaire moyen et récent : elle est caractérisée par des changements climatiques et des variations du niveau marin. Elle affecte essentiellement la Basse Vallée du fleuve. Les conséquences de cette évolution se résument ainsi :

* le creusement ou le recreusement des lits des rivières chaque fois que le niveau marin venait à baisser. La première phase d'entaille du réseau est Post-Inchirien. Le charriage de matériel grossier du cours d'eau favorise progressivement la formation de la nappe alluviale de graviers sous

berges visibles dans le lit mineur aux étiages chaque fois que la compétence du fleuve venait à baisser.

La seconde phase d'entaille du réseau intervient au Fluvial-Post-Ogolien (12 000 - 8 000 B.P. selon P. MICHEL) et le Sénégal a creusé à travers les dunes rouges avant de rejoindre de nouveau la mer ;

* la formation de la terrasse du Nouakchottien : le Nouakchottien est un épisode transgressif qui correspond au maximum de la Transgression Phan-drienne reconnue pour la première fois dans la région de Nouakchott. Au maximum de la transgression vers 5 500 B.P., culminant à + 2,5 m I.G.N., la mer a envahi la Basse Vallée et le Delta qui s'élargissent en golfe jusqu'à Boghé. La mer remobilise le matériel en place (dunes, dépôts fluviaux) qu'elle redépose sous la forme d'une terrasse azoïque (sans faune fossile) ou fossilifère. La faune est essentiellement constituée d'*Arca senilis* ou d'*Anadara*, de *Dosina isocardia* et de *Tympanotonus fasatus*. La terrasse du Nouakchottien est de 1,5 m environ.



* l'édification des systèmes dunaires : la topographie dunaire est largement représentée dans le cours inférieur du Sénégal (Fig. n° 5). Le matériel dunaire est essentiellement constitué de sables et les dunes apparaissent sous forme de cordons successifs séparés par des couloirs. Ces ergs vifs depuis le Sud de la Mauritanie comprennent des dunes longitudinales (erg du Trarza, erg du Brakna) orientées Sud-ouest - Nord-est. Cependant, vers 7 500 B.P., " une petite phase sèche " réoriente les dunes selon une direction Est-Ouest (M. SALL, 1969 ; P. MICHEL, 1970). Ces dunes de coloration rouge sont aussi appelées dunes ogoliennes. En revanche, l'édification des cordons littoraux (dunes jaunes semi-fixées à l'arrière des dunes blanches vives) est intervenue vers 4 000 B.P. au début de la régression marine Post-Nouakchottienne (Fig. n° 5) ;

* la pédogénèse et la rubéfaction du matériel : ce sont là deux héritages du Pluvial-Post-Ogolien. Il a déclenché une pédogénèse et la rubéfaction du matériel qui en a résulté. Ainsi se forment les sols bruns rouges au Nord du bassin et les sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés (chapitre IV).

Mais le dégagement des formes se poursuit aussi à l'heure actuelle.

L'évolution actuelle du bassin

Elle est fonction du climat actuel et du régime des cours d'eau.

Dans le Haut-Bassin, elle se fait dans deux " grands domaines climatiques " :

- le " domaine guinéen " à précipitation abondante : plus de 1,5 m d'eau en moyenne par an, avec une longue saison des pluies (7 mois) et une végétation de type forestière ;

- le domaine soudanien a des pluies moins importantes entre 1 200 mm et 600 mm / an, avec une végétation caractéristique de savane ou de forêt claire.

Le régime du fleuve Sénégal est de type irrégulier avec une succession de périodes de hautes eaux et de basses eaux. La " crue annuelle " se situe en août-septembre, l'étiage vers mai-juin.

* Dans le Haut-Bassin

En domaine guinéen, les conditions morphoclimatiques sont favorables à l'hydrolise, ce qui explique l'importance de l'altération. Mais, même si les versants livrent aux fleuves un matériel fin, leur mobilisation par ceux-ci est gênée par la forêt-galerie.

Des profils en long sont très irréguliers en raison de l'absence de sapement latéral, l'existence et la fréquence des seuils, des rapides, des chutes (tantôt évoquées précédemment) prouvent l'infirmité du creusement linéaire (carte n° 3). On rencontre des marmites de géant au niveau de tous les seuils rocheux, mais elles sont antérieures au climat actuel.

En domaine soudanien, le Sud du domaine (plus arrosé) est favorable à l'altération chimique. En revanche, au Nord (moins arrosé), l'altération mécanique l'emporte. Ainsi les glacis, les terrasses, les dunes, les surfaces d'aplanissement sont autant de paléoformes qui témoignent de l'efficacité de l'érosion différentielle. La charge livrée par les versants aux rivières est solide. En l'absence d'une forêt-galerie, les berges sont sapées latéralement, les lits creusés et les roches dures sculptées.

Les profils en long sont plus réguliers et le creusement se poursuit à l'heure actuelle.

* Dans le Cours Inférieur : la Vallée du fleuve

La " crue annuelle " du Sénégal, dans la vallée, déborde des berges et inonde le lit majeur. Cela a pour effet de déclencher une action fluviatile de colmatage et de décantation (Fig. n° 7). L'action fluviatile joue sur les hautes levées et dans les cuvettes de décantation. Il s'y dépose des argiles et des limons par gravité, et il en résulte un colmatage pouvant atteindre 1 mm / an d'épaisseur.

L'étiage intervient souvent avec des débits faibles ($10 \text{ m}^3/\text{s}$). La mer envahit alors le delta et un régime estuarien s'installe avec des biseaux salés atteignant et dépassant souvent la ville de Podor à l'heure actuelle. Ainsi il existe une nappe phréatique salée sur toute l'étendue du delta. Le sel floccule les argiles et les limons en agrégats de dimension optimale

pour la déflation éolienne : ainsi les cuvettes évoluent en sebkha (1) et sont généralement ceinturées d'une zone margile d'accumulation éolienne faite de monticules de limons et de sables fins.

Souvent aussi le sel se cristallise et exerce une pression de cristallisation sur le sol et provoque son ameublissement.

Les paysages, la géologie, la tectonique, l'évolution passée et présente sont des critères qui témoignent d'une " évolution longue et complexe " (P. MICHEL, 1973). Ces critères, quant à nous, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- l'unité géomorphologique du Bassin du Sénégal, unité qui a été du reste évoquée par P. MICHEL ;
- on peut évoquer la stabilité du bassin sur le plan tectonique. Mais surtout :
- l'inadaptation d'ensemble du réseau par antécédence. Les témoins de cette antécédence sont les paléoformes, les phases d'entaille du réseau hydrographique, le tracé coudé des cours d'eau, l'existence de seuils et de gorges ...

Inadaptation d'ensemble néanmoins, à la tectonique et à la structure pour le Haut-Bassin, alors que le cours inférieur situé sur des séries plus ou

(1) Sebkha (ou sebkra) : terme arabe désignant une dépression temporaire occupée par un lac souvent salé.

moins tendres parait adapté à la lithologie. Il faut cependant noter que des biefs peuvent être adaptés à l'une ou à l'autre : par exemple le Bakoye qui coule le long de la ligne de faille Kayes-Toukoto dans son cours inférieur.

Enfin ces différents critères nous permettrons de mieux comprendre les caractéristiques morphométriques et les facteurs litho-pédologiques : les premières sont surtout caractérisées par de fortes pentes aux sources des rivières, favorisant un ruissellement rapide, et un tracé irrégulier des cours d'eau qui prennent souvent des caractères torrentiels ; les secondes nous permettrons de dégager les zones favorables à l'infiltration des eaux, sous forme de réserves de soutien des débits des basses eaux.

CHAPITRE III

LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES
DU BASSIN DU SENEGAL

Pour ce chapitre, la remarquable monographie de C. ROCHETTE (1974) nous a servi de source de recueil des différentes données chiffrées d'analyse. Nous y faisons de larges emprunts que nous présentons sous forme de tableaux et de courbes que nous commentons. Nous ajoutons quelquefois à ces tableaux des paramètres que nous avons calculés nous-mêmes afin de rendre l'analyse plus fine ; il en est ainsi pour les densités de drainage.

Cette monographie apparaissant sur le plan géomorphologique comme une sorte d'économie du travail de P. MICHEL (1973), il nous a semblé nécessaire quelquefois d'aller à la source pour compléter l'information.

A/ LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES PRINCIPALES

(tableau n° 1)

Elles sont déduites de la mesure de la surface A de chaque bassin, de son périmètre P et de son coefficient de forme :

$$C = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Il s'agit ici de l'indice de compacité de Gravelius ; la monographie donne les autres mesures suivantes :

- la longueur L et la largeur l du rectangle équivalent

$$\left[\begin{array}{l} L \\ l \end{array} \right] = \frac{C \sqrt{A}}{1.12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{C} \right)^2} \right]$$

Tableau n° 1. Bassin du fleuve Sénégal. Caractéristiques physiques du Haut-Bassin.

Source : C. ROCHETTE 1974, " Le bassin du fleuve Sénégal ", monogr. hydro. O.R.S.T.O.M.

Le réseau hydrographique en amont de Bakel (1a).

Fleuves et sous-affluents	Longueur (km)	Alt. maxi. (m)	Alt. du confluent (m)	Dénivelée (m)	Pente moy. (%)
Sénégal-Bafing en amont de Bakel	1 006	800	11	789	0,78
Bafing en amont de Bafoulabé	750	800	88	712	0,95
Téné	136	1 200	510	690	5,07
Kioma	93	1 000	500	500	5,37
Balé 1	114	725	240	485	4,25
Balé 2	138	500	190	310	2,24
Balinn-Ko	164	600	135	465	2,83
Bakoye	561	760	88	672	1,19
Djinnko	73	650	305	345	4,72
Kokoro	82	375	307	68	0,83
Faragama	87	630	300	330	3,79
Baoulé	632	500	155	345	0,55
Falémé	625	800	18	782	1,25
Kouloun-Ko	56	500	225	275	4,91
Balinn-Ko	165	750	115	635	3,85
Kiola-Kabé	182	680	110	570	3,13
Doundi	70	450	100	350	5,00
Kolimbiné + Wadou	450	300	22	278	0,62
Karakoro	310	130	15	115	0,37

Les bassins contrôlés par des stations (1b).

Bassins	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	C	L (km)	I (km)	Ip	Ig (m/km)	Alt. maxi. (m)	Alt. mini. (m)
Falémé à Kidira	28 900	938	1,54	396	73	0,033	1,50	906	19
Bafing à Mahina	38 400	1 514	2,16	701	55	0,037	1,01	1 330	29
Bafing à Dibia	33 500	1 374	2,10	633	53	0,038	1,05	1 330	103
Baoulé à Siramakana	59 500	1 210	1,39	482	123	0,028	0,52	795	150
Bakoye à Toukoto	16 500	698	1,52	292	57	0,041	1,03	873	160
Sénégal à Bakel	218 000	3 144	1,89	1 418	154	0,022	0,43	1 330	15
Sénégal à Dagana	268 000	4 144	2,24	1 933	139	0,020	0,31	1 330	3

- l'indice de pente

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{b_i (a_i - a_{i-1})}$$

b_i : représentant la fraction de surface A comprise entre les courbes de niveau cotées a_i et a_{i-1}

- l'indice général de pente

$$I_G = \frac{D}{L}$$

D : étant la dénivellée mesurée entre les altitudes dépassées pour 95 % et 5 % de la cote hypsométrique ramenée à la longueur L du rectangle équivalent.

Nous avons calculé la densité de drainage des sous-bassins étudiés,

$D_d = \frac{L}{A}$ étant le rapport de la longueur du réseau sur l'aire A du dit bassin.

Les résultats de toutes ces estimations sont confinés dans les tableaux, ou traduits par les courbes que nous avons tracées.

1. Les formes des bassins

Elles ne sont données que pour la Falémé, le Bafing, le Baoulé et le Bakoye et au niveau des stations qui contrôlent la totalité de leurs bassins, respectivement Kidira, Mahina, Siramakana, Toukoto. La station de Bakel contrôle tout le bassin-versant supérieur (218 000 km²).

Au niveau de Bakel, l'indice de Gravelius traduit la forme de la totalité du Haut-Bassin. Quant à la station de Dagana qui contrôle 268 000 km² du bassin (+ de 92 %), on a un indice qui rend compte de la forme générale du bassin.

Dans l'ensemble, seul le bassin du Baoulé présente une compacité plus grande (C : le plus petit). L'indice de compacité est de 1.39 à Siramakana, suivi par celui du Bakoye à Toukoto : 1.52 .

D'autre part, l'indice traduit une forme allongée aux bassins de la Falémé et du Bafing.

A Bakel l'indice est de 1.89 d'où une compacité d'ensemble pour le Haut-Bassin.

En aval de Bakel, le Sénégal ne maintient plus une direction générale Sud-est - Nord-ouest mais après une boucle, s'oriente Est-Ouest ; cela allonge le bassin vers l'océan, ce qui confère à l'ensemble une forme ovoïde traduite par l'indice à Dagana : 2.24, le plus élevé (tableau n° 1).

2. Le relief et l'hypsométrie

Les données altimétriques reflètent l'ordonnance générale du relief. A savoir que les altitudes des rivières principales et de leurs affluents sont montagneuses dans le Haut-Bassin (1 200 m à la source de la Téné, 1 000 m pour la Kioma, tous deux affluents du Bafing).

En fait, les sources des principaux affluents sont situées dans le Fouta-Djalou ou dans ses contreforts septentrionaux, région de hauts reliefs entre 800 et 1 200 m. En revanche, les cours inférieurs et les confluences se situent sur le plateau Mandingue où, en dehors de quelques sommets, les altitudes se sont déjà estompées.

Le cours inférieur du Sénégal, par contre, se situe dans la Vallée sur un plateau d'environ 50 m d'altitude.

Ainsi la dénivellée pour l'ensemble Sénégal-Bafing en amont de Bakel, entre l'altitude maximale et l'altitude minimale est de 789 m. Elle passe à 115 m pour le Karakoro.

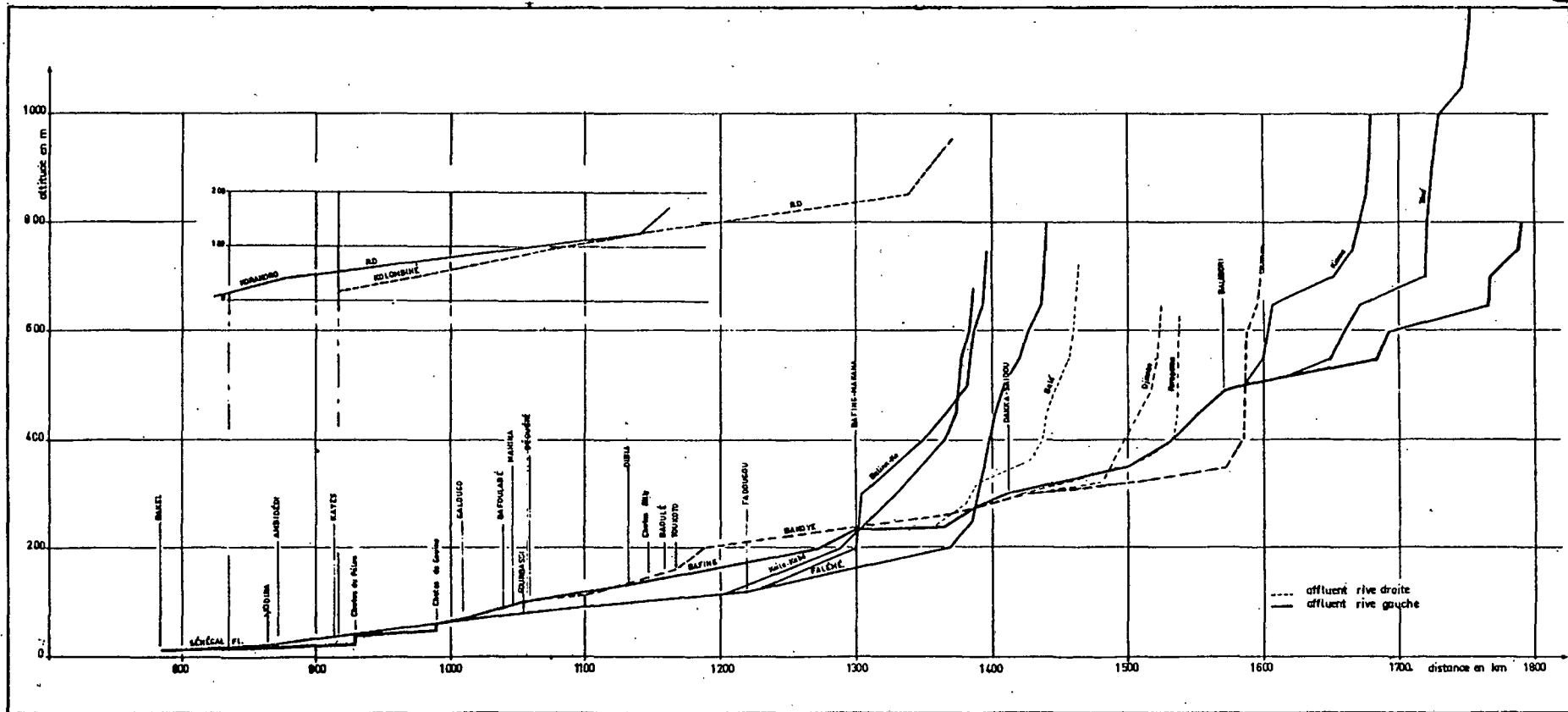
A Dagana, l'altitude maximale du bassin-versant est de 1 330 m et l'altitude minimale de 3 m.

Pour l'ensemble du bassin, ce sont les altitudes entre 200 et 400 m qui

FIG. 6

Profil en long du SENEGAL en amont de BAKEL
 et de ses principaux affluents

C. ROCHETTE, 1974



représentent le plus fort pourcentage de surface occupée, environ une moyenne de 98 %. Ceci nous amène à dire que le bassin du Sénégal est surtout dominé par un relief de plateau, même si localement, un relief de montagne se dessine.

Mais l'ordonnance générale du relief est respectée sous la forme classique de : montagne - plateau - plaine, d'amont en aval.

Nous verrons dans l'étude des profils que cette progression d'amont vers l'aval se fait souvent brusquement par des chutes au niveau de pentes fortes le plus souvent.

3. Les indices de pentes et profils en long (tableau n° 1, fig. n° 6).

Le tableau n° 1a donne la pente moyenne pour chaque affluent ; le tableau 1b donne par contre l'indice de pente I_p et l'indice général de pente I.G. Nous notons que c'est l'indice de pente I_p qui tient le plus compte de la physionomie du relief dans le bassin. On passe ainsi de 0,038 pour le Bafing à Dibia, à 0,020 pour le Sénégal à Dagana.

La pente moyenne varie de 5 ‰ pour le Doundi, affluent " perché " de la Falémé, à 0,37 ‰ pour le Karakoro. La Téné (Bafing) a une pente de 5,07 ‰ alors que le Kolimbiné + Wadou n'a plus que 0,62 ‰.

Ainsi dans le Haut-Bafing, en amont de la frontière entre le Mali et la Guinée, la pente moyenne varie entre 2 m/km et environ 50 cm/km. La pente moyenne du Bakoye est de 1,19 ‰, tandis que celle de la Baoulé décroît de 2 m/km en amont, à environ 30 cm/km près de sa confluence avec le Bakoye.

La Falémé, dernier affluent, a une pente forte de 9,5 m/km en moyenne dans le cours supérieur, un gradient qui chute jusqu'à 15 cm près de la confluence avec le Sénégal.

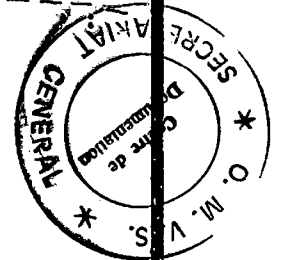
Le Sénégal lui-même perd environ 70 m de chute jusqu'à Kayes, c'est-à-dire sur une longueur de 130 km, ce qui correspond à une pente moyenne de 55 cm/km.

MORPHOLOGIE	LEVEES subactuelles	LIT MINEUR dépôt actuel	érosion	HAUTES LEVEES deltaïques	CUVETTES ARGILEUSES Sédimentation actuelle	Mare	TERRASSE du Nouakchottien	DUNES rouges fixées
Nature du terrain	Sablo-argileux	Sableux		Finement sableux	Argileux	très argileux	sableux	très sableux
Pédologie d'après J. MAYMARD	Complexe de sols tirs et de sols à taches	Sol d'apport fluvial (sol peu évolué)		sols à taches et concrétions sur limons de débordement	tirs sur argile de décantation	Sol à gley	sol à taches et concrétions sur terrasse	Sol brun-rouge
NOMS VERNACULAIRES (toucouleurs)	DIACRE	FALO		FONDE blanc noir	OUALO blanc noir	vindou	DIERI djedjogol	SOL ISOHUMIQUE
HYDROLOGIE								
CRUE for te moyenne faible								
ETIAGE et niveau de la nappe								

Leves
 Cuvettes
 Dépôts sableux

Fig. 7 COUPE SCHEMATIQUE DE LA BASSE VALLEE DU SENEGAL dans la région de PODOR

d'après P. MICHEL



Entre Kayes et Bakel, la pente moyenne descend jusqu'à 6 cm/km. En aval de Bakel, la pente moyenne diminue encore : 3 cm/km entre Bakel et Matam ; elle est de 1 cm/km entre Podor et Richard-Toll, et finalement de 0,6 cm/km dans le delta.

Ainsi le Sénégal proprement dit conserve dans son cours supérieur entre Bafoulabé et Kayes les mêmes caractéristiques que ses affluents principaux :

- les profils sont irréguliers : les vallées sont constituées par une succession de bassins séparés par des seuils rocheux de grès quartzites, de dolérites, de bancs de schistes, ce qui oblige les cours à changer brusquement de direction, traçant des coudes brusques, d'où un profil en long extrêmement irrégulier. Les profils en travers varient d'un endroit à l'autre, aussi dans le Haut-Bassin, les vallées sont étroites, 1 à 2 km pour la plaine alluviale. Les profils convexes des berges témoignent de l'absence d'érosion.

Par contre, dans la vallée, le sapement est important, d'où un micro-modelé très compartimenté. On distingue les levées alluviales, anciens bourrelets de berges qui bordent le lit mineur, les cuvettes de décantation argileuses inondées par la crue, le delta de rupture de levée qui borde sur le fond, des cuvettes (Fig. n° 7).

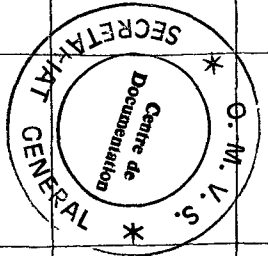
B/ LES UNITES HYDROLOGIQUES

(carte n° 5, fig. n° 8).

Les principaux affluents du Sénégal constituent des sous-bassins fluviaux. Unités hydrologiques de taille différente, elles sont contrôlées par des stations hydrométriques à leur confluence avec le Sénégal ou avec d'autres bras. Il s'agit principalement pour nous des bassins du Bafing, de la Falémé, du Bakoye, du Baoulé. Les autres affluents importants venus du Nord et leurs tributaires, le Kolimbiné et le Karakoro, s'ils ont des stations le long de leur cours, elles ne rendent pas compte des caractéristiques de l'ensemble des dits bassins.

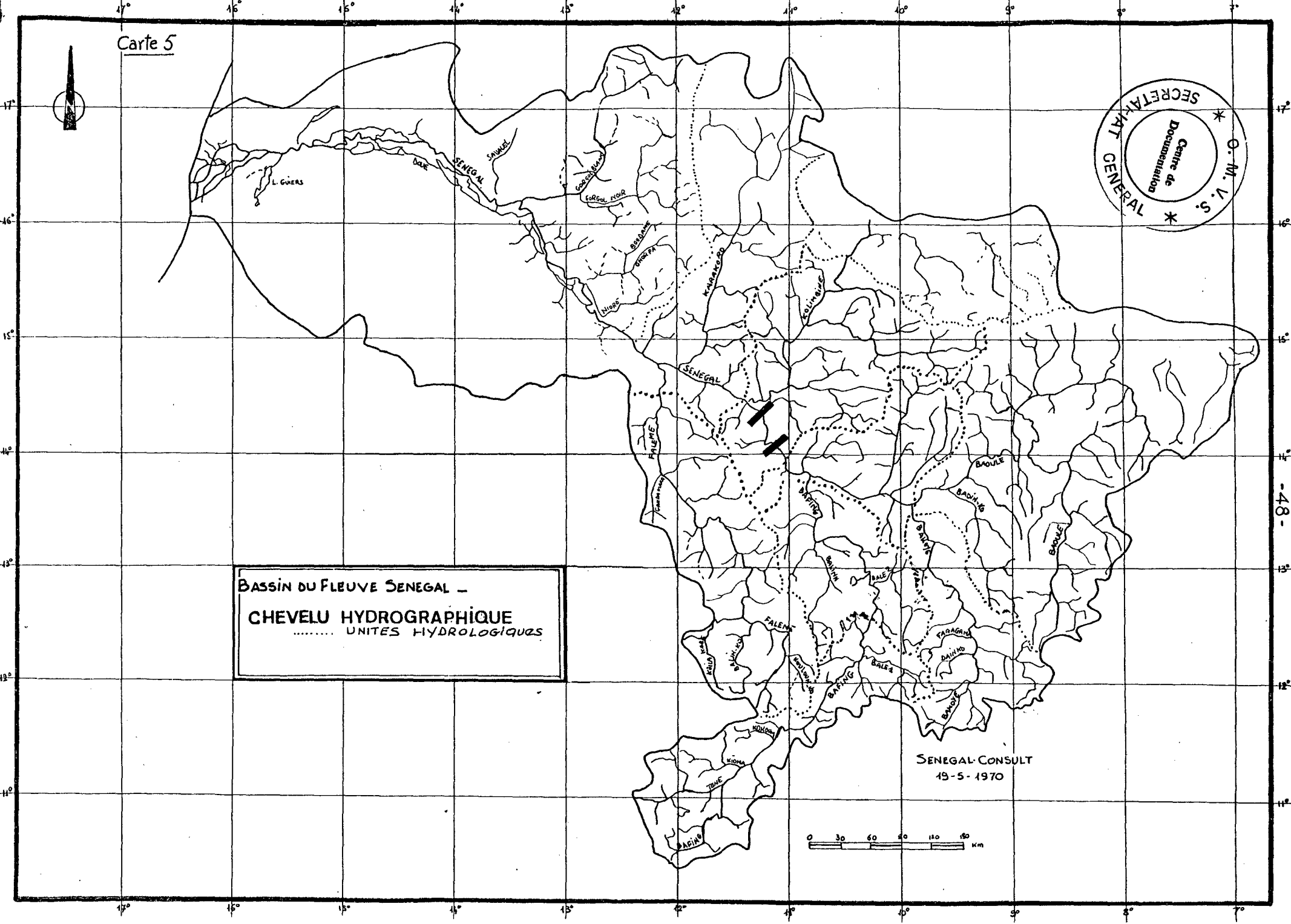
Les affluents peu importants comme le Gorgol, l'Oued Ghorfa, l'Oued Savahel

Carte 5



BASSIN DU FLEUVE SENEGAL -
CHEVELU HYDROGRAPHIQUE
..... UNITES HYDROLOGIQUES

SENEGAL CONSULT
19-5-1970



participent de l'ensemble des caractéristiques morphométriques du Bassin du Sénégal à Dagana qui contrôle elle 268 000 km² du bassin.

1. Le bassin de la Falémé

La Falémé est née à 800 m d'altitude dans une région de plateaux latéritiques au pied du Fouta Djallon. Elle s'allonge sur 625 km environ jusqu'à la confluence avec le Sénégal, contournant des sills de dolérites importants, dessinant de grands méandres dans une plaine parsemée de petits inselbergs ou de buttes latéritiques, ou des glacis cuirassés. Elle doit franchir des seuils rocheux de grès dur, de roches vertes, de microgranites, d'où un tracé irrégulier Nord-Sud passant par Est-Ouest, avant de se stabiliser à Sud-ouest - Nord-est, tracé comportant de petits rapides.

Dans son cours supérieur, elle doit descendre de 600 m sur 70 km, d'où une forte pente de 8,57 ‰ qui diminue jusqu'à 0,015 ‰ près de la confluence sa largeur varie entre 100 et 300 m.

La Falémé et ses principaux affluents ; le Kouloun-Ko, le Balinn-Ko, la Kiola-Kabé déterminent un bassin-versant de 28 900 km². Trois stations de mesure contrôlent ce bassin-versant : Fadougou, Gourbassi et Kidira à la confluence et dont nous donnons l'hypsométrie :

la Falémé à Kidira :

28 900 km², 10 ‰ du Bassin du Sénégal

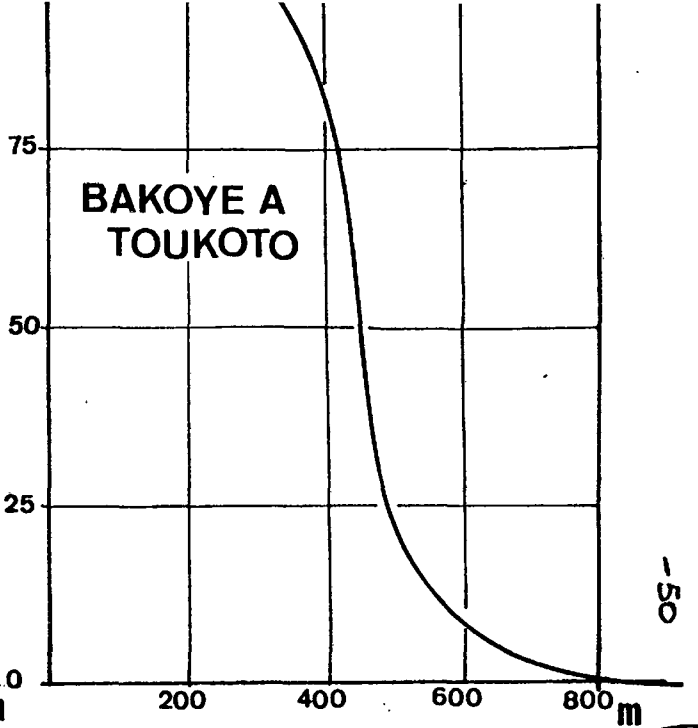
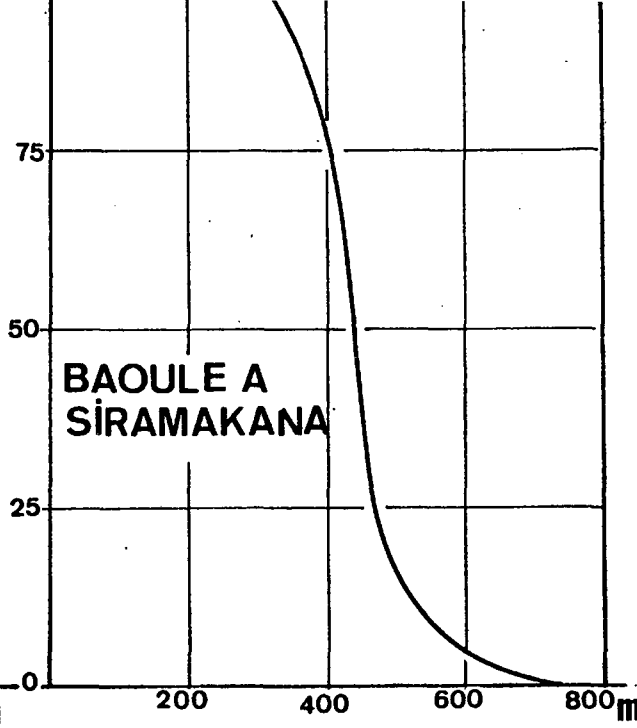
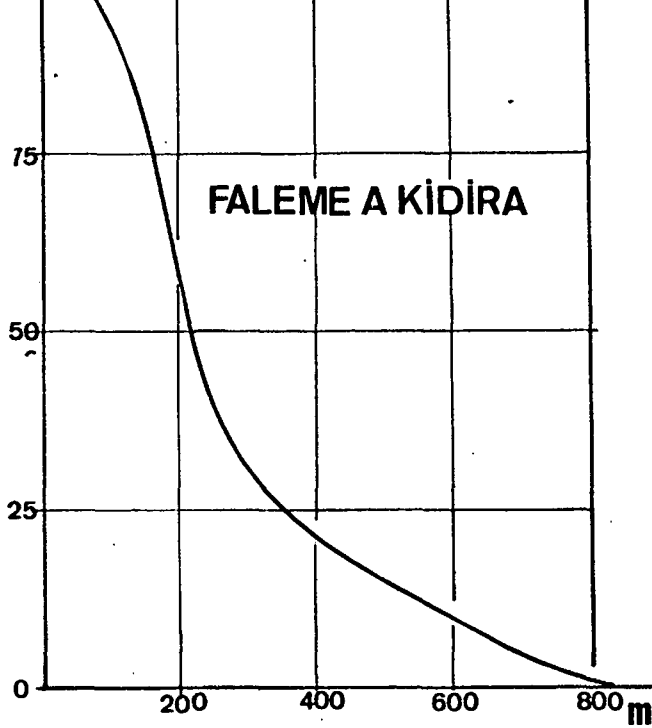
Ip : 0,033

IG : 1,5 m/km

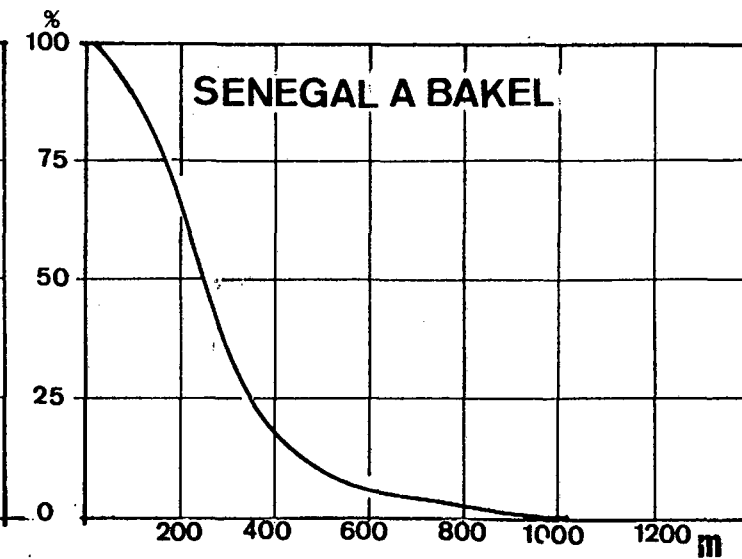
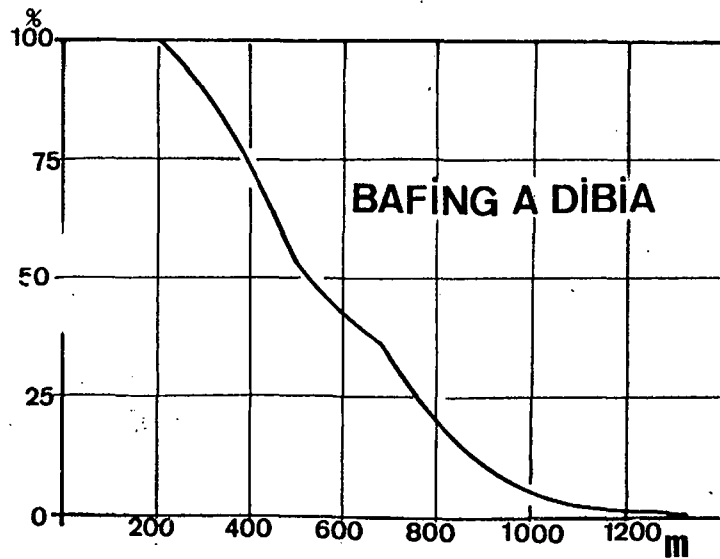
hypsométrie (figure n° 8) :

entre 19 m - 100 m	20,4 ‰
100 m - 200 m	49,1 ‰
200 m - 400 m	14,6 ‰
400 m - 600 m	71,4 ‰
600 m - 800 m	4,4 ‰
800 m - 906 m	0,1 ‰

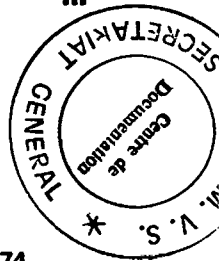
La densité de drainage totale est de 0,02.



-50



SOURCE: C.ROCHETTE 1974



2. Le bassin du Bafing

Le Bafing, branche maîtresse du Sénégal, prend sa source dans le Fouta Djalon, à 800 m d'altitude environ. La moitié de son bassin-versant est situé en Guinée. Le bassin se situe dans sa partie supérieure dans le socle birrimien et dans sa partie inférieure dans le complexe infra-cambrien qui forme l'immense plateau Mandingue. Sa longueur est de 750 km. La pente du fleuve varie de 0,2 ‰ à 0,05 ‰ entre la source et Dibia, confluence avec le Balinn-Ko. A l'aval de Dibia et jusqu'à Bafoulabé, elle est de 0,025 ‰.

La largeur de la plaine alluviale varie entre 150 m et 400 m. Les massifs gréseux épais et résistants, les séries de roches telles que les pélites, les grauwackes qui alternent dans son cours, confèrent au fleuve un tracé irrégulier, constitué de biefs et de seuils rocheux d'où l'existence de rapides ou de petites chutes, en plus de nombreux méandres que dessinent le Bafing.

Ses principaux affluents dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau n° 1 sont :

- la Téné 130 km pour un bassin-versant de 4 100 km², la Kioma 90 km 1 800 km², le Balé supérieur, le Balé inférieur et enfin le Balinn-Ko.

Six stations de mesure sont installées dans cette unité hydrologique dont nous retenons les trois principales : Dakka-Saïdou, Dibia et Mahina. C'est cette dernière qui contrôle tout le bassin-versant.

Le Bafing à Mahina :

38 400 km², 13,2 ‰ du bassin

Ip : 0,037

IG : 1,01 m/km

hypsométrie (figure n° 8) :

entre -89 - 100 m

0,1 ‰

100 - 200 m

10,4 ‰

200 - 400 m	37,2 %
400 - 600 m	18,2 %
600 - 800 m	23,4 %
800 - 1000 m	9,2 %
1000 - 1200 m	1,4 %
1200 - 1330 m	0,1 %

La densité de drainage totale est de 0,02.

3. Le bassin du Bakoye

Le Bakoye, de sa source, à 760 m d'altitude dans les Monts Méniens, à la confluence avec le Baoulé, parcourt 560 km. Il traverse des régions de granite (d'où une série de chutes et de rapides), une région plate de schistes du Birrimien et des grès infracambriens à l'amont de Toukoto.

Le Bakoye traverse deux fois l'accident tectonique de Kayes-Toukoto ; il coule d'abord dans la direction Sud - Nord-est puis s'infléchit vers la direction Est - Nord-est. Sa pente varie entre 0,1 et 0,2 % jusqu'à sa confluence avec le Baoulé, et son lit varie entre 50 et 200 m ; il décrit de nombreux méandres.

Quatre stations hydrométriques contrôlent cette unité hydrologique Toukoto-Qualia-Dioubéba-Kalé. Mais aux deux dernières, le Bafing a déjà reçu le Baoulé (un de ses principaux affluents, mais une unité hydrologique que nous voulons analyser à part). C'est donc à Toukoto, juste avant la confluence, que nous donnerons les caractéristiques hypsométriques.

Le Bakoye à Toukoto :

16 500 km², 5,7 % du bassin
Ip : 0,041
IG : 1,03 m/km

hypsométrie (figure n° 8) :

entre 160 - 200 m	0,3 %
200 - 400 m	76,2 %
400 - 600 m	20,2 %
600 - 800 m	3,0 %
800 - 873 m	0,3 %

La densité de drainage totale est de 0,03.

4. Le bassin du Baoulé

C'est un affluent du Bakoye, mais avec une longueur de 600 km, nous le prenons comme une unité hydrologique. Le Baoulé naît au Sud-est de Bamako, à environ 750 m d'altitude ; il traverse tour à tour des reliefs doléritiques puis des séries gréseuses infracambriennes du Plateau Mandingue où il décrit de nombreux méandres, ensuite une large vallée où affleurent les pélites tendres du Cambrien.

De direction sensiblement Sud-Nord, il décrit deux arcs de cercle avant de rejoindre le Bakoye selon une direction Nord-est - Sud-est.

Ses principaux affluents sont la Kénié, le Kéniéba-Ko, le Badin-Ko, le Dla, le Dlaba, et la Vallée du Serpent qui n'apporte pratiquement rien. Le bassin-versant est contrôlé par la station de Siramakana.

Le Baoulé à Siramakana

59 500 km² soit 20,5 % du bassin

Ip : 0,028

IG : 0,52 m/km

hypsométrie (figure n° 8) :

entre 150 - 200 m	0,6 %
200 - 400 m	86,2 %
400 - 600 m	12,8 %
600 - 795 m	0,4 %

La densité de drainage totale est de 0,01.

5. Le bassin du Sénégal (1)

Le fleuve Sénégal proprement dit est constitué à partir de Bafoulabé à la confluence du Bafing (1 050 km de l'embouchure). Le Bakoye, le Baoulé et leurs affluents ont déjà donné leurs " apports ".

Le Sénégal traverse alors des plateaux gréseux où son lit est coupé par une série de rapides et de chutes (chutes de Gouina, chutes de Félou), de seuils (seuil de Talari) et de plaines d'alluvionnement sableuses. Sa direction est Sud-est - Nord-ouest. A Kayes il reçoit le Kolimbiné (450 km) ; à 70 km en amont de Bakel il reçoit le Karakoro (310 km de long). Ces deux affluents de rive droite viennent du Nord alors que, sur sa rive gauche il reçoit la Falémé (625 km de long). La pente moyenne est de 0,30 ‰.

Le Haut-Bassin se limite à Bakel ; sur ce tronçon du fleuve sont installées six stations de mesure. Le bassin-versant, à ces différentes stations, a les superficies suivantes :

- à Bafoulabé : 124 700 km² ;
- à Galeugou : 128 000 km² ;
- à Gouina : 128 600 km² ;
- à Félou : 131 500 km² ;
- à Kayes : 157 400 km² ;
- enfin à Bakel 218 000 km² soit 75,1 ‰ du bassin-versant total.

Ip = 0,022

IG = 0,43 m/km

hypsométrie (figure n° 8) :

entre	15 -	100 m	11,7 ‰
	100 -	200 m	21,1 ‰
	200 -	400 m	50,3 ‰
	400 -	600 m	10,0 ‰
	600 -	800 m	5,0 ‰

(1) Il s'agit du fleuve Sénégal proprement dit constitué à partir de Bafoulabé.

800 - 1 000 m	1,65 %
1 000 - 1 200 m	0,25 %
1 200 - 1 330 m	0,00 %

La densité de drainage totale est de 0,005.

Le cours inférieur du Sénégal commence à partir de Bakel. En aval de cette limite, la direction du fleuve reste Sud-est - Nord-ouest jusqu'à Kaédi, ville située près d'une boucle que décrit le fleuve vers l'Ouest pour reprendre sur un court tronçon la direction Sud-est - Nord-ouest jusqu'à Boghé ; là, la vallée s'infléchit nettement selon une direction Est-Ouest jusqu'en aval de Rosso où elle devient Nord-nord-est - Sud-sud-ouest pour se perdre dans l'océan.

De Bakel à Dagana, c'est une vaste étendue avec quelques reliefs (des buttes de grès, de quartzites). L'altitude est comprise entre 0 m (région du delta) et environ 50 m.

Le fleuve y reçoit les oueds du Niorde, de Ghorfa et les deux Gorgol, et décrit de nombreux méandres.

La pente est extrêmement faible et passe de 0,07 ‰ à Bakel à 0,03 ‰ entre Bakel et Boghé ; vers Podor, elle n'est plus que de 0,006 ‰ et se réduit dans le delta à 0,001 ‰.

La largeur se modifie constamment dans la vallée ; jusqu'à Matam, elle varie de 250 à 750 m, entre Boghé et Podor de 150 à 200 m ; à Dagana elle passe à 700 m et reste constante dans tout le delta.

Ce dernier est composé de plusieurs marigots dont les principaux sont le Gorom et le Lampsar.

Le relief est très compartimenté comme le montre la figure n° 7.

La station de Dagana donne les principales caractéristiques et l'hypsométrie du bassin.

Le Sénégal à Dagana

268 000 km² soit 92,4 % du bassin

Ip = 0,020

IG = 0,31 m/km

hypsométrie (figure n° 8) :

entre	3 -	100 m	24,9 %
	100 -	200 m	19,1 %
	200 -	400 m	42,2 %
	400 -	600 m	8,2 %
	600 -	800 m	4,1 %
	800 -	1 000 m	1,3 %
	1 000 -	1 200 m	0,2 %
	1 200 -	1 330 m	0,0 %

La densité de drainage totale est de 0,006.

De l'amont vers l'aval, les altitudes dans le bassin du Sénégal décroissent, de même que les indices de pente.

Dans le Haut-Bassin, à l'amont de Bakel, le tracé des différentes rivières est irrégulier. Les profils en travers varient constamment et les profils en long sont entrecoupés de seuils, de chutes et de rapides ; ces seuils sont des niveaux durs constitués d'intrusions granitiques et doléritiques. Leur existence témoigne de l'infirmité du creusement linéaire.

Du reste, les cours supérieurs des principaux affluents, le lit mineur, le
dans

lit majeur et le champ d'inondation sont souvent confondus, les rivières s'écoulant quelquefois dans des gorges dans la région montagneuse du Fouta-Djalou.

Mais le système des fortes pentes, en accélérant les vitesses d'écoulement des eaux vers les drains principaux, et les densités de drainage plus élevées, font que le Haut-Bassin présente les conditions les plus favorables pour le déclenchement rapide des crues.

Le chevelu hydrographique, le tracé des différents affluents permet une coaliscence des flots, avant la station de Bakel. Cette dernière, par sa situation, contrôle tout le bassin-versant supérieur. L'hydrogramme combine un maximum unique qui se propage vers l'aval, suivi d'une descente lente des eaux.

Dans le cours inférieur, à l'aval de Bakel, les pentes plus faibles et les profils plus réguliers témoignent de l'efficacité de l'érosion hydrique. Mais la faiblesse des pentes et l'étalement des eaux dans un vaste champ d'inondation retardent la propagation des eaux et les débits maximum de crue tendent à s'aplatir.

Dans cette région du bassin, les pertes importantes par évaporation ou par infiltration réduisent les débits de basses eaux à quelques dizaines de mètres cubes par seconde aux mois de Mai et Juin.

C'est dans cette région que la lithologie, dont le rôle est fondamental pour l'hydrologie, prend une importance capitale.

CHAPITRE IV

LES FACTEURS LITHOLOGIQUES

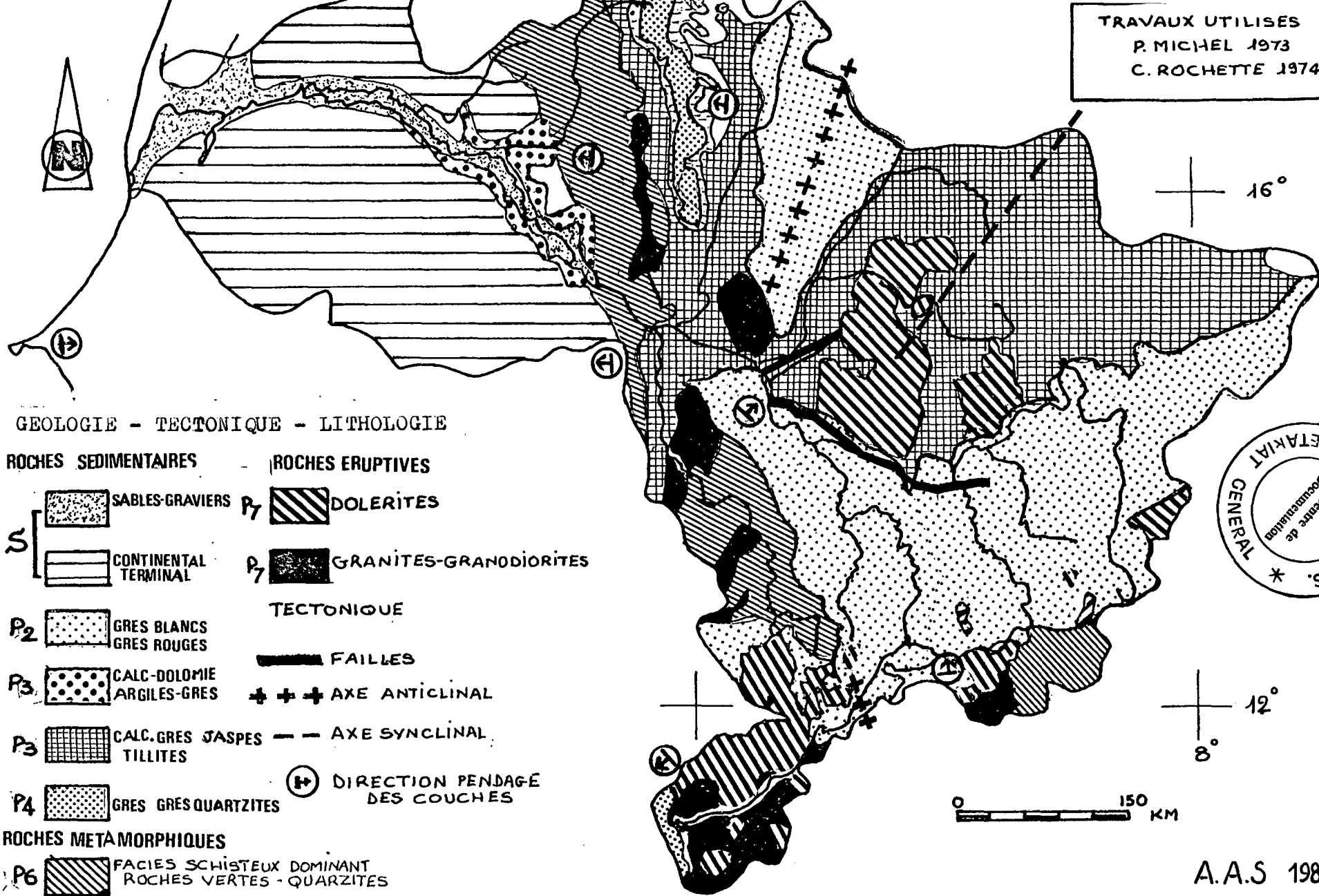
Le rôle joué par les nappes dans le soutien des débits de basses eaux en général et des étiages en particulier n'est pas à négliger. L'hydrologie continentale intègre les facteurs lithologiques, de par la capacité des terrains à la rétention de l'eau par infiltration et à la constitution de nappes souterraines, qu'il ne faut pas confondre avec l'eau retenue par les niveaux superficiels des sols. Ces deux types de drainage superficiel ou profond peuvent influencer sur certains caractères de l'écoulement (par exemple, entre autres, sur les formes des courbes de tarissement).

H. HUBERT, dès 1921, fait un premier bilan des eaux souterraines du Sénégal occidental. De nombreux travaux, dans certaines parties du bassin, ont été menés par la suite par des services spécialisés : Mines et Géologie - B.R.G.M. (1). Mais ces études ne couvrent pas la totalité du bassin, de sorte que si les nappes de la partie Nord de l'Etat du Sénégal et du Sud-ouest de la Mauritanie sont connues, nous n'avons aucune indication précise concernant les autres parties du bassin. Les cartes géologiques du bassin (notamment celle de C. ROCHETTE, 1974), les travaux géologiques et géomorphologiques de P. ELOUARD (1962), J.P. BASSOT (1966) et de P. MICHEL (1973) nous ont permis de faire une carte géologique simplifiée du bassin (carte n° 4) sur laquelle nous avons établi une échelle de perméabilité des séries en place (carte n° 6). Elle a été réalisée grâce à la classification hydrogéologique des grands ensembles du bassin en appliquant la méthode de l'O.R.S.T.O.M. (2) (P. DUBREUIL et J. GUISCAFRE 1971). Cette classification a été partiellement revue par J.F. ZUMSTEIN, ingénieur hydrologue de l'Agence des Bassins Rhin-Meuse.

(1) B.R.G.M. : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

(2) O.R.S.T.O.M. : Office de Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-Mer.

TRAVAUX UTILISÉS
 P. MICHEL 1973
 C. ROCHETTE 1974



GEOLOGIE - TECTONIQUE - LITHOLOGIE

ROCHES SEDIMENTAIRES

- S { SABLES-GRAVIERS
- CONTINENTAL TERMINAL
- P₂ GRES BLANCS
GRES ROUGES
- P₃ CALC-DOLOMIE
ARGILES-GRES
- P₃ CALC. GRES JASPES
TILLITES
- P₄ GRES GRES QUARTZITES

ROCHES ERUPTIVES

- P₇ DOLERITES
- P₇ GRANITES-GRANDIORITES

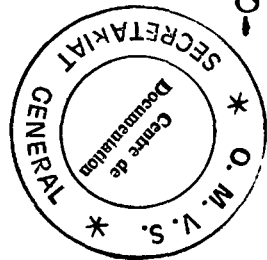
TECTONIQUE

- FAILLES
- AXE ANTICLINAL
- AXE SYNCLINAL
- DIRECTION PENDAGE
DES COUCHES

ROCHES METAMORPHIQUES

- P₆ FACIES SCHISTEUX DOMINANT
ROCHES VERTES - QUARTZITES

P₅: QUAND IL EXISTE EST FORME D'ARGILES ET DE MARNES



A.A.S 1984

Néanmoins il faut noter que cette classification se fonde sur la structure physique des roches et gagnerait à être vérifiée par des mesures de perméabilité au laboratoire ou sur le terrain. Pour nous, ce caractère qualitatif peut être complété par les informations sur le degré d'altération des roches que nous donne P. MICHEL (1973). D'autre part, les indications de C. ROCHETTE sur l'hydrogéologie générale du bassin et les travaux de l'O.M.V.S. (1) (1977) nous ont permis en plus de dégager les caractéristiques lithologiques et de faire l'inventaire des nappes du bassin notamment en son cours inférieur.

LES ZONES DE PERMEABILITE ET LES SYSTEMES AQUIFERES

L'échelle de perméabilité retenue permet de ranger les séries en sept grandes formations caractéristiques désignées de P1 à P7 (carte n° 6) et en plus deux grandes classes d'alluvions :

* P1 désigne les roches à perméabilité d'interstices qu'on retrouve dans les sables, les grès, et pour lesquelles l'hydrogéologie des rivières drainées recèle des nappes très profondes ;

- P2 désigne les mêmes familles de roches que P1, cependant les rivières y drainent les nappes en général ;

- P3 désigne l'alternance des roches perméables et imperméables ; grès argileux, calcaires argileux sur plusieurs mètres. Les débits sont ici souvent plus faibles qu'en P2 ;

- P4 désigne hydrogéologiquement les roches à circulation de fissures du genre de calcaires fissurés par exemple ;

- P5 regroupe les roches imperméables telles les argiles, les marnes ;

(1) O.M.V.S. : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal.
3 états : le Mali, la Mauritanie, le Sénégal.

- P6 désigne le groupe de roches cristallines ou cristallophylliennes susceptibles de renfermer des niveaux aquifères ;
- P7 forme le groupe de roches recristallisées, totalement imperméables (quartzites, calcaires cristallins ...).

Les deux classes d'alluvions sont désignées par :

- S1 constituée de sables et graviers très perméables et où la partie argileuse est pratiquement inexistante ;
- et S2 la classe constituée par des alluvions dans lesquels la partie argileuse devient plus importante.

L'analyse combinée de la carte géologique (carte n° 4) et de l'échelle de perméabilité permet de distinguer, pour le bassin du Sénégal :

- un Haut-Bassin avec des terrains allant de P2 / P3 à P7, constitués de roches métamorphiques et éruptives ;
- et un Cours Inférieur, la Vallée, où dominent les séries sédimentaires, parmi lesquelles les sables occupent de vastes étendues (carte n° 6) ; C'est aussi dans cette partie que l'on retrouve la famille des alluvions " S ".

On retiendra pour l'ensemble du bassin la dualité entre le Haut-Bassin peu favorable à la constitution de nappes et le Cours Inférieur qui comporte d'importants systèmes aquifères.

1. Le Haut-Bassin imperméable

Cette région du socle et de ses couvertures paléozoïques est constituée par des formations anciennes où les roches mères les mieux représentées sont les grès, les quartzites, le faciès schisteux et pélitique, les roches vertes et quelques formations granitiques ou doléritiques.

Leur degré d'altération, fissures des séries de granite, diaclases des

schistes et des grès, érosion des dolérites et des grès crée des conditions d'infiltration favorables et peut en faire de bonnes roches " magasins " (exemple : l'érosion des dolérites et des grès qui constituent des cônes d'éboulis dans la région de Kédougou).

Des reliefs cuirassés peuvent laisser l'eau s'infiltrer et constituer des nappes de faible profondeur.

Il ne manque donc pas de conditions favorables à la naissance d'un écoulement souterrain à faible profondeur. Du reste, les populations locales du Plateau Mandingue s'approvisionnent bien en eau de pluie mais exploitent aussi des puits, d'où l'existence de nappes.

Mais aucune étude d'ensemble ne signale l'existence de nappes importantes dans le Haut-Bassin.

P. MICHEL étudie en 1973 les vitesses de tarissement des rivières du Haut-Bassin. Il signale leur grande variabilité, mais dans l'ensemble assez rapides. Pour cet auteur, des retenues existent mais " au niveau superficiel d'altération et de colluvionnement, ou dans les alluvions des lits majeurs des cours d'eau ". Les seuils barrant les rivières peuvent donner naissance à de petites nappes. Mais même si les critères ci-dessus évoqués ne témoignent pas de l'absence de retenues dans le Haut-Bassin, du moins témoignent-ils de leur faible importance.

C. ROCHETTE (1974) tranche le débat en affirmant que " du point de vue de leur capacité de rétention en eau, toutes les formations du Haut-Bassin doivent être considérées comme imperméables ".

*

* * *

Nous nuancerons quant à nous notre conclusion pour cette partie du bassin en considérant que le socle et ses couvertures dans le Haut-Bassin sont imperméables dans l'ensemble mais peuvent entretenir des nappes peu importantes et très localisées.

2. Les nappes de la Vallée (Cours Inférieur)

Les conditions sont favorables dans cette région d'âge Secondaire et Tertiaire. Les principaux sédiments sont argileux ou gréseux. On y trouve des sables, des calcaires de l'Eocène, des limons, des formations localement recouvertes d'un manteau sableux, mais qui contiennent des systèmes aquifères plus ou moins étendus.

Ces systèmes ont été tous étudiés par différents auteurs, entre autres P. ELOUARD, J. DEPAGUE et H. MOUSSU (1967). A l'appui de notre étude, nous reprenons leur figure (n° 9) que nous avons simplifiée afin de mieux ressortir leurs caractéristiques. L'O.M.V.S., dans son Rapport Technique n° 1 (1977), complète nos informations en donnant la transmissivité de ces nappes et leurs débits spécifiques au niveau des forages.

Ces nappes sont au nombre de six pour le Cours Inférieur : la nappe du Brakna, de l'Amechtil, du Trarza, la nappe du Maestrichien, la (ou les) nappe alluviale, et la nappe du Ferlo (Fig. n° 9).

a) La nappe du Brakna

Elle se trouve dans les sables et grès tendres de la partie la plus orientale du faciès littoral du Lutécien (Eocène moyen). Ces grès et sables s'étendent sur la rive droite de la vallée à partir des affleurements du substratum en aval de Bakel jusqu'à 25 km à l'aval de Kaédi.

Elle est à surface libre avec une altitude supérieure à Q_m dans la partie orientale, mais s'abaisse à -10_m près de la limite occidentale.

La nappe du Brakna présente une transmissibilité d'environ $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une puissance encore mal connue. Les débits spécifiques des forages mesurés sont de l'ordre de 2 à 6 l/s/m de rabattement. Cette nappe du Brakna est alimentée par le ruissellement sur les schistes et les quartzites de la série M'Bout.

b) La nappe de l'Amechtil

Elle est contenue dans des grès et des dolomies du Lutécien et dans des formations argilo-calcaires. Elle fait suite à celle du Brakna vers l'Ouest mais recouverte par les grès argileux du Continental Terminal et les niveaux peuvent varier jusqu'à - 30_m au Nord-ouest de Boghé. Sa transmissivité selon l'O.M.V.S. est estimée entre 1 et $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$ avec des débits spécifiques des forages se trouvant aux environs de 1,5 l/s/m de rabattement. Cette nappe est captive.

c) La nappe du Trarza

Elle occupe la partie la plus occidentale dans le Nord du Bassin du Sénégal. Elle est très étendue et est largement exploitée pour l'élevage. Les grès argileux du Continental Terminal servent de roches "magasins", mais selon P. ELOUARD, "l'eau peut-être quelquefois retenue par un sable intercalé dans les grès argileux".

La nappe du Trarza est doublement alimentée par les crues du fleuve mais aussi par un ruissellement sur le substratum primaire. La transmissivité au Nord du lac R'Kiz serait de l'ordre de 3 à $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$ et de $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$ à Podor.

Au Nord le niveau piézométrique est à -10 m mais se trouve à 0 m I.G.N. aux abords de la vallée et descend vers le Nord-ouest avec une pente de 0,1 %.

Ces trois systèmes aquifères sont communément appelés dans la région nappes du Guebla Mauritanien.

d) La nappe du Ferlo

C'est R. DEGALLIER (1962) qui étudie cette importante nappe des dépôts gréseux du Continental Terminal passant dans les couches de marnes et calcaires éocènes vers l'Ouest. Elle se trouve dans le Ferlo (figure n° 9) et les niveaux selon les endroits peuvent être de - 10, - 20, - 40 m. On

admet une transmissivité moyenne de $3. 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. La nappe est essentiellement alimentée en ses bordures par les crues du fleuve car le climat actuel ne favorise pas un apport d'eau de pluie. La nappe se serait constituée au cours du Quaternaire durant des périodes à pluviométrie plus importante qu'actuellement.

e) La nappe du Maestrichien

Elle est sous-jacente à la nappe du Brakna, avec laquelle elle forme un système hydraulique unique avec le même niveau piézométrique : 0.5 m I.G.N. aux bords de la vallée et pouvant descendre vers le Nord avec une pente de 1 ‰. Elle est contenue dans les sables du Maestrichien (Crétacé Supérieur) en contact direct avec les alluvions de la vallée.

Elle est déjà exploitée et commence à 50 km en aval de Bakel avec une épaisseur moyenne de 400 m.

Elle serait alimentée par les nappes alluviales encore qu'on ait peu de données quant à ces échanges.

La transmissivité a une valeur moyenne de $1. 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Les niveaux piézométriques descendent à plus de 9 m I.G.N. à 60 km en aval de Bakel jusqu'à + 1 m I.G.N. à Nianga. Les débits spécifiques des forages varient entre 0,5 et 5 l/m/s de rabattement.

f) La nappe alluviale

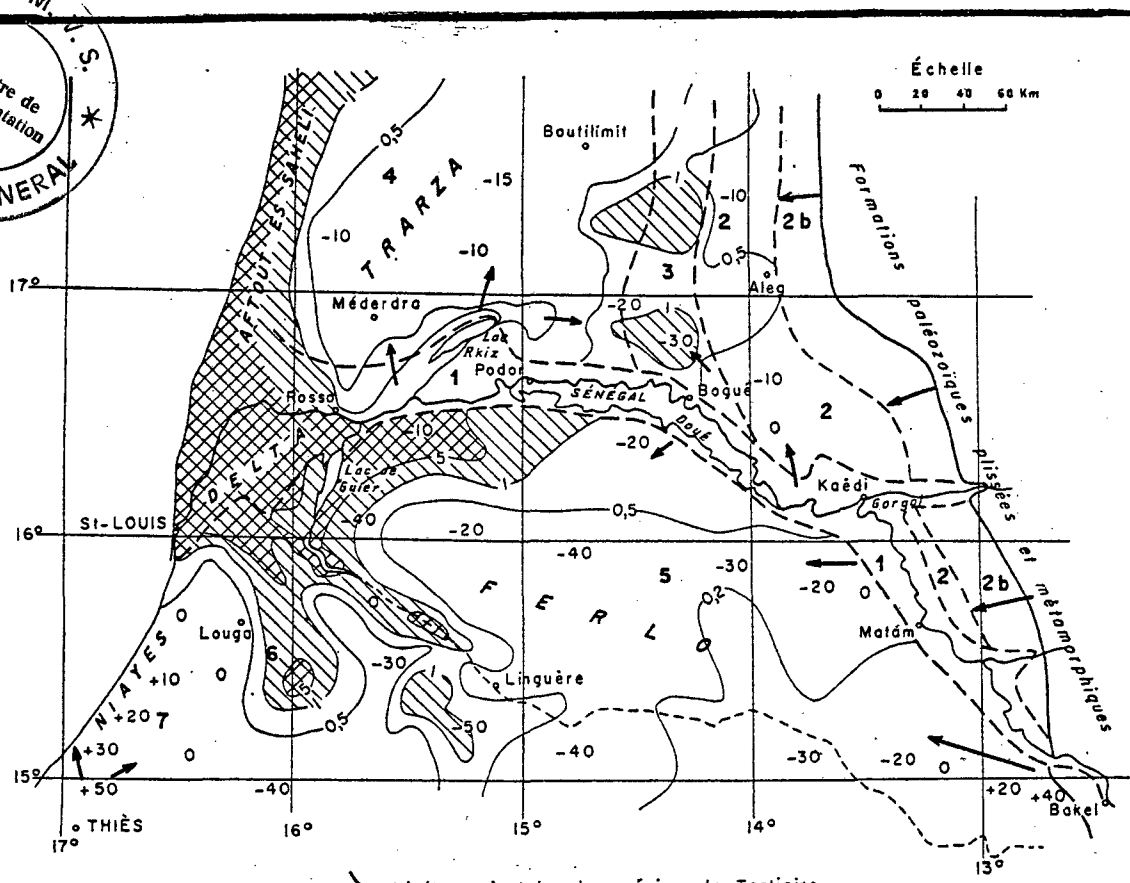
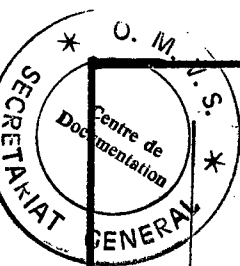
C'est un aquifère des alluvions quaternaires de la vallée avec des sables moyens, grossiers, graveleux reposant sur un substratum en général maestrichien ou éocène.

L'eau se trouve au dessus, dans des horizons de nature diverse : sables ou limons plus ou moins argileux. C'est ce qui nous amène à parler de " nappes alluviales ".

Leur transmissivité serait de l'ordre de $7. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. L'étude piézométrique faite par l'O.M.V.S. montre que les nappes alluviales, alternativement,

sont alimentées et drainées par le fleuve à 500 m près de celui-ci, elles sont drainées par les terrains encaissants en bordure de la vallée, et se perdent par évaporation ou évapotranspiration au delà de cette limite.

Cette nappe (ou ces nappes alluviales) est alimentée par l'infiltration des eaux de crue, évaluée à $250 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ et par les eaux de pluie pour une valeur de l'ordre de $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (ces estimations sont de l'O.M.V.S.). La profondeur piézométrique décroît d'amont vers l'aval de 5 à 8 m en amont (la Haute Vallée) à 4 à 5 m dans la Basse Vallée.



- Limite orientale des séries du Tertiaire
- | | |
|---|---|
| <p>Principales nappes</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Infero-flux du fleuve Sénégal 2 Nappe du Brakna 2b Biseau sec 3 Réseau aquifère de l'Amechtil 4 Nappe du Trarza 5 Nappe du Ferlo 6 Région à deux niveaux aquifères 7 Nappe des niayes --- Limite des zones aquifères | <p>Salure des nappes</p> <ul style="list-style-type: none"> — Courbe d'égal résidu sec en g/l Type chlorure sodique: ▨ 1 à 5 g/l ▩ Plus de 5 g/l <p>Niveau des nappes</p> <ul style="list-style-type: none"> +50 à -50 Cotes piézométriques → Alimentation des aquifères |
|---|---|

Fig. 9. — Les nappes phréatiques du Sud-Ouest de la Mauritanie et du Sénégal septentrional, d'après P. ELOUARD (1959), H. PALOC (1962), J. DEPAGNE et H. MOUSSU (1967).

Cette étude qui confirme aussi la dualité entre le Haut-Bassin et la Vallée montre les possibilités de rétention souterraine de ces deux régions mais aussi donne une idée quantitative de ces retenues.

Cependant, le Cours Inférieur du Sénégal, notamment la Basse-Vallée, est confronté à un phénomène d'intrusion de l'eau salée.

Dès que le débit du fleuve est inférieur à $600 \text{ m}^3/\text{s}$, une opposition entre le débit du fleuve et la poussée des eaux océaniques s'installe au détriment du fleuve.

Nous donnons les distances de remontée des eaux marines dans le fleuve en fonction de la décrue, données que nous empruntons à C. ROCHETTE (1974).

Débits en m^3/s	Distances en km de l'embouchure
500	37
400	45
300	58
200	75
150	90
100	115
50	140

La pénétration est donc fonction du temps écoulé entre le moment où le débit est descendu au dessous de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ et le démarrage de la nouvelle crue. En année très sèche, la remontée de la mer peut atteindre 200 km de pénétration comme se fut le cas en 1973 où la remontée avait atteint 230 km de l'embouchure. Mais ce phénomène fait l'objet d'une thèse de A. KANE au Laboratoire de Géographie Physique de Nancy. Nous renvoyons à ce travail qui devrait être publié en 1984.

Cette étude montre l'importance des systèmes aquifères du Cours Inférieur du bassin. Cette région s'oppose au Haut-Bassin qui est imperméable dans l'ensemble, en tout cas, très peu pourvu en retenues.

Cependant, nous n'avons aucune données sur les échanges entre le fleuve et sa nappe alluviale notamment. Mais il faut surtout noter que l'intense évaporation dans le Cours Inférieur diminue considérablement et les débits du fleuve et ceux des nappes qui ne recèlent pratiquement plus rien à partir du mois de février (ce qui favorise la remontée des eaux océaniques).

Néanmoins, la grandeur du bassin (290 000 km²) et surtout la dualité entre le Haut-Bassin et le Cours Inférieur permettent de penser que la compensation entre les apports et les pertes se réalise.

Enfin, il faut noter aussi que la nature des terrains tout en conditionnant la perméabilité des zones concernées détermine aussi les types de sols et les possibilités d'installation du couvert végétal.

CHAPITRE V

LES FACTEURS PEDOLOGIQUES
ET BIOGEOGRAPHIQUES

Les sols et la végétation constituent des facteurs importants de l'écoulement.

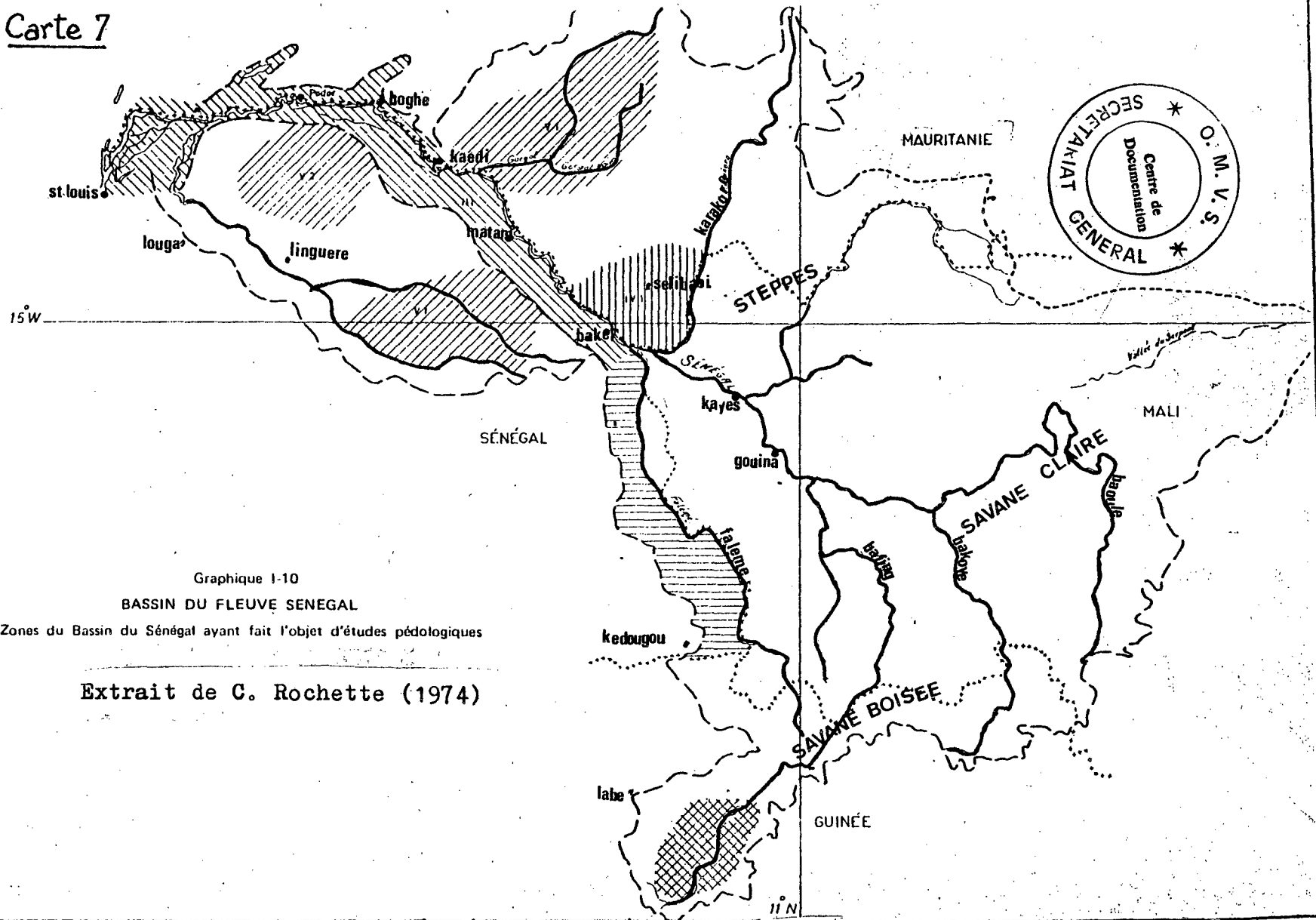
Des études pédologiques sur le bassin du Sénégal existent mais ne couvrent pas tout le bassin, et encore intéressent-elles pour une bonne partie, le territoire sénégalais du bassin, couvert par des cartes pédologiques au 200 000 e.

Les travaux de S.P. BARRETO et VAN ES (1962), ceux de J. MAYMARD (1967) permettent de faire un inventaire très précis des sols des hauts-bassins du Bafing et de la Falémé, de la région de Tambacouda-Bakel et du Ferlo. Les sols de la vallée du Sénégal et de quelques régions au Nord du territoire sénégalais ont aussi fait l'objet de travaux. Du reste, S.P. BARRETO a fait une " économie " de ses travaux et des cartes pédologiques en une étude reproduite dans la " Monographie du Sénégal " de l'O.R.S.T.O.M. (1974). Mais dans l'ensemble les études pédologiques restent très localisées dans le bassin (carte n° 7). C'est donc en intégrant le matériel originel (les roches-mères) et les ouvrages généraux de A. HUETZ DE LEMPS (1970) et J. DEMANGEOT (1984) en plus des notes pédologiques que nous essayerons de recenser les grandes familles des sols du bassin, sans toutefois entrer dans les multiples subdivisions.

En revanche, pour les formations végétales, l'analyse procédera de leur zonalité, car la couverture végétale malgré les multiples conditions qui déterminent son installation, correspond aux zones climatiques. Localement, nous donnerons les formations des reliefs particuliers et les noms locaux de certaines espèces.

C'est aussi dans ce chapitre que nous étudierons un phénomène très étendu

Carte 7



Graphique I-10
BASSIN DU FLEUVE SENEGAL
Zones du Bassin du Sénégal ayant fait l'objet d'études pédologiques
Extrait de C. Rochette (1974)

C'est nous qui reportons la végétation

dans le bassin (et dans le domaine tropical d'une manière générale) : le cuirassement. C'est certes un héritage du passé, mais la cuirasse étant souvent stérile et pouvant être perméable (chapitre IV), elle apparaît plus pour nous comme un facteur pédologique, d'autant plus qu'elle évolue comme un sol.

Enfin, malgré les nuances climatiques, on différencie bien dans le bassin trois grands domaines climatiques : les domaines sahélien, soudanien et guinéen. Si pour les deux premiers nous nous accordons avec l'appellation de domaine, la principale caractéristique du dernier domaine cité est le relief qui favorise une pluviométrie supérieure à 1 500 mm d'eau par année d'où une végétation plus fournie, une humidité relative plus importante etc ...

Ce facteur local est-il suffisant pour parler de " domaine " ? Nous reviendrons sur la nuance à apporter dans la réponse à cette question. Pour ce chapitre nous retenons les trois domaines cités. Les formations végétales et les sols typiques de ces domaines seront zonaux. Les facteurs locaux qui favorisent des types spécifiques de sols ou de végétation ne manquent pas : ces types seront intrazonaux.

A/ L'ETUDE DES SOLS DU BASSIN

Trois grandes familles de sols occupent le Bassin du Sénégal : les sols subarides, les sols ferrugineux tropicaux et les sols ferralitiques. Ils constituent les sols zonaux du bassin à côté desquels les vertisols et les sols hydromorphes et halomorphes constituent les types intrazonaux.

1. Les sols subarides

Ils se développent sur un matériel sableux ou sablo-argileux ou sur quelques affleurements de roches calcaires ou sur des marnes de la zone sahélienne.

On y distingue deux grands sous-types :

- les sols bruns de 100 à 150 cm d'épaisseur, de coloration foncée et sous forme de teintes brunes (d'où leur nom) ;
- et les sols brun-rouges ayant une évolution plus poussée et atteignant 2 m d'épaisseur.

La coloration vient de l'absence de matière organique en profondeur (et pour cause la pauvreté de la végétation sahélienne) et d'une faible concentration en fer.

Dans le bassin, les sols bruns s'étendent entre Longa et Linguère et en amont de Kaédi. Les brun-rouges se trouvent sur les régions de dunes et sur les pentes bien drainées au Nord du bassin (carte n° 7).

D'une manière générale, ils se répartissent localement et souvent par taches selon les milieux du domaine sahélien, favorables à leur développement.

Ainsi on peut conclure avec P. AUDRY (1962) que " la répartition relative des sols bruns et des sols brun-rouges ne présente pas de zonalité et dépend du drainage du modelé et du matériau ".

2. Les sols ferrugineux tropicaux

Ils se développent sur les matériaux neutres ou acides, sableux ou sablo-argileux du domaine soudanien (S.P. BARRETO, 1974).

C'est du reste le comportement de cette argile qui permet de distinguer les deux groupes principaux :

- les sols ferrugineux non lessivés à argiles stables, des matériaux sableux et très bien drainés qui se développent largement au Sud-est de Sélibabi. On les rencontre aussi dans le cours inférieur du Sénégal entre Longa et la vallée du fleuve.

Au Sénégal (état), ils ont donné les sols dior, terres à arachides, ce qui explique leur dégradation par une mise en valeur intensive.;

- les sols ferrugineux lessivés : ils se développent dans la zone soudanienne entre 750 et 1 200 mm de pluie par an. Dans ce type les argiles migrent en profondeur en raison du lessivage.

Les sols ferrugineux se caractérisent surtout par la présence du fer et du manganèse. Le fer entraîne la coloration et son lessivage, ou celui du manganèse (plus important dans le deuxième sous-type) donne un autre sous-type, les sols beiges (sans accumulation de fer), d'où des teintes ocres ou beiges.

3. Les sols ferralitiques

Ils se développent sur des matériaux divers, ayant subi une altération poussée de type latéritique.

Ces sols seront d'autant plus rouges et plus argileux que la roche-mère est basique. Ils contiennent des oxydes de fer, des hydroxydes d'alumine et atteignent 250 à 300 cm d'épaisseur. Leurs conditions de développement font qu'on les trouve en domaine guinéen sur les hauteurs du Fouta-Djalou, près de la source du Bafing et dans la région du plateau de Dalaba. D'après la nouvelle classification de G. AUBERT et P. SEGALIEN (1966), on y distingue trois sous-classes : les sols ferralitiques faiblement désaturés, les moyennement et les fortement désaturés.

Bien que la carte n° 7 ne donne que les secteurs où des études pédologiques ont été faites et pour lesquels nous avons donné leur localisation dans le bassin, les conditions de développement, surtout les roches mères, nous permettent de retenir que les sols subarides se rencontrent en domaine sahélien, les sols ferrugineux se développent largement dans le vaste domaine soudanien du bassin et que les sols ferralitiques n'occupent que le domaine guinéen montagneux du bassin.

Cependant, la localisation des sols intrazonaux sera plus aisée car ne procède que de milieux particuliers.

4. Les sols intrazonaux

Ils se répartissent par taches et on distingue trois types.

a) Les vertisols

Anciennement appelés " argiles noires tropicales ", ils se développent sur des roches basiques mais surtout se trouvent sur des modelés particuliers : plateaux mal drainés, replats, bas de pentes ou dans des bas-fonds.

Ils colonisent les formations birrimiennes et paléozoïques du bassin de la Falémé et dans la région de Kédougou.

b) Les sols hydromorphes

Ces sols sont caractérisés par l'excès d'eau, d'où la présence de nappes ou d'une zone à engorgement temporaire. Ceci est facilité par le régime de pluie concentrée et sous forme d'averses.

Ces sols jalonnent la vallée du fleuve, de Bakel à Dagana, et les vallées de la Falémé et du Bafing.

c) Les sols halomorphes

Ils impliquent la nécessité de la présence de sel, au moins 0,2 % de sels sodiques. Ils occupent essentiellement le delta du Sénégal et gênent beaucoup la mise en valeur. Ailleurs on les retrouve dans le bassin de la Falémé, sur les grès et les schistes.

Tels sont les grands types de sols intrazonaux que l'on rencontre dans le bassin.

Cependant la grande caractéristique des sols et paysages du bassin est qu'ils peuvent être indurés, recouverts d'une épaisse cuirasse ferrugineuse, latéritique ou bauxitique.

5. Bref aperçu sur le cuirassement

Le cuirassement est le résultat de l'accumulation de fer et d'alumine sous forme de concrétion cimentée par le fer et l'alumine qui se compacte.

Le fer est lié à la latérite en milieu tropical, laquelle latérite est rouge et dure. Dans ce milieu, le cuirassement est l'aboutissement d'un processus global et complexe qui a marqué le Tertiaire et le Quaternaire. M. ROUGERIE (1959) dit que " la latérisation n'est pas la production de latérite mais une péjoration de l'altération chimique et du matériel rocheux ".

La cuirasse peut être riche en fer et alumine ou en argiles, sables et grès. Ainsi il existe plusieurs types de cuirasses et la cuirasse peut avoir trois types de faciès. Elle se comporte comme un sol, évolue comme un sol, d'où l'existence de cuirasse résiduelle ou d'accumulation absolue.

Le domaine de cuirassement est le domaine tropical à alternance de saison sèche et de saison pluvieuse avec une végétation de savane et un sol ferrugineux. Ces conditions expliquent la grande extension des cuirasses dans Le Bassin du Sénégal dans :

- les plateaux à manteau latéritique du Fouta-Djalon ;
- le plateau Mandingue et les sommets des massifs ;
- les glacis et les dépôts du Continental Terminal.

Toutes ces formes de relief sont cuirassées, on trouve même des lambeaux de cuirasse en domaine sahélien, d'où l'existence dans le passé de climats plus humides qu'actuellement.

*

* *

Nous n'avons donné que les grandes familles des sols zonaux et intrazonaux.

Elles se subdivisent en sous-classes en fonction de leur lessivage plus ou moins important, en fonction des minéraux particuliers qui dominent la texture et en fonction de l'épaisseur relative des différents horizons.

Il faut noter que dans les régions de transition entre domaine climatique, c'est souvent un type de sol qui passe à un autre type.

Cependant, le lessivage important et l'existence de cuirasses témoignent aussi de la faible protection des sols par la couverture végétale.

B/ LES FORMATIONS VEGETALES

La végétation joue un rôle fondamental. Elle a une action sur la décomposition des roches, elle nourrit les sols en matières organiques. Par sa densité, elle change l'aspect du paysage, protège les sols et change les conditions locales par la baisse de l'insolation et l'entretien d'une atmosphère humide. Au Nord du bassin du Sénégal, la végétation joue un rôle de brise-vent en arrêtant la déflation éolienne. Mais elle peut réduire l'écoulement par évapotranspiration ou en pompant l'eau dont elle a besoin, directement dans les nappes ou bien en interceptant la pluie par les feuilles. Ceci constitue une sorte de " manque à gagner " pour les rivières.

La deuxième partie de ce travail nous édifiera plus précisément sur son action, mais on peut dire que dans le Bassin du Sénégal, la physionomie de la végétation change, du Sud au Nord, pas brutalement mais par transition comme les zones climatiques.

Du Nord au Sud du bassin, les formations zonales sont les suivantes.

1. Les steppes sahéliennes

" Ce sont des formations ouvertes, herbeuses, mêlées de plantes ligneuses parmi lesquelles prédominent les épineux " (P. MICHEL, 1973).

Cette végétation claire est fonction des ressources locales en eaux,

elles-mêmes fonction de la topographie et du sol.

Dans le bassin, les steppes colonisent les surfaces dunaires, les ergs, les collines, les dépressions interdunaires inondées et ensablées, en somme le matériel sableux ou sablo-argileux du Trarza, du Brakna, les dunes du Karakoro, le plateau de l'Assaba et le Ferlo central et sablonneux.

Les acacia dominant parmi les arbres à épines et à petites feuilles : le gommier (acacia sénégale), l'acacia raddiana, le sourour (acacia seyal), le soump (balinites aegyptica). on peut rencontrer le baobab (adan-sonia digitata).

Les buissons sont constitués entre autres espèces de salanes (euphorbia balsamifera), de jujubiers (ziziphus mauritiana).

Le tapis herbacé est dominé par les panicum turgidum, aristida longiflora et le borreria raddiata ...

Les sources portent les espèces hygrophiles : la typhaie (typhea éléphantina), le tamarinier (tamarindus indica). Les dépressions inondées portent les gonakies (accacia nilotica), les vétivers (vetivera nigriflora).

Cette végétation doit souffrir une longue saison sèche et selon P. MICHEL, le taux moyen de couverture en saison sèche est de 75/80 %.

Dans les zones de transition vers le climat soudanien, on trouve des associations d'espèces déjà plus feuillues. Dans la région, le cram-cram (cenchrus biflorus) est considéré comme l'espèce herbacée type du Sahel. Avec le cram-cram commence le Sahel.

2. Les savanes soudaniennes

Le boisement est plus touffu.

La strate arbustive est dominée par les combrétacés : le kinkéliba (combrétum glutinosum), les bambous (oxinanthéra abyssinica) ... Sur les collines et plateaux, la strate herbeuse est dominée par les graminées : andropogon

gayanus ...

La végétation se présente en un boisement arboré ou arbustif et en un tapis continu de hautes herbes.

Au dessus se dressent les grands arbres parmi lesquels on trouve les espèces suivantes : le néré (*Parkia biglobosa*), le kapokier (*Bombax costatum*), le tamarinier (*Tamarindus indica*), le vén (*Pterocarpus érinaceus*), le caillédrot (*Khaya sénégaleensis*), le fromager (*Ceiba peutangra*), le baobab ...

La végétation ligneuse colonise les plateaux cuirassés, les terrains de grès argileux du Continental Terminal et le Plateau Mandingue.

Les collines, les pentes, les replats sont peuplés d'îlots forestiers denses.

Les espèces restent variées mais la végétation reste en étroite liaison avec la topographie et la nature des terrains. Au Sud du domaine soudanien, la végétation est plus dense, c'est la transition vers les montagnes du Fouta-Djalon.

3. Les forêts et savanes guinéennes

Le peuplement est différent des plaines et plateaux du Nord sahélien et du domaine soudanien.

La forêt de grands arbres couvre les reliefs. L'espèce la plus répandue est le parinari excelsa (le koura).

La strate secondaire est constituée par des savanes et des formations herbues.

Ici l'intervention de l'homme a fait que ce sont surtout les savanes d'origine édaphique ou anthropique qui se sont surtout étendues. De sorte que l'on devrait plutôt parler d'îlots forestiers, ou comme R. SCHNEL (1960) de reliques forestières : reliques de la région de Dalaba avec des rosacées,

le koura ; reliques qui présentent un tapis herbacé dominé par les peuplements de fougères genre bolbitris.

La région du Mali a des îlots forestiers de kôbi (carapa procéra) entre autres espèces.

Les vallées portent les espèces hygrophiles tandis que les versants portent les savanes.

Le plateau de Labé est complètement dénudé.

*

* *

Steppes, savanes et forêts sont les formations zonales du bassin qui correspondent respectivement au domaine sahélien, soudanien et guinéen.

Les steppes doivent souffrir la longue saison sèche, les savanes et les forêts comprenant des espèces utiles sont menacées par l'homme.

Localement, à la faveur d'un modelé ou d'une topographie spécifique, si ce n'est une région inondée, subsiste un peuplement végétal azonale.

4. La végétation azonale

a) Les terrains cuirassés

Ils portent un peuplement ligneux de combrétacées, des arbres tels que le syzygium guineense, des buissons et des arbustes, des graminées d'andropogon gayanus, des pelouses de lepturella aristata.

b) Les vallées alluviales

Elles sont occupées dans le Fouta-Djalon par des forêts galeries de palmiers,

de palmiers à huile (*éléais guinéensis*), de raphias (*raphia sudanica*), de rôniers (*borrassus flabellifer*) ...

Les berges des grandes rivières connaissent un riche peuplement d'arbres. Ainsi le lit majeur du Sénégal à l'aval de Bakel est bordé de gonakié, de kadd (*derbia albida*) ... Le delta du Sénégal est peuplé d'halophytes : *salsola baryosma*, *sporobolus spicatus* ou *robustus*, de *tamarix sénégaleensis*.

Les vasières sont occupées par la mangrove (*avicenia* ou *rizophora*) associée à des palétuviers.

Les dunes littorales à végétation clairsemée, avec des plantes à stolons, sont recouvertes d'espèces variées, appartenant cependant à la steppe : *sporobolus spicatus*, *mayténus sénégaleensis*, *parinari macrophylla* ...

Dans ces zones sahéliennes, le filao (*casuarina équisétifolia*) joue un rôle important de brise-vent, et les cocotiers (*cocos nucifera*) profitent bien des sables meubles de la Basse Vallée.

Dans l'ensemble du bassin, les espèces sont variées. Ces formations doivent souffrir la longueur de la saison sèche au Nord et partout l'action de l'homme qui se manifeste par la déforestation et les feux de brousse. Il en résulte que ce sont surtout les savanes qui se sont développées, boisées au Sud du bassin et devenant claires à clairsemées vers le Nord.

En domaine guinéen, le peuplement boisé réduit l'évaporation physique, mais il y prédomine une évapotranspiration élevée. Le couvert végétal change l'aspect du milieu mais gêne beaucoup l'érosion hydrique.

Plus au Nord, la couverture végétale discontinue favorise l'érosion hydrique, mais l'évaporation physique est élevée pour atteindre ses valeurs les plus élevées en domaine sahélien. En définitive, le rôle du couvert végétal (favorable ou non) doit être nuancé.

Cependant, son installation est liée aux conditions édaphiques mais aussi climatiques, notamment par les précipitations.

CHAPITRE VI

LA DIVERSITE CLIMATIQUE
DU BASSIN DU SENEGAL

" C'est le cadre climatique qui impose à travers précipitations et températures, les modalités de l'hydrologie fluviale ". (P. PAGNEY, 1980).

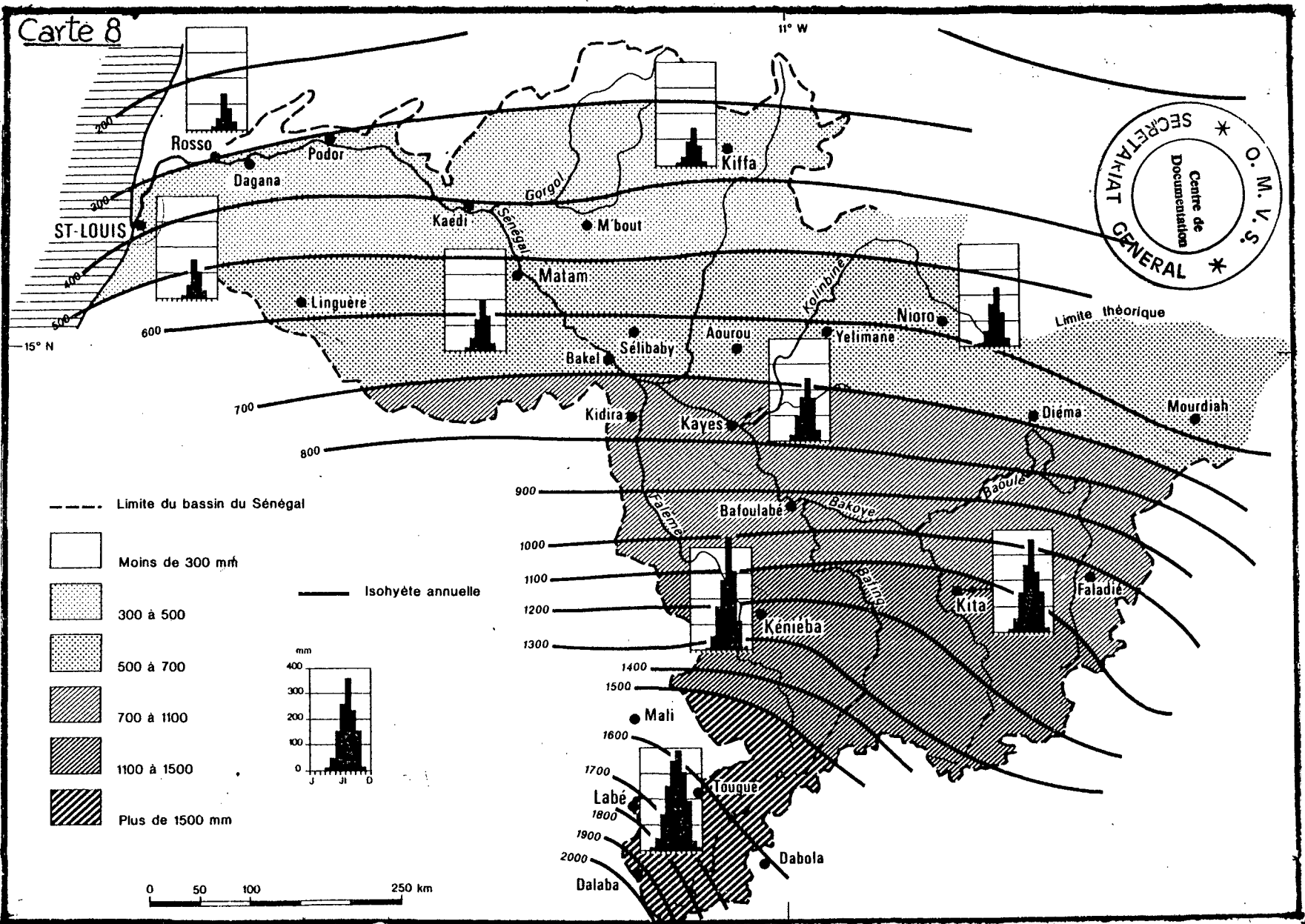
Le Bassin du fleuve Sénégal, par son étendue en latitude et en longitude (1), participe entièrement de la " région des basses latitudes chaudes et humides ". Cette région se situe dans un contexte thermique unitaire où " les cours d'eau enregistrent de telle variabilité à des degrés divers, du seul fait de leur alimentation exclusivement pluviale. Cela confère aux précipitations un rôle décisif pour expliquer les modalités de l'écoulement fluvial " (R. FRECAUT, 1974 et 1982).

Ainsi donc, de tous les facteurs qui prévalent à la définition et à la délimitation des climats, ce sont les précipitations et les températures que nous prendrons en compte dans ce chapitre, dans une optique hydrologique, à savoir la définition des régimes pluvio-thermiques pour l'estimation de la lame d'eau moyenne tombée dans le bassin.

Si nous avons pu dire que le fleuve Sénégal se situait loin derrière le Nil, le Congo, l'Amazone et même loin de son voisin le Niger par sa longueur, il n'en demeure pas moins que comme ces grands systèmes fluviaux, le fleuve Sénégal traverse plusieurs types de climats de sa source au Fouta-Djalon à l'embouchure à Saint Louis.

C'est donc par la délimitation climatique que nous commencerons notre étude : rappeler les domaines et régions climatiques du bassin-versant. Dans

(1) Rappel : le bassin s'étend entre 10°20' N et 17° N de latitude et est compris entre 7°20' et 12°20' de longitude Ouest.



BASSIN DU SENEGAL : Isohyetes moyennes annuelles (1931-1960)
d'après C. Rochette (1974)

ces domaines et régions, nous définirons les principales composantes de l'analyse pluviométrique après avoir au préalable critiqué toutes nos données pluviométriques et justifié la période d'étude choisie.

Les facteurs thermiques font l'objet d'une partie à eux seuls.

Enfin, nous ne risquons pas de nous tromper en évoquant déjà la grande variabilité interannuelle des modules pluviométriques qui atteignent à l'heure actuelle une forme extrême dans la péjoration : la sécheresse. C'est donc par l'analyse de ce phénomène que nous terminerons.

A/ LA DELIMITATION CLIMATIQUE

L'intérêt du découpage climatique pour notre étude appelle à la précision de la terminologie. Des appellations diverses données aux types de climat, certaines sont très courantes mais revêtent un sens particulier en fonction de l'optique dans laquelle la recherche est menée.

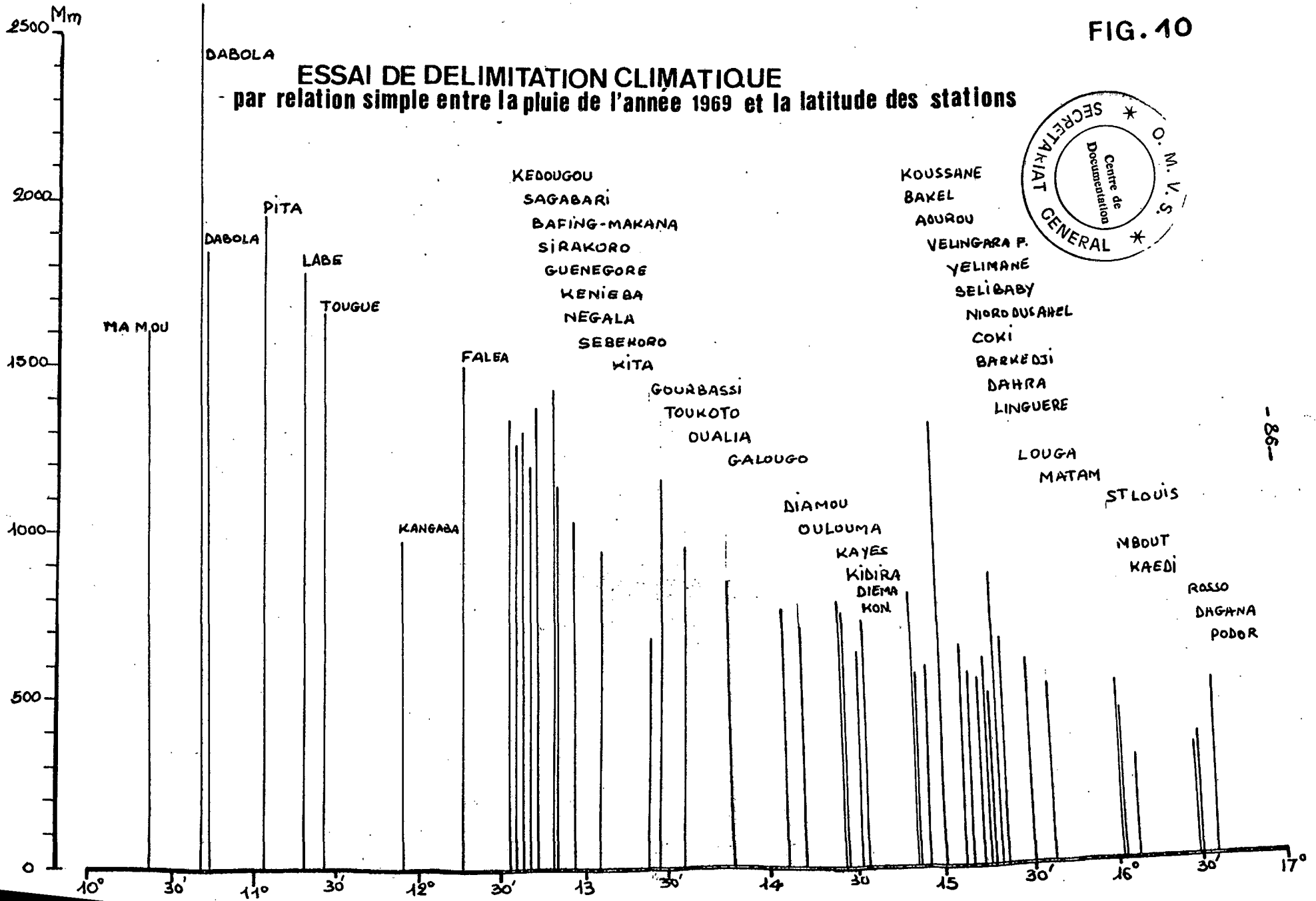
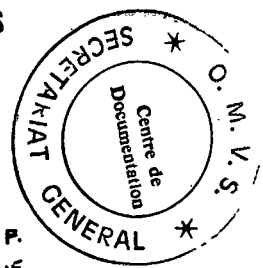
Le tracé des isohyètes interannuelles, présenté sur la carte n° 8 extrait de la carte des isohyètes de l'Afrique Occidentale sur la demande du C.I.A.E.H. (1) montre que :

- la pluie varie de 2 000 mm/an à l'extrémité méridionale du bassin (région du Fouta-Djalon) à 250 mm/an dans la bordure septentrionale ;
- on distingue une chute rapide des précipitations sur le rebord du Fouta-Djalon de 2 000 mm/an à 1 700 mm/an ;
- entre 2 000 mm/an et 1 600 mm/an, les isohyètes ont un tracé Sud-ouest - Nord-est et se redressent progressivement ;
- de 1 500 mm/an à 1 000 mm/an : à l'Ouest du bassin la décroissance est

(1) C.I.A.E.H. : Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques.

FIG. 10

ESSAI DE DELIMITATION CLIMATIQUE
 - par relation simple entre la pluie de l'année 1969 et la latitude des stations



régulière et le tracé parallèle, en revanche à l'Est du bassin les isohyètes ont tendance à replonger vers le Sud ;

- au delà de 1 000 mm/an, le tracé est relativement parallèle et la décroissance nettement plus régulière. L'espacement des isohyètes devient grand au delà de 800 mm/an et nettement plus grand entre 500 et 250 mm de pluie par an.

Ainsi, d'après cette carte, quatre styles pluviométriques se succèdent du Sud au Nord du bassin :

- 1) entre 2 000 mm/an et 1 500 mm/an ;
- 2) entre 1 500 mm/an et 1 100 mm/an ;
- 3) entre 1 100 mm/an et 700 mm/an ;
- 4) entre 700 mm/an et 300 mm/an.

Ces quatre styles pluviométriques des documents rencontrés et des chercheurs intéressés correspondent à trois domaines climatiques et prennent des appellations spécifiques. Nous donnons dans le tableau n° 2 suivant certaines dénominations et nous indiquons les noms que nous retenons dans notre étude.

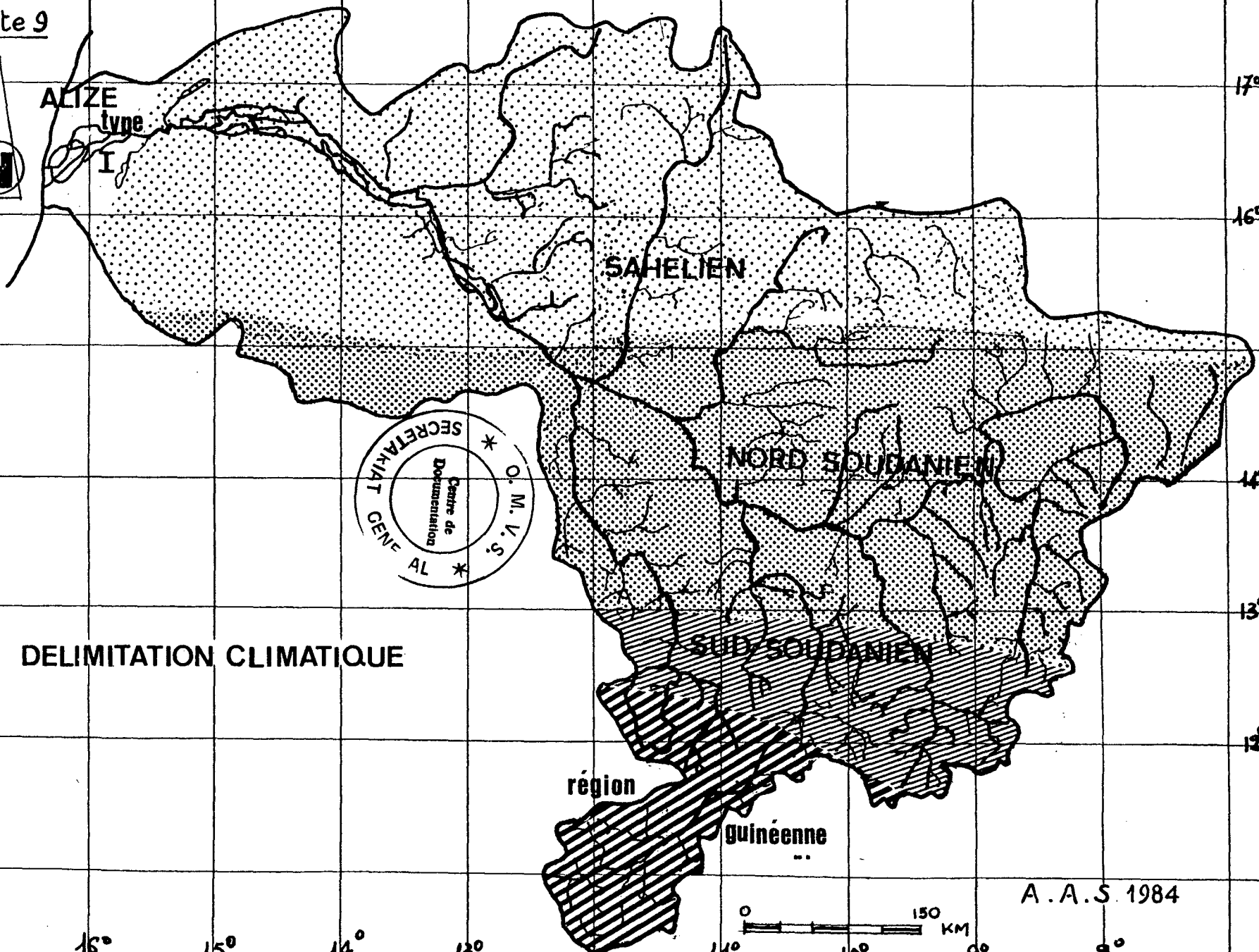
Tableau n° 2. Dénominations climatiques dans le Bassin du Sénégal.

O.R.S.T.O.M.	O.M.V.S.	M. LEROUX (1980) AMADOU A. SOW (1984)
Domaine tropical de transition	Région foutanienne	Région guinéenne
Domaine tropical pur	Région soudanienne	Domaine Sud-soudanien
		Domaine Nord-soudanien
Domaine sahélien	Région sahélienne	Domaine sahélien

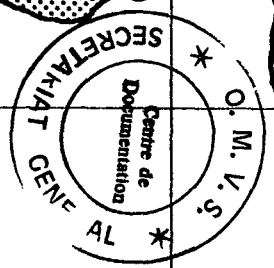
Carte 9



ALIZE
type
I

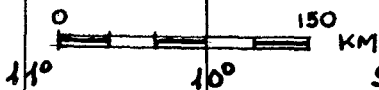


DELIMITATION CLIMATIQUE



région

Guinéenne



A. A. S. 1984

17° 16° 15° 14° 13° 11° 10° 9° 8°

17° 16° 14° 13° 12°

. Domaines et régions climatiques

" Le climat de l'Afrique Tropicale " de M. LEROUX (1980) constitue le travail le plus récent sur le climat de l'Afrique. Il définit les domaines et régions climatiques à partir des critères aérologiques, chorologiques et physiologiques intégrés.

Le découpage climatique de cet auteur procède des tonalités physiologiques résultantes que sont l'humidité relative, la température et la pluie. Nous avons adopté ce découpage pour le Bassin du Sénégal (carte n° 9).

L'étude de la relation entre la latitude et la pluie de l'année 1969 (année exceptionnellement pluvieuse pour les stations pluviométriques du bassin) confirme la diminution des précipitations du Sud du bassin vers le Nord. Mais encore la figure n° 10 fait ressortir quatre zones d'hauteur pluviométrique très différentes qui correspondent relativement au découpage proposé par M. LEROUX. Nous avons essayé de déterminer les relations entre la précipitation moyenne 1951 - 1980 et la latitude, la longitude et l'altitude des stations retenues, à partir d'une régression multiple.

L'étude associe à chaque paramètre un coefficient de corrélation partiel qui mesure le degré et la nature de la liaison qui existe entre chaque paramètre et la pluviométrie, autrement dit sous la forme du pourcentage de pluie expliqué par le dit paramètre dans le pourcentage total.

Ce travail, sur lequel nous reviendrons plus amplement, a été rendu aisé par l'utilisation de l'ordinateur.

Il ressort de cette étude après le dépouillement des matrices de corrélation multiple et partielle que la pluie moyenne 1951 - 1980 des stations retenues présente :

- une meilleure corrélation avec l'altitude pour les stations situées dans le Fouta-Djalon et ses contreforts immédiats Labé, Pita, Dalaba, Tougué, Faléa. Le coefficient de corrélation partiel est de 0,77. Nous avons aussi associé à ces stations d'autres stations situées à la même

latitude mais installées dans le bassin du Niger (chapitre VIII, fig. N° 29) ;

- dans le domaine Sud-soudanien, le meilleur coefficient de corrélation se trouve entre la pluie et la longitude : le coefficient de corrélation partiel est de 0,81 ;

- dans les domaines Nord-soudanien et sahélien, le meilleur coefficient de corrélation partiel se situe entre la pluie et la latitude : les coefficients sont respectivement - 0,92 et 0,82.

Nous précisons qu'il s'agit là des coefficients de corrélation partiels, c'est-à-dire la part de variance expliquée par chaque paramètre dans la variance totale qui est égale, elle, au coefficient de corrélation multiple.

Les résultats significatifs de cette régression sont tous donnés dans les tableaux n° 21 et 22 du chapitre VIII.

Nous n'avons retenus dans le modèle que la pluie comme paramètre à expliquer " car s'il convient de connaître les causes, ce sont précisément les effets qui fondent la délimitation climatique, car traduisant l'aboutissement des interférences entre les différents facteurs ... effets d'où transparaissent nécessairement les causes " (M. LEROUX, 1980, T. II). Or "la pluie est l'élément essentiel de différenciation des climats de l'Afrique tropicale " (R. ARLERY, H. GRISSOLET, B. GUILMET 1973).

La latitude et la longitude étant des mesures planétaires, si elles expliquent un style pluviométrique particulier, il ne peut l'être qu'à l'échelle d'un domaine pluviométrique, voire d'un domaine climatique. En revanche l'altitude étant un phénomène local, n'explique un style pluviométrique qu'à l'échelle plus restreinte d'une région pluviométrique.

Ainsi, à l'appui de la figure n° 10 et de la carte n° 13 sur laquelle nous représentons la pluie moyenne (série de référence) et les mois de début, du maximum et de la fin de la saison des pluies, nous retenons le découpage et les dénominations proposées par M. LEROUX à qui nous empruntons

ses tonalités résultantes (M. LEROUX, 1980).

Du Nord au Sud du bassin, nous retenons :

- 1) le domaine sahélien : $T^{\circ} \geq 30^{\circ}C$, $H.R \leq 40\%$, $P \text{ mm} < 500 \text{ mm/an}$ (1) ;
- 2) le domaine Nord-soudanien : $T^{\circ} \geq 27^{\circ}C$, $H.R \leq 50\% - 60\%$, $P \text{ mm} < 1\ 000 \text{ mm/an}$;
- 3) le domaine Sud-soudanien : $T^{\circ} \geq 27^{\circ}C$, $H.R \ 50 - 60\%$, $P \text{ mm} > 1\ 000 \text{ mm/an}$. Dans ce dernier domaine climatique, à la faveur du relief, se distinguent deux sous-régions correspondant :
 - aux contreforts et premiers plateaux du Fouta-Djalon ;
 - à la masse montagneuse du Fouta-Djalon en ses sommets les plus élevés. Ces deux sous-régions correspondent pour nous à :
- 4) la région guinéenne : $T^{\circ} \ 22 - 24^{\circ}C$, $H.R \geq 50 - 60\%$, $P \text{ mm} > 1\ 500 \text{ mm/an}$. Un cinquième domaine est mentionné sur la carte n° 9. Il s'agit :
- 5) du domaine de l'alizé maritime de type I (appellation de M. LEROUX).

Ce domaine n'est pas mentionné par les documents et travaux. Il se localise sur la frange maritime du bassin, mais il va du Nord-ouest de la Mauritanie jusqu'à Dakar (Sénégal).

Son originalité réside dans le fait qu'il est intéressé toute l'année par l'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores. Cet alizé vient de la face orientale de cette haute pression et aborde le littoral occidental de l'Afrique du Nord-ouest. Il est stable (stabilisé par la subsidence supérieure) et relativement humide (en raison de son trajet maritime). Il

(1) Avec T° pour température moyenne annuelle, $H.R$ pour humidité relative et $P \text{ mm}$ pour précipitation moyenne annuelle.

entretient une forte humidité relative entre 60 et 70 % en moyenne annuelle.

Cet alizé règne en permanence dans ces régions et leur donne un " cachet " particulier. Cet alizé maritime a été baptisé par M. LEROUX de type I pour le différencier du type II qu'il va devenir à la fin de son trajet, sur la face occidentale des Açores, mais alors façade orientale des continents tropicaux où, plus humide et plus chaud, il sera plus instable et donnera des précipitations.

Nous ne mentionnons ce domaine que pour mémoire, car par les totaux pluviométriques enregistrés, il intègre le domaine sahélien (exemple Saint Louis : 356 mm/an pour 60 années d'observation).

*

* *

Ainsi, le découpage retenu n'est pas fondamentalement différent des autres délimitations quand nous retenons l'esprit de la dénomination pour les mêmes caractéristiques pluviométriques. Cependant nous parlerons de Région Guinéenne plutôt que de domaine tropical de transition (qui confond, en un même nom : domaine Sud-soudanien et région guinéenne) ou de région Foutanienne. Cette dénomination " Région Guinéenne " a l'avantage de bien spécifier le facteur prépondérant car la Région Guinéenne du point de vue climatique n'est qu'une sous-classe d'une classe supérieure, le domaine Sud-soudanien. Ce domaine est très peu étendu dans notre bassin, mais il l'est largement vers l'Est de l'Afrique Occidentale.

Néanmoins, il n'en demeure pas moins qu'à l'échelle de l'Afrique Occidentale, le Bassin du Sénégal devient un cadre restreint, localisé. Au fur et à mesure que s'affirmeront ou l'océanité ou la continentalité, des nuances s'y dégageront. Nous associerons nos moyennes pluviométriques, dégagées de données récentes, à ces définitions climatiques générales et nous affinerons notre analyse.

B/ LA CRITIQUE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Elle a été faite par des méthodes statistiques que nous expliquons. Elle est d'autant plus nécessaire que nos données proviennent de sources diverses.

1. L'acquisition des données et le réseau de postes

L'acquisition n'a pas été facile du fait que le Bassin du Sénégal se partage entre quatre états, d'où quatre réseaux d'observations différents. Il s'agit des réseaux des pays suivants :

- la Guinée : le réseau du Service National de la Météorologie ;
- le Mali : le réseau du Service National de la Météorologie ;
- la Mauritanie et le Sénégal : le réseau des Services Météorologiques Nationaux.

Une partie des données pluviométriques depuis l'origine des stations jusqu'en 1965 a été recueillie de l'annuaire du C.I.A.E.H. pour le Mali, la Mauritanie et le Sénégal, pays pour lesquels nous avons complété les données de 1965 à 1978 à l'A.S.E.C.N.A. dont la direction pour l'Afrique de l'Ouest est installée à Dakar.

Pour la suite des données pour le Mali et la Mauritanie, nous avons dû contacter des services des pays intéressés par la poste, respectivement le C.I.L.S.S. (1) et le Service de la Météorologie pour la période 1978 - 1980. Pour le Sénégal, les données de 1978 à 1982 ont été complétées à partir de la banque de données du Département de Géographie de l'Université de Dakar. Pour l'ensemble des données pluviométriques de la République Populaire de Guinée, il nous a fallu contacter le Service National de la Météorologie par le biais de l'Ambassade de Guinée à Dakar, qui nous les a acheminées par la poste jusqu'à Nancy. Le tableau suivant donne les

(1) C.I.L.S.S. : Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel.

périodes, les organismes et le moyen d'acheminement des données.

Tableau n° 3. Origine des données pluviométriques d'analyse.

Réseau d'observation	Origines des Postes jusqu'en 1965	De 1965 à 1978	De 1978 à 1981 - 1982
Du Mali	Annuaire C.I.A.E.H. O.R.S.T.O.M. (Bondy) O.R.S.T.O.M. (Paris)	A.S.E.C.N.A. (Dakar)	C.I.L.S.S. (par la poste)
De la Mauritanie	-	-	Service mauritanien de la Météorologie (par la poste)
Du Sénégal	-	-	Département de Géographie (Dakar)
De la Guinée	Service National de la Météorologie par l'Ambassade de Guinée à Dakar (par la poste)		

On comprendra que ces origines diverses ne nous ont pas permis de visiter les stations d'observations pour avoir une idée de la manière dont la pluie est recueillie dans les réseaux du Mali, de la Mauritanie et de la Guinée :

- certains sites de stations restent encore inconnus par nous et ne figurent sur aucun document cartographique ;

- la station de Saint-Louis, par contre, connaît trois sites différents pour une même période d'observation sans indication sur les déplacements : St Louis Aéro, St Louis Ecole, St Louis Ville. Nous avons choisi le site

de St Louis Ville et les données doivent être considérées comme non-homogènes. Nous les prenons comme elles sont car St Louis a la série la plus longue et la plus intéressante ;

- la station de Yang-Yang est sans coordonnées géographiques. Même l'annuaire du C.I.A.E.H. ne les mentionne pas : c'est nous qui les calculons ;
- ces données pluviométriques souffrent de lacunes mensuelles et annuelles quant aux totaux pluviométriques enregistrés.

Nous avons noté que, systématiquement pour toutes les stations, aucune observation n'a été faite entre 1958 et 1960 (ou alors très peu), période de lutte et d'instabilité politique liée à l'accession à l'indépendance des quatre états du bassin.

La carte n° 10 donne l'état de l'équipement actuel du bassin. Il se compose de :

- 11 stations synoptiques (stations principales) ;
- 18 stations climatologiques (stations auxiliaires) ;
- 52 postes pluviométriques.

Soit un total de 81 stations dont 66 dans le bassin proprement dit et 15 stations aux alentours immédiats, utiles pour le tracé des isohyètes.

La carte n° 10 montre aussi l'inégale répartition des postes de mesures.

A l'extrême Nord du bassin ne subsiste que la station de Kiffa. De grandes régions du Nord-est du bassin sont dépourvues de stations, comme du reste les régions du Sud-est du bassin.

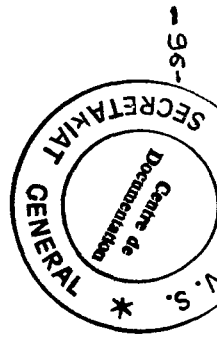
Dans l'ensemble, des îlots densément pourvus s'opposent à des étendues " désertes ". Or l'ensemble gagnerait dans une meilleure répartition car le nombre de stations est relativement important.

*

* *

STATIONS	1951	52	53	54	55	56	57	58	59	1960	61	62	63	64	65	66	67	68	69	1970	71	72	73	74	75	76	77	78	79	1980
PODOR																														
BOGHE																														
DAGANA																														
ROSSO																														
ST LOUIS																														
MATAM																														
LOUGA																														
LINGUERE																														
BALLE																														
DAHRA																														
COKI																														
NIOAO DU SAHEL																														
SELIBABY																														
NARA																														
YELIMANE																														
AOUROU																														
BAKEL																														
KOUSSANE																														
SANDARE																														
AMBI DEDI																														
KONIAKARI																														
DIEMA																														
MOURDIAH																														
KIDIRA																														
KAYES																														
OUSSOUBINAGNA																														
DIEMOU																														
KOUROUNINKOTO																														
GALOUGO																														
BAFOULABE																														
TOUKOUTO																														
GOURBASSI																														
FALADYE																														
KITA																														
NEGALA																														
KENIERA																														
SARAYA																														
GUENEGORE																														
SIRAKORO																														
KEDOUGOU																														
FALEA																														
KANGABA																														
TOUGUE																														
LABE																														
PITA																														
DABOLA																														
DALABA																														
MAMOU																														
KIFFA																														

■ Année Lacunaire
 □ Année partiellement Lacunaire
 Le nombre de traits indique le nombre de mois manquant exemple ici 2 mois dans l'année



Les lacunes, les données douteuses, la mauvaise répartition des postes pluviométriques du bassin nous mènent forcément à une critique rigoureuse de nos séries pluviométriques. Nous mènerons cette critique en quatre étapes :

- l'homogénéisation des séries par la méthode des doubles cumuls, en vue de déceler les cassures éventuelles dues à des causes diverses : déplacements des sites, changements d'instruments de mesure ou simplement des relevés fantaisistes ;
- le choix de station de base assez représentative d'une région donnée pour l'analyse pluviométrique moyenne ;
- l'étude du coefficient de variation et les ajustements graphiques des séries d'observation en vue du choix de la meilleure loi de distribution de la pluie, loi dans laquelle seront dégagées les pluies fréquentielles ;
- enfin le dégagement des valeurs limites de l'intervalle de confiance à accorder aux séries ainsi comblées.

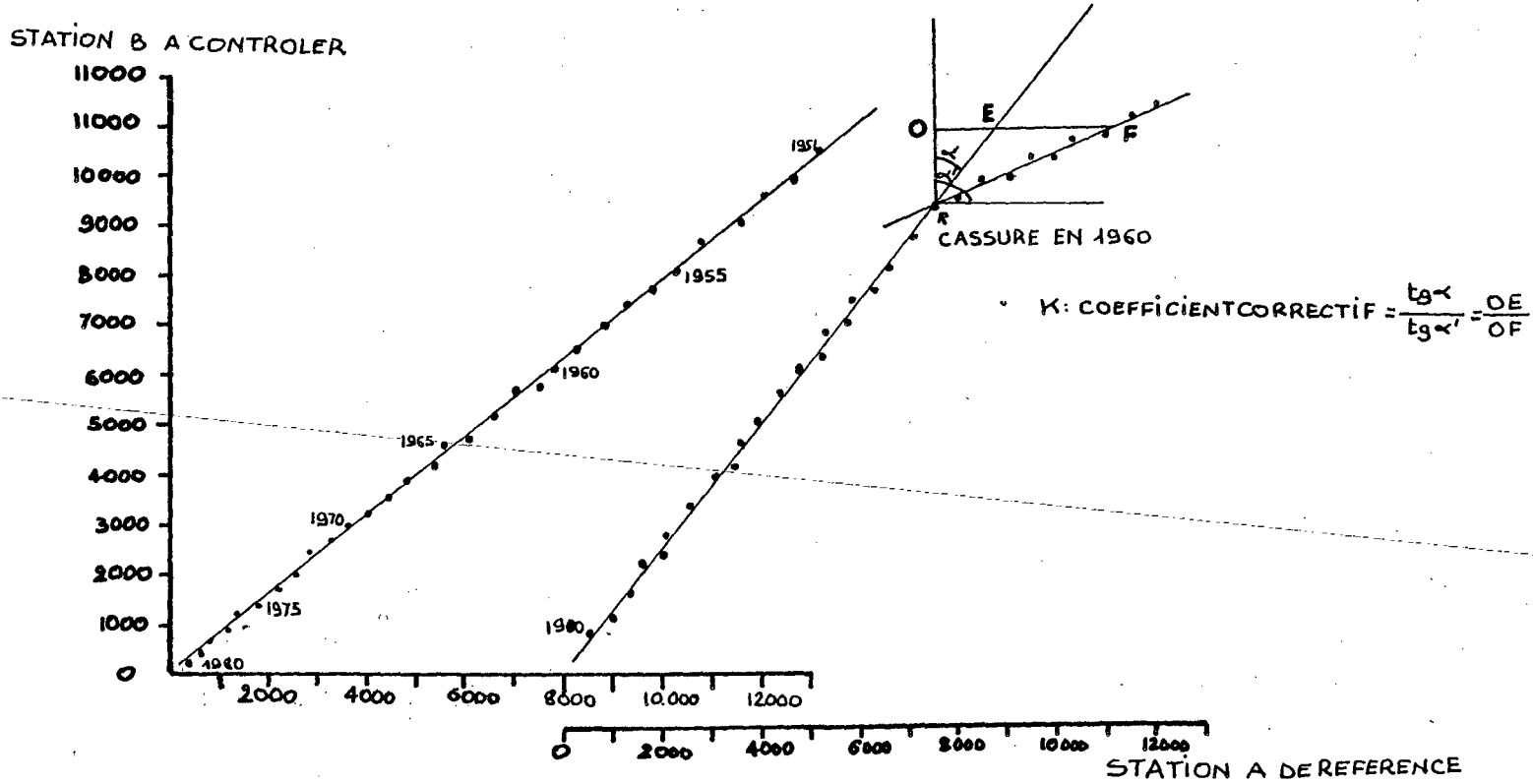
2. L'homogénéisation et les liaisons pluviométriques

La méthode des doubles cumuls (fig. n° 11) consiste à comparer les totaux cumulés relevés à un poste pluviométrique B à comparer avec un poste A dont la série est plus longue, choisi comme station de référence. Les totaux portés sur papier millimétré, avec en abscisse les totaux de la station de référence A et en ordonnée ceux de la station B à vérifier :

- si les points s'alignent de façon linéaire, on peut en conclure que la série B est homogène ;
- si en revanche il apparaît une ou plusieurs cassures dans la distribution des points, la série n'est pas homogène, les cassures provenant des causes diverses que nous avons rappelées.

Pour corriger la station non-homogène, il suffit de former le rapport des

PRINCIPE D'HOMOGENEISATION DE DONNEES
FIG. 11 PAR LES DOUBLES CUMULS



pentés déterminées par les tangentes α et α' ou α' et α (fig. n° 11). La valeur de ce rapport est le coefficient correctif par lequel il faut multiplier les valeurs considérées comme érronées, en commençant par l'année à partir de laquelle la ou les cassures sont observées dans la distribution des points.

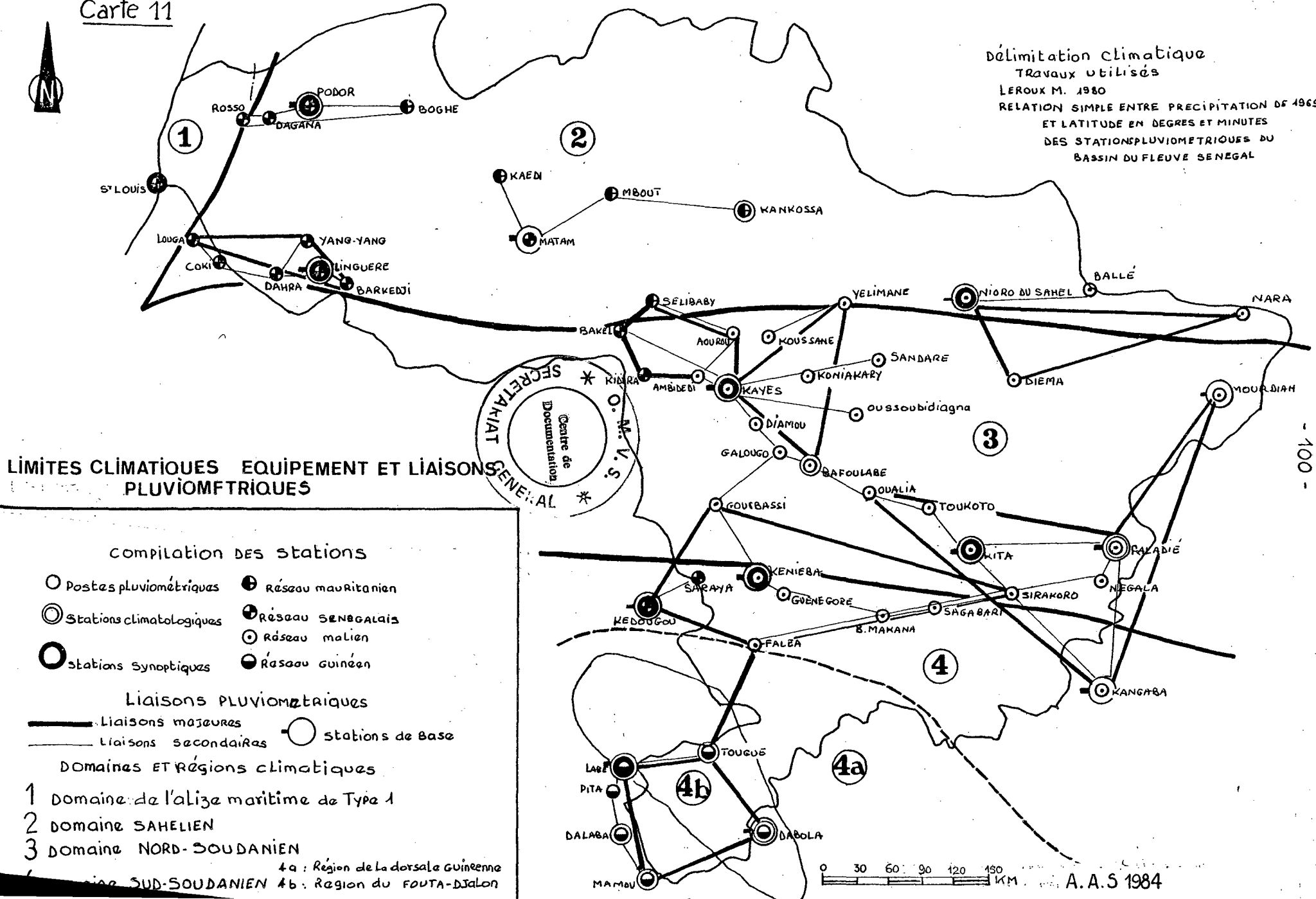
Il faut cependant prendre certaines précautions quant à l'utilisation de cette méthode rappelée par P. DUBREUIL (1971) :

- vérifier que les stations appartiennent aux mêmes conditions climatiques et que leur proximité suggère une liaison positive, significative ;
- il faut considérer les couples de valeurs pour les mêmes années ;
- à main levée, on peut joindre les premier et dernier points de la distribution afin de vérifier que l'ensemble des points se répartit de part et d'autre de cette droite. Les points peuvent s'écarter légèrement de cette droite en raison d'interfacts liés à l'origine même de l'eau précipitée. Il convient donc de ne pas corriger systématiquement certaines valeurs et changer ainsi le sens de l'information pluviométrique. Il convient de corriger quand la valeur du rapport est supérieur à 0,15 car on estime que la pluie est mesurée avec 15 % d'erreur ;
- enfin, pour une utilisation plus commode de la méthode, on peut commencer à cumuler les valeurs les plus récentes vers les anciennes valeurs. Car on connaît presque toujours le site actuel d'une station, et ce sont les informations sur les sites passés qui manquent.

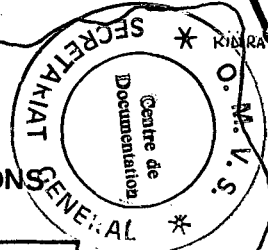
Nous donnons dans le tableau suivant les résultats de ce travail pour le Bassin du Sénégal. (Tableau n° 5).



Délimitation climatique
Travaux utilisés
LEROUX M. 1980
RELATION SIMPLE ENTRE PRECIPITATION DE 1969
ET LATITUDE EN DEGRES ET MINUTES
DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES DU
BASSIN DU FLEUVE SENEGAL



LIMITES CLIMATIQUES EQUIPEMENT ET LIAISONS PLUVIOMETRIQUES



- 100 -

compilation des stations

○ Postes pluviométriques	⊕ Réseau mauritanien
⊙ Stations climatologiques	⊙ Réseau SENEGALAIS
⊙ Stations Synoptiques	⊙ Réseau malien
	⊙ Réseau guinéen

Liaisons PLUVIOMETRIQUES

— Liaisons majeures ○ Stations de Base

— Liaisons secondaires

Domaines ET Régions climatiques

1 Domaine de l'alize maritime de Type 1

2 Domaine SAHELIE

3 Domaine NORD-SOUDANIE

4a : Région de La dorsale Guinéenne

4b : Région du FOUTA-DJALON

4c : Région SUD-SOUDANIE

Tableau n° 5. Périodes et coefficients correctifs des stations homogénéisées.

Stations de référence	corrigées	Périodes corrigées	Coefficients correctifs
Kédougou	Saraya	1951 à 1955 / 1955 - 1965	1,37 / 0,96
Nioro du Sahel	Nara	1955 - 1963	1,1
Kidira	Bakel	1951 - 1958 / 1959 - 1974	1,01 / 0,70
Bakel	Sélibaby	1951 - 1962 / 1963 - 1971	0,51 / 0,69
Podor	Boghé	1951 - 1955	1,04
Linguère	Coki	1951 - 1957	0,80
Linguère	Yang-Yang	1951 - 1957	0,70
Linguère	Barkédji	1955 - 1974	0,69
Faladye	Kita	1951 - 1957	0,90

Nous mettons en garde quant à la station de St Louis. Elle n'a pu être homogénéisée.

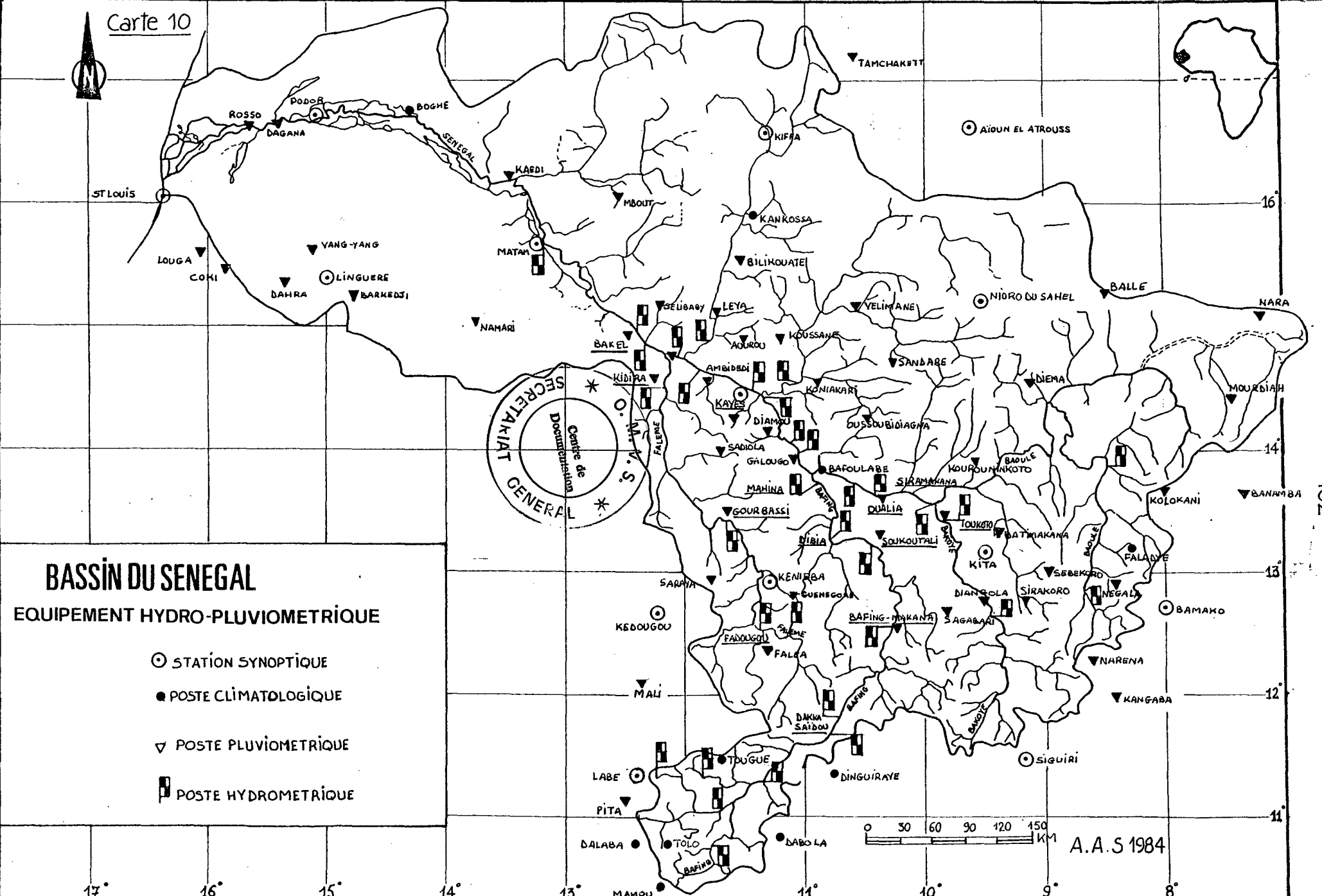
Les liaisons ainsi obtenues par double cumul, spontanément ou après corrections, constituent pour nous la carte des liaisons pluviométriques (carte n° 11). Elle définit neuf groupes de stations qui se lient les unes aux autres par la méthode des doubles cumuls. Ces liaisons se font autour d'une station de base dont nous avons avant tout vérifié l'homogénéité et qui possède une longue série.

Les liaisons entre stations appartenant au même contexte climatique sont appelées liaisons secondaires. Celles qui n'appartiennent pas au même contexte climatique du fait de leur éloignement, mais qui présentent homogénéité sans correction, donnent les liaisons majeures.

C'est au niveau de ces groupes que nous avons choisi les stations de base de l'analyse pluviométrique moyenne, encore qu'il faudrait définir à leur niveau les lois de distribution possible de la pluie moyenne annuelle et



ST LOUIS

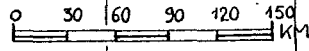


SECRETARIAT GENERAL
Centre de Documentation
O.S.A.S.

BASSIN DU SENEGAL

EQUIPEMENT HYDRO-PLUVIOMETRIQUE

- ⊙ STATION SYNOPTIQUE
- POSTE CLIMATOLOGIQUE
- ▽ POSTE PLUVIOMETRIQUE
- ▣ POSTE HYDROMETRIQUE



A.A.S 1984

mensuelle.

3. Le comblement des lacunes

Le comblement a été fait à partir d'une régression linéaire entre stations assez proches et appartenant aux mêmes conditions climatiques.

Auparavant, nous avons étudié les lois de distribution de la pluie annuelle et des mois de début, du maximum et de la fin de l'année pluvieuse.

a) Le choix des stations de base pour l'étude des lois de distribution

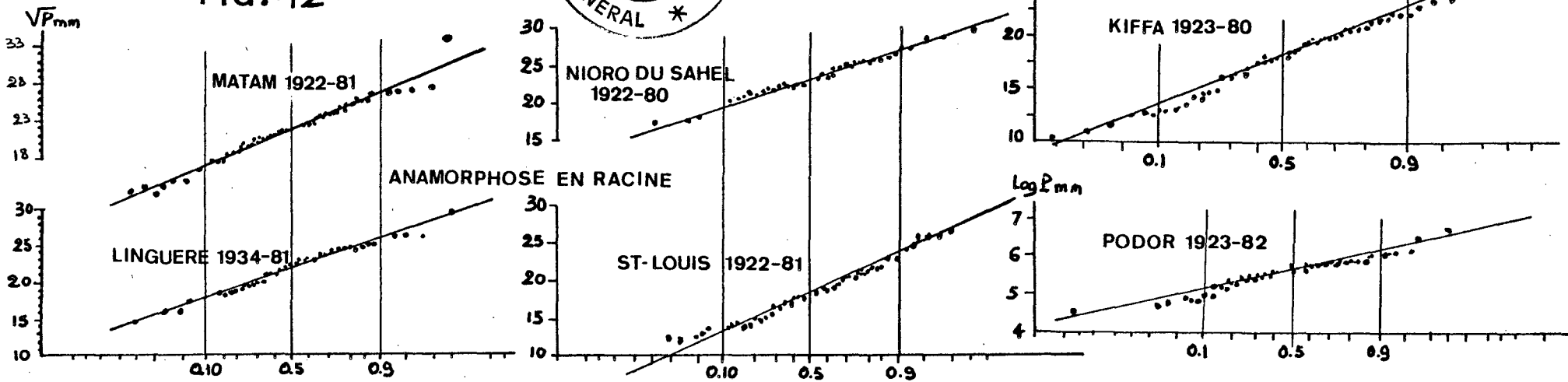
Nous n'avons étudié les lois de distribution possibles des précipitations qu'au niveau des stations de base choisies, stations de référence des liaisons pluviométriques.

Les critères de choix sont les suivants : la longueur de la série d'observations, l'homogénéité de celle-ci, la situation géographique dans le bassin, le site particulier pouvant rendre compte des nuances locales dans le domaine climatique (carte n° 11, tableau n° 6).

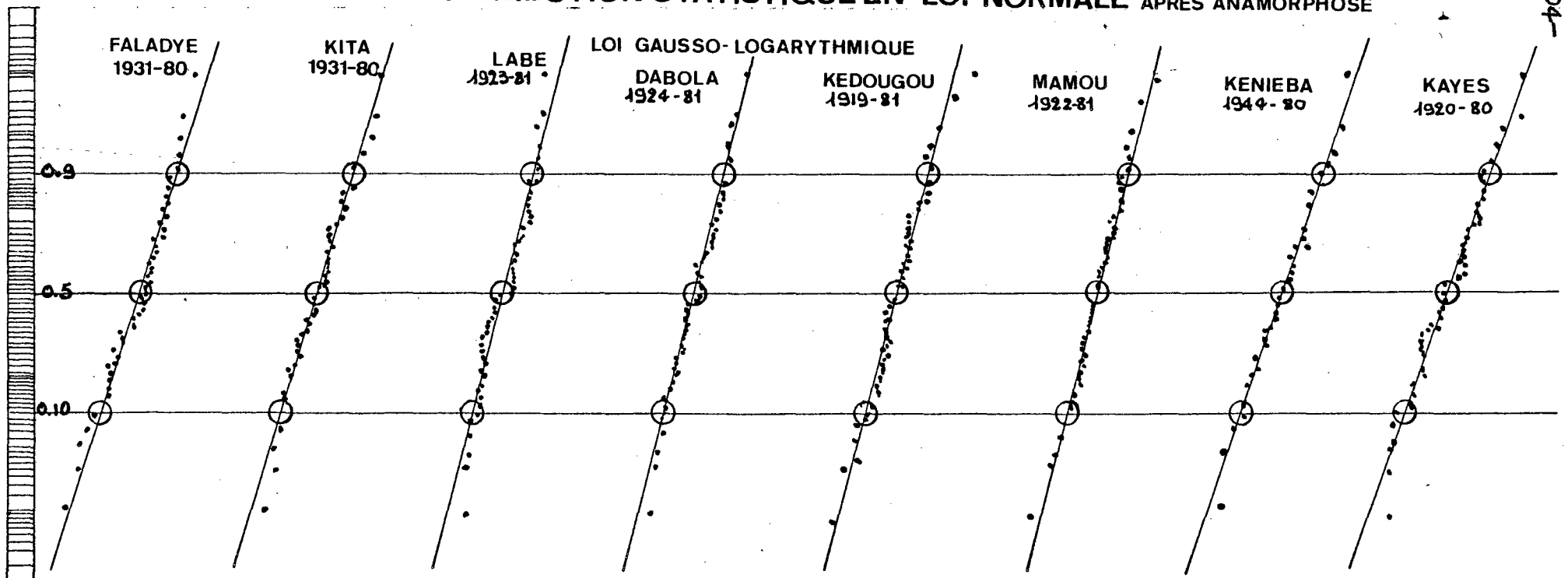
Il s'agit :

- pour le domaine sahélien des stations de St Louis ((sur la frange maritime), de Podor (dans le delta du fleuve), de Matam (près du fleuve mais en amont dans le Cours Inférieur), de Kiffa (la plus septentrionale du bassin), de Linguère et de Niore du Sahel (la plus continentalisée dans ce domaine) ;
- pour le domaine Nord-soudanien, il s'agit de Kayes, de Kita et de Faldye ;
- pour le domaine Sud-soudanien, nous avons choisi Kéniéba et Kédougou ;
- enfin, pour la région guinéenne, nous avons retenu Labé sur le rebord

FIG. 12



PLUIES ANNUELLES DISTRIBUTION STATISTIQUE EN LOI NORMALE APRES ANAMORPHOSE



occidental de la montagne, de Dabola (sur le rebord oriental) et de Mamou (la station la plus méridionale).

Les limites entre domaines et régions climatiques ont été tracées bien que n'étant pas matérialisables avec précision. A ces endroits, nous avons choisi des stations pour avoir une idée de la transition pluviométrique entre domaine : Linguère, Niore du Sahel et Kéniéba.

Tableau n° 6. Caractéristiques des stations de base.

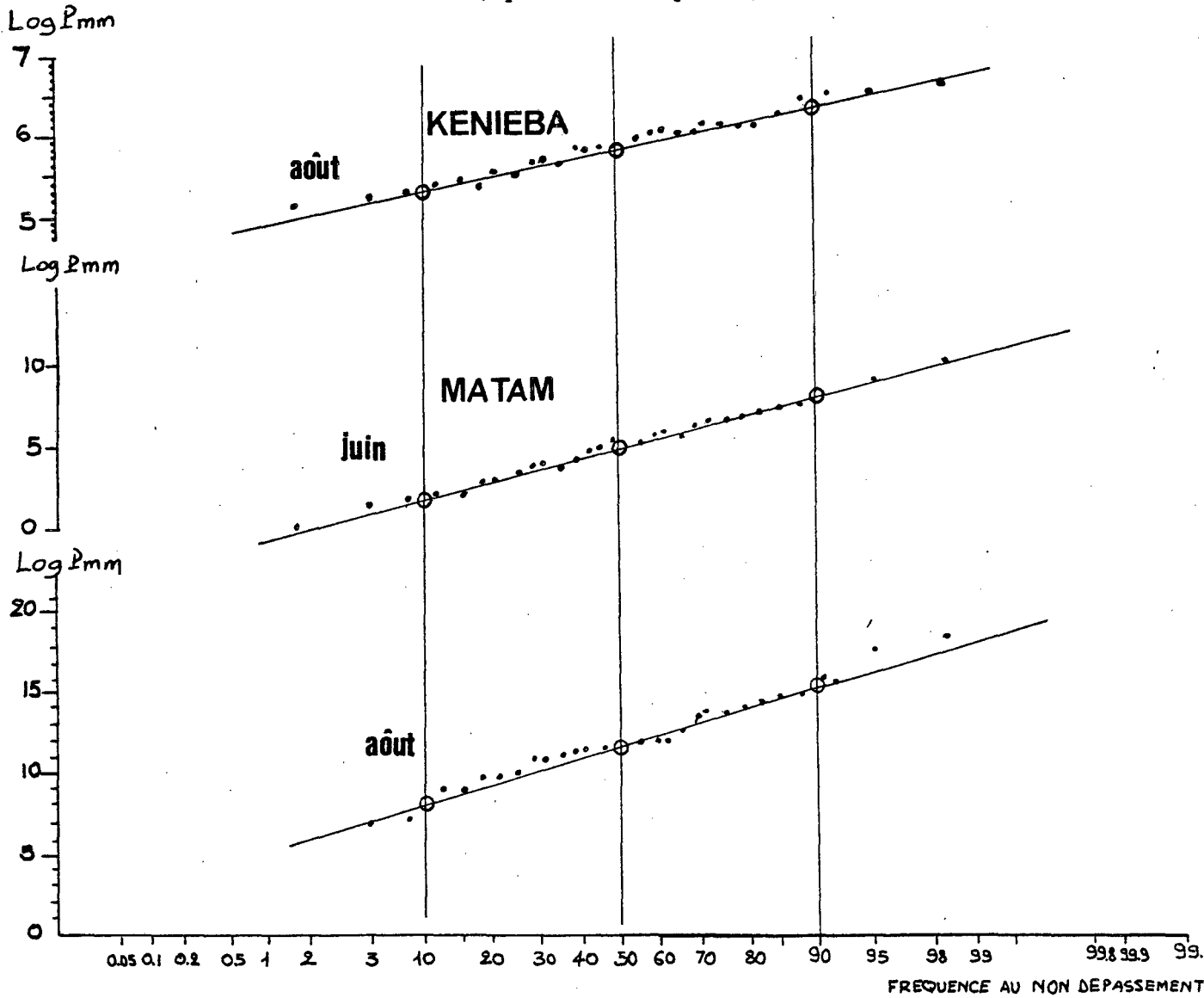
	Stations	Périodes d'observation retenues	Caractéristiques
1	St Louis	1922 - 1981 60 ans	Série complète
2	Podor	1923 - 1982 60 ans	"
3	Matam	1922 - 1981 60 ans	"
4	Kiffa	1923 - 1980 58 ans	"
5	Niore du Sahel	1922 - 1980 59 ans	"
6	Linguère	1934 - 1981 48 ans	"
7	Faladye	1931 - 1980 50 ans	"
8	Kita	1931 - 1980 50 ans	Période 1951 - 1955 homogénéisée
9	Kéniéba	1944 - 1980 37 ans	1 mois en 1966 comblé
10	Kédougou	1919 - 1980 62 ans	3 ans (58 - 59 - 60) comblés
11	Labé	1923 - 1981 59 ans	Série complète
12	Kayes	1920 - 1980 61 ans	"
13	Dabola	1924 - 1981 58 ans	11 mois en 1958 comblé
14	Mamou	1922 - 1981 60 ans	Série complète

b) Les lois de distribution des pluies moyennes

Les totaux pluviométriques après classement par ordre croissant ont été portés sur papier fonctionnel gaussien-arithmétique ou gaussien-logarithmique.

FIG. 13

DISTRIBUTION STATISTIQUE DES PLUIES MENSUELLES
(après anamorphose)



A chaque variable pluviométrique X_i on associe son rang dans la série : la fréquence expérimentale au non-dépassement correspondante a été déterminée selon la formule

$$\frac{I - 1/2}{N}$$

où I = le rang et N = la taille de l'échantillon.

Sur le papier fonctionnel, on porte en abscisse les fréquences gaussiques et en ordonnées les précipitations mensuelles ou annuelles, et on trace la droite d'ajustement qui permet d'envisager la loi de probabilité.

Elle relie deux points correspondant aux fréquences 0,10 et 0,90 respectivement en année sèche et en année humide (1). La variable réduite de gauss associée à ces fréquences est 1,28. Cette droite est appelée droite de " HENRI " et passe par la fréquence 0,5.

Pour le bassin du Fleuve Sénégal, il ressort de ces ajustements graphiques des précipitations annuelles et mensuelles (fig. n° 12 et 13) que l'on peut envisager une distribution normale des modules pluviométriques après changement de variables, anamorphose, en " logarithme de pluie " ou " racine de pluie ".

D'autre part l'étude du coefficient de variation C.V (2) des pluies annuelles et mensuelles permet de choisir la loi (tableau n° 7).

(1) Les fréquences 0,10 et 0,90 correspondent à une durée de retour de 10 ans en période sèche et en période humide. La fréquence 0,5 correspond à la durée de retour une année sur deux.

(2) $C.V = \frac{\text{écart type}}{\text{pluie moyenne}}$

Les coefficients de variation sont très faibles et quelque soit la quantité de pluie annuelle tombée, l'année pluvieuse enregistre toujours un total positif. Ce qui amène à dire que la pluie annuelle n'est pas bornée à une valeur limite.

Tableau n° 7. Coefficients de variation aux stations de base.

Stations	Saison pluvieuse			Année pluvieuse
	Début	Maximum	Fin	
1 St Louis	Juin 1,6	Août 0,8	Oct. 1,4	0,5
2 Podor	- 1,2	- 0,6	- 1,7	0,4
3 Kiffa	- 0,9	- 0,5	- 2,0	0,4
4 Matam	- 0,9	- 0,3	- 1,2	0,3
5 Kayes	Mai 0,4	- 0,2	- 0,9	0,2
6 Linguère	Juin 1,0	- 0,4	- 1,1	0,3
7 Nioro du Sahel	- 0,7	- 0,6	- 0,9	0,4
8 Kita	Avril 1,5	- 0,3	- 0,8	0,2
9 Paladye	- 1,3	- 0,3	- 0,8	0,2
10 Kéniéba	Mai 0,7	- 0,4	- 0,8	0,2
11 Labé	- 0,9	- 0,2	Nov. 1,2	0,1
12 Mamou	Avril 1,2	- 0,2	- 0,8	0,1
13 Dabola	Mars 1,5	- 0,3	- 1,0	0,1
14 Kédougou	Mai 0,9	- 0,3	Nov. 1,6	0,2

*

* *

Les distributions étudiées distinguent deux groupes de stations : les stations des domaines Sud-soudanien et Nord-soudanien et de la Région guinéenne, dont l'ajustement paraît satisfaisant en loi gaussio-logarithmique pour les pluies annuelles, et le groupe des stations du domaine sahélien qui suivent une loi " racine normale ". Les précipitations mensuelles des mois étudiés au niveau des stations de base suivent cette règle. Ainsi leur ajustement peut être envisagé en loi normale après anamorphose en logarithme ou en racine de la variable pluie (figures 12 et 13).

Il convient de remarquer aussi que des stations peuvent quelquefois suivre la loi normale après anamorphose aussi bien en logarithme et en racine. Ce sont des stations au voisinage de deux domaines climatiques. Dans ce cas, nous avons choisi le meilleur ajustement graphique.

c) Le comblement des données par régression

Le tableau n° 4 montre l'état des données pluviométriques quant aux lacunes qu'elles peuvent connaître. Nous n'avons présenté que la période 1951 - 1980, que nous avons choisie pour l'étude et pour le tracé de la carte des isohyètes. Pour cette période, certaines stations ont les données complètes, d'autres ont des années entièrement lacunaires. Enfin, pour certaines stations, seuls quelques mois de l'année sont lacunaires.

Ces lacunes mensuelles sont peu importantes quand il s'agit de mois où il ne pleut que rarement. Ce qui peut être le cas pour 7, 6 ou 5 mois en fonction du domaine et la probabilité d'une précipitation mensuelle nulle est plus grande. Les lacunes deviennent alors importantes quand il s'agit d'un mois de saison de pluie, par exemple septembre, août ou juillet.

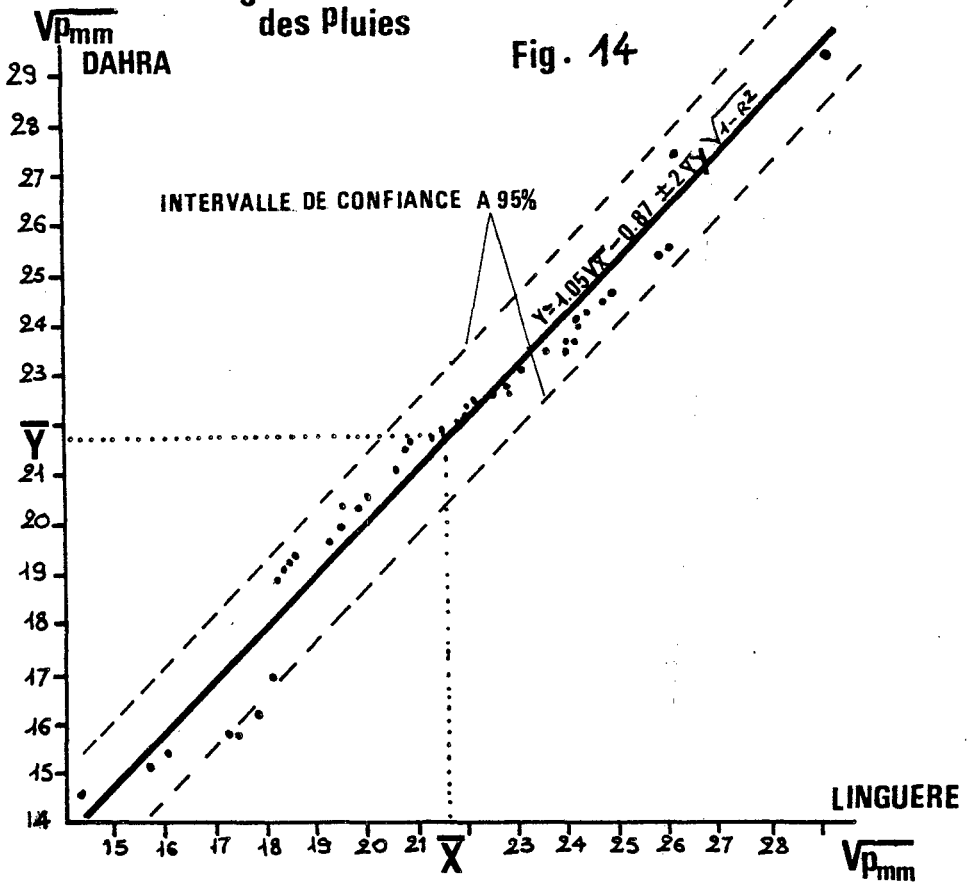
Nous avons toutefois fait un comblement mensuel pour retrouver le total annuel.

Le comblement s'est fait par une régression linéaire (figures n° 14 et 15).

Il s'agit en fonction de la loi de distribution (loi logarithme normale ou loi racine normale) de déterminer l'équation de régression linéaire entre une station de référence complète et une autre station lacunaire en

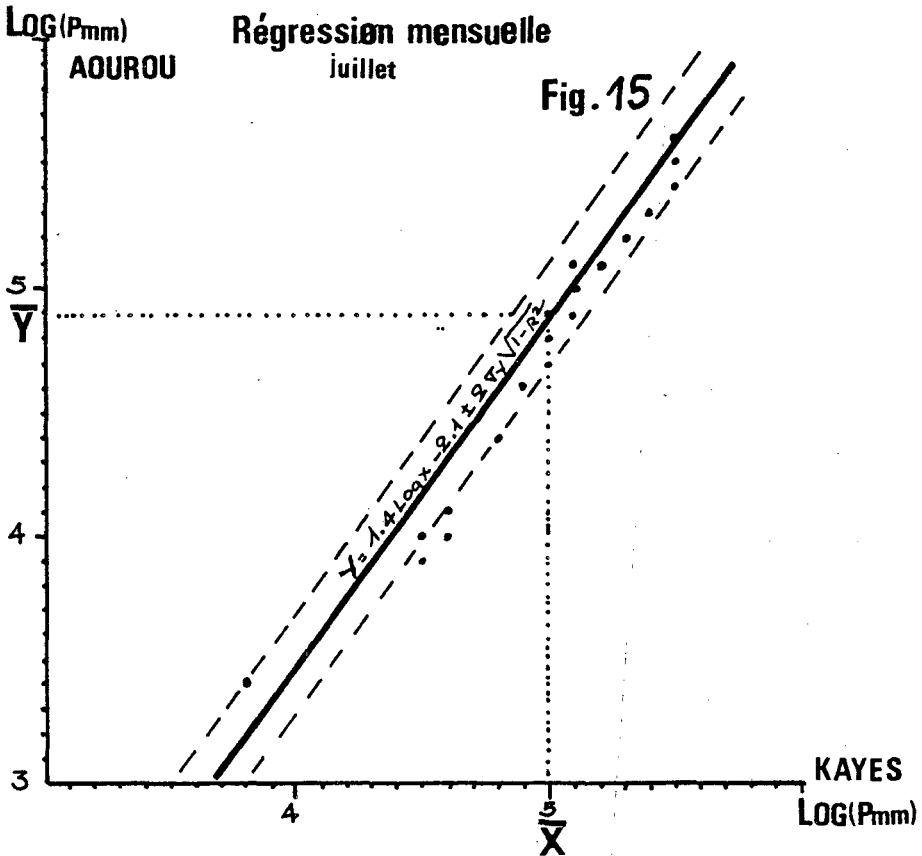
Régression à l'échelle annuelle des Pluies

Fig. 14



Régression mensuelle

Fig. 15



retenant les couples de valeurs pour lesquels les données existent.

L'équation est de la forme pour notre bassin

$$\text{soit : } \boxed{\bar{y} = a \text{ Log } x + b \text{ ou } \bar{y} = a \sqrt{x} + b}$$

\bar{y} est la pluie moyenne cherchée pour un mois (ou une année) lacunaire à une station ;

a = la constante d'ajustement ;

x = la valeur de la précipitation pour le mois (ou l'année) correspondant à la station de référence ;

b est une constante.

L'équation de régression est assortie d'un coefficient de corrélation " R " qui mesure le degré de liaison qui peut exister entre les deux échantillons de valeurs.

Cette liaison peut être linéaire ou non. En fait, la valeur de R ne témoigne donc que de l'existence ou non d'une liaison et non de la nature de cette liaison. " R " peut être très faible.

Mais la valeur de la pluie ainsi restituée par cette méthode n'est qu'une des valeurs possibles pour le mois ou l'année lacunaire. Cette valeur restituée peut être supérieure ou inférieure à la vraie valeur. Il convient alors de chercher le résidu pouvant exister entre la vraie valeur de pluie et celle qui est restituée.

Ce résidu peut être donné par la formule

$$\varepsilon = U \cdot \sqrt{V - R^2}$$

U = valeur réduite de Gauss

ε = le résidu positif ou négatif

V = l'écart type de la série à combler

R^2 = le carré du coefficient de corrélation

La forme complète de l'équation de régression devient

$$\bar{y} = a \text{ Log } x + b \pm \epsilon \text{ ou } \bar{y} = a \sqrt{x} + b \pm \epsilon$$

$\pm \epsilon$ permet de figurer sur la représentation graphique la largeur de la bande du plan axé sur la droite et qui englobe une proportion donnée des observations à un certain pourcentage appelé Intervalle de Confiance I.C.

Par exemple pour I.C à 95 %, $\epsilon = 2\sqrt{1 - R^2}$ (figures n° 14 et 15).

C'est cette méthode que nous avons utilisée pour le comblement. Mais son emploi nécessite certaines précautions :

- les couples de valeurs annuelles ou mensuelles à corrélérer doivent appartenir à des stations voisines, de mêmes conditions climatiques. La station de référence doit être homogène ;
- les deux stations doivent répondre par conséquent à la même distribution normale, gaussio-logarithmique, ou loi racine normale ou toute autre loi dans laquelle se fera la corrélation ;
- il convient aussi de ne pas restituer un nombre de valeur N_i supérieur à la moitié de la taille N de l'échantillon de couple, c'est-à-dire qu'il faut que :

$$N_i < \frac{N}{2}$$

- l'échantillon doit être assorti, après le comblement, d'un intervalle de confiance choisi afin de ne pas abuser les éventuels utilisateurs ;
- enfin, après un comblement mensuel des lacunes, nous avons estimé parallèlement les totaux annuels des années présentant de nombreuses lacunes mensuelles. Dans le but d'éviter une incohérence de nos données, nous avons confronté les totaux annuels et les totaux mensuels partiels des valeurs restituées comme le suggère P. DUBREUIL (1971). Nous avons alors établi le rapport suivant :

$$Po = \frac{P \ J}{P' \ J}$$

où Po = estimation globale de l'année ;

P' J = somme des valeurs mensuelles restituées ;

Po = valeur du rapport par laquelle il faut multiplier les valeurs restituées.

*

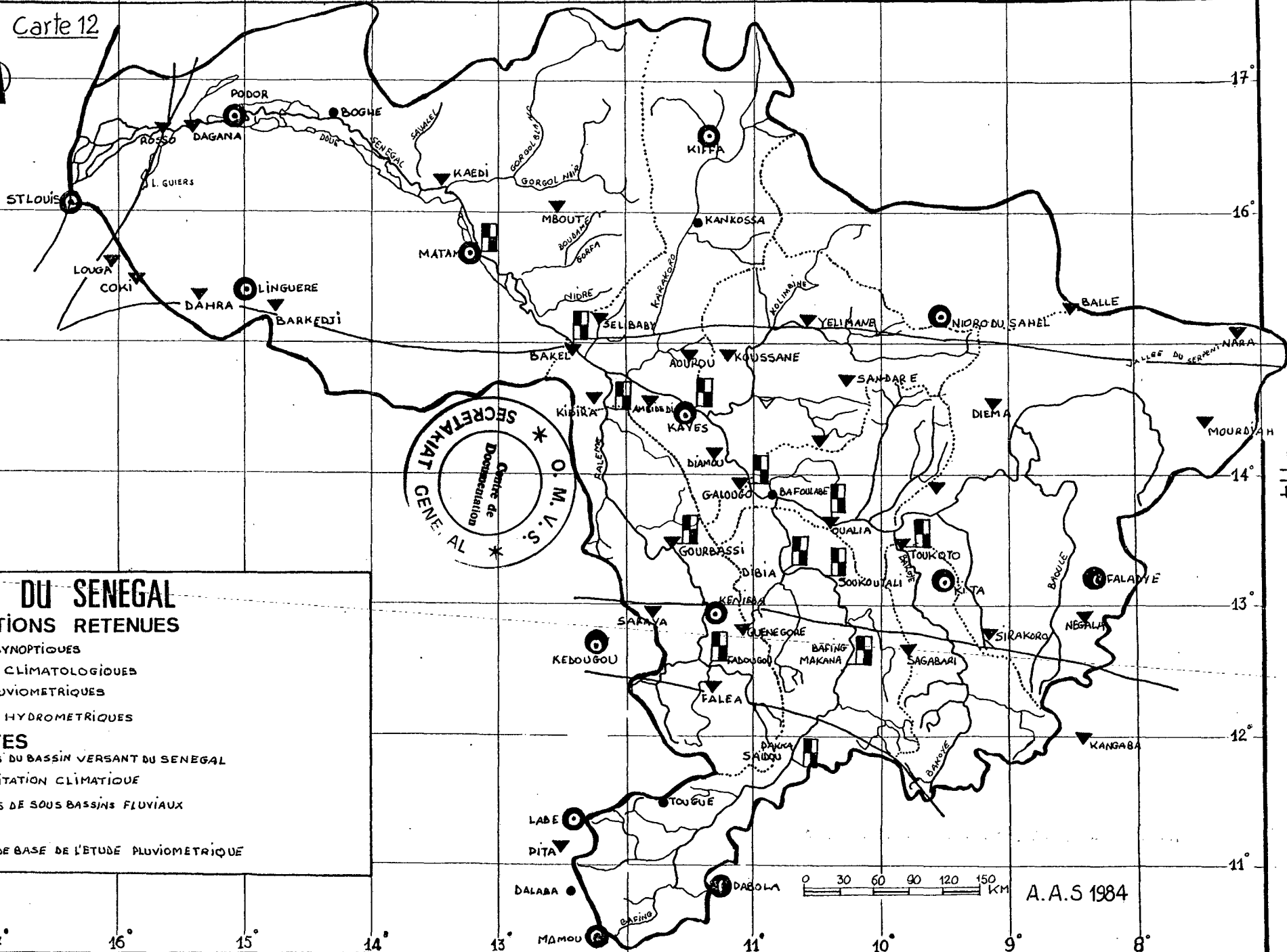
* *

Dans le bassin du Sénégal, nous avons remarqué que certains coefficients de corrélation annuels sont significatifs, de même que pour les précipitations du mois d'août. Par contre, pour les autres mois, les valeurs de ce coefficient peuvent être très faibles : 0,40 - 0,50.

Dans le tableau n° 8, nous comparons nos moyennes annuelles 1951 - 1980 aux moyennes existantes : 1931 - 1960 et 1951 - 1980. Cette dernière série de moyennes a été établie par le C.I.L.S.S. Mais nous avons constaté que cet organisme établissait ses moyennes en faisant le rapport de la somme totale sur le nombre d'années existant de précipitations, sans comblement.

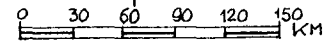
Mais pour la période 1951 - 1980, les écarts entre les deux séries présentées sont très faibles. En revanche, par rapport à la série 1931 - 1960, les écarts peuvent être importants. Cela, du reste, confirme l'hypothèse du déficit pluviométrique de ces années récentes.

Carte 12



BASSIN DU SENEGAL
STATIONS RETENUES

- STATIONS SYNOPTIQUES
 - STATIONS CLIMATOLOGIQUES
 - ▼ POSTES PLUVIOMETRIQUES
 - ▭ STATIONS HYDROMETRIQUES
- LIMITES**
- LIMITES DU BASSIN VERSANT DU SENEGAL
 - ~ DELIMITATION CLIMATIQUE
 - ⋯ LIMITES DE SOUS BASSINS FLUVIAUX
- STATIONS DE BASE DE L'ETUDE PLUVIOMETRIQUE



A.A.S 1984

17°

16°

15°

14°

13°

11°

10°

9°

8°

17°

16°

14°

13°

12°

11°

-114-

Tableau n° 8 . Présentation des stations pluviométriques retenues.
Moyenne 1951 - 1980 en mm.
Comparaison de normales pluviométriques.

Stations	Coordonnées			Normales			Climats
	Lat. N	Long. W	Alt. m	31-60	1951 - 1980		
					C.I.L.S	Amadou A.S.	
1 Podor	16° 38'	14° 56'	6	336		280	Domaine sahélien
2 Boghé	16° 34'	14° 17'	11	329		301	
3 Dagana	16° 31'	15° 30'	5	324		287	
4 Rosso	16° 30'	15° 49'	5			266	
5 St Louis	16° 01'	16° 30'	4	347		294	
6 Matam	15° 38'	13° 15'	15	537		437	
7 Louga	15° 37'	16° 13'	38	476		371	
8 Linguère	15° 23'	15° 07'	20	535		457	
9 Ballé	15° 20'	8° 35'	285	439		455	
10 Dahra	15° 20'	15° 29'	39			462	
11 Coki	15° 17'	14° 52'	15			401	
12 Nioro du Sahel	15° 14'	9° 36'	235	631	563	564	
13 Selibaby	15° 14'	12° 10'	60			415	
14 Nara	15° 10'	7° 17'	263	514		440	
15 Yélimane	15° 07'	10° 34'	97			571	
16 Aourou	14° 58'	11° 35'	65		579	536	Domaine Nord- soudanien
17 Bakel	14° 54'	12° 28'	25	712		499	
18 Koussane	14° 53'	11° 44'	96		595	590	
19 Sandare	14° 43'	10° 18'	281		715	704	
20 Ambidedi	14° 35'	11° 47'	30		723	669	
21 Koniakari	14° 34'	10° 54'	81		713	719	
22 Diema	14° 33'	9° 11'	252		654	610	
23 Mourdiah	14° 28'	7° 28'	314	591	520	504	
24 Kidira	14° 28'	12° 13'	35	790		675	
25 Kayes	14° 26'	11° 26'	46	821	691	695	
26 Oussou- bidiagna	14° 15'	10° 28'	259			789	
27 Diamou	14° 06'	11° 16'	60		765	757	
28 Kourou- ninkoto	13° 52'	9° 35'	267		840	840	
29 Galougo	13° 50'	11° 04'	91		853	852	
30 Bafoulabé	13° 48'	10° 50'	104	942	855	847	
31 Toukoto	13° 27'	9° 53'	177		886	858	
32 Gourbassi	13° 24'	11° 28'	79		923	916	
33 Faladye	13° 08'	8° 21'	337	1 019	968	975	
34 Kita	13° 04'	9° 27'	328	1 151		1 033	

... / ...

... / ...

Stations	Coordonnées			Normales			Climats
	Lat. N	Long. W	Alt. m	31-60	1951 - 1980		
					C.I.L.S	Amadou A.S	
35 Negala	12° 52'	7° 30'	290			996	Domaine Sud- soudanien
36 Kéniéba	12° 48'	11° 21'	136		1 286	1 292	
37 Saraya	12° 47'	11° 47'	186			1 065	
38 Guenegoro	12° 44'	11° 01'	240			1 303	
39 Sirakoro	12° 41'	9° 40'	369		1 113	1 084	
40 Kédougou	12° 33'	12° 13'	122	1 267		1 285	
41 Faléa	12° 16'	11° 17'	455		1 407	1 422	
42 Kangaba	11° 56'	8° 25'	370		1 141	1 140	
43 Tougué	11° 26'	11° 40'	868	1 065		1 451	Région guinéenne
44 Labé	11° 19'	12° 18'	1 025	1 662		1 660	
45 Pita	11° 04'	12° 24'	965	1 860		1 642	
46 Dabola	10° 45'	11° 07'	438	1 678		1 544	
47 Mamou	10° 22'	12° 05'	783			1 939	
48 Dalaba	10° 43'	12° 15'	1 202			2 149	

C/ LES CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE

Le découpage climatique retenu consacre nos domaines et régions climatiques. Il procède aussi bien de l'analyse de la température, de l'humidité relative et des mécanismes généraux du " climat de l'Afrique tropicale " (M. LEROUX, 1980), mécanismes sur lesquels nous reviendrons. A ce sujet, du reste, la documentation est très riche et nous renvoyons aux ouvrages généraux de P. PAGNEY (1976), P. PEDELABORDE (1970), C. PEGUY (1970).

Il s'agit pour nous, à présent, de noter les grandes caractéristiques de la pluviométrie moyenne dans les domaines climatiques et les nuances locales ; caractéristiques et nuances qui s'insèrent dans l'ensemble des climats tropicaux en général.

Pour ce faire, nous dégagerons les grands traits de la pluie au niveau des longues séries d'observations de nos stations de base, séries de plus de 40 ans et même 60 ans (tableau n° 5).

Ces longues séries ont l'avantage d'être homogènes (à l'exception de la station de St Louis), complètes mais surtout stables dans le temps, englobant et des séquences sèches et des séquences humides. Les moyennes seront donc représentatives de la pluviométrie du bassin et de sa variabilité.

1. L'abondance moyenne annuelle

(Tableau n° 9, carte n° 13)

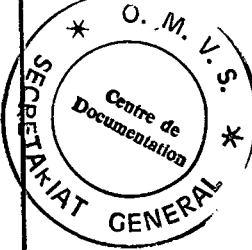
a) Les modules pluviométriques du bassin du Sénégal diminuent avec la latitude du Sud au Nord

La station de Mamou, la plus méridionale ($10^{\circ} 22' N$), a une moyenne pluviométrique de 1 942 mm pour 60 années d'observation. Pour la même période d'observation, la station de Kiffa, la plus septentrionale ($16^{\circ} 38' N$), n'enregistre que 328 mm, ce qui représente environ 17 % du total pluviométrique de Mamou. L'écart est de 1 614 mm du Sud guinéen au Nord sahélien en comparant les modules pluviométriques moyens de toutes les stations.

PRESENTATION DES STATIONS DE BASE DE L'ANALYSE DES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES ET MOYENNES MENSUELLES

J F M A M J J^t A^t S O N D ANNEE

TABLEAU I



6°04'N 16°30'W ALT: 4m

ST LOUIS 1922-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

1.3	1.1	0.0	0.1	1.2	9.9	46.9	147.6	415.2	29.0	1.3	2.1	355.6
3.8	3.0	0.1	0.7	4.5	15.9	38.8	119.2	79.5	41.5	4.6	8.0	137.4
21.1	18.0	0.7	3.4	30.0	70.7	182.8	769.6	399.0	186.0	24.4	44.6	1239.4
0	0	0	0	0	0	0	4.5	8.1	0	0	0	102.0

16°38'N 14°56'W ALT: 6m

PODOR 1920-1982

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

0.8	1.6	0.6	0.1	1.6	15.0	54.6	113.1	79.9	19.0	1.6	1.3	289.2
2.0	4.9	3.3	0.4	4.8	18.5	45.0	67.3	55.0	31.4	6.4	5.2	118.1
10.0	26.0	25.2	2.5	27.5	80.7	210.5	310.3	314.8	197.7	49.0	36.1	793.4
0	0	0	0	0	0	1.1	12.5	2.1	0	0	0	98.4

15°23'N 15°07'W ALT: 20m

LINGUERE 1934-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

0.6	1.4	0.9	0.3	2.4	23.2	97.2	198.7	118.7	42.6	2.4	1.7	474.1
2.5	5.5	6.2	1.1	6.0	27.3	47.6	79.7	54.7	48.1	7.1	5.4	133.8
15.7	34.5	43.8	5.6	31.5	104.2	256.1	395.3	298.9	212.9	33.3	30.9	853.6
0	0	0	0	0	0	10.3	41.6	40.4	0	0	0	204.7

15°38'N 13°15'W ALT: 15m

MATAM 1922-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

0.7	0.8	0.2	0.7	4.5	42.1	115.1	181.5	107.7	23.0	2.2	1.5	480.0
2.3	3.8	0.9	4.7	14.8	37.4	55.2	86.4	58.3	27.3	7.9	6.0	163.1
12.7	22.5	5.8	36.2	100.0	168.0	232.2	472.6	245.2	117.9	46.4	40.6	1111.9
0	0	0	0	0	0	11.0	36.0	25.8	0	0	0	175.0

14°26'N 11°26'W ALT: 46m

KAYES 1920-1980

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la période
Minimum de la période

0.4	0.3	0.1	1.5	21.3	83.0	165.3	232.8	155.3	41.4	2.7	0.6	711.7
2.2	2.2	0.4	5.3	31.8	40.0	61.0	86.1	62.9	38.1	11.3	2.8	150.8
17.0	16.6	3.9	30.0	186.7	186.8	344.2	526.1	370.1	203.1	82.9	49.8	1136.1
0	0	0	0	0	20.0	20.0	54.5	59.4	0	0	0	480.6

15°14'N 09°36'W ALT: 235m

NIORODU SAHEL 1922-1980

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la période
Minimum de la période

0.4	0.4	0.1	4.8	16.4	62.5	165.5	224.7	182.6	25.5	2.2	1.2	636.3
2.1	2.1	0.4	9.9	30.7	45.1	82.3	148.6	71.3	23.0	5.1	3.7	263.9
15.4	15.3	2.9	46.0	205.0	220.9	420.2	831.0	392.2	94.8	29.0	21.7	1579.0
0	0	0	0	0	10.5	40.0	20.1	29.4	0	0	0	298.7

13°04'N 09°27'W ALT: 328m

KITA 1931-1980

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

0.5	0.3	1.0	11.2	44.9	154.4	249.6	338.4	224.9	71.9	6.6	0.9	1104.6
3.1	1.5	2.7	17.1	30.1	57.6	74.2	96.6	77.3	54.9	13.7	3.2	200.9
22.0	9.7	15.0	82.6	124.3	290.0	458.9	569.4	439.0	260.3	77.1	16.3	1619.8
0	0	0	0	0	54.7	98.9	154.3	62.5	0	0	0	766.0

12°48'N 11°21'W ALT: 136m

KENIEBA 1944-1980

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la période
Minimum de la Période

0.0	0.3	0.2	6.3	52.2	165.2	260.6	398.4	286.4	105.8	8.2	1.1	1284.7
0.1	1.1	0.9	8.0	35.5	62.5	89.0	158.3	91.0	29.4	12.6	4.0	260.5
0.5	6.3	5.6	32.6	165.0	300.0	446.0	531.1	500.9	508.5	49.9	29.2	1913.7
0	0	0	0	0	54.4	128.1	171.6	189.5	2.8	0	0	838.9

12°33'N 12°13'W ALT: 129m

KEDOUGOU 1923-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

0.1	0.3	0.3	4.8	45.5	185.8	263.0	329.7	316.6	122.9	13.9	0.8	1289.2
0.6	1.0	1.5	9.1	41.1	55.1	70.0	37.2	96.8	89.3	22.7	4.6	220.2
4.5	5.6	11.0	42.7	199.1	337.0	501.2	519.0	645.0	417.9	96.6	34.3	2160.1
0	0	0	0	0.9	71.0	122.0	149.5	128.3	17.0	0	0	836.0

13°05'N 08°21'W ALT: 337m

FALADYE 1931-1980

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

0.6	0.5	4.2	10.2	51.0	124.8	240.2	321.3	193.6	56.3	4.6	0.4	987.7
2.4	2.0	8.3	12.8	33.6	43.6	62.8	105.2	61.4	47.3	8.7	1.1	172.8
16.4	12.4	38.1	65.1	131.1	208.9	359.4	632.7	342.8	246.5	43.8	4.8	1396.7
0	0	0	0	2.7	40.6	122.8	147.1	84.5	0	0	0	623.1

11°19'N 12°18'W ALT: 1025m

LABE 1923-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la Période
Minimum de la Période

2.2	2.4	9.2	44.1	144.3	247.8	339.9	367.1	309.7	171.1	38.0	9.3	1683.1
5.8	6.2	20.1	40.3	58.6	58.0	85.4	83.3	79.8	81.3	46.0	21.1	239.1
29.0	34.0	115.0	177	281.0	365.0	591.0	573.0	527.0	430.0	246.0	108	2159.0
0	0	0	0	12.0	93.0	147.0	208.0	157.0	66.0	0	0	1322.0

10°45'N 11°07'W ALT: 438

DABOLA 1924-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la période
Minimum de la période

1.9	5.6	19.5	49.3	142.6	212.6	275.2	352.2	302.8	179.1	27.4	5.0	1571.2
7.3	25.9	28.6	36.6	64.1	68.3	65.3	98.7	86.7	75.4	27.0	16.7	233.4
50.0	149.0	150.0	150.0	288.0	480.0	430.0	572.0	544.0	430.0	95.0	105.0	2180.0
0	0	0	0	20.0	83.0	115.0	146.0	146.0	47.0	0	0	1148

10°29'N 12°05'W ALT: 783m

MAMOU 1922-1981

Précipitations moyennes
Ecart type
Maximum de la période
Minimum de la Période

4.2	6.3	34.8	44.4	173.3	277.2	315.9	423.6	365.4	223.2	58.9	8.4	1942.4
3.7	11.1	42.1	51.3	73.8	83.8	84.4	86.9	103.1	80.2	45.6	16.7	285.3
85.0	54.0	234.0	293.0	425.0	546.0	507.0	663.0	647.0	488.0	215.0	93.0	2801.0
0.0	0.0	0.0	10.0	29.0	84.0	171.0	250.0	303.0	101.0	0.0	0.0	1248.0

On note par domaine :

- région guinéenne 1 732 mm ;
- domaine Sud-soudanien 1 287 mm ;
- domaine Nord-soudanien 935 mm ;
- domaine sahélien 427 mm.

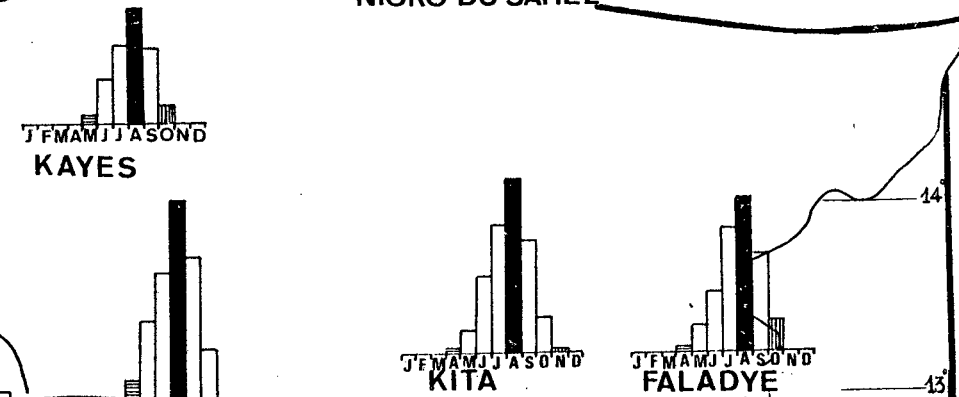
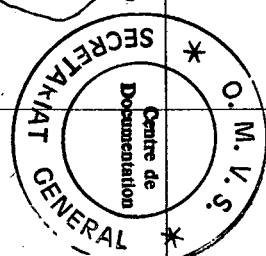
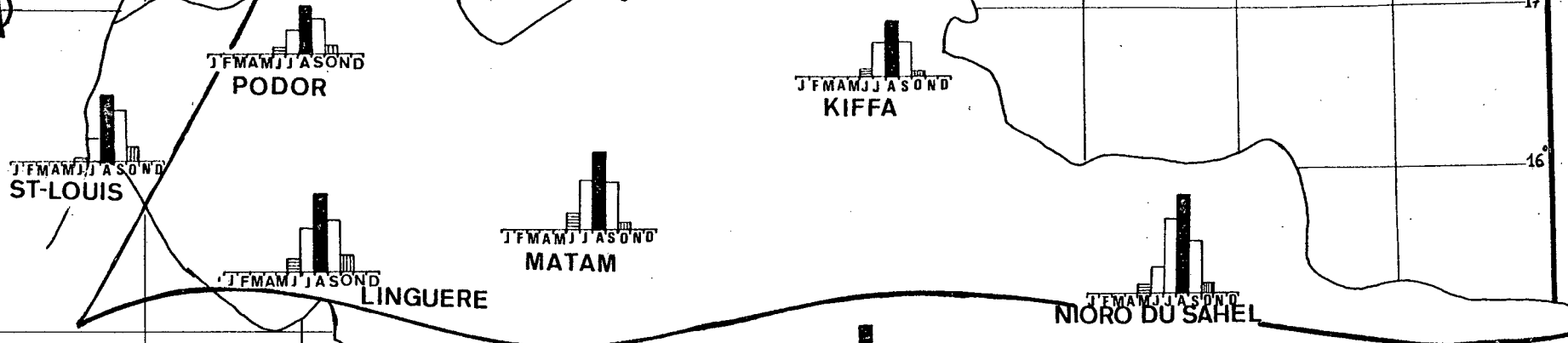
Pour mesurer la décroissance de la pluie moyenne du Sud au Nord, nous avons cherché ce que représente en pourcentage le total de chaque domaine climatique par rapport à la région la plus arrosée : la région guinéenne et par rapport au domaine qui suit immédiatement après. Ainsi :

- la pluie moyenne du domaine Sud-soudanien représente 74,3 % de la pluie moyenne annuelle tombée en région guinéenne. Autrement dit, seuls les 3/4 de la moyenne guinéenne tombent dans le domaine immédiatement au Nord. Il ne reste plus qu'un peu plus de 50 % de ce total guinéen dans ce domaine Nord-soudanien, pourcentage qui se réduit à environ 25 % dans le domaine sahélien ;

- la pluviométrie du domaine sahélien au Nord ne représente que 46 % du total précipité dans le domaine Nord-soudanien immédiatement au Sud, qui lui-même a une pluie moyenne qui ne représente que 73 % de la moyenne du domaine Sud-soudanien.

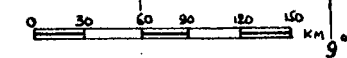
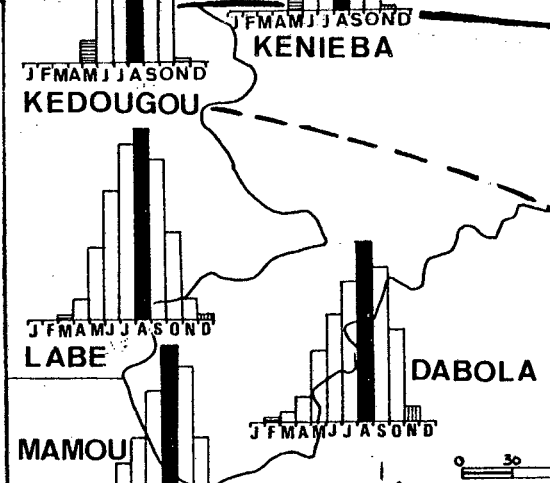
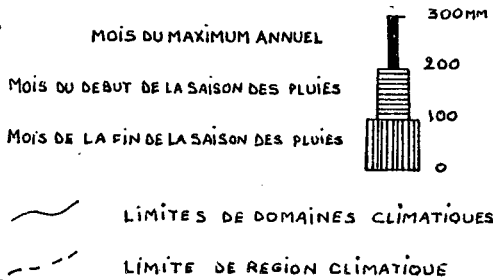
On peut dire que la décroissance moyenne de la pluie, depuis la région guinéenne jusqu'au domaine sahélien, se chiffre à environ 25 % dans chaque domaine climatique.

Le profil pluviométrique que représente la figure n° 16 rend mieux compte de la diminution de la pluie du Sud au Nord. Elle peut être considérée comme progressive entre la Région Guinéenne et le domaine Nord-Soudanien, mais elle est plutôt brutale entre ce domaine et le domaine Sahélien.



**BASSIN DU SENEGAL
PROFILS PLUVIOMETRIQUES MOYENS**

SERIE DE REFERENCE



A.A.S 1984

b) Les précipitations moyennes annuelles sont concentrées en quelques mois

(carte n° 13)

L'année pluvieuse distingue deux saisons : une, dite sèche, et une saison dite pluvieuse ou humide.

La saison sèche.

Elle est centrée sur l'hiver boréal et dure 7 mois dans le domaine Sahélien, 6 mois dans le domaine Nord-Soudanien, 5 mois dans le domaine Sud-Soudanien et 3 à 4 mois dans la région guinéenne.

Ainsi, la durée de cette période sèche pluviométriquement diminue du Nord au Sud du bassin.

La saison pluvieuse.

Elle est improprement appelée dans la région " hivernage " alors qu'elle est centrée en été boréal. Sa durée, fonction de la longueur de la saison sèche (ou inversement), diminue aussi du Sud au Nord. Ainsi, elle peut varier de 5 mois, 6, 7 et 9 à 10 mois du Nord-sahélien au Sud guinéen.

c) La répartition intermensuelle de la pluie moyenne annuelle est très inégale

Le seul caractère " unitaire " du bassin se trouve au niveau du mois du maximum pluviométrique qui est partout situé au mois d'août. Ce mois concentre environ 38 % des précipitations annuelles du domaine sahélien, 31 % dans le domaine Nord-Soudanien, 28 % dans le domaine Sud-Soudanien et plus que 22 % de la pluie moyenne annuelle de la région guinéenne.

Ainsi, l'inégale répartition mensuelle de la pluie diminue du Nord au Sud.

Le mois d'août reste partout le mois du maximum pluviométrique annuel, mais la pluie moyenne se répartit mieux en saison humide plus on progresse

vers le Sud du bassin.

Mais le " poids " du mois d'août et l'inégale répartition mensuelle de la pluviométrie se mesure mieux en ne tenant compte que des pluies tombées durant la période pluvieuse dans le total annuel. Car certains mois de saison sèche peuvent recevoir des pluies beaucoup moins importantes sur lesquelles nous reviendrons.

Le tableau suivant donne le " poids " du mois d'août et le pourcentage cumulé des mois les plus pluvieux de la saison des pluies.

Tableau n° 10. L'importance cumulée en % des mois de saison de pluies.

	Août	2 mois les + plu- vieux	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	Climats
St Louis	42	75	89	97	100	-	-	-	-	Sahé- lien
Podor	40	68	87	94	100	-	-	-	-	
Kiffa	40	64	88	95	100	-	-	-	-	
Linguère	39	64	85	94	100	-	-	-	-	
Matam	39	64	86	95	100	-	-	-	-	
Nioro	37	63	83	93	97	100	-	-	-	
Kayes	33	56	78	91	97	100	-	-	-	Nord Sou- danien
Faladye	31	55	75	88	94	100	-	-	-	
Kita	31	53	74	88	95	100	-	-	-	
Kéniéba	31	54	74	87	95	99	100	-	-	Sud Sou- danien
Kédougou	26	51	71	85	95	99	100	-	-	
Labé	22	42	61	76	86	95	100	100	-	Région gui- néenne
Dabola	22	41	59	73	84	93	98	100	100	
Mamou	22	41	57	69	81	90	95	98	100	

On remarque que malgré la durée de 5 mois dans le domaine Sahélien, deux mois seulement concentrent en fait près de 75 % de l'eau précipitée. Le domaine Nord-Soudanien concentre plus de 75 % de l'eau tombée en trois mois alors que la saison pluvieuse dure 6 mois. Le domaine Sud-Soudanien concentre près de 90 % du total de la saison pluvieuse en 4 mois, et il faut 6,7 mois dans la région Guinéenne pour atteindre 95 % du total précipité.

*

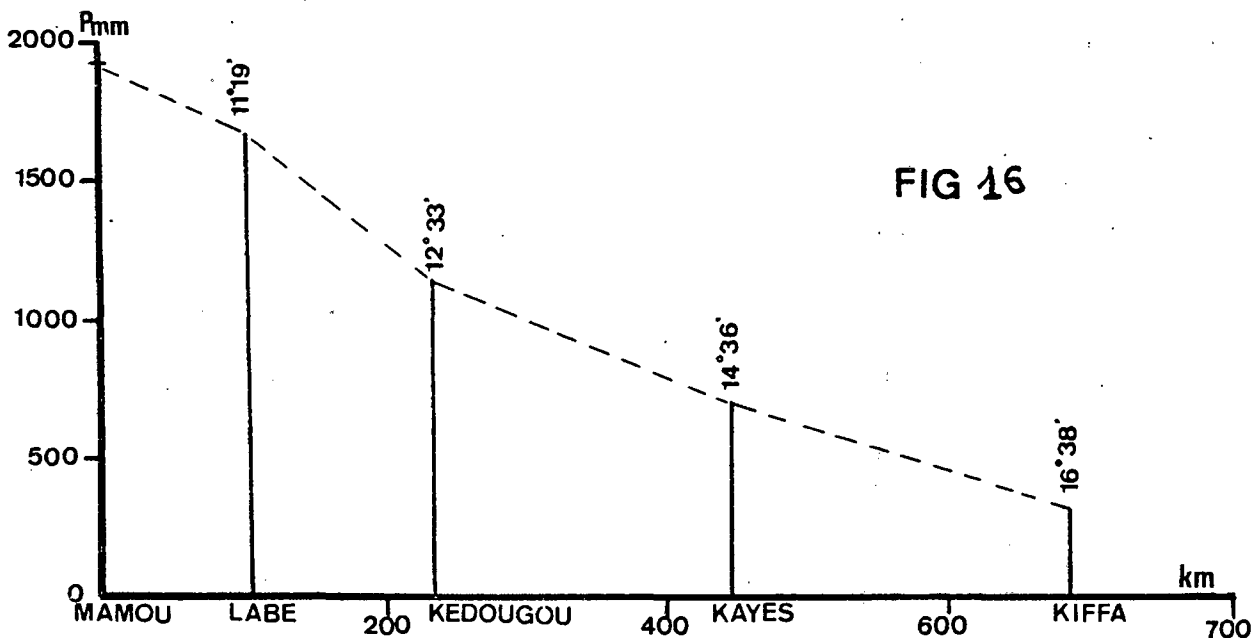
* *

Pour le compte de la décroissance Sud-Nord, on peut mettre en évidence :

- la diminution des modules pluviométriques, progressive entre la région guinéenne, le domaine Sud-soudanien et le domaine Nord-soudanien, puis brutale vers le domaine sahélien ;
- la diminution de la longueur de la saison pluvieuse, d'où une meilleure répartition de l'abondance annuelle entre les mois de saison pluvieuse, mais une répartition de plus en plus inégale vers le Nord, aboutissant à l'extrême concentration de la pluie en 5 mois dans le domaine sahélien où 2 mois peuvent recevoir les 3/4 de l'eau précipitée.

Enfin, le profil pluviométrique ci-après résume les résultats des calculs. Il montre la variabilité spatiale de l'abondance moyenne annuelle de la pluie.

PROFIL PLUVIOMETRIQUE MOYEN



Les modules pluviométriques interannuels aussi connaissent une grande variabilité.

2. La variabilité interannuelle

Elle peut se mesurer par le coefficient de variation interannuelle donnée par l'expression :

$$C.V = \frac{V}{\bar{P}}$$

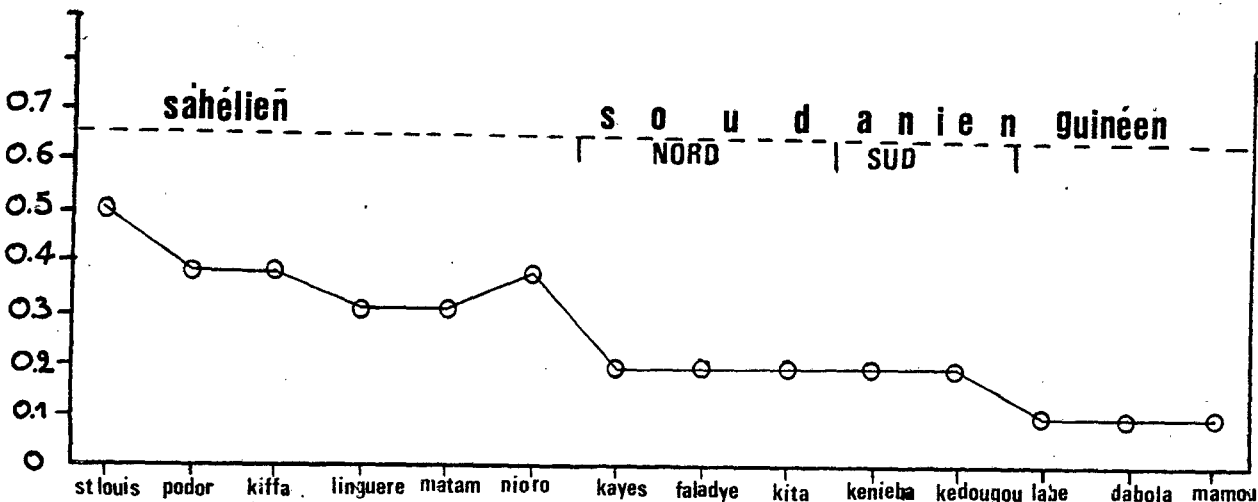
où V est l'écart type de la série
et \bar{P} la pluie moyenne annuelle.

La figure n° 17 montre l'évolution de ce coefficient.

La variation interannuelle ne dépasse pas 0,1 dans la Région guinéenne.

Elle reste faible encore dans le domaine Soudanien Sud et Nord (0,2), mais augmente dans le domaine Sahélien qui connaît la plus grande variabilité de ces modules déjà faibles par rapport au reste du bassin.

FIG 17 EVOLUTION DU COEFFICIENT DE VARIATION ANNUEL



Cette variabilité interannuelle se perçoit mieux encore à travers les courbes de variabilité interannuelles (figures n° 18 et 19).

Les courbes traduisent la réalité d'une grande variation interannuelle combinant des " pics " correspondant aux années très humides et des " creux " correspondant aux années déficitaires, le tout consacrant une évolution en " dents de scie ".

La variabilité interannuelle peut se mesurer aussi à travers l'intervalle de variation qui est la différence entre les observations extrêmes (1).

Le tableau n° 11 montre que cet intervalle est partout important. Mais il dépend plus d'une précipitation annuelle très élevée que d'un déficit prononcé. A croire qu'une année fortement pluvieuse devient une exception et

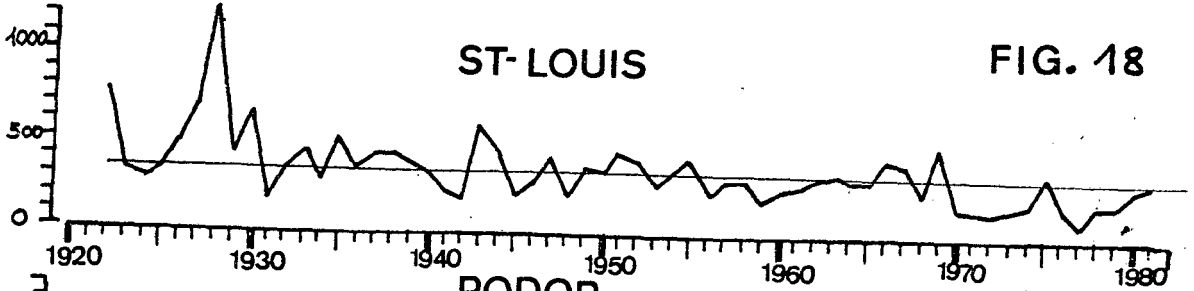
(1) Pluie maximale maximorum - Pluie minimale minimorum.

VARIABILITE INTERANNUELLE DE LA PLUVIOMETRIE

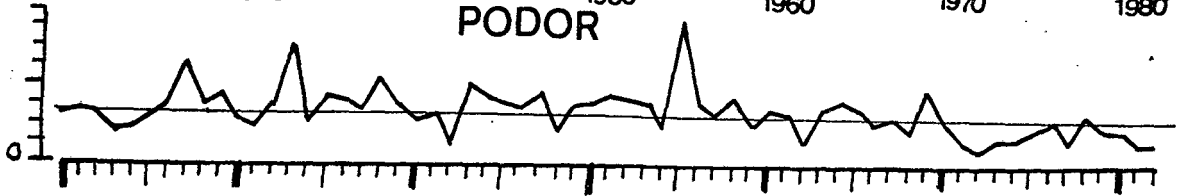
P_{mm}

FIG. 18

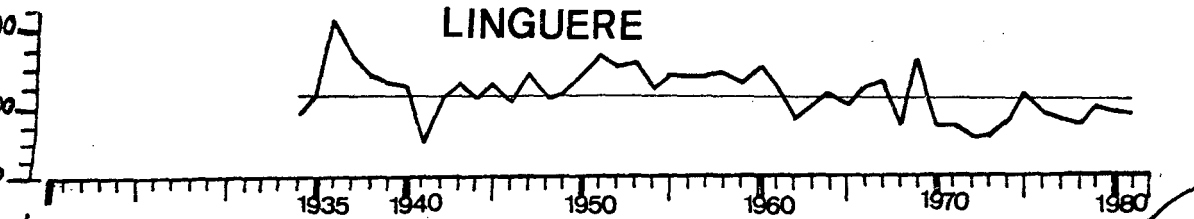
ST-LOUIS



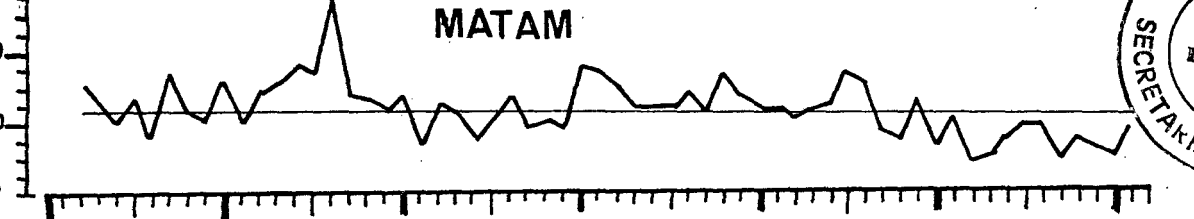
PODOR



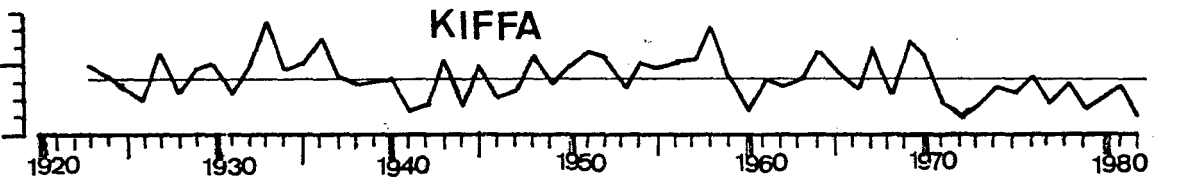
LINGUERE



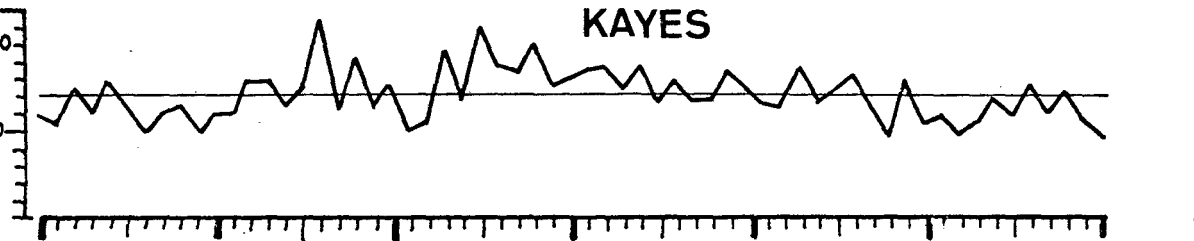
MATAM



KIFFA



KAYES



NIORO DU SAHEL

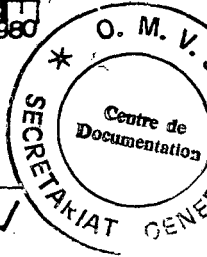
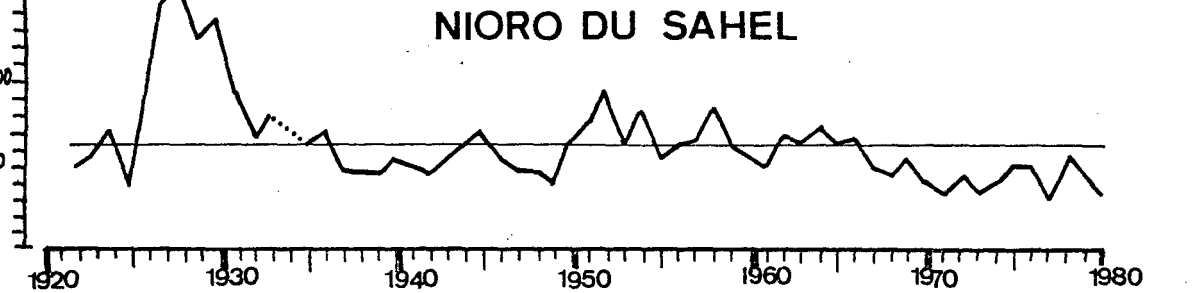
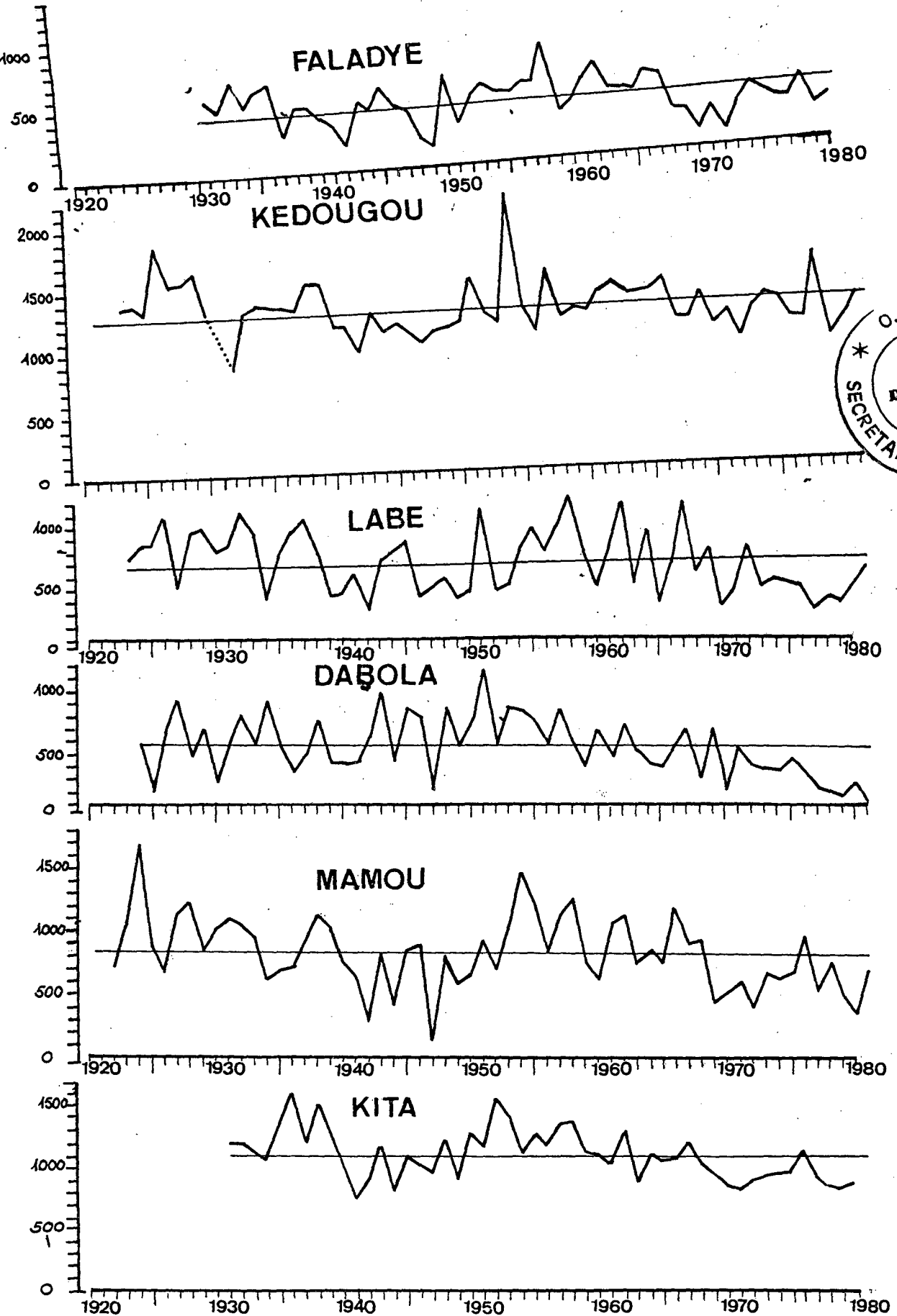


FIG. 19



que la règle serait plutôt un déficit. Néanmoins la variabilité interannuelle peut être considérée comme un caractère commun, car elle intéresse tout le bassin, quelque soit l'importance de la pluie annuelle. Cependant, ce caractère commun montre plutôt une évolution à la baisse des modules annuels à partir de 1970. Le début de ce déficit varie d'une année ou de deux en fonction de la station : Matam, 1969 ; Nioro du Sahel, 1966 ; Kita, 1968 ; Faladye, 1967 ; Kédougou, 1966 ; Labé, 1969 ; Dabola, 1969 ; Mamou, 1968.

La règle dans le bassin est à la variabilité interannuelle mais les caractères de ce déficit, sa profondeur et surtout sa durée montrent bien que c'est une péjoration pluviométrique qui, combinée aux autres facteurs, la hausse de l'évaporation, la baisse de l'humidité relative, le déficit d'écoulement, constitue ce que l'on appelle "La Sécheresse".

La grande variabilité interannuelle est associée à une variabilité intermensuelle importante. Le tableau n° 11 montre que les mois de saison sèche ont un coefficient de variation très élevé. Il n'est pas nul car nous l'avons dit, certains mois peuvent enregistrer des précipitations. En revanche, les mois de saison des pluies connaissent une variabilité moins grande et les coefficients mensuels de variation peuvent être plus élevés que ceux de la pluie annuelle.

Du Nord au Sud du bassin, le nombre de mois à coefficient élevé diminue. En fait, ces coefficients traduisent, d'une autre manière, la réalité de la répartition intermensuelle et de l'abondance pluviométrique.

Ces variations interannuelles et intermensuelles peuvent se compléter par l'étude des pluies fréquentielles.

3. Les précipitations fréquentielles

Elles sont déterminées à partir des lois de distribution des modules pluviométriques annuels et mensuels.

Pour ce faire, toujours en fonction de la loi normale, on procède à un rangement par ordre croissant des modules après anamorphose en logarithme ou en racine pour notre bassin, et on détermine ainsi les fréquences au non-dépassement selon la formule

$$\frac{I - 1/2}{N}$$

I étant le rang et N le nombre d'observation de l'échantillon.

L'estimation d'un quantile est donnée par la formule

$$\text{Log } P_F = \text{Log } \bar{P} \pm U \sqrt{V}$$

ou

$$\sqrt{P_F} = \sqrt{P} \pm U \sqrt{V}$$

Ces formules s'appliquent à notre bassin où

- P_F = pluie fréquentielle cherchée ;
- \bar{P} = la précipitation moyenne ;
- \sqrt{V} = l'écart-type de la série d'observation ;
- U = la variable réduite de Gauss : selon sa valeur et son signe la table de Gauss donne la fréquence au non-dépassement.

La durée de récurrence d'une précipitation est donnée par l'expression

$$T = \frac{1}{1 - F}$$

où T = durée de retour et F = la fréquence au non-dépassement.

Nous avons déterminé les précipitations et leurs durées de retour suivants pour U positif en année humide et U négatif en année sèche.

Tableau n° 12. Valeurs de la variable " U " à diverses fréquences.

Fréquence	Année humide		Année sèche	
	F	U	F	U
Biennale	0,50	0,00	0,50	0,00
Quinquennale	0,80	0,84	0,20	- 0,84
Décennale	0,90	1,28	0,10	- 1,28
Vicennale	0,95	1,64	0,05	- 1,64
Cinquantennale	0,98	2,05	0,02	- 2,05
Centennale	0,99	2,32	0,01	- 2,32

Pour évaluer l'erreur-type sur l'estimation des quantiles, on calcule l'intervalle de confiance I.C dans lequel se situent les valeurs fréquentielles à une probabilité donnée (voir figures n° 14 et 15).

Les tableaux n° 13, 14, 15 donnent toutes les estimations fréquentielles des pluies moyennes annuelles et moyennes mensuelles. Le coefficient K_3 d'irrégularité interannuelle ou intermensuelle est estimé à partir du rapport suivant :

$$K_3 = \frac{P_F 0,90}{P_F 0,10}$$

(tableau n° 12).

STATIONS	PERIODE SECHE					M	σ	Me	PERIODE HUMIDE				
	DUREE RETOUR	F:0.01 100	F:0.02 50	F:0.05 20	F:0.10 10				F:0.2 5	F:0.5	F:0.8 5	F:0.90 10	F:0.95 20
ST LOUIS 60ans	75	96	132	169	221	338	4.20348	334	481	565	639	720	792
PODOR 63ans	106	118	139	161	192	268	LOG 0.38847	279	374	446	514	606	674
KIFFA 59ans	90	110	142	175	219	347	3.57572	321	433	501	560	631	681
LINGUERE 48ans	203	228	268	306	356	462	3.12066	483	582	650	709	778	826
MATAM 60ans	169	196	241	284	342	467	3.7129	477	611	694	767	853	913
KAYES 61ans	430	455	495	534	585	696	LOG 0.20795	739	829	909	979	1067	1128
NIORO DU SAHEL 58ans	192	229	291	352	434	615	4.70956	620	826	949	1057	1186	1275
KITA 50ans	719	754	811	866	936	1087	LOG 0.17835	1094	1263	1366	1456	1567	1644
FALADYE 50ans	632	664	716	765	829	966	LOG 0.18290	999	1127	1221	1304	1406	1477
KENIEBA 37ans	790	834	905	973	1063	1259	LOG 0.20112	1276	1491	1629	1751	1901	2007
LABE 59ans	1195	1242	1317	1387	1477	1666	LOG 0.14335	1741	1879	2002	2108	2235	2324
DABOLA 58ans	1101	1149	1218	1285	1372	1554	LOG 0.14879	1575	1761	1880	1984	2109	2195
KEDOUGOU 58ans	872	911	974	1033	1110	1273	LOG 0.16292	1271	1459	1568	1662	1777	1857
MAMOU 60ans	1363	1418	1507	1590	1697	1921	LOG 0.14806	1924	2176	2322	2449	2603	2708

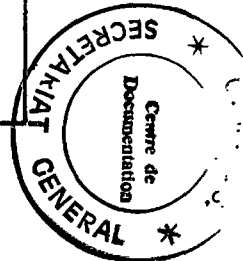
I.C A 95%	IK.
ENTRE	
96 - 718	3.3
121 - 595	2.8
113 - 623	2.9
233 - 769	2.1
201 - 843	2.4
459 - 1055	1.7
236 - 1171	2.7
761 - 1553	1.6
670 - 1393	1.6
842 - 1882	1.7
1251 - 2219	1.4
1154 - 2092	1.5
919 - 1763	1.5
1429 - 2583	1.5

M: MOYENNE Me: MEDIANE σ: ECART I.C A 95% : INTERVALLE DE CONFIANCE A 95% = M ± 2σ

IK: COEFFICIENT D'IRREGULARITE = PF 0.90 / PF 0.10

LOI NORMALE : PF = M ± U.σ U: VARIABLE REDUITE DE GAUSS U 5ans = 0.84 U 10ans = 1.28 U 20ans = 1.64

U 50ans = 2.05 U 100ans = 2.32



a) Les pluies fréquentielles annuelles

Les estimations sont données dans le tableau n° 13. On observe que le coefficient K_3 d'irrégularité évolue en augmentant du Sud vers le Nord du bassin. Dans le tableau n° 14, nous calculons la durée de retour en période humide des précipitations extrêmes, maximales et minimales.

Les durées de retour varient d'une station à l'autre. Mais à l'exception de la station de Mamou, les années sèches extrêmes reviennent plus rapidement que les années extrêmes humides.

Les stations de St Louis, de Kédougou et de Labé ont la durée de retour de leur record humide " indéterminable ". En effet, la variable U prend des valeurs trop fortes, ce qui nous laisse supposer que ces totaux d'années très pluvieuses sont très exceptionnels ou alors ils sont aberrants.

Tableau n° 14. Durée de retour des précipitations extrêmes d'après une anamorphose de la loi normale.

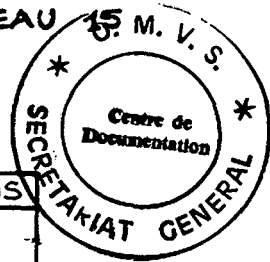
P(mm)	Maxi.	Durée de retour	Mini.	Durée de retour
St Louis	1 239	?	102	40 ans
Podor	793	300 ans	98	170 ans
Kiffa	663	75 ans	100	68 ans
Linguère	854	150 ans	205	100 ans
Matam	1 112	?	175	80 ans
Nioro	1 579	+ 100 ans	299	20 ans
Kayes	1 136	+ 100 ans	481	25 ans
Faladye	1 397	45 ans	623	120 ans
Kita	1 620	77 ans	766	40 ans
Kéniéba	1 914	50 ans	839	45 ans
Kédougou	2 160	?	836	200 ans
Labé	2 159	?	1 322	2 ans
Dabola	2 180	86 ans	1 148	47 ans
Mamou	2 801	180 ans	1 248	550 ans

ASSIN DU FLEUVE SENEGAL

TABLEAU

ETUDE FREQUENTIELLE DES PLUIES MOYENNES
MENSUELLES DES MOIS DE DEBUT, DU MAXIMUM
ET DE LA FIN DE LA SAISON DES PLUIES

PRES ANAMORPHOSE DELA LOI NORMALE EN RACINE ET LOI LOG-NORMALE



CODE	SECHE					MOYEN	HUMIDE					STATIONS
	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2		0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	
PERIODE DE RETOUR	100ans	50	20	10	5		5	10	20	50	100	ans
DEBUT: JUIN	-	-	-	-	2	10	25	35	45	58	68	ST LOUIS 1922 - 1981
MAXIMUM: AOUT	3	8	20	36	62	130	223	281	334	401	447	
FIN: OCTOBRE	-	-	-	1	6	25	57	80	101	128	147	
DEBUT: JUIN	-	-	-	1	4	15	32	43	54	67	77	PODOR 1920 - 1982
MAXIMUM: AOUT	8	14	25	53	56	103	164	201	235	276	305	
FIN: OCTOBRE	-	-	-	1	4	16	38	52	66	84	97	
DEBUT: JUIN	-	1	2	5	10	22	39	50	60	73	82	KIFFA 1923 - 1982
MAXIMUM: AOUT	18	25	38	52	71	118	176	212	243	281	307	
FIN: OCTOBRE	-	-	-	-	2	14	35	50	63	82	95	
DEBUT: JUIN	-	-	-	3	7	23	47	63	78	97	111	LINGUERE 1924 - 1981
MAXIMUM: AOUT	34	45	63	82	109	169	243	287	326	374	406	
FIN: OCTOBRE	-	-	-	1	9	33	74	101	126	159	183	
DEBUT: JUIN	-	-	2	5	13	35	68	90	111	136	155	MATAM 1922 - 1981
MAXIMUM: AOUT	32	43	62	81	108	171	249	295	336	386	420	
FIN: OCTOBRE	-	-	-	2	6	22	48	65	82	102	117	
DEBUT: MAI	-	-	-	-	4	19	42	59	74	94	108	KAYES 1920 - 1980
MAXIMUM: AOUT	71	85	108	130	160	226	303	348	387	434	467	
FIN: OCTOBRE	-	-	2	5	12	35	68	91	111	138	155	
DEBUT: MAI	-	-	-	-	-	7	31	50	69	94	113	NIORO 1922 - 1980
MAXIMUM: AOUT	24	36	60	86	125	217	334	406	470	548	603	
FIN: OCTOBRE	-	-	1	3	7	22	43	58	71	88	100	
DEBUT: AVRIL	-	-	-	-	2	10	24	34	44	56	65	KITA 1931 - 1980
MAXIMUM: AOUT	161	175	198	220	252	324	417	477	531	601	652	
FIN: OCTOBRE	-	2	8	15	28	61	113	144	173	208	234	
DEBUT: AVRIL	-	-	-	1	4	11	22	29	35	44	50	FALADYE 1931 - 1980
MAXIMUM: AOUT	104	115	136	157	187	260	363	433	499	586	654	
FIN: OCTOBRE	-	1	4	10	20	49	90	116	140	170	192	
DEBUT: AVRIL	-	-	1	2	4	8	15	20	24	29	32	KENIEBA 1944 - 1980
MAXIMUM: AOUT	157	172	201	230	271	371	508	599	685	798	876	
FIN: NOVEMBRE	-	-	-	1	3	10	22	30	37	47	54	
DEBUT: MAI	-	-	2	6	14	38	73	96	117	143	162	KEDOUGOU 1923 - 1981
MAXIMUM: AOUT	154	168	190	213	244	316	410	469	524	595	647	
FIN: NOVEMBRE	-	-	-	1	4	16	38	52	66	84	97	
DEBUT: AVRIL	-	-	1	4	11	35	72	97	120	149	170	LABE 1923 - 1981
MAXIMUM: AOUT	205	219	241	263	292	357	437	485	529	583	622	
FIN: NOVEMBRE	-	-	-	2	8	31	69	95	119	150	172	
DEBUT: MARS	-	-	-	1	5	20	46	64	80	101	117	DABOLA 1924 - 1981
MAXIMUM: AOUT	166	180	204	228	260	335	433	494	551	624	677	
FIN: NOVEMBRE	-	-	2	5	10	28	53	69	84	104	117	
DEBUT: MARS	-	-	1	4	11	33	66	88	108	134	152	MAMOU 1922 - 1981
MAXIMUM: AOUT	258	273	297	319	349	415	493	539	580	631	667	
FIN: DECEMBRE	-	-	-	-	2	12	30	43	54	69	80	

DEBUT ET FIN DE SAISON DES PLUIES : LOI RACINE NORMALE

MAXIMUM : LOI RACINE NORMALE SAUF POUR : KITA - FALADYE - KENIEBA KEDOUGOU

LABE - DABOLA - MAMOU : LOI LOG-NORMALE

b) Les pluies fréquentielles mensuelles

Nous n'avons calculé que les pluies fréquentielles des mois de début, du maximum et de la fin de la saison des pluies. Ils sont les plus caractéristiques car les autres mois ne reçoivent pratiquement pas de pluie.

C'est un comptage simple qui nous permet de déterminer ces mois, autrement dit la fréquence maximale détenue par un mois.

Si la pluie débute au cours d'un mois et se poursuit les mois suivants jusqu'au maximum, ce mois est effectivement celui du début.

Pour le mois considéré comme la fin de la saison des pluies, il faut qu'aucune pluie ne survienne le mois immédiatement suivant.

Les pluies fréquentielles des mois de début et de fin de saison des pluies s'annulent dès que la fréquence de retour en année sèche dépasse 5 ans, bien que nous n'ayons tenu compte que des précipitations positives. Cela a réduit l'échantillon de valeurs car ces mois connaissent souvent des précipitations nulles. (Tableau n° 15).

Nous donnons dans le tableau suivant le coefficient K_3 d'irrégularité du mois du maximum, août, qui lui ne s'annule jamais même si la fréquence centennale peut être très faible en domaine sahélien.

Tableau n° 16. Coefficients d'irrégularité interannuelle (mois d'août).

Stations	Moyennes	K ₃	Stations	Moyennes	K ₃
St Louis	148 mm	7,8	Kita	338 mm	2,2
Podor	113 mm	3,5	Faladye	301 mm	2,7
Kiffa	126 mm	4,1	Kéniéba	398 mm	2,6
Matam	182 mm	3,6	Kédougou	330 mm	2,2
Linguère	179 mm	3,5	Labé	367 mm	1,8
Kayes	234 mm	2,7	Dabola	350 mm	2,2
Nioro du Sahel	235 mm	4,7	Mamou	424 mm	1,7

Le coefficient d'irrégularité interannuelle évolue du Sud du bassin au Nord sahélien qui connaît les plus grandes valeurs de ce coefficient. Cette irrégularité illustre bien la variabilité des précipitations dans le bassin.

*

* *

Cette analyse met en évidence la variabilité des modules pluviométriques, variabilité dans le temps pouvant prendre un aspect extrême de sécheresse, répartition inégale : autant de caractères de la pluviométrie qui vont avoir des conséquences sur l'écoulement, d'autant plus que l'on peut dire que les dernières années s'installent dans une période pluvieuse déficitaire.

Mais les principales caractéristiques de la pluie sont liées à des facteurs locaux qui s'insèrent dans un cadre plus général, la circulation atmosphérique.

L'analyse des mécanismes nous permettra de situer l'origine ou les diverses

origines de l'eau précipitée, après quoi nous définirons les régimes pluviométriques saisonniers du Bassin du Sénégal.

D/ LE MECANISME DES PRECIPITATIONS ET LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES SAISONNIERS

Le Bassin du Fleuve Sénégal, par sa situation géographique entre 10° 20' N et 17° N et 7° W et 12° 20' W, participe de la zone intertropicale. Le climat est lié à la connaissance des mécanismes généraux de la circulation atmosphérique (Fig. n° 20).

1. Le mécanisme des précipitations

La circulation locale procède d'un mécanisme simple. Elle est liée à l'interaction de 3 centres d'action et de l'existence de discontinuités, zones de contact entre les masses d'air issues de ces cellules anticycloniques.

a) Les centres d'action

Il s'agit de l'anticyclone des Açores dans l'Atlantique Nord et de l'anticyclone de Ste Hélène dans l'Atlantique Sud. Ces deux cellules sont permanentes, stables et dynamiques (Figures n° 20 et 21).

Le troisième centre d'action, en revanche, est saisonnier et d'origine thermique. Il ne subsiste au sol qu'en hiver de l'hémisphère Nord, période pendant laquelle il reçoit de grands renforts thermiques. Il est centré au Sahara (d'où ses diverses appellations : lybien, maghrébin). En été de l'hémisphère Nord, l'anticyclone saharien est remplacé au sol par une dépression dont la puissance aspiratrice lui fait jouer un rôle essentiel (Fig. n° 20 et 21).

Ces trois centres d'action en surface constituent des cellules isobariques, mais en altitude ils forment une ceinture unique.

FIG. 20

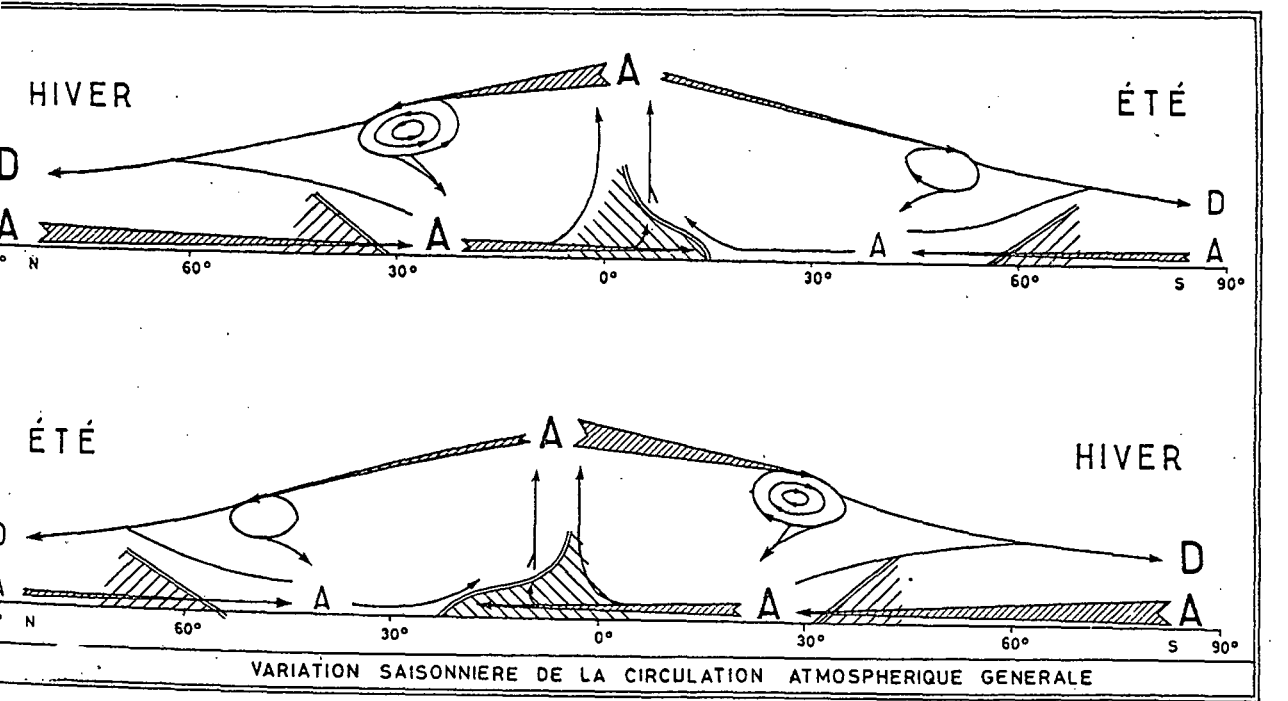
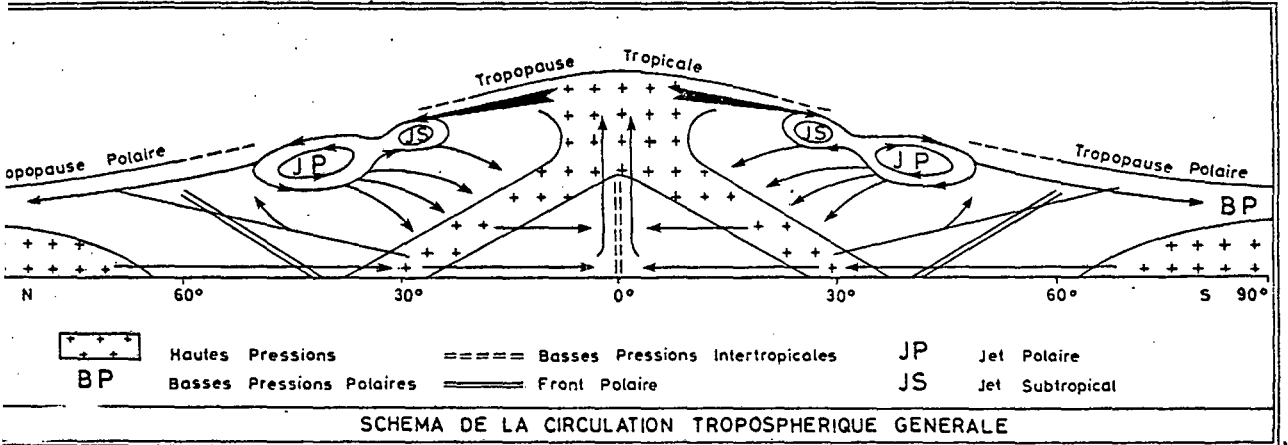


FIG. 21

d'après M. Leroux (1973)

b) Les masses d'air

Le bassin est intéressé par deux types de masses d'air :

- l'alizé : il provient des cellules anticycloniques et, en fonction de son trajet, on lui donne un épithète pour spécifier ses nouveaux caractères hérités. Ainsi nous parlerons de l'alizé maritime (ALm), de l'alizé maritime continentalisé (ALm.c) ou de l'harmattan (alizé continental ALc). L'ALm et l'ALm.c viennent de l'anticyclone des Açores. L'harmattan, l'ALc, vient de l'anticyclone saharien ;
- la mousson : c'est de l'alizé natif qui est issu de l'anticyclone de Ste Hélène. Après passage de l'Equateur, en raison de la force de Coriolis, il change de direction et aborde l'Afrique Occidentale selon une direction Sud-ouest - Nord-est.

Ainsi, on parle de la mousson qui est un phénomène d'été, et des alizés.

c) Les discontinuités

Ce sont les zones de contact entre deux masses d'air d'origines et de caractères différents (Fig. n° 20 et 21).

La principale discontinuité de la région est l'Equateur Météorologique que l'on trouve sur le continent en sa structure F.I.T, Front Intertropical. Le F.I.T constitue la discontinuité entre la mousson du Sud-ouest et les alizés ALm, ALm.c ou ALc.

Une autre discontinuité est appelée D.AL et constitue la limite d'orientation plus ou moins méridienne entre deux alizés de caractères différents, ALm ou ALm.c et ALc (Fig. n° 23), d'où son nom de D.AL, discontinuité d'alizés.

Les différences se situent au niveau de l'humidité et des températures. Cette différence de températures entre les deux flux fait que la D.AL se transforme en inversion d'alizé I.AL. Cependant, ces zones de contact

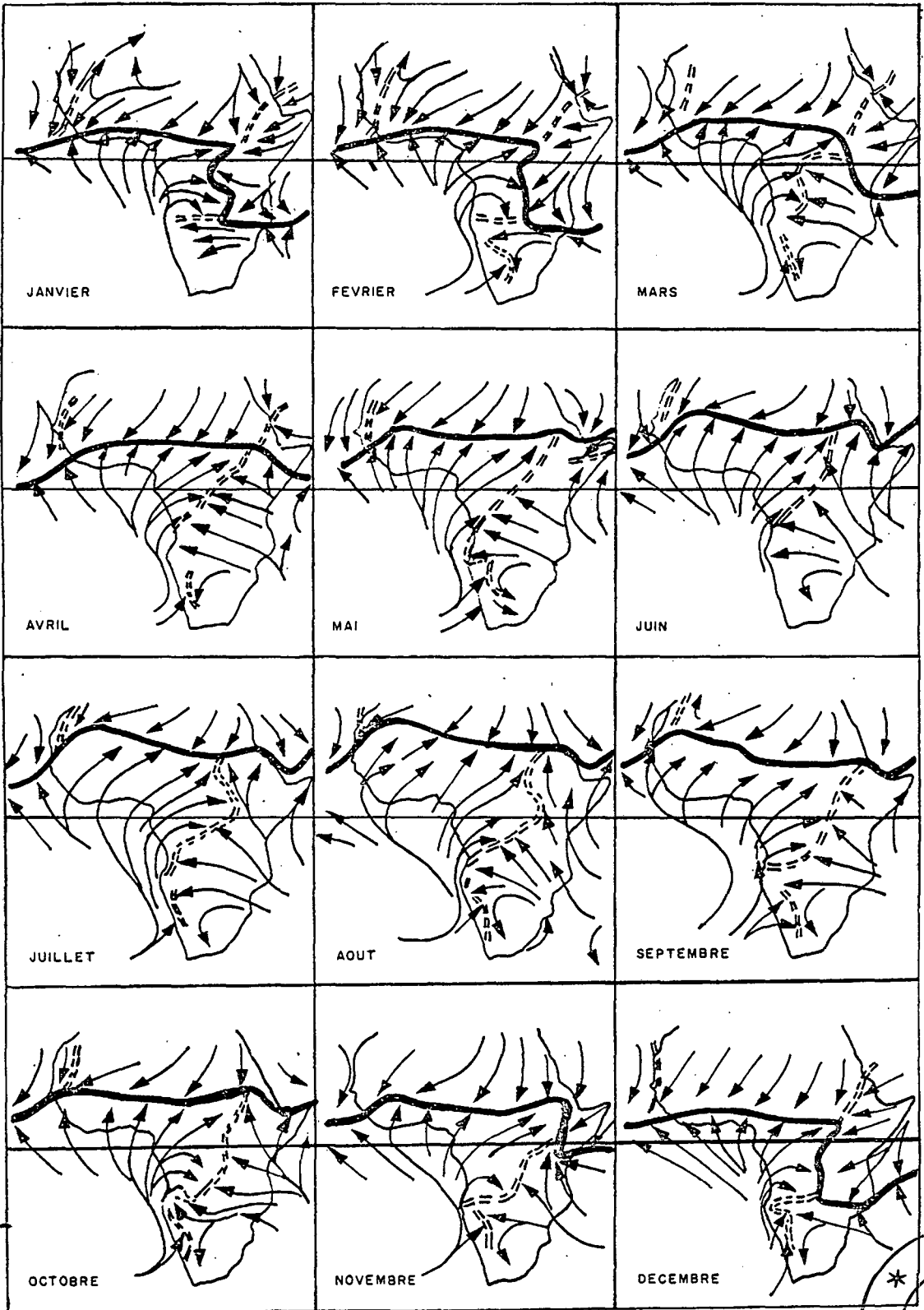
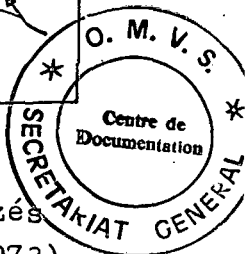


FIG. 22

POSITIONS MOYENNES DU F.I.T

D. al : Discontinuité d'alizés
d'après R. Garnier (1973)



(D.AL ou I.AL) intéressent la côte occidentale de l'Afrique où le bassin du Sénégal est très peu représenté.

Ainsi le Bassin du Sénégal apparait comme une zone-tampon dont le climat est lié aux conditions météorologiques qui prévalent dans les deux hémisphères.

Or les centres d'action connaissent un phénomène migratoire en fonction des saisons thermiques extrêmes : hiver et été (Fig. n° 21).

L'Equateur Météorologique en sa structure F.I.T, celle qui nous intéresse et qui est une composante de la circulation atmosphérique générale, connaît aussi le même balancement saisonnier. Nous présentons dans la figure n° 22 les positions successives en cours d'année de cette discontinuité, figure que nous empruntons à R. GARNIER (1973).

Les conséquences de cette organisation générale et la migration saisonnière, pour le Bassin du Sénégal, sont les suivantes :

1) la prédominance pendant une période de l'année des alizés :

- l'ALm : son trajet maritime lui confère une certaine humidité et une fraîcheur sensibles. En revanche, sur le continent, il s'assèche et devient de l'alizé maritime continentalisé ALm.c ;
- l'ALc ou harmattan : il est chaud et sec (humidité relative 10 %, température 40° C environ en moyenne) ;

2) la domination du flux de mousson de l'Atlantique Sud, chaud et humide, pendant l'autre partie de l'année. La mousson arrive dans la région avec la remontée vers le Nord du F.I.T qui constitue sa limite septentrionale.

Entre ces deux périodes existent de brèves périodes intermédiaires, périodes de transition qui marquent le balancement de la circulation d'une saison à l'autre.

Ainsi, les régions les plus méridionales du bassin verront d'abord arriver la mousson qui, avec le F.I.T, intéresse :

- la région guinéenne dès le mois de mars ;

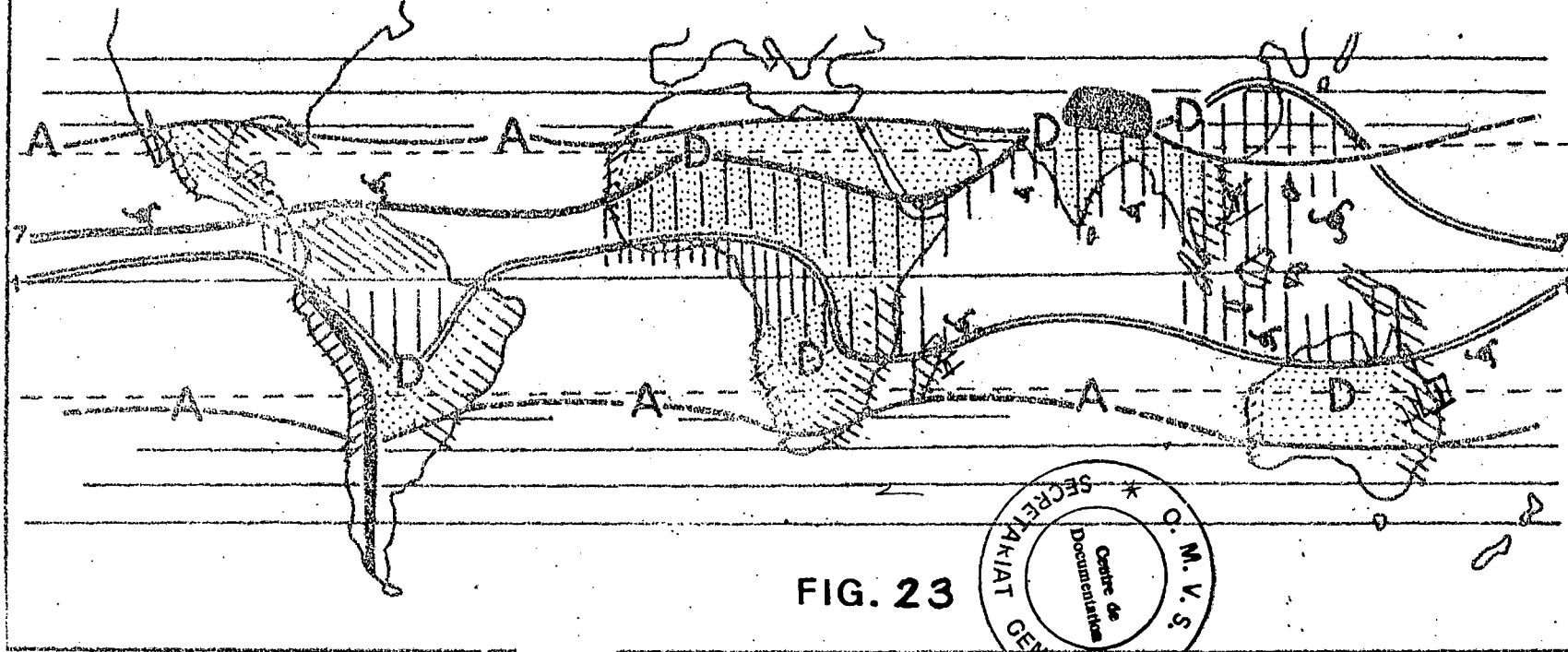



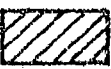


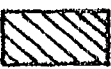
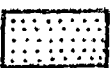



FIG. 23

 <p>Roiaf d'échelle synoptique</p>	<p>Limite de pénétration moyenne des perturbations des Fronts Polaires (en Hiver)</p> 	<p>Positions moyennes de l'Equateur Météorologique</p> <p>1 Janvier</p> <p>7 Juillet</p>	<p>- Masses d'air -</p>
<p>A Anticyclones dynamiques permanents</p>	<p>Zones de déplacement des Fronts Polaires</p>  <p>Perturbations dominantes d'hiver</p>	<p>Limite moyenne de masses d'air</p>	 <p>Alizé maritime stable (type I)</p>
<p>D Dépressions thermiques continentales (Ete) ou Anticyclones à vent fort thermique (Hiver)</p>	 <p>Zone d'activité cyclonique tropicale</p>	 <p>Mousson et "mousson" permanentes</p>	 <p>Alizé maritime instable (type II)</p>
			 <p>Alizé continentalisé ou Alizé continental</p>
			 <p>Circulation de mousson (Ete)</p>

FACTEURS DYNAMIQUES ET PERTURBATIONS DANS LA ZONE INTERTROPICALE d'après M. Leroux (1976)

- le domaine Sud-soudanien vers le mois d'avril ;
- le domaine Nord-soudanien à partir du mois de mai ;
- et le domaine sahélien seulement vers le mois de juin.

Le F.I.T atteint sa position la plus septentrionale au mois d'août, mois pendant lequel on peut dire que tout le bassin baigne dans le flux de mousson. Le retrait du F.I.T se fait aussitôt après, en septembre, et il est plus rapide que la remontée.

Or, le flux de mousson est le principal vecteur de l'humidité dans la région, humidité précipitée par les perturbations. C'est de son épaisseur que dépendent les quantités de pluies tombées.

Ainsi, l'arrivée et le retrait de la mousson explique la durée de la saison pluvieuse en fonction des domaines climatiques, et donc inversement la durée de la saison non pluvieuse appelée " saison sèche ".

2. L'eau précipitée

a) En saison dite sèche

C'est la saison où dominant les alizés dans le bassin. La frange maritime, donc une partie infime du bassin, est intéressée par l'ALm et l'ALm.c . La discontinuité constituée par ces deux flux avec l'ALc issu de l'anticyclone saharien (D.AL ou I.AL) annihile toute vellité de développement nuageux, d'autant plus que c'est la strate inférieure de l'ALm qui est humide. Aussi l'ALm issu des Açores se stabilise : il est responsable du désert froid côtier allant du Nord-ouest de la Mauritanie et se prolongeant sur les côtes Nord du Sénégal. Il s'agit là du domaine climatique baptisé climat d'alizé de type I (chapitre VI). L'humidité de l'ALm est déposée sous forme de rosée et non précipitée.

Dans le reste du bassin, c'est surtout l'harmattan (ALc) qui domine la circulation. Dynamiquement il peut donner des pluies mais il est sec. Il se déplace par poussée " surge ", soulevant le sable, et détermine un type de temps chaud et sec.

La durée du règne des alizés détermine la durée de la saison dite sèche (Fig. n° 23).

La saison ne connaît que des pluies survenant à la faveur de l'arrivée d'une perturbation extratropicale, le Front Polaire, qui donne des pluies faibles appelées pluies de Heng ou pluies des Mangués ou pluies d'invasions d'air d'origine polaire (A. SECK, 1962 ; M. LEROUX, 1968 ; J. LEBORGNE, 1979).

Ces pluies intéressent les mois de décembre, janvier et février. L'arrivée des perturbations s'accompagne de températures plus basses. Mais au total, ces pluies restent très faibles.

b) En saison des pluies

Avec la remontée du F.I.T arrive le flux de mousson avec des potentiels précipitables dont l'importance dépend de l'épaisseur du flux. Sa présence dans la région détermine la durée de la saison pluvieuse (Fig. n° 23).

L'utilisateur principal de l'eau de la mousson est la Ligne de Grains (1), improprement appelée souvent tornade (M. LEROUX, 1976).

La ligne de grains se développe à la faveur de l'arrivée d'un noyau d'Est dans le flux de mousson. Si la mousson atteint une épaisseur importante (plus de 1 000 m), le conflit entre ces deux masses d'air de caractères nettement opposés développe la perturbation qui évolue ensuite d'Est vers l'Ouest.

Le courant d'Est est un alizé continental issu des hautes pressions subtropicales boréales, continuellement renforcé par des expulsions d'air polaires sous forme de noyaux de vents d'Est qui pénètrent la mousson "comme l'étrave d'un navire" (M. LEROUX, 1976).

(1) Ligne de Grains : grain est un terme marin qui signifie pluie. Ici, un système organisé de vent, nuages et de pluie.

Son passage est précédé par une chute de pression, des formations nuageuses de type cumulonimbus, d'un brusque changement de la direction du vent qui passe de Sud-ouest à Est et de précipitations orageuses.

Mais la perturbation peut ne pas donner de pluie car elle n'utilise pas ce qu'elle trouve sur place, d'où l'inégale répartition des précipitations. Par exemple, dans le désert, la ligne des grains soulève le sable et donne un type de temps particulier connu sous le nom de " Haboob ".

Après passage de la perturbation, on observe une chute de la température sans incidence notable.

Enfin, il convient de rappeler que ces mécanismes sont généraux quant à l'origine des précipitations en domaine tropical, mais des pluies peuvent être liées à des facteurs locaux comme une instabilité thermo-dynamique d'une masse d'air unique, la mousson, à la faveur de l'intervention d'un relief. Mais ces pluies sont localisées et l'importance des totaux dépend de l'épaisseur de la mousson.

3. Les régimes pluviométriques saisonniers

Ils dépendent des quantités de pluie reçue et de leur répartition annuelle (carte n° 13).

a) Le régime sahélien

La pluie moyenne annuelle est inférieure à 500 mm/an. Du reste, aucune station de base du bassin en ce domaine n'enregistre ce total.

L'année pluvieuse ne dure que 5 mois. Le F.I.T arrive dans la région au mois de juin et se retire dès septembre. Le mois d'août est le plus arrosé et concentre 38 % des précipitations. Il est suivi du mois de juillet (24 %) et du mois d'octobre (22 %). Ainsi 84 % du total annuel sont concentrés en 3 mois.

Les mois de saison sèche enregistrent de faibles précipitations liées aux invasions polaires qui atteignent " facilement " cette partie septentrionale

du bassin.

500 mm de pluie correspondent à la fréquence de retour une année sur deux en période humide.

La station de Matam est représentative de ce régime avec 480 mm/an.

La station de Kiffa est la plus septentrionale et reçoit en moyenne 328 mm/an.

La station de St Louis, malgré la proximité de la mer, ne reçoit que 355 mm/an en raison de conditions aérologiques décrites plus haut. Il s'y ajoute que le F.I.T a tendance à être parallèle au littoral dans le sens Nord-Sud et ne favorise plus l'affrontement des masses d'air. La ligne de grains apparaît comme " bloquée ". La perturbation se déplaçant d'Est vers l'Ouest, les stations les premières atteintes sont les plus arrosées. Vers l'Ouest, elle épuise petit à petit ses " forces ".

Paradoxalement, c'est la continentalité qui favorise une pluviométrie relativement plus abondante comme le montre la succession des totaux suivants:

- Niore du Sahel : 636 mm/an ; - Matam : 480 mm/an ;
- Linguère : 474 mm/an ; - Podor : 289 mm/an.

Cependant, les sites des stations favorisent aussi cette situation.

La station de Niore du Sahel, à la limite Sud du domaine sahélien, réalise la transition vers le domaine Nord-soudanien. Elle connaît déjà 6 mois de saison des pluies, un total annuel supérieur à 500 mm mais qui reste nettement inférieur aux totaux du domaine soudanien.

Enfin, le régime sahélien est un régime unimodal.

b) Le régime Nord-soudanien

Il est symbolisé par la station de Kayes : 712 mm/an. La saison pluvieuse dure 6 mois. Le maximum se situe en août qui concentre 33 % du total annuel, suivi de juillet (23 %), du mois de septembre (22 %). Ces 3 mois détiennent 78 % du total annuel.

Dès le mois de mai, les pluies commencent et augmentent jusqu'au maximum. Ainsi, la montée des pluies se fait en 4 mois. Par contre, la chute se réalise en 2 mois du fait du retrait rapide du F.I.T .

Les totaux des stations de Kita et de Faladye sont plus élevés mais ces deux stations sont nettement au Sud du domaine, plus à l'Est et sur des reliefs plus élevés.

Kita et Faladye avec respectivement 1 100 et 988 mm/an constituent bien un sous-régime de plateaux à 300 m d'altitude. Il s'y ajoute que la mousson dans cette partie du domaine, comme au Sud, garde encore sa direction générale Sud-ouest - Nord-est.

Kayes est plus à l'Ouest et est relativement à proximité du domaine sahélien.

Le régime Nord-soudanien est unimodal. (carte n° 13).

c) Le régime Sud-soudanien

Les précipitations moyennes annuelles des deux stations de base, Kédougou et Kéniéba, dépassent 1 200 mm/an, respectivement 1 285 mm et 1 290 mm. Les altitudes pourtant restent faibles : 136 et 132 m.

Le mois d'août détient le maximum (26 % à Kédougou et 31 % du total à Kéniéba). Mais, à la différence des deux premiers régimes, le mois d'août est suivi par le mois de septembre alors qu'autre part, c'était le mois de juillet. La saison des pluies est plus longue et dure 7 à 8 mois.

L'augmentation de la pluie se fait en 4 mois jusqu'au maximum, du mois d'avril au mois d'août, et la décroissance jusqu'au mois de novembre en 3 mois.

La mousson dure plus longtemps dans cette région.

Sur les premiers contreforts du Fouta-Djalou et dans le massif lui-même, le relief devient plus élevé. Les 3 stations types de cette région ont des

profils pluviométriques particuliers. On peut parler d'un sous-régime guinéen dans ce domaine Sud-soudanien.

Le sous-régime guinéen

Les précipitations dépassent 1 500 mm d'eau par année :

- Labé : 1 683 mm ;
- Dabola : 1 571 mm ;
- Mamou : 1 942 mm

pour 59 ans d'observation.

Il n'y a pratiquement pas de saison sèche. L'alizé continental n'y dure guère, les pluies d'invasions polaires presque inexistantes, ce qui témoigne des limites de pénétration du Front Polaire.

Mais ce sous-régime combine 3 styles pluviométriques.

Le style de Labé

Elle est à 1 025 m d'altitude. La pluie débute en mars et se poursuit jusqu'en décembre. Les deux premiers mois de l'année sont " secs ". Le maximum d'août (22 % du total) est suivi du mois de juillet (20 % du total), du mois de septembre (18 %), ensuite viennent le mois de juin (15 %) et le mois d'octobre (10 %).

On remarque une succession alternative des mois les plus pluvieux de part et d'autre du mois du maximum. Cela peut s'expliquer par l'existence dans cette région de vallons, de dépressions perchées d'où peuvent se développer une instabilité thermodynamique dans le flux de mousson.

Le style de Dabola

La station est à 438 m d'altitude. La saison pluvieuse dure 10 mois, comme à Labé, mais c'est décembre et janvier qui sont " secs ". Le maximum d'août se maintient, mais la pluie augmente de février au maximum et diminue en 3 mois, novembre marquant la fin des pluies.

Le style de Mamou

La station est à 783 m d'altitude. Ici, seul le mois de janvier est sec. Mamou détient le record annuel du bassin. La montée des pluies est régulière de février au maximum d'août et la décroissance se fait en 4 mois.

L'originalité de ce sous-régime réside dans la quasi-permanence de la mousson, d'une part car il n'y a pratiquement que 2 mois entre le retrait du F.I.T de cette région et sa prochaine réapparition (Fig. n° 23), d'autre part l'intervention du facteur local : la montagne du Fouta-Djalon favorise une précipitation abondante.

La mousson aborde le Fouta-Djalon selon une direction Sud-ouest - Nord-est. Sur les premières pentes se trouve la station de Mamou. L'effet orographique (et la situation en latitude) conduit à une chute importante de pluie. Odienné, station du Bassin du Niger qui se trouve pourtant à une latitude plus au Sud (9° 30' N), ne connaît que 1 628 mm/an. Cette station se trouve à 432 m d'altitude.

La montagne a tendance à canaliser davantage le flux de mousson vers le Nord-est. Ainsi Labé, bien qu'élevée, mais se situant au Nord-ouest de la montagne, connaît moins de précipitation que la station de Mamou.

Enfin, Dabola, à 438 m d'altitude, n'est ni au vent, ni sous le vent, mais parallèle à la direction de la mousson, et dans une région plus basse, ce qui explique son total encore inférieur à ceux de Labé et Mamou.

A latitude à peu près égale mais d'altitudes différentes, nous donnons les pluies moyennes de quelques stations :

- Labé	11° 19' N	1 025 m	1 660 mm/an ;
- Bougouni	11° 25' N	353 m	1 208 mm/an ;
- Sikasso	11° 19'	377 m	1 231 mm/an ;
- Mamou	10° 22'	783 m	1 939 mm/an ;
- Odienné	9° 30'	432 m	1 628 mm/an.

C'est donc bien le relief qui fait dire que le Fouta-Djalou est le " château d'eau " de l'Afrique Occidentale.

Cependant, le sous-régime guinéen reste unimodal.

Les longues séries d'observations nous ont permis ci-dessus de dégager les caractéristiques moyennes et générales de la pluviométrie du Bassin du Fleuve Sénégal.

L'analyse met en évidence la diminution de la pluie du Sud au Nord du bassin. Cette décroissance oppose le Haut-Bassin, plus arrosé, où les rivières sont mieux alimentées, et le Cours Inférieur à climat sahélien, où la pluie moyenne reste faible.

Il s'y ajoute que dans ce Cours Inférieur, le fleuve n'y reçoit aucun apport superficiel.

La lame d'eau moyenne tombée sera déterminée avec la série 1951 - 1980. Mais on peut dire que les valeurs des précipitations moyennes des domaines et régions climatiques, que nous venons d'analyser, donnent déjà une idée de la pluie moyenne qui sera reçue, et disponible pour les cours d'eau du bassin.

Cependant, la période 1951 - 1980 connaît une importante péjoration pluviométrique que nous étudions aussi.

CHAPITRE VII

LES CARACTERES EXCEPTIONNELS DE LA
PLUVIOMETRIE DANS LE BASSIN DU SENEGAL

La grande variabilité de la pluviométrie est la règle générale dans le Bassin du Fleuve Sénégal : variabilité interannuelle et intermensuelle des modules pluviométriques, variabilité de ces mêmes modules dans l'espace, enfin une variabilité qui intéresse tous les domaines climatiques, avec un coefficient plus élevé dans le domaine sahélien où la pluie est déjà faible (coefficients de variation entre 0,4 et 0,5) (cf. chapitre VI).

Certaines années connaissent une pluviométrie extrêmement importante : St Louis 1 239 mm en 1928 (moyenne 356 mm/an), Podor 793 mm en 1955 (moyenne 289 mm/an), Matam 1 112 mm en 1936 pour une moyenne de 480 mm/an, Kayes 1 136 mm en 1936 (moyenne 712 mm/an), Mamou 2 801 mm en 1924 (moyenne 1.942 mm/an).

Mais cette pluviométrie peut avoir des valeurs annuelles très faibles, souvent ridicules au regard de la moyenne annuelle : St Louis 102 mm en 1977, Podor 98 mm en 1942, Matam 175 mm en 1972, Kayes 480 mm en 1980, Mamou 1 248 mm en 1947.

Les courbes d'évolution interannuelle de la pluie (Figures n° 18 et 19) témoignent de cette évolution en " dents de scie ".

Dans cette évolution, des années excédentaires se succèdent sur une échelle de temps relativement longue : nous parlerons alors de période excédentaire ou en revanche de période déficitaire dans le cas d'une suite d'années déficitaires pluviométriquement.

Mais l'importance relative de l'excédent sur une échelle de temps donnée nous amènera à parler de période humide ou de période sèche dans le cas d'une importance relative du déficit caractérisant une suite d'années.

Ainsi une période excédentaire pour nous est à différencier d'une période humide ou à l'inverse une période déficitaire d'une période sèche.

Ce sont ces dernières périodes dites " sèches " que nous analyserons comme caractère exceptionnel de la pluviométrie en raison de leurs caractères douloureux pour la vie sous toutes ses formes, en raison de l'économie essentiellement agricole de la " région " tributaire de l'eau de la pluie, et en raison de l'aspect actuel de ce qu'il est convenu d'appeler sécheresse et dont les principaux caractères à l'heure actuelle sont rappelés par J. SIRCOULON (1976) : " ... Rigueur, persistance, extension ... ".

Cet auteur retient dans son étude pour les années récentes trois grandes périodes de sécheresse en Afrique intertropicale :

- la sécheresse des années " 1913 " (1907 - 1914) ;
- la sécheresse des années " 1940 " (1941 - 1945) ;
- et la sécheresse récente des années " 1972 " (1968 - ?).

La longueur de nos séries d'observation au niveau des stations de base ne nous permet pas d'analyser la sécheresse des années " 1913 " ; mais elle couvre les années 1940 et s'arrête à 1980, parfois même en 1981 ou 1982.

A/ ESSAI DE DELIMITATION DES PERIODES PLUVIOMETRIQUES DITES " SECHES " ET DES PERIODES DITES " HUMIDES "

L'analyse du phénomène de la sécheresse, la définition de sa longueur ne sont pas aisés en raison de la multiplicité des critères que l'on peut adopter, et notamment les indices pluviothermiques, ombrothermiques, xérothermiques ...

Elle n'est pas aisée aussi en raison d'une des principales caractéristiques de la pluie dans le bassin, sa variabilité interannuelle au sein même d'une période pluviométrique déficitaire.

Mais c'est surtout la complexité du phénomène et le fait que nous ne l'analyserons que sur un seul élément du climat, certes le plus important en

domaine tropical, la pluie, plus que la difficulté de choisir un critère d'appréciation, qui nous suggèrent une méthodologie simple qui utilise la " méthode des quantiles " combinée à l'estimation de l'écart moyen selon la formule

$$Em = \frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} \cdot 100$$

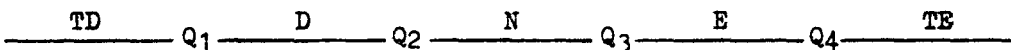
X_i = module pluviométrique d'une année ;

\bar{X} = la moyenne de la série d'année ;

Em est donnée en pourcentage.

1. Méthodologie

Grâce à la méthode des quintiles et selon l'ordre croissant des totaux pluviométriques annuels, nous avons défini 5 groupes de valeurs pluviométriques. Chaque groupe, chaque quintile représente 20 % des valeurs.



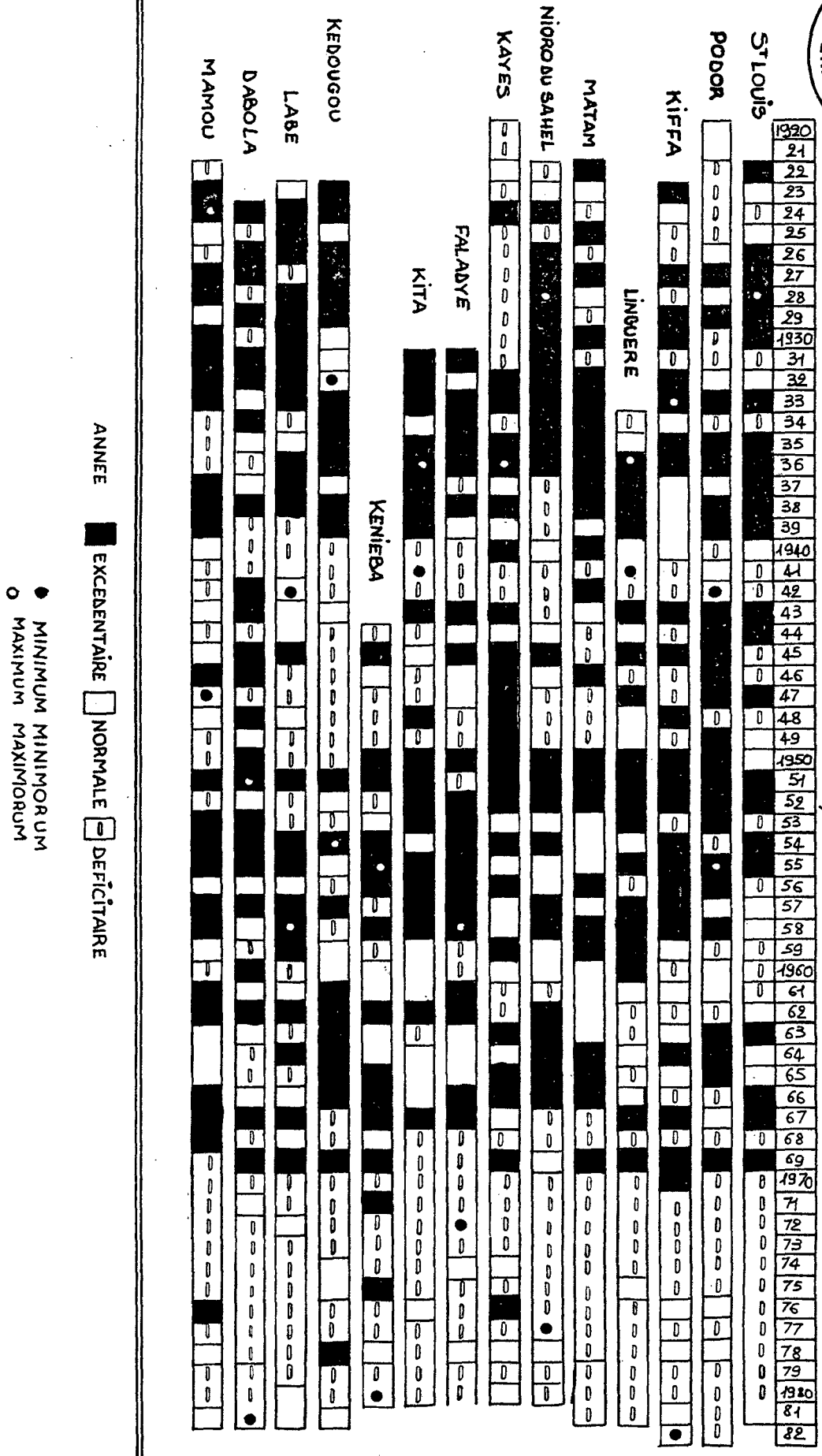
Les valeurs inférieures au 1er quintile sont caractérisées de très déficitaires : TD. Entre Q₁ et Q₂ se trouvent les valeurs déficitaires : D. Entre Q₂ et Q₃ sont représentées les 20 % de valeurs dites normales : N. Entre Q₃ et Q₄ les valeurs dites excédentaires et au delà de Q₄ se trouvent les valeurs très excédentaires.

La figure n° 24, grâce à cette démarche, donne les caractères de chaque année pluvieuse des séries d'observation retenues. Nous y avons regroupé les deux premiers quintiles Q₁ et Q₂ sous le même caractère déficitaire et les deux derniers quintiles Q₃ et Q₄ sous le caractère excédentaire. Ces deux caractères extrêmes enserrant les années caractérisées de " normales ".



* **BASSIN DU FLEUVE SENEGAL**
CARACTERISTIQUES DES SERIES PLUVIOMETRIQUES

FIG. 24



ANNEE EXCEBENTAIRE NORMALE DEFICITAIRE
 ● MINIMUM MINIMORUM
 ○ MAXIMUM MAXIMIORUM

De l'analyse de la figure n° 24, nous retenons les premières observations suivantes :

- il témoigne avant tout de la variabilité interannuelle de la pluie. Une année excédentaire peut se trouver au milieu de plusieurs années déficitaires ;
- certaines stations enregistrent leur maximum maximum de la série intervenant au sein d'années déficitaires. Exemple : Linguère maximum maximum en 1941 alors que 1940 est normale et 1942 déficitaire.

Labé connaît son maximum maximum en 1946 alors que 1941, 1942, 1943, 1944, 1947, 1948, 1949 et 1950 sont des années déficitaires ou normales.

L'année 1969 est presque partout une année excédentaire interrompant une suite d'années déficitaires se poursuivant après 1969. L'année 1976 est la seule année excédentaire d'une période de 10 ans allant de 1970 à 1980.

Des années telles que 1969 ou 1976 (sur lesquelles nous reviendrons), pour les moins insolites, nous font dire que la pluie est " capricieuse " dans le Bassin du Sénégal.

En revanche, les minimum minimum interviennent toujours dans une période déficitaire ;

- toutes les stations de base depuis le début de leur série d'observation jusqu'en 1970 n'ont jamais connu une seule année ayant le même caractère partout, ou excédentaire ou normale ou déficitaire. Ce fait met en relief la période 1970 - 1980 qui, à l'exception de certaines années selon les stations et les domaines (1975 - 1976 ou 1978) est déficitaire partout.

Ces différents caractères variant d'un domaine à l'autre, d'une station à l'autre d'un même domaine climatique rendent surtout encore mal aisée la définition des périodes dites sèches ou des périodes dites humides à partir desquelles nous définirons la sécheresse.

2. Les périodes humides et les périodes sèches

En faisant des regroupements d'années successives ayant le même caractère (Fig. n° 25), on peut parler de période excédentaire, normale ou déficitaire. Au sein de chaque période, une année peut avoir un caractère franchement opposé, mais nous ne retenons le cas le plus fréquent sans tenir compte de l'exception qui ne confirme que la variabilité.

Mais une période excédentaire ou déficitaire ne suffit pas pour parler de période humide ou de période sèche. La variabilité interannuelle ne nous autorise pas en fonction de son excédent moyen ou de son déficit moyen à caractériser une période de sèche ou humide en dehors de tout autre critère. Car l'excédent moyen (l'écart moyen) ou le déficit moyen peuvent avoir une valeur si peu importante qu'ils ne peuvent être rangés que sous le compte de l'irrégularité interannuelle. Si par contre cet écart a une valeur relativement importante en fonction du domaine considéré, écart se poursuivant sur une longue période, nous pouvons alors parler de période humide (écart moyen positif) ou de période sèche (écart moyen négatif) ou de sécheresse.

Ceci pose le problème de connaître le seuil à partir duquel l'écart moyen positif ou négatif autorise à parler de séquence humide ou sèche.

Pour notre analyse, l'écart moyen des valeurs correspondant à Q_2 et Q_3 enserrant les valeurs " normales " constituent pour nous :

- Q_2 : la valeur de l'écart moyen au-delà de laquelle la période est dite sèche ;

- Q_3 : la valeur de l'écart moyen au delà de laquelle la période est dite humide ;

- * Q_2 est le seuil d'un écart moyen négatif, d'un déficit moyen ;
- * Q_3 est le seuil d'un écart moyen positif, donc d'un excédent moyen.

Entre Q_2 et Q_3 , la valeur de l'écart moyen positif ou négatif est à affecter au compte d'une variabilité interannuelle au sein d'une période à déficit moyen ou excédent moyen dite normale.

Ces seuils Q_2 et Q_3 ainsi définis sont fonction de chaque série de valeurs pluviométriques, donc d'un domaine climatique, et fondent la relativité des caractères humide, sec ou normal en un domaine climatique.

En effet, un déficit de 10 % n'aura pas la même valeur en domaine Soudanien qu'en domaine sahélien au regard de la moyenne pluviométrique. Or, cette moyenne pluviométrique est si faible dans les régions sahéliennes que 10 % de déficit moyen suffisent à parler de sécheresse, alors que dans la région guinéenne plus humide, ce même déficit peut paraître sans grande importance par rapport à la moyenne.

La figure n° 25 donne les périodes ainsi caractérisées et l'exemple ci-dessous de la station de Kiffa explique notre démarche.

<u>Kiffa</u>	moyenne 328 mm/an (58 ans d'observation)
- $Q_1 = 198$ mm	les valeurs inférieures à Q_1 (198 mm) sont très déficitaires ;
- $Q_2 = 294$ mm	entre 198 et 294 mm, les valeurs sont déficitaires ;
- $Q_3 = 367$ mm	entre 294 et 367 mm, les valeurs sont normales ;
- $Q_4 = 437$ mm	les valeurs entre 367 et 437 mm sont excédentaires. Au delà de Q_4 (437 mm), se trouvent les valeurs des années très excédentaires.

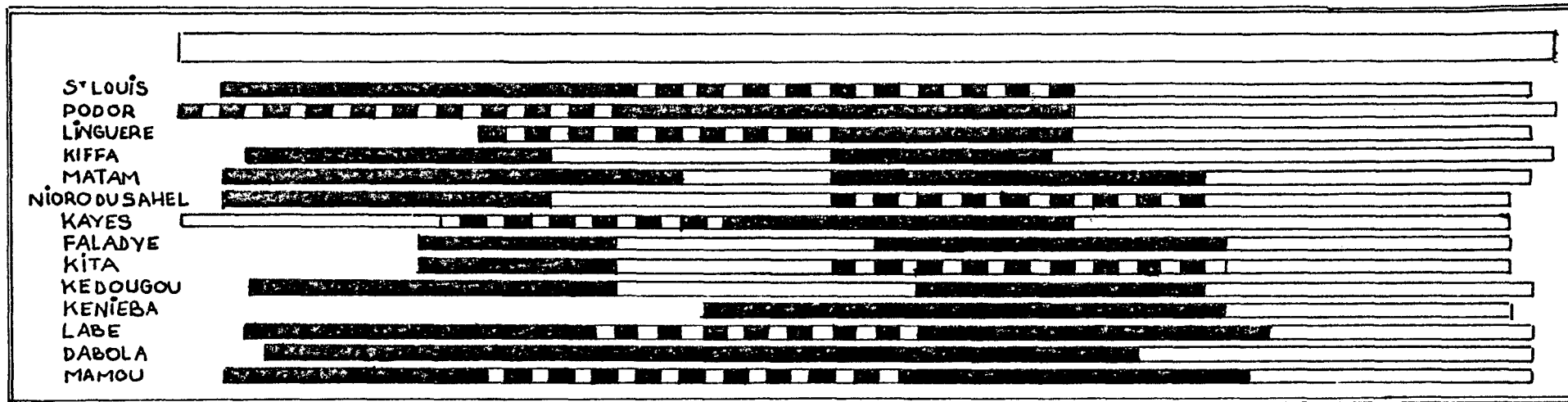
En Q_2 , écart moyen = 10 % du seuil, valeur à partir de laquelle la période déficitaire est dite sèche ;

en Q_3 , écart moyen = + 12 %, valeur à partir de laquelle la période excédentaire est considérée comme humide. Entre 10 et 12 % se trouvent les valeurs de l'écart moyen (déficit ou excédent) correspondant aux années d'une période dite " normale ".

Le tableau n° 17 donne les résultats de notre démarche mais fait ressortir

FIG. 25

BASSIN DU FLEUVE SENEGAL ESSAI DE DETERMINATION DES PERIODES "HUMIDES ET SECHES" PAR "LA METHODE DE L'ECART ABSOLU"



PERIODE HUMIDE
PERIODE NORMALE
PERIODE SECHE

des diversités et des cas particuliers.

a) Le domaine sahélien

(stations de St Louis, Podor, Linguère, Kiffa, Matam, Nioro)

La période 1920 - 1930 coïncide avec une période humide à St Louis, à Kiffa, à Nioro du Sahel. A Podor et Linguère, la période est normale. Il nous faut noter qu'à ces deux dernières stations, la période est normale à l'excès, c'est-à-dire que c'est un excédent moyen non important par rapport au seuil Q_3 qui fait que la période soit normale.

Matam présente la plus longue période humide qui débute en 1922 pour s'achever en 1942, soit 20 ans.

Ainsi, dans le domaine sahélien, du début des observations jusqu'en 1940, l'évolution coïncide avec une période humide pour les stations de base.

A Matam, Kiffa et Nioro, cette période humide se résorbe en une phase sèche entre

- 1936 et 1949 pour Kiffa et Nioro du Sahel ;
- et entre 1943 et 1950 pour Matam.

Podor, d'une phase normale, passe à un épisode humide entre 1940 et 1960.

A Linguère, c'est la phase normale à l'excès du début qui se prolonge jusqu'en 1949.

A St Louis, la période humide de 1920 à 1941 se résorbe en une période normale de 1942 à 1960.

Entre 1960 et 1980, la période est sèche partout.

Tableau n° 17. Bassin du Sénégal : pluie moyenne annuelle. Périodes humides et périodes sèches.

Stations	Périodes	Q ₂	Q ₃	Ecart moyen	Caractéristiques	Domaines
St Louis 356	1922-1940	- 14	0	+ 32	Humide Normale Sèche	Sahélien
	1941-1960			- 8		
	1961-1981			- 21		
Podor 289	1920-1940	- 12	+ 7	+ 6	Normale Humide Sèche	
	1941-1960			+ 13		
	1961-1982			- 20		
Linguère 474	1934-1949	- 8	+ 10	+ 7	Normale Humide Sèche	
	1950-1960			+ 21		
	1960-1981			- 16		
Kiffa 328	1923-1936	- 10	+ 12	+ 15	Humide Sèche Humide Sèche	
	1937-1949			- 11		
	1950-1959			+ 29		
	1960-1982			- 15		
Matam 480	1922-1942	- 10	+ 5	+ 16	Humide Sèche Humide Sèche	
	1943-1949			- 14		
	1950-1966			+ 15		
	1967-1981			- 34		
Nioro du Sahel 636	1922-1936	- 15	+ 1	+ 41	Humide Sèche Humide Sèche	
	1937-1949			- 19		
	1950-1966			+ 7		
	1966-1980			- 32		
Kayes 712	1920-1931	- 8	+ 7	- 14	Sèche Normale Humide Sèche	Nord- Soudanien
	1932-1944			+ 5		
	1945-1960			+ 17		
	1961-1980			- 9		
Faladye 988	1931-1939	- 5	+ 4	+ 10	Humide Sèche Humide Sèche	
	1940-1951			- 6		
	1952-1967			+ 10		
	1968-1980			- 16		
Kita 1 105	1931-1939	- 7	+ 3	+ 16	Humide Sèche Normale Sèche	
	1940-1949			- 10		
	1950-1967			- 0,3		
	1968-1980			- 16		

... / ...

Stations	Périodes	Q ₂	Q ₃	Ecart Moyen	Caractéristiques	Domaines
Kédougou 1 290	1923-1939	- 6	+ 2	+ 9	Humide Sèche Humide Sèche	Sud- soudanien
	1940-1953			- 9		
	1954-1966			+ 8		
	1967-1981			- 8		
Kéniéba 1 285	1944-1959	- 6	+ 2	+ 9	Humide Humide Sèche	Sud- soudanien
	1960-1967			+ 10		
	1968-1980			- 13		
Labé 1 683	1923-1938	- 9	+ 5	+ 10	Humide Normale Humide Sèche	Guinéen
	1939-1953			- 7		
	1954-1969			+ 6		
	1970-1981			- 12		
Dabola 1 571	1924-1938	- 6	+ 1	+ 2	Humide Humide Humide Sèche	Guinéen
	1939-1950			+ 4		
	1951-1963			+ 9		
	1964-1981			- 11		
Mamou 1 942	1922-1933	- 5	+ 2	+ 10	Humide Sèche Humide Sèche	Guinéen
	1934-1952			- 6		
	1953-1968			+ 3		
	1969-1981			- 11		

Q₂ = valeur limite de l'écart moyen au-delà de laquelle la période est considérée comme sèche ;

Q₃ = valeur limite de l'écart moyen au-delà de laquelle la période est considérée comme humide ;

Entre Q₂ et Q₃ se situent les valeurs de l'écart moyen pour la période considérée comme normale.

Q₂ et Q₃ sont exprimés en pourcentage.

b) Le domaine Nord-soudanien

Kayes présente la plus longue série d'observation qui commence en 1920.

De 1920 à 1930, la période est sèche. Mais la longueur de la série des autres stations, Kita et Faladye, ne nous permet pas de retrouver cette période sèche.

Entre 1931 et 1944, la période est normale à l'excès à Kayes. Elle est humide à Faladye et à Kita de 1930 à 1940. Entre 1940 et 1949 - 1951, Faladye et Kita connaissent une période sèche.

La série de Kayes continue de connaître une évolution normale.

La période des années " 1950 " est humide à Kayes et à Faladye et normale à Kita.

A partir de 1960 à Kayes et 1967 à Kita et Faladye, l'évolution est sèche jusqu'en 1980.

c) Le domaine Sud-soudanien

Kédougou et Kéniéba ont des séries de longueur différente : 58 ans pour Kédougou et 37 ans pour Kéniéba.

De 1923 à 1940, Kédougou connaît une période humide.

De 1941 à 1954, la période est sèche pour redevenir humide entre 1953 et 1967.

Kéniéba, de 1944 à 1970, connaît une période humide. A partir de 1967 pour Kédougou et 1970 pour Kéniéba, l'évolution se fait dans une période sèche jusqu'en 1981.

d) La région guinéenne

Labé et Dabola semblent ne pas avoir connu de période franchement sèche jusqu'en 1969.

A Labé, de 1922 à 1938, la période est humide, devient normale entre 1939 et 1953 en raison d'un faible déficit moyen, et de 1954 à 1969 la période est humide.

Dabola a une série continue humide de 1923 à 1963, année à partir de laquelle la période est sèche jusqu'en 1981.

Mamou, de 1922 à 1934, connaît une période humide qui devient normale à l'image de la série de Labé de 1935 à 1952. Entre 1952 et 1968, la période est humide.

En domaine guinéen, on peut dire qu'à partir de 1970, toutes les trois stations entrent dans une phase sèche jusqu'en 1981.

*

* *

L'évolution des séries pluviométriques entre périodes sèches, humides ou normales révèle aussi bien des similitudes que des diversités entre domaines climatiques qu'entre stations d'un même domaine.

Cette difficulté à définir à peu près pour les divers domaines des périodes à caractères similaires procède aussi bien de la variabilité spatiale et temporelle de la pluie mais surtout du fait que la Sécheresse est une notion qui englobe d'autres réalités climatiques au sein desquelles la pluie, bien qu'essentielle ici, n'est qu'une conséquence des combinaisons, ou bien facteur entraînant d'autres combinaisons. On ne peut que rallier à la thèse de H. GESLIN (1959) : " La recherche d'une formule climatique définissant le facteur sécheresse devrait s'appuyer sur l'étude

expérimentale en fonction des éléments climatiques eux-mêmes, des variations du bilan de l'eau ...".

Elle doit intégrer, cette définition, pour être précise, les facteurs thermiques, la circulation locale ou plus difficilement encore les combinaisons entre les divers facteurs que l'on appelle " complexe climatique ".

Mais il n'en reste pas moins que les forts déficits pluviométriques observés dans le bassin sur de longues périodes suffisent à évoquer la sécheresse.

B/ LES SECHERESSES DANS LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

La méthode de " l'écart moyen " et des " quintiles " (Fig. n° 25) permet de retenir pour le Bassin du Sénégal les périodes suivantes au niveau des stations de base.

f) Entre 1920 et 1940, 10 stations de base ont connu une période humide, de durée et d'importance variable.

2) Entre 1940 et 1950, 7 stations connaissent la période sèche que J. SIRCOULON (1976) appelle " la sécheresse des années 40 ". Elle n'est pas partout uniforme dans le bassin. Mais on la retrouve dans les séries de Kiffa (1936 - 1949), de Matam (1943 - 1950) et de Niore du Sahel (1936 - 1950). Ces trois stations appartiennent au domaine sahélien. Cependant les autres stations du domaine, à l'exception de Podor (période humide de 1940 à 1960), n'en connaissent pas pour autant une période humide. L'évolution est normale : faiblement excédentaire à Linguère (7 %), faiblement déficitaire à St Louis (- 8 %).

Dans le domaine Nord-soudanien, la sécheresse des années " 1940 " se retrouve à Faladye et à Kita entre 1940 et 1950.

La série de Kédougou en domaine Sud-soudanien est sèche entre 1940 et 1954.

Dans la région guinéenne, les stations de Labé et de Mamou sont faiblement excédentaires entre 1939 et 1953.

3) Entre 1950 et 1960, des stations enregistrent leur maximum maximorum de la période d'observation retenue : Podor en 1955, Faladye en 1957, Kéniéba en 1955, Kédougou en 1954, Labé en 1958, Dabola en 1951 (Fig. n° 24).

Ainsi 11 stations de base connaissent une période humide et le reste, 3 stations, sont faiblement excédentaires.

De 1950 à 1960, l'évolution pluviométrique consacre une phase humide pour le Bassin du Sénégal.

4) De 1960 à 1982, toutes les stations du bassin connaissent leur plus longue période sèche.

Le début de cette phase varie d'une station à l'autre du bassin, mais à partir de 1970, l'évolution est franchement et partout sèche.

*

* *

Nous retrouvons ainsi dans les séries pluviométriques étudiées de 1920 à 1982 deux phases de sécheresse :

- entre 1940 et 1950 ;
- et à partir de 1970.

Cette dernière phase, la plus longue, est uniforme pour le bassin.

La figure n° 26 que nous empruntons à P. MICHEL (1973) retrace l'évolution des phases sèches et humides du domaine intertropical Ouest-africain qui semble avoir connu des phases sèches dans le passé lointain.

L'évolution actuelle a pu faire dire du reste à C. TOUPET (1973) que " la tendance ... à la diminution des pluies au cours du siècle dernier est très vraisemblable ... elle continue et confirme le dessèchement historique ".

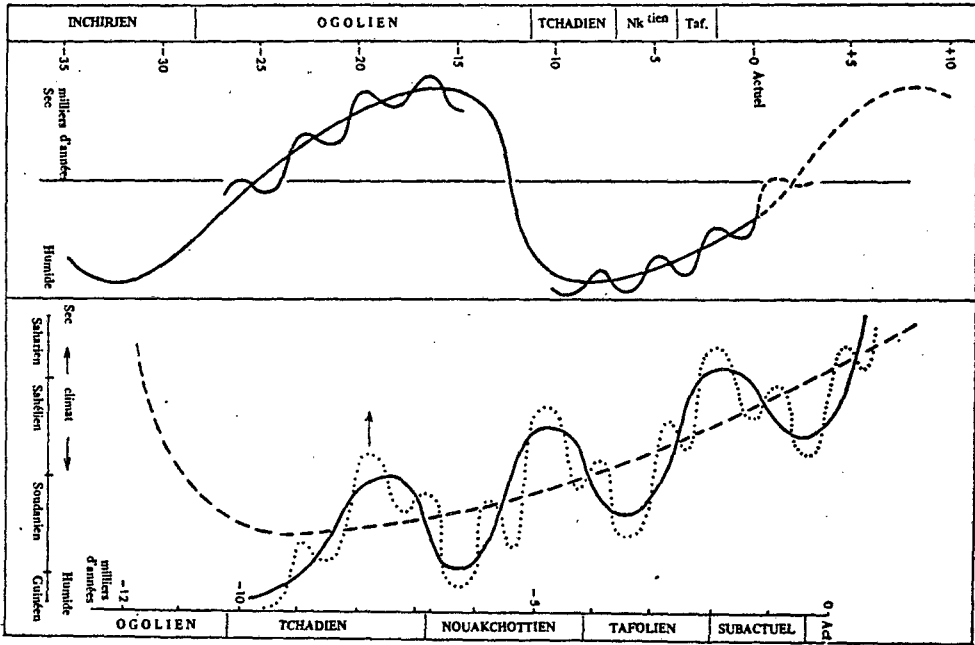


FIG: 26

Oscillations climatiques.

D'après R. Michel (1973)

Cependant, c'est uniquement la dernière phase sèche des " années 1960 " à 1982 de nos séries d'observations que nous étudierons

- en raison de son caractère continu au cours des années récentes ;
- du fait que ce caractère exceptionnel de la pluie est uniforme pour tout le Bassin du Sénégal ;
- enfin et surtout parce que dans cette dernière et récente période de sécheresse que nous définirons en nous inspirant de L. SERRA et de J. SIRCOULON (1976) comme étant " une diminution anormale des apports en eau, caractérisée par sa rigueur, sa persistance et son extension " (1), n'est plus seulement un phénomène des régions sahéliennes mais affecte à des degrés divers une importante frange du domaine intertropical.

Ainsi la longueur de nos séries pluviométriques nous suggère d'analyser la sécheresse sous un triple aspect comparatif de la moyenne pluviométrique par rapport à la moyenne des séries de référence, par rapport à la moyenne de la période 1931 - 1960 et enfin par rapport à la moyenne de la période 1951 - 1980.

C/ LA SECHERESSE RECENTE DANS LE BASSIN DU SENEGAL

La méthode de " l'écart moyen et des quintiles " appliquée à la seule période trentenaire 1951 - 1980 fait aussi ressortir la période humide des " années 1950 ", suivie de la période sèche des " années 1960 ".

Ainsi l'évolution propre à la période 1951 - 1980 fait débiter effectivement la sécheresse autour des années 1966, 1967 ou 1968. Mais ces années ont surtout été marquées par de forts déficits moyens qui ne constituent en fait qu'une brusque aggravation de la péjoration pluviométrique dans une

(1) Nous mettons entre guillemets, cependant ce n'est pas une citation des deux auteurs que nous mentionnons. C'est nous qui définissons en nous inspirant de leur analyse des sécheresses et de leur définition du phénomène.

BASSIN DU SENEGAL

TABLEAU N° 18

ECART A LA MOYENNE "1951-1980" EN POURCENTAGE

STATIONS	ST LOUIS	PODOR	KIFFA	MATAM	LINGUERE	NIORO	KAYES	FALADYE	KITA	KENIEBA	KEDOUGOU	LABE	DABOLA	MAMOU
1951-1980	294	280	328	435	457	566	695	975	1083	1292	1285	1660	1544	1939
1951	+55	+37	+47	+57	+48	+33	+24	-15	+7	+44	+19	+25	+41	+5
52	+45	+31	+37	+39	+36	+71	+26	+6	+46	-6	-4	-12	+2	-7
53	-2	+21	-12	+8	+46	+11	+10	+17	+32	-5	-9	-10	+21	+10
54	+27	-29	+29	+11	+11	+49	+26	+10	+3	+10	+68	+8	+20	+33
55	+42	+183	+16	+10	+28	+0	-2	+8	+18	+48	-2	+17	+16	+21
56	-23	+9	+25	+34	-27	+11	+16	+15	+8	+11	-18	+6	+2	0
57	+6	0	+31	+4	+28	+16	-1	+14	+26	-8	+21	+17	+22	+16
58	+8	+34	+89	+58	+30	+50	-3	+43	+28	+16	-8	+30	+3	+24
59	-35	-20	+2	+24	+18	+9	+23	-12	+5	-14	-3	+7	-7	-3
1960	-12	+11	-57	+11	+34	-1	+7	-4	+2	-5	-3	-11	+11	-11
61	-3	+10	-2	+10	+15	-12	-5	+15	-5	+2	+8	+7	-44	+13
62	+13	-55	-14	+2	-25	+19	-9	+27	+20	+26	+12	+26	+13	+17
63	+22	+18	-3	+12	-13	+14	+27	+5	-19	+2	+6	-10	0	-4
64	+12	+26	+44	+16	+6	+27	-1	+4	+2	+1	+6	+17	-7	+2
65	+10	+22	+11	+61	-7	+11	+11	+3	-1	+20	+7	-18	-8	-3
66	+49	-12	-21	+43	+13	+15	+22	+17	0	+3	+13	-3	+1	+20
67	+41	-3	+54	-22	+22	-13	-4	+16	+10	+29	-11	+28	+12	+4
68	-21	-25	-40	-29	-34	-21	-31	-15	-5	-27	-11	-5	-15	+6
69	+81	+54	+63	+23	+49	-4	+14	-16	-11	+11	+4	+7	+12	-20
1970	-39	-9	+36	-35	-35	-29	-20	-32	-21	-20	-15	-19	-21	-16
71	-40	-51	-50	-1	-28	-40	-14	-15	-24	+4	-8	-11	+2	-10
72	-48	-61	-64	-60	-46	-22	-30	-36	-17	-35	-24	+7	-6	-21
73	-35	-45	-46	-50	-44	-36	-20	-17	-12	-16	-6	-10	-10	-7
74	-33	-46	-17	-25	-28	-26	-3	0	-12	-7	-1	-7	-11	-9
75	+32	-19	-18	-6	+7	-12	-15	-5	-11	+11	-1	-9	-4	-7
76	-37	-6	+1	-10	-17	-13	+12	-12	+5	-23	-13	-10	-11	+8
77	-65	-53	-48	-55	-26	-47	-15	-15	-14	-22	-14	-20	-18	-14
78	-24	+9	-5	-27	-31	-2	+6	+1	-21	-1	+24	-15	-20	-2
79	-25	-19	-53	-40	-14	-21	-20	-20	-22	-15	-25	-18	-22	-17
1980	0	-22	-34	-50	-17	-45	-31	-16	-19	-35	-13	-10	-15	-24
81	+14	-50	-5	-15	-18						+2	-4	-26	-5
82		-40	-69											

période déjà sèche (1). Nous reviendrons, du reste, sur les débuts du phénomène dans l'analyse.

1. La sécheresse dans la Région guinéenne

Les trois stations de base de cette région climatique présentent une diversité quant au début de la sécheresse, comme le montre le tableau n° 18. Paradoxalement, la station la plus arrosée du bassin, Mamou, connaît un début précoce par rapport à Labé et par rapport à Dabola. Cependant, dès 1969, le déficit moyen est presque partout de 20 %, et toutes les années qui suivent sont déficitaires (à l'exception de 1976) et cela jusqu'en 1981 (Tableau n° 18).

Dans le tableau n° 19, nous donnons pour chaque station la moyenne pluviométrique de la période de sécheresse. Nous comparons cette moyenne aux moyennes pluviométriques des séries de référence à la moyenne de la période de 1931 - 1960 et enfin à celle de la période 1951 - 1980.

Ainsi, à Labé, la moyenne pluviométrique des 12 années sèches est de 1 473 mm, à Dabola 1 342 mm et à Mamou 1 712 mm.

Les écarts moyens par rapport aux trois moyennes dégagés sont les suivants :

- la station de Labé accuse un déficit moyen de 12 % par rapport à la moyenne de la série de référence de 58 ans, 14 % par rapport à la période 1931 - 1960 et 11 % de déficit moyen par rapport à la moyenne 1951 - 1980 (tableau n° 18) ;
- à la station de Mamou, le déficit par rapport à ces trois moyennes est de 12 % ;
- à Dabola, les déficits respectifs sont 15 %, 20 % et 13 %.

(1) P. PELISSIER (1966) montrait déjà que la sécheresse avait débuté bien avant dans le Nord du Sénégal (cf. A. SOW, 1982).

BASSIN DU SENEGAL

ECARTS MOYENS ENTRE LA MOYENNE DES PLUIES DES ANNEES DE SECHERESSE ET LES MOYENNES ANNUELLES DE LA SERIE D'OBSERVATION ET DES PERIODES : 1931-1960 ET 1951-1980

TABLEAU N°

STATIONS	MOYENNE mm	SECHERESSE Période	Série d'observation	1931-1960	1951-1980	ANNEE LA PLUS SECHE
ST LOUIS	<u>237</u>	1968 - 1980	356	347	294	1977
	102	EM	-33 -71	-32 -71	-19 -65	
PODOR	<u>222</u>	1966 - 1980	289	336	280	1972
	110	EM	-23 -62	-34 -67	-21 -61	
KIFFA	<u>218</u>	1971 - 1980	328	351	328	1982
	100	EM	-34 -70	-38 -72	-34 -70	
MATAM	<u>315</u>	1967 - 1980	480	537	435	1972
	175	EM	-34 -64	-41 -67	-28 -60	
LINGUERE	<u>364</u>	1968 - 1980	474	535	457	1972
	245	EM	-23 -48	-32 -54	-20 -46	
NIORO DU SAHEL	<u>432</u>	1967 - 1980	636	676	566	1977
	299	EM	-32 -53	-36 -56	-24 -47	
KAYES	<u>611</u>	1967 - 1980	712	743	695	1968/1980
	480	EM	-14 -33	-18 -35	-12 -31	
FALADYE	<u>827</u>	1968 - 1980	988	1037	975	1972
	623	EM	-16 -37	-20 -40	-15 -36	
KITA	<u>931</u>	1968 - 1980	1105	1130	1083	1971
	825	EM	-16 -25	-18 -27	-14 -24	
KENIEBA	<u>1118</u>	1968 - 1980	1285	1347	1292	1972/1980
	839	EM	-13 -35	-17 -38	-13 -35	
KEDOUGOU	<u>1182</u>	1967 - 1980	1290	1256	1285	1979
	959	EM	-8 -26	-6 -24	-8 -25	
LABE	<u>1473</u>	1970 - 1980	1683	1707	1660	1979
	1365	EM	-12 -19	-14 -20	-11 -18	
DABOLA	<u>1342</u>	1972 - 1980	1571	1675	1544	1981
	1148	EM	-15 -27	-20 -31	-13 -26	
MAMOU	<u>1712</u>	1969 - 1980	1942	1947	1939	1980
	1481	EM	-12 -24	-12 -24	-12 -24	

MOYENNE DES PLUIES EN MM
EM : ECART MOYEN EN %



-33 écart moyen par rapport aux 3 moyennes
EM -71 écart moyen de l'année la plus sèche par rapport aux 3 moyennes
237 Moyenne des pluies des années de sécheresse

Ainsi, dans la Région guinéenne, la station de Dabola détient le record absolu du déficit moyen et par rapport aux trois moyennes.

On observe aussi que la sécheresse a commencé tardivement à Dabola par rapport à Labé et à Mamou, mais le déficit y est plus accusé. En revanche, le début du phénomène est précoce à Mamou, mais les déficits moyens y sont les plus faibles.

2. La sécheresse dans le domaine Sud-soudanien

Ce domaine climatique est très peu étendu dans le bassin et les deux seules stations de base de l'analyse pluviométrique dont nous disposons, Kédougou et Kéniéba, sont trop peu éloignées l'une de l'autre pour nous permettre de tirer des généralités. Il s'y ajoute que la moyenne 1931 - 1960 pour Kéniéba n'a été établie que pour 24 années d'observation : 1937 - 1960.

La sécheresse débute à Kédougou en 1967 et en 1968 à Kéniéba.

Les moyennes respectives de cette période de sécheresse du début jusqu'en 1980 sont de 1 182 mm pour Kédougou et de 1 118 mm pour Kéniéba.

Les déficits moyens respectifs par rapport aux trois moyennes d'étude de la série de référence de la période 1931 - 1960 et 1951 - 1980 sont les suivants :

- à Kédougou : 8 %, 6 % et 8 % de déficit moyen ;
- à Kéniéba, le déficit moyen par rapport à la longue série de référence est de 13 %. Il s'élève à 17 % par rapport aux deux moyennes trentenaires.

Kédougou connaît ainsi des déficits moyens plus accusés que la station de Kéniéba.

3. La sécheresse dans le domaine Nord-soudanien

Dans ce domaine nous avons retenu trois stations de base : Kita, Faladye et Kayes.

Si la sécheresse débute en 1968 à Kita et à Faladye, elle commence plus tôt à Kayes en 1967. Les moyennes respectives de cette période sèche du début jusqu'en 1980 sont de 611 mm à Kayes, 931 mm à Kita et 827 mm à Faladye.

Ces totaux représentent des déficits moyens suivants.:

- à Kita : 16 % par rapport à la longue série de référence, 18 % par rapport à la période 1931 - 1960 et 14 % par rapport à la moyenne pluviométrique de la période 1951 - 1980 ;
- à Kayes, par rapport à ces mêmes moyennes de référence, les déficits respectifs sont 14 %, 18 % et 12 % ;
- et à Faladye, respectivement 16 % , 20 % et 15 %.

Dans ce domaine, la station de Kita qui a la situation géographique la plus centrale dans le bassin, détient le record du déficit moyen par rapport à la moyenne de la série de référence : 16 %. Mais c'est la station de Faladye qui connaît les déficits les plus importants par rapport aux moyennes trentenaires 1931 - 1960 et 1951 - 1980 : respectivement 20 % et 15 %.

Ainsi, dans ce domaine, les déficits moyens par rapport aux trois moyennes se situent entre 12 et 20 %.

4. La sécheresse dans le domaine sahélien

Dans ce domaine, dès 1966, la station de Podor enregistre un déficit moyen de 12 % (tableau n° 18). Les stations de Linguère, de Matam et de Nioro du Sahel connaissent leur premier déficit moyen important en 1967. A St Louis, le phénomène commence en 1968 et seulement en 1971 à Kiffa, la station la plus septentrionale du bassin. Les plus faibles moyennes pour la période sèche sont enregistrées dans ce domaine :

- St Louis	237 mm ;	Podor	222 mm ;
- Kiffa	218 mm ;	Matam	315 mm ;
- Linguère	364 mm ;	Nioro du Sahel	432 mm.

(tableau n° 19).

Ces moyennes représentent de forts déficits moyens par rapport aux différentes moyennes de comparaison.

On observe les déficits moyens suivants :

	Déficit par rapport à la série de référence	Déficit par rapport à la période 1931 - 1960	Déficit par rapport à la période 1951 - 1980
St Louis	33 %	32 %	19 %
Podor	23 %	34 %	21 %
Kiffa	<u>34</u> %	38 %	<u>34</u> %
Matam	<u>34</u> %	<u>41</u> %	28 %
Linguère	23 %	32 %	20 %
Nioro du Sahel	32 %	36 %	24 %

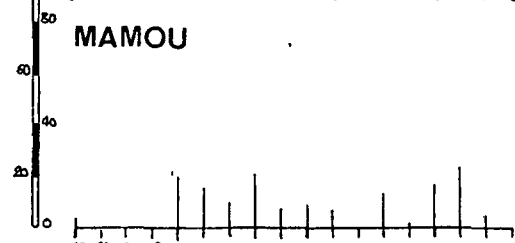
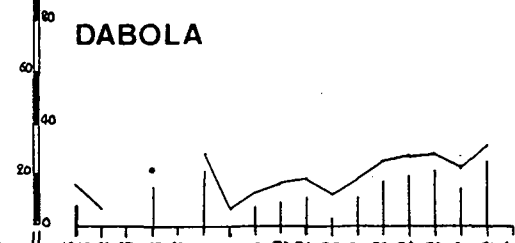
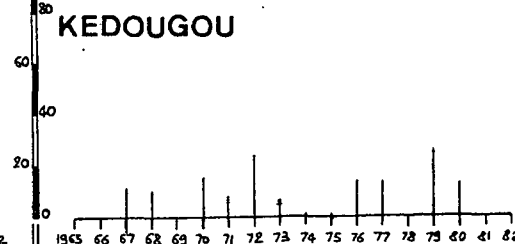
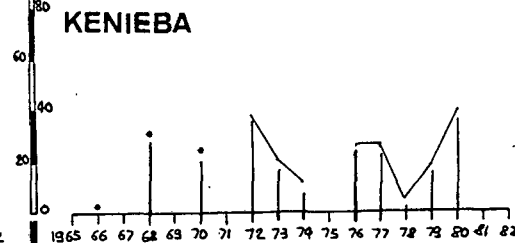
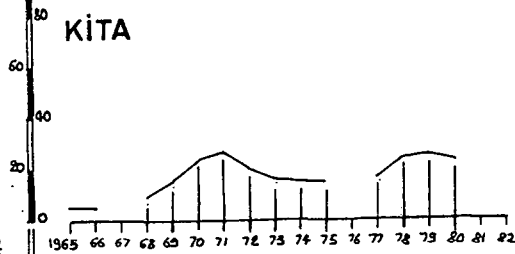
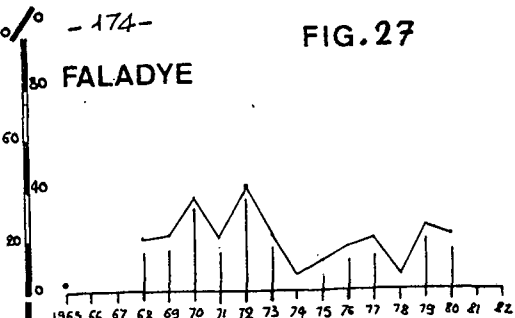
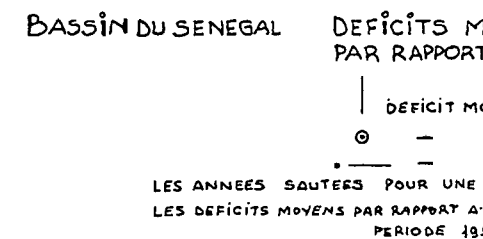
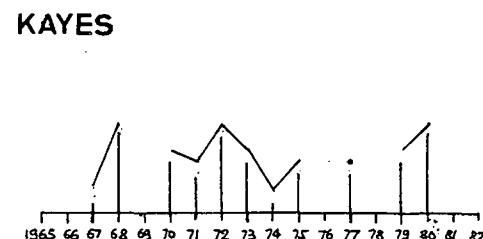
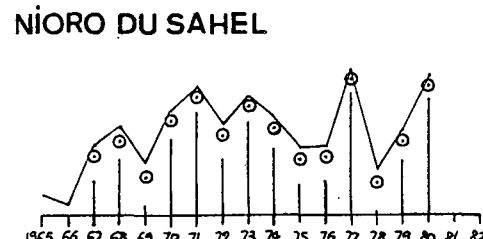
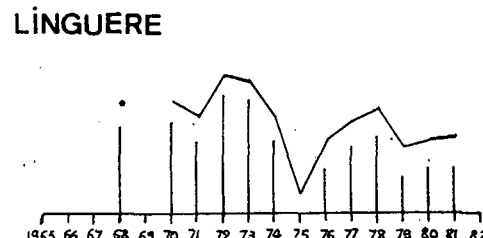
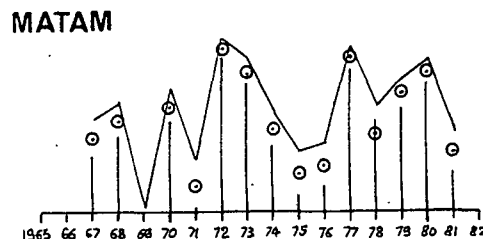
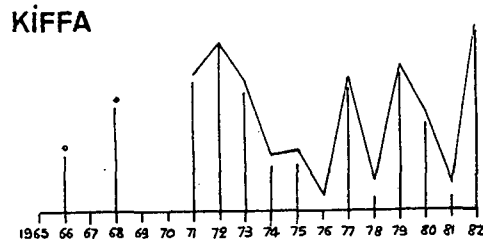
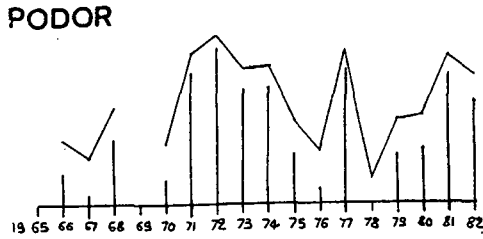
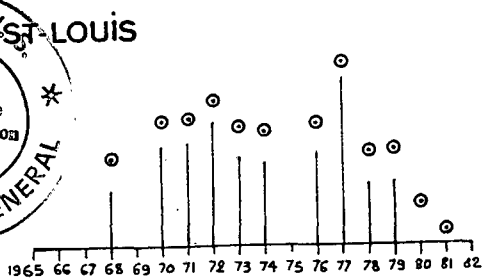
Le domaine sahélien connaît ainsi les déficits les plus élevés du bassin. Nous soulignons les déficits moyens records par rapport à chaque moyenne. Les stations de Kiffa et de Matam semblent être les plus déficitaires.

*

* *

On observe que, conformément à la diminution de la pluviométrie du Sud du bassin vers le Nord, les déficits moyens évoluent à la hausse du Sud vers le Nord aussi. Le domaine sahélien, le moins arrosé du bassin, connaît ainsi les déficits moyens les plus importants.

Par domaine climatique, les déficits moyens par rapport à chaque moyenne se répartissent comme suit :



DEFICITS MOYENS DES ANNEES DE SECHERESSE PAR RAPPORT AUX NORMALES PLUVIOMETRIQUES

| DEFICIT MOYEN PAR RAPPORT A LA NORMALE 1951 - 1980
 ○ - - - - - DE LA SERIE D'OBSERVATION 1931 - 1960

LES ANNEES SAUTEES POUR UNE NORMALE DONNEE CORRESPONDENT A DES ANNEES EXCENDENTAIRES POUR CETTE NORM
 LES DEFICITS MOYENS PAR RAPPORT A UNE NORMALE DONNEE NON REPRESENTES SONT SENSIBLEMENT EGUX A CEUX DE LA
 PERIODE 1951 - 1980 EX: MAMOU LES ANNEES DE SECHERESSE ONT LE MEME DEFICIT POUR LES 3 M

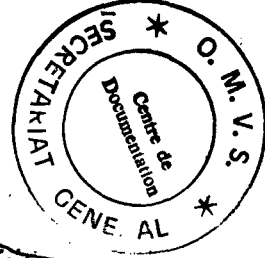
	Région guinéenne	Domaine Sud-soudanien	Domaine Nord-soudanien	Domaine sahélien
Série d'ob- servation	13 %	16 %	15 %	30 %
Période 1931 - 1960	15 %	12 %	19 %	36 %
Période 1951 - 1980	12 %	11 %	14 %	34 %

On constate que :

- le domaine Sud-soudanien enregistre les déficits les moins élevés et le domaine sahélien les plus importants (carte n° 14) ;
- les déficits moyens par rapport à la série pluviométrique de référence et par rapport à la moyenne 1951 - 1980 sont moins élevés que les déficits par rapport à la période 1931 - 1960. Les deux premières moyennes sont dégagées de deux périodes qui incluent la période sèche, alors que la période de 1931 - 1960 a été une période humide ;
- enfin, on observe aussi que la variabilité de la pluviométrie se maintient encore, même durant la période de sécheresse. Pour la même année, des stations d'un même domaine climatique restent déficitaires, mais avec des valeurs qui peuvent être très différentes.

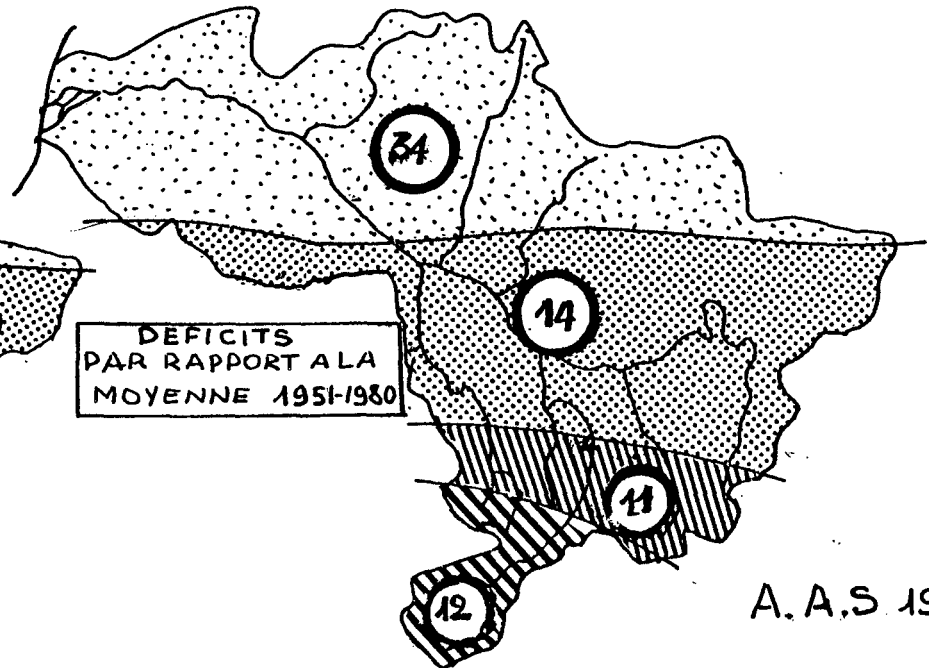
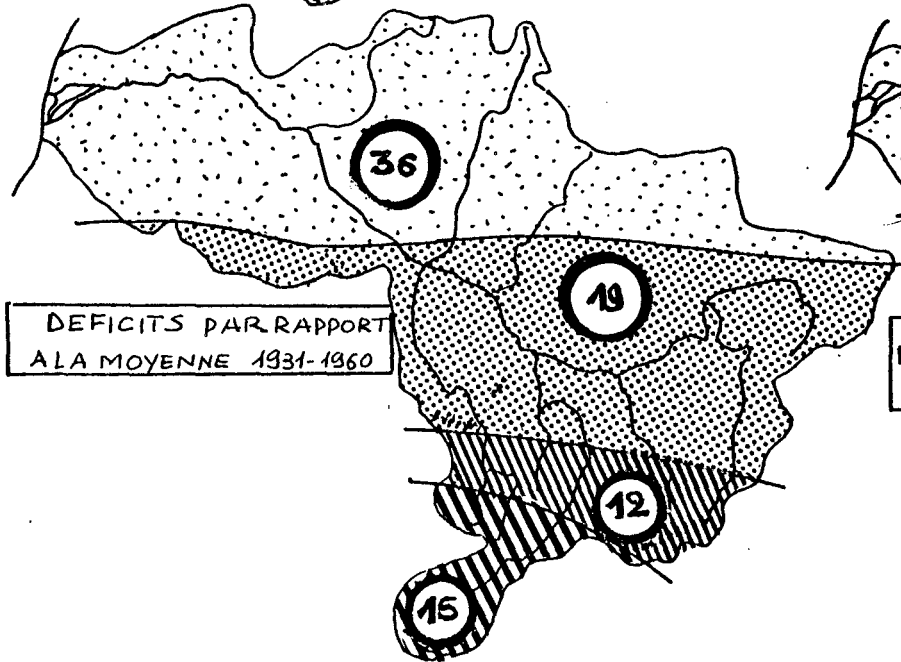
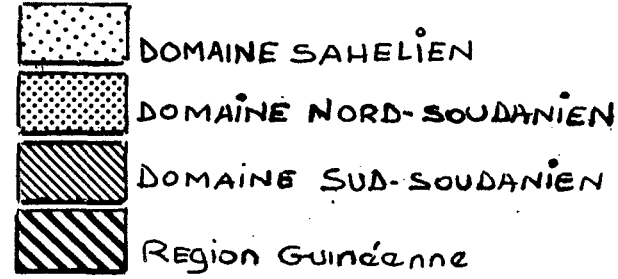
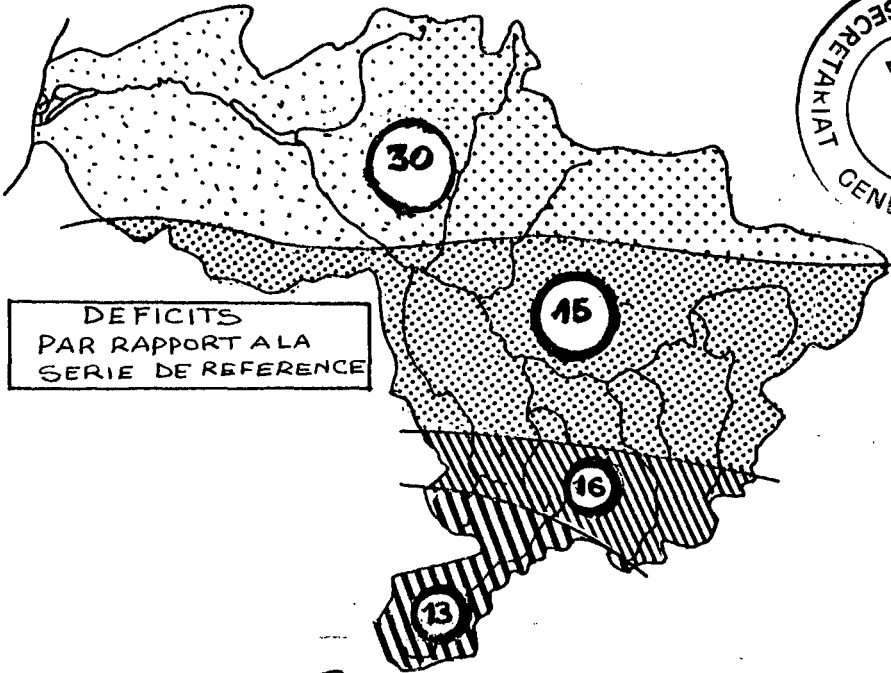
Cependant, il faut noter que l'analyse de la sécheresse n'a retenu que les déficits moyens par rapport aux trois moyennes de référence (Fig. n° 27). Or " la moyenne est ce qui n'arrive jamais ".

Pour mieux cerner le phénomène de la sécheresse, sur le plan descriptif tout au moins, il conviendrait d'analyser son évolution année par année et domaine par domaine. Cette entreprise, bien que se limitant aux premières années de sécheresse, a été menée par J. SIRCOULON (1976) et pour un ensemble plus vaste.



DEFICITS EN% DE LA PERIODE SECHERESSE

ÇARTE 14



A. A. S. 1984

Nous essayerons de compléter cette étude en relevant pour le Bassin du Sénégal des généralités quant aux débuts du phénomène, les années les plus caractéristiques et ce que nous appelons les années insolites (fortement excédentaires) de cette période.

D/ LES CARACTERES DE LA SECHERESSE

1. Les débuts du phénomène

La moyenne 1951 - 1980 sensiblement égale à la moyenne des longues séries d'observation fait débiter la sécheresse en 1967 ou 1968. Cette dernière année, 1968, représente la cas le plus fréquent en domaine sahélien, Nord-soudanien et Sud-soudanien. A Podor et Kiffa en domaine sahélien, elle commence respectivement en 1966 et 1971.

En région guinéenne, dès 1969, Mamou commence à être déficitaire, Labé en 1970 et Dabola en 1972.

La moyenne 1931 - 1960, bien que plus importante que les deux premières, situe le début de la sécheresse, des déficits moyens aux mêmes années sauf à Faladye, trois ans plus tôt en 1965.

Mais partout et par rapport à toutes les moyennes, le début du phénomène correspond à un déficit moyen (écart moyen négatif) qui fait suite le plus souvent à une suite d'années excédentaires (tableau n° 18).

Nous avons préféré retenir un critère unique pour situer les débuts de la sécheresse : l'année à partir de laquelle, pour toutes les stations, le déficit moyen s'est poursuivi sur plusieurs années. Ainsi le début du phénomène varie d'une station à l'autre.

Somme toute on peut retenir comme début de la sécheresse, avec certains auteurs, l'année 1968, année de forts déficits moyens dans le bassin. Cette année intervenant après des années fastes a surtout marqué les milieux populaires paysans, et dans une autre mesure les différents spécialistes

s'intéressant aux apports en eau.

Mais le déficit n'a pas été uniforme dans tout le bassin durant cette période.

2. Les années les plus caractéristiques

L'année 1972

De 1968 à 1974, elle fut l'année la plus sèche pour dix stations de base. Les déficits moyens pour ces stations sont les suivants : St Louis 48 %, Podor 61 %, Kiffa 64 %, Matam 60 %, Linguère 46 %, Kayes 30 %, Faladye 36 %, Kéniéba 35 %, Kédougou 24 % et Mamou 21 % (tableau n° 18).

Pour les autres stations, pendant cette période, l'année la plus sèche fut 1971 à Niore du Sahel où le déficit moyen a été de 40 %. Il est de 24 % à Kita pour la même année.

Pour les stations de Labé et de Dabola, en région guinéenne, l'année 1970 fut la plus sèche avec respectivement des déficits moyens de 19 % et 21 %.

Pour cette période, l'ensemble du bassin a été touché par le phénomène mais à des degrés divers. Cependant, les premiers déficits importants ayant surtout affecté le domaine sahélien, le phénomène a été surtout circonscrit dans ce domaine au début.

Après l'année 1972, le déficit est resté constant mais moins élevé (tableau n° 18).

L'année 1977

Elle marque une brusque réaugmentation des déficits pluviométriques moyens.

La station de St Louis connaît son déficit moyen le plus élevé des 60 années d'observation : 65 %.

A Podor, le déficit moyen a été de 53 %, à Kiffa 48 %, à Matam 55 %, à Niore du Sahel 47 %, à Faladye 15 %, à Kita et à Kédougou 14 %.

Les stations les plus arrosées du bassin accusent des déficits moyens élevés : Labé 22 %, Dabola 18 % et Mamou 14 %.

Ainsi, après 1972, l'année 1977 a été la plus déficitaire.

De 1979 à 1981 - 1982

Toutes ces années connaissent encore un déficit moyen élevé souvent plus important que celui de 1972 ou 1977, quelquefois le plus important des séries d'observation :

- en 1979, le déficit moyen le plus élevé est enregistré par la station de Kiffa (53 %), suivie de Matam (40 %). A Kéniéba, le déficit est de 35 %. Partout ailleurs il est situé entre 15 et 25 % ;

- en 1980, le déficit moyen record revient à Matam (50 %), suivie de Niore du Sahel (45 %) et de Kiffa (34 %). La station de Kayes enregistre pour une seconde fois son record absolu de 1968 : 31 %. La station de St Louis enregistre sa moyenne, 294 mm, d'où un déficit nul. A Labé, le déficit moyen se résorbe à 10 %, mais partout ailleurs il se situe entre 15 et 25 % ;

- en 1981, St Louis a un écart positif de + 14 %. Mais Podor enregistre un déficit moyen de 50 %, suivie de Linguère (18 %), de Matam (15 %) et de Kiffa (5 %). La station de Kédougou a un faible excédent moyen (+ 2 %). Les stations guinéennes restent déficitaires : Labé - 4 %, Dabola - 26 %, Mamou - 5 %.

Les données de 1981 n'intéressent que ces stations, les autres séries s'arrêtant en 1980.

L'année 1982

Les deux seules stations sahéliennes dont nous avons les données pluviométriques restent très déficitaires. A Podor, le déficit moyen est de 40 %. La station de Kiffa enregistre le déficit moyen le plus important des 59 années d'observation : 69 %.

3. Les années " insolites "

Ce sont les années excédentaires au sein de la période de sécheresse récente. Elles peuvent être fortement excédentaires alors que l'année qui a précédé et celle qui suit sont très déficitaires.

L'année 1969

Dix stations de base ont eu un écart moyen positif alors que les années 1968 et 1970 sont déficitaires (tableau n° 18).

La station de St Louis en 1969 connaît son maximum maximum de la période 1951 - 1980 : 531 mm. Il en est de même pour la station de Linguère : 679 mm. Au niveau de certaines stations, le caractère insolite de l'année 1969 se mesure pleinement. Par exemple :

- pour la station de St Louis, 1969 a un excédent moyen de 81 %. L'année 1968 a connu un déficit moyen de 21 % et l'année 1970 un déficit moyen de 39 % ;
- à la station de Matam, l'excédent moyen en 1969 est de 23 %. Les déficits moyens des années 1968 et 1970 sont respectivement de 29 % et 35 % ;
- la station de Linguère évolue pareillement : elle connaît un excédent moyen de 49 % en 1969 et des déficits moyens de 34 % en 1968 et 35 % en 1970.

L'année 1971 déficitaire partout dans le bassin est curieusement excédentaire à Kéniéba en domaine Sud-soudanien : + 4 %.

L'année 1972, la plus sèche de la période 1968 - 1974, est aussi excédentaire à Labé en région guinéenne (+ 7 %)/ Il en est de même pour les années suivantes :

- 1976 : + 12 % à Kayes, + 5 % à Kita, + 8 % à Mamou ;
- 1978 : + 9 % à Podor, + 6 % à Kayes et + 24 % à Kédougou ;
- 1981 : + 14 % à St Louis et + 2 % à Kédougou.

*

* *

L'évolution de la sécheresse (Fig. n° 27) apparait ainsi comme une sorte de combinaison de forts déficits moyens généralisés dans le bassin pendant 3 , 4 , 5 années ou plus, entrecoupées d'une année excédentaire, immédiatement suivie d'une autre suite déficitaire, le tout présentant des " pics ", des " extremum " de déficits moyens tels que 1972, 1977, 1980, 1982. Mais malgré cette variation du déficit moyen, la règle générale depuis 1968 et partout dans le bassin est à l'assèchement et les années " insolites " ne sont que des exceptions au sein d'un " train d'années sèches ".

Dans le tableau n° 18, on observe que les déficits moyens records pour des valeurs supérieures à 60 % reviennent aux stations de Kiffa (69 % en 1982), St Louis (65 % en 1977), Podor (61 % en 1972), Matam (60 % en 1972). Ces déficits moyens très élevés enregistrés en domaine sahélien, domaine en marge des régions désertiques où l'aridité est de règle, ont fait que l'on a surtout parlé de sécheresse sahélienne. Mais c'est surtout en égard aux valeurs des déficits, que la notion de rigueur dans la définition de la sécheresse par J. SIRCOULON (1976) prend tout son sens.

Les stations des domaines Nord-soudanien et Sud-soudanien ont connu des déficits moyens records situés entre 30 et 40 %.

Les stations de la région guinéenne ont surtout connu, elles, des records de déficits moyens entre 20 et 30 %. Ce sont du reste ces valeurs des

déficits moyens qui doivent amener à nuancer le terme de " sécheresse " pour la Région guinéenne.

Cependant, c'est surtout dans la situation en latitude des stations guinéennes, entre 9° et 11° N par rapport à la station de Kiffa à 16° N que la seconde notion d'extension dans la définition de la sécheresse prend tout son sens.

Enfin, on sait que le phénomène de la sécheresse a commencé en 1968 et même avant. Mais pour diverses valeurs du déficit moyen, on retrouve, quelque soit le domaine concerné, les années sèches telles que 1979, 1980, 1981 et même 1982. La notion de persistance caractère uniforme pour le bassin prend elle aussi son sens. Ces trois notions, rigueur, extension et persistance, font que cette dernière sécheresse est la plus spectaculaire des trois rappelées par J. SIRCOULON (1976).

Il faut convenir néanmoins que l'analyse pluviométrique, à elle seule, ne suffit point pour tenter une explication du phénomène de la sécheresse dans ses causes.

Nous nous bornerons à évoquer les situations diverses et complexes les plus caractéristiques que nous avons notées. Elles peuvent nous permettre, à titre " d'apprenti-chercheur ", de montrer le sens dans lequel les recherches devraient être entreprises, afin de trouver peut-être les causes de la sécheresse dans le domaine tropical.

1) Certaines années de sécheresse, 1968, 1972, 1977, 1980, font l'unanimité quant aux forts déficits moyens enregistrés dans le bassin. Les valeurs de

ces déficits partout importants sont diverses d'un domaine à l'autre et d'une station à l'autre d'un même domaine climatique. Ceci s'insère dans le caractère général de la variabilité interannuelle de la pluie, et surtout en raison de facteurs locaux qui peuvent aggraver le phénomène.

Cette variabilité et les facteurs locaux expliquent certainement que les stations d'altitude comme Mamou (783 m d'altitude) et Labé (1 025 m) aient connu, la première en 1976, un excédent moyen de 8 %, pendant que la seconde, Labé, pour la même année, enregistrait un déficit moyen de 11 %.

2) La station de Kiffa détient le record du déficit moyen du bassin : 69 % en 1982 et déjà 64 % en 1972. Doit-on évoquer uniquement sa position en latitude la plus septentrionale du bassin à 16° 38' N ? Mais alors, comment expliquer qu'en 1970, Kiffa ait connu un excédent moyen de 36 % et que Labé, Dabola et Mamou, les stations les plus méridionales du bassin (entre 9° et 11° de latitude), aient enregistré, pour la même année, des déficits moyens respectifs de 19 , 21 et 16 % ?

Les stations de St Louis, Linguère, Podor sont les stations les plus occidentales du bassin entre 14° et 15° de longitude Ouest. En 1974, elles ont enregistré des déficits moyens respectifs de 33 , 46 et 28 %, alors que la station la plus continentale, Faladye (8° 21' de longitude Ouest), pour la même année 1974, a eu une année " normale ".

On voit bien que les facteurs géographiques tels que la latitude, la longitude ou l'altitude, s'ils peuvent expliquer l'importance du déficit ou de l'excédent moyen, n'expliquent pas pour autant la constance du déficit des années de sécheresse.

Ces variations, ces situations diverses du reste peuvent s'expliquer aisément par le fait que " chaque saison des pluies a son cachet particulier en fonction de la circulation générale, des paramètres climatiques en jeu et qui se matérialise par l'abondance annuelle, la durée de l'épisode pluvieux, de l'hivernage, début, maximum et fin " (M. LEROUX, 1970). C'est dans ce contexte que les années insolites 1969, 1976 trouvent leur explication.

3) La sécheresse coïncide-t-elle à un retour cyclique d'une phase sèche ?

L'évolution en période aride et en période pluviale est confirmée par de nombreux auteurs : S. ROBERT, P. CHAMARD, P. MICHEL, P. ASSEMIEN, C. TOUPET en une série d'articles publiés en 1973. Ces articles se fondent sur des recherches paléoclimatiques, géomorphologiques, historiques, archéologiques et polliniques.

Néanmoins, comme le montre J.C. OLIVRY (1982), " la succession de périodes humides et sèches constitue un fait d'observation ... mais les observations et nos connaissances actuelles ne permettent pas d'accepter le déterminisme d'une périodicité définie par l'apparition des phénomènes ".

Du reste, J.M. GIRAUD et D. ROSSIGNOL (1973) montrent bien à travers des recherches d'extrémums et de phases par les tests de Kiveliovitch et Vialard sur les pluies " qu'il n'est pas mis en évidence des cycles dans les séries étudiées, mais l'apparition de périodes fugaces, élastiques et locales qui sont sans doute à l'origine de l'impression de cycles dans les pluies actuelles " (1).

Il nous semble que :

- l'extension même du phénomène, au-delà du bassin du Sénégal à une zone comprise dans le domaine tropical entre les isohyètes " 300 mm et 1 200 mm/an ", zone couvrant les régions sahéliennes et Nord-soudaniennes (J. SIRCOULON, 1976) ;
- le phénomène du " Niño " en Amérique Latine ;

(1) Cette étude a été faite sur les pluies de Dakar de 1901 à 1972. Elle a été étendue aux stations de St Louis, Podor, Dagana, Matam, Tambacounda et Ziguinchor. Ces stations appartiennent aux domaines sahélien, Nord-soudanien et Sud-soudanien.

- la sécheresse du Nord-est du Brésil ;

- et même la sécheresse de 1976 en France (année 1976 qui coïncide curieusement à une année normale, excédentaire, en tout cas très peu déficitaire en domaine tropical)

ces sécheresses devraient conduire à rechercher les causes dans un cadre qui englobe toutes ces régions : la circulation atmosphérique générale.

En 1970, M. LEROUX écrivait : " l'eau précipitée dans la région est fonction de l'importance de la pénétration du flux de mousson et de son épaisseur, donc du dynamisme de chaque hémisphère géographique ". Dans la même étude, il montre que " ... si l'hiver austral est très froid, l'Equateur Météorologique est fortement décalé vers le Nord. Les pluies sont généralement excédentaires ... Si au contraire, l'hiver austral est doux, l'Equateur Météorologique occupe une position plus méridionale que la normale saisonnière et les pluies sont fortement déficitaires "(Fig. n° 28).

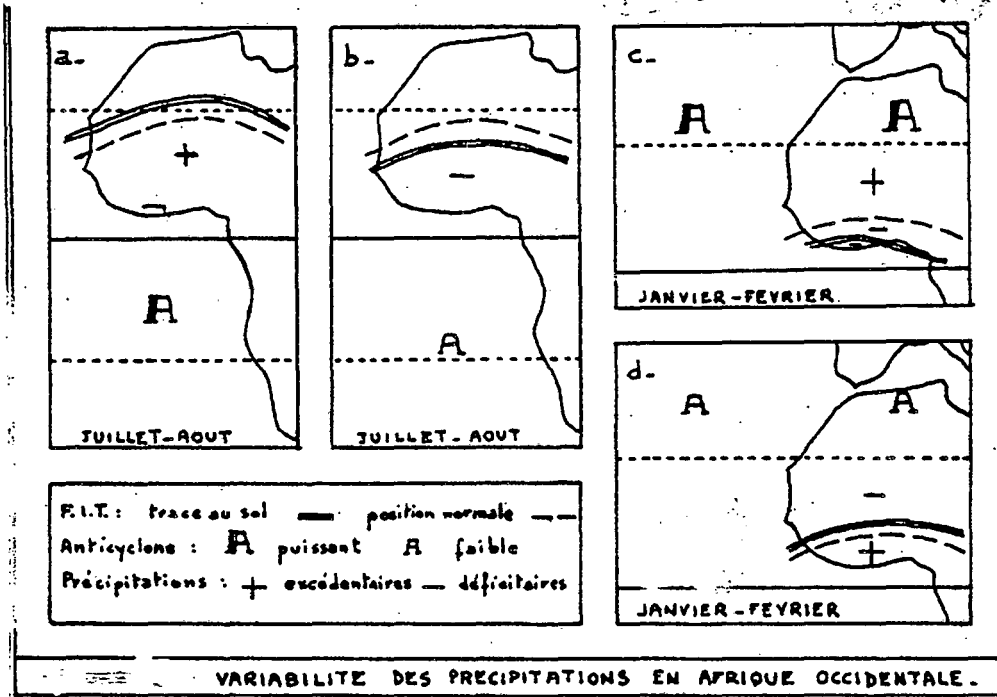
Récemment, D. LAMBERGEON (1977) confirme cette assertion en montrant que " lorsque les pressions sont à la fois fortes à Abidjan et faibles à Nouadibhou, les pluies sont supérieures à la normale sur les régions du Sahel, les pluies étant déficitaires lorsque se produit l'inverse ".

Ainsi, les déficits qui se prolongent depuis une quinzaine d'années dans certaines régions du domaine tropical ne constituent qu'un épisode dans l'évolution climatique qui ne peut s'expliquer que par la circulation atmosphérique générale.

Quelle évolution prendra la pluviométrie dans cette phase de péjoration qui dure depuis plus de 15 ans ? Les connaissances et la documentation, encore moins notre étude pluviométrique ne nous permettent de répondre à

En annexe, nous illustrons par des coupures de journaux de la presse sénégalaise et internationale sur les problèmes que pose l'eau dans les pays concernés par la sécheresse.

FIG. 28



d'après M. Leroux (1976)

cette interrogation.

Les études récentes de J. SIRCOULON (1976), les travaux de M. LEROUX sur " le climat de l'Afrique tropicale " (1980), l'étude de J.C. OLIVRY (1982) font penser qu'il ne faut pas s'attendre à des lendemains meilleurs, ce qui semble se confirmer par les totaux pluviométriques enregistrés en 1982 et 1983.

Mais, pour une fois, malgré notre estime, souhaitons leur d'avoir tort.

CHAPITRE VIII

LES FACTEURS DETERMINANTS DE
L'ÉCOULEMENT MOYEN ANNUEL

Il s'agit de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée et des facteurs thermiques du Bassin du Sénégal. L'eau écoulee par les rivières provient uniquement de la pluie. Les facteurs thermiques, par l'évaporation et l'évapotranspiration qu'ils concourent à déterminer, exercent une ponction plus ou moins importante sur l'eau précipitée dans le bassin.

Ces deux paramètres que nous estimons ont ainsi une influence déterminante sur l'écoulement moyen annuel.

A/ LA LAME D'EAU MOYENNE ANNUELLE DANS LE BASSIN

La lame d'eau moyenne annuelle dans le bassin est déterminée pour la période trentenaire 1951 - 1980. Du fait de la variabilité annuelle de la pluie, cette période est représentative de la pluviométrie moyenne dans le bassin. Elle englobe une phase extrême humide (les années " 1950 ") et une phase extrême sèche (la sécheresse récente des années " 1970 ").

Cependant, pour une analyse complète de l'écoulement moyen annuel dans le bassin, nous avons aussi estimé la lame d'eau moyenne tombée pour la période décennale 1970 - 1980 (période de la sécheresse).

Mais la lame d'eau moyenne annuelle est estimée à partir d'un modèle, sous la forme d'une relation entre la pluie et les facteurs géographiques, que nous expliquons.

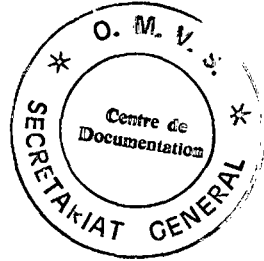
BASSINS DES FLEUVES SENEGAL ET NIGER

PRESENTATION DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES RETENUES
POUR LE PROGRAMME DE REGRESSION MULTIPLES SUR 4

TABLEAU N° 20

VARIABLES: La Précipitation moyenne 1951-1980 - La Latitude en D° et minutes
La Longitude et l'Altitude en mètres. PAR DOMAINE CLIMATIQUES
PROGRAMME ETABLI PAR J. P. Laborde INPL NANCY

STATIONS	X ₁ Précipitation	X ₂ LATITUDE	X ₃ LONGITUDE	X ₄ ALTITUDE		
1	PODOR	280	16° 38'	14° 56'	6m	DOMAINE SAHELNIEN
2	BOGHE	301	16° 34'	14° 17'	11m	
3	DAGANA	287	16° 31'	15° 30'	5m	
4	ROSSO	266	16° 30'	15° 49'	5m	
5	S° LOUIS	294	16° 01'	16° 30'	4m	
6	MATAM	437	15° 32'	13° 15'	15m	
7	LOUGA	371	15° 37'	16° 13'	38m	
8	LINGUERE	457	15° 23'	15° 07'	20m	
9	BALLE	455	15° 20'	8° 35'	285m	
10	DAHRA	462	15° 20'	15° 28'	39m	
11	COKI	401	15° 17'	14° 52'	15m	
12	NIOURO DU SAHEL	564	15° 14'	9° 36'	235m	
13	SELIBABY	415	15° 14'	12° 10'	60m	
14	NARA	440	15° 10'	9° 17'	263m	
15	YELIMANE	521	15° 07'	10° 24'	27m	
16	AOUROU	536	14° 58'	11° 35'	66m	
17	BAKEL	499	14° 54'	13° 22'	25m	DOMAINE NORD SOUDANAIEN
18	KOUSSANE	590	14° 53'	11° 44'	96m	
19	SANDARE	704	14° 43'	10° 18'	24m	
20	AMBIDEDI	669	14° 35'	11° 47'	20m	
21	KONIAKARY	319	14° 34'	10° 54'	61m	
22	DIEMA	670	14° 23'	9° 11'	252m	
23	MOURDIAH	504	14° 22'	9° 28'	314m	
24	KIDIRA	695	14° 22'	12° 13'	35m	
25	KAYES	685	14° 26'	14° 26'	46m	
26	OUSSOUBIDIAGNA	789	14° 15'	10° 22'	258m	
27	DIAMOU	757	14° 06'	11° 16'	60m	
28	KOUROUNINKOTO	840	13° 52'	9° 35'	267m	
29	GALOUGO	852	13° 50'	11° 04'	94m	
30	BAFOULABE	847	13° 48'	10° 50'	104m	
31	TOUKOTO	852	13° 27'	9° 53'	177m	
32	SEGOU	702	12° 27'	6° 16'	288m	
33	GOURBASSI	916	13° 24'	11° 22'	74m	
34	SAN	759	12° 18'	4° 54'	227m	
35	FALADYE	975	13° 02'	8° 21'	333m	
36	KITA	1033	12° 04'	9° 27'	328m	
37	NEGALA	996	12° 57'	7° 30'	290m	
38	KENIEBA	1392	12° 48'	11° 21'	136m	DOMAINE SUD-SOUDANAIEN
39	SARAYA	1065	12° 47'	11° 47'	181m	
40	GUENEGORO	1303	12° 46'	11° 01'	240m	
41	SIRAKORO	1086	12° 41'	9° 40'	269m	
42	KEDOUGOU	1285	12° 33'	12° 13'	122m	
43	BAMAKO	1062	12° 32'	8° 01'	324m	
44	KOUTIALA	994	12° 24'	5° 22'	257m	
45	FALEA	1422	12° 16'	11° 17'	405m	
46	KANGABA	1440	11° 56'	8° 25'	270m	
47	TOUGUE	1451	11° 26'	11° 40'	828m	
48	BOUGOUNI	1208	11° 25'	7° 30'	253m	
49	SIKASSO	1221	11° 19'	5° 41'	285m	
50	LABE	1660	11° 19'	12° 18'	1025m	
51	PITA	1642	11° 04'	12° 24'	965m	
52	DABOLA	1544	10° 45'	11° 07'	438m	
53	MAMOU	1939	10° 22'	12° 05'	783m	DOMAINE GUINEEN
54	ODIENNE	1628	9° 30'	7° 34'	432m	
55	DALABA	2149	10° 42'	12° 15'	1269m	



1. Le modèle d'estimation de la lame d'eau moyenne annuelle

L'estimation de la pluie moyenne tombée sur un bassin-versant n'est pas chose aisée. Pourtant, le problème, d'une manière générale, se pose de façon simple.

Il s'agit, connaissant la pluie tombée sur un nombre de postes pluviométriques, de calculer la pluie ou la lame d'eau moyenne sur une aire à partir des postes observés. Il apparaît ainsi posé comme une sorte d'extrapolation d'une moyenne pluviométrique observée en un point, en tout point d'une aire considérée, le plus proche du poste observé, en pondérant la valeur moyenne avec la surface considérée pour le poste (méthode de Thiessen).

La méthode des isohyètes, quant à elle, tient compte du relief. L'extrapolation des courbes d'égaux hauteurs pluviométriques se fait à partir des données morphométriques.

En effet, en tout point d'un bassin-versant, on connaît la latitude, la longitude, l'altitude et aux points d'observation la moyenne pluviométrique tombée.

Il semble ainsi possible de restituer une pluie moyenne en tout point, en tenant compte des trois variables connues : la latitude, la longitude et l'altitude.

Le problème ainsi posé nous suggère un modèle d'estimation de la pluie moyenne annuelle précipitée sur le Bassin du Sénégal par une régression multiple sur les quatre variables connues, dont le résultat serait une équation de régression sous la forme :

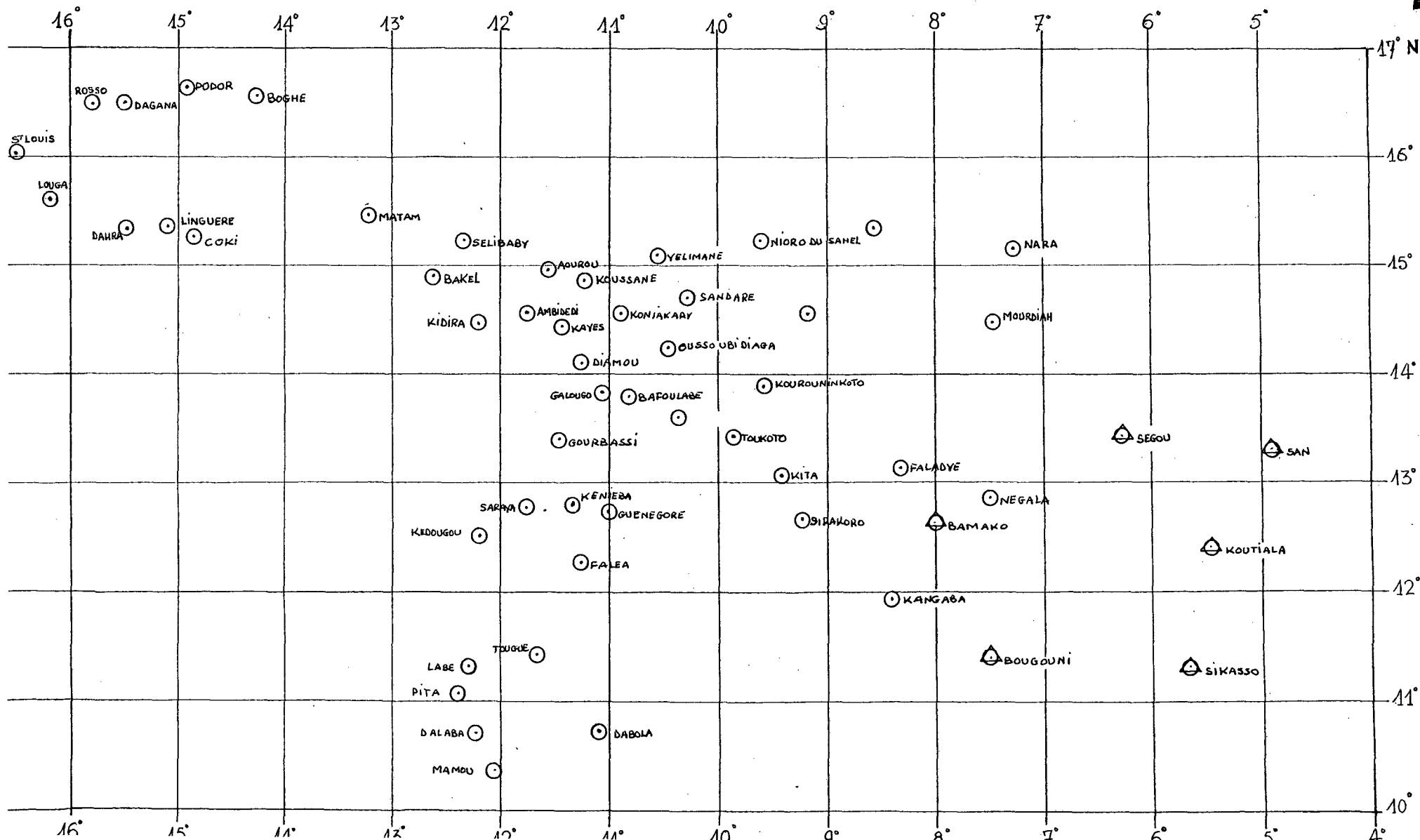
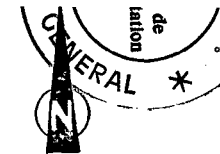
$$Y = B + A x_2 + C x_3 + D x_4 \pm \epsilon$$

avec Y = la pluie moyenne en un point quelconque du bassin, connaissant :
 x_2 = la latitude, x_3 = la longitude et x_4 = l'altitude ;
 B = le coefficient de l'équation (coefficient B_0 : tableaux n° 21 et 22) ;
 A, C, D = les coefficients de régression associés aux variables indépendantes x_2, x_3 et x_4 ;

○ STATIONS DU BASSIN DU SENEGAL

△ STATIONS DU BASSIN DU NIGER

REPARTITION SPATIALE EN FONCTIONS DES DOMAINES CLIMATIQUES
DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES RETENUES POUR LA REGRESSION
MULTIPLE SUR LES 4 VARIABLES : Precipitation moyenne - Latitude - Longitude - Altitude



ξ = l'erreur-type sur l'estimation (cf. chapitre VI).

L'emploi de ce modèle défini avec J.F. ZUMSTEIN (1) a été rendu aisé par l'utilisation de l'ordinateur. Le modèle appliqué aux bassins du Sénégal et du Niger (2) a été construit à partir des observations de 55 postes pluviométriques répartis dans les deux bassins (tableau n° 20 et fig. n° 29).

La régression a été faite par domaine climatique avec la moyenne des précipitations annuelles de la période 1951 - 1980.

Un autre modèle a été construit à partir de la moyenne décennale 1970 - 1980. Les résultats pour les deux périodes sont donnés dans les tableaux n° 24 et 25.

Pour une estimation précise de la pluie moyenne tombée, il convient d'effectuer un carroyage régulier qui couvre la totalité du bassin-versant. La pluie moyenne sera celle du centre d'un carreau considéré.

Un intérêt du modèle se trouve dans le fait que l'on peut modifier la taille des carreaux, connaissant toujours en leur centre la latitude, la longitude et l'altitude. Une moyenne arithmétique de l'ensemble des pluies moyennes restituées par carreaux, couvrant la superficie du bassin, donne la lame d'eau moyenne annuelle précipitée.

Un second intérêt du modèle réside dans le fait que la régression est associée à un coefficient de corrélation multiple et à une matrice de coefficients de corrélation partiels :

- le coefficient de corrélation multiple donne une idée de la nature du lien existant entre les différents paramètres, les différentes variables considérés. Il s'agit de la variance totale expliquée par les variables ;

(1) J.F. ZUMSTEIN : ingénieur hydrologue à l'Agence du Bassin Rhin-Meuse.

(2) A. BALLO (1984) : " Les modalités d'écoulement fluvial en domaine tropical humide africain ... ", thèse de 3e cycle, Nancy.

REGRESSION MULTIPLE LINEAIRE

*

LES DONNEES UTILISEES PROVIENNENT DU FICHIER NORDSOUD
QUI CONTIENT LES 21 OBSERVATIONS FAITES SUR LES
4 VARIABLES.

REGRESSION SUR 3 VARIABLES EXPLICATIVES

NO.VAR.COE.F.REG.
COEF.COR.PART.

2-268.650058
-.925876398
353.7264247
.770173544
4.524227443
.581107563

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE: .936057623
COEFFICIENT B0 : 3850.45838

TEST DE STUDENT FISHER SUR LE COEF. DE REG. MUL. :
SEUIL A 95% : 3.35512768 (NU1=3, NU2=17)
VAL. EXPR. : 40.107517

TEST DE STUDENT SUR LE PLUS PETIT COEF. DE COR. PARTIELLE :
SEUIL A 95% : 2.10985846 (NU=17)
VAL. EXPR. : 2.94407603

MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION :

	1	2	3	4
1	1	-.87754	-.13347	.319377
2	-.87754	1	.533404	-.44463
3	-.13347	.533404	1	-.70578
4	.319377	-.44463	-.70578	1

REGRESSION MULTIPLE LINEAIRE

*

LES DONNEES UTILISEES PROVIENNENT DU FICHIER SAHELIEU
QUI CONTIENT LES 15 OBSERVATIONS FAITES SUR LES
4 VARIABLES.

REGRESSION SUR 3 VARIABLES EXPLICATIVES

NO.VAR.COE.F.REG.
COEF.COR.PART.

2-141.145945
-.825709154
3-12.7329461
-.327192056
4-1.172234274
-.15734988

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE: .900607768
COEFFICIENT B0 : 2775.82121

TEST DE STUDENT FISHER SUR LE COEF. DE REG. MUL. :
SEUIL A 95% : 3.74808319 (NU1=3, NU2=11)
VAL. EXPR. : 15.7433759

TEST DE STUDENT SUR LE PLUS PETIT COEF. DE COR. PARTIELLE :
SEUIL A 95% : 2.20102846 (NU=11)
VAL. EXPR. : .5284535

MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION :

	1	2	3	4
1	1	-.82029	-.60638	.586375
2	-.82029	1	.543611	-.55817
3	-.60638	.543611	1	-.93052
4	.586375	-.55817	-.93052	1

TABLEAU N°21

- 194 -

- les coefficients de corrélation partiels donnent la part de variance expliquée dans la variance totale.

Le dépouillement de la matrice des coefficients de corrélation partiels et son analyse dans une optique géographique donnent une idée pour la période 1951 - 1980 des paramètres les plus déterminants par leur influence et par domaine climatique dans la dynamique des précipitations dans le Bassin du Sénégal et dans le domaine tropical.

Mais il convient avant tout de rappeler cette dynamique dans ses grandes lignes.

2. La dynamique des précipitations dans le bassin

La pluie dans le bassin et dans le domaine tropical est fonction :

- de la présence du flux de mousson, chaud et humide, de son épaisseur et de sa pénétration, quant à l'importance des totaux précipités (chapitre VI). La mousson évolue avec la latitude. En somme, la latitude (ou la mousson) est le principal vecteur d'humidité précipitable dans le bassin ;
- de l'utilisatrice principale de " l'eau de la mousson " qui est la ligne des grains (M. LEROUX, 1970, et chapitre VI). La ligne de grains évolue d'Est en Ouest, donc longitudinalement.

Vers l'Est, elle garde encore toutes ses potentialités énergétiques car elle est constamment renforcée par l'arrivée de noyaux d'Est froids (renfort. thermique),

Vers l'Ouest, elle les épuise progressivement et son passage de jour sur les régions côtières est gêné par les phénomènes de " brises de terre " et de " brises de mer ".

Mais on peut dire que son déplacement, en plus du facteur précité, est fonction de la répartition des totaux de pluie, vu que la mousson, vecteur d'humidité, a une direction générale Nord-est.

REGRESSION MULTIPLE LINEAIRE

*

LES DONNEES UTILISEES PROVIENNENT DU FICHIER SUBSQUC
QUI CONTIENT LES 10 OBSERVATIONS FAITES SUR LES
4 VARIABLES.

REGRESSION SUR 3 VARIABLES EXPLICATIVES

NO. VAR. COEF. REG.
COEF. COR. PART.

2-85.3704138
.739850464
3-2.526654
.815649082
4.390914831
.369443115

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE: .822846241
COEFFICIENT B0 : 1484.53077

TEST DE STUDENT FISHER SUR LE COEF. DE REG. MUL. :
SEUIL A 95% : 4.94821401 (NU1=3, NU2=6)
VAL. EXPER. : 4.22515052

MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION :

	1	2	3	4
1	1	-.07383	.749087	-.17339
2	-.07383	1	.221483	-.49534
3	.749087	.221483	1	-.52087
4	-.17339	-.49534	-.52087	1

REGRESSION MULTIPLE LINEAIRE

*

LES DONNEES UTILISEES PROVIENNENT DU FICHIER GUINEEN
QUI CONTIENT LES 9 OBSERVATIONS FAITES SUR LES
4 VARIABLES.

REGRESSION SUR 3 VARIABLES EXPLICATIVES

NO. VAR. COEF. REG.
COEF. COR. PART.

2-269.970848
-.877195381
318.3107306
.281400064
4.649285273
.773180587

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE: .948267413
COEFFICIENT B0 : 3842.08497

TEST DE STUDENT FISHER SUR LE COEF. DE REG. MUL. :
SEUIL A 95% : 5.63469054 (NU1=3, NU2=5)
VAL. EXPER. : 14.8696059

TEST DE STUDENT SUR LE PLUS PETIT COEF. DE COR. PARTIELLE :
SEUIL A 95% : 2.57037757 (NU=5)
VAL. EXPER. : .655727256

MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION :

	1	2	3	4
1	1	-.49425	.694617	.731566
2	-.49425	1	.054082	.151613
3	.694617	.054082	1	.819268
4	.731566	.151613	.819268	1

CARTEN^o22

- 196 -

En somme, la longitude, la ligne de grains peut être perçue comme facteur de répartition ;

- enfin, la pluie peut être aussi fonction de l'altitude qui est un facteur local qui peut perturber l'ordonnance générale des éléments climatiques. Elle peut donner lieu à d'importantes chutes de pluie grâce à son influence.

Il s'agit dans cette description générale de savoir quel est le facteur le plus déterminant dans la dynamique des précipitations par domaine climatique, au regard des coefficients de corrélation entre la pluie et les différents paramètres latitude, longitude et altitude.

Dans le tableau n° 23 suivant, nous donnons ces différents coefficients.

Tableau n° 23. Coefficients de corrélation multiples et partiels dans le Bassin du Sénégal (période 1951 - 1980).

Climats	Coefficients de corrélation partiels			Coefficient multiple
	Pluie et latitude	Pluie et longitude	Pluie et altitude	
Dom. sahélien 15 observations	- 0,82	- 0,60	+ 0,58	0,90
Dom. Nord-soudanien 21 obs.	- 0,88	- 0,13	+ 0,32	0,94
Dom. Sud-soudanien 10 obs.	- 0,07	- 0,75	- 0,17	0,82
Rég. guinéenne 9 obs.	- 0,49	+ 0,69	+ 0,73	0,95

a) La pluie dans le bassin

La dynamique de la pluie décrite plus haut explique bien la valeur du coefficient de corrélation multiple. Les trois paramètres latitude, longitude, altitude interviennent pour expliquer la pluie. Les coefficients sont partout proches de 1 et soutiennent l'hypothèse d'une relation fonctionnelle proche de la linéarité.

b) La pluie et la latitude

Elles présentent un coefficient de corrélation suggestif d'une relation proche de la linéarité en domaine sahélien et Nord-soudanien. Dans ces deux domaines plus au Nord, la pluie, la latitude inévitablement suppose la présence, l'arrivée du flux de mousson. Ce qui veut dire que dans la variance totale expliquée par les coefficients de corrélation multiple 0,90 en domaine sahélien et 0,94 en domaine Nord-soudanien, dans ce total plus de 80 % sont expliqués par la latitude.

En région guinéenne, le coefficient de corrélation partiel est moins élevé et nettement très faible en domaine Sud-soudanien.

- Est-ce dû à la présence quasi permanente du flux de mousson dans ces régions, surtout guinéenne, ce qui en fait un facteur moins déterminant ?

- Ou alors simplement les faibles coefficients s'expliquent-ils par l'existence d'un autre lien, d'une autre relation fonctionnelle non linéaire ? Cette dernière hypothèse satisfait mieux car la présence de mousson, donc la latitude, est le facteur premier dans la dynamique des précipitations. Cependant, dans la région guinéenne, où elle est presque toujours présente, et du fait du relief, la mousson a surtout besoin d'une instabilité pour donner d'abondantes pluies.

Néanmoins, les valeurs négatives des coefficients partiels montrent que l'évolution est inverse entre la pluie et la latitude. La mousson prend une direction générale Nord-est après passage de l'Equateur.

c) La pluie et la longitude

Elles ne semblent présenter un coefficient appréciable qu'en domaine Sud-soudanien, en région guinéenne, et dans une moindre mesure en domaine sahélien.

Le domaine Nord-soudanien le plus étendu en longitude a un coefficient faible. Nous y avons pourtant noté que les stations les plus à l'Est sont les plus arrosées. Mais l'essentiel des stations est groupé à l'Ouest (Fig. n° 29).

d) La pluie et l'altitude

Ces deux variables présentent un coefficient relativement élevé en région guinéenne. Cela est tout naturel car c'est la région montagneuse du bassin où le relief favorise d'importantes chutes de pluie.

En domaine Sud-soudanien, ce coefficient est très faible. Ce domaine apparaît comme étant à l'abri du massif montagneux, sur le versant sous le vent. Il s'y ajoute que la masse montagneuse orientée Sud-ouest - Nord-est a tendance à canaliser davantage le flux de mousson vers le Nord-est.

Le domaine Nord-soudanien est une région de plateaux entre 500 et 600 m d'altitude. Des reliefs qui ne sont pas assez élevés pour surélever la mousson qui, du reste, doit franchir avant des altitudes de plus de 1 000 m en région guinéenne. Cela pourrait expliquer le faible coefficient partiel dans ce domaine, toutefois dans l'hypothèse d'une relation fonctionnelle linéaire entre la pluie et le relief.

Le coefficient de corrélation partiel est relativement plus important en domaine sahélien qu'en domaine Nord-soudanien. Il existe ici quelques massifs dunaires : l'Affolé, le Tagant, l'Assaba qui se dressent sur une région d'altitude moyenne entre 100 et 200 m. Si la mousson atteint ce domaine et si elle conserve encore assez de potentiel précipitable, le relief peut localement jouer.

En somme, si l'on ne considère que la valeur du coefficient de corrélation partiel, on peut noter que par domaine climatique, respectivement les facteurs suivants sont les plus déterminants :

- domaine sahélien : latitude, longitude, altitude ;
- domaine Nord-soudanien : latitude, altitude, longitude ;
- domaine Sud-soudanien : longitude, altitude, latitude ;
- région guinéenne : altitude, longitude, latitude.

*

* *

Cette analyse sur les coefficients de corrélation partiels n'a qu'une valeur suggestive quant aux recherches que l'on pourrait mener en ce sens, en vue de mieux préciser l'influence ou le rôle déterminant des divers facteurs dans la dynamique des précipitations.

Elle ne mène pas à des conclusions rigoureuses car elle n'est faite qu'à partir de coefficients partiels qui, même faibles, ne dénotent ni une absence de liaison, ni une dépendance à l'inverse, ni même une interdépendance des facteurs. Il s'y ajoute que nos réflexions ne sont déduites que de l'hypothèse d'une relation fonctionnelle proche de la linéarité, relation qui ne se vérifie totalement que pour le coefficient de corrélation multiple.

L'existence d'une autre liaison entrainerait systématiquement une sous-estimation des coefficients partiels.

Il n'en demeure pas moins que ces combinaisons entre variables représentent des complexes climatiques très intéressants quant à l'influence déterminante que les unes et les autres pourraient avoir dans la dynamique des précipitations en domaine tropical.

Enfin, le modèle permet surtout avec les pluies moyennes annuelles

restituées de tracer les cartes des isohyètes moyennes annuelles.

3. La carte des isohyètes moyennes annuelles et la pluie moyenne dans le bassin

a) La carte des isohyètes

Le tracé à partir du modèle est très aisé pour les domaines sahélien et Nord-soudanien. Il est plus difficile pour le domaine Sud-soudanien en raison de sa faible étendue dans notre bassin.

Il est en revanche très délicat pour la région guinéenne en raison des altitudes élevées et variables d'un point à l'autre.

Toutes les altitudes des points de pluies moyennes annuelles ont été déterminées à partir des cartes topographiques couvrant le bassin et dont nous donnons la liste en annexe.

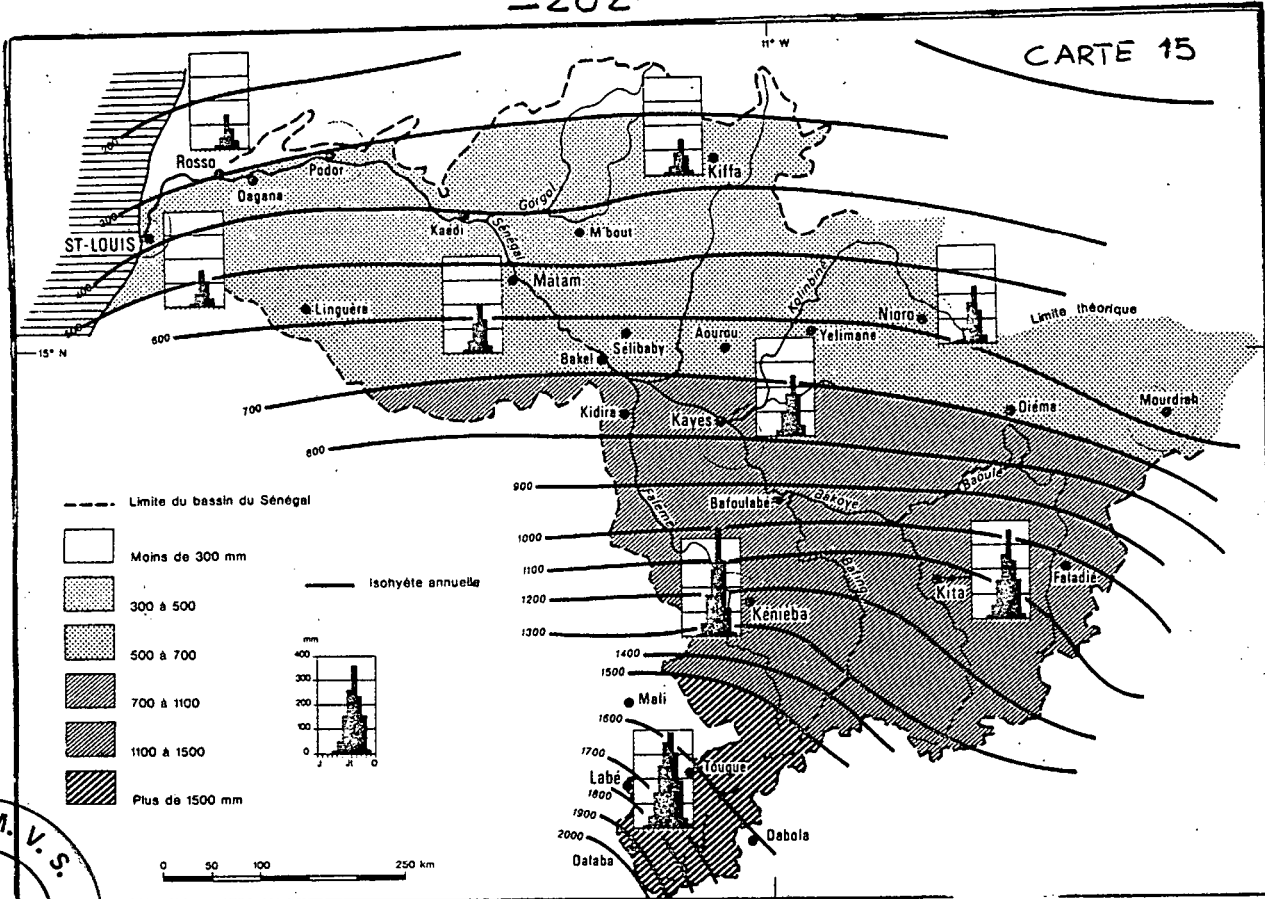
Néanmoins, nous mettons en garde quant à l'utilisation du modèle. En effet, une altitude moyenne ne peut être considérée. Cette valeur moyenne coïncide rarement avec l'altitude réelle du centre du carreau, et systématiquement les pluies moyennes restituées prendront une même valeur unique, ce qui réduirait l'effet du modèle.

Toutefois, le tracé des isohyètes moyennes annuelles est sensiblement parallèle en domaine sahélien, où il s'y ajoute un espacement important qui témoigne de la faible pluviométrie dans ce domaine.

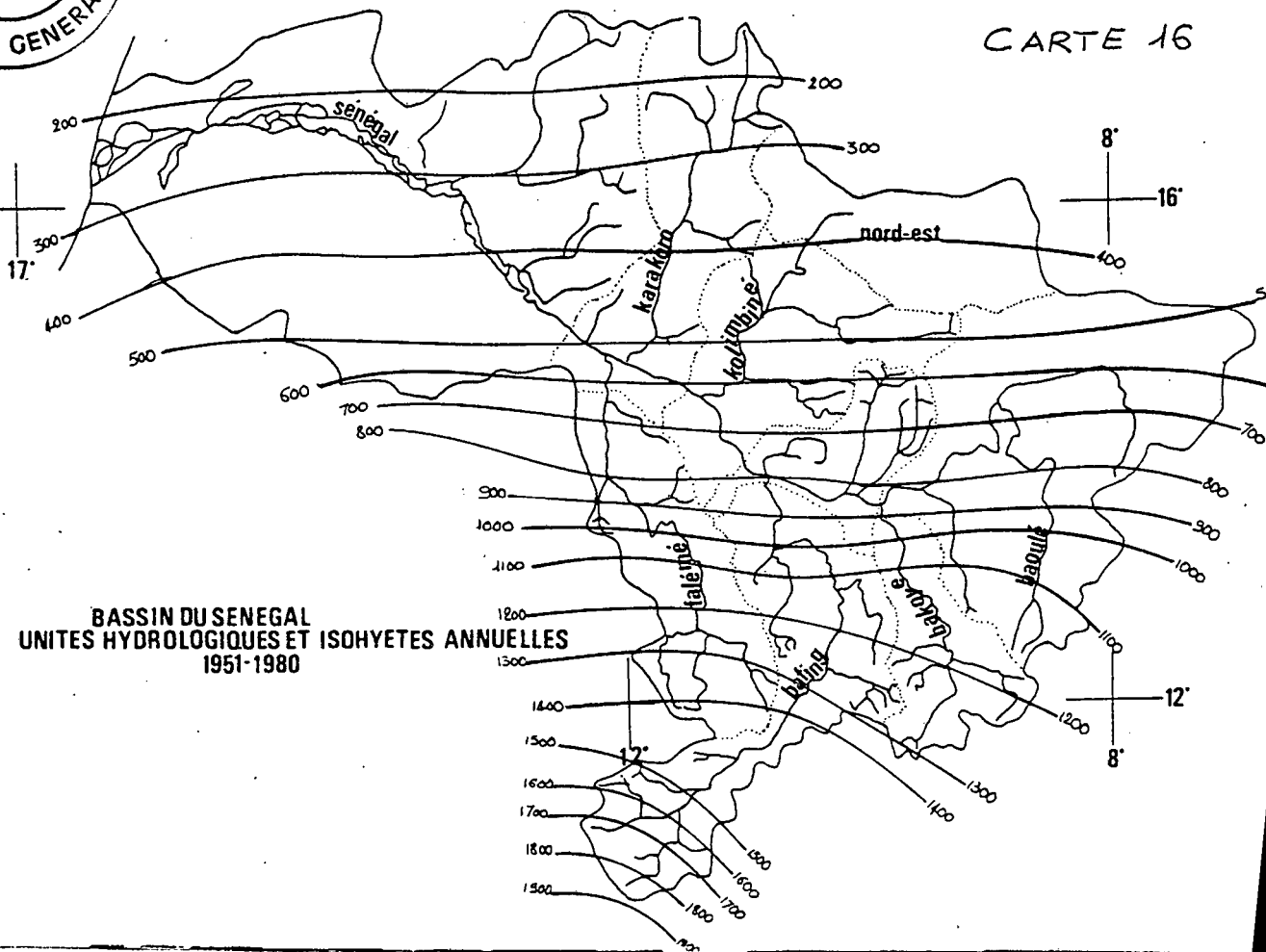
En domaine Nord-soudanien, les isohyètes moyennes annuelles se resserrent mais le parallélisme est moins évident.

A la limite Sud de ce domaine (isohyète 1 000 mm/an), à l'Est du bassin, les isohyètes ont tendance à replonger vers le Sud du bassin (carte n° 16).

Cette tendance est plus nette en domaine Sud-soudanien et en région guinéenne.



— Précipitations moyennes annuelles sur le bassin du Sénégal et évolution des précipitations moyennes mensuelles (d'après C. Rochette)



La comparaison des cartes des isohyètes annuelles pour les périodes 1931 - 1960 et 1951 - 1980 est très significative (cartes n° 15 et n° 16).

Entre 1931 et 1960, le bassin est limité au Nord par l'isohyète 300 mm/an et au Sud par l'isohyète 2 000 mm/an.

Entre 1951 et 1980, le bassin se trouve limité au Sud par l'isohyète 1 900 mm/an. Au Nord, l'isohyète 300 mm/an se trouve vers 16° N et l'isohyète 200 mm/an (au Nord du bassin pour 1931 - 1960) se situe dans le bassin, et la limite Nord correspondrait à l'isohyète 150 mm/an.

Ainsi, la période 1951 - 1980 par rapport à 1931 - 1960 s'inscrit bien dans une période de péjoration pluviométrique (chapitre VII). Cette péjoration sera sans nul doute ressentie dans l'écoulement moyen annuel, surtout pour la période 1970 - 1980, période de sécheresse dont nous avons tracé aussi la carte des isohyètes moyennes (carte n° 18).

b) La pluie moyenne annuelle dans le bassin

Elle est estimée par sous-bassin (Falémé, Baoulé, Karakoro, Kolimbiné) et dans la seule zone endoréique du bassin que nous avons baptisée " Zone Nord-est ". Cette appellation est surtout donnée en raison de la situation de cette zone au Nord-est du bassin (cartes n° 17 et 18).

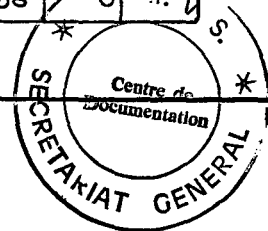
Une première estimation globale a été faite par sous-bassin. Mais vu que les sous-bassins peuvent s'étendre sur plusieurs domaines climatiques, nous avons estimé la lame d'eau moyenne annuelle pour chaque domaine d'un sous-bassin.

En vue d'homogénéiser les deux moyennes ainsi calculées, nous avons déterminé un " coefficient d'homogénéisation " (cf P. DUBREUIL, 1971) en faisant le rapport

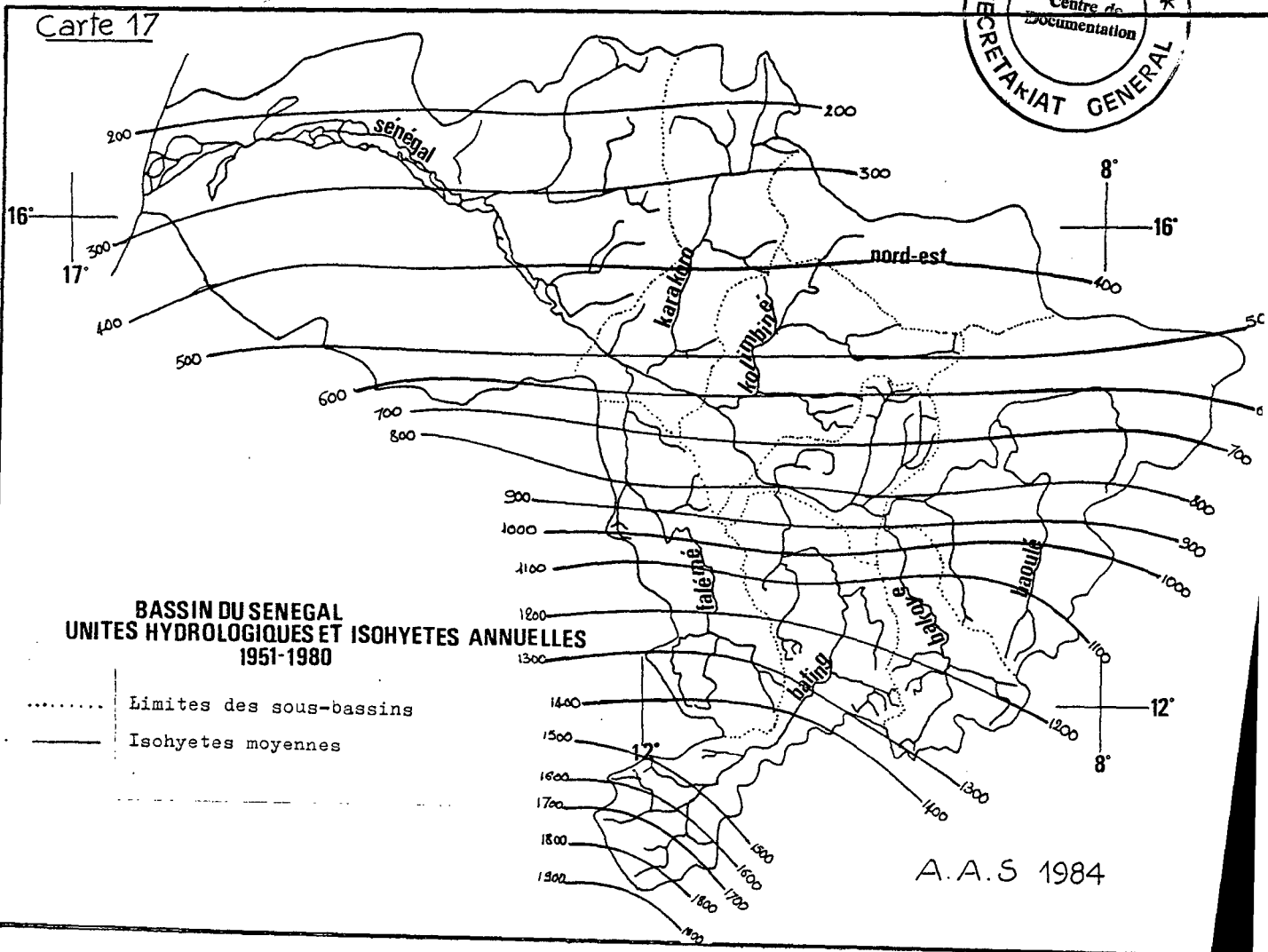
$$C.H = \frac{E.G}{E'G}$$

Tableau 24 : LAMES D'EAU MOYENNES PRECIPITEES Periode 1951-1980

BASSINS	Reg-guineenne	Dom-sud-souda	Dom-nord-soud	Dom-sahelien	Moyennes	E.G	C.H
FALEME	1196 1135	1190 1129	847 804		1078 1023	1023	0.95
BAFING	1450 1466	1206 1220	1047 1059		1234 1248	1248	1.01
BAKOYE		1212 1225	1141 1154		1177 1190	1190	1.01
BAOULE		1213 1107	844 770	509 464	855 780	780	0.91
KARAKORO			764 742	342 332	553 537	537	0.97
KOLIMBINE			786 922	465 545	626 734	734	1.17
NORD-EST				398	398	398	
HAUT-BASSIN	1414 1227	1216 1055	740 642	401 348	943 818	818	0.87
VALLEE INF-			608 496	308 252	458 374	374	0.81
BASSIN DU SENEGAL	1406 1027	1216 888	782 571	350 256	939 686	686	0.76



Carte 17



avec E.G = estimation globale par bassin ,

E'G = moyenne des estimations par domaine climatique pour chaque bassin ,

C.H = le coefficient par lequel il faut multiplier les moyennes par domaine climatique.

C'est aussi par le même procédé et pour les deux périodes 1951 - 1980 et 1970 - 1980 que nous avons estimé la lame d'eau moyenne annuelle pour le Haut-Bassin et pour le Cours Inférieur du Fleuve Sénégal.

Les résultats de toutes ces estimations sont donnés dans les tableaux n° 24 et n° 25.

Les équations de régression pour les pluies moyennes annuelles par domaine climatique sont les suivantes :

Période 1951 - 1980

Domaine sahélien :

$$\text{Pluie moyenne / an} = 2\,775.82 + (-141.15 * x_2) + (-12.73 * x_3) + (-0.16 * x_4) ;$$

Domaine Nord-soudanien :

$$\text{Pluie moyenne / an} = 3\,850.46 + (-268.65 * x_2) + (-53.73 * x_3) + (-0.52 * x_4) ;$$

Domaine Sud-soudanien :

$$\text{Pluie moyenne / an} = 1\,484.53 + (-83.37 * x_2) + 62.33 * x_3 + 0.39 * x_4 ;$$

Région guinéenne :

$$\text{Pluie moyenne / an} = 3\,842.08 + (-269.97 * x_2) + 18.61 * x_3 + 0.65 * x_4 ;$$

Période 1970 - 1980

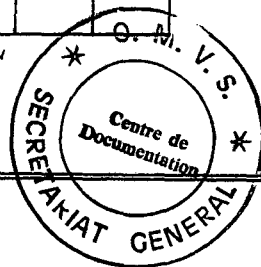
Domaine sahélien :

$$\text{Pluie moyenne / an} = 2\,241.09 + (-112.69 * x_2) + (-12.72 * x_3) + (-0.23 * x_4) ;$$

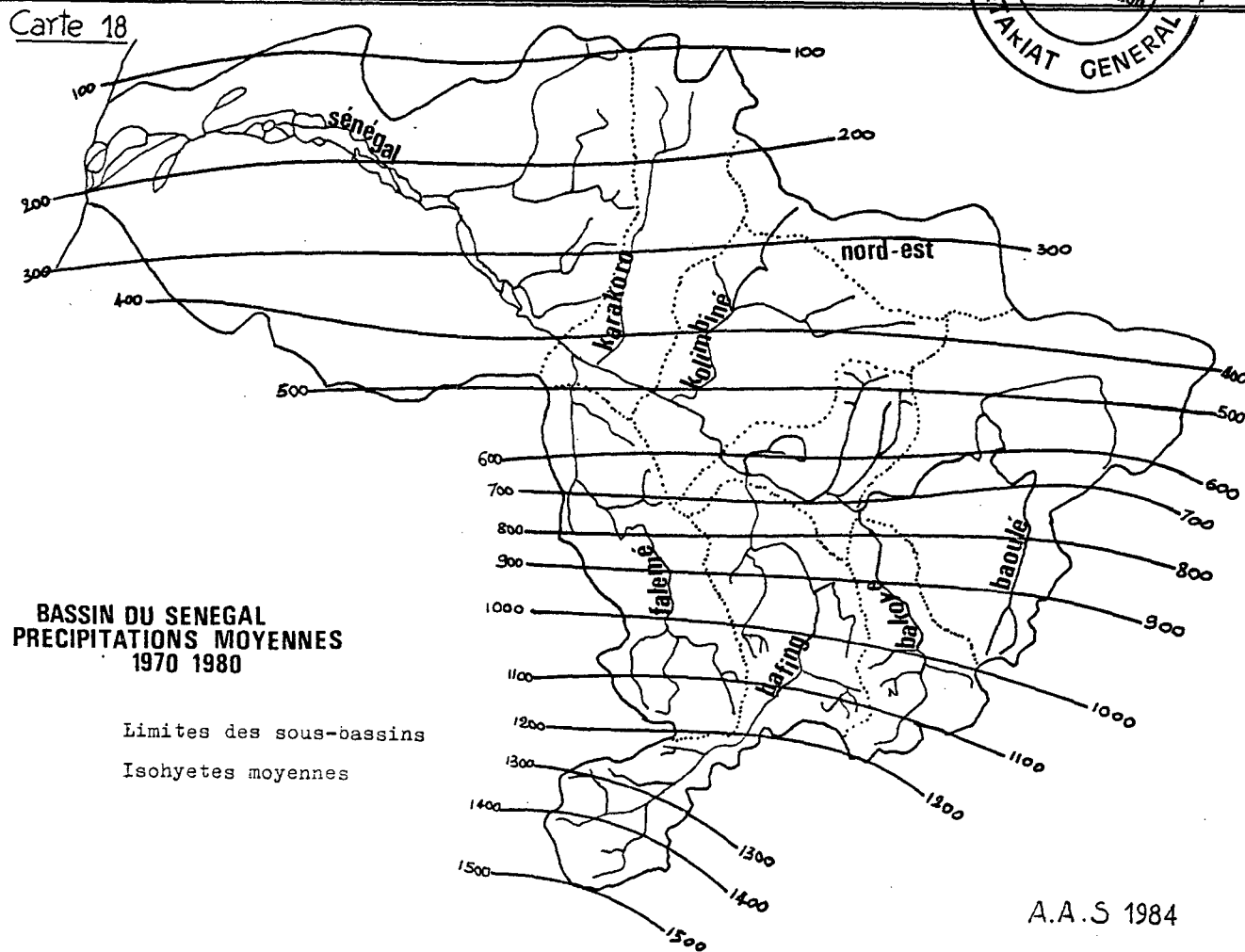
Tableau 25 : LAMES D'EAU MOYENNES PRECIPITEES Periode 1970-1980

BASSINS	Reg-guineenne	Dom-sud-souda	Dom-nord-soud	Dom-sahelien	Moyennes	E.G	C.H
FALEME	1079 [1038]	1082 [1040]	724 [696]		962 [925]	925	0.96
BAFING	1347 [1440]	1053 [1126]	850 [909]		1083 [1153]	1158	1.06
BAKOYE		1045 [1108]	823 [872]		934 [990]	990	1.06
BAOULE		1018 [932]	660 [604]	444 [406]	707 [647]	647	0.92
KARAKORO			459 [393]	225 [193]	342 [293]	293	0.86
KOLIMBINE			581 [714]	332 [408]	457 [562]	562	1.2
NORD-EST				301	301	301	
HAUT-BASSIN	1268 [1053]	1086 [902]	677 [562]	319 [265]	838 [696]	696	0.83
VALLEE INF			408 [332]	225 [183]	317 [258]	258	0.81

E.G : estimation globale C.H : coefficient d'homogenisation
 [] valeur homogenisee



Carte 18



Domaine Nord-soudanien :

Pluie moyenne / an = $3\ 104.28 + (-195.21 * x_2) + 18.31 * x_3 + 0.34 * x_4$;

Domaine Sud-soudanien :

Pluie moyenne / an = $2\ 401.97 + (-154.77 * x_2) + 50.84 * x_3 + 0.18 * x_4$;

Région guinéenne :

Pluie moyenne / an = $3\ 790.56 + (-264.54 * x_2) + 17.17 * x_3 + 0.45 * x_4$

*

* *

Les tableaux n° 24 et n° 25 montrent que la pluie moyenne annuelle dans le Bassin du Sénégal diminue du Sud du bassin vers le Nord. Les valeurs moyennes annuelles traduisent fidèlement la succession des régions et domaines climatiques.

Le Haut-Bassin du Sénégal englobe ces quatre régions et domaines climatiques. La pluie moyenne est de 818 mm/an, total voisin du total moyen des pluies annuelles du domaine Nord-soudanien.

Le Cours Inférieur du bassin ne comporte qu'un faible secteur Nord-soudanien. L'essentiel se trouve en domaine sahélien, ce qui traduit la pluie moyenne annuelle dans cette région : 374 mm/an.

Cependant, la pluie moyenne n'est qu'un terme du bilan hydrologique dont un second terme est le déficit d'écoulement. Il peut être perçu par l'évaporation potentielle qui est fonction entre autres paramètres des facteurs thermiques que nous analysons ci-après.

BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

TABLEAU 26

EVAPORATION MOYENNES MENSUELLES
ET
FACTEURS THERMIQUES DETERMINANTS
DE
LECOULEMENT MOYEN

TX: Temperature moyenne maximale
TM: Temperature moyenne
TN: Temperature moyenne minimale
Am: Amplitude thermique diurne

STATIONS	ELEMENTS MOYENS	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D.	ANNEE	PERIODE
ST LOUIS	T.X. °C	29.6	30.2	30.4	28.9	27.8	29.5	30.3	30.9	31.6	32.3	31.7	29.9	30.3	1946-1975 30ans
	T.M. °C	22.5	23.2	23.6	23.2	23.4	26.0	27.4	27.9	28.4	28.1	26.0	23.4	25.3	
	T.N. °C	15.4	16.2	16.9	17.5	19.0	22.4	24.5	24.9	25.1	23.9	20.3	16.8	20.2	
	Am °C	14.2	14.0	13.5	11.4	8.8	7.1	5.8	6.0	6.5	8.4	11.4	13.1	10.0	
	Evaporation mm	224	204	209	166	131	118	148	108	104	130	171	245	158	
PODOR	T.X. °C	31.3	33.2	36.7	38.6	41.1	40.6	37.2	35.4	35.5	36.4	34.8	35.9	35.9	1946-1975 30ans
	T.M. °C	22.7	24.7	27.4	29.4	31.9	32.1	30.7	29.9	30.0	30.3	27.6	23.3	28.3	
	T.N. °C	14.1	16.1	18.1	20.1	22.6	23.7	23.0	24.3	24.5	24.1	20.4	15.6	20.7	
	Am °C	17.2	17.1	18.6	18.5	18.5	16.9	14.1	11.1	11.0	12.3	14.4	15.5	15.3	
	Evaporation mm	224	236	309	347	374	341	225	164	130	181	193	207	235	
KIFFA	T.X. °C	30.7	33.3	35.9	40.1	41.9	41.1	38.7	36.7	37.8	38.7	35.1	36.6	36.8	1970-1982 13ans
	T.M. °C	22.5	24.6	28.0	31.7	34.4	35.5	33.0	31.7	31.3	27.1	23.1	29.5	29.5	
	T.N. °C	14.2	15.9	20.1	23.2	26.9	28.9	27.2	25.4	25.5	23.8	19.1	15.6	22.2	
	Am °C	16.5	17.4	15.8	16.9	15.0	13.2	11.5	11.3	12.3	14.4	16.0	15.6	14.6	
	Evaporation mm	224	236	309	347	374	341	225	164	130	181	193	207	235	
LINGUERE	T.X. °C	33.7	35.8	38.6	40.5	44.2	39.3	35.4	33.3	33.7	36.4	36.7	33.3	36.4	1949-1971 30ans
	T.M. °C	24.9	26.2	28.4	30.2	34.4	34.0	29.4	28.2	28.1	28.8	27.4	24.2	28.1	
	T.N. °C	14.7	16.6	18.2	19.8	24.6	22.6	23.3	23.0	22.6	21.4	18.1	15.0	19.7	
	Am °C	19.0	19.2	20.4	20.7	19.6	16.7	12.1	10.3	11.1	15.0	18.6	18.3	16.3	
	Evaporation mm	332	337	487	467	432	341	200	120	143	197	340	347	345	
MATAM	T.X. °C	32.7	35.4	39.2	44.1	42.4	40.4	36.0	33.5	34.2	36.3	36.2	32.9	36.7	1946-1975 30ans
	T.M. °C	23.4	25.8	29.0	31.6	34.0	33.5	30.4	28.0	29.2	30.0	27.2	24.4	28.9	
	T.N. °C	14.0	16.1	18.8	22.1	25.7	26.5	24.8	22.5	24.2	23.7	19.3	15.3	20.7	
	Am °C	18.7	19.3	20.4	19.0	16.7	13.9	11.2	11.0	12.6	16.9	17.6	15.6	15.6	
	Evaporation mm	266	285	370	406	449	378	241	149	130	203	230	284	272	
KAYES	T.X. °C	33.8	36.8	39.9	41.9	42.2	38.0	33.3	31.6	32.2	35.7	36.8	33.2	36.3	1941-1970 30ans
	T.M. °C	25.8	28.2	31.1	33.7	35.2	32.0	28.6	27.8	27.9	29.4	28.6	25.4	29.4	
	T.N. °C	16.8	19.5	22.2	25.4	28.1	26.0	23.2	23.0	22.9	23.0	20.4	17.0	22.3	
	Am °C	17.0	17.3	17.7	16.5	14.1	12.0	9.5	8.6	9.9	12.7	16.4	16.8	17.0	
	Evaporation mm	272	294	373	386	392	257	148	73	69	126	201	240	233	
NIORO DU SAHEL	T.X. °C	32.6	35.7	38.9	41.0	42.2	39.3	34.6	32.2	34.1	37.4	36.6	32.5	36.4	1941-1970 30ans
	T.M. °C	22.6	25.7	28.7	31.8	34.3	33.0	28.9	27.5	28.5	29.8	27.2	23.1	28.4	
	T.N. °C	12.5	15.6	18.5	22.6	26.4	26.3	23.2	22.2	22.2	22.2	17.9	13.8	20.3	
	Am °C	20.1	20.1	20.4	19.4	15.8	13.5	11.4	9.4	11.3	15.2	18.7	18.7	16.0	
	Evaporation mm	281	347	402	406	423	347	163	95	109	133	253	256	267	
FALADYE	T.X. °C	33	37	39	39	40	37	34	30	31	34	34	33	35	1931-1948 17ans
	T.M. °C	22	25	28	30	32	30	26	25	26	27	25	23	27	
	T.N. °C	11	14	18	22	24	23	22	21	21	20	16	12	19	
	Am °C	22	23	21	17	16	14	9	9	10	14	18	21	16.1	
	Evaporation mm	224	236	309	347	374	341	225	164	130	181	193	207	235	
KITA	T.X. °C	33.6	36.7	38.4	40.0	38.4	34.5	30.8	29.6	30.8	33.2	34.6	32.8	34.1	1955-1970 15ans
	T.M. °C	26.2	29.1	31.0	32.8	32.0	29.0	26.4	25.6	26.0	27.9	26.8	25.5	28.1	
	T.N. °C	18.8	21.5	23.7	25.5	25.5	23.4	21.9	21.5	21.3	21.2	18.2	17.2	21.7	
	Am °C	14.8	15.2	14.7	14.5	12.9	11.1	8.9	8.1	9.5	12.0	15.6	14.6	12.6	
	Evaporation mm	299	287	344	304	233	140	74	48	49	75	177	242	187	
KENIEBA	T.X. °C	35	37	40	41	40	35	32	30	32	33	35	34	35.3	1943-1964 21ans
	T.M. °C	25	27	30	32	32	28	27	25	26	27	26	24	27.6	
	T.N. °C	15	18	21	24	24	22	21	21	21	21	18	15	20.1	
	Am °C	18	17	18	17	14	11	9	8	10	11	17	18	14.0	
	Evaporation mm	241	263	292	278	221	116	66	49	51	71	148	180	162	
LABE	T.X. °C	30	31	33	32	31	28	26	25	26	27	28	28	28.7	1938-1957 19ans
	T.M. °C	21	23	25	25	24	23	22	21	22	22	22	21	22.6	
	T.N. °C	13	15	16	18	18	18	18	18	18	17	15	14	16.4	
	Am °C	17	16	17	14	13	10	8	7	9	10	13	14	12.3	
	Evaporation mm	259	276	295	241	153	82	56	48	51	82	126	148	155.5	

B/ LES FACTEURS THERMIQUES ET L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (E.T.P.)

Les facteurs thermiques constituent les derniers facteurs déterminants de l'écoulement moyen. Leur influence significative dans le bilan de l'eau est mesurée par le déficit d'écoulement qui est perçu par la valeur moyenne de l'évapotranspiration potentielle. Ainsi nous rappelons brièvement les valeurs de la température moyenne annuelle de l'air, leurs variations et les régimes thermiques qu'elles déterminent.

Nous nous appesantirons davantage sur les valeurs calculées de l'évapotranspiration potentielle que nous comparerons aux valeurs de l'évaporation mesurée au Piche.

1. Les facteurs thermiques

Les valeurs caractéristiques des moyennes mensuelles et annuelles sont données dans le tableau n° 26.

Nous y représentons les moyennes suivantes :

- la T.X = la moyenne mensuelle des températures maximales journalières ;
- la T.N = la moyenne mensuelle des températures minimales journalières ;
- la T.M est la température moyenne mensuelle calculée par le rapport

$$\frac{TX + TN}{2}$$

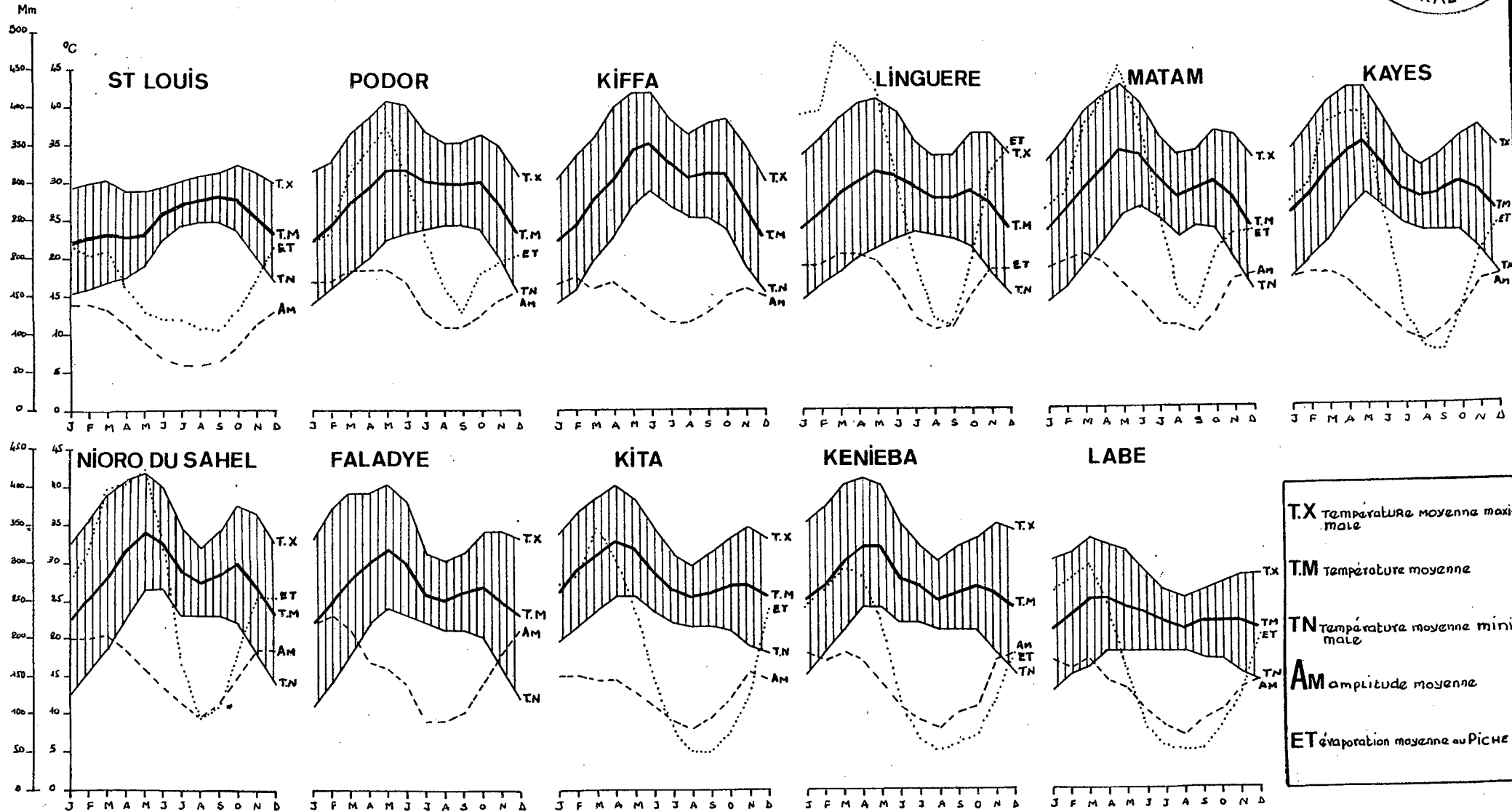
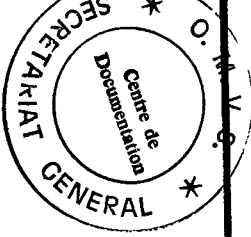
- l'Am°C est l'écart diurne moyen mensuel donné par la différence TX - TN.

Nous représentons aussi dans le tableau n° 26 les moyennes mensuelles de l'évaporation journalière mesurée au Piche.

L'amplitude thermique annuelle que nous donnons dans l'analyse est la différence entre les écarts diurnes moyens de la température moyenne mensuelle

EVAPORATION ET FACTEURS THERMIQUES DETERMINANTS
DE L'ECOULEMENT

FIG. 30



T.X température moyenne maximale
T.M température moyenne
T.N température moyenne minimale
A.M amplitude moyenne
E.T évaporation moyenne au Piche

(T.M) du mois le plus chaud, et celle du mois le plus froid.

Toutes ces valeurs caractéristiques sont données par stations appartenant aux différents domaines et régions climatiques du Bassin du Sénégal.

Nos périodes d'observation ne sont toutefois pas uniformes car les températures ne sont mesurées que récemment au niveau de certaines stations. Mais nos moyennes des températures sont calculées sur une période d'observation d'au moins 15 ans, ce qui nous semble suffisant pour caractériser cet élément climatique qui, somme toute, à l'échelle annuelle ne connaît que de faibles variations.

a) Les variations de la température moyenne mensuelle

La figure n° 30 montre que les variations mensuelles des températures moyennes (T.M.) dépendent principalement de celles des moyennes maximales (T.X.), de même que l'évaporation (qu'elles conditionnent) et l'écart diurne moyen (Am°C).

Ainsi, l'évolution de la T.X, la T.M et de la T.N est à peu près similaire. Les maxima principaux sont enregistrés en saison sèche.

Les maxima secondaires interviennent aussi en période sèche (octobre en général).

Les minima principaux sont observés en décembre-janvier alors que les minima secondaires interviennent toujours en saison humide et toujours au mois d'août.

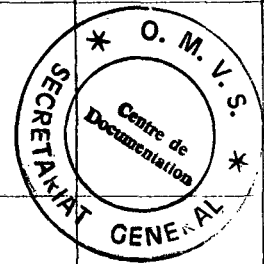
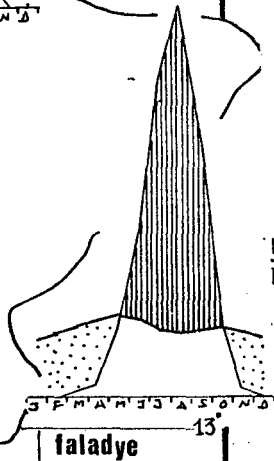
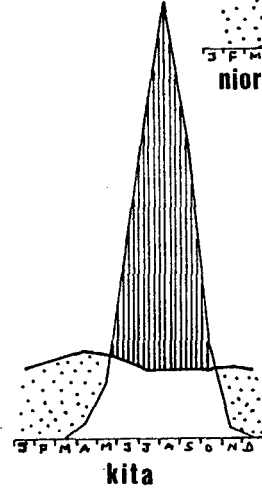
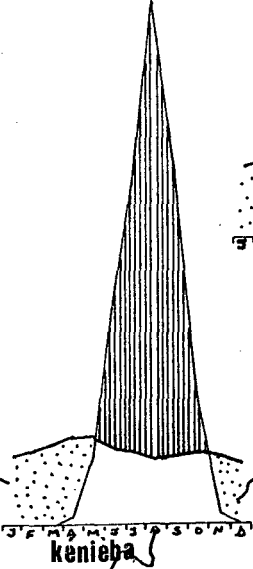
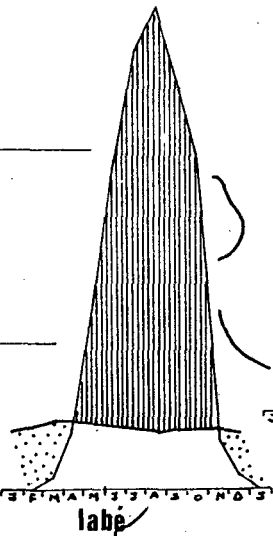
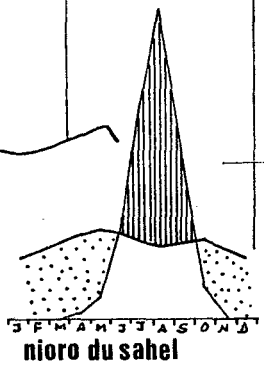
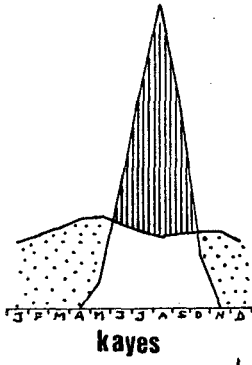
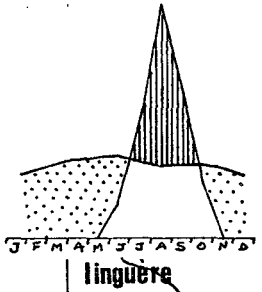
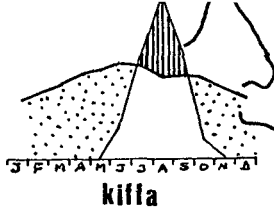
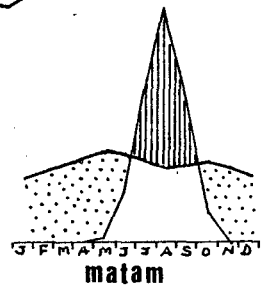
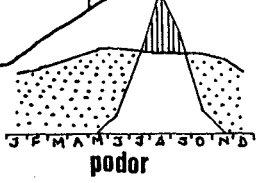
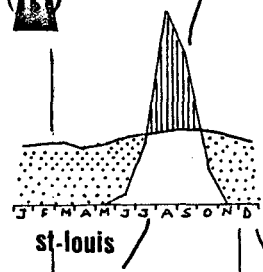
Cette évolution générale des températures est ainsi tronquée par rapport à l'évolution cosmique qui consacre un seul maximum d'été et un seul minimum d'hiver.

L'évolution montre aussi que les maxima principaux et secondaires respectivement précèdent et suivent la saison pluvieuse, la période humide, et que les températures commencent à baisser dès les débuts de cette période de pluies.

La carte n° 19 montre qu'au maximum pluviométrique d'août correspond le



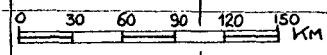
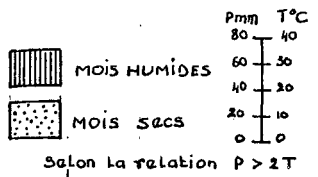
0 30 60 90 120 150



BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

STATIONS DE BASE

PROFILS OMBRO-THERMIQUES



A.A.S 1984

minimum secondaire des températures moyennes.

L'évolution cosmique ainsi tronquée est due à la chute des précipitations, ce qui consacre partout un régime bimodal des T.X et des T.M, mais régime à deux maxima moins net pour les T.N notamment en domaine sahélien (Podor, Matam).

Les maxima principaux correspondent à l'évolution cosmique et interviennent en début de saison humide. Les pluies font baisser les températures (1), ce qui détermine son second maximum, qui engendre le déphasage par rapport à l'évolution cosmique. A la fin de la période humide, cette évolution cosmique reprend et consacre un second maximum en octobre-novembre. Les températures commencent alors à baisser en raison de la période hivernale boréale. De sorte que les minima principaux des températures sont en rapport avec l'évolution cosmique.

A cette évolution tronquée s'ajoutent deux autres faits :

- l'augmentation de la température de la côte vers l'intérieur du bassin avec la diminution progressive du rafraîchissement, exercé par les alizés maritimes et la prédominance en saison sèche à l'intérieur du bassin de vents continentaux (l'harmattan). Les valeurs caractéristiques de la station côtière de St Louis sont relativement faibles ;

- l'accroissement aussi de la température de l'air du Sud vers le Nord du bassin qui s'explique par la diminution des altitudes et du couvert végétal plus discontinu vers le Nord.

(1) Il faudrait évoquer pour la chute des températures en plus de la pluie, les phénomènes inducteurs tels que les fortes couvertures nuageuses, l'accroissement de l'humidité relative et les passages des lignes de grains dont les moteurs sont les noyaux d'Est froids.

L'existence des régimes thermiques bimodaux, nous l'avons expliqué, est due à la saison pluvieuse ; or ses débuts et fins normaux varient du Sud vers le Nord du bassin.

C'est dans ce concert de facteurs, durée de la saison pluvieuse, opposition entre la côte et l'intérieur du bassin, les altitudes variables et la discontinuité du couvert végétal, que se situent les nuances locales de l'évolution des facteurs thermiques qui consacrent les régimes thermiques saisonniers ci-après.

b) Les régimes thermiques saisonniers

Ils constituent les nuances locales des températures moyennes, fonction de la place des extrêmes (maxima principaux et secondaires) et des valeurs caractéristiques, fonction surtout des facteurs limitatifs qui peuvent intervenir.

Le régime sahélien

Les valeurs caractéristiques sont les plus élevées du bassin. Les T.X atteignent et dépassent souvent 35°C, les T.N sont supérieures à 20°C. Les deux situent les températures moyennes (T.M) autour de 30°C en moyennes annuelles.

Les maxima principaux interviennent en juin et les minima principaux en décembre-janvier.

Les maxima secondaires sont enregistrés en octobre et les minima secondaires en août.

Les écarts diurnes connaissent de fortes valeurs en période sèche. En moyennes annuelles, ils se situent entre 14° et 16°C.

Dans le tableau suivant, nous donnons les valeurs caractéristiques moyennes annuelles pour les stations représentatives du domaine sahélien.

Tableau n° 27. Valeurs caractéristiques moyennes annuelles en D°C en régime sahélien.

Stations	T.X	T.N	T.M	Ecart diurne	Amplitude annuelle
Kiffa	36.8	22.2	29.5	14.6	3.3
Podor	35.9	20.7	28.3	15.3	0.3
Linguère	33.3	19.7	28.1	16.8	0.6
Matam	36.7	20.7	28.4	15.6	2.0
Nioro	36.4	20.3	28.4	16.0	6.6

Le régime Nord-soudanien

La station de Kayes

Le maximum principal intervient au mois de mai (35.2°C). Le maximum secondaire est situé en novembre (29.4°C) et, est tardif par rapport au domaine sahélien. Le minimum principal est de janvier et le minimum secondaire toujours d'août.

Dans ce domaine, les altitudes sont déjà plus élevées et le couvert végétal reste discontinu, plus fourni qu'en domaine sahélien. Ces facteurs limitatifs font que les valeurs moyennes annuelles sont plus basses.

L'écart diurne connaît de fortes valeurs en saison sèche et reste supérieur à 10°C.

Les valeurs caractéristiques moyennes annuelles sont les suivantes.

Tableau n° 28. Valeurs caractéristiques moyennes annuelles en D° C en régime Nord-soudanien.

Stations	T.X	T.N	T.M	Ecart diurne	Amplitude annuelle
Kayes	36.3	22.3	29.4	14.0	2.9
Faladye	35.0	19.0	27.0	16.1	6.0
Kita	34.1	21.7	28.1	12.6	0.1

Kita et Faladye au Sud du domaine ont déjà des valeurs thermiques plus faibles que le Nord du domaine Nord-soudanien.

A Kita, le maximum principal est déjà d'avril et ce déplacement se confirme en régime Sud-soudanien.

Le régime Sud-soudanien

La station de Kéniéba

Le maximum principal est d'avril (32° C) et le maximum secondaire reste centré en octobre. Le minimum principal est précoce par rapport au domaine Nord-soudanien et intervient en décembre. Le minimum secondaire reste toujours d'août (25° C). Les valeurs caractéristiques sont nettement plus faibles que dans les deux premiers domaines en moyennes annuelles :

T.X = 35.3° C ; T.N = 20.1° C ; T.M = 27.4° C ; écart diurne = 14° C.

L'amplitude annuelle est de 1° C.

Les contreforts du Fouta-Djalou (altitudes plus élevées) et la végétation mi-savane mi-forêt exercent une influence limitative sur les valeurs moyennes qui deviennent plus faibles encore en régime guinéen.

Le régime guinéen

La station de Labé

La région est la plus arrosée, les valeurs moyennes de l'humidité relative

sont supérieures à 60 % (chapitre VI). C'est aussi une région d'altitude fortement boisée. Autant de facteurs qui permettent de comprendre que ce régime présente les valeurs les plus faibles du bassin.

Le maximum principal est de mars (25°C), le maximum secondaire de novembre (22°C) (septembre et octobre connaissent la même valeur). Le minimum principal de décembre est de 21°C de même que le secondaire d'août. Le régime bimodal est net pour la T.X et la T.M. L'écart diurne moyen annuel est de 12.3°C et les valeurs peuvent descendre en dessous de 10°C.

L'amplitude annuelle moyenne est de 4°C.

*

* *

Les régimes locaux ne sont déterminés que par les facteurs locaux et leurs influences. Ces influences s'exercent surtout dans la détermination des mois des maxima, car inévitablement les minima sont de décembre-janvier pour les principaux et d'août pour les secondaires.

Les écarts diurnes sont nettement en moyennes annuelles supérieurs à l'amplitude annuelle. L'écart diurne étant la différence entre la T.X (enregistrée de jour) et la T.N (de nuit), les écarts entre les températures diurnes et les températures nocturnes sont plus élevés que les écarts annuels : " la nuit, c'est l'hiver des pays tropicaux ".

Les facteurs thermiques conditionnent pour une part les valeurs de l'évaporation (E.T) et de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P). Elles sont plus élevées en domaine sahélien et diminuent vers le Sud du bassin.

Tableau n°29. Bassin du Sénégal.

Humidité relative (H.R. en %) et E.T.P. selon TURC et PENMANN.

KAYES

	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D	An
E.T.P. TURC	169	184	251	246	202	140	128	123	129	137	138	134	165
E.T.P. PENMANN	153	<u>151</u>	200	216	257	<u>268</u>	246	222	211	211	168	165	206
H.R. en %	24	20	<u>17</u>	20	32	57	73	<u>79</u>	78	67	44	30	45

KITA

E.T.P. TURC	179	203	217	242	180	144	129	115	117	138	138	168	164
E.T.P. PENMANN	169	177	224	237	<u>255</u>	248	233	213	202	212	175	<u>162</u>	209
H.R. en %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

KENIEBA

E.T.P. TURC	161	181	222	212	163	143	122	110	119	134	130	131	152
E.T.P. PENMANN	160	160	212	229	<u>242</u>	216	191	187	190	198	171	<u>152</u>	192
H.R. en %	34	30	<u>28</u>	34	50	69	81	<u>84</u>	82	78	64	47	57

== Maxima
 — Minima

2. L'importance de l'évaporation (E.T) et de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P)

a) E.T et E.T.P

La figure n° 30 montre l'évolution similaire entre les températures moyennes mensuelles et les moyennes mensuelles de l'évaporation (E.T).

Les plus fortes valeurs de l'E.T correspondent aux mois de période sèche où les températures sont élevées. Les valeurs les plus faibles interviennent en période humide durant laquelle les températures baissent.

L'écart diurne et l'E.T ont une évolution semblable mais les minima de l'évaporation correspondent aux minima secondaires des températures, ce qui montre bien que l'évaporation n'est pas seulement fonction des facteurs thermiques, ce qui est plus évident pour l'évapotranspiration potentielle (E.T.P).

b) L'E.T.P

La figure n° 31 permet de comparer l'E.T.P calculée respectivement avec les formules empiriques de Penmann et de Turc (1). (Tableau N°29)

(1) E.T.P selon la formule de Turc.

$$\text{E.T.P mm / mois} = \frac{0,4 t}{T + 15} \quad (I_g + 50 K)$$

t = température moyenne mensuelle ;

I_g = moyenne mensuelle de la radiation globale (cal / cm² / jour). Elle peut être déduite de l'insolation relative h / H par la relation

$$I_g = I_g A \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right), \quad I_g A \text{ et } h \text{ sont mesurés ;}$$

K = 1 si l'humidité relative HR ≥ 50 % ;

$$K = \frac{120 - HR}{70} \quad \text{avec } HR < 50 \% ;$$

h/H = rapport de la durée de l'insolation réelle sur la durée astronomique du jour. H est donnée par des tables.

BASSIN DU SENEGAL

EVOLUTION COMPAREE DE DE L'E.T.P selon les formules de TURC et de PENMAN

KAYES

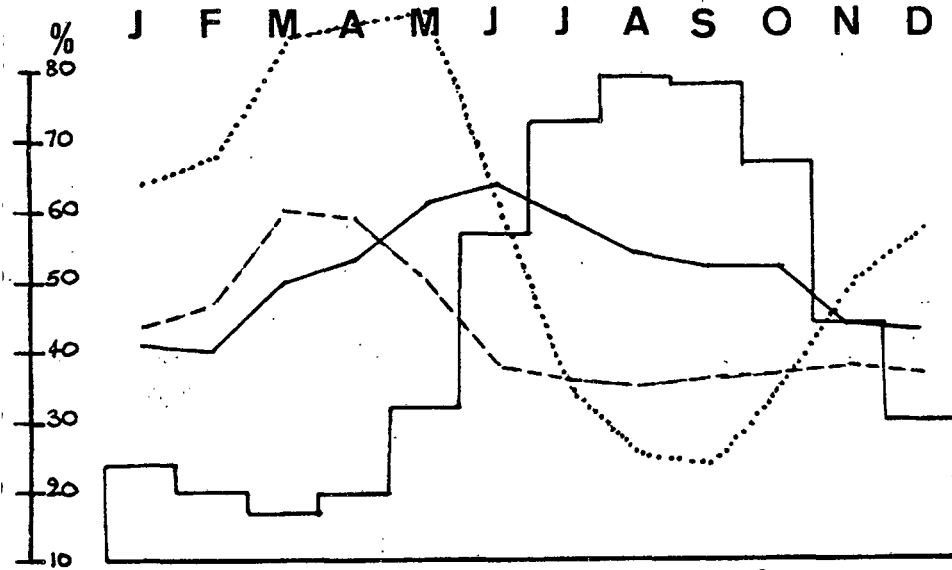
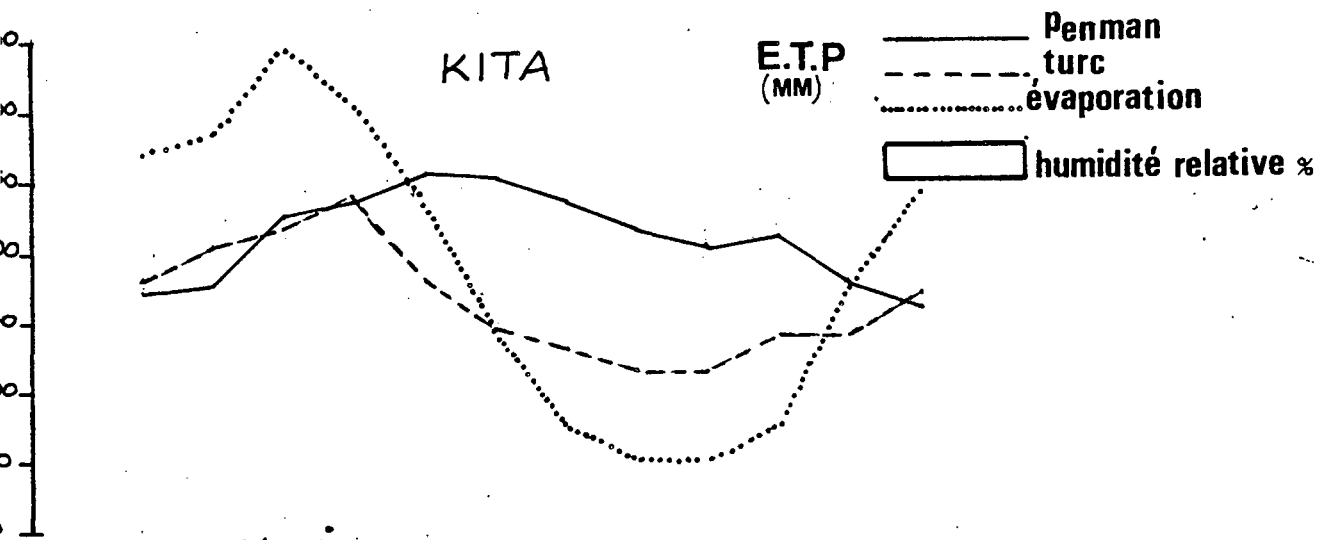
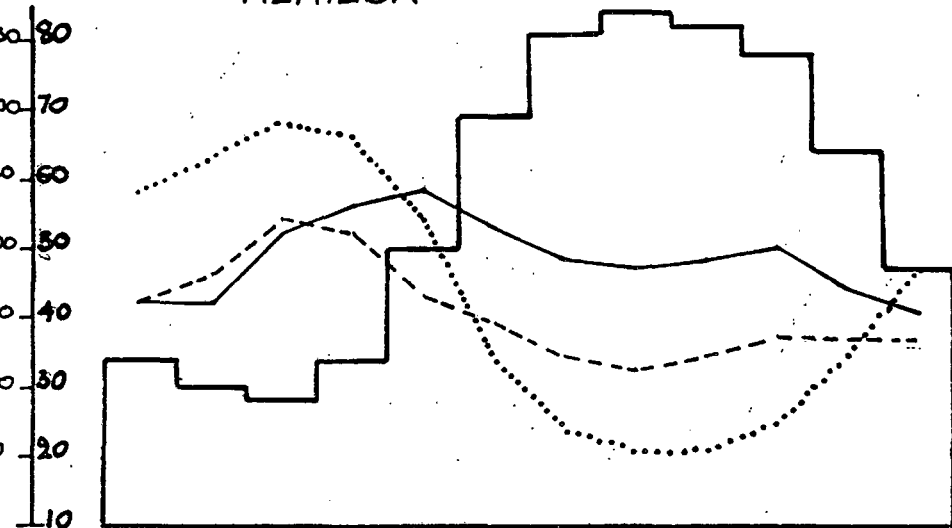


FIG. 31



KENIEBA



L'évolution générale des deux courbes montre que les valeurs les plus élevées de l'E.T.P sont enregistrées en période sèche. Durant cette période, l'écart entre les deux valeurs moyennes de l'E.T.P est très faible et toujours à la faveur des valeurs de Penmann. Dès le début de la période humide, l'écart devient considérable et les valeurs obtenues avec la formule de TURC semblent sous-estimées par rapport à celles de PENMANN. Pendant cette période, l'ensemble des éléments climatiques entraînant une forte évapotranspiration, connaissent une diminution : températures, écart diurne, vitesse du vent, insolation Seule l'humidité relative atteint ses valeurs maximales.

Nous avons représenté sur la figure n° 31 la courbe d'évolution de l'humidité relative moyenne (dont nous ne disposons des données que pour les deux stations Kayes et Kéniéba). La formule empirique de Turc ne tient plus compte de l'humidité relative dès qu'elle est supérieure à 50 %, comme c'est le cas en période humide en domaine tropical. Or même si elle entraîne une diminution de l'E.T.P, les valeurs de Turc sont sous-estimées par rapport à celles de Penmann dont la formule repose sur une évaluation rigoureuse du bilan énergétique de la surface évaporante, et rend parfaitement compte de la réalité. Elle associe aussi l'albédo de la surface évaporante, environ 0,25 pour les étendues de savane ou de steppe (comme c'est le cas du Bassin du Sénégal), qui permet de déterminer un coefficient correctif sous la forme $1 - 0,25$, qui permet de corriger les valeurs données par les abaques de la radiation solaire directe.

L'utilisation des formules de Turc et de Penmann a été rendue facile par les organigrammes et nous donnons dans le tableau n° 30 les différentes estimations.

Mais c'est la formule de Turc que nous retenons et les valeurs de l'E.T.P qu'elle donne. Nous ne disposons pas de toutes les données pour toutes les stations qui permettent d'utiliser celle de Penmann.

Bien que la formule de Turc soit, du reste, plus maniable, l'E.T.P ne peut être estimée que pour certaines stations en raison aussi de données non

Tableau n° 30. Bassin du Sénégal.

Evaporation (E.T.) et évapotranspiration (E.T.P.) en mm.

E.T.P. selon TURC.

stations	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D	An
Louis													
E.T.	<u>221</u>	204	209	166	131	118	118	108	<u>104</u>	130	171	215	15
E.T.P.	105	114	147	<u>152</u>	149	139	139	136	135	132	116	<u>102</u>	12
Sam													
E.T.	226	285	370	406	<u>449</u>	378	241	149	<u>130</u>	203	230	234	27
E.T.P.	151	160	219	<u>236</u>	226	180	158	140	144	150	136	<u>132</u>	16
Yess													
E.T.	272	291	373	386	<u>392</u>	257	118	73	<u>69</u>	126	201	240	23
E.T.P.	169	184	<u>251</u>	246	202	140	128	<u>123</u>	129	137	138	134	16
Yata													
E.T.	269	287	344	<u>304</u>	233	140	74	<u>48</u>	49	75	177	242	18
E.T.P.	179	203	217	<u>242</u>	180	144	129	<u>115</u>	117	138	138	168	16
Yaniéba													
E.T.	241	263	<u>292</u>	378	221	116	66	<u>49</u>	51	71	118	180	16
E.T.P.	161	181	<u>222</u>	212	163	143	122	<u>110</u>	119	134	130	131	15
Yanébé													
E.T.	259	276	<u>295</u>	241	153	82	55	<u>48</u>	51	82	126	198	15
E.T.P.	141	148	<u>160</u>	142	128	108	97	<u>82</u>	98	112	109	111	12

disponibles.

Les stations pour lesquelles l'E.T.P est estimée sont représentatives des domaines climatiques du bassin et donnent une idée de l'E.T.P comme limite supérieure qui correspond à la demande climatique.

La figure n° 32 montre l'évolution comparée de l'évaporation (E.T) , de l'E.T.P et de la pluviométrie :

- l'E.T.P augmente du Sud au Nord du bassin ;
- la saison sèche concentre les maxima de l'E.T et de l'E.T.P.

L'évolution comparée avec la pluviométrie montre que dès les débuts de l'hivernage, l'E.T.P commence à diminuer jusqu'à atteindre des valeurs inférieures à la pluviométrie : cette diminution s'explique par l'intervention de tous les facteurs limitatifs : accroissement de l'humidité relative, la baisse de la température, la réduction de la vitesse du vent, la baisse de l'insolation, les fortes couvertures nuageuses ..., des facteurs dont les uns du reste entraînent les autres.

*

* *

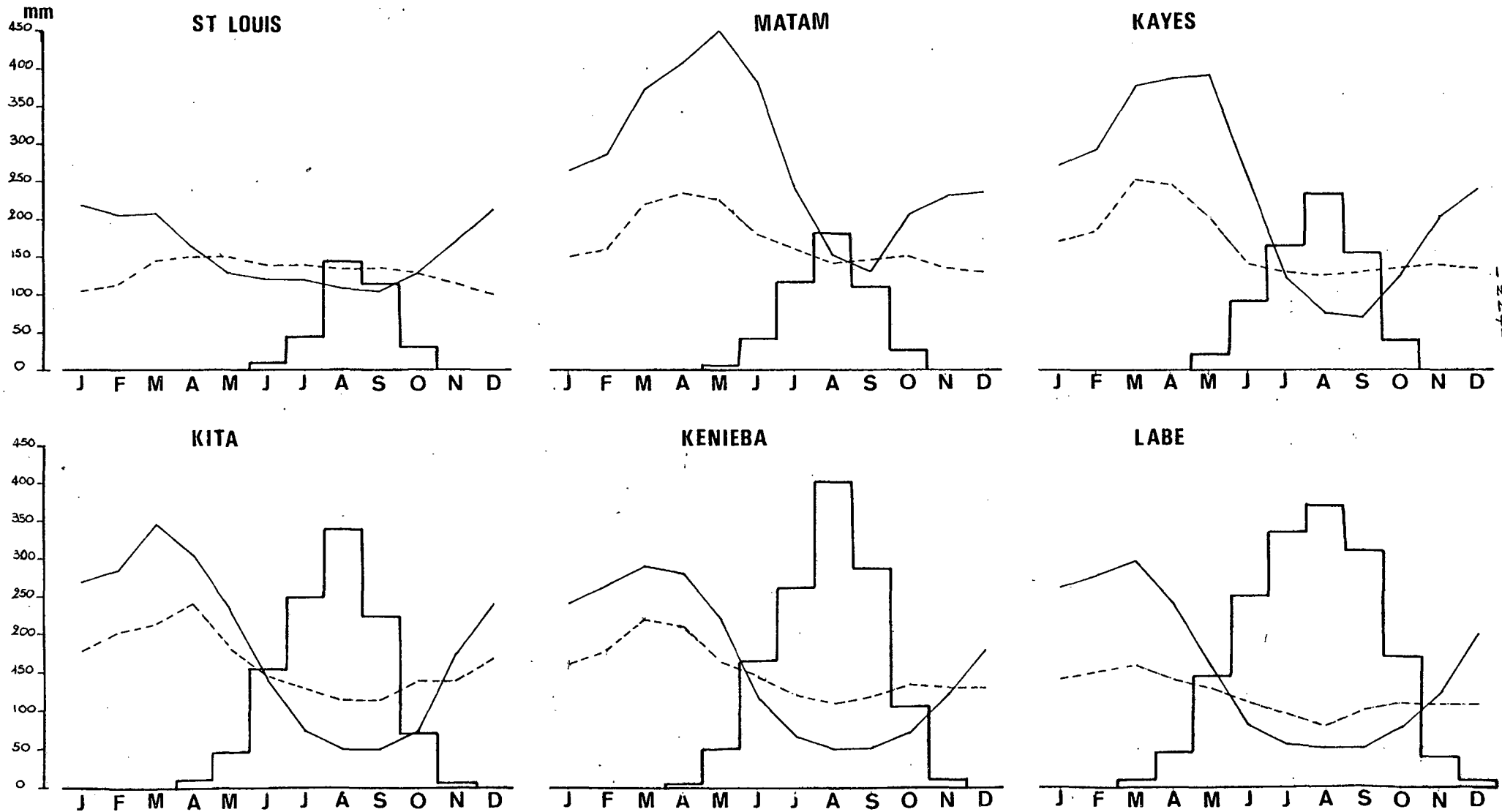
L'analyse et les calculs nous ont permis d'estimer en moyennes annuelles la lame d'eau précipitée et en moyennes mensuelles et annuelles l'évapotranspiration potentielle. Ces deux paramètres essentiels nous permettront de déterminer les bilans hydrologiques dans la deuxième partie de ce travail.

Cependant, il nous faut rappeler que les modalités de l'écoulement moyen procèdent de l'interaction de tous les facteurs que nous avons analysés séparément, en rappelant toutefois et chaque fois leur intérêt ou leur influence sur l'écoulement.

BASSIN DU SENEGAL

EVOLUTION COMPAREE DE LA PLUVIOMETRIE P_{mm} DE L'EVAPORATION e.t
ET DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE e.t.p

FIG.32



-224-

e.t

A présent, c'est une approche synthétique de ces différents facteurs morphométriques, lithologiques, biogéographiques, climatiques qui permettra de saisir ces diverses influences sur l'écoulement et ses variations moyennes.

Dans cette approche synthétique, il ne s'agira pas pour nous de quantifier ces influences. Nous les présenterons sous forme d'influence très favorables (+ +), favorables (+), défavorables (-) ou très défavorables (- -). Cette démarche que nous empruntons à A. MEBARKI (1982) sera la conclusion aux facteurs de l'écoulement moyen dans le Bassin du Fleuve Sénégal.

CONCLUSION

LES FACTEURS PHYSIQUES DU BASSIN DU SENEGAL ET LEURS INFLUENCES ANALYSE SYNTHETIQUE

Dans le tableau n° 30, nous représentons les influences des différents facteurs de l'écoulement moyen dans le bassin. Nous avons conservé la division " commode " du bassin qui distingue le Haut-Bassin et le Cours Inférieur, autrement appelé la Vallée. La limite entre ces deux régions naturelles est une ligne sensiblement Nord-Sud passant par Bakel (chapitre I, carte n° 2).

Il est aisé, en fonction de la démarche choisie, de dégager les influences favorables ou non, des divers facteurs de l'écoulement moyen dans le Cours Inférieur car l'essentiel se situe en domaine sahélien.

Il nous a semblé en revanche nécessaire, notamment pour les influences du climat et du couvert végétal, de subdiviser le Haut-Bassin en ses régions et domaines climatiques. Cette subdivision permet de mieux saisir les variations des influences de ces deux facteurs.

Le rôle essentiel de chaque facteur a été chaque fois dégagé dans les chapitres qui précèdent, aussi les rappelons-nous brièvement.

Le climat

De toutes les influences, c'est assurément celles du climat qui demeurent les plus importantes. Le climat fournit avant tout l'eau écoulee par les rivières. Cette alimentation est essentiellement pluviale en domaine

Tableau n° 31. Les facteurs de l'écoulement et leurs influences.

Bassin → Facteurs ↓		Haut-Bassin	Cours Inférieur " Vallée "
Morphométrie		+ +	- -
Lithologie		- -	+ +
Climats	R.G	+ +	- -
	S.S	+ +	
	N.S	+ -	
	S	- -	
Végétation	R.G	-	+
	S.S	+	
	N.S	+ +	
	S	+ -	
Sous-bassins		Falémé - Bafing Baoulé - Bakoye Karakoro - Kolimbiné	Oued Gorfha Oued Gorgol
Superficie km ²		218 000	72 000

+ + : très favorables
 - - : très défavorables
 + : favorables
 - : défavorables

R.G : région guinéenne
 S.S : Sud-soudanien
 N.S : Nord-soudanien
 S : sahélien

tropical, et les débits des cours d'eau traduisent les fluctuations pluviométriques. Mais le climat joue aussi un rôle important dans les déficits d'écoulement par les températures qui conditionnent en partie l'évaporation, dont les inégalités font varier l'abondance des cours d'eau. Le climat favorise aussi l'installation du couvert végétal qui, une fois installé, va avoir son rôle propre à jouer.

La végétation

Elle est liée au climat et aux sols, mais agit sur le ruissellement et donc sur l'érosion hydrique. Elle absorbe de l'eau - " une sorte de manque à gagner pour l'écoulement " - et peut intercepter la pluie, réduisant ainsi l'efficacité des averses.

Cependant, elle restreint la chaleur et réduit les valeurs de l'eau évaporée en même temps qu'elle protège les sols. Son influence peut être défavorable quand elle est dense mais elle assure un équilibre du milieu.

Le relief

Par la topographie, le relief règle les systèmes des pentes, donc les vitesses d'écoulement. Par l'altitude, il commande dans une certaine mesure l'efficacité des averses.

La lithologie

Elle commande les mécanismes des nappes et joue ainsi un rôle favorable dans le soutien des débits des basses eaux.

L'ensemble de ces influences interfèrent dans le cadre de l'espace géographique du bassin-versant. Pour le Bassin du Sénégal, le tableau n° 30 permet de dégager les constatations suivantes.

A/ LES INFLUENCES DES FACTEURS DANS LE HAUT-BASSIN

Il couvre, à Bakel, 218 000 km² soit 75 % du bassin-versant.

Le relief y est important au Sud en région guinéenne et relativement en domaine Sud-soudanien.

Dans ce secteur du bassin, les fortes pentes augmentent les vitesses de l'écoulement des eaux qui échappent ainsi à l'évaporation et localement, l'écoulement a des caractères torrentiels. Cependant, les altitudes dans le Haut-Bassin diminuent du Sud vers le Nord.

La couverture végétale aussi diminue du Sud vers le Nord. Si elle peut être favorable à l'érosion hydrique au Nord du Haut-Bassin, où elle s'éclaircit jusqu'à devenir rare, elle y est néanmoins défavorable à la fixation et à la protection des sols.

La végétation est aussi défavorable en région guinéenne mais à l'érosion hydrique et à l'écoulement en interceptant les lames d'eau précipitées, par le feuillage.

Cependant, le couvert végétal entretient dans le sous-bois un équilibre en réduisant les valeurs de l'évaporation, qui connaît ainsi ses plus faibles valeurs en région guinéenne et dans le domaine Sud-soudanien. A cela s'ajoutent les lames d'eau importantes qui y sont précipitées et qui font du climat à ce point de vue un facteur favorable à l'écoulement.

Mais en revanche dans le Nord sahélien, le climat est très défavorable. La pluie moyenne y est très faible, et l'évaporation très importante.

Le seul facteur dont le rôle reste uniformément favorable à l'écoulement reste la lithologie, qui présente des terrains que l'on peut considérer comme imperméables. Mais cette influence est défavorable, tout au moins à l'écoulement, dans la constitution des réserves souterraines de soutien des bas débits car, pour peu que les pentes soient fortes (le cas du domaine soudanien et de la région guinéenne), le ruissellement vers les drains principaux est rapide et la lithologie apparaît autrement certes, comme

favorable à l'écoulement.

*

* * *

Il apparaît ainsi, comme le montre le tableau n° 30, que les influences des divers facteurs dans le Haut-Bassin, voient leur influence favorable diminuer du Sud vers le Nord ou augmenter du Sud vers le Nord ou inversement. Elles peuvent même localement connaître des caractères extrêmes. Cette analyse laisse entrevoir les influences contradictoires. Néanmoins, dans l'ensemble, cette région naturelle comporte beaucoup de facteurs favorables, dont les effets peuvent être limités mais jamais neutralisés complètement par les influences défavorables.

Le Haut-Bassin se limite à Bakel et, en aval de cette ville, s'étend le Cours Inférieur.

B/ LES INFLUENCES DES FACTEURS DANS LE COURS INFÉRIEUR

C'est la région la moins étendue du bassin. Elle se situe presque entièrement en domaine sahélien, hormis un très faible secteur Nord-soudanien à l'Ouest, qui ne mérite pas d'être pris en compte. Ce secteur participe plus, quant à ces caractéristiques climatiques, du domaine sahélien.

Le couvert végétal est très discontinu à absent localement. C'est une région de steppes au Nord et de savanes arbustives au Sud du domaine. Ainsi la végétation apparaît favorable à l'écoulement superficiel par l'absence d'interception des pluies tombées. Elle apparaît aussi favorable à l'érosion hydrique. Mais le climat sahélien, en raison de la faiblesse de la pluviométrie, est lui très défavorable à l'écoulement. L'absence de versant fait qu'aucun matériel n'est livré au fleuve.

La région est plate, d'où l'étalement des eaux dans une immense vallée

d'inondation, ce qui réduit davantage les vitesses d'écoulement et donne le champ libre à l'évaporation physique qui atteint ici ses valeurs maximales.

Il en résulte que le relief est très défavorable, le climat aussi et ces deux facteurs neutralisent le rôle favorable que peut avoir ici le couvert végétal pour l'érosion hydrique. Il ne règne ici qu'une désagrégation mécanique.

Ce même couvert végétal faible, par ailleurs, ne protège pas les sols qui sont minces. Sa faible densité favorise la déflation éolienne (autrement favorisée par le climat sec). Ainsi, de vastes secteurs du Cours Inférieur sont ensablés, deviennent stériles, à l'image du Ferlo (chapitre I, carte n° 2) qui apparaît comme " un désert aux dimensions du Sénégal ".

C'est ce phénomène, du reste, qui explique la désertification du Nord du Sénégal. Désertification en raison des sols de plus en plus stériles, sans végétation, mais aussi sans populations. Ces dernières affluent vers la vallée du fleuve, et l'activité économique favorise un ameublissement des sols. Cependant, cet aspect concerne davantage l'aménagement, aspect très intéressant, mais qui n'entre pas dans l'optique de notre travail.

Enfin, il faut noter que dans le Cours Inférieur, seule la lithologie est très favorable à l'écoulement. La région recèle des nappes souterraines importantes. Elles jouent un rôle important pour le soutien des débits de basses eaux en raison des pertes d'eau importantes que le fleuve subit pour des causes naturelles et économiques aussi.

*

* *

Il résulte ainsi de l'analyse du rôle des facteurs physiques pour l'écoulement dans le Cours Inférieur, que les influences diverses sont très défavorables à l'écoulement et neutralisent par ailleurs celles qui auraient pu l'être. Dans l'ensemble, les influences demeurent défavorables.

DEUXIEME PARTIE

LES BILANS HYDROLOGIQUES ET LES MODALITES DE L'ECOULEMENT MOYEN

Les modalités du drainage dépendent de l'influence combinée des différents facteurs qui ont fait l'objet d'une analyse dans la première partie.

L'écoulement est ainsi fonction de " ce qui reste après évaporation, de la géométrie et de l'état de la surface réceptrice des précipitations, de la nature du sous-sol et des interventions de l'homme " (J. DEMANGEOT, 1984).

Le Haut-Bassin du fleuve Sénégal couvre les trois quarts du bassin. Les domaines et régions climatiques sahélien, nord-soudanien, sud-soudanien et la région guinéenne y sont représentés. Il apparaît favorable à l'écoulement moyen.

En revanche, le Bassin Inférieur essentiellement en domaine sahélien est défavorable à l'écoulement moyen et il ne sera pas retenu dans cette étude faute de stations fiables et représentatives.

Le module annuel à Dakka-Safdou en région guinéenne est de $274 \text{ m}^3/\text{s}$. Il passe à Galougo en domaine nord-soudanien à $581 \text{ m}^3/\text{s}$. A Bakel, au sortir du Haut-Bassin, il est de $730 \text{ m}^3/\text{s}$. A Matam, en domaine sahélien, il reste égal à $737 \text{ m}^3/\text{s}$ et à Dagana (1), près du delta, il a diminué et il est de

(1) Le module moyen de Dagana est estimé pour la période 1903-1969.

696 m³/s.

Ainsi, de la source à Matam, l'abondance moyenne annuelle augmente, et se stabilise au niveau de la station de Dagana.

Le Bassin du Sénégal semble ainsi réaliser un équilibre entre :

- le Haut-Bassin, zone d'alimentation ;
- et le Cours Inférieur, zone de " consommation ".

Cependant, les eaux ne sont pas seulement un paramètre, elles ont leur " vie " dans le bassin-versant et constituent une entité en soi qu'il faut étudier comme telle, par les différentes manifestations du comportement hydrologique.

On analysera donc successivement :

- le réseau hydrométrique ;
- les bilans annuels de l'écoulement dans le bassin ;
- le bilan moyen du Haut-Bassin et les variations de l'abondance annuelle ;
- le régime pluvial tropical et ses nuances dans le Bassin du Sénégal ;
- les formes extrêmes de l'écoulement dans le bassin.

CHAPITRE I

LE RESEAU ET L'ANALYSE CRITIQUE
DE L'INFORMATION HYDROMETRIQUE
DU BASSIN DU SENEGAL

Le Fleuve Sénégal permet une activité économique importante pour les populations riveraines. Une activité orientée vers la pêche et l'agriculture. Le fleuve permettait aussi la navigation jusqu'à Kayes, en République du Mali, en période de saison des pluies qui coïncide avec la période des hautes eaux. Il a servi ainsi à relier le Mali, enclavé, à la mer, et a permis le développement de relations commerciales entre le Sénégal et le Mali.

Récemment, le fleuve a servi d'axe de pénétration pour la pacification des populations de l'intérieur par les troupes coloniales. C'est à son embouchure que la ville de St Louis, la plus ancienne du Sénégal, et l'une des plus anciennes d'Afrique Occidentale, a été fondée. Mais c'est surtout l'intérêt pour la navigation qui a été à l'origine de l'installation des premières échelles limnimétriques sur des sites des cours d'eau. /

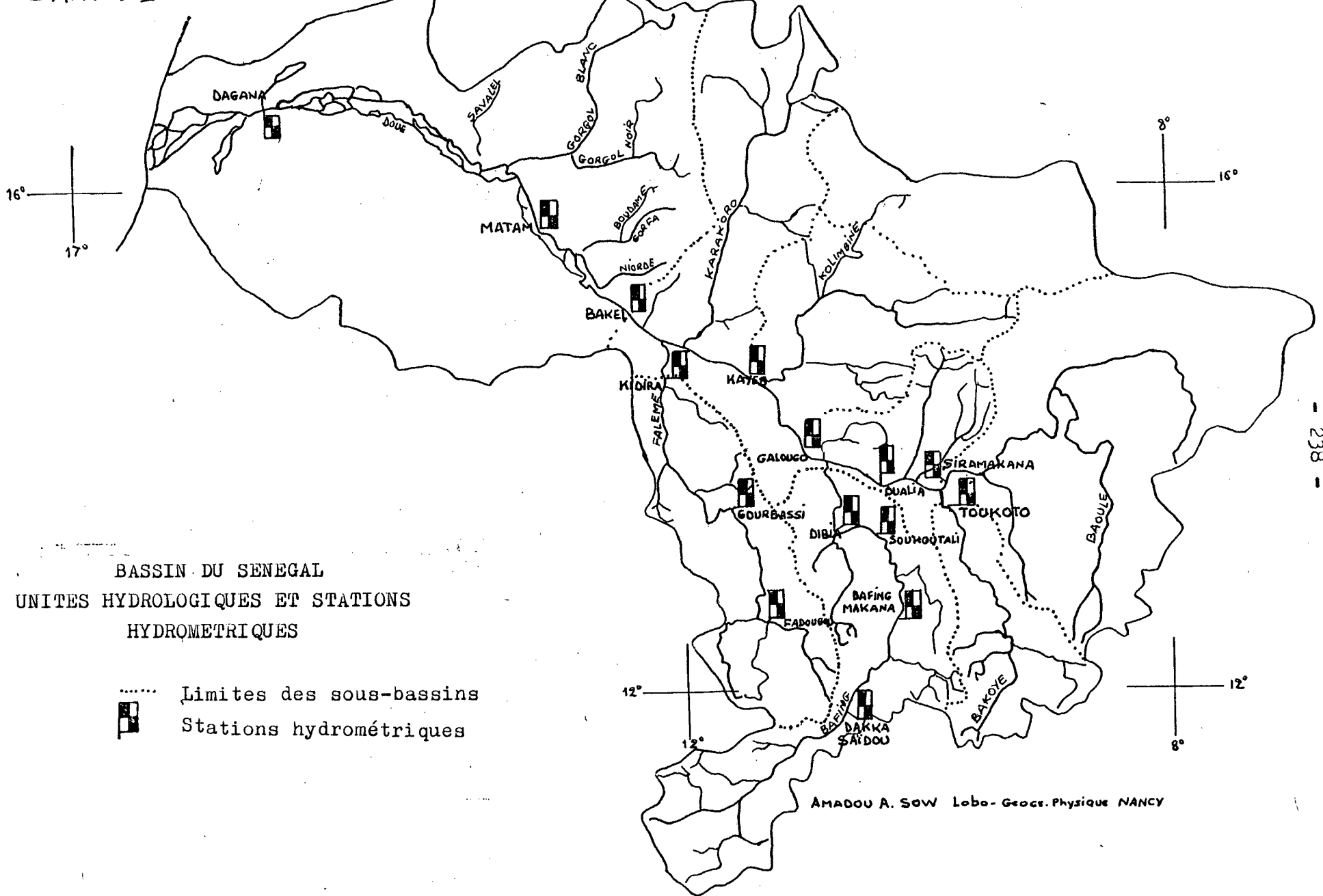
A/ L'INSTALLATION DU RESEAU HYDROMETRIQUE

Le réseau hydrométrique du bassin est relativement important (carte n°10).

Les plus anciennes échelles installées sont Kayes (en 1892), Bakel en 1901, Galougo, Bafoulabé, Toukoto en 1904 et Ambidédi en 1909.

Ces échelles constituent la première génération d'échelles du Bassin du Sénégal.

Cependant, certaines observations ont été par la suite interrompues, et en 1949, les lectures régulières n'étaient effectuées qu'aux stations de Kayes et de Bakel.



C'est entre 1950 et 1960 que furent créées de nombreuses échelles par l'U.H.E.A. (1) à Kidira, Fadougou, Ambidédi et Dakka-Saïdou. D'autres échelles comme Bakel, Kayes et Galougo ont été réinstallées. En 1967, 1968 et 1969, de nouvelles échelles furent installées.

Ainsi, le bassin tire parti de trois générations d'échelles, soit un nombre assez important de stations hydrométriques dont certaines, néanmoins, sont abandonnées à l'heure actuelle.

Les services de mise en place et de gestion de ce réseau hydrométrique ont été assez nombreux. Les plus connus et les plus anciens sont certainement la M.A.S. (2), le D.N., la M.E.F.S., l'O.R.S.T.O.M. et les différents services nationaux de l'hydraulique du Mali, de la Guinée et du Sénégal.

Le réseau pour l'étude du bassin et des régimes des cours d'eau dispose actuellement des stations suivantes (carte n° 21) :

- sur le Baoulé :
les stations de Parc-Baoulé, Missirah et Siramakana (en République du Mali) ;
- sur le Bakoye :
les stations de Diangola, Toukoto, Oualia et Kalé (en République du Mali) ;
- sur le Bafing :
les stations de Pont du Km 17, Sokatora, Balabori (en République de Guinée), Bafing-Makana, Soukoutali, Dibia, Mahina (au Mali) ;

(1) U.H.E.A. : Union Hydroélectrique Africaine.

(2) M.A.S. : Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal ;

D.N. : Dakar - Niger : il s'agit de la compagnie des chemins de fer du Sénégal dont la ligne la plus grande relie Dakar à Niamey (au Niger) via Bamako (Mali) ;

M.E.F.S. : Mission d'Etudes du Fleuve Sénégal.

- sur la Falémé :
les stations de Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira ;
- sur le Kolimbiné :
la station du Pont Kabaté ;
- sur le Karakoro :
la station de Bokédiambi ;
- sur le Sénégal proprement dit
en amont de Bakel :
les stations de Bafoulabé, Galougo, Gouina, Félou, Kayes, Ambidédi,
Ségala, Koungani (au Mali) et Bakel au Sénégal ;
en aval de Bakel :
les deux stations principales, en plus des nombreuses échelles ins-
tallées, sont Matam et Dagana (Sénégal).

1. Les résultats de lectures des échelles limnimétriques

Cependant, l'analyse des séries de hauteurs d'eau observées a souvent amené à réduire considérablement la liste des stations pour des raisons d'équipements incomplets des stations, d'installations trop récentes (pour notre analyse), du nombre réduit de jaugeages effectués ou simplement en raison de très mauvaises lectures.

Au sujet des lectures, la M.A.S. dispose à St Louis des archives pour l'ensemble des lectures faites sur les échelles de 1902 à 1960. Ces lectures y sont reliées sous la forme de carnets intitulés " carnets des hauteurs aux échelles d'étiages "

En 1951, M. GIRAUD met sérieusement en doute les valeurs consignées dans ces carnets, antérieures à 1935. Cependant, la détection des erreurs multiples entachant les relevés limnimétriques a pu être menée à bien par les hydrologues de l'O.R.S.T.O.M. au moyen de recoupements, de corrélations et de nivellement de contrôle des échelles.

Les résultats de ce travail ont fait l'objet de la remarquable publication de l'O.R.S.T.O.M., " Le Bassin du Fleuve Sénégal " , sous la direction de C. ROCHETTE (1974). Cette monographie se révèle être une banque de données et d'informations hautement appréciable sur le Bassin du Sénégal. Les données limnimétriques et les débits ont été reconstitués ou corrigés de l'origine des stations à 1964/65.

Dans le cadre du projet d'aménagement de l'O.M.V.S. (1), Sénégal-Consult (2), en collaboration avec le service hydraulique de Bamako, a reconstruit les lectures et les séries par des recoupements et des modèles mathématiques. Les séries de débits moyens mensuels et annuels de toutes les stations disponibles pour le projet de l'O.M.V.S. ont été étendues. Ce projet a disposé de données d'études allant de 1903 à 1968 : 66 ans.

Nous tenons pour acquis les résultats de ces travaux et nous avons recueilli d'autres informations auprès des services concernés.

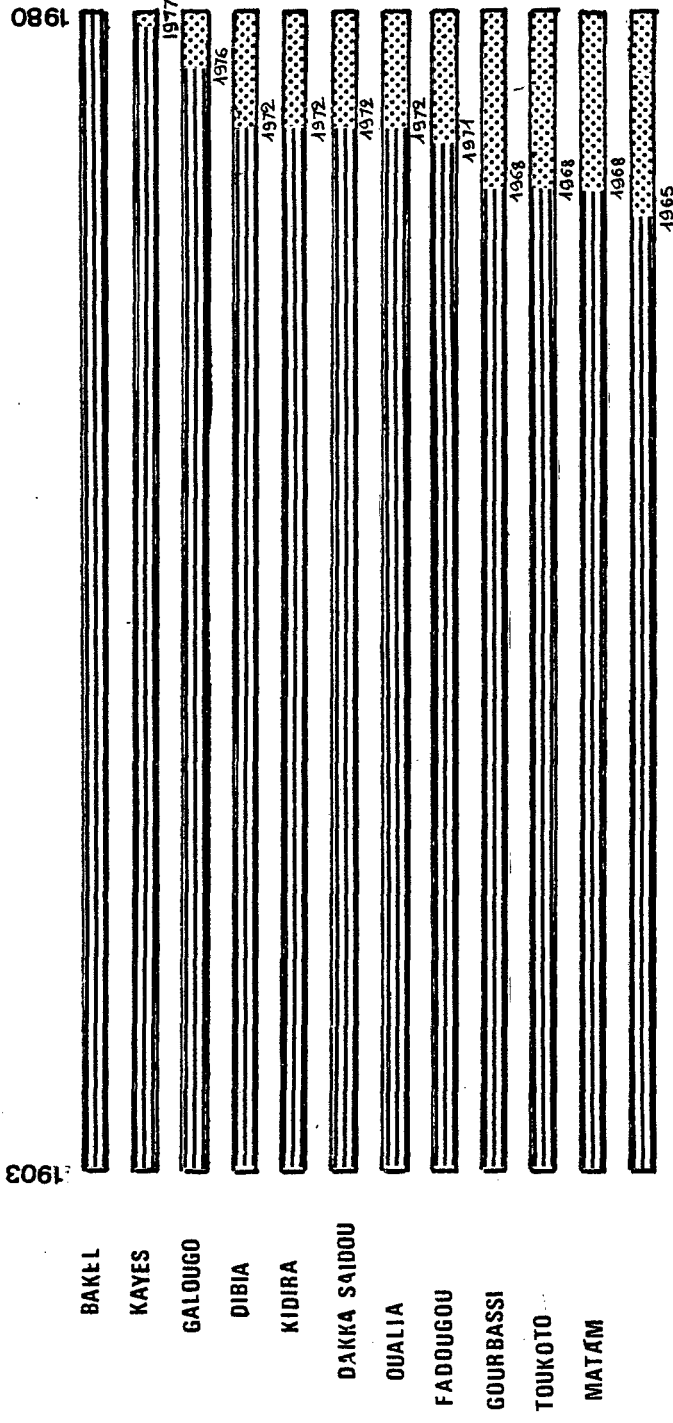
Le comblement et l'homogénéisation des valeurs récentes que nous avons faits pour les dernières années allant de 1968 à 1980 nous permettent de disposer de longues séries de référence allant de 1903 à 1980 (Fig. n° 33). Nous avons recueilli d'autres informations concernant les relations hauteurs-débits des stations retenues et les jaugeages récents effectués.

Ces dernières informations ont été obtenues grâce à l'amabilité de Monsieur J. SIRCOULON, Directeur des Services Techniques de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy et grâce aux responsables du C.I.L.S.S. au Mali qui nous ont envoyé l'information disponible à Bamako.

(1) Rappel : O.M.V.S. : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
(2) Sénégal-Consult : principal organisme d'étude de l'O.M.V.S.

FIG 33

séries hydrométriques



Periode estimée par regression

2. Les stations retenues pour l'analyse moyenne

Hormis les rivières du Karakoro et du Kolimbiné qui ne disposent chacune que d'un poste de mesure et sur le cours inférieur près de leur confluence (ce qui en réduit l'intérêt), les principales rivières disposent d'au moins trois ou quatre postes fonctionnels. Ces stations permettent ainsi d'apprécier les variations de l'abondance moyenne de la source à la confluence de ces rivières.

Il nous a fallu choisir entre les différents postes de mesure ceux qui se répartissent le mieux le long des cours d'eau. Car certains sont assez voisins et ne livrent que la même information (exemple Dakka-Saïdou et Boureya sur le Bafing supérieur, Galougo et Gouina sur le Sénégal) (carte n°21).

Cependant, le choix des postes retenus a été surtout déterminé par l'existence de données fiables et l'importance du nombre de jaugeages effectués. Nous avons aussi tenu compte du degré de fiabilité que les différents observateurs (O.R.S.T.O.M. , Sénégal, Mali) confèrent à certains sites de stations et de l'existence de barèmes hauteurs-débits fiables (1).

Nous avons finalement retenu les postes suivants (carte n°21) :

- pour la Falémé : Fadougou, Gourbassi, Kidira ;
- pour le Bafing : Dakka-Saïdou, Dibia ;
- pour le Bakoye : Toukoto et Oualia, et Siramakana sur son principal affluent, le Baoulé ;
- pour le Sénégal : Galougo, Kayes, Bakel et Matam.

Pour les deux affluents sahéliens du bassin, le Kolimbiné et le Karakoro, nous n'avons pas disposé des données d'observations.

(1) Les barèmes hauteurs-débits nous ont été fournis par le C.I.L.S.S. et le service de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy. Cela a permis de contrôler certaines valeurs qui paraissaient douteuses.

T A B L E A U N° 35: B A S S I N D U S E N E G A L

COEFFICIENTS DE VARIATION MENSUELS ET ANNUELS DES STATIONS DE REFERENCE

NATAN	BAKEL	KAYES	GALOUGO	DIBIA	DAKKA-SAIDOU	FADOUGOU	GOURBASSI	KIDIRA	QUALIA	TOUKOTO	SIRANAKAHA
N=0.4	M=0.6	M=0.6	M=0.6	M=0.5	M=0.4	M=0.7	M=0.9	N=0.6	M=0.7	M=0.8	M=1.0
J=0.7	J=0.7	J=0.6	J=0.6	J=0.5	J=0.5	J=0.7	J=0.7	J=0.9	J=0.6	J=0.6	J=1.2
JT=0.5	JT=0.4	JT=0.5	JT=0.5	JT=0.5	JT=0.4	JT=0.6	JT=0.6	JT=0.6	JT=0.5	JT=0.5	JT=0.8
AT=0.3	AT=0.4	AT=0.4	AT=0.4	AT=0.3	AT=0.3	AT=0.4	AT=0.4	AT=0.4	AT=0.5	AT=0.4	AT=0.6
S=0.4	S=0.4	S=0.4	S=0.3	S=0.3	S=0.2	S=0.3	S=0.3	S=0.5	S=0.4	S=0.5	S=0.6
Ø=0.5	Ø=0.5	Ø=0.5	Ø=0.5	Ø=0.5	Ø=0.4	Ø=0.6	Ø=0.6	Ø=0.8	Ø=0.5	Ø=0.4	Ø=0.5
N=0.5	N=0.4	N=0.4	N=0.4	N=0.5	N=0.4	N=0.5	N=0.6	N=0.6	N=0.4	N=0.5	N=0.5
D=0.4	D=0.4	D=0.3	D=0.3	D=0.3	D=0.3	D=0.4	D=0.4	D=0.5	D=0.3	D=0.4	D=0.6
JA=0.4	JA=0.4	JA=0.3	JA=0.4	JA=0.3	JA=0.3	JA=0.4	JA=0.4	JA=0.4	JA=0.4	JA=0.5	JA=1.0
F=0.4	F=0.4	F=0.4	F=0.5	F=0.3	F=0.3	F=0.5	F=0.5	F=0.4	F=0.4	F=0.7	F=1.0
MA=0.5	MA=0.5	MA=0.4	MA=0.5	MA=0.3	MA=0.3	MA=0.6	MA=0.8	MA=0.5	MA=0.5	MA=0.6	MA=1.0
A=0.5	A=0.6	A=0.6	A=0.5	A=0.5	A=0.4	A=0.6	A=1.5	A=0.6	A=0.9	A=1.2	A=1.0
ANNEE=0.4	ANNEE=0.3	ANNEE=0.3	ANNEE=0.3	ANNEE=0.3	ANNEE=0.2	ANNEE=0.3	ANNEE=0.3	ANNEE=0.4	ANNEE=0.4	ANNEE=0.3	ANNEE=0.6

La station de Dagana (celle de la décennie hydrologique choisie par l'O.R.S.T.O.M.) n'a pas été retenue. Les dernières années, la remontée des eaux océaniques dans le delta du fleuve a été si loin que les débits des basses eaux ont pu être influencés. Il s'y ajoute que les données sont déduites des stations en amont.

Au niveau des 12 stations ainsi retenues, nous avons effectué une analyse critique et des données et des sites d'installation.

B/ CRITIQUE STATISTIQUE DES DONNEES HYDROMETRIQUES

Le procédé est le même que pour les données pluviométriques (chapitre VI). La critique statistique concerne l'homogénéisation des données hydrométriques, la détermination des lois de distribution des modules, les corrélations entre stations et le degré de confiance à accorder aux échantillons de données traités.

Nos stations de référence à cet effet sont :

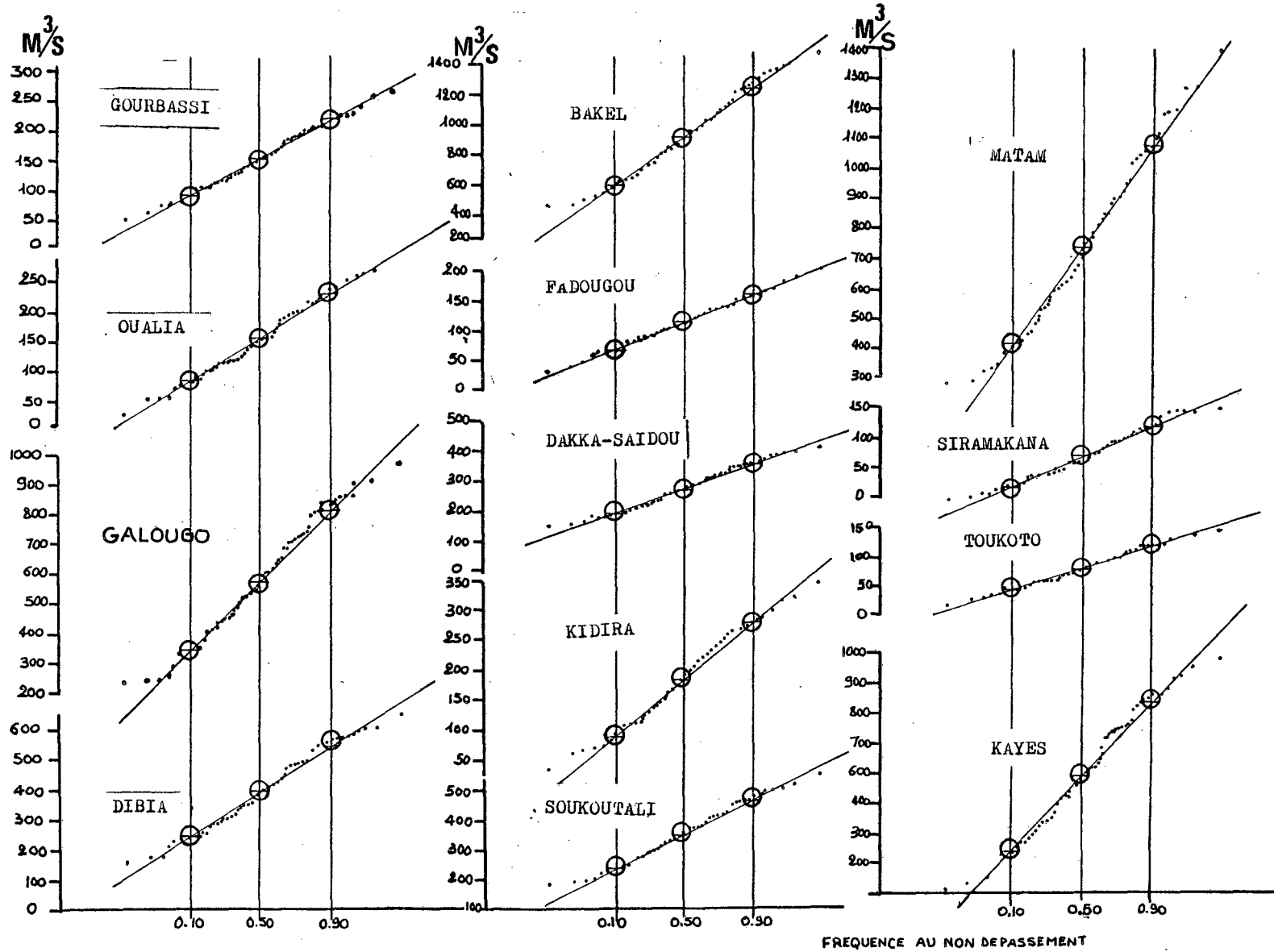
- la station de Bakel : la plus intéressante du point de vue de sa situation entre le Haut-Bassin et le Bassin Inférieur du Fleuve Sénégal (carte n°21). La série de référence 1903 - 1980 est complète et la station est l'une des mieux suivies ;
- nous avons aussi choisi la station de Kayes : elle est la plus ancienne et son barème hauteurs-débits est défini sans ambiguïté.

1. L'homogénéisation des données

La confrontation des modules de deux stations par la méthode des doubles cumuls a été faite à partir des longues séries de référence (1903 - 1980 : 78 ans). Nous avons d'abord confronté les stations de Bakel et Kayes.

BASSIN DU SENEGAL
 ESSAI D'AJUSTEMENT DES DEBITS MOYENS ANNUELS
 SELON UNE LOI NORMALE

FIG N°34



Toutes les autres stations ont été confrontées entre elles en partant de Kayes et de Bakel, comme stations de référence : Bakel - Kayes ; Kayes (Galougo ; Galougo - Oualia ...

Aucune correction n'a été faite. L'ensemble de la période 1903 - 1968 est homogène. En fait, les données de cette période ont servi pour les études de base du projet de l'O.M.V.S. Les données de cette période ont dû être traitées par cet organisme. Nous avons après comblement vérifié l'homogénéité de la période 1968 - 1980 par rapport à la période 1903 - 1968.

2. La loi de distribution des modules

L'étude des coefficients de variation mensuelle et annuelle, C.V. (écart-type / moyenne. Tableau n° 32) pour les différentes stations retenues autorise à envisager une distribution des modules selon une loi normale.

Les coefficients de variation sont très faibles. Les plus faibles sont notés pour la période de hautes eaux. En revanche, les C.V des mois de basses eaux (mai-juin) sont un peu plus élevés. Cela témoigne des fortes variations de ces débits qui peuvent être très faibles. Cette faiblesse des débits de basses eaux donne déjà une idée de l'importance des réserves souterraines du Haut-Bassin (chapitre IV). Mais il faut aussi convenir de la difficulté à affectuer des jaugeages pour les faibles débits.

Cependant, la distribution des modules selon une loi normale a été vérifiée graphiquement (Fig. n° 34). L'ajustement paraît satisfaisant. La pente de la " droite de Henri " (chapitre VI) témoigne de l'importance relative des débits moyens annuels à certaines stations. Les pentes les plus fortes appartiennent aux stations les plus en aval qui bénéficient des apports des différentes rivières (Matam, Bakel, Kayes, Kidira).

C'est à partir de cette loi et pour diverses fréquences de retour que nous avons dégagé les débits fréquentiels annuels et mensuels en période sèche et en période humide. Mais c'est aussi à partir de cette loi que nous avons fait les différentes corrélations entre stations afin de déterminer les équations de régression.

BASSIN DU SENEGAL : Coefficients de corrélation mensuelle entre stations

TABLEAU 33

	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
GALOUGO - D. SAIDOU	0,65	0,94	0,97	0,93	0,91	0,97	0,99	0,95	0,91	0,93	0,91	0,84
MATAM - BAKEL	0,88	0,98	0,96	0,96	0,96	0,94	0,97	0,98	0,99	0,99	0,98	0,93
BAKEL - KAYES	0,83	0,86	0,94	0,96	0,97	0,96	0,94	0,84	0,82	0,82	0,82	0,79
KAYES - KIDIRA	0,60	0,86	0,95	0,84	0,95	0,90	0,80	0,93	0,90	0,87	0,85	0,74
KIDIRA - GOORBASSI	0,79	0,95	0,93	0,96	0,95	0,98	0,99	0,99	0,96	0,92	0,98	0,97
KIDIRA - FADGUGOU	0,76	0,97	0,96	0,94	0,96	0,98	0,95	0,96	0,97	0,84	0,95	0,90
KAYES - GALOUGO	0,92	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,95	0,91	0,91
GALOUGO - OUALIA	0,61	0,75	0,79	0,87	0,99	0,85	0,69	0,85	0,86	0,85	0,83	0,88
GALOUGO - DIDIA	0,86	0,96	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,91	0,92	0,80	0,94
OUALIA - SIRAMAKANA	-	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-	-	-
OUALIA - TOUKOTO	-	0,96	0,94	0,94	0,98	0,87	0,91	0,96	0,82	0,86	0,62	0,89

3. Le comblement des lacunes de la période 1968 - 1980

Afin de combler les quelques valeurs mensuelles manquantes pour la période 1968 - 1980, nous avons établi des corrélations linéaires simples, vu que la distribution des données hydrométriques suit une loi normale.

Les équations de régression ont été rétablies entre débits mensuels en ne considérant que les valeurs du même mois. Nous avons ainsi obtenu 12 équations, dont une pour chaque mois de l'année hydrologique.

Les couples de valeurs sont tirés des échantillons de référence, et partout nous avons pris au moins 60 valeurs communes pour obtenir des corrélations aussi significatives que possible.

Afin de trouver les meilleures corrélations, nous avons choisi le " chemin des coefficients de corrélations les plus grands ". Cela permet de retenir pour le comblement les stations qui présentent les meilleures liaisons, les plus proches de la linéarité.

Ce travail a été rendu aisé par l'utilisation de l'ordinateur. Les stations ont été confrontées deux à deux et toujours en référence au départ à Bakel et Kayes dont les données sont complètes de 1903 à 1980.

Les résultats sont donnés dans le tableau n° 33 . On observe que les meilleurs coefficients de corrélation reviennent aux mois de saison des pluies. Ils sont compris entre 0,80 et 0,90. Pour certaines stations, le coefficient est égal à 0,99.

Les coefficients les plus faibles reviennent au mois de mai. Ils sont compris entre 0,60 et 0,80 pour ce mois. Cela témoigne aussi des difficultés d'estimation des faibles débits de basses eaux.

Nous avons restitués les débits moyens mensuels manquant à partir des équations de régression mensuelles. Cependant, parallèlement, nous avons déterminé les équations de régression annuelles entre stations (tableau n°34). De bonnes corrélations existent entre stations à l'échelle annuelle, le

Tableau n° 34. Bassin du Sénégal.
Corrélation annuelle entre stations.

Stations	Corrélation	Nombre de couples	R	Equation de regression
Matam	Bakel/Matam	62	0,94	Q Matam = 0,97 Q Bakel + 26,54
Kayes	Bakel/Kayes	77	0,97	Q Kayes = 0,75 Q Bakel + 47,62
Galougo	Kayes/Galougo	74	1,00	Q Galougo = 0,94 Q Kayes + 27,32
Kidira	Kayes/Kidira	72	0,95	Q Kidira = 0,36 Q Kayes - 29,33
Gourbassi	Kidira/Gourbassi	66	0,96	Q Gourbassi = 0,66 Q Kidira + 36,29
Fadougou	Gourbassi/Fadougou	71	0,92	Q Fadougou = 0,67 Q Gourbassi + 7,85
Dibia	Galougo/Dibia	72	0,99	Q Dibia = 0,64 Q Galougo + 23,90
Dakka-Safidou	Galougo/D.Safidou	72	0,98	Q Dakka-Safidou = 0,35 Q Galougo + 70,50
Oualia	Galougo/Oualia	72	0,95	Q Oualia = 0,30 Q Galougo - 14,84
Toukoto	Oualia/Toukoto	66	0,95	Q Toukoto = 0,47 Q Oualia + 3,81
Siramakana	Oualia/Siramakana	66	0,98	Q Siramakana = 0,65 Q Oualia - 37,46

coefficient le plus faible est de 0,94.

Cette double estimation a permis de corriger les valeurs mensuelles en déterminant le " coefficient d'homogénéisation " (1)

$$C.H = \frac{PJ}{P'J} \text{ (chapitre VI).}$$

Pour les échantillons ainsi obtenus allant de 1903 à 1980, nous avons déterminé l'intervalle de confiance selon la formule

$$y = a_Q m^3/s + b \pm \xi$$

où y = le débit à estimer, lacunaire pour une station donnée ;

a et b = des constantes d'ajustement ;

$Q m^3/s$ = le débit à la station de référence pour le même mois ;

$\pm \xi$ = l'erreur-type sur l'échantillon étendu : sa détermination a été faite selon la formule

$$U \cdot \sqrt{1 + R^2}$$

où R = le coefficient de corrélation ;

U = la variable réduite de Gauss pour l'intervalle de confiance à un pourcentage donné. Exemple pour I.C à 80 % , $U = 1,28$.

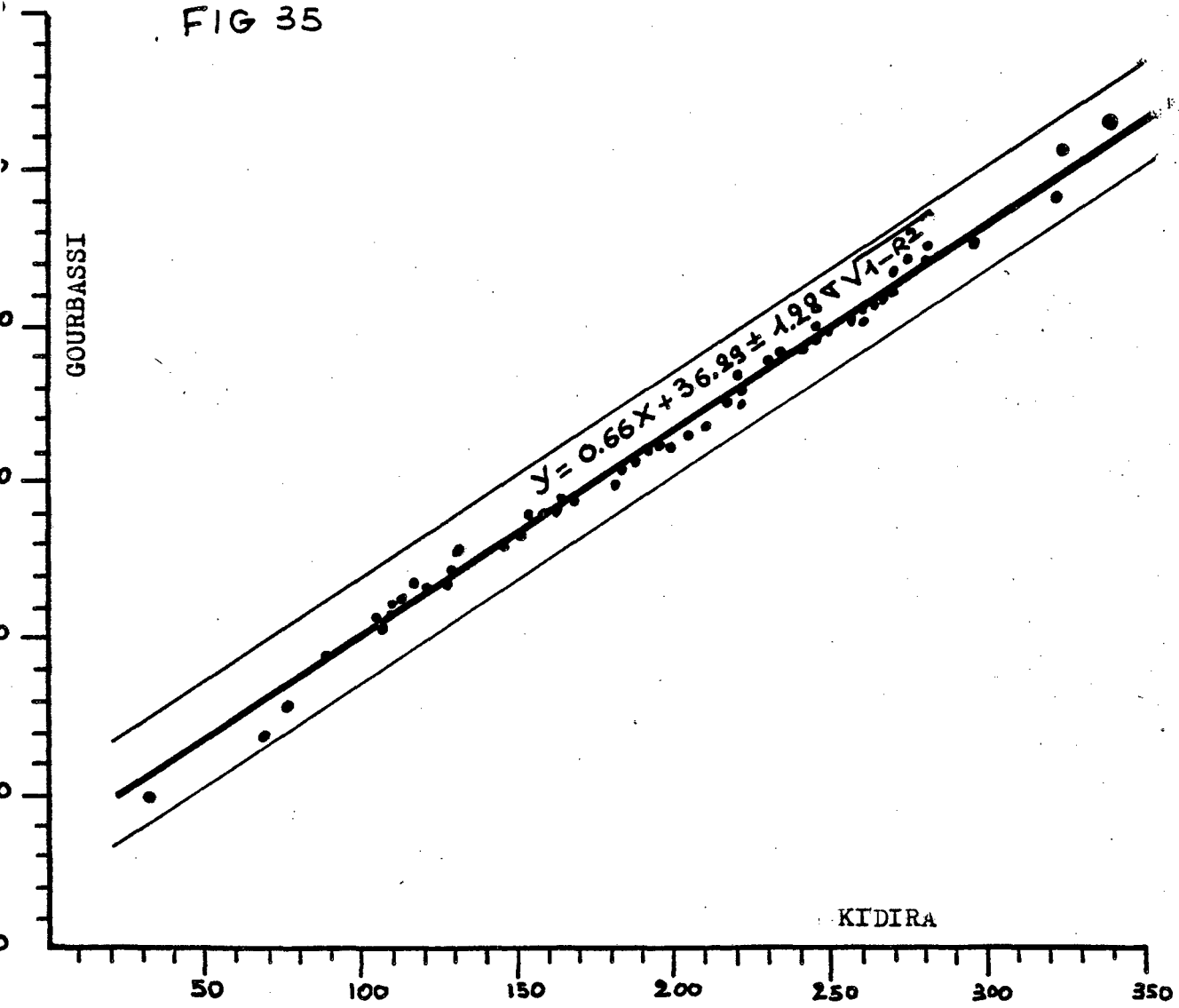
À 95 % , nous avons pris $U = 2$.

Les tableaux n° 33, 34 et la figure n° 35 donnent l'ensemble des résultats obtenus à partir de cette critique statistique des données.

(1) C.H = coefficient d'homogénéisation. Cette méthode est enseignée par P. DUBREUIL (1974) mais c'est nous qui l'appelons ainsi par commodité.

BASSIN DU SENEGAL
CORRELATION DE MODULES ANNUELS
(1903-1968)

FIG 35



C/ ANALYSE CRITIQUE DES STATIONS RETENUES

Dans le tableau n° 35, nous représentons les stations retenues pour notre analyse.

Les informations que nous y donnons concernent les données géographiques : superficie des bassins contrôlés par des stations que nous rappelons, leurs altitudes, longitudes et latitudes, de même que leurs dates de mise en service et l'étalonnage des stations. Ces informations sont données par les divers documents consultés : archives de St Louis, la monographie de C. ROCHETTE, les carnets des observateurs ...

Cependant, certaines informations appellent quelques remarques.

1. L'altitude du zéro des échelles limnimétriques

Elle est considérée comme acquise depuis le rattachement en 1956 des différentes échelles au système de l'I.G.N. (1). Malgré tout, l'échelle de la station de Dibia (tableau n° 35) sur le Bafing n'a pas été rattachée à un repère fixe. Il en est de même pour la station de Goubassi sur la Falémé. Nous prenons les données telles qu'elles existent.

2. L'étalonnage des stations de mesure

Jusqu'en 1964, un certain nombre de jaugeages seulement avait été effectués. Par exemple, en 1964, deux jaugeages seulement avaient été faits à Kayes, la station la plus ancienne installée en 1892.

Dans l'ensemble, jusqu'à cette année, les courbes de tarage avaient des qualités inégales et nécessitaient une certaine extrapolation à partir de certaines hauteurs atteintes par les rivières.

Certains jaugeages, du reste, avaient été faits pendant la même période, ce qui réduit la valeur de l'information.

(1) I.G.N. : Institut Géographique National qui considère comme repère le niveau des mers.

T A B L E A U N°35: B A S S I N D U S E N E G A L

I N F O R M A T I O N S S U R L E S S T A T I O N S H Y D R O M E T R I Q U E S R E T E N U E S

S T A T I O N S	SUPERFICIE BASSIN KM2	DONNEES GEOGRAPHIQUES	ALTITUDE DU ZERO DE L'EHELLE (M.IGN)	ETALONNAGE NB DE JAUGEAGES	MARNAGE ETALONNE	DEBITS CORRESPONDANTS EN M3
MATAM	230.000	15°39'N-13°15'W	6,32m IGN	-	0,1 et 5m	-
BAKEL	218.000	14°54'N-12°27'W	11,16m IGN	220	0,36 et 12,28	1,1 et 6440
KAYES	157.400	14°27'N-11°27'W	20,16m	40	0,26 et 9,68	0,55 et 4220
GALOUGO	128.400	13°51'N-11°03'W	69,23m	17	0,38 et 8,24	17,5 et 4430
KIDIRA	28.900	14°27'N-12°13'W	19,605m	76	0,55 et 9,5	0,2 et 1930
GOURBASSI	17.100	13°24'N-11°38'W		135	0,09 et 6,87	0,34 et 1366
FADOUGOU	9.300	12°31'N-11°23'W	119,03m	177	0,02 et 7,58	0,025 et 1175
OUALIA	84.700	13°56'N-10°23'W	108,16m	89	0,47 et 7,96	0,29 et 1592
TOUKO'FO	16.500	13°27'N- 9°53'W	161,05m	54	0,26 et 2,29	0,7 et 590
DIBIA	33.500	13°14'N-10°48'W	?	73	1,15 et 10,16	1,15 et 3858
DAKKA-SAIDOU	15.700	11°57'N-10°37'W	307,42m	50	0,10 et 6,51	2,12 et 2117
SIRAMAKANA	59.500	13°35'N- 9°53'W	157,03m	15	0,97 et 3,9	0,5 et 470

Des mesures complémentaires ont été faites depuis 1964 par les ingénieurs de l'O.R.S.T.O.M. et du Sénégal-Consult.

Ainsi, le nombre de jaugeages que nous donnons dans le tableau n° est le nombre total effectué jusqu'en 1980/81. La liste complète jusqu'à cette date et les barèmes hauteurs-débits correspondants nous ont été gracieusement fournis par le Service hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy.

Ces informations nous ont permis de vérifier les modules des échantillons retenus, lesquels sont bien " calés " entre le plus bas débit mesuré et le plus élevé.

Nous représentons dans le tableau n°35 les débits correspondants à ces mesures extrêmes à certaines stations.

Enfin, chaque fois qu'elles étaient disponibles, nous donnons les valeurs extrêmes atteintes par la crue et l'étiage. Il faut noter cependant que cette dernière information est souvent critiquée dans les documents consultés.

3. Les sites des stations de mesure

Du point de vue géographique, la station de Bakel a la situation la plus favorable. La confluence de tous les affluents avec le bras principal se réalise en amont de Bakel. La disposition du réseau hydrographique permet ainsi la coalliscence des " flots " et la courbe de variation mensuelle des débits à cette station enregistre un maximum unique suivi d'une phase de descente des eaux.

En annexe, nous reproduisons les courbes de tarage tracées à partir des jaugeages antérieurs à 1964. Ce sont les courbes données par la monographie de C. ROCHETTE. Cependant, nous nous y reportons afin de compléter, les dernières mesures jusqu'en 1980/81.

La situation de la station, au " sortir " du Haut-Bassin fait qu'elle " résume " d'une certaine manière l'ensemble de l'écoulement moyen du Haut-Bassin. En revanche, d'autres sites de stations nous semblent peu favorables, telles les stations proches des confluences de deux grandes rivières, Kidira près de la confluence entre le Sénégal et la Falémé, Dibia à la confluence du Bafing et du Balin-Ko et Siramakana à la confluence du Baoulé et du Bakoye.

Certaines stations se trouvent installées dans des secteurs où le fleuve a plusieurs bras.

La station de Fadougou, quant à elle, du fait du fond rocheux de la rivière, bénéficie d'une certaine stabilité. Il en est de même pour Galougo.

Il faut noter que la navigation des pirogues sur certaines rivières présente des risques d'endommagement des éléments d'échelles.

Cependant, à partir de 1951, presque toutes les échelles ont été réinstallées. Le réseau a bénéficié d'un meilleur suivi.

L'intérêt suscité par le bassin en vue de son aménagement (O.M.V.S.) a permis un meilleur contrôle des installations.

Enfin, il faut noter que la gestion O.R.S.T.O.M. du réseau permettait, en plus de la bonne tenue des stations, une centralisation de l'information hydrométrique auprès des centres O.R.S.T.O.M. régionaux et du service central à Bondy.

D'autre part, l'information hydrométrique y était traitée et critiquée.

Les stations ont été rétrocédées, pour la gestion, aux services nationaux concernés, ce qui nous a posé des problèmes de rassemblement des données. Mais partout, notre but a toujours été compris et facilité.

Les stations retenues pour notre analyse sont ainsi, malgré quelques inconvénients, les meilleures pour l'étude des régimes du bassin.

Cependant, une des originalités du tracé du réseau hydrographique et des sites d'installation des stations est qu'ils permettent de vérifier certaines relations entre les débits des rivières.

On vérifie par exemple que :

$$\begin{array}{rcl} Q \text{ à Kayes} & = & 591 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ à Kidira} & = & 183 \text{ m}^3/\text{s} \\ & & \hline & & + 774 \text{ m}^3/\text{s} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} Q \text{ à Bakel} & = & 730 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{différence} & : & 44 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ soit environ } + 6 \% \text{ que l'on peut attribuer aux} \\ & & \text{apports du Karakoro.} \end{array}$$

De même que :

$$\begin{array}{rcl} Q \text{ à Toukoto} & = & 77 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ à Siramakana} & = & 65 \text{ m}^3/\text{s} \\ & & \hline & & + 142 \text{ m}^3/\text{s} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} Q \text{ à Oualia} & = & 158 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{différence} & : & 16 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ soit } 10 \% \text{ environ que l'on peut attribuer aux ap-} \\ & & \text{ports des affluents en amont de Oualia. Ces valeurs sont} \\ & & \text{les moyennes de la série 1903 - 1980.} \end{array}$$

*

* * *

Pour l'étude des régimes des cours d'eau dans le Bassin du Sénégal, les valeurs moyennes mensuelles des débits sont données dans les annuaires hydrologiques du mois de mai au mois d'avril. C'est ce découpage utilisé par les

différents services hydrauliques que nous adopterons. Il constitue ainsi ce que l'on appelle " l'année hydrologique ". Néanmoins, il nécessite un réaménagement si l'on veut confronter les régimes des rivières avec les autres paramètres climatiques car l'année climatique est comptée de janvier à décembre.

Les facteurs de l'écoulement tels que :

- l'E.T.P. (par les températures) atteint son maximum annuel entre mars, avril et mai ;
- l'humidité relative connaît ses valeurs les plus faibles pendant cette période ;
- la pluie est souvent absente aussi, tout au moins au Nord du bassin.

En somme, l'évolution des éléments climatiques influant sur l'écoulement situe bien la période des basses eaux en avril-mai. Ainsi, l'année hydrologique se situe bien entre deux périodes de basses eaux successives.

Cependant, elle prend en compte 8 mois d'une année légale et 4 mois l'année suivante. Les valeurs moyennes mensuelles sont du reste souvent données sous la forme 1964/65 par exemple, pour rendre compte du découpage qui en fait s'étend sur deux années légales.

Malgré tout, nous respectons ce découpage des annuaires hydrologiques du bassin et les valeurs moyennes mensuelles seront partout, dans l'analyse, données de mai à avril.

CHAPITRE II

LES BILANS ANNUELS DE L'ÉCOULEMENT
DANS LE BASSIN DU SENEGAL

L'affluent principal du bassin est le Bafing (750 km de long), rivière née au Fouta Djalon. A Bafoulabé, sa rencontre avec le Bakoye (560 km de long), autre affluent né dans les Monts-Méniens (carte n° 3), donne naissance au Sénégal proprement dit (carte n° 3). C'est en aval de Bafoulabé que les affluents tels que le Kolimbiné, le Karakoro, la Falémé et les oueds du Cours Inférieur viennent grossir le réseau principal. Ainsi, c'est l'ensemble formé par le Bafing et le Sénégal qui constitue l'artère principale du bassin.

C'est au niveau des stations de référence retenues, installées le long de cet ensemble, que nous appellerons Sénégal-Bafing (C. ROCHETTE, 1974), que seront étudiés les bilans annuels de l'écoulement dans le bassin.

Les bilans hydrologiques seront associés aux domaines climatiques du bassin. Cependant, pour cerner la réalité du bilan d'un domaine, nous avons aussi déterminé les bilans de stations installées sur des affluents du Sénégal-Bafing. Leurs situations géographiques rendent mieux compte des nuances dans les domaines climatiques.

A cet effet, la station de Bakel est, par sa situation clé entre le Haut Bassin et le Bassin Inférieur, celle qui rend compte du bilan moyen de l'ensemble du Bassin Supérieur (carte n° 21).

A/ LES TERMES ET LES PERIODES RETENUES POUR LES BILANS ANNUELS

Le bilan hydrologique fait appel à des termes qu'il nous faut rappeler.

1. Les termes du bilan annuel

L'équation du bilan hydrologique sous une de ses formes les plus réduites s'écrit :

$$P \text{ mm} = E \text{ mm} + ER + R_1 - R_0 ,$$

équation dans laquelle

* P(mm) est la lame d'eau moyenne précipitée : elle a été déterminée grâce à une méthodologie que nous avons expliquée dans le chapitre VIII ;

* E(mm) est la lame d'eau moyenne écoulée. Elle est le plus souvent indiquée sous la forme P'(mm). Elle se déduit facilement à partir du module par le rapport

$$E(\text{mm}) = \frac{Q \text{ m}^3/\text{s} \times t(\text{s})}{1\,000 \cdot S(\text{km}^2)}$$

où t = le nombre de secondes de l'année. Pour un an = 365 jours, t = 31 536 000 s ;

S = la superficie du bassin en km² ;

* ER (ou ET) est la lame d'eau en mm prélevée par évapotranspiration et à laquelle s'ajoute la différence entre le stock mis en réserve R₁ et le volume restitué provenant de ces réserves. Cette différence s'exprime par R₁ - R₀.

Toute la lame d'eau reçue n'étant donc pas écoulée, le prélèvement par les plantes et l'évaporation, par les hommes quelquefois et par les stocks en réserve, constitue un déficit pour l'écoulement qui est donné par la relation

$$DE(\text{mm}) = ER + R_1 - R_0.$$

Cependant, R_1 et R_0 tendent à s'équilibrer ($R_1 \neq R_0$) d'autant mieux que la période est longue.

Ainsi, DE ne représente en somme que l'évapotranspiration réelle E.T.R. Cet équilibre relatif fait que pour nos périodes d'estimation des bilans moyens, R_1 et R_0 seront négligés et nous considérerons que $DE = E.T.R.$

Ainsi, les termes du bilan deviennent simples et s'expriment ainsi :

$$P(\text{mm}) = E(\text{mm}) + D.E(\text{mm}).$$

$P(\text{mm})$ et $E(\text{mm})$ étant connus, on peut calculer le coefficient d'écoulement :

$$CE \% = \frac{E(\text{mm})}{P(\text{mm})} \cdot 100$$

On peut ainsi estimer le volume moyen total d'eau écoulée, soit la disponibilité moyenne annuelle en eau de surface par les relations

$$V \text{ m}^3/\text{an} = Q \text{ m}^3/\text{s} \times t = \frac{q/1/\text{s}/\text{km}^2 \times t \times S(\text{km}^2)}{1\ 000} .$$

2. Les périodes retenues pour les bilans annuels

Les bilans sont déterminés pour les périodes d'observation 1951 - 1980 et 1970 - 1980. Les régimes et leurs variabilités sont étudiés sur la période de référence 1903 - 1980 (78 ans).

Cette série de 78 ans, par sa longueur, est à tout point de vue représentative de l'écoulement moyen. Mais nous avons essayé de " mesurer " la représentativité des deux moyennes de 30 ans et de 11 ans en déterminant le coefficient de représentativité

$$C.R = \frac{Q_x}{Q_n} \quad \text{où}$$

Q_x = la moyenne d'une série donnée ;

Q_n = la moyenne d'une longue série de référence.

Le C.R varie de 0 à 1. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant .

Tableau n° 36. Coefficient de représentativité des périodes du bilan moyen par rapport à la série 1903 - 1980.

Stations	C.R = $\frac{Q_{30}}{Q_{78}}$	C.R = $\frac{Q_{11}}{Q_{78}}$	C.R = $\frac{Q_{11}}{Q_{30}}$
Matam	0,98	0,67	0,65
Bakel	0,97	0,66	0,64
Kayes	0,97	0,65	0,62
Galougo	0,96	0,64	0,62
Dibia	0,97	0,67	0,65
Dakka-Saïdou	0,97	0,73	0,71
Toukoto	0,98	0,65	0,64
Oualia	0,97	0,70	0,68
Siramakana	0,93	0,43	0,40
Kidira	0,97	0,59	0,57
Gourbassi	0,97	0,70	0,68
Fadougou	0,96	0,71	0,68

On observe bien que la période 1951 - 1980 (30 ans) est bien représentative de l'écoulement moyen annuel du bassin, donc du bilan moyen. Le C.R varie entre 0,93 à Siramakana et 0,98 à Matam et Toukoto.

En revanche, la période 1970 - 1980 (11 ans) pour laquelle nous avons déterminé le C.R par rapport aux deux moyennes de 30 ans et de 78 ans est

moins représentative de l'écoulement. Il s'agit de la période de sécheresse (chapitre VII). Son bilan sera un " bilan de sécheresse ". Cependant, on note déjà les stations (par la valeur du C.R) qui ont été les plus touchées par la sécheresse, constatation sur laquelle nous reviendrons.

Du reste, dans l'analyse, nous comparons souvent les valeurs caractéristiques de l'écoulement de ces deux périodes du bilan aux valeurs calculées sur la période 1903 - 1980 de référence.

Dans le tableau n° 37 suivant, nous comparons les modules par rapport aux moyennes de l'O.R.S.T.O.M. mais pour des périodes différentes.

Tableau n° 37. Comparaison des modules dans le Bassin du Sénégal.

Stations	O.R.S.T.O.M. 1903-1965	O.M.V.S. 1903-1968	AMADOU		1970-1980
			1903-1980	1951-1980	
Matam	776	-	737	719	480
Bakel	690	-	730	711	466
Kayes	624	627	591	571	369
Galougo	642	616	581	560	361
Oualia	159	167	158	154	107
Dibia	433	419	397	387	260
Dakka-Safidou	288	288	274	266	193
Kidira	195	195	183	176	104
Gourbassi	164	165	157	152	106
Fadougou	115	120	114	109	77,4
Toukoto	88	81	77	75,4	49,3
Siramakana	-	71	65	59,8	26

Les termes du bilan sont surtout liés aux climats. Or l'agencement climatique dans le Bassin du Sénégal-Bafing fait que la lame d'eau moyenne précipitée (Pmm) diminue du Sud du Bassin vers le Nord sahélien (chapitre VI, tableau n° 9 , carte n° 13). Il s'y ajoute que l'E.T.P augmente aussi du Sud du bassin vers le Nord. Ces variations consacrent celles du bilan du Sud vers le Nord. Le bilan est aussi fonction de la nature des sols du bassin. Dans l'ensemble, le Haut-Bassin offre les meilleures conditions à l'écoulement, sauf en domaine sahélien (tableau n° 31). En revanche, le Bassin Inférieur entièrement situé en domaine sahélien offre beaucoup moins de conditions favorables.

Il faut rappeler que le déficit d'écoulement -DE(mm) - augmente avec les précipitations et qu'il ne reflète pas, en général, fidèlement les variations hydrologiques en raison des pertes diverses. Nous le comparons souvent à la valeur de l'E.T.P par domaine climatique chaque fois que cette donnée est disponible.

B/ LE BILAN ANNUEL DE L'ÉCOULEMENT EN DOMAINE GUINEEN (OU DOMAINE DE TRANSITION)

La station de Dakka-Saïdou est la première choisie sur le bras principal du Sénégal-Bafing. Elle est installée sur le Bafing proprement dit qui a reçu en aval de la station la Kioma, la Téné, le Kokoum et le Bombélé. Ainsi, la station de Dakka-Saïdou est située à un endroit où le bras principal est déjà formé et est certainement la seule à pouvoir rendre compte du bilan en région guinéenne (carte n°22).

1. Le bilan moyen de la période 1951 - 1980

Le Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen et les termes du bilan dans ce secteur du bassin sont les suivants (1).

Tableau n°38 . Valeurs moyennes et termes du bilan à Dakka-Saïdou
1951 - 1980

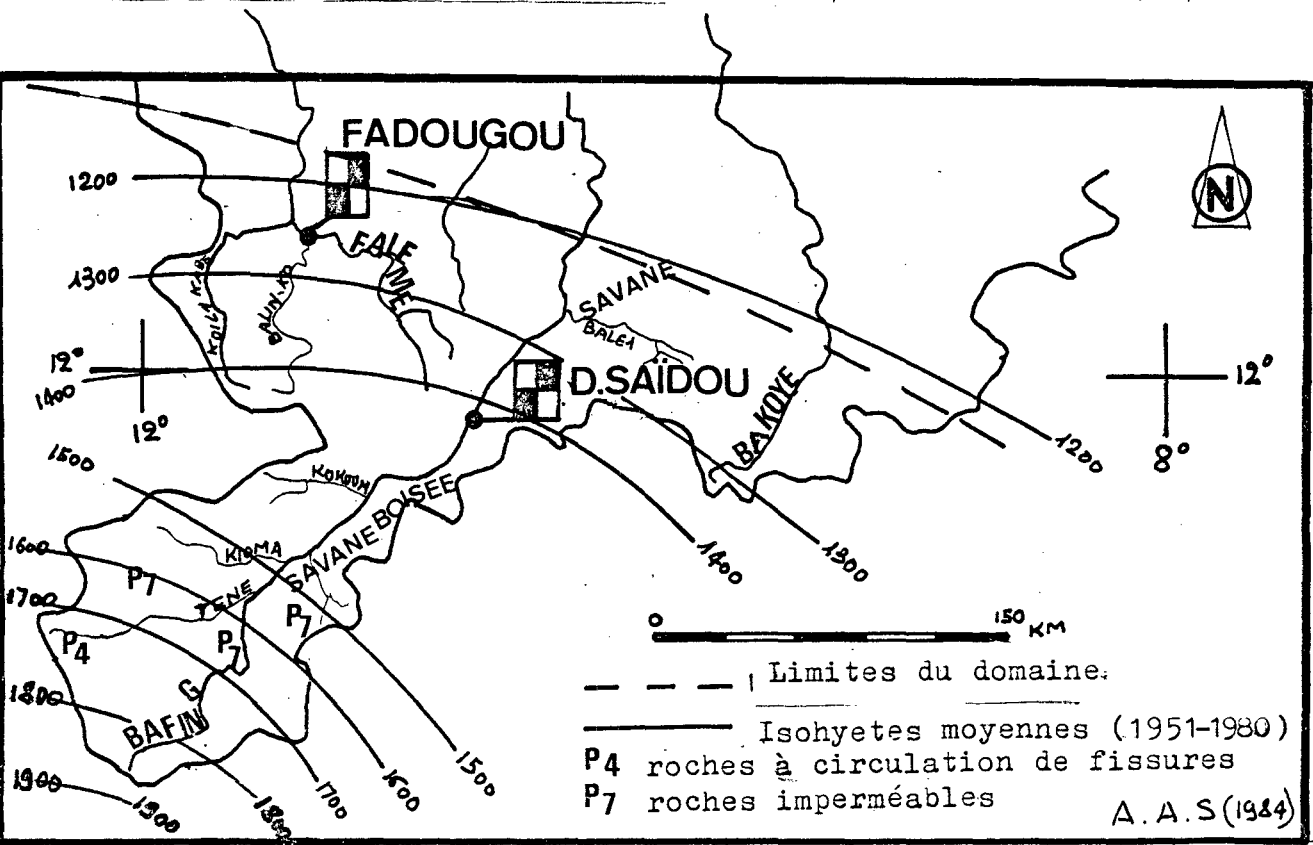
B.V km ²	Q m ³ /s	Ecart- type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique L/s/Km ²
				P(mm)	E(mm)	D.E %	C.E %	
700	266	72,1	0,27	1 466	534	932	36	16,9

(1) Rappel. B.V = bassin-versant. Q m³/s = module. Module spécifique en l/s/km². C.V = coefficient de variation. Pmm = pluie moyenne. E(mm) = lame d'eau écoulee. D.E(mm) = déficit d'écoulement (E.T.R). CE = coefficient d'écoulement.

RTE 22



LE DOMAINE GUINEEN OU DE TRANSITION DU BASSIN DU SENEGAL



- - - - - Limites du domaine.
 ———— Isohyetes moyennes (1951-1980)
 P4 roches à circulation de fissures
 P7 roches imperméables
 A. A. S (1984)

L'ensemble de ces valeurs, pour toutes les stations, a été déterminé et représenté dans le tableau n° 57. Ainsi, on observe que le module brut du Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou est le plus faible sur l'artère principale. En revanche, le module spécifique est le plus élevé du bassin. Ceci est logique vu la superficie du bassin récepteur.

La pluie moyenne précipitée est aussi la plus importante. Ce total est représentatif, du reste, des valeurs atteintes par la pluie annuelle dans cette région à forte pluviométrie : Labé 1 683 mm/an, Dalaba 1 571 mm/an et Mamou 1 942 mm/an.

La lame d'eau moyenne écoulee est de 534 mm. Ce qui détermine avec la lame d'eau reçue, un déficit d'écoulement de 932 mm correspondant à une valeur d'E.T.R moyenne de l'ordre de 64 % (E.T.R estimée à Labé selon la formule de Turc est de 1 436 mm/an).

Cependant, l'E.T.R en fait n'est que de 932 mm/an, ce qui est tout à fait concevable car, en secteur guinéen, on peut faire abstraction de réserves importantes. Ceci non seulement parce qu'il y aurait un relatif équilibre en R_1 et R_0 , mais le milieu est imperméable, les pentes fortes assurent un ruissellement rapide des eaux. Ce ruissellement souvent nommé coefficient de ruissellement n'est autre que le C.E (coefficient d'écoulement) qui est le plus élevé du bassin : 36 % (tableau n° 59).

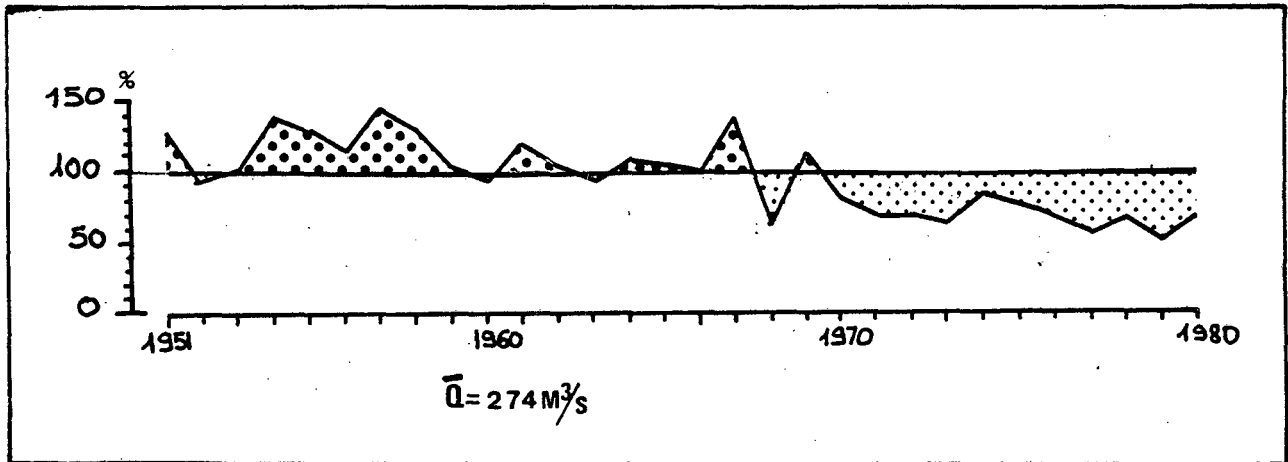
Mais au total dans cette région, la consommation des plantes doit être plus importante que celle de la température moyenne qui connaît ici ses valeurs les plus faibles du bassin (en raison de l'altitude) alors que le milieu est le plus boisé du bassin (carte n° 22).

2. La variabilité interannuelle du bilan moyen

Sur la période 1951 - 1980, la variabilité du bilan peut être mesurée par le coefficient de variation : $C.V = 0,27$. Ce coefficient est sensiblement égal à celui calculé sur la longue série de référence 1903 - 1980 : 0,24. Ils traduisent tous les deux une faible dispersion relative des valeurs, autour de la moyenne, d'où une faible variation. Cependant, la variabilité

du bilan se mesure mieux par l'hydraulicité sur la période 1951 - 1980 par rapport à la moyenne 1903 - 1980.

Figure n° 35. Hydraulicité en % sur la période 1951 - 1980 à Dakka-Saïdou.



La période 1951 - 1980 connaît une forte hydraulicité qui va de 1951 à 1959, où l'hydraulicité moyenne est de 121 % (ou 1,21).

De 1960 à 1967, l'hydraulicité moyenne est de 108 %. L'année 1968 marque la première chute importante de l'hydraulicité (66 %). Elle est suivie d'une légère remontée en 1969 (115 %), année à partir de laquelle l'hydraulicité reste faible jusqu'en 1980 (moins de 100 %).

La plus forte valeur est notée en 1957 : 145 %. L'année de la plus faible hydraulicité est l'année 1979 : 57 %.

L'évolution, en somme, consacre deux périodes : une période faste de 1951 à 1968 et une période allant de 1968 à 1980 qui, à l'exception de l'année 1969, est sèche.

Cette évolution se calque sur l'évolution pluviométrique qui a connu un

maximum durant les années " 1950 " et qui connaît une sécheresse durant les années " 1970 ". Sur la période 1951 - 1980, l'étude fréquentielle (1) pour la prédétermination des modules donne les résultats suivants :

Tableau n° 39. Modules fréquentiels sur la période 1951 - 1980 en m³/s

Q 1/100	Q 1/50	Q 1/10	Q 1/5	Q̄	Média- ne	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/50	Q 1/100	K ₃ (2)
F = 0,01	F = 0,02	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,98	F = 0,99	
180)	118	174	205	266	263	326	358	414	(434)	2,06

Nous donnons à titre indicatif seulement le module de fréquence centennale car on ne peut déterminer un quantile dont la durée de retour est 3 fois supérieure à la taille de l'échantillon de valeurs (P. DUBREUIL, 1974).

Ces valeurs comparées à celles déterminées sur la période 1903 - 1980 (tableau n° 63) sont plus faibles du fait de l'abondance moyenne qui est elle-même plus faible. Mais les valeurs sont sensiblement égales. Il faut noter que la diminution des modules fréquentiels en période sèche est plus importante que pour la période de référence 1903 - 1980.

L'irrégularité annuelle mesurée par l'index K₃ montre une plus grande irrégularité entre 1951 - 1980 : 2,06 contre 1,9 pour 1903 - 1980.

(1) Les modules fréquentiels sont donnés par la relation :

$$Q_f \text{ (m}^3\text{/s)} = Q \text{ m}^3\text{/s} \quad U \cdot \nabla_q \quad U = \text{variable de Gauss.}$$

(2) Il s'agit de l'index K₃ de J. RODIER (1964) qui est le rapport des modules décennaux humides et secs. Nous le calculons par le rapport des modules fréquentiels décennaux humides et secs

$$K_3 = \frac{Q_f \text{ 0,90}}{Q_f \text{ 0,10}}$$

3. Les bilans particuliers de la période 1951 - 1980

Il s'agit des bilans des années particulières sur la période 1951 - 1980 et du bilan de la sécheresse sur la période 1970 - 1980 (1).

a) Les années particulières

Les valeurs extrêmes pour la période 1951 - 1980 sont données dans le tableau n° .

Le maximum maximum de la période intervient à Dakka-Saïdou en 1957 : $396 \text{ m}^3/\text{s}$ ($25,2 \text{ l/s/km}^2$) et le minimum minimum en 1979 : $155 \text{ m}^3/\text{s}$ ($9,87 \text{ l/s/km}^2$).

Ces valeurs correspondent à des durées de retour en période humide de 1 fois en 28 ans pour le maximum et de 1 année sur 16 pour le minimum.

Les valeurs extrêmes pour l'échantillon de valeurs de 78 ans sont aussi données dans le tableau n° 61. Elles sont les suivantes :

- pour le maximum, $419 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1924 ($26,7 \text{ l/s/km}^2$) avec une fréquence de retour de 1/76 ans ;
- le minimum est le même que pour la période 1951 - 1980.

Cependant, pour les deux échantillons, on observe que les valeurs extrêmes faibles reviennent plus rapidement que les extrêmes humides.

b) Le bilan de la période de sécheresse 1970 - 1980

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen sur la période 1970 - 1980 à Dakka-Saïdou sont les suivantes :

(1) Comme pour la période 1951 - 1980, nous donnons les valeurs caractéristiques de toutes les stations du bassin dans le tableau n° .

Tableau n° 40. Valeurs moyennes et termes du bilan (1970 - 1980).

Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Mod. spécifique
			P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
193	23	0,12	1 440	388	1 052	27	12,3

Ces valeurs caractéristiques de la sécheresse sont très faibles par rapport aux moyennes de 30 ans et de 78 ans.

Le module ne représente plus que 71 % du module de 78 ans et 73 % du module 1951 - 1980.

La pluie moyenne diminue sensiblement et la lame d'eau écoulée n'est plus que de 388 mm. Le déficit d'écoulement est plus élevé, 1 052 mm, soit une évapotranspiration réelle de 73 %. Le coefficient d'écoulement se réduit à 27 %. La variabilité de ce bilan peut être mesurée par le C.V et l'index K₃. Cependant, ces coefficients étant déterminés sur un échantillon plus court de 11 ans, ils sont à prendre à titre indicatif. Il en est de même pour le module fréquentiel cinquantennal que nous donnons. Les résultats de ces calculs sont les suivants.

Tableau n° 41. Modules fréquentiels sur la période 1970 - 1980 en m³/s à Dakka-Saïdou.

Q 1/50	Q 1/20	Q 1/10	Q 1/5	Q̄	Méd.	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/20	Q 1/50	K ₃
F = 0,02	F = 0,05	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,95	F = 0,98	
(145)	155	163	174	193	194	213	223	232	(241)	1,4

Le C.V (0,12) et l'index K_3 (1,4) traduisent une irrégularité moins importante par rapport à 1951 - 1980 et 1903 - 1980. Mais il faudrait interpréter cela comme une stabilité des faibles valeurs de cette période de sécheresse ou, les prendre pour ce qu'ils représentent du fait de la taille de l'échantillon.

Enfin, notons que l'année la plus sèche en région guinéenne hydrologiquement, l'année 1979; pluviométriquement n'est pas l'année la moins humide. Néanmoins, la pluviométrie est déficitaire dans la région : Labé - 19 %, Dabola - 23 % et Mamou - 17 %.

Dans le tableau n° 59, nous donnons les termes du bilan en domaine climatique Sud-soudanien. Les valeurs de la station de Fadougou, très peu éloignées de celles de Dakka-Saïdou, traduisent une nuance du bilan moyen.

4. La nuance septentrionale du bilan

La Falémé à Fadougou

La Falémé naît dans les contreforts septentrionaux du Fouta Djallon. Il longe le bras principal du Sénégal-Bafing sur 625 km avant de confluer en aval de Kidira près de Bakel (carte n° 22).

a) Le bilan moyen de la période 1951 - 1980

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen sont les suivantes.

Tableau n° 42. Valeurs caractéristiques et termes du bilan (1951 - 1980).

B.V km ²	Q m ³ /s	Ecart- type	C.V	Termes du bilan				Module spéci- fique
				P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
9 300	109	35,8	0,33	1 132	370	762	33	11,7

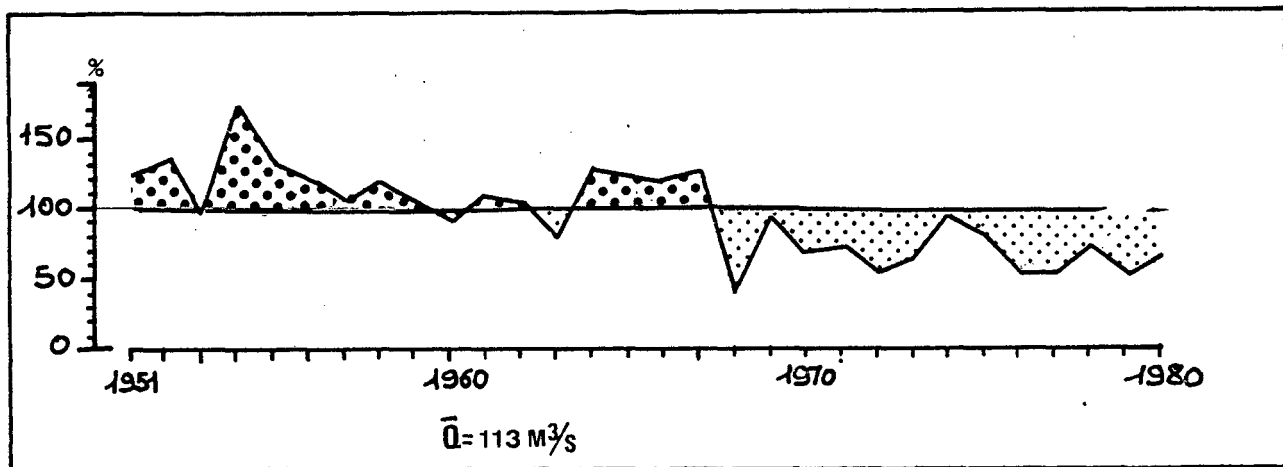
Les valeurs moyennes, le module brut, le module spécifique sont moins élevés qu'à Dakka-Saïdou. Le module brut à Fadougou ne représente que 41 % du module à Dakka-Saïdou.

La pluie moyenne est de 1 132 mm, elle est moins importante et est logique du fait de la diminution de la pluviométrie du Sud vers le Nord. Ainsi, la lame d'eau écoulee (E mm) n'est que de 370 mm, soit 164 mm de moins qu'à Dakka-Saïdou. Somme toute, la Falémé n'est qu'un affluent du Sénégal-Bafing.

Le déficit d'écoulement, D.E (mm), est de 762 mm, ce qui représente une évapotranspiration réelle de 67 %. Cependant, le coefficient d'écoulement qui est une caractéristique des régimes des bassins est sensiblement égal à celui de Dakka-Saïdou : respectivement 33 % à Fadougou contre 36 %. C'est du reste cette valeur qui nous fait considérer le bilan à Fadougou comme une variante du bilan moyen en régime guinéen.

Le coefficient de variation C.V montre une plus grande variabilité que sur le Bafing : 0,33 contre 0,27 à Dakka-Saïdou. Cette variabilité mesurée par l'hydraulicité sur la période montre que la courbe moyenne à Fadougou évolue à peu près comme celle du Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou (Fig. n° 36 ci-après).

Figure n° 36. Hydraulicité en % sur la période 1951 - 1980 à Fadougou.



La figure n° 36 présente deux phases d'évolution :

- une période de forte hydraulité de 1951 à 1967 (118 % en moyenne) ;
- et une période de faible hydraulité de 1968 à 1980 (68 % en moyenne à l'exception de l'année 1969 : 95 %).

L'étude fréquentielle des modules donne les valeurs suivantes :

Tableau n° 43. Modules fréquentiels en m³/s sur la période 1951 - 1980 à Fadougou.

Q 100	Q 1/50	Q 1/10	Q 1/5	\bar{Q}	Médiane	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/50	Q 1/100	K ₃
F = 01	F = 0,02	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,98	F = 0,99	
26)	36	63	79	109	107	139	155	183	(193)	2,5

L'irrégularité mesurée sur la période par l'index K₃ donne une valeur sensiblement supérieure pour la Falémé à Fadougou par rapport au Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou.

b) Les bilans particuliers de la période 1951 - 1980

Il s'agit des bilans des années particulières et de la période de sécheresse.

Les années particulières

A Fadougou, sur la Falémé, le maximum maximorum de la période 1951 - 1980 est observé en 1954 : 199 m³/s (21,4 l/s/km²). Il a une durée de retour en période humide de 1 fois tous les 161 ans. Le minimum minimorum est observé en 1968 : 48 m³/s avec une fréquence de 1/23 ans.

Pour la série de référence 1903 - 1980, le maximum maximorum (qui est le même que pour la série de 30 ans) a une fréquence de retour de 1/122 ans.

Le minimum minimorum observé en 1913, 38 m³/s, a une fréquence de 1/63 ans.

En somme, les années sèches reviennent plus vite que les années extrêmes humides.

Le bilan de la période de sécheresse 1970 - 1980

Il présente les valeurs caractéristiques moyennes suivantes.

Tableau n° 44. Valeurs moyennes et termes du bilan à Fadougou (1970 - 1980).

Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique
			P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
77,4	15,1	0,20	1 039	262	777	25	8,32

Par rapport à la période 1951 - 1980, ces valeurs moyennes s'inscrivent à la baisse. Mais elles s'inscrivent aussi à la baisse par rapport au bilan de la même période sur le Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou. Cette diminution est normale puisqu'il s'agit avant tout d'une période de sécheresse, normale aussi du fait de la diminution des pluies du Sud du bassin vers le Nord.

Les modules fréquentiels pour la période sont aussi plus faibles, et l'irrégularité donnée par l'index K₃ (avec toutefois les mêmes réserves vu la taille de l'échantillon) traduit une irrégularité moins importante.

Les quantiles sont données dans le tableau suivant.

Tableau n° 45. Modules fréquentiels en m³/s sur la période 1970 - 1980 à Fadougou.

Q /50	Q 1/20	Q 1/10	Q 1/5	\bar{Q}	Média- ne	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/20	Q 1/50	K ₃
F = 0,02	F = 0,05	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,95	F = 0,98	
(46)	53	58	65	77	74	90	97	102	(108)	1,7

*

* *

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen de la Falémé à Fadougou traduisent une certaine faiblesse par rapport au Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou.

Ces valeurs plus faibles, la lame d'eau précipitée, les modules, sont toutefois conformes à la diminution de la pluviométrie du Sud au Nord, donc de l'ordonnance générale des zones climatiques dans le bassin.

En revanche, le C.E qui est une caractéristique des régimes des bassins est sensiblement égal pour le Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou et la Falémé à Fadougou (tableau n° 59). L'irrégularité annuelle est cependant plus importante pour la Falémé à Fadougou.

Ainsi, les principaux paramètres qui caractérisent le régime sont sensiblement les mêmes aux deux stations.

A ce titre, le bilan hydrologique à Fadougou, station du domaine climatique Sud-soudanien, apparaît comme une variante septentrionale du bilan hydrologique en région guinéenne à Dakka-Saïdou. On comprend aisément, du reste, l'assimilation des deux secteurs Sud-soudanien et guinéen sur le

plan hydrologique à un même domaine de transition. L'analyse qui suit nous permettra de revenir là-dessus et de mieux affiner nos propos.



BASSIN DU SENEGAL A GALOUGO

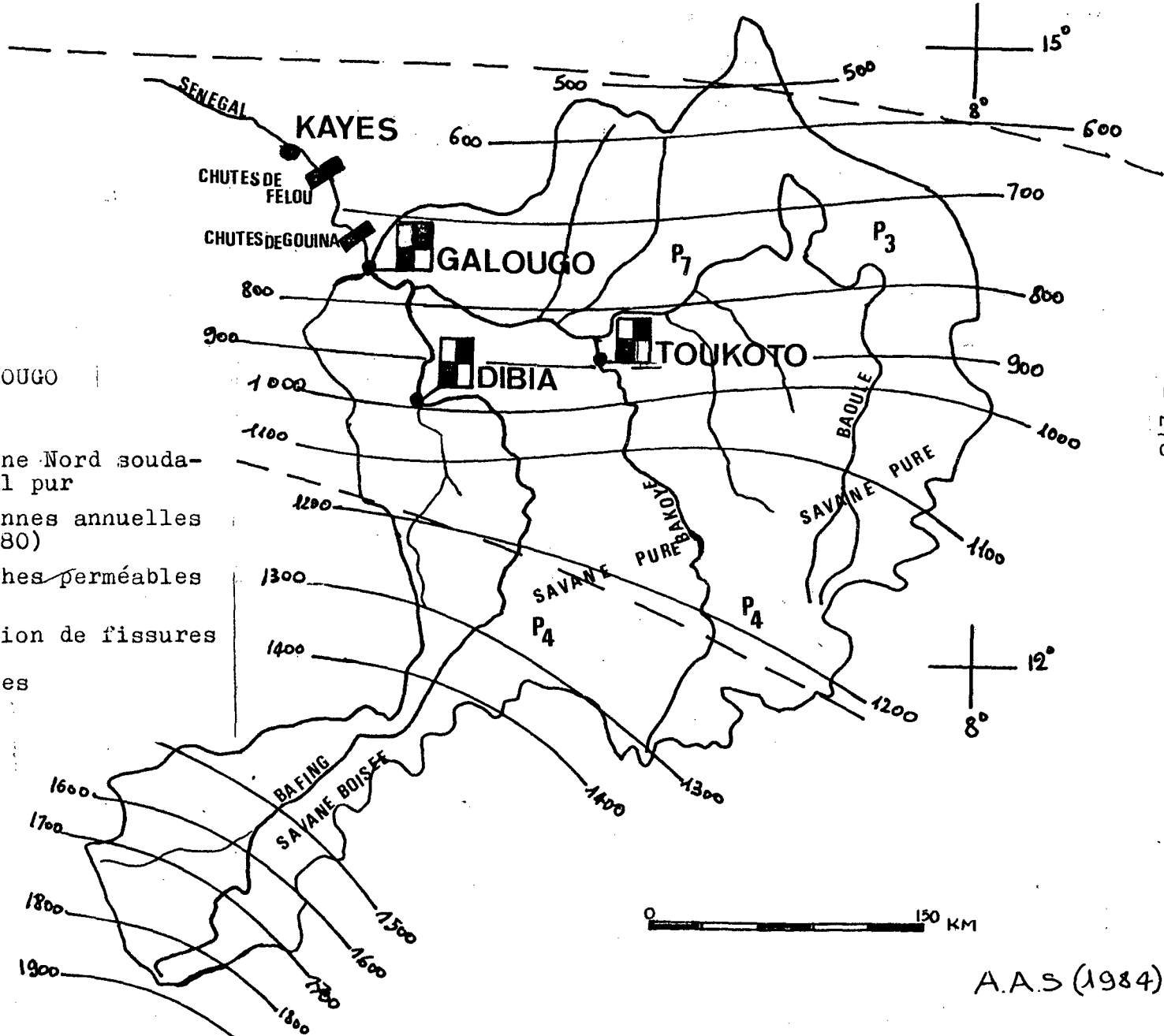
--- Limite du domaine Nord soudanien ou tropical pur

— Isohyetes moyennes annuelles (1951-1980)

P₃ alternance de roches perméables et imperméables

P₄ roches à circulation de fissures

P₇ roches imperméables



C/ LE BILAN ANNUEL DE L'ÉCOULEMENT EN DOMAINE SOUDANAIEN (TROPICAL PUR)

Le bilan du domaine Nord-soudanien, ou tropical pur, sera le plus complet en ce sens que l'importance des stations installées dans ce domaine permet d'apprécier les variantes locales du bilan moyen.

Dans ce domaine, le bras principal, le Sénégal-Bafing, dispose de trois stations : Dibia dans le secteur Sud du domaine, Toukoto, station installée sur l'affluent du bras principal le Bakoye, et dont le bilan peut rendre compte de la variante continentale.

Le bilan moyen du domaine sera estimé au niveau de la station de Galougo (carte n° 23).

1. Le bilan moyen de la période 1951 - 1980

Le Sénégal-Bafing à Galougo

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen de la période 1951 - 1980 à Galougo sont les suivantes.

Tableau n° 46. Valeurs caractéristiques et termes du bilan (1951 - 1980)

.V km ²	Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique
				P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
28 400	560	197	0,35	1 248	138	1 110	11	4,36

Le bassin-versant contrôlé à Galougo représente plus de 8 fois celui du Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou. Cependant, le faible secteur sahélien qu'il comporte permet de considérer que le bilan n'est pas influencé (carte n°23). Le bras principal a reçu le Bakoye grossi par le Baoulé et de nombreuses petites rivières.

La lame d'eau précipitée (P mm) est de 1 248 mm/an. Elle est inférieure à la lame d'eau précipitée en domaine guinéen : 1 466.

L'écoulement est aussi plus faible : E(mm) égal à 138 mm contre 534 mm en domaine guinéen. Les pertes sont ainsi plus importantes, de sorte que le déficit d'écoulement D.E est de 1 110 mm/an, ce qui représente une moyenne d'évapotranspiration réelle de 89 %.

Cette valeur du déficit d'écoulement se comprend : le bassin est plus large et, est susceptible de comporter des réserves bien que dans l'ensemble les formations dominantes soient imperméables. Le bassin-versant se situe dans une région où la végétation type est la savane pure. Les températures sont plus fortes. Il s'y ajoute que dès la sortie du domaine guinéen, les pentes sont moins importantes, les vallées s'élargissent et laissent libre cours à l'évaporation.

Ainsi, le coefficient d'écoulement C.E est de 11 % alors qu'il était de 36 % en domaine guinéen.

Ces pertes importantes se mesurent à leur juste valeur quand on observe les valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement à la station de Kayes.

Elle fait suite à celle de Galougo, cependant le Sénégal-Bafing est coupé par deux chutes en amont de la station : les chutes de Félou et les chutes de Gouina. Ces chutes ralentissent les vitesses d'écoulement et déterminent une zone marécageuse à évaporation intense (carte n°24).

Tableau n° 47. Valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement à Kayes (1951 - 1980).

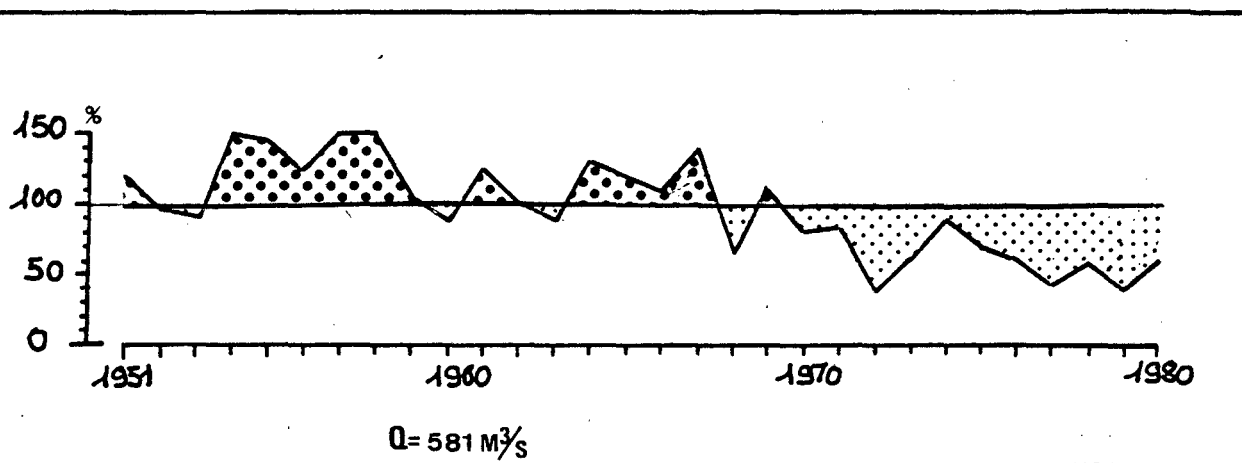
B.V km ²	Q m ³ /s	C.V	Termes du bilan				Module spécifique
			P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E	
157 400	571	0,35	1 248	114	1 134	9	3,62

Il faut noter aussi que les pertes sont importantes à Kayes en raison de l'importance du secteur sahélien compris dans le bassin-versant. Le bilan moyen à Galougo connaît aussi une variabilité annuelle.

2. La variabilité interannuelle du bilan moyen

La figure n° 37 ci-après traduit les variations de l'hydraulicité mesurée sur la période 1951 - 1980. Elles reflètent assez fidèlement l'évolution observée en amont.

Figure n° 37. Hydraulicité en % sur la période 1951 - 1980 à Galougo.



De 1951 à 1967, l'hydraulicité est très forte, la moyenne est de 120 %. Elle baisse fortement en 1968 et aussi la période 1968 - 1980 (à l'exception de l'année 1969) connaît une hydraulicité très faible : 66 % en moyenne annuelle.

La variation mesurée par le C.V sur la période traduit une plus forte variation qu'en domaine guinéen : 0,35 contre 0,27 à Dakka-Safidou.

Par rapport à la série d'observation 1903 - 1980, la variabilité est sensiblement la même : C.V = 0,32 (1903 - 1980).

Cette variabilité mesurée par les modules fréquentiels donnent les valeurs suivantes.

Tableau n° 48. Modules fréquentiels en m^3/s à Galougo (1951 - 1980).

Q 1/100	Q 1/50	Q 1/10	Q 1/5	\bar{Q}	Média- ne	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/50	Q 1/100	K_3
F = 0,01	F = 0,02	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,98	F = 0,99	
(101)	157	308	395	560	535	726	813	964	(1 019)	2,6

Le module à Galougo étant plus élevé qu'à Dakka-Saïdou du fait de l'augmentation de l'abondance moyenne de l'amont vers l'aval, les valeurs fréquentielles sont plus élevées à Galougo. Cependant, l'irrégularité annuelle donnée par le coefficient K_3 est plus élevée : 2,6 contre seulement 2,06 en domaine guinéen.

Cette irrégularité annuelle est même plus élevée que pour la série de référence à Galougo pour laquelle $K = 2,4$.

3. Les bilans particuliers de la période 1951 - 1980.

Il s'agit des bilans des années particulières et de la période de sécheresse.

a) Les années particulières

Le maximum maximorum sur la période est observé en 1958 : $862 m^3/s$ ($6,71 l/s/km^2$). Il a une fréquence de retour en période humide de 1 fois tous les 17 ans. Le minimum minimorum est observé en 1979 : $243 m^3/s$ ($1,89 l/s/km^2$). La fréquence de retour est sensiblement la même que pour le maximum : 1 fois tous les 19 ans.

b) Le bilan de la période de sécheresse (1970 - 1980)

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement sont les suivantes.

Tableau n° 49. Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Galougo (1970 - 1980).

Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique l/s/km ²
			P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
361	95,9	0,27	1 158	89	1 069	8	2,81

La lame d'eau précipitée est plus faible que pour la période 1951 - 1980 (moins 98 mm) et l'écoulement se réduit à une moyenne de 89 mm/an. Le déficit d'écoulement (ou les pertes réelles) est plus faible : 1 069 mm.

Mais dans ce domaine on observe une diminution plus sensible des lames d'eau précipitées entre 1951 - 1980 et 1970 - 1980 que pour le domaine guinéen.

Les modules fréquentiels sont les suivants.

Tableau n° 50. Modules fréquentiels en m³/s sur la période 1970 - 1980.

Q 1/50	Q 1/20	Q 1/10	Q 1/5	\bar{Q}	Média- ne	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/20	Q 1/50	K ₃
F = 0,02	F = 0,05	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,95	F = 0,98	
(165)	204	239	281	361	353	442	484	519	(558)	2

L'irrégularité annuelle plus faible durant cette période (C.V = 0,27 ; $K_3 = 2,0$) que pour la période 1951 - 1980 s'explique aussi par la taille de l'échantillon des valeurs et par une sorte de stabilité des modules faibles de cette période de sécheresse.

*

* *

Le bilan moyen en domaine Nord-soudanien ou tropical pur se traduit par une lame d'eau précipitée moins importante qu'en domaine guinéen, une lame d'eau écoulee moins importante aussi. Le déficit d'écoulement est ainsi plus élevé en raison des conditions régnantes moins favorables : température, végétation, étalement des eaux, pentes plus faibles. Il s'y ajoute l'importance du bassin-versant contrôlé par la station de Galougo. Mais ce bilan moyen connaît deux variantes : une au Sud du domaine que nous présentons à la station de Dibia et une seconde variante continentale que nous analysons à la station de Toukoto sur le Bakoye (carte n° 23).

4. La nuance méridionale du bilan moyen

Le Sénégal-Bafing à Dibia

Il s'agit du Sud du domaine Nord-soudanien. La pluviométrie est plus abondante. C'est un secteur de savane plus ou moins boisée.

La station de référence est la station de Dibia sur le Sénégal-Bafing (carte n° 23).

a) Le bilan moyen de la période 1951 - 1980

Les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen sont données dans le tableau suivant.

Tableau n° 51. Valeurs caractéristiques de l'écoulement à Dibia (1951 - 1980).

B.V km ²	Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique l/s/km ²
				P(mm)	E(mm)	D.É(mm)	C.E %	
33 500	387	126	0,33	1 320	364	956	28	11,5

Le module brut à Dibia est moins élevé qu'à Galougo mais il est plus important que celui de Dakka-Saïdou en domaine guinéen. La superficie du bassin à Dibia - 33-500 km² - fait que le débit spécifique se situe entre celui de Galougo (4,37 l/s/km²) et celui de Dakka-Saïdou (16,9 l/s/km²). A Dibia, il est de 11,5 l/s/km².

La lame d'eau moyenne précipitée est de 1 320 mm/an contre 1 248 mm à Galougo et 1 466 à Dakka-Saïdou.

Ce secteur Nord-soudanien qui fait suite au domaine guinéen est ainsi plus arrosé.

La lame d'eau écoulee est plus importante qu'à Galougo, 364 mm, et le déficit d'écoulement est de 956 mm. Le C.E est de 28 %.

Les valeurs moyennes de l'écoulement (module brut, lame d'eau écoulee, déficit d'écoulement et surtout le coefficient d'écoulement) se situent bien entre les valeurs moyennes du domaine guinéen et du domaine tropical pur.

Le C.E qui caractérise les bassins passe successivement de 36 % à Dakka-Saïdou à 33 % à Fadougou sur la Falémé. A Dibia, il est de 28 % et à Galougo il n'est plus que de 11 %.

b) La variabilité interannuelle du bilan moyen

Elle peut se mesurer par la courbe d'hydraulicité moyenne. La courbe se

calque à peu près sur les courbes de Dakka-Saïdou - Fadougou et Galougo (Fig. n° 38).

De 1951 à 1968, l'hydraulicité est très forte avec une moyenne de 123 % (120 % à Galougo).

De 1968 à 1980, à l'exception de l'année 1969, l'hydraulicité est faible : 70 % (66 % à Galougo).

La valeur la plus faible de l'hydraulicité est enregistrée en 1979 (45 %) comme à Galougo et à Dakka-Saïdou. L'année de la plus forte hydraulicité est l'année 1957 : 150 %.

La variabilité du bilan mesurée par le C.V est légèrement moins importante qu'à Galougo (C.V à Dibia est de 0,33 contre 0,35 à Galougo et 0,27 à Dakka-Saïdou).

Les modules fréquentiels ne dépendant que du module annuel et de l'écart-type, à Dibia les quantiles ont des valeurs moins élevées qu'à Galougo (tableau n° 60). L'index K_3 est de 2,4 et traduit aussi une irrégularité moins importante qu'à Galougo où $K_3 = 2,6$.

c) Le bilan de la période de sécheresse 1970 - 1980

Le bilan de la sécheresse dans ce secteur du domaine tropical pur comme partout ailleurs se traduit :

- par un module moins élevé qu'à Galougo, la station de référence : 260 m^3/s ;
- une lame d'eau écoulee plus importante néanmoins : 245 mm ;
- un déficit d'écoulement de 918 mm, soit une E.T.R de 79 %.

Ces différentes valeurs montrent que la sécheresse a été moins déficitaire dans ce secteur qu'à Galougo.

L'index K_3 mesuré sur les débits fréquentiels décennaux humides et secs

révèle une stabilité plus importante ici qu'à Galougo : $K_3 = 1,7$ à Dibia contre 2,0 à Galougo.

*

* *

La seconde nuance du bilan moyen à Galougo est analysée sur le Bakoye à Toukoto.

5. La nuance continentale du bilan moyen

Le Bakoye à Toukoto

Le Bakoye est un affluent du Sénégal-Bafing, né dans les Monts-Méniens. La source est à l'extrême Nord-est du domaine guinéen et le Bakoye grossit le bras principal après avoir reçu le Baoulé à Siramakana (carte n°23). Il conflue avec le Bafing en amont de Galougo.

Entre Dibia et Galougo, les apports peuvent s'estimer à 31 % et l'essentiel est dû au Bakoye.

Toukoto est la station qui contrôle le bassin-versant du Bakoye (carte n°23). Elle est assez continentalisée et le bilan moyen peut traduire la variante continentale du domaine Nord-soudanien.

a) Le bilan moyen de la période 1951 - 1980

Il peut être estimé à partir des valeurs caractéristiques suivantes.

Tableau n°52. Valeurs caractéristiques de l'écoulement à Toukoto (1951-1980).

B.V km ²	Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique
				P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
16 500	75,4	31,2	0,41	1 190	144	1 046	12	4,57

Avec le Baoulé à Siramakana, le Bakoye à Toukoto présente les modules les plus faibles du bassin (tableau n°57). Le Bakoye traverse essentiellement le domaine Nord-soudanien.

La lame d'eau précipitée est sensiblement moins importante pour le bassin-versant du Bakoye à Toukoto que pour le Sénégal-Bafing à Galougo. La lame d'eau écoulée est plus importante qu'à Galougo : 144 mm/an contre 138 mm/an. Elle est cependant moins élevée qu'à Dibia : 364 mm/an.

Le déficit d'écoulement est de 1 046 mm/an, soit une E.T.R de l'ordre de 88 %, ce qui est important vu la taille du bassin 8 fois moins grand que la superficie du bassin à Galougo où l'E.T.R est de 88 %.

Le coefficient d'écoulement est de 12 %, il est plus élevé qu'à Galougo, mais ne représente que la moitié du C.E à Dibia.

b) La variabilité interannuelle du bilan

Cette variante continentale du bilan présente la même variabilité du point de vue de l'hydraulicité (fig. n°38).

Entre 1951 et 1967, l'hydraulicité est très forte avec une moyenne de 122 %. De 1968 à 1980, à l'exception de l'année 1969, elle est très faible : 72 %.

Le coefficient de variation est le plus élevé que pour les stations étudiées : C.V = 0,41.

Les valeurs fréquentielles données dans le tableau n° sont les plus faibles et l'index K_3 d'irrégularité est des plus élevés de tout le bassin du Sénégal-Bafing : $K_3 = 3,3$.

c) Le bilan de la période de sécheresse 1970 - 1980

Il se présente avec des valeurs moyennes très faibles

Le module ($49,3 \text{ m}^3/\text{s}$) ne représente que 14 % du module à Galougo pour la même période.

La lame d'eau tombée (990 mm/an), avec l'écoulement (94 mm/an), donnent un

déficit d'écoulement de 896 mm/an, soit une E.T.R de 90 %. Le C.E est ainsi de 9 % (8 % à Galougo). Ce bilan associe une variabilité annuelle importante : C.V = 0,47 et $K_3 = 4$

Les variantes du bilan en domaine Nord-soudanien tirent parti essentiellement des caractéristiques des bassins contrôlés et des conditions climatiques différentes.

La variante méridionale à Dibia connaît une lame d'eau écoulée plus importante. Le bassin à Dibia est presque 4 fois plus petit, les pertes sont ainsi moins importantes alors que la pluie moyenne reçue est plus importante qu'à Galougo. Ainsi, le C.E est plus élevé. Cette variante se dégage ainsi en fonction des conditions morphoclimatiques plus favorables qu'à Galougo.

En revanche, la variante continentale à Toukoto tire parti d'un bassin contrôlé presque 8 fois plus petit qu'à Galougo. La lame d'eau reçue est sensiblement moins importante qu'à Galougo. Cependant, les pertes pour un bassin-versant beaucoup moins important sont aussi importantes que pour le bassin du Sénégal-Bafing à Galougo. Elles représentent ainsi une E.T.R d'environ 88 % (89 % à Galougo). Ces pertes importantes s'expliquent ici par les conditions climatiques essentiellement qui favorisent une évaporation importante. Le C.E est néanmoins plus élevé qu'à Galougo et beaucoup plus petit que celui du Bafing à Dibia.

Dans le tableau n° 59, nous donnons les caractéristiques moyennes de l'écoulement au niveau de chaque station du bassin du Sénégal-Bafing. Les développements qui ont précédé ont été faits au niveau des stations choisies, afin de rendre compte des bilans moyens et de leurs nuances par domaine climatique.

Ainsi, on observe que :

- la pluie moyenne reçue diminue du Sud du bassin vers le Nord. Cette diminution est conforme à la diminution de la pluviométrie, donc à l'agencement des domaines climatiques du bassin ;
- la lame d'eau écoulée diminue aussi du Sud vers le Nord en même temps que le bassin-versant s'aggrandit considérablement et que les pentes deviennent plus importantes en raison de réserves souterraines somme toute peu importantes mais surtout les pertes augmentent avec les conditions climatiques qui deviennent moins favorables vers le Nord du bassin ;
- ces facteurs font que le C.E diminue du Sud vers le Nord et l'irrégularité des bilans augmente parallèlement.

Néanmoins, l'examen du coefficient d'écoulement C.E pour les stations du Sénégal-Bafing amène à certaines constatations (tableau n° 59).

Le C.E est une caractéristique des régimes des bassins. Il diminue dans le bassin de l'amont vers l'aval, ce qui est logique car la lame d'eau précipitée $P(\text{mm})$ diminue de l'amont vers l'aval en même temps que la taille du bassin augmente.

Ainsi, le C.E à Dakka-Saïdou est de 36 %, à Fadougou, il est de 33 % (sur la Falémé), à Dibia 29 %, à Gourbassi (sur la Falémé) 27 %, à Kidira 19 %, à Toukoto (sur le Bakoye) 12 %, à Galougo 11 % et à Kayes 9 %.

En aval de Kayes, à Bakel, le C.E passe à 13 % d'où une augmentation alors que la lame d'eau précipitée continue de diminuer, et le bassin atteint 218 000 km² à Bakel. A Matam, le C.E est de 17 % et Matam est une station

installée en domaine sahélien dans le Cours Inférieur.

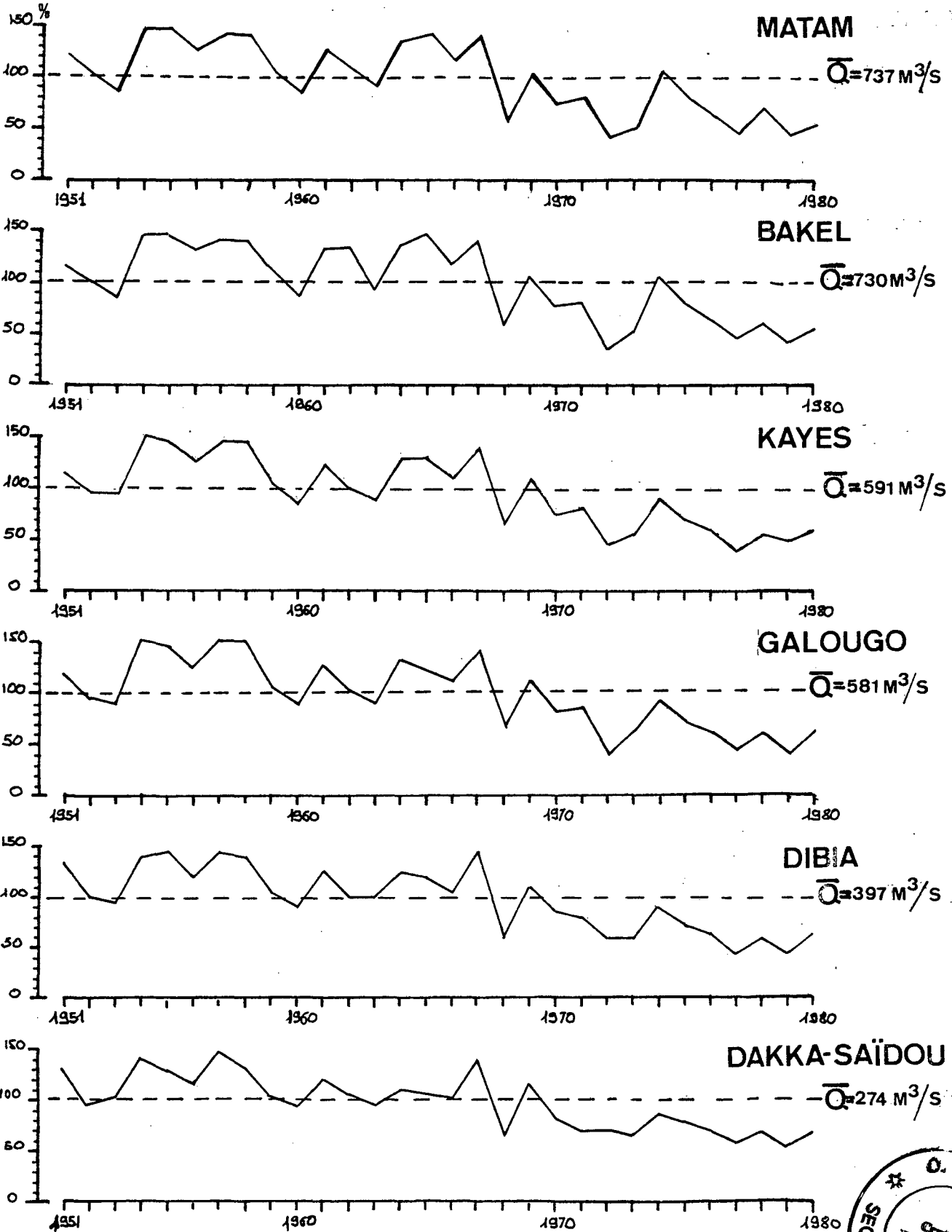
L'augmentation du C.E à Bakel montre qu'à son niveau et à partir de cette station, les termes du bilan reflètent l'ensemble des conditions de tout le Haut-Bassin. Ceci est conforme à tout bassin allogène qui, à partir d'un certain secteur, réalise toutes les conditions du bassin-versant, donc des régimes climatiques très différents du secteur, du domaine dans lequel la station est effectivement installée.

BASSIN DU SENEGAL

FIG 38

HYDRAULICITE EN % periode 1951-1980

\bar{Q} de reference 1903-1980



CHAPITRE III

LE BILAN ANNUEL DU HAUT-BASSIN
ET LES VARIATIONS DE
L'ABONDANCE MOYENNE ANNUELLE

La station de Bakel, par sa situation " clé " entre le Haut-Bassin et le Cours Inférieur, rend compte de l'ensemble des conditions et caractéristiques moyennes de l'écoulement dans le Haut-Bassin. Elle réalise ainsi une sorte de bilan moyen pour le bassin supérieur.

A/ LE BILAN ANNUEL DU HAUT-BASSIN DU SENEGAL-BAFING A BAKEL

A Bakel, le bassin-versant du Sénégal-Bafing est grand de 218 000 km². Il comporte les domaines et région climatique guinéen, Sud-soudanien, Nord-soudanien et sahélien (chapitre VI). Ce dernier domaine comporte des secteurs " pseudo-endoréiques " et enregistre les totaux pluviométriques les plus faibles du bassin.

Le module brut à Bakel est de 711 m³/s. Par rapport à Dakka-Saïdou, la première station étudiée, il y a une augmentation d'environ 63 %. A Bakel, le Sénégal-Bafing a reçu les apports de ses principaux affluents.

1. Le bilan moyen de la période 1951 - 1980

Les valeurs caractéristiques du bilan sont les suivantes.

Tableau n° 53. Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Bakel (1951 - 1980).

B.V km ²	Q m ³ /s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique l/s/km ²
				P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
218 000	711	256	0,36	818	103	715	13	3,26

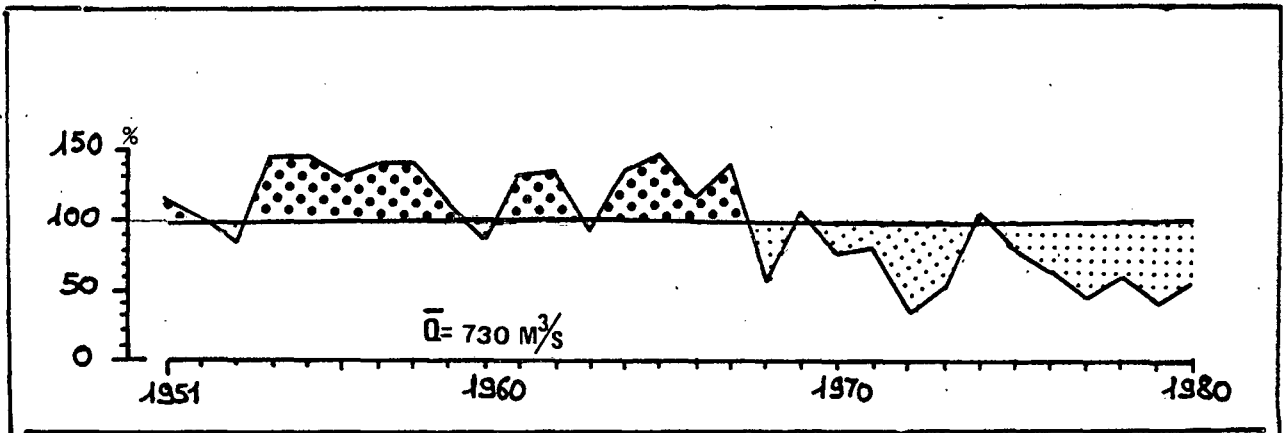
La pluie moyenne reçue, estimée sur l'ensemble du bassin contrôlé, est de 818 mm/an. Elle s'explique par l'importance du secteur sahélien du bassin-versant et par les zones pseudo-endoréiques.

La lame d'eau écoulee est de 103 mm, d'où un déficit moyen d'écoulement de 715 mm, ce qui représente une valeur d'E.T.R d'environ 87,4 %. Cette valeur est légèrement inférieure à celle de Galougo en domaine Nord-soudanien (90 %) et à celle de Toukoto (88 %). Mais le Haut-Bassin comporte un secteur guinéen et Sud-soudanien où l'E.T.R connaît ses valeurs les plus faibles du bassin. D'où une sorte de légère compensation à Bakel par rapport à Galougo. Cependant, à Bakel, il s'agit d'un bilan moyen qui se traduit par un C.E égal à 13 %, valeur moyenne pour le Haut-Bassin.

2. La variabilité interannuelle du bilan moyen

Cette variabilité exprimée par la courbe de l'hydraulicité sur la période 1951 - 1980 confirme la même évolution en 2 périodes tantôt évoquée. (FIG 39)

FIG 39 Hydraulicité en % sur la période 1951-1980 à BAKEL



- une phase de forte hydraulicité qui va de 1951 à 1967 avec une moyenne de 122 % ;

- et une phase de 1968 à 1980 qui, à l'exception de l'année 1969, connaît une hydraulicité moyenne faible : 66 %. Cette dernière période est aussi celle de la sécheresse des années " 1970 ".

L'année de la plus forte hydraulicité est l'année 1954 : 146 %. L'année de la plus faible hydraulicité est l'année 1972 : 66 %.

Cette évolution en " dents de scie " traduit une grande variabilité exprimée par ailleurs par le coefficient de variation C.V (0,36). Cette valeur est sensiblement la même qu'à Kayes (0,35) et à Galougo (0,35).

L'étude des modules fréquentiels donne les valeurs suivantes.

Tableau n° 54. Modules fréquentiels en m³/s à Bakel (1951 - 1980).

Q 1/100	Q 1/50	Q 1/10	Q 1/5	\bar{Q}	Média- ne	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/50	Q 1/100	K ₃
F = 0,01	F = 0,02	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,98	F = 0,99	
(114)	186	383	496	711	718	927	1 039	1 237	(1 309)	2,7

L'irrégularité annuelle est traduite par l'index K₃ : 2,7. Elle est plus importante qu'à Galougo : 2,6 et à Kayes : 2,6. Elle peut s'expliquer par l'intervention des influences sahéliennes dans le bassin contrôlé à Bakel.

3. Les bilans particuliers de la période 1951 - 1980

Il s'agit des bilans des années particulières et de la période de sécheresse.

a) Les années particulières

Le maximum maximorum sur la période est observé en 1954 : $1\ 068\ \text{m}^3/\text{s}$, soit un module spécifique de $4,90\ \text{l/s/km}^2$. Le minimum minimorum intervient en 1972 : $263\ \text{m}^3/\text{s}$, soit un module spécifique très faible de $1,21\ \text{l/s/km}^2$. Ces valeurs extrêmes révèlent aussi une grande irrégularité qui peut se traduire par une sécheresse comme c'est le cas pour la période 1970 - 1980 dont nous faisons le bilan.

b) Bilan de la période de sécheresse 1970 - 1980

Tableau n° 55. Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Bakel (1970 - 1980).

Q m^3/s	Ecart-type	C.V	Termes du bilan				Module spécifique l/s/km^2
			P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %	
467	152	0,33	696	68	628	10	2,14

Le module de la période de sécheresse 1970 - 1980 correspond sur la période 1951 - 1980 à une durée de retour en période humide de $1/20$ ans. A titre de comparaison, on observe que ce module correspond à une durée de retour sur la série 1903 - 1980 de 1 fois tous les 6 ou 7 ans. La pluie moyenne précipitée est de $696\ \text{mm/an}$. Cependant, cette valeur tient surtout de la pluviométrie guinéenne, secteur ayant moins ressenti la sécheresse.

La lame d'eau écoulée à Bakel est de $68\ \text{mm/an}$, d'où un déficit d'écoulement de $628\ \text{mm/an}$, soit une E.T.R d'environ $90\ \%$.

Le coefficient d'écoulement pour cette période est de $10\ \%$, d'où une légère augmentation par rapport à Galougo ($8\ \%$).

Le coefficient de variation pour cette période de sécheresse se stabilise par rapport à la série trentenaire. Il est de 0,33 contre 0,36 pour 1951 - 1980.

Les valeurs fréquentielles pour la prédétermination des modules sont les suivantes.

Tableau n° 56. Modules fréquents en m³/s à Bakel (1970 - 1980).

Q 50	Q 1/20	Q 1/10	Q 1/5	\bar{Q}	Média- ne	Q 1/5	Q 1/10	Q 1/20	Q 1/50	K ₃
= 02	F = 0,05	F = 0,10	F = 0,20	F = 0,50		F = 0,80	F = 0,90	F = 0,95	F = 0,98	
54)	218	272	339	467	470	595	662	716	(779)	2,4

L'irrégularité annuelle mesurée par l'index K₃ est de 2,4. C'est le coefficient le plus élevé pour la période sur l'ensemble du Sénégal-Bafing. Il peut s'expliquer par les influences sahéliennes, domaine qui a douloureusement senti les effets de la sécheresse dont les caractéristiques climatiques sont rappelées dans le chapitre VII.

*

* *

Le bilan hydrologique à Bakel se traduit par les valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement dans l'ensemble du Haut-Bassin. Ces valeurs sont souvent supérieures aux valeurs des domaines climatiques, surtout Nord-soudanien ou tropical pur. Mais elles peuvent être aussi légèrement inférieures. Ainsi, la lame d'eau écoulee à Bakel est inférieure à celles qui sont déterminées pour les stations de Kayes, Galougo, Dibia, Dakka-Saïdou,

Tableau n° 57. Bassin du Sénégal.

Valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement annuel sur la période 1951 - 1980.

Stations	Bassin- versant (km ²)	Q m ³ /s (an)	Ecart- type	C.V	q/l/s/km ²	E(mm)	V m ³ x E ^x
<u>Sénégal-Bafing</u> à							
Matam	230 000	719	251	0,35	3,13	99	2,27 E ¹⁰
* Bakel	218 000	711	256	0,36	3,26	103	2,24 E ¹⁰
* Kayes	157 400	571	199	0,35	3,63	114	1,80 E ¹⁰
* Galougo	128 400	560	197	0,35	4,36	138	1,77 E ¹⁰
* Dibia	33 500	387	126	0,33	11,5	364	1,22 E ¹⁰
* Dakka-Saïdou	15 700	266	72,1	0,27	16,9	534	8,39 E ⁹
<u>Bakoye</u> à							
* Toukoto	16 500	75,4	31,2	0,41	4,57	144	2,38 E ⁹
Oualia	84 700	154	63,0	0,41	1,82	57	4,66 E ⁹
<u>Baculé</u> à							
Siramakana	59 500	59,8	40,9	0,68	1,00	32	1,89 E ⁹
<u>Falémé</u> à							
Kidira	28 900	176	73,8	0,42	6,09	193	5,55 E ⁹
Gourbassi	17 100	152	49,4	0,33	8,89	280	4,79 E ⁹
* Fadougou	9 300	109	35,8	0,33	11,7	370	3,43 E ⁹

E(mm) = lame d'eau moyenne écoulée ;

V m³ x E^x = volume d'eau écoulée par an ;

* stations de l'analyse moyenne.

Kidira, Goubassi, Toukoto, Fadougou (tableau n° 57).

Ceci s'explique aisément par les pertes importantes dans un bassin-versant à Bakel de 218 000 km². Il s'y ajoute que ce bassin englobe en plus de vastes secteurs sahéliens où l'évaporation est très élevée et des secteurs pseudo-endoréiques.

Le déficit d'écoulement à Bakel n'est pourtant pas le plus élevé du bassin. Ainsi, on observe comme une sorte de pondération du fait de l'existence dans le Haut-Bassin de domaines à conditions favorables (guinéen et en partie Sud-soudanien).

Ainsi, on peut trouver un équilibre entre les influences sahéliennes défavorables dans l'ensemble (et qui affectent la lame d'eau écoulée, la lame d'eau précipitée) et les influences guinéennes surtout, favorables à l'écoulement et qui tendent à stabiliser les valeurs moyennes du déficit d'écoulement (E.T.R). Ce mélange des influences situe le coefficient d'écoulement à 13 % à Bakel.

Il en résulte, comme nous l'avons souligné, que le bilan annuel à Bakel reflète les conditions du Haut-Bassin et apparait comme un bilan moyen du Bassin Supérieur du Sénégal-Bafing.

Enfin, nous donnons ci-après, à titre de comparaison, les valeurs caractéristiques de l'écoulement à la station de Dagana qui n'a pas été retenue.

Tableau n° 58. Valeurs caractéristiques de l'écoulement à Dagana (1903 - 1964).

B.V km ²	\bar{Q} m ³ /s	Q l/s/km ²	Ecart- type	C.V	P (mm)	E (mm)	D.E (mm)	C.E %	V m ³	K ₃
268 000	690	2,57	157	0,23	594	81	513	14	2,17 ¹⁰	1,8

Les valeurs encadrées sont empruntées à C. ROCHETTE (1974).

Tableau n° 59. Bassin du Sénégal.

Bilan hydrologique moyen 1951 - 1980.

Bassin	Q m ³ /s	S km ²	Termes du bilan			
			P(mm)	E(mm)	D.E(mm)	C.E %
<u>Le Sénégal-Bafing</u> à						
* Matam	719	230 000	594	99	495	17
** Bakel	711	218 000	818	103	715	13
Kayes	571	157 400	1 248	114	1 134	9
* Galougo	560	128 400	1 248	138	1 110	11
Dibia	387	33 500	1 320	364	956	28
* Dakka-Saïdou	266	15 700	1 466	534	932	36
<u>Le Bakoye</u> à						
Oualia	154	84 700	1 190	57	1 133	5
Toukoto	75,4	16 500	1 190	144	1 046	12
<u>Le Baoulé</u> à						
Siramakana	59,8	59 500	780	32	748	4
<u>La Falémé</u> à						
Kidira	176	28 900	1 023	193	830	19
Gourbassi	152	17 100	1 023	280	743	27
* Fadougou	109	9 300	1 132	370	762	33

* stations retenues pour les bilans des domaines climatiques ;

** station retenue pour le bilan du Haut-Bassin.

On observe une légère diminution du module par rapport à la station de Matam (environ 6 %) et environ 5 % par rapport à la station de Bakel. L'abondance spécifique se réduit à Dagana à $2,57 \text{ l/s/km}^2$, soit $0,56 \text{ l/s/km}^2$ en moins par rapport à Matam et $0,69 \text{ l/s/km}^2$ par rapport à la station de Bakel, alors que le bassin-versant entre Matam et Dagana s'agrandit de $38\ 000 \text{ km}^2$, et de $50\ 000 \text{ km}^2$ par rapport au bassin-versant contrôlé à Bakel.

La lame d'eau écoulée à Dagana est inférieure de 18 mm par rapport à Matam et de 22 mm par rapport à Bakel. Si le déficit d'écoulement s'élève légèrement par rapport à Matam (513 mm contre 495 mm pour Matam), ce déficit est moins élevé par rapport à Bakel (513 mm contre 715 mm pour Bakel). Le C.E (14 %) est plus important qu'à Bakel (13 %) mais il est moins élevé que celui de Matam (17 %).

L'irrégularité interannuelle $K_3 = 1,8$ est la moins importante du bassin.

On observe ainsi que les valeurs respectives de l'écoulement moyen à Dagana exprime surtout une stabilité due à l'intervention des influences sahéliennes : évaporation, infiltration ...

Néanmoins, les facteurs sahéliens défavorables ne réduisent nullement l'écoulement moyen de façon importante en raison des conditions du Haut-Bassin. Il faut noter cependant le rôle de soutien des débits exercé par les nappes souterraines du Cours Inférieur.

Ainsi, en domaine sahélien, à Matam et à Dagana, le Sénégal-Bafing réalise encore les conditions de son bassin-versant, ce qui est évidemment logique pour un bassin allogène.

Mais les bilans moyens de l'écoulement dans le Bassin du Sénégal-Bafing amènent aussi à certaines constatations et réflexions qui constituent pour nous la conclusion sur les bilans (tableau n°59).

Elles concernent :

Tableau n°60. Bassin du Sénégal.

Modules fréquentiels (m³/s) 1951 - 1980.

Stations	Période sèche				\bar{Q}	MED	Période humide				K ₃
	1/100 ans	1/50 ans	1/10 ans	1/5 ans			1/5 ans	1/10 ans	1/50 ans	1/100 ans	
	F = 0,01	F = 0,02	F = 0,1	F = 0,2			F = 0,5	F = 0,8	F = 0,9	F = 0,98	
am	135	205	398	509	719	744	930	1 041	1 234	1 304	2,6
el	114	186	383	496	711	718	927	1 039	1 237	1 309	2,7
res	107	163	316	404	571	565	738	826	980	1 035	2,6
ougo	101	157	308	395	560	535	726	813	964	1 019	2,6
ia	92	127	225	280	387	388	493	548	646	681	2,4
ka-Saïdou	98	118	174	205	266	263	326	358	414	434	2,1
koto	3	11	35	49	75	66	102	115	139	148	3,3
lia	7	25	73	101	154	149	207	234	283	300	3,2
amakana	-	-	8	26	60	69	94	112	144	155	14,0
lira	4	25	82	114	176	167	238	271	328	348	3,3
rbassi	37	51	89	110	152	148	194	215	253	267	2,4
ougou	26	36	63	79	109	107	139	155	183	193	2,5

La lame d'eau précipitée : elle diminue du Sud du bassin vers le Nord, donc de l'amont vers l'aval. Cette évolution est conforme à l'évolution de la pluie dans le bassin.

Il est aussi logique que les modules bruts s'accroissent d'amont en aval (au moins jusqu'à Matam) alors que les modules spécifiques diminuent fortement de l'amont vers l'aval.

L'augmentation des modules bruts est fonction de deux faits : l'accroissement de la superficie du bassin récepteur et aussi le tracé du réseau hydrographique qui fait que les affluents principaux naissent en domaine guinéen comme le bras principal et longent longtemps ce réseau avant de confluer.

La diminution du module spécifique est conforme aussi à l'augmentation de la superficie des bassins contrôlés. Il traduit la lame d'eau moyenne écoulée qui diminue elle aussi en raison de pertes considérables d'amont en aval (évapotranspiration, infiltration ...). Les différents apports des affluents ne compensent guère suffisamment les pertes, d'autant plus que la lame d'eau précipitée diminue d'amont vers l'aval aussi.

Ces deux paramètres $P(\text{mm})$ et $E(\text{mm})$ traduisent par leur différence un déficit d'écoulement $D.E(\text{mm})$ qui augmente de l'amont vers l'aval pour atteindre sa valeur maximale à Kayes (1 134 mm). Mais ici, les chutes de Gouina et de Félou, la zone marécageuse dans laquelle se situe la station, les secteurs pseudo-endoréiques du bassin-versant et les pentes plus faibles sont à prendre aussi en compte pour expliquer l'E.T.R qui présente une valeur de 91 % à Kayes.

Il nous faut noter aussi que dans les zones soudaniennes et sahéliennes, le bassin peut aussi présenter des zones à infiltration, même si l'ensemble du Haut-Bassin est à considérer comme imperméable.

— Mais le D.E est partout et toujours inférieur à l'E.T.P. estimée dans les domaines climatiques, ce qui montre que l'E.T.R. somme toute n'est pas optimale.

Tableau n° 61. Bassin du Sénégal.

Valeurs caractéristiques moyennes annuelles.
Valeurs extrêmes de 1951 - 1980 en m³/s.

Stations	Maximum maximorum			Durée de retour (ans)	Minimum minimorum			Durée de retour (ans)	I.V	R
	Q m ³ /s	l/s/km ²	An		Q m ³ /s	l/s/km ²	An			
Matam	1 086	4,72	1955	14	282	1,23	1972	24	804	3,9
Bakel	1 068	4,90	1954	12	263	1,21	1972	25	805	4,1
Kayes	890	5,65	1954	18	239	1,52	1977	21	651	3,7
Galougo	862	6,71	1958	17	243	1,89	1979	19	619	3,5
Dibia	580	17,3	1957	16	179	5,34	1979	20	401	3,2
D. Saïdou	396	25,2	1957	28	155	9,87	1979	16	241	2,6
Toukoto	138	8,36	1954	44	17	1,03	1972	33	121	8,1
Qualia	262	3,09	1958	23	29	0,34	1973	42	233	9,0
Kidira	274	9,48	1955	11	60	2,08	1979	18	214	4,6
Gourbassi	225	13,2	1954	6	67	3,92	1968	23	158	3,4
Fadougou	199	21,4	1954	161	48	5,16	1968	23	151	4,1
Sira-makana	139	2,34	1958	38	0	-	1972-1979	14	139	-

$$\text{Durée de retour des modules extrêmes} = T = \frac{1}{1-F}$$

F = la fréquence

T est calculée pour la période humide.

Le coefficient d'écoulement C.E est un paramètre qui pour nous présente le plus d'intérêt.

Il se déduit de la lame d'eau écoulee (fonction du module et de la superficie du bassin) et de la lame d'eau précipitée. Dans un domaine à alimentation exclusivement pluviale et où la pluie est le facteur de différenciation des climats, le C.E apparait comme une caractéristique des régimes du bassin.

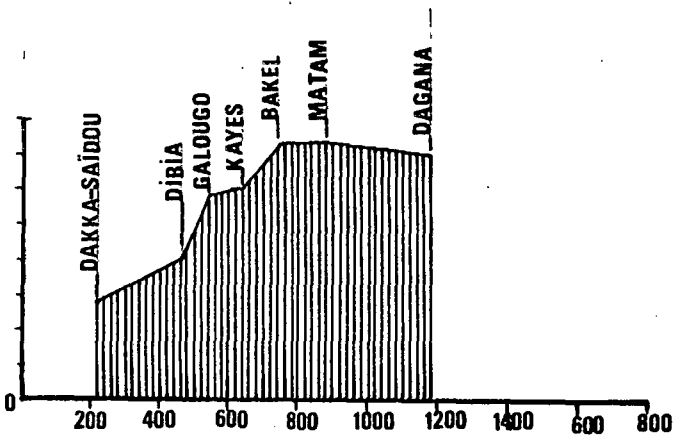
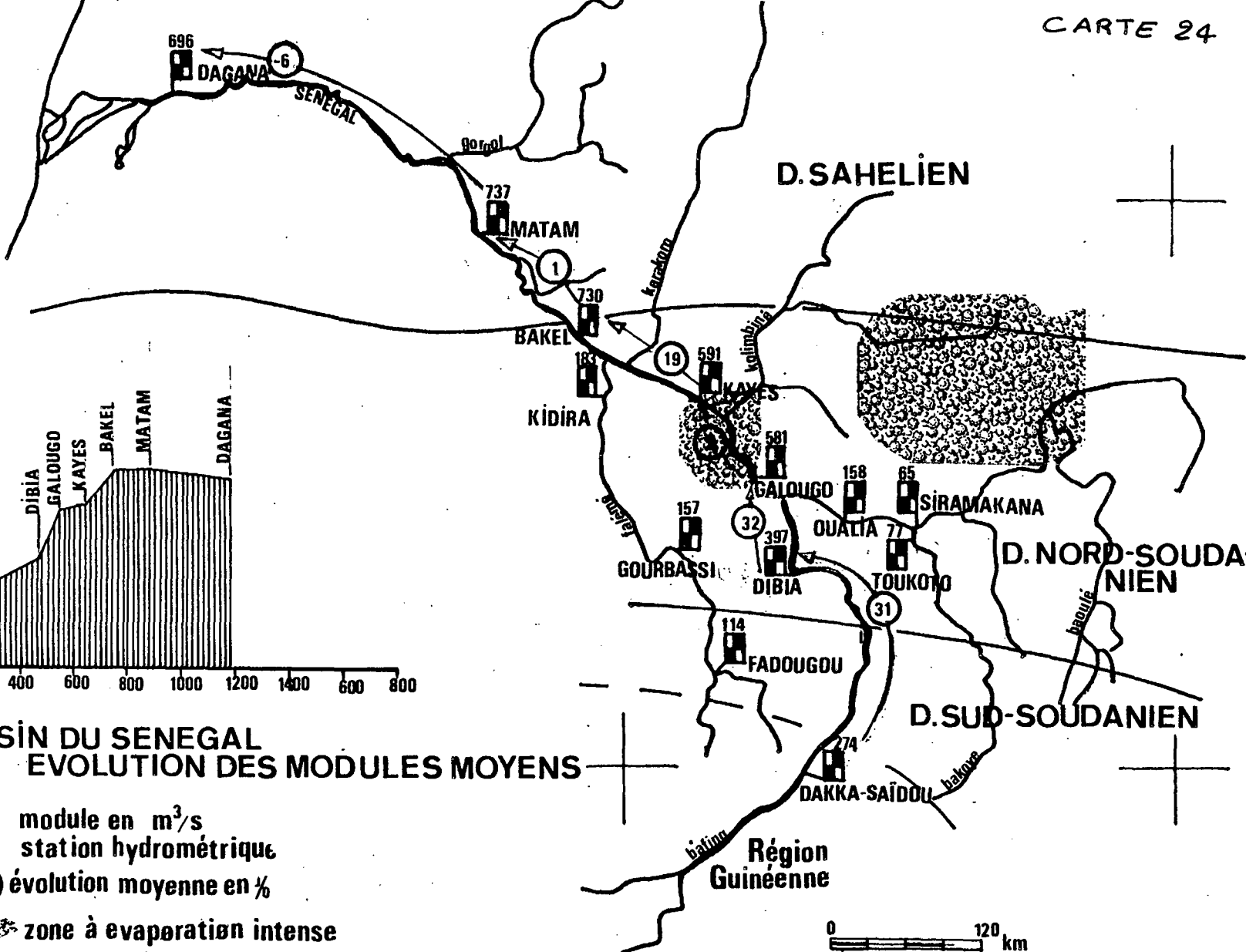
Cependant, le C.E est néanmoins un paramètre aléatoire. Non pas parce qu'il fait intervenir un paramètre aléatoire, la pluie, mais aussi parce qu'il néglige la nature et l'aptitude des bassins à un écoulement rapide pour ne retenir en fait que la pluie.

Malgré tout, sa diminution de l'amont vers l'aval jusqu'à Kayes montre qu'il exprime bien les régimes hydrologiques et leurs variantes.

Pour terminer, l'étude des bilans montre que si climatiquement on retient le domaine sahélien, le domaine Nord-soudanien, le domaine Sud-soudanien, dernier domaine dans lequel se situe la région guinéenne, hydrologiquement du fait des facteurs spécifiques tels que la lithologie, la végétation, les pentes qui influent sur l'écoulement, on ne peut retenir que trois grands domaines : le domaine sahélien, le domaine tropical pur et le domaine tropical de transition.

Le domaine tropical de transition (ou guinéen) est constitué par le domaine climatique Sud-soudanien et la région guinéenne.

Cependant, les développements qui vont suivre nous permettent de mieux préciser nos propos.



BASSIN DU SENEGAL
EVOLUTION DES MODULES MOYENS

- module en m³/s
station hydrométrique
- évolution moyenne en %
- zone à évaporation intense



B/ LES VARIATIONS DE L'ABONDANCE MOYENNE ANNUELLE DU SENEGAL-BAFING

La variabilité de l'abondance moyenne annuelle dans le bassin du Sénégal-Bafing sera étudiée à l'appui de la série de référence 1903 - 1980 (78 ans). Les valeurs caractéristiques - les modules bruts, les modules spécifiques et fréquentiels - de même que les volumes totaux écoulés (les disponibilités en eau de surface) sont données dans le tableau n° 62.

Nous donnons aussi les différents coefficients d'irrégularité C.V, K_3 et R ainsi que l'intervalle de variation I.V.

1. L'abondance moyenne annuelle

Elle est aussi étudiée au niveau des stations de base installées sur le bras principal. Il s'agit de Dakka-Saïdou, Dibia, Galougo, Kayes, Bakel et Matam. Cependant, nous donnons aussi le module à Dagana, dernière grande station du cours principal. Elle n'a pas été retenue et le module est donné pour la période 1903 - 1969.

a) Les modules bruts en m^3/s

L'abondance moyenne annuelle augmente de l'amont vers l'aval conformément à l'accroissement de la superficie du bassin.

La carte n° 24 représente le tracé des cours d'eau et les stations du bassin retenues.

Elle permet de mesurer l'augmentation des modules bruts vers l'aval et d'estimer sommairement les apports à chaque station.

Ainsi, à Dakka-Saïdou, le module brut est de $274 m^3/s$. Il passe à $397 m^3/s$ à Dibia, ce qui correspond à une augmentation moyenne de 31 %. Entre Dibia et Galougo, la confluence avec le Bakoye (gros par le Baoulé) se réalise à Bafoulabé. Des affluents non moins importants (Balé n° 2) grossissent le Sénégal-Bafing et font que le module passe à $581 m^3/s$ à Galougo, soit un apport total de 32 % environ entre Dibia et Galougo. Par rapport à Dakka-Saïdou, la première station, le module a été multiplié par 2,12 environ.

Tableau n° 62. Bassin du Sénégal.

Valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement annuel
(1903 - 1980).

Stations	Bassin- versant (km ²)	Q m ³ /s	Ecart- type	C.V	Q l/s/km ²	V m ³ x E ^x
<u>Le Sénégal-Bafing</u> à						
Matam	230 000	737	259	0,4	3,20	2,32 E ¹⁰
Bakel	218 000	730	255	0,3	3,35	2,30 E ¹⁰
Kayes	157 400	591	193	0,3	3,76	1,86 E ¹⁰
Galougo	128 400	581	184	0,3	4,52	1,83 E ¹⁰
Dibia	33 500	397	119	0,3	11,8	1,25 E ¹⁰
D. Safidou	15 700	274	65,4	0,2	17,4	8,63 E ⁹
<u>Le Bakoye</u> à						
Toukoto	16 500	77,0	27,1	0,4	4,67	2,43 E ⁹
Oualia	84 700	158	56,6	0,4	1,86	4,98 E ⁹
<u>Le Baoulé</u> à						
Siramakana	59 500	65,0	37,3	0,6	1,09	2,04 E ⁹
<u>La Falémé</u> à						
Kidira	28 900	183	72,4	0,4	6,32	5,76 E ⁹
Gourbassi	17 100	157	48,7	0,3	9,16	4,94 E ⁹
Fadougou	9 300	114	35,2	0,3	12,2	3,56 E ⁹

Entre Galougo et Kayes, l'augmentation du débit est faible. Ces deux stations ne sont pas distantes. Le seul affluent dans ce secteur est le Kolimbiné venu du domaine sahélien et les apports restent faibles. L'écoulement dans une zone marécageuse, les chutes de Gouina et de Félou, la faiblesse relative des pentes créent une zone à évaporation intense (carte n°24) Ainsi, l'augmentation du module entre Galougo et Kayes reste faible : environ 2 %. Le module à Kayes est de $591 \text{ m}^3/\text{s}$.

En aval de Kayes, le Sénégal-Bafing reçoit le Karakoro, autre affluent sahélien, mais surtout la Falémé, un des principaux affluents nés sur les contreforts du Fouta-Djalou. Cet affluent roule à Kidira un module de $183 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le module entre Kayes et Bakel passe de $591 \text{ m}^3/\text{s}$ à $730 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à une augmentation de 19 % environ.

En aval de Bakel, le Sénégal-Bafing entre dans le Cours Inférieur qui se déroule entièrement en milieu sahélien à pluviométrie la plus faible du bassin : l'artère principale n'y reçoit pratiquement pas d'affluents importants sinon des oueds sahéliens tels que le Niorde, l'oued Savalel. La vallée du fleuve s'élargit en même temps que la pente moyenne s'affaiblit davantage. Néanmoins, le module à Matam est légèrement supérieur à celui de Bakel. Il est de $737 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 1 % environ d'augmentation.

Ainsi, entre Dakka-Saïdou et Matam, le module a été multiplié par 2,69 environ.

A Dagana, le module n'est plus que de $696 \text{ m}^3/\text{s}$ (moyenne 1903 - 1969), soit une diminution de $41 \text{ m}^3/\text{s}$ (6 % environ). Cette diminution est somme toute faible et dénote surtout une stabilité de l'abondance moyenne dans un bassin allogène (voir les bilans).

Cependant, la variabilité de l'abondance peut aussi se mesurer à travers les modules spécifiques qui tiennent compte des nuances géographiques.

Tableau n° 63 Bassin du Sénégal.
Modules fréquentiels (m³/s) 1903 - 1980.

Stations	Période sèche				Q	Med	Période humide				K ₃
	1/100 ans	1/50 ans	1/10 ans	1/5 ans			1/5 ans	1/10 ans	1/50 ans	1/100 ans	
	F = 0,01	F = 0,02	F = 0,1	F = 0,2			F = 0,5	F = 0,8	F = 0,90	F = 0,98	
Matam	134	207	406	519	737	733	954	1 068	1 267	1 339	2,6
Bakel	137	208	404	516	730	737	944	1 056	1 252	1 323	2,6
Kayes	142	196	344	429	591	593	753	838	986	1 040	2,4
Galougo	152	203	345	426	581	573	736	817	958	1 010	2,4
Dibia	120	154	245	297	397	403	496	549	640	673	2,2
D. Saïdou	122	140	190	219	274	269	329	358	408	426	1,9
Toukoto	14	21	42	54	77	76	100	112	133	140	2,7
Qualia	26	42	85	110	158	164	205	230	274	290	2,7
Siramakana	-	-	17	33	65	65	96	112	141	151	6,6
Kidira	14	34	90	122	182	184	243	275	331	351	3,0
Gourbassi	43	57	94	116	156	196	197	219	256	270	2,3
Fadougou	32	41	68	84	113	113	143	158	186	195	2,3

$$K_3 = \frac{Q F : 0,90}{Q F : 0,10}$$

b) Les modules spécifiques en l/s/km²

Ils varient de 17,4 l/s/km² à Dakka-Saïdou à 2,59 l/s/km² à Dagana. Ils diminuent ainsi de l'amont à l'aval, tenant ainsi compte de l'importance des bassins contrôlés par les stations retenues. (Tableau N° 64)

De 17,4 l/s/km² à Dakka-Saïdou, le module spécifique passe à 11,8 à Dibia. A Galougo, il n'est plus que de 4,52 l/s/km². Il ne dépasse plus 4 l/s/km² entre Kayes et Matam. A Dagana, il n'est plus que de 2,59 l/s/km². Le module spécifique est ainsi " honorable " de la source à Dibia et reste " faible " pour le reste (1).

Il faut souligner néanmoins que la prise en compte des secteurs pseudo-endoréfiques à partir de Kayes dans le bassin-versant réduit l'intérêt du module spécifique. Ces secteurs ne connaissent pratiquement pas d'écoulement et sont compris dans le bassin-versant.

2. La variabilité interannuelle de l'abondance

Elle peut être perçue à travers le coefficient de variation annuel C.V (tableau n° 62) mais également par les modules fréquentiels et notamment par le coefficient d'irrégularité K_3 (tableau n° 63). On peut adjoindre à ces paramètres l'intervalle de variation I.V qui est la différence entre les modules extrêmes de la période, et le coefficient R qui en est le rapport (tableau n° 65).

Dans le tableau n° 62, nous donnons les coefficients de variation annuelle. Les C.V restent faibles à l'échelle annuelle et sont tous situés entre 0,2

(1) On distingue plusieurs classes de valeurs-types des modules spécifiques en milieu chaud et humide :

- plus de 100 l/s/km² : valeurs énormes ;
- entre 35 et 100 l/s/km² : valeurs très élevées ;
- entre 10 - 15 et 30 - 35 l/s/km² : valeurs honorables ;
- inférieure à 5 l/s/km² : valeurs faibles.

Tableau n° 64. Bassin du Sénégal. Débits annuels fréquentsiels (l / s / km²)
1903 - 1980.

Stations	F = 0,001	F = 0,01	F = 0,02	F = 0,10	F = 0,5	F = 0,90	F = 0,98	F = 0,99	F = 0,999
Matam	/	0,59	0,90	1,76	3,20	4,64	5,51	5,81	7,59
Bakel	/	0,63	0,96	1,86	3,35	4,84	5,74	6,07	7,90
Kayes	/	0,90	1,26	2,19	3,76	5,32	6,27	6,61	8,53
Galougo	/	1,18	1,58	2,69	4,52	6,36	7,46	7,87	10,1
Oualia	/	0,31	0,50	1,01	1,86	2,72	3,23	3,41	4,46
Dibia	/	3,59	4,58	7,31	11,8	16,4	19,1	20,1	25,7
D. Saïdou	1,21	7,78	8,91	12,1	17,4	22,8	25,9	27,1	33,7
Kidira	/	0,50	1,18	3,11	6,32	9,53	11,4	12,1	16,1
Gourbassi	/	2,55	3,32	5,51	9,16	12,8	14,9	15,8	20,3
Fadougou	/	3,43	4,45	1,36	12,2	17,0	19,9	20,9	26,9
Toukoto	/	0,83	1,29	2,56	4,67	6,77	8,04	8,50	11,1
Sirama	/	/	/	0,28	1,09	1,89	2,36	2,54	3,53

et 0,4. Le coefficient le plus faible revient à Dakka-Saïdou (0,2). La station de Matam a un coefficient de variation de 0,4. Malgré tout, dans l'ensemble, même si la dispersion des valeurs moyennes annuelles autour de la moyenne ainsi mesurée augmente du Sud au Nord du bassin, les C.V restent faibles. C'est du reste ce qui justifie le choix de la loi normale de distribution des modules.

3. Les modules fréquentiels en m³/s

Ils sont donnés dans le tableau n° 63 pour des probabilités d'apparition correspondant à des durées de retour de 5 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans en période humide et en période sèche.

On observe que ces modules fréquentiels ne s'annulent jamais sauf pour la station de Siramakana qui est sur un affluent du Sénégal-Bafing : le Baoulé.

Cependant, le module centennal peut être très faible en période sèche. Pour la même période de retour de 10 ans, partout le module en période humide représente plus du double du module de la même durée d'apparition en période sèche.

Cela témoigne de l'irrégularité des modules que nous mesurons par l'index K_3 . L'index le plus faible revient à Dakka-Saïdou (1,9) et passe à 2,2 à Dibia, à 2,4 à Galougo et à Kayes. Il est de 2,6 à Bakel et à Matam.

L'irrégularité augmente de l'amont vers l'aval comme le coefficient de variation. Cette variabilité spatiale se complète par une variabilité temporelle aussi qui peut se mesurer par les années de retour de ces valeurs extrêmes sur la période 1903 - 1980.

Les maximum maximorum peuvent être très élevés : Matam 1 394 m³/s en 1936 ; Bakel 1 247 m³/s ... (tableau n° 65). Les valeurs extrêmes déterminent un intervalle de variation important. Le coefficient R d'irrégularité est partout élevé et traduit une grande irrégularité de l'abondance moyenne annuelle (R est pondéré pour les valeurs voisines de 2).

Tableau n° 65. Bassin du Sénégal.

Valeurs caractéristiques moyennes annuelles.

Modules extrêmes de 1903 à 1980.

Stations	Maximum maximorum			Durée de retour (ans)	Minimum minimorum			Durée de retour (ans)	I.V	R
	m^3/s	$l/s/km^2$	An		m^3/s	$l/s/km^2$	An			
Matam	1 394	5,50	1936	182	282	1,23	1972-1973	26	984	4,9
Bakel	1 247	5,72	1924	47	263	1,21	1972	30	984	4,7
Kayes	978	6,21	1924	45	209	1,33	1913	42	768	4,7
Galougo	969	7,55	1924	57	238	1,85	1913	32	731	4,1
Dibia	654	19,5	1924	67	175	5,22	1913	32	478	3,7
D. Saïdou	419	26,7	1924	76	155	9,87	1979	29	264	2,7
Toukoto	138	8,36	1954	82	17	1,03	1972	74	121	8,1
Oualia	268	3,16	1924	39	29	0,34	1973	89	239	9,2
Kidira	338	11,7	1935	63	32	1,11	1913	53	305	10,6
Gourbassi	264	15,4	1935	74	51	2,98	1913	67	213	5,2
Fadougou	199	20,9	1954	122	38	4,09	1913	63	160	5,1
Sira-makana	144	2,42	1924	60	0	0	1972-1979	24	144	-

I.V = intervalle de variation = $Q_{maxi} - Q_{mini}$ en m^3/s ;

R = coefficient d'immodération = $\frac{Q_{maxi}}{Q_{mini}}$.

Partout dans le bassin, les valeurs extrêmes sèches reviennent plus rapidement que les valeurs extrêmes humides.

Par exemple, le minimum minimorum à Matam reviendrait tous les 26 ans alors que le maximum, lui, reviendrait tous les 182 ans.

Cette variabilité temporelle peut être perçue par la figure n° de l'évolution interannuelle des modules à Bakel. Cette station est choisie en raison de sa situation géographique.

La figure n° 40 révèle une évolution très irrégulière. Elle présente deux grandes phases humides entrecoupées de trois périodes sèches.

Entre 1903 et 1910, l'évolution est supranormale à l'exception de l'année 1907.

De 1910 à 1917, l'évolution est infranormale.

De 1918 à 1938, l'évolution reste irrégulière mais surtout supranormale.

Le maximum maximorum est enregistré en 1924 : $1\ 247\ m^3/s$.

De 1939 à 1949, à l'exception de l'année 1946, l'évolution redevient infranormale.

De 1950 à 1967, c'est une période humide supranormale à l'exception des années 1953 et 1960.

Depuis 1968, l'évolution est infranormale à l'exception des années 1969 et 1974 qui restent " normales ".

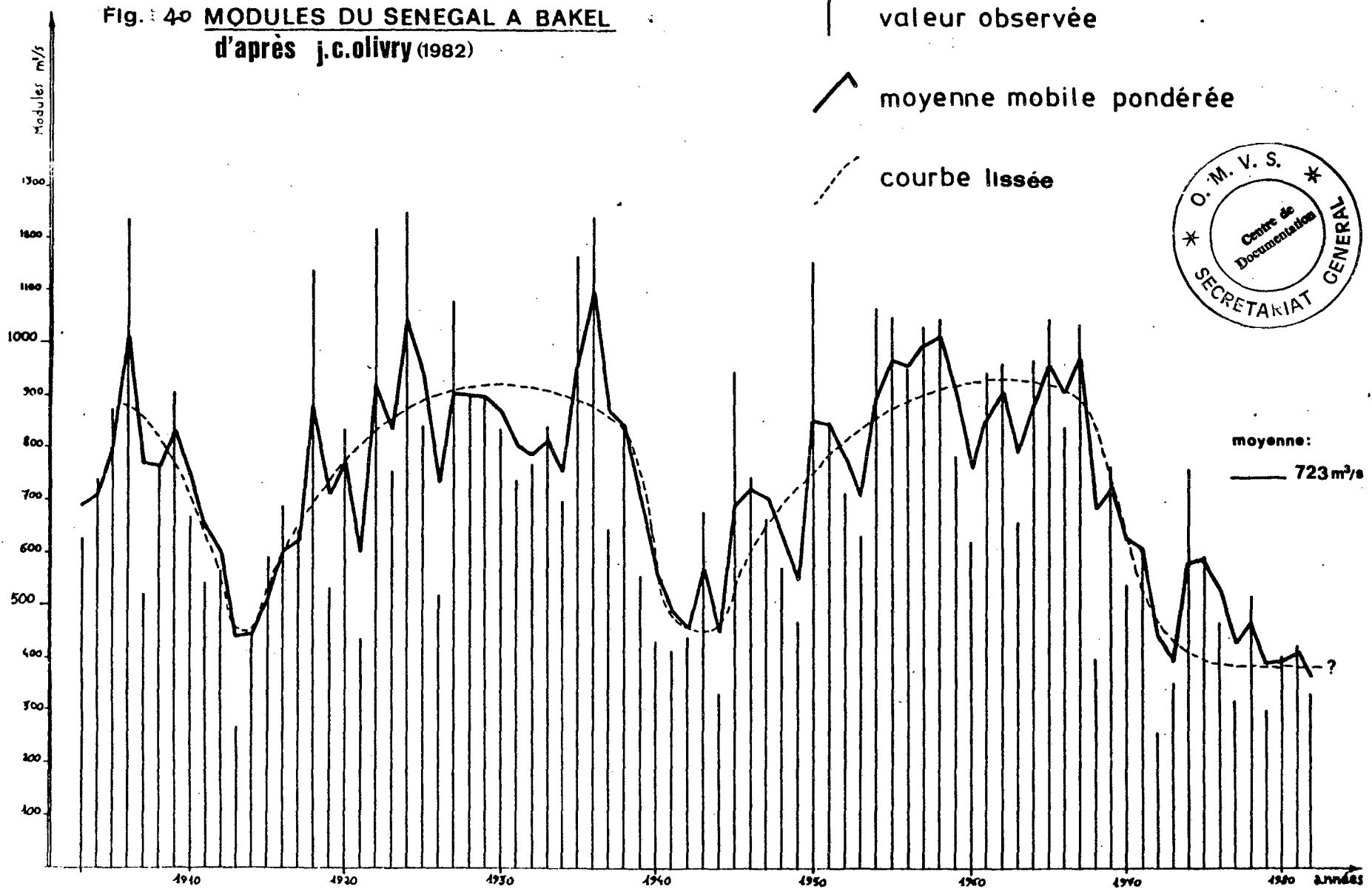
L'examen de la courbe lissée des moyennes mobiles pondérées que nous empruntons à J.C OLIVRY (1982) fait ressortir les mêmes variations et présente les trois épisodes secs : les années 1910, 1940 et 1970 assimilables à des périodes de sécheresse (Fig. n° 40).

*

* *

L'analyse à l'appui de la série de référence 1903 - 1980 au niveau des stations du Sénégal-Bafing permet de retenir la grande caractéristique suivante

Fig. 40 MODULES DU SENEGAL A BAKEL
d'après j.c.olivry (1982)



de l'écoulement moyen annuel : la variabilité interannuelle des modules, variabilité temporelle et spatiale. Cette caractéristique augmente de l'amont vers l'aval et évolue ainsi dans le même sens que l'abondance pluviométrique.

Ceci n'est guère surprenant dans un domaine d'alimentation fluviale essentiellement pluviale. Du reste, les phases de sécheresse pluviométrique se retrouvent dans l'évolution de l'abondance moyenne annuelle.

Ainsi, les sécheresses pluviométriques et les sécheresses hydrologiques procèdent surtout des relations pluies et débits.

CHAPITRE IV

LE REGIME PLUVIAL TROPICAL ET SES
NUANCES DANS LE BASSIN DU SENEGAL

Le bassin du Sénégal-Bafing est situé dans la zone tropicale boréale. Seulement, cette zone connaît une grande diversité climatique. Ainsi 4 domaines et régions climatiques sont définis pour le Bassin du Sénégal-Bafing, respectivement du Nord au Sud : sahélien, Nord-soudanien, Sud-soudanien et la Région guinéenne (chapitre VI, carte n° 9).

L'analyse des bilans hydrologiques moyens annuels et les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen annuel montrent qu'il n'y a pas conformité totale entre domaines climatiques et domaines hydrologiques.

Les divers facteurs déterminants de l'écoulement moyen et leurs influences diverses ne permettent de retenir que trois grands domaines hydrologiques du Nord au Sud :

- le domaine sahélien ;
- le domaine soudanien (tropical pur) ;
- le domaine guinéen (tropical de transition).

Cependant, comme le montre R. FRECAUT (1974 et 1982), le seul mode d'alimentation pluviale, dans la zone tropicale, et la diversité climatique engendrent une telle variabilité à des degrés divers que le rôle des précipitations est décisif pour expliquer les modalités de l'écoulement fluvial.

En outre, les influences des autres facteurs font qu'à chaque domaine climatique coïncide un régime fluvial qui est en fait une nuance du régime pluvial tropical. Ces nuances sont aussi diverses que les domaines climatiques et font que l'on parle des régimes fluviaux tropicaux.

Pour le Bassin du Sénégal-Bafing, il s'agit essentiellement des nuances ou régimes fluviaux tropicaux guinéen, soudanien et sahélien.

Nous n'étudions pas le régime sahélien faute de données, mais la situation de la station de Bakel, qui réalise une sorte de synthèse de l'écoulement de ces trois domaines hydrologiques, nous suggère d'étudier d'abord :

- le régime pluvial tropical du Sénégal-Bafing à Bakel ;
- le régime pluvial tropical guinéen et
- le régime pluvial tropical soudanien.

Tableau n° 66 Régime du Sénégal-Bafing à Bakel

B.V = 218.000km² Altitude moyenne du bassin : 672,5m alt. de la station : 11,59m IGN

Lat. : 14°54'N Long. : 12°27'W Climats du B.V : sahelien , soudanien , guinéen

Végétation : savane boisée - savane pure - savane à épineux

	Année moyenne 1903 - 1980						Année extrême humide 1924			Année extrême sèche 1972		
	Q	q	C.M.D	C.V	K3	R	Q	FR	C.M.D	Q	FR	C.M.D
Mai	8,54	0,04	0,01	0,6	7,5	94,1	10,0	1/3	0,01	0,97	1/16	0,001
Juin	98,7	0,45	0,1	0,7	15,5	1000	144	1/4	0,2	43,0	1/5	0,1
Juillet	559	2,56	0,8	0,4	3,3	6,6	1385	?	-1,9	291	1/8	0,4
Août	2220	10,2	3,0	0,4	3,4	8,3	3973	1/30	5,4	795	1/15	1,1
Septembre	3218	14,8	4,4	0,4	3,2	6,3	5300	1/18	7,3	1060	1/19	1,5
Octobre	1576	7,23	2,2	0,5	4,2	7,5	2463	1/8	3,4	499	1/13	0,7
Novembre	543	2,49	0,7	0,4	3,4	8,1	796	1/7	-1,1	218	1/13	0,3
Décembre	238	1,09	0,3	0,4	2,8	7,6	384	1/21	10,5	106	1/16	0,1
Janvier	131	0,60	0,2	0,4	2,7	7,8	210	1/20	0,3	54,2	1/18	0,1
Février	76,4	0,35	0,1	0,4	3,0	11,7	125	1/19	0,2	27,0	1/21	0,04
Mars	41,5	0,19	0,06	0,5	3,6	25,0	70,0	1/6	0,1	9,24	1/24	0,01
Avril	17,5	0,08	0,02	0,6	6,0	46,7	32,0	1/14	0,04	1,83	1/18	0,02
ANNEE	730	3,35	-	0,3	2,6	4,7	1247	-1/47	-	263	1/30	-

R* : 440

Q : m³/s; -q : l/s/km²; -C.M.D : Coefficient mensuel de débit; -C.V : Coefficient de variation;
 K3 : index d'irrégularité; -R : coefficient d'irrégularité; -FR : Fréquence relative en période humide;
 R* : coefficient d'immodération annuel

A/ LE REGIME PLUVIAL TROPICAL DU SENEGAL-BAFING A BAKEL

Comme pour les bilans hydrologiques, la station de Bakel réalise une sorte de régime tropical " moyen " pour le bassin (carte n° 21).

1. Le régime moyen

La courbe des variations intermensuelles traduit un régime simple, classique, qui consacre un maximum de septembre et un minimum qui intervient en mai (tableau n° 66, fig. n° 41).

Ces variations traduisent ainsi une période de montée des eaux appelée période de hautes eaux ou de crue annuelle, et une période de descente des eaux appelée période des basses eaux ou étiage (Fig. n° 41).

La montée des débits moyens mensuels se fait de mai à septembre, soit en 4 mois. Entre mai et juin, l'augmentation moyenne est de 30 % ; entre juin et juillet, elle est de 14 % ; 52 % entre juillet et août et enfin 31 % entre août et septembre (tableau n° 66).

La descente à partir de septembre se réalise durant le reste de l'année, soit en 8 mois.

Entre septembre et octobre, on observe une chute importante du module brut de 51 %. Entre octobre et novembre, la baisse est de 32 % et entre novembre et décembre, elle est de 10 %. A partir de décembre, la baisse se stabilise relativement : 3 % entre décembre et janvier ; 2 % entre janvier et février et 1 % en moyenne de février à mai.

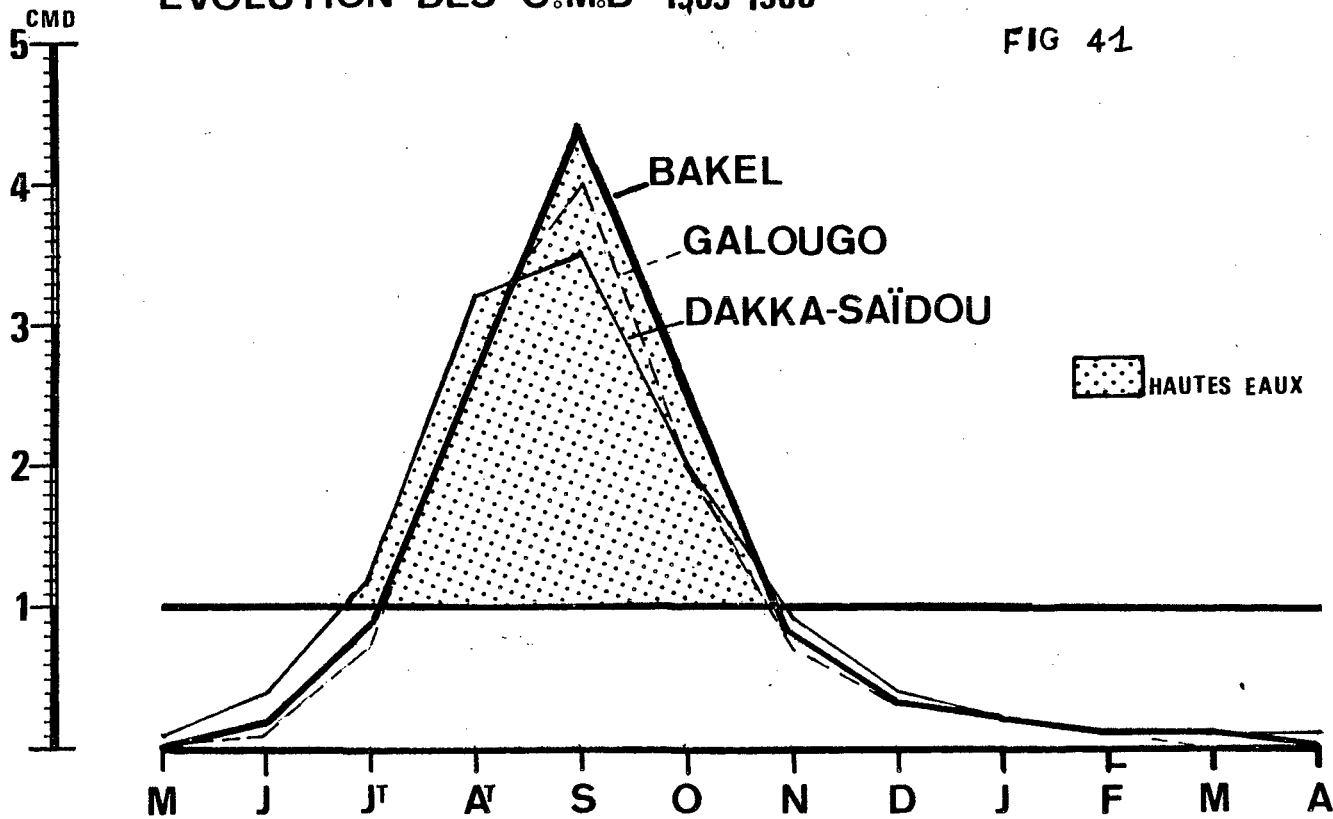
Le gonflement des eaux est nettement plus rapide que la descente. Le coefficient mensuel de débit (1) (C.M.D) illustre davantage ce régime et permet de dégager les mois des hautes eaux et ceux des basses eaux (tableau n° 66).

(1)

$$\text{C.M.D} = \frac{Q \text{ m}^3/\text{s d'un mois}}{Q \text{ m}^3/\text{s en moyenne annuelle}} \quad (\text{FIG N}^\circ 41)$$

EVOLUTION DES C.M.D 1903-1980

FIG 41



A Bakel, la période des hautes eaux (crue annuelle) dure 3 mois : août, septembre, octobre (C.M.D > 1). La période des basses eaux (C.M.D < 1) va, elle, de novembre à juillet et dure 9 mois.

Les C.M.D les plus élevés reviennent respectivement aux mois de septembre, août et octobre. Les maigres les plus prononcés se situent entre avril et mai.

Ces variations illustrent aussi les variations mensuelles de la pluviométrie en domaine tropical. Ce domaine connaît une période non pluvieuse allant du mois d'octobre au mois de juin, suivie d'une saison pluvieuse de juin à octobre. Il faut néanmoins tenir compte des variations en fonction des nuances climatiques quant à la distribution moyenne de ce régime pluviométrique (chapitre VI).

Cependant, l'augmentation des modules mensuels entre mai et juin à Bakel correspond aux premières pluies de juin/juillet. La montée la plus importante se situe entre juillet et août : 52 %. Ces deux mois sont les plus pluvieux de l'année, mois durant lesquels la mousson, vecteur d'humidité, est bien installée.

Le maximum pluviométrique se situe en août et intervient avant le maximum de la crue annuelle de septembre. Ce retard est à affecter aux délais de saturation des sols, les premières ondées servant à alimenter les réserves superficielles.

La décroissance des modules mensuels la plus importante se situe entre septembre et octobre (51 %) et est consécutive au retrait rapide de la mousson qui entraîne l'arrêt des pluies en octobre.

Le diagramme ombro-thermique de la station de Kayes, valable pour la station de Bakel (carte n° 49), montre que la période pluviométrique considérée comme humide va de juin à octobre et dure 5 mois. Ainsi, la période des hautes eaux (3 mois) est plus courte que la période pluviométrique humide. Outre la saturation des sols qui précède le ruissellement, il faut évoquer aussi les ponctions importantes de l'évapotranspiration pour expliquer la courte période des hautes eaux.

Ainsi, les variations mensuelles consacrent un maximum annuel qui, en valeur brute, peut être très important. Mais à l'inverse, le minimum annuel peut être extrêmement faible. Le rapport de ces deux valeurs annuelles extrêmes, au niveau des C.M.D relatifs, définit le coefficient R* d'immodération (1) qui atteint à Bakel en régime moyen 440, soit une grande irrégularité ou immodération.

2. La variabilité intermensuelle

Nous avons déterminé les débits fréquents mensuels en période sèche et en période humide. Nous les donnons dans le tableau n° 70 pour les durées de retour une année sur cinq, une année sur dix et pour une année sur vingt.

On observe qu'à Bakel, les modules des mois de mai et juin s'annulent en période sèche dès la fréquence 1/20 (0,05). Les débits fréquents du mois d'avril sont très faibles mais restent positifs. Dans le même tableau, nous représentons les modules mensuels fréquents des stations de Dakka-Saïdou, Galougo et Dibia appartenant à des domaines climatiques spécifiques. A titre de comparaison, on observe que les débits mensuels fréquents ne s'annulent jamais, même pour les mois à modules les plus faibles.

A Bakel, les variations extrêmes témoignent de l'intervention des influences sahéliennes.

Cependant, l'irrégularité intermensuelle est aussi exprimée par le C.V et l'index K_3 (tableau n° 66). On observe qu'une irrégularité importante caractérise les mois de basses eaux. Mais les plus importantes variations (irrégularité) affectent surtout les mois de début et de fin de la saison pluvieuse qui marquent aussi les débuts et fins " normaux " de la période des hautes eaux.

(1) Le coefficient d'immodération R ainsi défini par M. PARDE (1968) traduit ici une immodération dans le sens d'une variabilité ou d'une irrégularité annuelle. Il sera noté R*.

Ainsi, à Bakel, ce sont les mois d'avril, mai et surtout juin qui connaissent la plus grande irrégularité. Ils sont suivis du mois d'octobre. A Bakel en juin, $K_3 = 15,5$, $C.V = 0,7$; en octobre, $K_3 = 4,2$ et $C.V = 0,5$ (tableau n° 66).

Les autres mois de la période des basses eaux connaissent une moindre irrégularité, une sorte de stabilité du fait de l'absence de pluie.

Les mois de hautes eaux connaissent en revanche des variations beaucoup moins importantes et le mois de septembre est le moins irrégulier. A Bakel en septembre, $K_3 = 3,2$ et $C.V = 0,4$.

La variabilité intermensuelle peut être autrement exprimée par le coefficient R (1) d'irrégularité ou d'immodération intermensuelle. Les valeurs de R aussit témoignent de l'irrégularité des mois de la période des basses eaux. Le mois de juin reste le mois le plus irrégulier : en juin, $R = 1\ 000$; en mai, $R = 94,1$; en avril, $R = 46,7$.

3. La variabilité interannuelle

Elle peut être mesurée aussi par les débits fréquentiels annuels, l'index K_3 et le C.V annuels.

A Bakel, K_3 annuel = 2,6 ; C.V annuel = 0,3

Cependant, nous envisageons surtout l'analyse des variations mensuelles des modules des années extrêmes (Fig. n° 41). Les variations des années extrêmes traduisent surtout une modification du régime pluvial tropical (tableau n° 66).

A Bakel, l'année la plus humide de la période de 78 ans est l'année 1924

(1) Le coefficient R = le rapport des modules extrêmes d'une longue série. Il traduit ici une variabilité, une irrégularité interannuelle au niveau d'une série de modules mensuels ou annuels. Il en est de même pour K_3 et C.V. En ce sens, l'irrégularité sera notée R.

M³/S

ANNEE HUMIDE 1924-25
 \bar{Q} 1247 M³/S

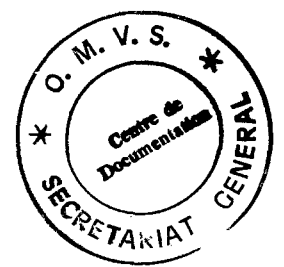
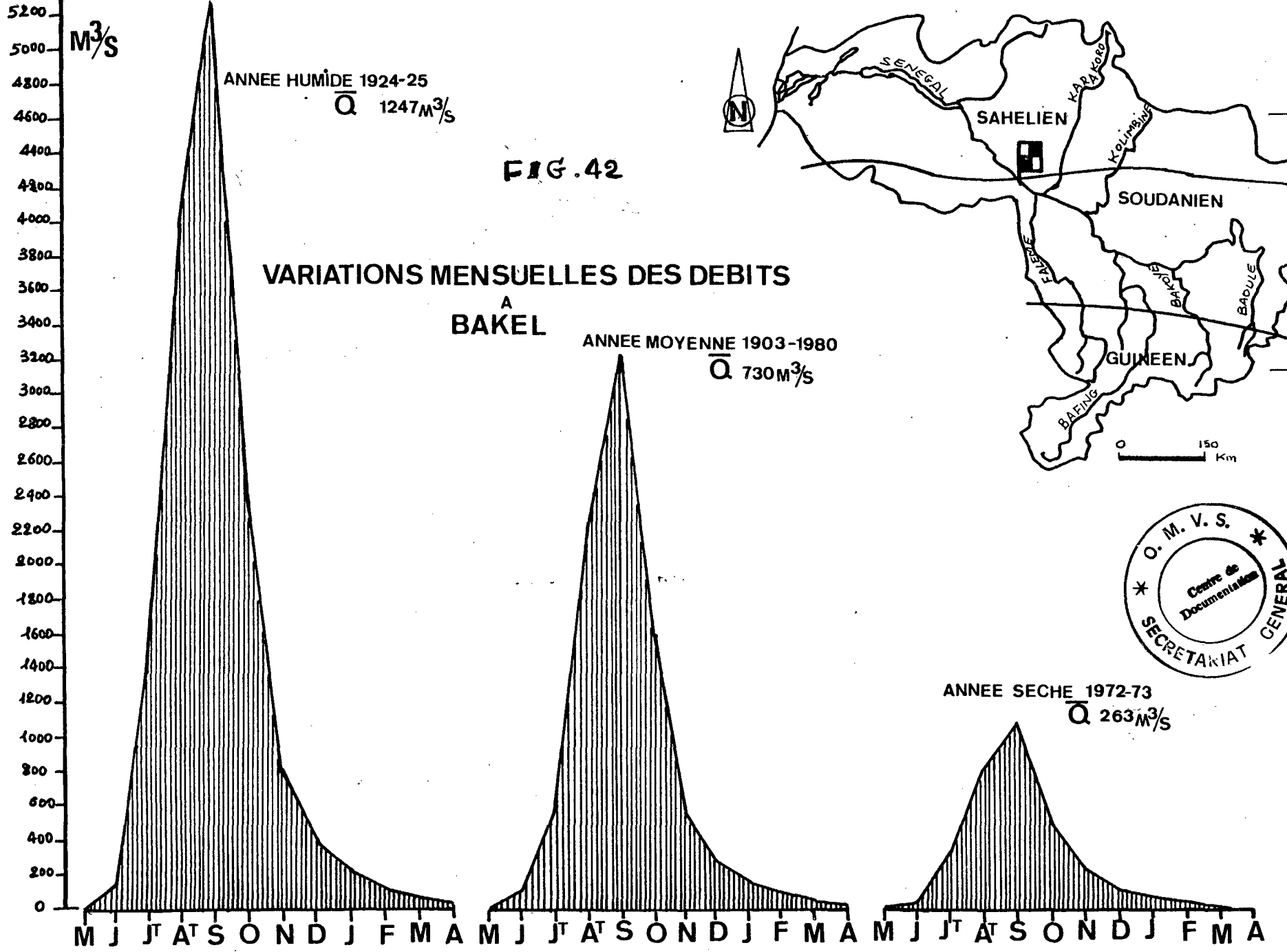
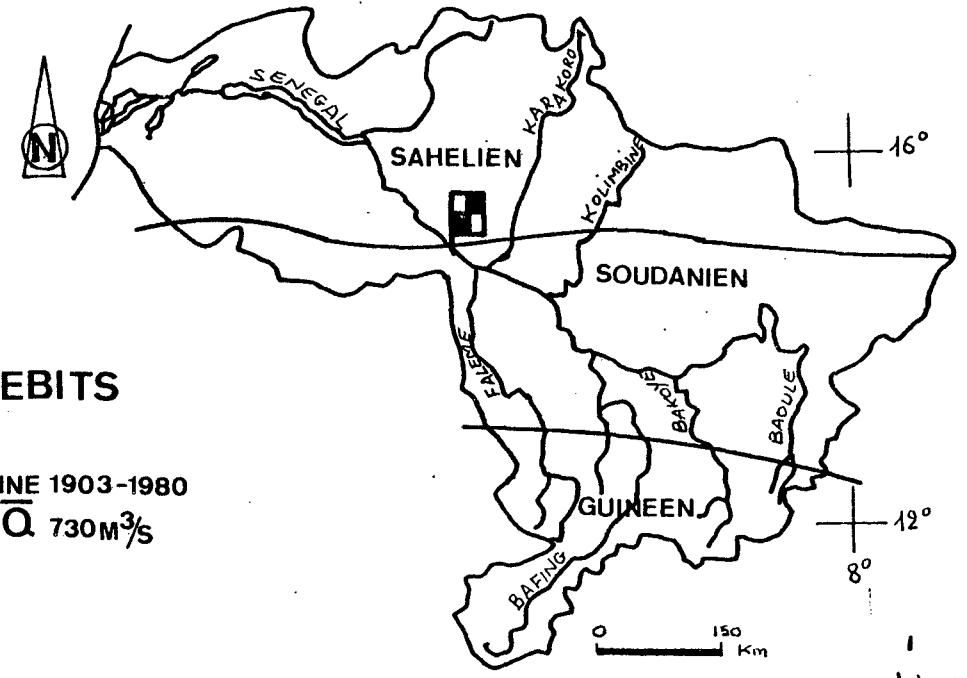
FIG. 42

VARIATIONS MENSUELLES DES DEBITS

A
BAKEL

ANNEE MOYENNE 1903-1980
 \bar{Q} 730 M³/S

ANNEE SECHE 1972-73
 \bar{Q} 263 M³/S



avec un module annuel de $1\,247\text{ m}^3/\text{s}$, soit $5,72\text{ l/s/km}^2$.

La période des hautes eaux a duré 5 mois (3 en année moyenne). Ainsi, l'année 1924 traduit une modification du régime pluvial tropical en régime pluvial guinéen. Le maximum annuel est toujours enregistré en septembre et le minimum annuel en mai. Cette année humide a une fréquence de retour en période humide de $1/47$ ans.

L'année la plus sèche de la période est l'année 1972 avec un module annuel de $263\text{ m}^3/\text{s}$, soit $1,2\text{ l/s/km}^2$.

La période de hautes eaux ne varie pas, elle dure 3 mois mais avec des modules très faibles. Le maximum annuel reste toujours de septembre et le minimum annuel avec une valeur très faible de mai.

Cette année extrême a une fréquence de retour en période humide de $1/30$ ans. L'année extrême sèche reviendrait plus rapidement que l'année humide. Le rapport des modules extrêmes R est de 4,7, ce qui traduit une grande irrégularité interannuelle. L'année 1972 traduit elle aussi une modification sensible du régime. La période de crue annuelle (2 mois) est caractéristique d'un régime sahélien.

*

* *

Les caractéristiques moyennes du régime pluvial tropical à la station de Bakel pour la période 1903 - 1980 se résument pour l'essentiel dans le tableau n° 66 et dans les profils et courbes n° 42

Ces caractéristiques traduisent un régime en conformité avec le régime des pluies. Les précipitations et l'ensemble des influences diverses dans le bassin-versant et surtout le mélange de ces influences déterminent pour le régime moyen à Bakel :

- une période de hautes eaux qui dure 3 mois (août, septembre, octobre) et une période de basses eaux qui dure 9 mois ;
- un maximum annuel⁽¹⁾ de septembre et un minimum annuel qui est situé au mois de mai ;
- ce régime est immodéré. $R^* = 440$, ce qui montre une grande irrégularité annuelle ;
- le régime moyen connaît aussi une grande variabilité interannuelle : $K_3 = 2,6$; $C.V = 0,3$ et $R = 4,7$.

Cependant, à la station de Bakel, comme nous l'avons souligné, le régime ainsi défini traduit la conjonction de toutes les influences du bassin et apparaît comme un régime tropical moyen de l'ensemble du bassin.

Les régimes particuliers à chaque domaine climatique du bassin constituent les nuances du régime tropical. Ces nuances transparaissent en comparaison avec le régime moyen à Bakel. Il s'agit de la nuance guinéenne et de la nuance soudanienne.

(1) Annuel : il s'agit de l'année hydrologique

B/ LE REGIME PLUVIAL TROPICAL GUINEEN

Le Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou

La nuance guinéenne du régime pluvial tropical sera étudiée à la station de Dakka-Saïdou (carte n° 22). Cette station est installée dans un milieu morphoclimatique particulier dont nous donnons les principaux traits dans le tableau n° 67 .

1. Le régime moyen

La courbe des variations intermensuelles à Dakka-Saïdou traduit un régime simple qui, comme à Bakel, combine une période de montée des eaux, suivie d'une période de décroissance (Fig. n° 41). La montée se fait à partir du minimum moyen annuel situé en avril et la baisse à partir du maximum situé en septembre.

Ces variations moyennes connaissent les valeurs brutes que nous donnons dans le tableau n° 67 .

Elles sont traduites aussi par les C.M.D que nous y représentons aussi.

Ces C.M.D déterminent ainsi une crue annuelle qui dure 4 mois : juillet, août, septembre et octobre (C.M.D > 1). Cette période est suivie d'une période de basses eaux (C.M.D < 1) qui dure le reste de l'année hydrologique, soit 8 mois. La montée des eaux se fait ainsi d'avril à septembre, avec les moyennes de hausses suivantes.

Entre avril et mai une faible augmentation de 1 %, augmentation qui passe à 8 % entre mai et juin. Entre juin et juillet, la hausse atteint 25 % ; elle atteint 56 % entre juillet et août et se stabilise à 9 % entre août et septembre.

La baisse quant à elle se réalise entre septembre et avril. Les valeurs moyennes de cette décroissance situent la plus forte baisse entre septembre et octobre : 42 %. Entre octobre et novembre, la décroissance est de 33 % ; 14 % entre novembre et décembre ; 5 % entre décembre et janvier et 2 % entre janvier et février. Entre février et avril, la décroissance se stabilise à 1 % en moyenne par mois.

La montée des eaux est ici aussi nettement plus rapide que la décroissance.

Tableau n° 67 Régime du Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou

B.V = 15.700km² Altitude moyenne du bassin : 818,5m alt. de la Station : 307,42m IGN

Lat. : 11°57'N Long. : 10°37'W Climat tropical guinéen ou tropical de transition

Végétation : Savane fortement boisée, flots forestiers

	Année moyenne 1903 - 1980						Année Extrême humide:1924			Année Extrême sèche 1979		
	Q	q	C.M.D	C.V	K3	R	Q	FR	C.M.D	Q	FR	C.M.D
Mai	22,0	1,40	0,1	0,4	2,7	7,1	20,6	1/2	0,1	14,3	1/6	0,1
Juin	97,5	6,21	0,4	0,5	4,1	23,3	172	1/19	0,6	55,6	1/5	0,2
Juillet	337	21,5	1,2	0,4	3,2	4,9	837	?	3,1	173	1/9	0,6
Août	865	55,1	3,2	0,3	2,1	2,9	1.272	1/20	4,6	490	1/16	1,8
Septembre	952	60,6	3,5	0,2	1,7	2,5	1.275	1/18	4,7	582	1/30	2,1
Octobre	550	35,00	2,0	0,4	3,0	4,9	756	1/6	2,8	242	1/14	0,9
Novembre	234	14,9	0,9	0,4	2,7	5,3	348	1/11	1,3	132	1/9	0,5
Décembre	104	6,62	0,4	0,3	2,6	7,6	161	1/19	0,6	110	1/2	0,4
Janvier	54,2	3,45	0,2	0,3	2,3	4,6	81,8	1/21	0,3	26,9	1/20	0,1
Février	36,0	2,29	0,1	0,3	2,4	5,1	56,9	1/26	0,2	16,0	1/22	0,1
Mars	22,4	1,43	0,1	0,3	2,2	4,2	32,7	1/17	0,1	10,9	1/24	0,04
Avril	13,7	0,87	0,1	0,4	2,9	6,3	18,7	1/6	0,1	6,70	1/12	0,02
ANNEE	274	17,5	-	0,2	1,9	2,7	419	1/76	-	155	1/29	-

R* : 35

Q : m³/s; -q : l/s/km²; -C.M.D : Coefficient mensuel de débit; -C.V : Coefficient de variation;
 K3 : index d'irrégularité; -R : coefficient d'irrégularité; -FR : Fréquence relative en période humide;
 R* : coefficient d'immodération

- 332 -

Les C.M.D les plus élevés reviennent respectivement à septembre, août, octobre et juillet. Les maigres les plus prononcés interviennent respectivement en février, mars et avril.

Ainsi la période des hautes eaux (crue annuelle) est relativement plus longue qu'à Bakel. Cependant, il faut noter ici dans cette nuance que le C.M.D du mois de novembre est très peu éloigné de 1 (0,9). On pourrait à la limite étendre la crue annuelle à 5 mois en y incluant le mois de novembre.

La comparaison avec les variations mensuelles de la pluviométrie révèle la conformité avec le régime des pluies dans ce domaine. Le maximum annuel de la crue est en retard d'un mois par rapport au maximum pluviométrique d'août. Mais dans ce domaine, la saison des pluies dure 10 mois pratiquement avec 8 mois considérés comme humides. Ainsi la période des hautes eaux (4 à 5 mois) est plus courte que la période humide pluviométriquement.

Le milieu morpho-climatique est partout le plus favorable à l'écoulement dans le bassin (cf. conclusion Première Partie). Cependant, ces influences favorables se mesurent sur la durée relativement plus longue de la période des hautes eaux mais surtout sur le fait qu'à Dakka-Saïdou, le module minimal moyen mensuel est plus soutenu qu'à Bakel : $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ à Dakka-Saïdou contre $8,54 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel où l'abondance moyenne annuelle est plus importante.

On observe par exemple que la décroissance du module brut entre septembre et octobre est de 43 % en moyenne à Dakka-Saïdou et de 51 % à Bakel. Ainsi ces variations consacrent un régime sensiblement ^{moins} immodéré par rapport au régime moyen à Bakel où $R^* = 35$.

2. La variabilité intermensuelle

Nous donnons dans le tableau n° 70 les débits fréquentiels mensuels en période sèche et humide pour les fréquences de retour 1/5, 1/10 et 1/20.

On observe que le débit minimum moyen mensuel ne s'annule jamais, ce qui

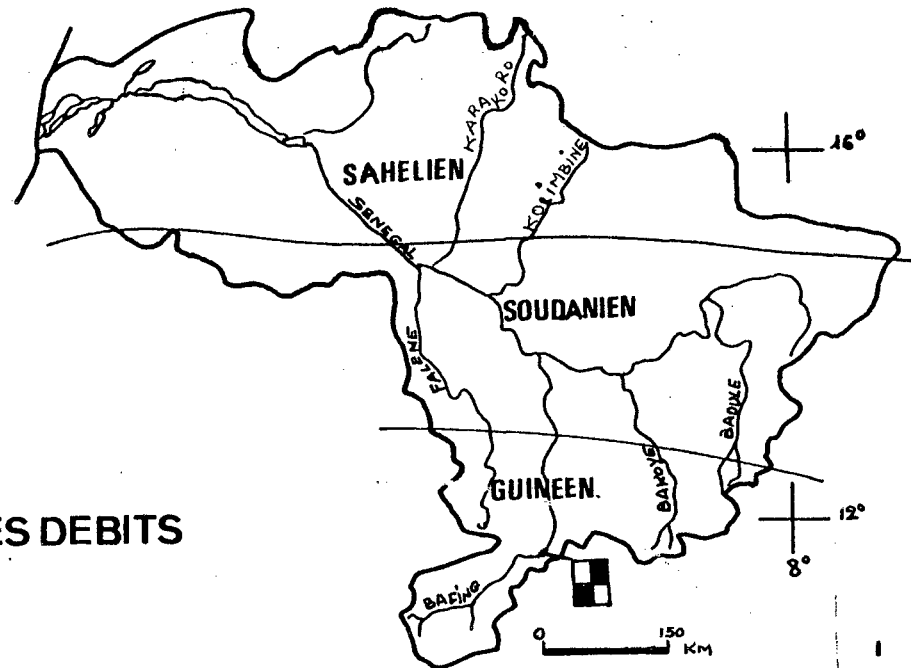
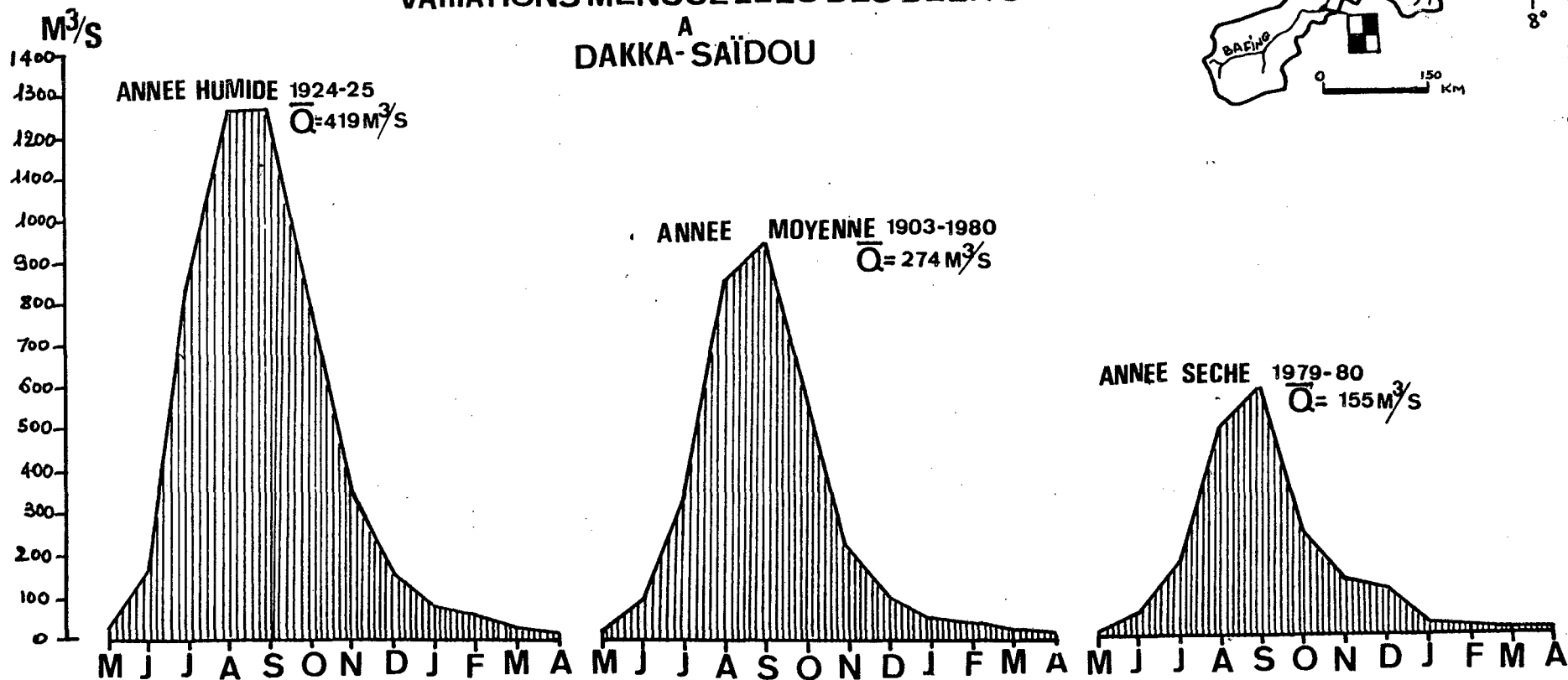


FIG 43.

VARIATIONS MENSUELLES DES DEBITS
A
DAKKA-SAÏDOU



est le cas pour Bakel dès la fréquence $1/20$ (0,05). Du reste, les débits moyens de mars et avril, pour cette fréquence, sont mieux soutenus qu'à Bakel.

L'index K_3 et le C.V qui mesurent l'irrégularité mensuelle connaissent dans ce régime les valeurs les plus faibles du bassin (Tableaux n° 67 et n° 70).

Le mois le plus irrégulier est le mois de juin ($K_3 = 4,1$; C.V = 0,5). Comme à Bakel, juin, juillet et octobre restent les mois les plus irréguliers mais cette irrégularité est beaucoup moins importante par rapport à Bakel.

Le rapport des modules extrêmes mensuels R confère lui aussi une immodération plus importante aux mois de période de basses eaux. L'extrême immodération revient toujours au mois de juin : 23,3. Le mois de décembre a aussi un coefficient élevé (7,6) dû au fait que c'est le mois le moins pluvieux. Il marque en général la fin de la saison pluvieuse.

3. La variabilité interannuelle

Elle est mesurée par les valeurs des années la plus humide et la plus sèche.

L'année la plus humide à Dakka-Saïdou, comme à Bakel, est l'année 1924 : $419 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $26,7 \text{ l/s/km}^2$. La période des hautes eaux a duré effectivement 5 mois (4 mois pour le régime moyen), de juillet à novembre (Fig. n°). Cette année en période humide a une fréquence de retour de 1 fois tous les 76 ans.

L'année la plus sèche est l'année 1979 avec un module annuel de $155 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $9,9 \text{ l/s/km}^2$. Elle a une fréquence de retour en période humide de 1 fois tous les 29 ans.

Durant cette année sèche, le module mensuel minimal a été tout de même mieux soutenu qu'à Bakel.

La période des hautes eaux en 1979 se réduit à 2 à 3 mois où le C.M.D a été

supérieur à 1 ou voisin de 1 (en octobre, C.M.D = 0,9). L'irrégularité est somme toute beaucoup moins grande qu'à Bakel où $R = 2,7$. Malgré tout, trois mois de crue annuelle traduisent une modification du régime tropical guinéen en un régime tropical soudanien ou tropical pur.

Cependant, et malgré tout, le maximum annuel de même que le minimum annuel reviennent toujours aux mois de septembre et d'avril comme pour le régime moyen en année sèche comme en année humide.

*

* *

Le régime tropical guinéen se caractérise par une période de crue annuelle qui dure 4 mois et une période de basses eaux qui dure 8 mois.

Le maximum annuel intervient en septembre et le minimum annuel en avril. Dans ce régime aussi (comme à Bakel), en année moyenne comme en année extrême (sèche ou humide), les maximums et les minimums se reproduisent toujours les mêmes mois. Cependant, nous parlerons de régularité temporelle. Outre l'immodération annuelle ($R^* = 35$), ce régime connaît une irrégularité interannuelle. Cependant, le rapport des modules extrêmes interannuels $R = 2,7$ traduit une irrégularité moins importante par rapport au régime moyen à Bakel où $R = 4,7$.

Par rapport au régime moyen à Bakel, le régime tropical guinéen du Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou se singularise par :

- un minimum annuel précoce par rapport à Bakel. Il intervient en avril au lieu de mai à Bakel ;
- une période de hautes eaux plus longue qui dure 4 à 5 mois (3 à Bakel). Le C.M.D du mois de novembre en régime guinéen est égal à 0,9. Ce mois à certains égards peut être considéré comme un mois de hautes eaux. Mais il faudrait plutôt considérer le mois de novembre en régime guinéen comme

ayant un module plus soutenu. Du reste, le minimum annuel, du fait de l'abondance de la pluviométrie et de la longueur de la saison pluvieuse, est plus soutenu ici qu'à Bakel.

On peut noter aussi que la décroissance des modules à partir du mois de septembre en régime guinéen est moins rapide qu'à Bakel pour le régime moyen.

A Bakel, entre septembre et octobre, la baisse représente en moyenne 51 % du maximum annuel alors qu'elle est de 43 % pour la station de Dakka-Saïdou. Cependant, l'étude des vitesses de tarissement nous permettra de préciser ;

- enfin et surtout, le régime tropical guinéen connaît une irrégularité interannuelle plus faible qu'en régime tropical moyen : $K_3 = 1,9$; C.V = 0,2 ; R = 2,7.

En aval de Dakka-Saïdou, le Sénégal-Bafing pénètre en domaine soudanien ou tropical pur. La pluviométrie y est moins importante et les conditions morpho-climatiques très différentes. Les influences diverses déterminent une seconde nuance du régime pluvial tropical.

Tableau n° 68 Régime du Sénégal-Bafing à Galougo

B.V : 128.400km² Altitude moyenne du bassin : 702,5m alt. de la station : 69,236m IGN

Lat. : 13°51'N Long. : 11°03'W Climat tropical soudanien ou tropical pur

Végétation : savane boisée, savane pure

	Année moyenne 1903 - 1980						Année extrême humide 1924			Année extrême sèche 1913		
	Q	q	C.M.D	C.V	K3	R	Q	FR	C.M.D	Q	FR	C.M.D
Mai	10,6	0,08	0,02	0,6	9,5	161	9,10	1/2	0,02	8,00	1/3	0,01
Juin	114	0,89	0,2	0,6	6,6	50,7	224	1/21	0,4	95,0	1/3	0,2
Juillet	521	4,06	0,9	0,5	4,2	7,06	1456	?	2,5	220	1/9	0,4
Août	1927	15,0	3,3	0,4	2,9	5,25	3202	1/23	5,5	716	1/19	1,2
Septembre	2384	18,6	4,1	0,3	2,4	5,07	3677	1/21	6,3	798	1/48	1,4
Octobre	1190	9,27	2,0	0,5	3,8	6,63	1739	1/6	3,0	557	1/8	0,9
Novembre	416	3,24	0,7	0,4	3,6	8,24	664	1/11	1,1	220	1/7	0,4
Décembre	201	1,57	0,3	0,3	2,5	34,4	308	1/17	0,5	120	1/9	0,2
Janvier	108	0,84	0,2	0,4	3,0	13,6	175	1/17	0,3	68,0	1/6	0,1
Février	58,0	0,45	0,1	0,5	4,0	27,2	105	1/24	0,2	37,0	1/5	0,1
Mars	27,0	0,21	0,05	0,5	5,0	20,8	50,0	1/20	0,1	14,0	1/6	0,02
Avril	12,9	0,10	0,02	0,5	4,2	9,75	20,0	1/8	0,3	4,00	1/12	0,007
ANNEE	581	4,52	-	0,3	2,4	41	969	1/57	-	238	1/32	-

R* : 205

Q : m³/s; -q : l/s/km²; -C.M.D : Coefficient mensuel de débit; -C.V : Coefficient de variation;
 K3 : index d'irrégularité; -R : coefficient d'irrégularité; -FR : Fréquence relative en période humide
 R* : coefficient d'immodération

- 338 -

C/ LE REGIME TROPICAL SOUDANIEN

Le Sénégal-Bafing à Galougo

Le régime moyen est étudié au niveau de la station de Galougo sur le Sénégal-Bafing. La station contrôle un bassin-versant de 128 400 km² qui ne comporte pratiquement pas de secteur sahélien (carte n° 23).

1. Le régime moyen

Il est exprimé par la courbe des variations intermensuelles des débits. Cette courbe combine, comme pour les autres régimes, une période de montée des eaux suivie d'une période de descente (Fig. n° 41).

Le minimum annuel se situe en mai et le maximum en septembre.

La montée des eaux se fait de mai à septembre. Entre mai et juin, l'augmentation reste faible : 4 %. Elle est de 17 % entre juin et juillet, passe à 59 % entre juillet et août et se stabilise à 19 % entre août et septembre.

La décroissance des débits se fait à partir de septembre. Elle est d'abord brutale : 50 % en moyenne entre septembre et octobre, 33 % entre octobre et novembre. La décroissance se stabilise à 9 % entre novembre et décembre et à 4 % entre décembre et janvier. Elle reste entre 2 et 1 % pour le reste de l'année.

Ces variations mensuelles connaissent des valeurs brutes moyennes que nous donnons dans le tableau n° 68. Ces valeurs traduites par les C.M.D relatifs déterminent une période de hautes eaux qui dure 3 mois (août, septembre et octobre) et une période de basses eaux qui dure 9 mois. Cependant, le mois de juillet a un C.M.D égal à 0,9.

Ces variations mensuelles sont aussi en rapport avec les variations pluviométriques moyennes. Le régime pluviométrique consacre une saison sèche qui dure 6 mois (de novembre à avril). La saison pluvieuse dure ainsi 6 mois, de mai à octobre.

Le profil pluviométrique de la station de Kayes, valable pour Galougo, montre que la saison pluvieuse connaît 5 mois humides (carte n° 19). Ainsi, la période des hautes eaux en régime soudanien, qui dure 3 mois, est plus courte que la saison pluvieuse et la période considérée comme humide.

Le maximum annuel situé en septembre est aussi, comme partout ailleurs, en retard d'un mois par rapport au maximum pluviométrique d'août. Ce décalage d'un mois et la longueur de la période des hautes eaux s'expliquent aussi par les délais de saturation des sols et les pertes importantes dues à l'évapotranspiration.

L'évaporation est favorisée ici par rapport au domaine guinéen. En effet, les vallées sont plus larges et les pentes plus faibles. L'étalement des eaux favorise ainsi des pertes importantes. Ces pertes estimées pour le bilan correspondent à une E.T.R d'environ 90 % (chapitre II).

L'abondance moyenne annuelle est plus importante qu'en régime guinéen du fait des apports divers et du fait de l'importance du bassin-versant.

L'abondance moyenne annuelle reste moins importante par rapport à la station de Bakel qui bénéficie d'apports en aval de Galougo (Falémé, Kolimbiné, Karakoro, carte n° 23) et d'un bassin plus grand.

Le module annuel à Galougo est de $581 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à un module spécifique de $4,52 \text{ l/s/km}^2$, ce qui correspond par ailleurs à la classe des valeurs-types " faibles " (R. FRECAUT, 1982). Cependant, l'immodération annuelle du régime ($R = 205$) est beaucoup moins importante qu'à Bakel. Ce régime connaît aussi une variabilité intermensuelle.

2. La variabilité intermensuelle

Nous donnons dans le tableau n° 70 les modules mensuels fréquentiels quinquennaux, décennaux et vincennaux en période sèche comme en période humide.

On observe que dès la fréquence $1/20$, le débit moyen mensuel du mois du minimum mai s'annule. En régime tropical moyen à Bakel, ce sont les mois

du minimum (mai aussi) et le mois suivant qui s'annulent. L'irrégularité intermensuelle mesurée par les coefficients K_3 , C.V et R situe les valeurs les plus importantes durant la période de basses eaux et surtout durant les mois de début de la saison pluvieuse. En mai (mois du minimum annuel), C.V = 0,6 , $K_3 = 9,5$ et $R = 161,2$. En juin, C.V = 0,6 , $K_3 = 6,6$ et $R = 50,7$.

Les mois de crue annuelle restent aussi irréguliers mais d'une irrégularité moins importante.

3. La variabilité interannuelle

Nous la mesurons par les années extrêmes humides et sèches du tableau n° 68 .

L'année la plus humide comme à Bakel et à Dakka-Saïdou est l'année 1924. A Galougo, $969 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $7,55 \text{ l/s/km}^2$. La crue annuelle a duré 5 mois : juillet, août, septembre, octobre et novembre. Le maximum annuel a été septembre et le minimum annuel de mai.

L'année 1924 a une fréquence de retour en période humide de une fois sur 57 ans.

L'année la plus sèche, en revanche, est l'année 1913. (1979 à Dakka-Saïdou, 1972 à Bakel). L'écoulement s'est réduit à 2 mois de crue annuelle (août, septembre), durée caractéristique d'un régime sahélien.

Le maximum annuel est resté toujours de septembre, mais le minimum annuel a été précoce par rapport à la situation moyenne. Il est d'avril. Ce décalage se comprend aisément dans un régime pluvial. La sécheresse pluviométrique se caractérise aussi bien par une faible épaisseur de mousson mais aussi et surtout par une remontée moins importante du F.I.T.

L'année 1913 a une fréquence de retour plus rapide que l'année humide : 1 fois tous les 32 ans. L'irrégularité interannuelle $K_3 = 2,4$, $R = 4,1$ et C.V = 0,3.

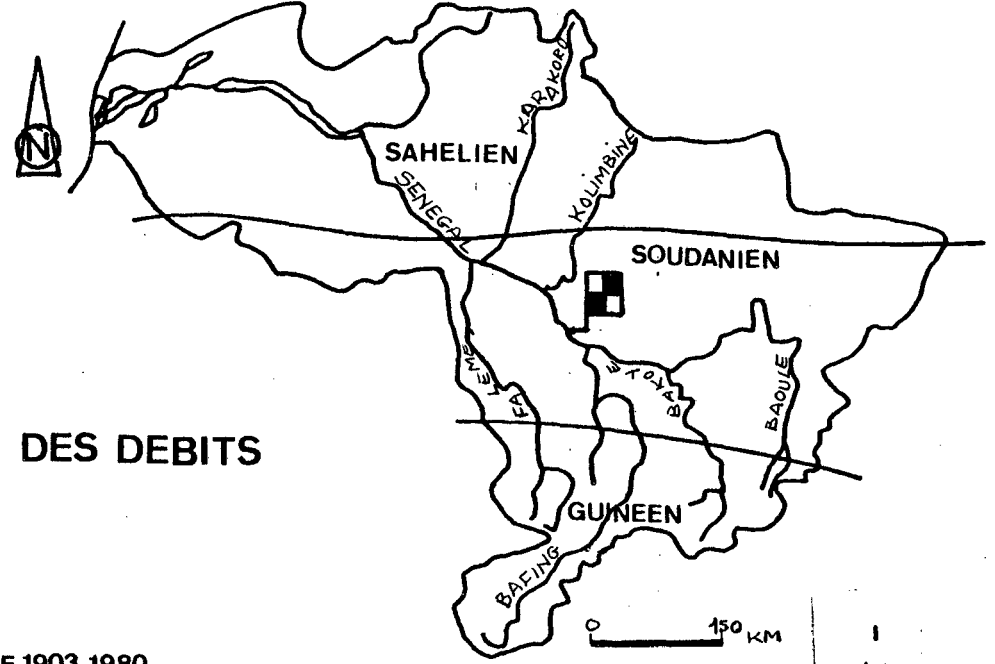
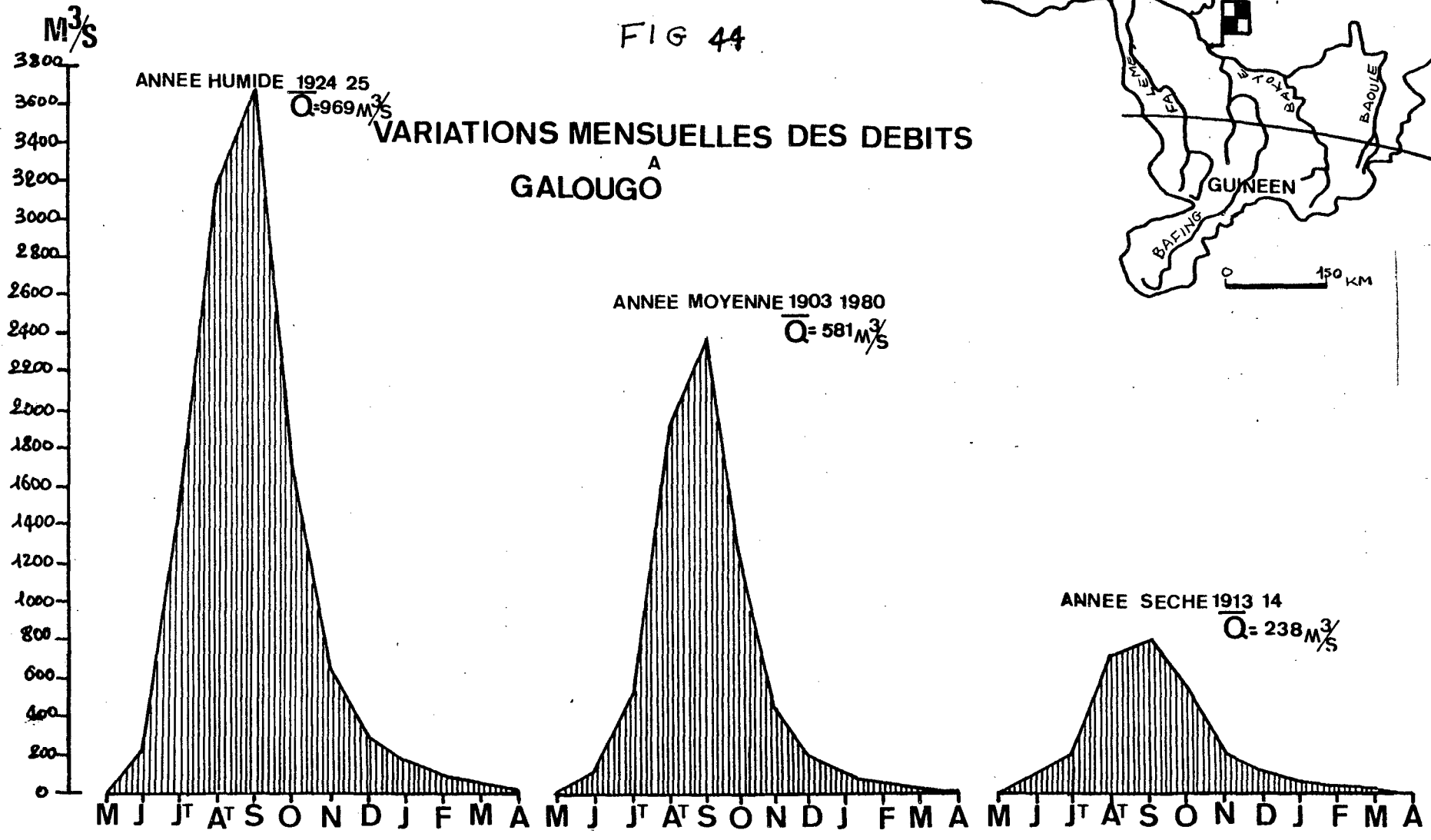


FIG 44



Le régime soudanien ou tropical pur se caractérise par une période de hautes eaux qui dure 3 mois (août, septembre et octobre) et par une période de basses eaux qui dure 9 mois.

Le maximum annuel est de septembre et le minimum de mai. Ce régime moyen en conformité avec le régime pluviométrique est immodéré : $R = 205$. Cependant, il est stable par la régularité du mois du maximum et du mois du minimum.

Il se différencie nettement du régime guinéen par :

- la longueur de la période de crue annuelle qui dure 3 mois contre 4 mois à Dakka-Saïdou en régime guinéen ;
- par la place du minimum annuel : avril en régime guinéen et mai en régime soudanien. Ce minimum annuel est moins soutenu à Galougo ($10,6 \text{ m}^3/\text{s}$ contre $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ à Dakka-Saïdou) ;
- le régime soudanien est beaucoup plus immodéré que le régime guinéen (R à Dakka-Saïdou = 35 contre 205 à Galougo) ;
- enfin, le régime soudanien connaît une irrégularité interannuelle plus importante ($K_3 = 2,4$ contre 1,9 en domaine guinéen, $C.V = 0,3$ contre 0,2 et $R = 4,1$ contre 2,7).

Par rapport au régime moyen à Bakel, le régime soudanien présente les mêmes caractéristiques :

- les deux périodes de l'écoulement annuel - hautes eaux et basses eaux - ont la même durée ;
- les maximums et les minimums sont situés aux mêmes mois. Cependant, le minimum annuel est légèrement plus soutenu à Galougo qu'à Bakel.

La principale différence se trouve essentiellement au niveau de l'immodération du régime moyen à Bakel plus importante qu'à Galougo : R à Galougo = 205 contre 440 à Bakel.

L'irrégularité interannuelle étant sensiblement la même à Bakel ($K_3 = 2,6$ - C.V = 0,3 et R = 4,7) qu'à Galougo ($K_3 = 2,4$ - C.V = 0,3 et R = 4,1), il apparait ainsi en définitive que le régime du Sénégal-Bafing à Bakel traduit surtout un régime tropical soudanien moyen ou tropical pur. L'immodération à Bakel s'explique par l'intervention de toutes les influences :

- guinéennes et soudaniennes qui expliquent l'importance du maximum annuel. Tous les apports sont déjà parvenus et viennent du domaine guinéen ;
- sahéliennes qui expliquent la sévérité de l'étiage annuel.

Cependant, le régime soudanien présente deux variantes : au Sud du domaine à Dibia sur le Sénégal-Bafing et dans le secteur le plus continental du domaine (et du bassin du reste) à Toukoto sur le Bakoye.

4. Les variantes locales du régime soudanien

La première variante du régime soudanien se dégage au Sud du domaine. Elle profite d'un secteur relativement plus arrosé qui fait immédiatement suite au domaine guinéen. Nous l'analysons à la station de Dibia sur le Sénégal-Bafing.

La seconde variante est étudiée à la station de Toukoto sur le Bafing. Elle se trouve dans le secteur le plus continental du domaine soudanien.

a) La variante méridionale du domaine

Le Sénégal-Bafing à Dibia

Le Sénégal-Bafing à Dibia connaît les mêmes variations mensuelles en ce qui concerne les périodes des hautes eaux et des basses eaux et leur durées respectives par rapport à Galougo.

Cependant, les principales singularités de cette variante se trouvent

- dans la répartition des minimums annuels. A Dibia, le minimum intervient en avril et est précoce par rapport au régime soudanien moyen à Galougo. On peut attribuer ce fait aux influences guinéennes, mais bien que la station bénéficie d'un milieu plus arrosé, le minimum n'en est pas pour autant

mieux soutenu qu'à Galougo : $10,49 \text{ m}^3/\text{s}$ contre $10,59 \text{ m}^3/\text{s}$ à Galougo ;

- la seconde particularité qui différencie nettement les deux régimes est que la variante méridionale à Dibia est beaucoup moins immodérée :

R^* à Dibia = 87 contre 205 à Galougo ;

- l'irrégularité interannuelle est moins importante aussi à Dibia. L'index K_3 à Dibia est de 2,2 contre 2,4 à Galougo. Le coefficient R à Dibia = 3,7 contre 4,1 à Galougo. Ces coefficients traduisent une irrégularité interannuelle moins grande qu'à Galougo.

b) La variante continentale du domaine

Le Bakoye à Toukoto

Le régime connaît aussi les mêmes variations mensuelles qu'à Dibia et Galougo.

Cependant, le minimum annuel comme à Dibia se situe en avril. Ce minimum est aussi beaucoup moins soutenu par rapport à ces deux stations : $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ à Toukoto ($10,49 \text{ m}^3/\text{s}$ à Dibia et $10,59 \text{ m}^3/\text{s}$ à Galougo). Le maximum reste de septembre.

Mais les principales particularités par rapport aux régimes soudanien et guinéen et même par rapport au régime tropical moyen à Bakel se trouvent dans

- la grande immodération du régime : $R^* = 557$ (Bakel : 440 et Galougo : 205, Dakka-Saïdou 35, Dibia 87). C'est ainsi le régime le plus immodéré du bassin ;

- mais aussi la grande irrégularité interannuelle du régime. L'index K_3 est égal à 2,7 (2,4 à Galougo, 2,2 à Dibia et 1,9 à Dakka-Saïdou). Cette valeur est proche de celle de Bakel et de Matam (2,6) bien que le bassin du Bakoye ne comporte pas de secteur sahélien. Le coefficient R est ici égal à 8,1.

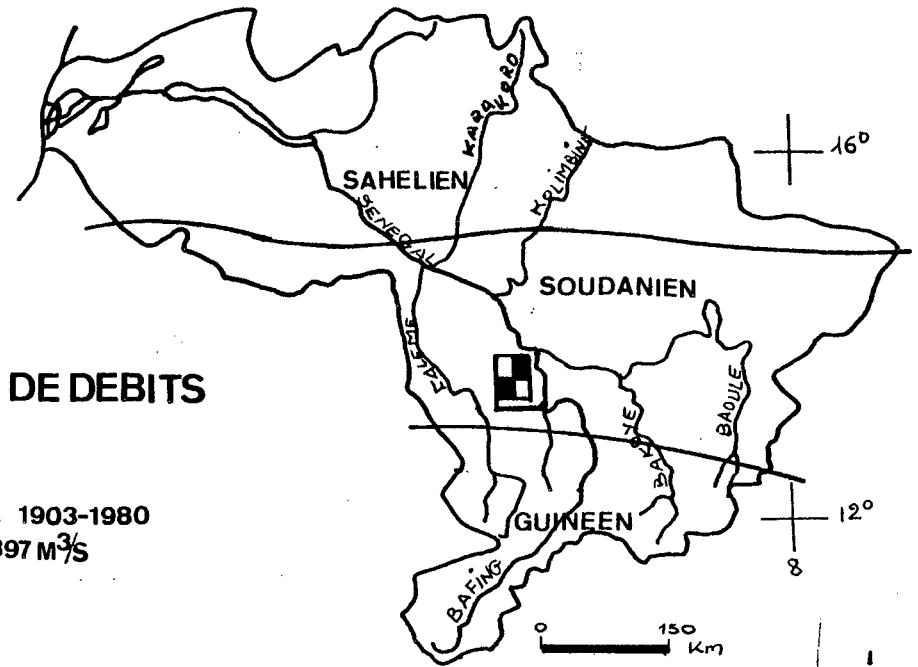
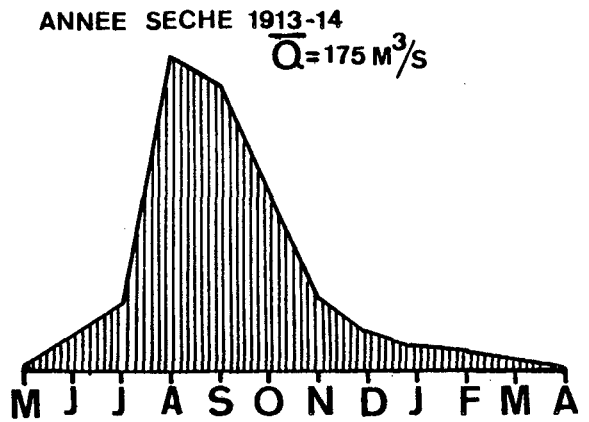
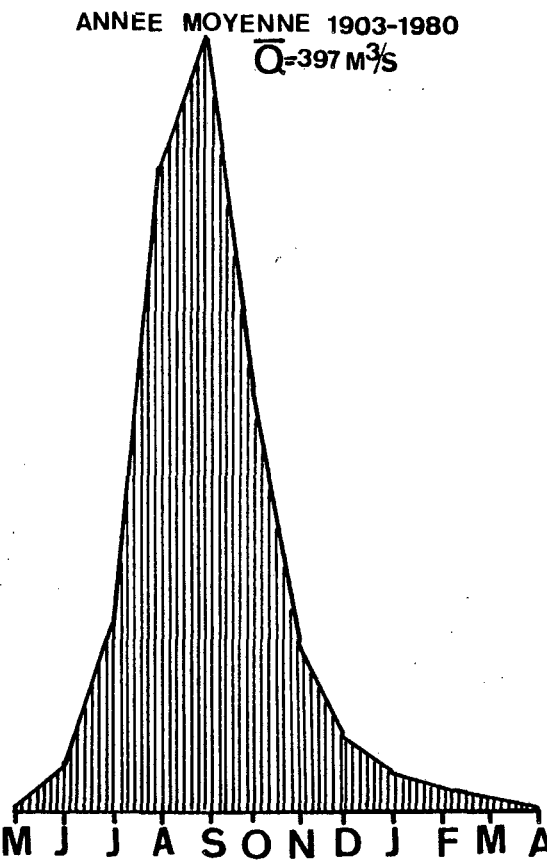
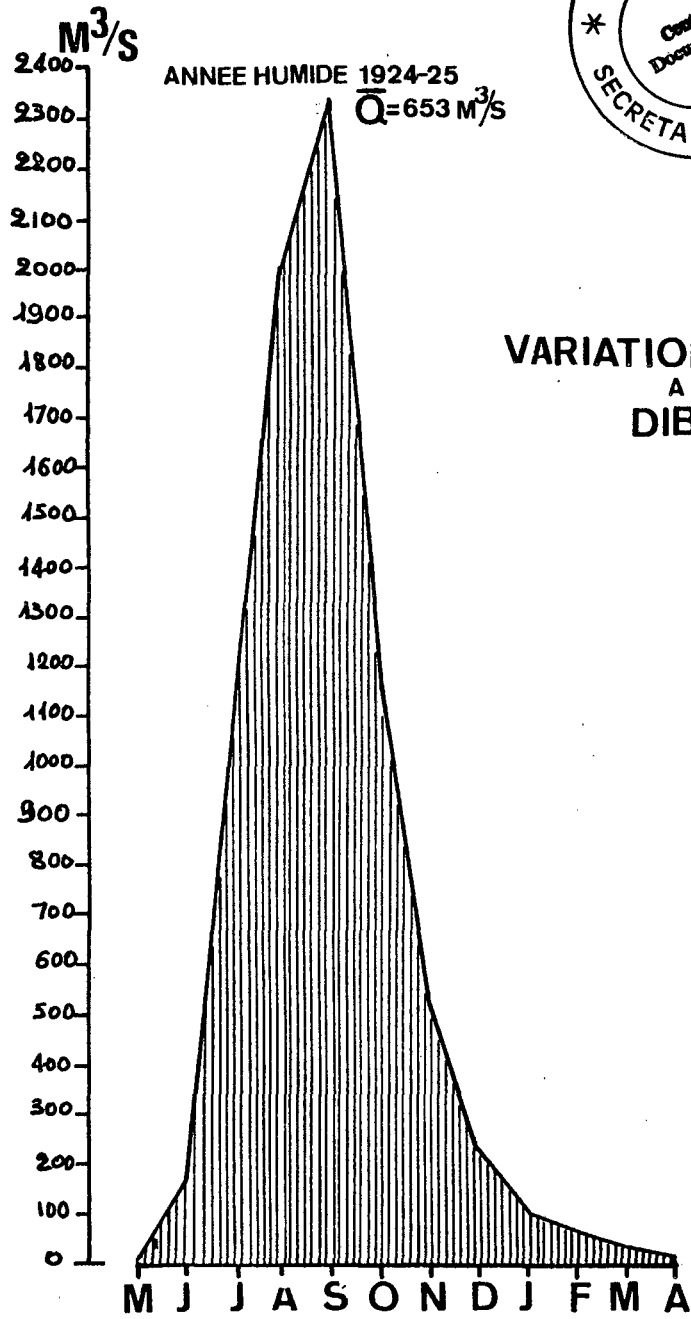


FIG 45

VARIATIONS MENSUELLES DE DEBITS A DIBIA



Cette grande variabilité apparait ainsi comme le fait de la continentalité. A titre d'exemple, l'E.T.P évaluée à Kita, station valable pour Toukoto, est de 1 970 mm/an.

Le déficit d'écoulement à Toukoto est de 1 046 mm/an pour une lame d'eau moyenne précipitée de 1 190 mm/an. Ce déficit correspond à une E.T.R de 88 % pour un bassin de 16 500 km². A Galougo 128 400 km², E.T.R = 90 % ; à Bakel 218 000 km², E.T.R = 87 % ; à Matam 230 000 km², E.T.R = 83 %.

Ces différentes valeurs sont données pour une moyenne 1951 - 1980. Leur comparaison par rapport aux valeurs de Toukoto sur le Bakoye montre que c'est la continentalité par l'évapotranspiration qui conditionne ce sous-régime soudanien. Car somme toute les pertes par infiltration restent faibles dans le bassin du Bakoye. Ainsi, la variante continentale du régime soudanien est la plus immodérée du bassin.

*

* *

Les deux sous-régimes ainsi analysés se dégagent surtout à la faveur des conditions particulières des secteurs du domaine soudanien dans lesquels ils se dégagent.

* La première variante méridionale se dégage dans un secteur plus arrosé près du domaine guinéen. Cette proximité fait intervenir des influences guinéennes qui situent le minimum annuel en avril, minimum précoce par rapport au régime moyen à Galougo.

* La seconde variante se dégage à l'Est du domaine soudanien. Du fait de la continentalité, les pertes par évapotranspiration sont importantes et font de ce sous-régime le plus immodéré du bassin.

L'exemple du bassin du Sénégal confirme quant aux régimes analysés l'appellation de régimes fluviaux ou mieux encore pluviaux tropicaux. Ils sont aussi divers que les domaines climatiques le sont. Dans ces domaines, les facteurs locaux déterminent quelquefois des sous-régimes.

Le régime pluvial tropical moyen analysé à la station de Bakel sur le Sénégal-Bafing se caractérise par :

1/ La combinaison d'une longue période de basses eaux ou d'étiage de 9 mois qui coïncide avec la saison pluviométrique sèche, et une période de hautes eaux ou crue annuelle qui dure 3 mois (août, septembre, octobre). Cette dernière période est centrée sur l'été boréal, la période pluvieuse.

- Le maximum de la crue annuelle intervient en septembre et le minimum en mai, respectivement au milieu de la saison pluvieuse et au début de celle-ci.

- Le régime pluvial tropical est ainsi conforme au régime pluviométrique. Il faut cependant noter un décalage d'un mois entre le maximum pluviométrique d'août et le maximum de la crue annuelle de septembre. Ce retard est dû aux délais de saturation des sols ;

2/ Le régime pluvial tropical connaît une immodération annuelle très importante. La concentration relative de la saison des pluies en quelques mois explique la brusque montée des eaux en été. L'essentiel de la pluie se concentre au mois d'août, le ruissellement qui suit la saturation des sols situe le maximum annuel en septembre avec des valeurs brutes et un C.M.D relatif très élevés. Ainsi l'importance du maximum de la crue annuelle est fonction de la mousson.

En revanche, les facteurs climatiques limitatifs qui atteignent leur maximum annuel en avril et mai situent le minimum annuel durant cette période. Il intervient avec un module très faible et un C.M.D relatif peu élevé, ce qui montre que les nappes sont peu importantes. Le rapport entre ces deux valeurs explique les valeurs importantes de l'immodération ;

3/ Le régime pluvial tropical est aussi caractérisé par une grande irrégularité interannuelle. Cette irrégularité est mesurée par les différents coefficients C.V, K_3 et R. Ces trois coefficients ne sont évidemment pas comparables entre eux mais mesurent chacun la spécificité du caractère irrégulier que nous rappelons :

* le C.V mesure l'irrégularité par la dispersion des modules autour d'une moyenne d'une série de modules : il s'agit alors d'une variabilité ;

* l'index K_3 , déterminé à partir des modules fréquentiels décennaux et humides et secs, traduit l'irrégularité par le retour des modules mensuels ou annuels extrêmes dans le temps (10 ans). Il s'agit d'une irrégularité temporelle ;

* le coefficient R traduit l'irrégularité interannuelle par les valeurs extrêmes sèches et humides d'une longue série. Il s'agit de l'irrégularité interannuelle pour les valeurs du rapport supérieures à 2 et de la pondération pour les valeurs voisines de 2 ;

- Pour le régime tropical moyen du bassin à Bakel, les trois coefficients traduisent une grande irrégularité : C.V = 0,3 - K_3 = 2,6 - R = 4,7.

L'irrégularité la plus importante affecte la période d'étiage. Durant cette période, les mois de début de l'augmentation des modules (mai et juin pour Bakel) et les mois de début de la décroissance du module à partir du maximum annuel (octobre pour Bakel) connaissent l'irrégularité la plus marquée.

Cela se comprend aisément du fait même que ces mois correspondent respectivement aux débuts et fins normaux de la saison pluvieuse.

Ces deux périodes connaissent respectivement une grande irrégularité (définie par les trois coefficients) car les pluies ne sont pas encore bien installées et interviennent (en mai et en juin) sous forme d'averses espacées dans le temps et pas bien copieuses. Ou alors, pour le mois d'octobre, la période coïncide avec le retrait du F.I.T, donc de la mousson et les

Tableau n° 69. Bassin du Sénégal.

Coefficients mensuels de débits 1903 - 1980.

Stations	M	J	Jt	At	S	O	N	D	J	F	M	A
Matam	0,01	0,1	0,7	2,7	4,4	2,5	0,8	0,3	0,2	0,1	0,1	0,02
Bakel	0,01	0,1	0,8	3,0	4,4	2,2	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1	0,02
Kayes	0,01	0,2	0,9	3,3	4,2	2,1	0,7	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02
Galougo	0,02	0,2	0,9	3,3	4,0	2,0	0,7	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02
Dibia	0,03	0,2	0,6	2,2	2,6	1,4	0,5	0,2	0,1	0,1	0,07	0,03
D. Saïdou	0,1	0,4	1,2	3,2	3,5	2,0	0,9	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1
Kidira	0,004	0,1	0,7	3,5	4,8	2,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Gourbassi	0,01	0,1	0,9	3,5	4,4	2,0	0,6	0,2	0,1	0,1	0,03	0,01
Fadougou	0,02	0,2	1,1	3,7	3,8	1,9	0,7	0,3	0,2	0,1	0,04	0,02
Oualia	0,004	0,1	0,8	3,5	4,6	1,9	0,5	0,2	0,1	0,1	0,01	0,007
Toukoto	0,007	0,2	0,8	3,2	3,9	2,6	0,7	0,3	0,2	0,1	0,04	0,007
Siramakana	-	0,02	1,0	4,8	3,6	1,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,05	0,03

averses commencent à devenir rares. Du reste, le retrait rapide de la mousson explique l'importance en valeur de la décroissance du module entre le maximum annuel et le mois suivant.

L'irrégularité du régime moyen à Bakel montre d'autre part que les années peuvent être très tranchées : à Bakel, l'intervalle de variation annuelle est de $984 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'année extrême humide se manifeste par une augmentation de la durée de la crue annuelle (5 mois au lieu de 3 à Bakel). Lors de cette année, c'est la période de crue annuelle qui se prolonge de 2 mois car inévitablement les C.M.D ne sont supérieurs à 1 qu'à partir du mois de juillet.

En revanche, l'année extrême sèche se manifeste par un raccourcissement de la période de crue annuelle (2 mois au lieu de 3). Lors de cette année, le début de la crue annuelle est tardif et la fin précoce par rapport à la moyenne.

Les nuances à ce régime moyen sont déterminées essentiellement par :

- la durée de la période de crue annuelle ;
- la place du minimum annuel ;
- la sévérité de l'étiage annuel ;
- le degré d'immodération annuelle du régime ;
- et le degré d'irrégularité interannuelle.

Le régime pluvial tropical guinéen

La période de crue annuelle dure 4 à 5 mois (juillet, août, septembre, octobre et novembre). Le maximum intervient en septembre et le minimum en avril. Le minimum en valeur brute est mieux soutenu qu'ailleurs. En l'absence de réserves souterraines importantes, il faut évoquer ici le milieu morpho-climatique favorable à l'écoulement. Ce régime est le moins irrégulier du bassin : $C.V = 0,2$ - $K_3 = 1,9$ et $R = 2,7$. Cependant, il reste légèrement immodéré : $R^* = 35$.

Le régime pluvial tropical soudanien

La période de crue annuelle dure 3 mois (août, septembre et octobre). Le maximum intervient en septembre et le minimum en mai. L'étiage est moins soutenu qu'en régime guinéen (malgré les différents apports en aval de Galougo). Le milieu est moins favorable et les pertes par évapotranspiration et par infiltration expliquent ce fait. Le régime connaît une immodération importante ($R^* = 205$) et une grande irrégularité : $C.V = 0,3$ - $K_3 = 2,4$ et $R = 4,1$.

Il connaît dans le bassin deux variantes locales dues à la place des minimums (avril), au degré d'immodération annuelle et d'irrégularité interannuelle par rapport au régime moyen. Ainsi, dans le Bassin du Sénégal, l'immodération annuelle et l'irrégularité interannuelle évolue du Sud vers le Nord. Cependant, l'analyse du régime moyen à Bakel, des nuances et variantes par rapport à ce régime complètent les caractères du régime tropical pur.

4/ La stabilité des mois des maximums et des minimums. Invariablement, en année moyenne sèche ou humide, le maximum intervient toujours et partout en septembre et le minimum en mai pour le régime moyen et soudanien et en avril pour ses nuances et pour le régime guinéen.

Cette stabilité (régularité temporelle) s'explique par la régularité tout au moins du flux de mousson, vecteur d'humidité. Quelles que soient les conditions climatiques, la mousson arrive au domaine guinéen, source des principales rivières. L'abondance moyenne étant liée au flux de la mousson, la stabilité, la régularité temporelle de la place des maximums et des minimums est ainsi fonction de sa présence car son épaisseur variable, second facteur de l'abondance, détermine le dernier caractère du régime tropical.

5/ La modification des régimes durant les périodes extrêmes sèches. Le régime guinéen devient alors un régime soudanien à 3 mois de crue annuelle (exemple tableau n° 67, année 1979). Le régime soudanien devient un régime sahélien à 2 mois de crue annuelle.

Cette modification s'explique aisément par le fait que chaque année pluvieuse

BASSIN DU SENEGAL

DEBITS FREQUENTIELS MENSUELS (1903 - 1980)

TABEAU N° 70

PERIODE SECHE

		M	J	JT	A	S	O	N	D	J	F	M	A
MATAM	F1/5	4.39	24	290	1434	2167	1098	365	175	91	47	25	9
	F1/10	3.03	3	189	1130	1595	693	238	135	68	33	17	5
	F1/20	1.92	-	107	882	1127	361	134	102	49	21	10	2
BAKEL	F1/5	4	42	363	1418	2109	942	349	165	91	51	26	9
	F1/10	2	12	261	998	1528	610	247	127	70	38	18	5
	F1/20	-	-	177	654	1053	338	164	95	52	28	11	1
KAYES	F1/5	4	50	363	1285	1737	749	292	151	80	43	18	6
	F1/10	2	22	196	948	1353	506	213	123	63	32	12	3
	F1/20	-	-	108	674	1039	367	148	99	49	23	8	1
GALOUGO	F1/5	5	59	311	1304	1732	736	262	144	73	35	15	8
	F1/10	2	30	201	978	1390	498	181	115	54	23	9	5
	F1/20	-	6	111	711	1110	303	114	90	39	14	4	3
DIBIA	F1/5	6	51	202	937	1149	494	193	107	60	35	20	6
	F1/10	4	29	115	753	938	322	129	85	51	29	17	4
	F1/20	2	12	44	602	765	181	76	67	43	24	14	2
DAKKA-SAÏDOU	F1/5	16	59	222	658	782	371	163	74	40	26	17	9
	F1/10	12	38	161	549	694	277	126	58	33	21	14	7
	F1/20	9	21	112	460	621	201	95	46	27	17	12	5

PERIODE HUMIDE

		M	J	JT	A	S	O	N	D	J	F	M	A
MATAM	F1/5	5.59	104	672	2593	4349	2645	851	328	178	103	57	24
	F1/10	10.9	125	772	2896	4921	3050	978	369	200	118	66	28
	F1/20	12.1	143	854	3145	5389	3382	1082	402	219	130	72	31
BAKEL	F1/5	13	156	754	3022	4328	2210	737	312	171	101	57	26
	F1/10	15	186	857	3402	4909	2542	838	350	192	115	65	30
	F1/20	17	210	941	3786	5324	2814	922	382	209	125	72	34
KAYES	F1/5	13	159	711	2569	3201	1678	593	260	145	84	40	16
	F1/10	15	187	818	2905	3524	1921	672	288	162	95	46	19
	F1/20	17	211	906	3180	3898	2120	736	312	175	103	51	21
GALOUGO	F1/5	16	169	731	2550	3037	1645	571	258	144	81	39	18
	F1/10	19	199	841	2876	3378	1823	652	288	163	93	45	21
	F1/20	22	222	931	3143	3658	2078	718	313	178	102	50	23
DIBIA	F1/5	16	133	534	1641	1955	1152	439	189	96	59	33	15
	F1/10	18	155	621	1825	2167	1324	503	210	106	66	36	17
	F1/20	20	173	692	1976	2339	1465	555	228	113	71	39	19
DAKKA-SAÏDOU	F1/5	29	136	452	1072	1121	728	306	133	68	46	28	14
	F1/10	32	157	572	1180	1209	822	343	149	76	51	31	20
	F1/20	35	174	561	1269	1282	899	373	161	82	55	33	22

COEFFICIENTS D'IRREGULARITE MENSUELS ET ANNUELS

	M	J	JT	A	S	O	N	D	J	F	M	A	ANNEE
MATAM	3.6	4.7	4.1	2.6	3.1	4.4	4.1	2.7	2.9	3.6	3.9	5.6	2.6
BAKEL	7.5	15.5	3.3	2.4	3.2	4.2	3.4	2.8	2.7	3.0	3.6	6.0	2.6
KAYES	7.5	8.5	4.2	3.1	2.6	3.8	3.2	2.3	2.6	3.0	3.6	6.3	2.4
GALOUGO	9.5	6.6	4.2	2.9	2.4	3.8	3.6	2.5	3.0	4.0	5.0	4.2	2.4
DIBIA	4.5	5.3	5.4	2.4	2.3	4.1	3.9	2.5	2.1	2.3	2.1	4.3	2.2
DAKKA,S.	2.7	4.1	3.2	2.1	1.7	3.0	2.7	2.6	2.3	2.4	2.2	2.9	1.9

a un cachet particulier fonction de la durée de l'épisode pluvieux et de l'épaisseur du flux de mousson.

Le régime pluvial tropical est ainsi immodéré et irrégulier mais stable, c'est-à-dire régulier dans le temps par la place des maximums et des minimums annuels.

Enfin, l'étude des régimes et celle des bilans révèle la non conformité totale entre domaine climatique et domaine hydrologique en raison de l'intervention et du mélange des influences, des facteurs de l'écoulement.

Nous retenons pour terminer les domaines hydrologiques suivants du Nord au Sud du bassin :

- le domaine sahélien que nous n'avons pas analysé ;
- le domaine soudanien, régime tropical pur ;
- le domaine guinéen, régime tropical de transition et double transition vers le Nord (tropical pur) et vers le Sud (régime équatorial à deux maximums).

Cependant, le comportement hydrologique se manifeste aussi par les extrêmes, à savoir les crues et les étiages.

CHAPITRE V

LES FORMES EXTREMES DE L'ÉCOULEMENT
DANS LE BASSIN DU SENEGAL

L'étude des formes extrêmes de l'écoulement sera faite au niveau des valeurs maximales ou minimales mensuelles atteintes par l'écoulement annuel ou interannuel.

L'analyse des régimes fluviaux tropicaux dans le bassin a permis de retenir la division simple de l'année hydrologique en deux périodes (chapitre I V) :

- une période de montée des eaux de durée variable (3 ou 4 mois) en fonction des domaines hydroclimatiques ;
- et une période de décroissance des débits moyens mensuels qui dure le reste de l'année.

Il s'agit respectivement

- de la période des hautes eaux
- et de la période des basses eaux.

On assimile souvent hautes eaux à crue annuelle et basses eaux à étiage annuel.

Cependant, la crue ou l'étiage sont les valeurs extrêmes atteintes chaque année et durant les périodes " normales " de hautes eaux et de basses eaux. Ainsi la crue annuelle correspond au maximum des hautes eaux ou le débit journalier ou mensuel le plus élevé de l'année, et l'étiage correspond au minimum des basses eaux ou au débit journalier ou mensuel le plus bas de l'année.

Ainsi, crue et étiage sont bien différents de hautes eaux et basses eaux. R. FRECAUT (1974 et 1982) précise bien ces deux notions. Pour cet auteur qui ne parle de crue ou d'étiage qu'en tant que phénomènes exceptionnels et donc non annuels, la crue et les hautes eaux " diffèrent par leur fréquence, leur durée et les valeurs des débits écoulés ", de même que " étiages fluviaux ou maigres très prononcés, ou très basses eaux ... se

PERIODE : 1903-1980

	C.V	ANNEE MOYENNE 1903-1980			$Vm^3 * E^x$	FREQUENCE D'APPARITION DES MAXIMAUX					
		Qm3/s	q/l/s/ Km2	Emm		AOÛT		SEPTEMBRE		OCTOBRE	
						N	F	N	F	N	F
MATAM	0,4	3304	14,4	453	$1,04E^{11}$	3	4%	72	92%	3	4%
BAKEL	0,4	3298	15,1	477	$1,04E^{11}$	7	9	68	87	3	4
KAYES	0,3	2534	16,1	508	$7,99E^{10}$	14	18	62	79	2	3
GALOUGO	0,3	2451	19,1	602	$7,73E^{10}$	15	19	60	77	3	4
KIDIRA	0,4	925	32,0	1009	$2,92E^{10}$	19	24	65	83	4	5
OUALIA	0,4	742	8,76	276	$2,34E^{10}$	15	19	62	79	1	1
GOURBASSI	0,3	725	42,4	1337	$2,29E^{10}$	18	23	56	72	4	5
TOUKOTO	0,4	324	19,6	619	$1,02E^{10}$	20	26	52	67	6	8
SIRAMAKANA	0,7	354	5,95	188	$1,12E^{10}$	45	59	25	33	6	8
DIBIA	0,3	1601	47,8	1507	$5,05E^{10}$	16	21	60	77	2	3
FADOUGOU	0,3	486	52,3	1648	$1,53E^{10}$	32	41	43	55	3	4
DAKKA-SAIDOU	0,2	994	63,3	1997	$3,13E^{10}$	19	24	57	73	2	3

Emm : Lame d'eau moyenne écoulée en mm

Vm^3 : Volume total d'eau écoulée en m^3

N : Nombre de fois

F : Fréquence relative au nombre d'observation

différencient des basses eaux ordinaires ou habituelles par leur gravité ou profondeur, par leur durée et leur fréquence ".

Cependant, l'assimilation peut être faite quand on comprend par

- hautes eaux la période de crue annuelle
- et par basses eaux la période d'étiage annuel.

Durant ces deux périodes, nous avons retenu l'échantillon des valeurs moyennes mensuelles les plus élevées et celui des valeurs moyennes mensuelles les plus basses : il s'agit respectivement de l'échantillon des maximums mensuels et des minimums mensuels au niveau desquels l'analyse sera faite.

L'étude des maximums mensuels sera cependant complétée par l'analyse des crues exceptionnelles, c'est-à-dire les valeurs journalières les plus élevées atteintes lors des années et saisons humides à forte pluviosité. Pour les étiages exceptionnels, il s'agira des valeurs extrêmes les plus faibles atteintes lors des années et saisons humides à très faible pluviosité.

A/ ETUDE DES MAXIMUMS MENSUELS OU CRUES ANNUELLES

Pour toutes les stations retenues, l'échantillon des débits maximaux mensuels a été déterminé pour la période 1903 - 1980 (78 ans). Nous donnons les résultats des calculs dans le tableau n° 71.

1. L'évolution des maximums mensuels

Elle confirme, comme pour l'abondance moyenne annuelle, l'augmentation des valeurs brutes de l'amont vers l'aval.

a) Les maximums bruts

Sur l'artère principale, le Sénégal-Bafing, on observe que le maximum mensuel à Dakka-Saïdou est de $994 \text{ m}^3/\text{s}$. Il passe à $1\ 601 \text{ m}^3/\text{s}$ à Dibia, soit une augmentation moyenne de 26 %. A Galougo, il passe à $2\ 451 \text{ m}^3/\text{s}$, soit + 37 %. Cette valeur moyenne tient cependant compte des apports du Bakoye grossi par le Baoulé. Le Bakoye à Oualia a un débit moyen maximal de $742 \text{ m}^3/\text{s}$.

Entre Galougo (2 451 m³/s) et Kayes (2 534 m³/s), l'augmentation est très faible : + 4 %. En plus du fait que les deux stations ne sont pas éloignées, le Sénégal-Bafing est coupé en aval de Kayes par deux chutes (Gouina et Félou) qui créent une zone marécageuse où les eaux sont ralenties (cf. bilan de l'écoulement chapitre n° III, carte n° 24).

Entre Kayes et Bakel (3 298 m³/s), l'augmentation est de 33 %, valeur qui tient compte des apports du Karakoro et du Kolimbiné et surtout de la Falémé qui, à Kidira, a un débit de 925 m³/s.

Entre Bakel et Matam (3 304 m³/s), l'absence d'apports, l'étalement dans une large vallée alluviale où les pentes sont plus faibles et la pénétration en domaine sahélien réduisent l'augmentation qui est très faible : + 0,3 %.

C'est en fait un début de stabilisation du maximum mensuel qui, à Dagana, n'est plus que de 2 492 m³/s (pour 62 ans d'observations). Cette stabilisation logique se traduit par une diminution du maximum de - 25 % par rapport au débit maximum de Matam (3 304 m³/s).

Cependant, jusqu'à Matam en domaine sahélien comme pour le module annuel, l'augmentation des valeurs maximales brutes se maintient.

b) Les maximums spécifiques

Ils diminuent aussi du Sud du bassin vers le Nord, conformément à l'augmentation de la superficie des bassins contrôlés. Les valeurs spécifiques sont indiquées dans le tableau n° 71.

En domaine guinéen, à Dakka-Saïdou et à Fadougou, les valeurs mensuelles spécifiques maximales sont respectivement 63,3 l/s/km² et 52,3 l/s/km². Ces valeurs sont les plus élevées et peuvent être considérées comme des " valeurs très élevées " (1).

(1) On distingue plusieurs classes de valeurs-types des modules spécifiques en milieu chaud et humide : valeurs énormes > 100 l/s/km²; très élevées entre 35 et 100 l/s/km²; honorables entre 30 - 35 et 10 - 15 l/s/km²; moyennes et médiocres entre 10-15 et 5 l/s/km² et faibles quand les valeurs sont inférieures à 5 l/s/km².

En domaine soudanien, les valeurs restent encore " très élevées " à Dibia (47,8 l/s/km²) et à Gourbassi sur la Falémé (42,4 l/s/km²).

Les valeurs sont honorables à Kidira : 32,0 l/s/km², à Toukoto (sur le Bakoye) 19,6 l/s/km², à Galougo 19,1 l/s/km²

A Kayes (16,1 l/s/km²), Bakel (15,1 l/s/km²), Matam (14,4 l/s/km²), les valeurs sont moyennes et médiocres. Elles le sont encore pour le Bakoye à Oualia (8,76 l/s/km²), le Sénégal-Bafing à Dagana (9,30 l/s/km²). Le module spécifique du maximum est faible à Siramakana sur le Baoulé : 5,95 l/s/km².

Nous donnons aussi dans le tableau n° 71 les lames d'eau mensuelles moyennes correspondantes écoulées. Elles diminuent aussi de l'amont vers l'aval. Cependant, les volumes totaux écoulés qui correspondent aux disponibilités en eau de surface, pour l'aménagement, augmentent de l'amont vers l'aval.

Mais le maximum mensuel, comme nous l'avons noté pour les régimes moyens, intervient toujours en septembre mais aussi en août ou en octobre.

2. Les fréquences d'apparition des maximums mensuels

Les fréquences d'apparition des maximums mensuels sont aussi données dans le tableau n° 71. Ils interviennent partout soit en août, soit en septembre ou en octobre. Cependant, on observe que le mois de septembre concentre la fréquence la plus élevée. Il est suivi du mois d'août et du mois d'octobre. Ces deux derniers mois ont des fréquences très faibles qui peuvent arriver à égalité.

La station de Siramakana sur le Baoulé présente néanmoins un cas particulier. La fréquence d'apparition la plus élevée revient ici au mois d'août, soit 59 % contre 33 % en septembre et 8 % en octobre. Nous n'avons les données d'observation pour le maximum que pour 76 ans.

Il faut surtout noter que les données à Siramakana sont très douteuses. Elles semblent n'avoir pas connu un écoulement annuel mesurable pour deux années. Cependant, il faut dire que le Baoulé est l'affluent le plus à l'Est dans le bassin, donc le premier atteint par les lignes de grains. Mais nous nous garderons d'une analyse rigoureuse vu l'état des données, tout au

moins pour le maximum mensuel.

Malgré tout, les fréquences, même faibles, d'apparition en août et en octobre montrent que le déclenchement de la " crue " est fonction, en plus des averses, de facteurs divers sur lesquels nous reviendrons.

Mais on peut retenir que la fréquence maximale d'apparition du maximum mensuel revient au mois de septembre, ce qui se confirme aussi pour le bassin du Niger (A. BALLO, 1984).

*

* *

La conformité des régimes fluviaux tropicaux avec les régimes pluviométriques permet de comprendre l'apparition la plus fréquente du maximum mensuel au mois de septembre. Elle est consécutive au maximum pluviométrique mensuel qui est partout situé au mois d'août. Ce mois est partout le plus pluvieux, mois durant lequel les averses sont plus nombreuses et plus copieuses.

Cette stabilité de la présence du flux de mousson explique les variations mensuelles des débits et le mois d'août, mois durant lequel tout le bassin baigne dans le flux de mousson, explique l'apparition du maximum mensuel en septembre. Les fréquences d'apparition en août et octobre montrent par ailleurs que les facteurs morphologiques (les pentes), pédologiques (saturation des sols) et biogéographiques (interception des pluies par le feuillage) interviennent aussi dans le déclenchement des crues en milieu chaud et humide. Cependant, " le facteur essentiel de leur genèse est un excès pluviométrique ou averse caractérisé par son total précipité, sa durée, son intensité " (R. FRECAUT, 1982).

Enfin, il faut noter que le flux de mousson n'a pas partout et chaque année pluvieuse la même épaisseur. Or, de celle-ci dépend l'importance des débits écoulés. Ces valeurs connaissent ainsi une grande variabilité.

3. La variabilité interannuelle des maximums mensuels ou crues annuelles

Cette variabilité est mesurée par le coefficient de variation, l'index K_3 et par le coefficient interannuel d'immodération R. Ces différents coefficients sont donnés dans les tableaux n°

Les valeurs des maximums mensuels connaissent une grande variabilité. Le C.V le plus élevé est observé à la station de Siramakana sur le Baoulé : 0,7. C'est une station continentale qui connaît de grandes pertes par évaporation. Mais aussi les valeurs sont à prendre avec beaucoup de circonspection. La station de Dakka-Saïdou connaît la variabilité la moins importante du bassin : 0,2. Mais pour le reste du bassin, les valeurs du C.V se situent entre 0,3 et 0,4 (tableau n° 71).

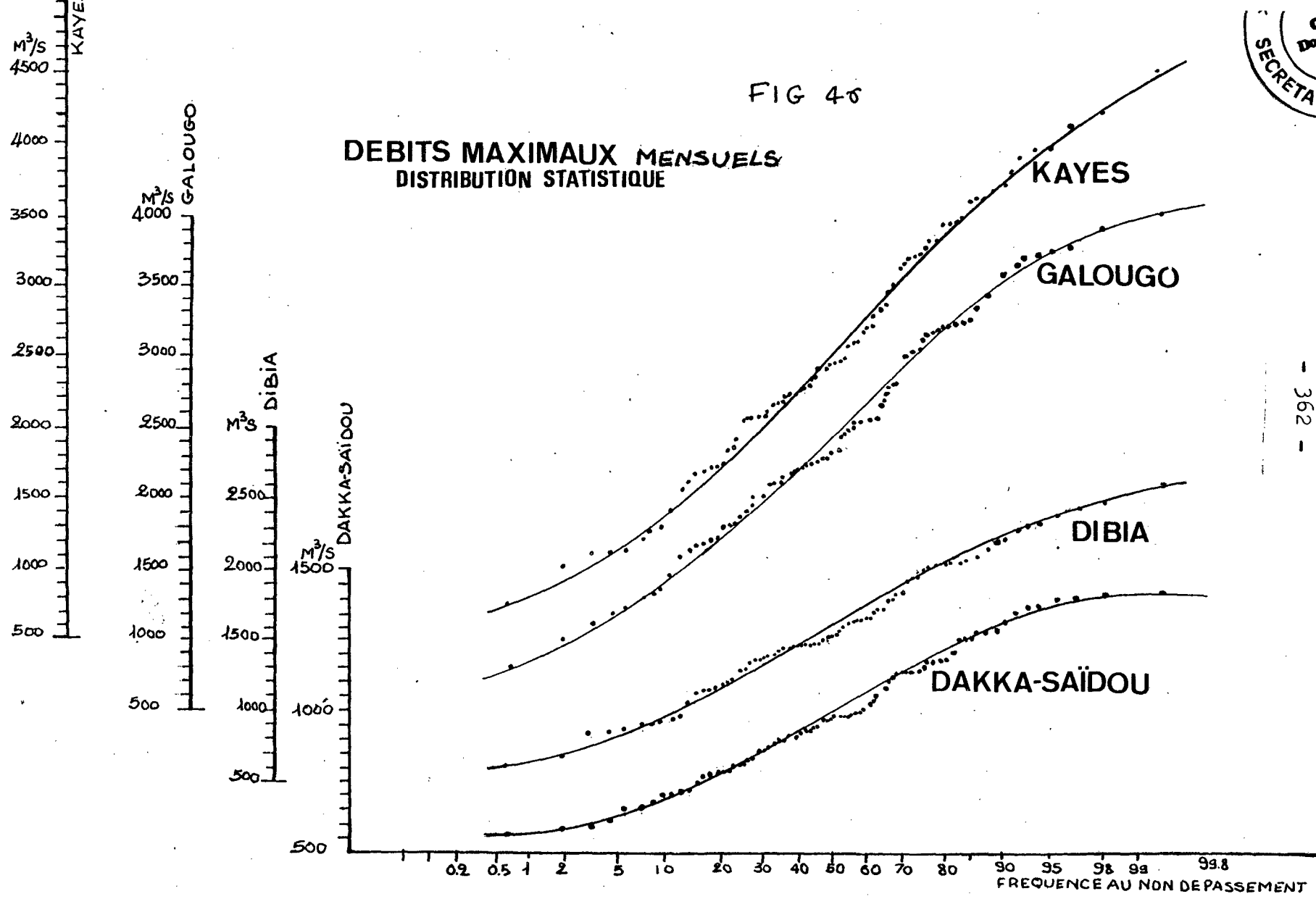
Il faut noter que ces valeurs du C.V ailleurs considérées comme faibles (module annuel) doivent être considérées ici comme élevées car pour le module annuel il s'agissait d'un C.V moyen annuel pour des mois à débits très variables. Pour les maximums mensuels, il s'agit d'un C.V calculé sur une période (août, septembre et octobre) où l'écoulement est appréciable et où la mousson est partout présente.

Du reste, la grande variabilité est aussi mesurée par l'intervalle de variation (I.V). Il est partout important et témoigne de l'écart pouvant exister entre les valeurs extrêmes. Le rapport de ces extrêmes " R " est aussi important.

L'irrégularité interannuelle la plus faible revient à la station de Dakka-Saïdou en domaine guinéen. L'irrégularité augmente vers le Nord (tableau n° 72). En dehors du coefficient $R = 257$ à Siramakana, à prendre avec beaucoup de réserves, les stations de Kidira sur la Falémé ($R = 11$), de Qualia sur le Bakoye ($R = 9,8$) connaissent une grande irrégularité des maximums mensuels. Mais partout l'irrégularité est importante. Elle peut être aussi mesurée par l'index K_3 (Tableau N°72)

FIG 46

DEBITS MAXIMAUX MENSUELS
DISTRIBUTION STATISTIQUE



4. L'étude fréquentielle des maximums mensuels

L'ajustement des valeurs des échantillons de débits maximaux mensuels a été fait pour les stations de Dakka-Saïdou, Dibia, Galougo, Kayes et Bakel sur le Sénégal-Bafing, de Kidira sur la Falémé et de Toukoto sur le Bakoye. Nous avons préféré déterminer directement les valeurs fréquentielles par simple lecture sur les courbes empiriques (Fig. n°46, 47).

On observe que les courbes empiriques sont en forme de S. On note une faible augmentation des valeurs les plus faibles. Ces faibles maximums mensuels sont déterminés par les averses faibles et constituent ce que l'on peut appeler " fausses crues ". Mais elles montrent aussi les débits maximaux au dessous desquels les valeurs ne descendent pas : en somme des débits limites liés à l'influence des nappes qui expliquent cette tendance hypogaussique.

On observe aussi qu'à partir de certaines valeurs correspondant aux fréquences 0,90 , 0,95 , 0,98 et 0,99 les maximums augmentent très faiblement. Ceci correspond à " l'effet de débordement " qui accompagne chaque crue. Les pentes des courbes sont ainsi " écrêtées ". Ces deux phénomènes - fausse crue et débordement - expliquent l'allure des courbes empiriques en forme de S.

Nous donnons dans le tableau n° 73 les valeurs fréquentielles en modules bruts, en modules spécifiques et les volumes totaux écoulés.

L'irrégularité interannuelle mesurée par l'index K_3 est aussi importante.

Tableau n°72. Coefficient K_3 d'irrégularité dans le bassin du Sénégal (1903 - 1980).

	D. Saïdou	Dibia	Galougo	Kayes	Kidira	Bakel	Toukoto
K_3	1,9	2,3	2,4	2,6	3,4	3,3	3,6

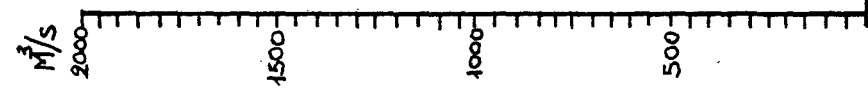
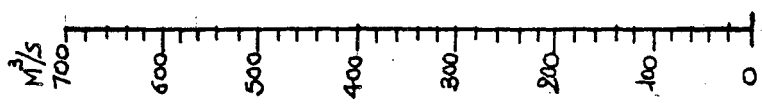
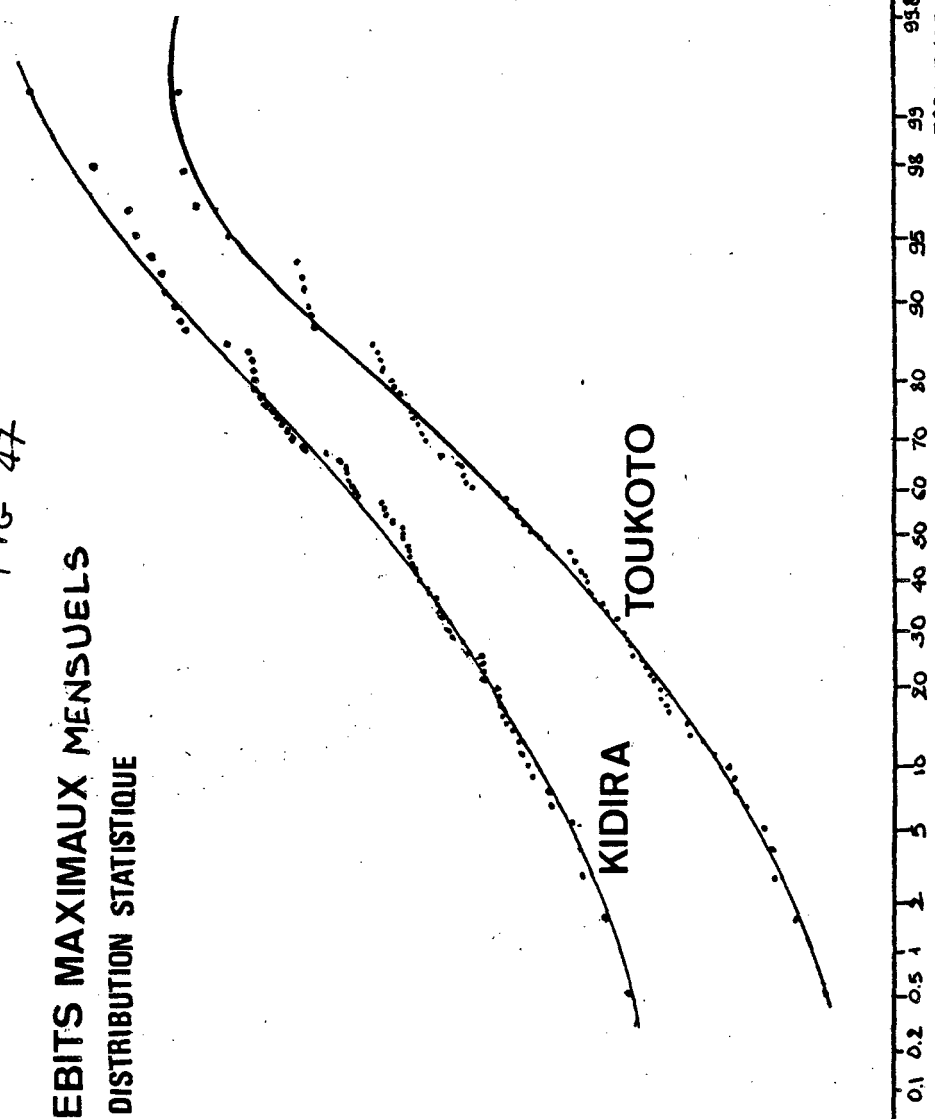


FIG 47

**DEBITS MAXIMAUX MENSUELS
DISTRIBUTION STATISTIQUE**

-364-



FREQUENCE AU NON DEPASS-

Le domaine guinéen paraît connaître l'irrégularité la plus faible : à Dakka-Saïdou, $K_3 = 1,9$. L'irrégularité s'accroît dans la partie continentale du domaine soudanien : le Bakoye à Toukoto $K_3 = 3,6$.

*

* *

L'étude des maximums mensuels montre la stabilité de la date d'apparition du maximum. Il s'agit surtout d'une régularité temporelle liée au rythme annuel de la mousson et à la stabilité des facteurs météorologiques. Cependant, les maximums mensuels connaissent une grande irrégularité spatiale et quantitative des valeurs atteintes. Elles peuvent être très tranchées. Mais les volumes d'eau écoulés sont toujours élevés et montrent l'importance des ressources disponibles en eau de surface.

Cependant, les développements qui ont précédé n'ont été établis qu'à partir des valeurs des débits maximaux mensuels. Le Bassin du Sénégal connaît aussi des crues exceptionnelles pour lesquelles seront utilisées les valeurs des débits journaliers maximaux.

B/ LES CRUES EXCEPTIONNELLES ET LES VALEURS JOURNALIERES EXTREMES DANS LE BASSIN DU SENEGAL

Il s'agit de situations extrêmes avec des valeurs très élevées écoulées par les cours d'eau lors des années de très forte hydraulicité qui correspondent aux années de pluviosité très forte.

Les valeurs de débits journaliers extrêmes ont été retenues en comparaison avec les débits maximums moyens mensuels. Elles sont très élevées et elles sont observées le plus souvent lors des années des maximums extrêmes. Ici donc, il s'agit de valeurs journalières et non de valeurs mensuelles (exemple à Bakel figure n° 48).

TABLEAU N°73:ETUDE FREQUENTIELLE DES DEBITS MAXIMAUX MENSUELS EN M3/S

	D. SAIDOU			DIBIA			GALOUGO			KAYES			TOUKOTO			KIDIRA			BAKEL		
	Q _F	q	V	Q _F	q	V	Q _F	q	V	Q _F	q	V	Q _F	q	V	Q _F	q	V	Q _F	q	V
F:0.01	580	36.9	1.80	700	20.9	2.21	900	7.01	2.84	950	6.04	3.00	80	4.85	0.25	200	6.92	0.63	900	4.13	2.84
F:0.02	600	38.2	1.83	750	22.4	2.37	1100	8.57	3.15	1050	6.67	3.31	90	5.45	0.28	250	8.65	0.79	1000	4.59	3.47
F:0.05	650	41.4	2.05	900	26.9	2.84	1300	10.1	4.09	1280	8.13	4.04	130	7.28	0.41	340	11.8	1.07	1300	5.96	4.09
F:0.10	720	45.9	2.27	1050	31.3	3.31	1550	12.1	5.04	1500	9.53	4.73	160	9.70	0.50	400	13.8	1.26	1600	7.34	4.89
F:0.20	820	52.2	2.58	1250	37.3	3.94	1880	14.6	6.31	1900	12.1	6.00	210	12.7	0.66	550	19.0	1.73	2000	9.17	5.93
F:0.50	1040	66.2	3.30	1750	52.2	5.52	2600	20.2	10.1	2700	17.2	8.51	350	21.2	1.10	850	29.4	2.68	3200	14.7	8.20
F:0.80	1260	80.3	3.97	2220	66.3	7.00	3400	26.5	14.5	3600	22.9	11.4	490	29.7	1.54	1200	41.5	3.78	4600	21.1	10.7
F:0.90	1390	88.5	4.38	2400	71.6	7.57	3750	29.2	16.6	3950	25.1	12.5	580	35.2	1.83	1380	47.8	4.35	5250	24.1	11.8
F:0.95	1440	91.7	4.54	2520	75.2	7.95	3920	30.5	18.3	4200	26.7	13.2	640	38.8	2.02	1520	52.6	4.79	5800	26.6	12.4
F:0.98	1480	94.3	4.67	2680	80.0	8.45	4120	32.1	19.7	4500	28.6	14.2	680	41.2	2.14	1650	57.1	5.20	6250	28.7	13.0
F:0.99	1490	94.9	4.7	2700	80.6	8.51	4200	32.7	20.8	4700	29.9	14.8	700	42.4	2.21	1750	60.6	5.52	6600	30.3	13.2

- 366 -

F : Fréquences Q_F : Débit maximum mensuel fréquentiel en m³/s q : Débit fréquentiel en l/s/km²
 V : Volume maximum mensuel écoulé en m³. V en E¹⁰

Pour les stations de Matam, Bakel et Kayes, il s'agit des records de la période 1903 - 1980 parmi lesquels les records absolus, c'est-à-dire les débits journaliers les plus élevés des 28 470 jours d'écoulement de la période, respectivement :

- à Matam 8 200 m³/s le 4 septembre 1936. A = 17,1 ; la lame d'eau écoulée = 1 124 mm ; le débit spécifique : 35,6 l/s/km² ; le volume total d'eau écoulée = 25,9 E 10 m³ ;

- à Bakel 9 340 m³/s le 24 août 1906. A = 19,4 ; la lame d'eau écoulée = 1 351 mm ; le débit spécifique = 42,8 l/s/km² ; le volume total d'eau écoulée = 29,4 E 10 m³ ;

- à Kayes 5 945 m³/s le 25 août 1950. A = 15,0 ; la lame d'eau écoulée = 1 191 mm ; le débit spécifique = 37,8 l/s/km² ; le volume d'eau écoulée = 18,7 E 10 m³ ;

- pour les autres stations, il s'agit des records de la période 1950 - 1964.

1. La puissance des crues et leurs fréquences d'apparition

La puissance des crues peut être définie par des critères numériques parmi lesquels nous retenons le coefficient de crue A (1) de P. MYER, A. COUTAGNE et M. PARDE (1961), tableau n° 74 .

Ce critère retient ainsi la valeur la plus élevée de la crue exceptionnelle (une donnée variable) et la superficie du bassin, un paramètre qui ne varie pas.

(1) Suivant les valeurs de A, M. PARDE qualifie la puissance des crues de :

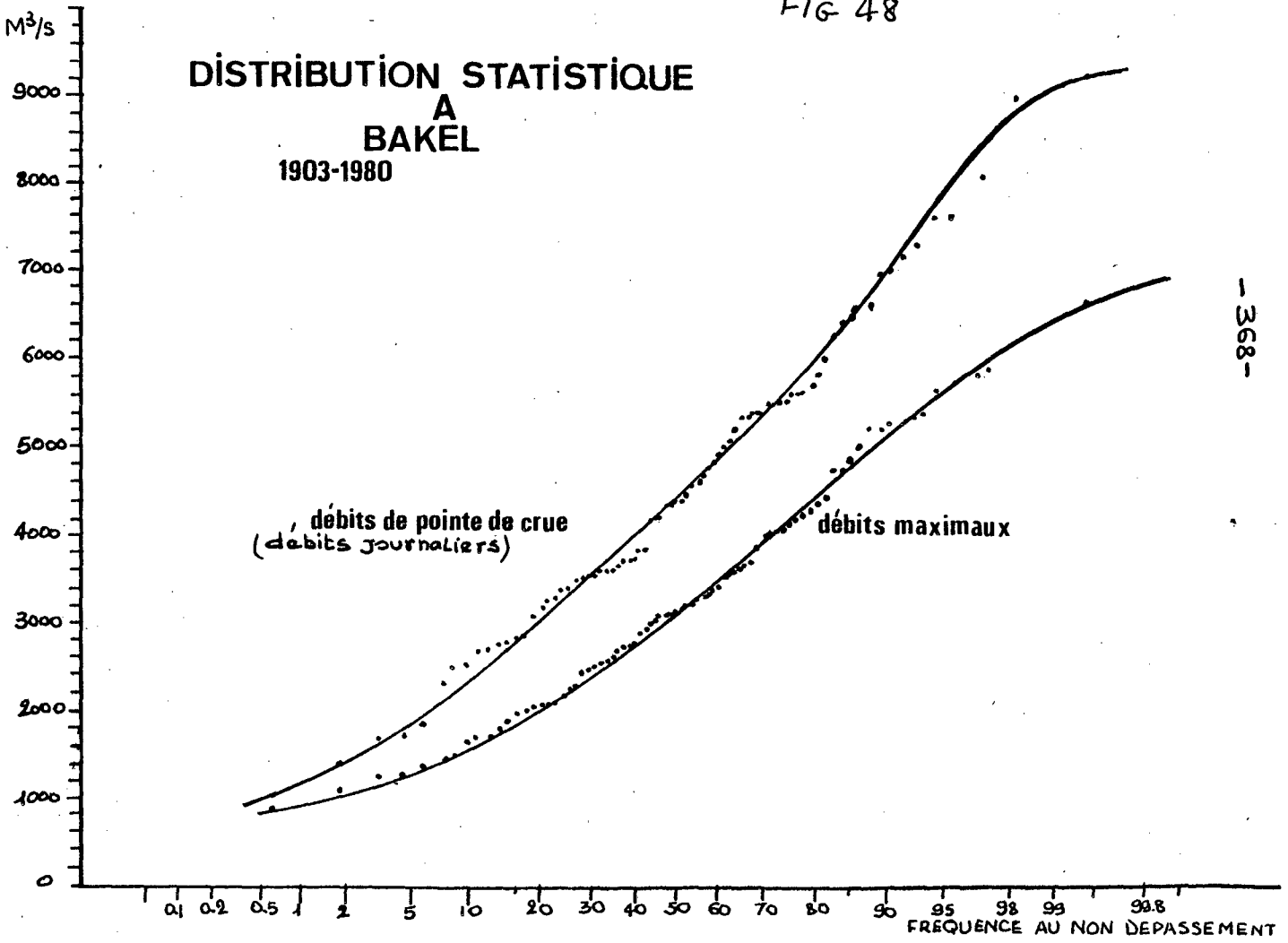
- médiocre ou modérée : $A < 60$;
- forte ou très forte : A de 60 à 120 ;
- formidable : A de 120 à 180 ;
- et exorbitante : A de 180 à 300 ou plus.

FIG 48

DISTRIBUTION STATISTIQUE

A
BAKEL

1903-1980



- 368 -

On constate que les crues exceptionnelles du bassin du Sénégal ont des puissances médiocres ($A < 60$). Ces crues exceptionnelles interviennent toutes lors de l'année des maximums maximorum mensuels. Elles interviennent toutes en septembre aussi, le plus souvent, mais aussi en août et rarement en octobre. Nous donnons dans le tableau n° 74 les observations de la station de Bakel pour laquelle nous avons les valeurs journalières sur une longue série (78 ans).

On observe aussi que pour les stations en amont sur les rivières, la crue exceptionnelle se manifeste durant la première décade du mois de septembre, en aval elle se manifeste dans la deuxième décade de ce mois. Si la crue intervient au mois d'août, c'est alors la dernière décade du mois.

Dans le Bassin du Sénégal, aucune crue exceptionnelle n'est enregistrée en octobre. Cependant, les conclusions de A BALLO (1984) nous permettent d'avancer qu'en milieu tropical, au mois d'octobre, la crue exceptionnelle intervient surtout dans la première décade du mois.

Cependant, dans l'ensemble, pour les crues exceptionnelles retenues, deux années particulières se dégagent : l'année 1922 qui semble avoir connu les crues exceptionnelles maximales sur le Sénégal-Bafing à Kayes et Matam, et l'année 1964 pour le Bafing, le Bakoye et la Falémé.

Certaines crues exceptionnelles sont intervenues en 1954 ou 1958. Dans l'ensemble, on observe surtout que ces crues exceptionnelles sont enregistrées durant des périodes à forte pluviosité : les années 1906 et 1922 qui précèdent et suivent la période sèche des années 1910, l'année 1936 qui précède la sécheresse des années 1940 et surtout les années 1950 qui semblent coïncider avec un maximum pluviométrique et les années 1964 qui précèdent celles de la sécheresse récente (1968 - 1982).

L'analyse de l'année de la crue exceptionnelle de 1922 permet d'étudier l'évolution des crues exceptionnelles du Sénégal (Fig. n° 50).

TABLEAU N° 74 "CRUES EXCEPTIONNELLES DANS LE BASSIN DU SENEGAL"

(Valeurs journalières en M³/s des crues exceptionnelles)

	1906			1922			1936			1950			1954			1956			1958			1959			1964					
	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A	Q	date	A			
LE SENEGAL BAFING A																														
MATAM	7700	31/8	16.1	7480	28/9	15.6	8200	4/9	17.1	7000	10/9	14.6													4610	12/9	9.6	5620	30/9	11.7
BAKEL	9340	24/8	19.4	9070	25/9	19.4	7600	22/8	16.3	7630	6/9	16.3																		
KAYES	4805	12/8	12.1	5880	18/9	14.8	5730	20/8	14.4	5945	25/8	15.0																		
GALOUGO													5350	24/8	14.9															
DIBIA																														
DAKKA SAIDOU																														
LA FALEME A																														
KIDIRA																														
GOURBASSI																														
FADOUGOU																														
LEBAKOYE A																														
OUALIA																														
TOUKOTO																														

Q = débit écoulé en M³/s

A = coefficient de crue de M. PARDE

2. La crue exceptionnelle de 1922 et son évolution

Lors de l'année 1922, la station de Bakel n'a pas enregistré sa crue. Celle-ci eut lieu en 1906 avec un débit de $9\,340\text{ m}^3/\text{s}$. Mais en 1922, la station de Bakel a enregistré un débit de $9\,070\text{ m}^3/\text{s}$, valeur la plus élevée après le maximum maximorum de 1906.

C'est donc au niveau des trois stations Kayes, Bakel et Matam que nous étudions l'évolution de la crue exceptionnelle.

Sur la figure n° 50, les valeurs journalières atteintes par le Sénégal-Bafing à Kayes, Bakel et Matam lors de la crue annuelle (période de hautes eaux) de 1922 sont représentées du 1er juillet au 22 décembre.

Les trois courbes présentent deux phases : une montée des débits journaliers et une phase de descente. Cette évolution est conforme aux variations intermensuelles des débits. Mais on observe que (Fig. n° 50) la montée des débits est partout irrégulière. Elle se manifeste par une série de " pics " de pulsations suivie d'une phase de descente. Cette évolution irrégulière se maintient jusqu'au maximum de la crue.

On peut dans le détail noter que la subite montée du débit journalier à Kayes le 22 juillet est enregistrée à Bakel le 25 juillet et à Matam le 26 juillet. La pulsation du 20 août à Kayes est notée à Bakel le 22 août et seulement le 31 août à Matam. Enfin, la pointe de la crue est enregistrée à Kayes le 18 septembre avec un débit de $5\,880\text{ m}^3/\text{s}$. Elle arrive à Bakel le 25 septembre, soit 7 jours plus tard, avec une valeur de $9\,070\text{ m}^3/\text{s}$. La pointe de crue se produit à Matam le 28 septembre, soit 3 jours plus tard qu'à Bakel avec un débit de $7\,480\text{ m}^3/\text{s}$. Le même débit est noté le 29 septembre également. Cependant, il a diminué de $1\,590\text{ m}^3/\text{s}$ par rapport à Bakel. Mais par rapport à Kayes, on note une augmentation de $1\,680\text{ m}^3/\text{s}$.

Entre Kayes et Bakel, l'augmentation est de $3\,190\text{ m}^3/\text{s}$, valeur qui tient compte de l'arrivée des crues exceptionnelles de la Falémé, du Kolimbiné et du Karakoro en aval de Kayes. Par exemple, la Falémé à Kidira lors de la crue exceptionnelle maximale de la période 1903 - 1980 enregistrait $2\,855\text{ m}^3/\text{s}$.

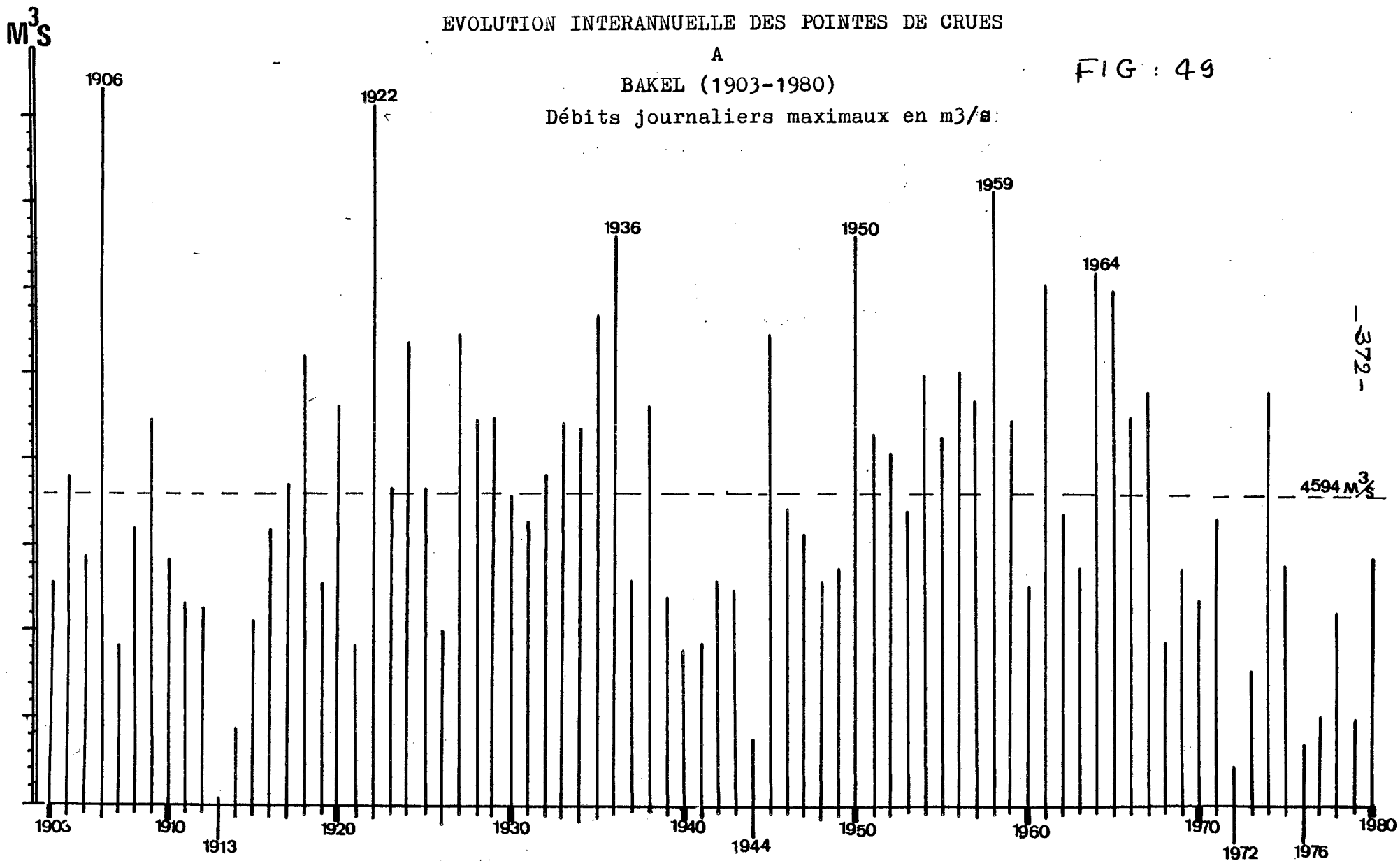
EVOLUTION INTERANNUELLE DES POINTES DE CRUES

A

BAKEL (1903-1980)

Débits journaliers maximaux en m³/s

FIG : 49



En somme, on peut attribuer l'irrégulière montée de la crue exceptionnelle de 1922 sous forme de pulsations aux averses pluvieuses dans le bassin, mais aussi à l'arrivée des crues exceptionnelles des rivières en amont : le Bakoye, le Baoulé ...

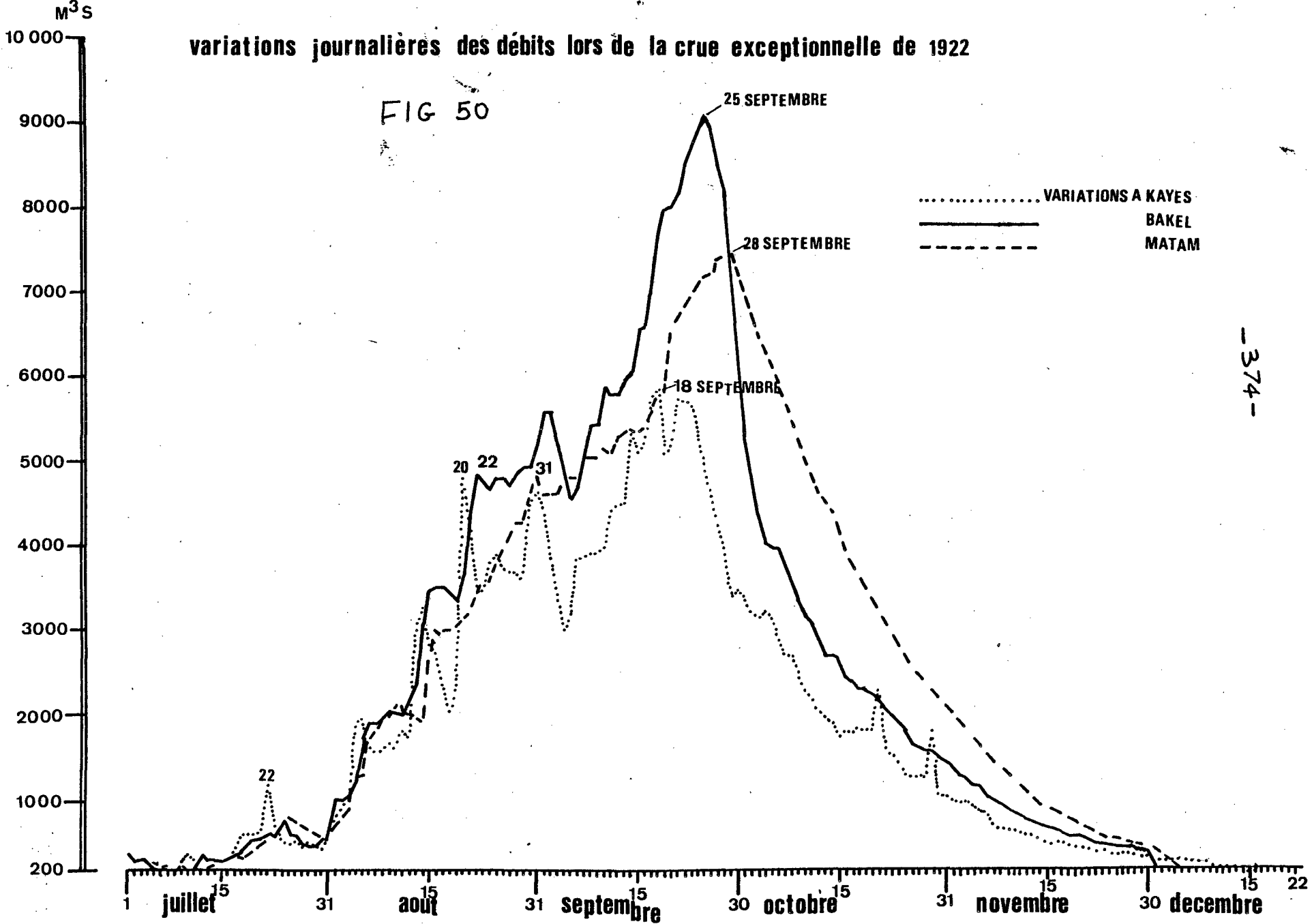
Le décalage entre le passage de la crue exceptionnelle à Kayes et à Bakel (7 jours) est somme toute assez important. Mais il s'agit d'une année particulière. En revanche, entre Bakel et Matam, il ne s'est passé que 3 jours entre le passage des deux maximums. Seulement, il s'agit toujours d'une année de crue exceptionnelle. Nous donnons dans le tableau suivant le temps moyen de propagation du débit journalier maximal calculé par C. ROCHETTE (1974). Du reste, notre analyse complète pour une part celle de cet auteur présentée dans la monographie du Fleuve Sénégal de laquelle nous tirons certaines données.

Tableau n° 75. Temps et vitesse de propagation du débit journalier d'après C. ROCHETTE (1974).

Section	Temps de propagation (jours)	Vitesse de propagation (km/jour)	Distances (km)
<u>La Falémé</u>			
Fadougou/Gourbassi	2	84	168
Gourbassi/Kidira	2,3	84	192
Fadougou/Kidira	4,3	84	360
Fadougou/confluent	(5,0)	(82)	410
<u>Le Bafing</u>			
Dakka-Saidou/Dibia	1,7	168	168
Dakka-Saidou/confluent	(2,2)	(170)	377
<u>Le Sénégal moyen</u>			
Bafoulabé/Kayes	1	127	127
Kayes/Bakel	1,8	70	126
Kidira/Bakel	1,2	67	80
Bakel/Matam	entre 1 et 9	entre 170 et 19	

variations journalières des débits lors de la crue exceptionnelle de 1922

FIG 50



-374-

On observe enfin que les valeurs atteintes par les crues exceptionnelles sont variables en valeurs brutes. On ne peut retenir que l'année 1964 comme année de crue exceptionnelle ressentie dans tout le bassin. Encore que pour cette année les valeurs atteintes sont diverses et souvent très éloignées des records absolus. Cela est dû au fait que, comme nous l'avons souligné, c'est l'averse qui est à la base du déclenchement de la crue. L'averse elle-même est liée aux conditions météorologiques et surtout au rythme de la mousson et de son épaisseur, variable en fonction des domaines climatiques. Cependant, chaque saison pluvieuse ayant un cachet particulier, lors des années à faible pluviosité, l'écoulement moyen est réduit et peut atteindre des valeurs extrêmement faibles caractéristiques d'étiages exceptionnels.

C/ L'ETUDE DES MINIMUMS MENSUELS OU ETIAGES ANNUELS

L'étude des minimums mensuels correspondant aux étiages annuels dans le Bassin du Sénégal-Bafing est très difficile à mener du fait de la qualité des données d'étiages si toutefois elles existent.

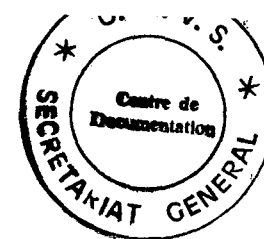
Les seules stations dont les données semblent d'assez bonne qualité sont les stations de Bakel, de Kayes, de Galougo, de Dibia, de Oualia et de Kidira. Encore que pour ces stations, les données journalières ne couvrent pas quelquefois toute l'année hydrologique. Ainsi, les mois de la période de basses eaux ne connaissent que quatre relevés journaliers indiqués avec beaucoup de réserves. La moyenne mensuelle de ces mois est toutefois toujours donnée et il faudrait considérer les développements qui vont suivre avec beaucoup de réserves.

Nous avons noté le retour systématique sur une série d'années de la même valeur moyenne mensuelle minimale de l'année hydrologique.

Par exemple, à Bakel, sur l'échantillon de 78 années d'observation, 40 années de suite ont la même valeur pour le minimum mensuel : $10 \text{ m}^3/\text{s}$ au mois de mai.

A Kayes, sur 11 ans de suite, on observe la même valeur pour l'étiage annuel ($11 \text{ m}^3/\text{s}$) ; et 23 années ont la même valeur d'étiage annuel égal à

1903-1980



S T A T I O N S	MAXIMUMS MAXIMORUM M3/S	MAXIMUMS MINIMORUM M3/S	I . V M3/S	R
MATAM	5880 en Sept. 1922	1030 en Sept. 1913	4850	5,7
BAKEL	6746 en Sept. 1922	918 en Sept. 1913	5828	7,3
KAYES	4525 en Sept. 1922	747 en Sept. 1913	3778	6,1
GALOUGO	4043 en Sept. 1964	798 en Sept. 1913	3245	5,1
DIBIA	2621 en Sept. 1964	631 en Août 1913	1990	4,2
DAKKA-SAIDOU	1434 en Août	557 en Sept. 1913	877	2,6
KIDIRA	1808 en Sept. 1922	164 en Sept. 1913	1644	11,0
GOURBASSI	1258 en Sept. 1964	271 en Sept. 1913	987	4,6
FADOUGOU	973 en Août 1954	174 en Sept. 1913	799	5,6
OUALIA	1367 en Sept. 1964	139 en Août 1973	1228	9,8
SIRAMAKANA	1028 en Août 1958	4 en Oct. 1977	1024	257
TOUKOTO	691 en Sept. 1964	72 en Sept. 1972	619	9,6

9,1 m³/s. A la station de Oualia, on note le même cas pour la valeur 0,64 m³/s qui revient 25 fois, à Kidira la valeur 0,87 m³/s est notée 30 fois de suite.

Ce retour systématique de la même valeur plusieurs années de suite rend inutile la recherche d'une loi de distribution des débits minimaux mensuels et leur prédétermination.

Du reste, ce sont les mois d'étiage annuel qui présentent les coefficients de corrélation entre stations les plus faibles (tableau n° 34).

La difficulté technique de mesure des étiages annuels et la qualité des données existantes rendent ainsi moins précise l'analyse des minimums mensuels. Nous avons constitué un échantillon de 78 valeurs de minimums mensuels aux stations de Kidira pour la Falémé, de Oualia pour le Bakoye et aux stations de Dakka-Saïdou, Galougo, Kayes et Bakel pour le Sénégal-Bafing.

Pour les stations du Cours Inférieur, Matam et Dagana, nous rappelons les valeurs moyennes des minimums pour la période 1903 - 1969 à titre indicatif.

Nous avons établi des corrélations entre débits minimaux de ces différentes stations dont les résultats sont les suivants :

- Bakel/Kayes : $Y = 0,76$; Q à Bakel + 1,17, $R(1) = 0,94$;
- Kayes/Galougo : $Y = 1,13$; Q à Kayes + 0,76, $R = 0,99$;
- Galougo/Oualia : $Y = 0,09$; Q à Galougo - 0,19 ; $R = 0,94$;
- Galougo/Dakka-Saïdou : $Y = 1,09$; Q à Galougo + 3,61 ; $R = 0,94$;
- Kayes/Kidira : $Y = 0,06$; Q à Kayes + 0,35 ; $R = 0,67$.

On observe tout de même de bonnes corrélations entre les stations installées sur le Sénégal-Bafing, ce qui est logique. Cependant, la corrélation est mauvaise pour les minimums du Sénégal-Bafing à Kayes et de la Falémé à Kidira.

(1) Rappel : R est le coefficient de corrélation.

TABLEAU N° 77 : BASSIN DU SENEGAL ETUDE DES DEBITS MINIMAUX MENSUELS EN M³/S
PERIODE 1903 - 1980

	\bar{Q}	q	Emm	V m ³	FREQUENCE AVRIL % MAI	MINIMUMS MAXI -	EXTREMES MINI	C.V	R	
<u>LE SENEGAL-BAFING</u>										
à BAKEL	8.17	0.04	1.18	2.57E ⁸	12	68 ¹	32 mai 55	0.3 m ³ /s JUIN	0.6	106.7
KAYES	7.37	0.05	1.48	2.32E ⁸	36	64	29.7 mai 1955	1 mai 1940	0.5	22.7
GALOUGO	9.07	0.07	1.48	2.32E ⁸	29	71	28 mai 1954	0.41 mai 1974	0.5	68.3
DAKKA-SAÏDOU	13.5	0.86	27.1	4.25E ⁸	92	8	38.7 mai 1954	5.7 avril 63	0.4	6.8
<u>LA FALEME à</u>										
KIDIRA	0.87	0.03	0.95	2.7E ⁷	-	-	-	-	0.5	-
<u>LE BAKOYE à</u>										
OUALIA	0.60	0.01	0.22	1.8E ⁷	29	72 ²	1.9 mai 68	0.1 mai 64	0.7	19.0

\bar{Q} : module en M³/S q : en L/s/km² V en m³ Emm : en millimètres

1. à Bakel un seul minimum est noté en juin 1916 soit 10%

2. à Oualia Les fréquences sont calculées sur 66 ans

Les critères habituels (débits bruts, débits spécifiques, variabilité spatio-temporelle) permettent de comprendre néanmoins la gravité des phénomènes d'étiages annuels et leur genèse.

1. La gravité du phénomène d'étiages annuels

Nous menons l'analyse au niveau des débits minimums mensuels.

On observe que du domaine guinéen de transition dans le Sud du bassin vers le Nord sahélien, la valeur brute de l'étiage annuel diminue de l'amont vers l'aval.

Si pour le module spécifique du minimum mensuel, cette diminution est conforme à l'augmentation de la superficie des bassins, le module brut d'étiage évolue à l'inverse de l'abondance moyenne annuelle brute.

Ainsi à Dakka-Saïdou en domaine guinéen, le module brut d'étiage annuel est de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,86 \text{ l/s/km}^2$. Il diminue de 72 % en moyenne à Galougo en domaine tropical pur ou Nord-soudanien : il est de $9,07 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,07 \text{ l/s/km}^2$). Cette valeur doit tenir compte également des apports faibles durant cette période du Bakoye qui connaît à Oualia un débit de $0,60 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,01 \text{ l/s/km}^2$.

Entre Kayes et Galougo, le débit minimal moyen diminue faiblement de 28 %. Il est à Kayes de $7,37 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,05 \text{ l/s/km}^2$. La faible diminution doit tenir compte de la proximité des 2 stations.

En aval de Kayes, le module d'étiage augmente : il est de $8,17 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel, soit une légère augmentation de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ et un débit spécifique de $0,04 \text{ l/s/km}^2$. Cette valeur doit tenir compte des apports de la Falémé qui à Kidira connaît une valeur de $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,03 \text{ l/s/km}^2$. Mais elle doit tenir compte aussi des apports des réserves souterraines car la station est située dans un secteur où les nappes alluviales de soutien peuvent être importantes.

Cependant, ces valeurs brutes et spécifiques sont très faibles. Sur le

bassin du Niger (1), par exemple à Koulikoro, le Niger enregistre un débit d'étiage moyen annuel de $59,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (période 1903 - 1982). Le Bani à Douna connaît une valeur de $19,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (période 1951 - 1980). Pour le Niger, ces valeurs plus élevées s'expliquent pour une part par la lithologie, par les réserves qui soutiennent les bas débits.

On peut noter aussi qu'en régime équatorial au Cameroun, le Ntem à Ngoazik (2) qui a un bassin-versant de $18\ 100 \text{ km}^2$ sensiblement égal à celui du Sénégal-Bafing à Dakka-Saïdou connaît un étiage annuel dont la valeur spécifique est de $5,10 \text{ l/s/km}^2$. A Dakka-Saïdou ($B.V = 15\ 700 \text{ km}^2$), l'étiage annuel spécifique n'est que de $0,86 \text{ l/s/km}^2$.

Pour ces cours d'eau du Cameroun, les valeurs spécifiques s'expliquent par l'importance des précipitations et surtout par le régime pluviométrique à deux maximums annuels.

Le Sénégal par exemple à Bakel n'a jamais enregistré une valeur de débit minimal moyen mensuel supérieure à $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de 1903 à 1980. Ce qui correspondrait à un étiage spécifique annuel de $0,18 \text{ l/s/km}^2$.

Ainsi les lames d'eau écoulées dans le Bassin du Sénégal correspondant à ces minimums mensuels sont très faibles. Elles se situent entre $0,22 \text{ mm/an}$ pour le Bakoye à Oualia, $0,95 \text{ mm}$ pour la Falémé à Kidira, $1,18 \text{ mm}$ pour le Sénégal-Bafing à Bakel, $1,48 \text{ mm}$ à Kayes, $2,23 \text{ mm}$ à Kayes et $27,1 \text{ mm}$ à Dakka-Saïdou.

Les volumes totaux en m^3 écoulés en année moyenne sont aussi très faibles. Ils correspondent à la disponibilité en eaux de surface durant ces périodes (tableau n° 77).

(1) Les données du Niger sont empruntées à A BALLO (1984).

(2) Les données sont empruntées à J.C OLIVRY (1984).

2. La fréquence d'apparition des étiages annuels : une relative stabilité dans le temps

Ces minimums moyens mensuels interviennent tous durant la période des basses eaux ou période d'étiage annuel. Ils interviennent aussi à la fin de cette période et les dates limites sont les mois d'avril et de mai. Dans le tableau n° 77 nous donnons les fréquences d'apparition de ces minimums mensuels.

En domaine guinéen à Dakka-Saidou, le minimum annuel est noté en avril pour une fréquence de 92 % des observations (78 années). Nous avons noté aussi que pour les variantes Sud et continentale du domaine tropical pur, le minimum annuel est noté en avril (cf. Toukoto et Dibia chapitre IV).

Seulement pour le reste du bassin, dans tout le domaine tropical pur ou Nord-soudanien, la fréquence maximale est enregistrée en mai (plus de 63 %). On observe aussi qu'en domaine sahélien, le minimum annuel intervient aussi en mai à Matam et Dagana (stations non retenues pour l'analyse moyenne). Un seul maximum a été noté en juin à Bakel en 1916.

Néanmoins, ces fréquences témoignent de la stabilité de la date d'apparition du minimum, toujours durant la période des basses eaux et à la fin de celle-ci.

Il faut néanmoins noter qu'en domaine guinéen, le minimum mensuel intervient en avril, période où il commence déjà à pleuvoir. Mais nous reviendrons sur cette situation.

3. L'irrégularité quantitative des étiages annuels

Nous mesurons l'irrégularité interannuelle par le C.V et le coefficient d'immodération interannuelle R.

Le C.V est compris entre 0,4 et 0,5. Nous rappelons que le C.V est déduit de l'écart-type qui mesure la dispersion des valeurs autour de la moyenne et de cette même moyenne. Or le retour systématique des valeurs annuelles

des minimums réduit quelque peu l'intérêt de la valeur du C.V, car l'écart-type reste le même pour les valeurs identiques.

Mais l'écart entre les valeurs interannuelles du minimum mensuel peut être très important, et le rapport de ces valeurs extrêmes témoigne de la grande immodération interannuelle du minimum : R = 106,7 à Bakel, 68,3 à Galougo, etc ... (tableau n°).

Du reste, certains cours d'eau tels que la Falémé à Kidira, le Bakoye à Toukoto, le Baoulé à Siramakana peuvent connaître une valeur nulle du minimum durant les années sèches. Il s'agit d'un arrêt total de l'écoulement de surface qui se réduit à une circulation dans les alluvions des lits des rivières (underflow).

*

* *

Cependant, il faut noter que la gravité des phénomènes d'étiages annuels, leur variabilité spatio-temporelle et leur stabilité d'apparition s'expliquent par la genèse même du phénomène.

4. La genèse des étiages en domaine tropical humide

La figure n° 51 sur laquelle nous représentons les variations moyennes mensuelles des débits et de la pluviométrie montre que le minimum de l'écoulement annuel intervient en période de basses eaux et à la fin de cette période d'étiage annuel.

En milieu tropical humide, la période des basses eaux coïncide avec la saison non pluvieuse, d'où une absence d'alimentation pour les cours d'eau.

Ainsi, la genèse de la période d'étiage annuel est avant tout le fait des facteurs climatiques pour lesquels il faut retenir que :

* la période qui va d'octobre à juin pour les domaines tropical pur,

Nord-soudanien et sahélien est une période sèche pluviométriquement ;

* dans cette période les mois de février, mars et avril correspondent à l'augmentation de la température moyenne et les phénomènes induits E.T et E.T.P ;

* au cours de cette période, l'humidité relative connaît ses valeurs les plus faibles et dès le mois de mars le bassin connaît les incursions de vents continentaux " harmattan " chauds et secs.

Ainsi, ce sont les éléments climatiques et les facteurs aérologiques qui expliquent la décroissance des débits mensuels à partir du maximum annuel. La décroissance s'explique d'abord par l'arrêt des pluies et son prolongement sur une longue période correspond aux éléments climatiques limitants qui atteignent leurs valeurs maximales durant cette période en l'absence de toute alimentation.

Mais il faut nuancer cette explication pour le domaine guinéen du bassin. Il connaît les valeurs les plus faibles de l'E.T et de l'E.T.P car les températures y sont plus faibles vu l'altitude. Il pleut pratiquement pendant 10 mois, de mars à décembre (Fig. n° 5/).

Mais au mois de mars et avril, les premières ondées, somme toute faibles, alimentent les réserves et remplissent les vallons dans la montagne guinéenne. Les pentes y sont fortes et peuvent permettre un écoulement rapide, mais l'évaporation est encore importante. Les faibles pluies ne suffisent pas cependant à limiter ses valeurs moyennes. Ainsi, le minimum intervient au mois d'avril suivi par une montée assez rapide des débits entre avril et mai.

Malgré tout, ce domaine connaît la valeur du minimum mensuel la plus élevée du bassin.

Au sortir du Haut-Bassin du Sénégal, à Bakel, le minimum mensuel est de $8,17 \text{ m}^3/\text{s}$. A Matam, dans le Cours Inférieur, le minimum mensuel reste à $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (moyenne de la période 1903 - 1964). Il s'agit d'une stabilisation de la valeur du minimum, peu différente de celle de Bakel. A Saldé dans le Cours Inférieur toujours, le minimum est de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (1952 - 1964). A Dagana,

il est de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (1903 - 1964). On observe ainsi une augmentation du minimum mensuel dans le Cours Inférieur du fleuve.

L'écoulement dans le bassin durant la période des basses eaux s'explique ainsi aisément : les principaux cours d'eau (Falémé, Bakoye, Bafing) prennent leur source dans le Fouta-Djalou en domaine guinéen ou sur des contre-forts immédiats.

La longueur de la saison pluvieuse (10 mois) dans le domaine explique le maintien de l'écoulement en aval dans le domaine climatique soudanien où il ne pleut plus à partir du mois d'octobre. L'intervention des facteurs limitants dans ce domaine soudanien qui favorisent des pertes importantes explique les variations spatiales de l'écoulement durant la période des basses eaux, notamment la valeur brute du minimum.

Ce minimum mensuel diminue ainsi de l'amont vers l'aval en l'absence de toute alimentation. Même si des réserves souterraines peuvent exister dans le Haut-Bassin, elles sont faibles et se limitent aux alluvions des lits des cours d'eau, car les modules minimaux sont faibles et ils peuvent s'annuler pour certains cours d'eau du Haut-Bassin.

Dans le Cours Inférieur, à partir de Bakel, le minimum mensuel se stabilise d'abord et augmente ensuite dans le Cours Inférieur, en l'absence de toute alimentation dans un secteur sahélien défavorable pourtant à l'écoulement dans l'ensemble. L'écoulement durant la période des basses eaux, notamment l'importance du minimum mensuel, s'explique par le soutien des nappes qui sont importantes dans ce secteur. Le soutien est réalisé par les nappes alluviales dans le lit du fleuve et par les nappes proches du lit. Il s'agit en somme d'une sorte de déstockage au profit du lit mineur du fleuve.

5. Etude du tarissement dans le Bassin du Sénégal

Elle permet de compléter l'analyse de la genèse des étiages et d'expliquer les formes de la courbe de décroissance des débits à partir du maximum annuel.

On reporte les débits journaliers de la période de décroissance des débits

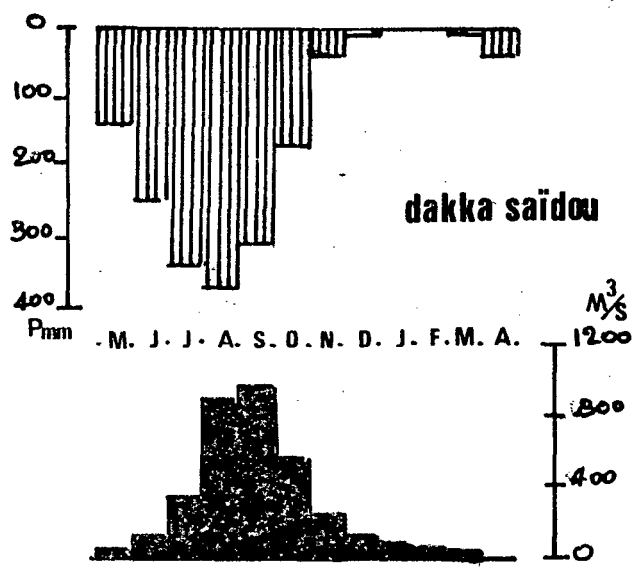
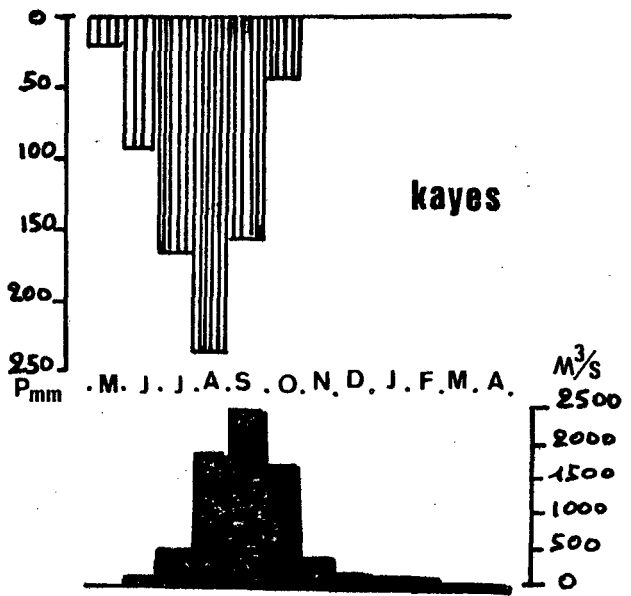
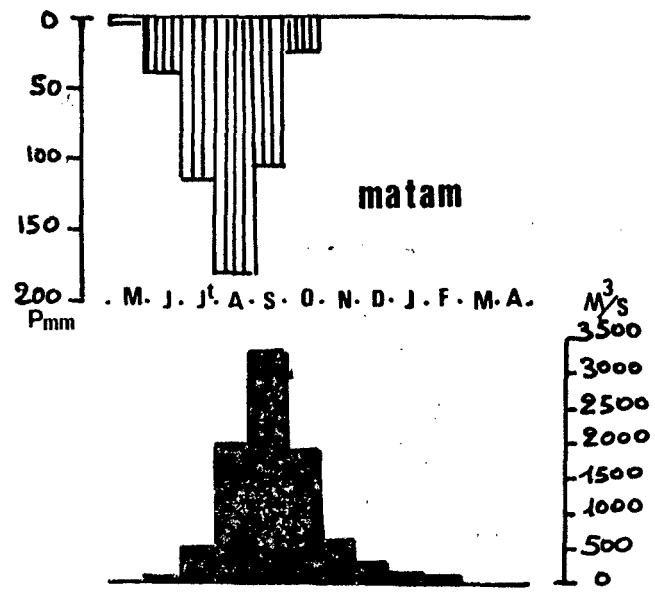


FIG: 51

BASSIN DU SENEGAL
 EVOLUTION MENSUELLE DE LA PLUVIOMETRIE EN MM
 ET DES DEBITS MOYENS EN M³/S

en diagramme semi-logarithmique avec en ordonnée logarithmique les débits et les temps en jours sur l'abscisse arithmétique.

En diagramme semi-logarithmique, l'ajustement de la série des débits décroissants se traduit par une droite si la loi exponentielle est vérifiée, car en général le tarissement suit une loi exponentielle de la forme

$$Q = Q_0 e^{-Kt}$$

avec Q_0 = le débit au jour J ;

Q = le débit au jour $J + t$;

t = le nombre de jours entre les débits Q_0 et Q ;

K = le coefficient de tarissement ou de décroissance des débits.

Le tarissement des cours du bassin a été étudié par C. ROCHETTE (1974) avec précision pour un nombre d'années assez important et avec des débits utilisés assez bien connus. L'absence de données fiables nous amène à reprendre les conclusions de cet auteur auquel nous renvoyons du reste pour les précisions.

La décroissance des débits est exprimée par la figure n° 52 où elle est étudiée pour les stations de Bakel, Galougo, Dibia, Oualia et Kidira en 1956 - 1957.

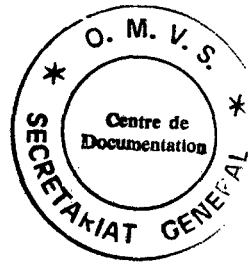
On observe la similitude des courbes des stations de Bakel et Galougo sur le Sénégal-Bafing et de Oualia sur le Bakoye.

En fait, les courbes obéissent à deux lois exponentielles exprimant la première le tarissement ou la vidange vraie des nappes, suivie d'une seconde loi exprimant l'épuisement des réserves.

La première loi : le tarissement obéit à la loi

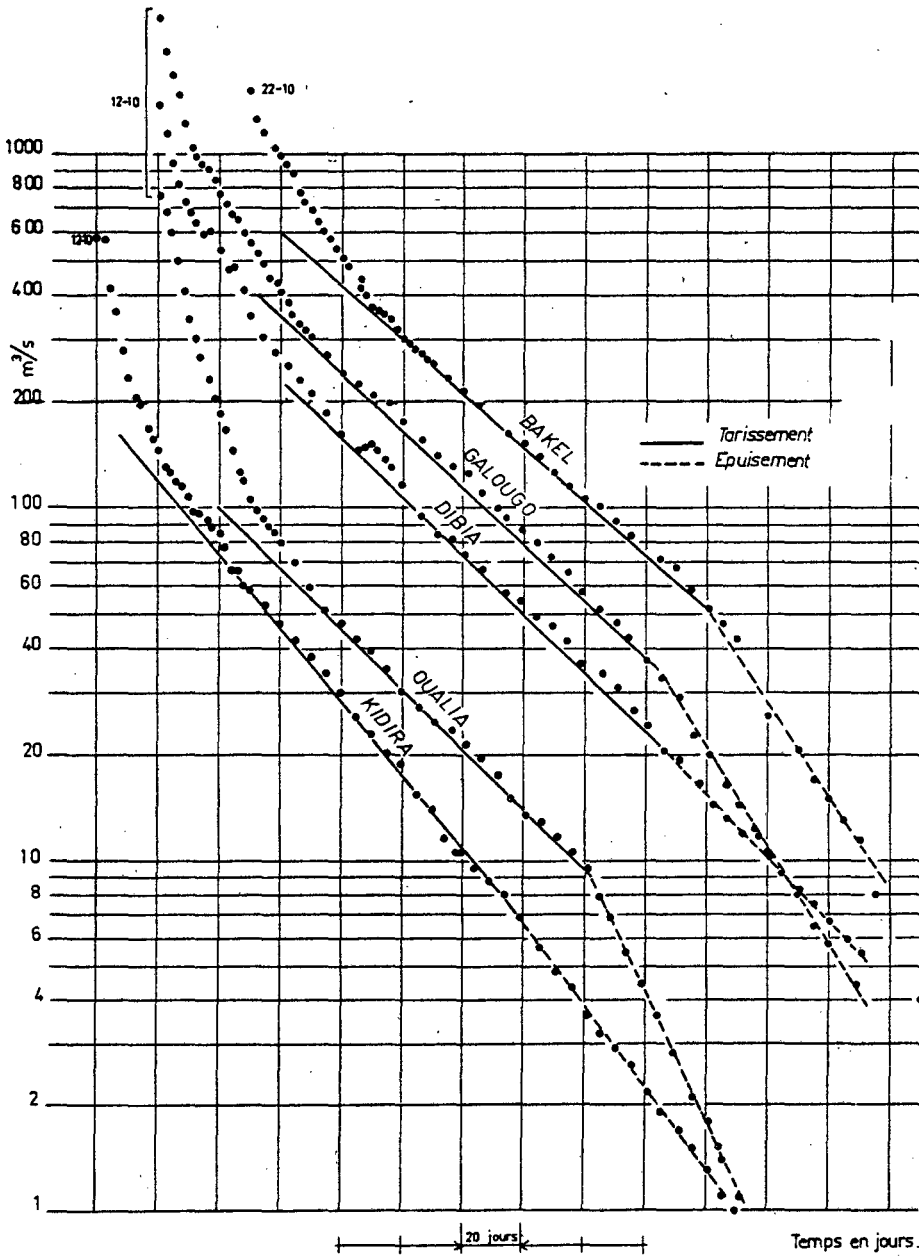
$$Q = Q_0 e^{-Kt}$$

Q_0 correspond aux débits de charnière du début du tarissement, K est le coefficient de tarissement.



COURBES DE TARISSEMENT CARACTERISTIQUES
(Années 1956-57)

FIG : 52



d'après C. Rochette (1974)

La seconde loi appelée épuisement obéit à une même loi

$$Q' = Q'o e^{-K't'}$$

$Q'o$ = les débits au début de l'épuisement ;

K' = le coefficient d'épuisement ;

t sur la première loi correspond au nombre de jours entre les débits Q_0 et Q ;

t' sur la seconde loi correspond au nombre de jours entre $Q'o$ et Q' .

Les coefficients de décroissance respectifs K et K' expriment les lois de tarissement et d'épuisement. K' est supérieur à K . K et K' se déterminent en transformant l'expression du tarissement ou de l'épuisement sous la forme

$$K = \frac{\text{Log de } Q - \text{Log } Q_0}{t}$$

et

$$K' = \frac{\text{Log de } Q' - \text{Log } Q'o}{t'}$$

Plus le coefficient de tarissement est faible, plus le cours d'eau est soutenu en étiage par les nappes. Ainsi, la courbe de tarissement traduit les apports d'origine essentiellement souterraine. Ils seront d'autant plus importants que le tarissement sera lent (K plus faible).

Elle permet aussi de mesurer le volume drainable des réserves du bassin à une date quelconque du tarissement mais surtout au début du tarissement, période où l'écoulement est assuré par les nappes. Il s'agit du débit de base, très important notamment pour l'aménagement : ce volume a pour expression

$$\frac{Q_0}{K}$$

dans le bassin. Durant l'épuisement, le volume écoulé à la station est donné par l'expression

$$\frac{Q_0 - Q'o}{K} + \frac{Q'o}{K}$$

L'ensemble des calculs mène aux résultats suivants donnés par C. ROCHETTE (1974).

Tableau n° 77. Caractéristiques du tarissement d'après C. ROCHETTE (1974).

Rivière	Station	Tarissement			Epuisement			Nombre d'années
		K	N jours	Q ₀ m ³ /s	K'	N'	Q'o	
Bakoye	Toukoto	(0,024)	(95)	(45)				6
	Oualia	0,020	117	90	0,046	50	9	11
Bafing	D. Saïdou	0,014	160	90				7
	Dibia	0,020	114	140				8
Falémé	Kidira	0,024	96	100	0,035	66	3,5	14
Sénégal	Galougo	0,0185	124	260	0,038	60	40	14
	Kayes	0,0185	124	300	0,037	62	54	14
	Bakel	0,0185	125	325	0,048	48	40	15
	Matam	0,0185	123	340	0,046	50	40	14

- les valeurs entre parenthèses sont imprécises ;
- nous ne retenons que les valeurs pour les stations retenues dans l'analyse.

Les coefficients K sont situés entre 0,020 et 0,0185, ce qui traduit l'homogénéité du tarissement des différents bassins. Cependant, le tarissement est plus lent sur le Bafing à Dakka-Saïdou (K = 0,014) que par exemple sur la Falémé à Kidira (K = 0,024). Selon C. ROCHETTE, cette capacité de rétention du Bafing supérieure à la Falémé serait imputable non à leur géologie, mais à un plus épais manteau d'altération sur le Bafing. Cela conduit à la formation de nappes profondes à débit faible en égard au volume d'eau emmagasiné, mais soutenu.

A titre de comparaison, on observe les coefficients de tarissement du Niger à Koulikoro (0,0192), le Bani à Douna (0,024) et le Baoulé à Bougou (0,0425). Ainsi, le Sénégal à Bakel est mieux soutenu que le Niger à Koulikoro. Du reste, dans l'ensemble, le tarissement semble mieux soutenu sur le Bassin du Sénégal.

Les volumes d'eau drainables aux début du tarissement calculés par C. ROCHETTE sont les suivants pour les stations uniquement retenues dans l'analyse.

Tableau n° 78. Volumes drainables au début du tarissement.

Stations	Q m ³ /s	q l/s/km ² = Q/S	V 10 ⁶ m ³	H mm	B.V km ²
Toukoto	30	1,8	105	6,4	16 500
Oualia	45	0,5	200	2,4	84 700
Dakka-Saïdou	106	6,7	635	40,4	15 700
Dibia	160	4,8	715	21,4	33 500
Fadougou	42	4,5	185	19,9	9 300
Gourbassi	42	2,4	192	11,2	17 100
Kidira	45	1,6	165	5,7	28 900
Galougo	245	1,9	1 140	8,9	128 400
Kayes	250	1,6	1 170	7,4	157 400
Bakel	300	1,4	1 410	6,5	218 000

Q = module brut ;

q = module spécifique ;

V = volume total ;

H = lame d'eau.

L'étude des étiages dans le Bassin du Sénégal montre les difficultés d'appréhension de ce phénomène en raison de l'absence de données ou de la qualité même de celles-ci.

Mais elle montre surtout la gravité du phénomène (faiblesse des modules bruts, des lames d'eau écoulées et des volumes totaux disponibles annuellement) durant le mois du minimum, et d'une manière générale pendant une bonne partie de la période des basses eaux.

Elle confirme aussi la stabilité temporelle de la date d'apparition du phénomène durant la période des basses eaux (saison non pluvieuse) et à la fin de celle-ci. Cette stabilité s'explique par la stabilité des facteurs climatiques qui sont à la base de la genèse du phénomène.

Enfin, nous retenons l'irrégularité du phénomène, irrégularité interannuelle du fait même de l'irrégularité des précipitations.

Seulement l'analyse a été faite au niveau des valeurs minimales mensuelles moyennes assimilables à l'étiage moyen. Le Sénégal connaît aussi des étiages exceptionnels beaucoup plus graves que les étiages annuels.

D/ LES ETIAGES EXCEPTIONNELS DU SENEGAL

Il s'agit de valeurs moyennes mensuelles correspondant au minimum minimorum, donc très faibles.

La station de Bakel enregistre sa valeur minimale mensuelle la plus faible en juin 1975, $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à une valeur spécifique de $0,0013 \text{ l/s/km}^2$. Elle enregistre en mai 1939 un minimum mensuel de $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,010 \text{ l/s/km}^2$; $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1973 ; $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1978 ; $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1980.

En 1974, Bakel enregistre un étiage annuel de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ qui intervient toujours au mois de mai.

A Kayes, le minimum mensuel absolu observé intervient en mai 1980 : le

débit d'étiage annuel était de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,006 \text{ l/s/km}^2$. En mai 1950, l'étiage annuel était de $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$; $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1962 ; $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1969 pourtant considérée comme une année humide.

A Galougo, le minimum est descendu à $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1974, soit $0,003 \text{ l/s/km}^2$.

A Oualia, pour la même année, il était de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,002 \text{ l/s/km}^2$. Nous donnons dans le tableau n° quelques valeurs de ces minimums mensuels très faibles.

Dans l'ensemble, ces valeurs extrêmes interviennent durant la période des années " 1970 " qui correspond aux années de la célèbre sécheresse pluviométrique.

Les sécheresses des années " 1910 " et " 1940 " semblent avoir connu des valeurs minimales mensuelles extrêmes moins faibles. Cependant, elles sont observées lors des années très sèches. Certains cours d'eau, comme nous l'avons souligné, ont connu et connaissent encore un arrêt de l'écoulement superficiel durant certains mois de la période d'étiage annuel.

Cependant, ces phénomènes exceptionnels ne sont pas seulement l'apanage des cours d'eau des domaines sahélien et soudanien.

Par exemple, en domaine équatorial, le Nyong (1) à Akonolinga a connu une valeur journalière brute de $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$ le 24 mars 1976-77, soit $0,65 \text{ l/s/km}^2$. A Ayos (2), le débit journalier brut est tombé à $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $0,60 \text{ l/s/km}^2$ le 18 mars 1972-73. Ces valeurs rappellent celles des domaines beaucoup moins humides, sahélien ou tropical pur. L'Oubangui moyen à Bangui (3) a enregistré le 5 avril 1974 un débit spécifique de $0,89 \text{ l/s/km}^2$. Le débit spécifique du Chari (4) inférieur à NDjaména est tombé à $0,07 \text{ l/s/km}^2$ le 24 avril 1974. Il était de $0,14$ en 1945 (5). Le Bani inférieur (6) à Douna a connu un débit spécifique de $0,009 \text{ l/s/km}^2$ le 2 mai 1974.

(1) et (2) : les valeurs sont empruntées à J.C. OLIVRY. (1984).

(3), (4), (5), (6) : les valeurs sont de J. SIRCOULON (1976).

Nous ne donnons que les valeurs les plus caractéristiques mais tous ces grands organismes fluviaux ont connu durant la période 1968 - 1974 des maigres exceptionnels avec des valeurs minimales spécifiques très inférieures à $0,1 \text{ l/s/km}^2$ (R. FRECAUT, 1982).

Même si les fréquences effectives des étiages, de même que la gravité du phénomène affectent plus les voisinages des milieux sahéliens ou désertiques, ils intéressent à des degrés divers les régions chaudes et humides. Ils se traduisent par un allongement anormal de la période normale des basses eaux qui ne connaît pas le plus souvent d'écoulement superficiel.

Ces phénomènes exceptionnels interviennent durant des périodes correspondant aux sécheresses climatiques qui sont à la base de leur genèse. Cependant, ils interviennent aussi durant des années considérées climatiquement comme des années humides, par exemple l'année 1969. Somme toute, il s'agit de phénomènes exceptionnels.

L'étude des formes extrêmes de l'écoulement révèle, si besoin en était, la conformité des régimes avec le rythme des pluies.

La crue dans le Bassin du Sénégal et en milieu tropical humide africain est essentiellement le fait des averses pluvieuses. Les crues sont d'origine exclusivement pluviale. " Elles reflètent elles aussi l'irrégularité de l'écoulement fluvial, le facteur essentiel de leur genèse étant un excès pluviométrique ou averse, caractérisé par son total précipité, sa durée et son intensité " (R. FRECAUT, 1982).

La qualité de l'averse est fonction de la saison pluvieuse. Une année de

très forte pluviosité déclenche des types de crues exceptionnelles. Cependant, exceptionnelle ou moyenne, la crue a une puissance relativement médiocre. L'étiage annuel, de même que l'étiage exceptionnel, est aussi le fait de l'irrégularité des pluies, notamment de son absence pendant une partie de l'année hydrologique, alors que l'étiage exceptionnel est le fait de la diminution notable des totaux précipités durant la saison pluvieuse, diminution atteignant le caractère de sécheresse lors d'années exceptionnelles à très faible pluviosité.

Ainsi, l'organisation du réseau hydrographique du Sénégal, dont les principales rivières naissent dans un domaine à saison pluvieuse plus longue, et la lithologie par les réserves souterraines expliquent respectivement l'écoulement durant la période des basses eaux dans le Haut-Bassin et le Cours Inférieur durant l'année hydrologique.

Cependant, la conscience populaire n'a pas retenu en domaine tropical chaud et humide africain des crues exceptionnelles caractérisées par leur aspect dévastateur (inondations ...). La conscience populaire retient surtout la gravité des étiages consécutifs aux années de sécheresse. Il semble que c'est surtout l'étiage annuel qu'il convient de bien connaître car il survient durant la période " critique " de l'année où les pluies sont absentes. Mais hélas, en raison de la difficulté de leurs estimations et de la mauvaise qualité des données, les précisions restent encore difficiles.

On observe ainsi une conformité entre régimes hydrologiques, régimes pluviométriques et activité agricole.

CONCLUSION GENERALE

Cette modeste contribution se situe avant tout sur le plan de la compréhension, afin de mieux connaître l'hydrologie fluviale en domaine tropical africain. A ce titre, elle s'inscrit à la suite des travaux antérieurs sur l'écoulement fluvial en Afrique et des travaux du Laboratoire de Géographie Physique de Nancy II.

Cette ambition nous a suggéré une démarche simple et classique : l'analyse des facteurs de l'écoulement et celle des modalités de cet écoulement dans le Bassin du Fleuve Sénégal.

* Les bases de l'étude

Les moyens pour atteindre ce but ont été essentiellement :

- les études antérieures à notre travail ;
- notre propre connaissance du milieu du fait de notre formation de géographe, formation appliquée au domaine africain et au bassin même du Sénégal ;
- et l'analyse des données diverses, surtout des séries hydro-pluviométriques de plus de 60 ans d'observation.

Cependant, parmi les travaux antérieurs, nous citons les deux principaux :

- les travaux de P. MICHEL (1973). Il s'agit d'une étude géomorphologique des bassins des Fleuves Sénégal et Gambie, donc des facteurs physiques de

l'écoulement entre autres.

Nous reprenons certaines de ses conclusions. Cependant, nous leur donnons une optique hydrologique en retenant surtout dans nos conclusions leurs influences sur l'écoulement d'une manière générale, et ce dans le Bassin du Sénégal.

- la monographie de C. ROCHETTE (1974), qui se présente avant tout comme une remarquable " banque de données " diverses, fondamentale pour l'étude du Bassin du Sénégal.

Nous reprenons certaines de ses conclusions dans l'optique hydrologique en géographie physique. Nous lui empruntons des données numériques, nous complétons par l'analyse de phénomènes non étudiés par cet auteur en même temps que nous nuancions ses conclusions du fait de la longueur de nos séries de données qui couvrent des périodes influencées par des changements climatiques importants.

Notre contribution, combien modeste, s'inscrit ainsi à la suite de ces deux travaux. Il s'agit de la première étude d'ensemble à notre connaissance en hydrologie fluviale dans le Bassin du Sénégal. Il s'agit aussi vraisemblablement de la dernière, vu que les projets d'aménagement du bassin fixent la fin des travaux en cours entre 1986 et 1990 (barrages de Manantali en amont et de Diama à l'aval). Il faut souhaiter que ces travaux servent à l'aménagement des sous-bassins tels que ceux de la Falémé, du Baoulé ...

* Les méthodes de l'étude

La statistique nous a permis de mieux préciser l'analyse climatique et hydrologique par des paramètres d'utilisation courante et simple. Elle nous a amené à adopter des modèles simples notamment pour le tracé des cartes d'isohyètes moyennes annuelles.

Nous avons également élaboré des programmes simples afin de mieux saisir les nuances des phénomènes, les complexes qu'ils engendrent. L'accès à ce

support statistique et informatique a été facilité par les responsables du Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Nancy II. Il nous aura fait gagner du temps.

Mais l'utilisation de ces deux moyens, de ces deux méthodes scientifiques constitue comme le soulignent J.B. RACINE et H. REYMOND (1973) : " une sorte de facture scientifique " en géographie. Cependant, nous pensons que la facture scientifique en géographie procède avant tout de la connaissance des limites des méthodes utilisées et de leur interprétation géographique. L'hydrologie fluviale, avant d'être mathématique ou statistique, est avant tout naturaliste. Ainsi, l'optique choisie pour ce travail, les moyens techniques et matériels nous ont amené à tirer des conclusions parmi lesquelles nous retenons les faits suivants.

* Les apports de l'étude

En domaine tropical, c'est assurément le climat dispensateur de l'eau écoulée qui constitue le facteur premier pour expliquer les régimes hydrologiques. Mais le découpage des domaines et régions climatiques ne peut correspondre exactement aux domaines hydrologiques du fait de la complexité des facteurs de l'écoulement.

Ainsi, les domaines climatiques sahélien, Nord-soudanien et Sud-soudanien dans lequel se situe la région guinéenne ne recouvrent pas totalement les domaines hydrologiques sahélien, tropical pur et tropical de transition ou guinéen. La précision dans la terminologie est ainsi indispensable suivant qu'il s'agit d'analyse climatique ou hydrologique.

Nous avons consacré de longs développements aux données climatiques pour rappeler les régimes pluviométriques. Ils étaient certes connus, seulement nous insistons sur leur irrégularité qui atteint à l'heure actuelle une péjoration qui connaît sa forme extrême et qui dure depuis plus de 15 ans. Il s'agit de la sécheresse récente à propos de laquelle nous établissons

une sorte de bilan des connaissances en reprenant les conclusions des études antérieures.

Dans le Bassin du Sénégal, les formes de relief, les pentes, la lithologie, la biogéographie et les éléments du climat concourent à donner une vie propre à l'eau précipitée. Nous avons voulu décrire les manifestations de l'écoulement au niveau de l'année hydrologique par les bilans de l'écoulement. Nous retenons de l'étude l'irrégularité interannuelle de l'abondance et les facteurs limitants, surtout climatiques, qui engendrent de grands déficits s'accroissant du Sud guinéen au Nord sahélien. Déficit à mettre en rapport avant tout avec l'intensité de l'évaporation et de l'évapotranspiration. De fait aussi, nous retenons des déficits accusés durant la période de sécheresse récente.

Les modalités de l'écoulement se traduisent également par les régimes saisonniers du bassin. Nous les rappelons mais nous insistons surtout sur leur variabilité dans le bassin en fonction des domaines et des secteurs particuliers. Mais surtout nous nous attachons aux modifications que peuvent connaître ces régimes en période de sécheresse climatique : le régime de transition devient un régime tropical pur ; le tropical pur se transforme en régime sahélien ; le régime sahélien quant à lui prend des allures de régime semi-aride.

Ces modifications posent le problème des ressources en eau de surface disponibles surtout en période d'étiage annuel.

Pendant cette période, l'étude du tarissement de C. ROCHETTE que nous reprenons donne une idée précise des disponibilités en eau. Nous étudions également l'irrégularité des minimums mensuels et nous montrons que cette forme d'écoulement extrême gagnerait à être mieux connue par l'amélioration de la qualité des mesures d'étiages. Elle se pose douloureusement aux populations, d'autant plus qu'elle intervient pendant la période non pluvieuse de l'année.

On aura noté qu'en même temps nous menons l'analyse de la péjoration climatique par " la sécheresse pluviométrique " et " la sécheresse hydrologique ". Ces phénomènes ont marqué le domaine tropical ouest-africain en " 1910 " et " 1940 " et durant toute la période récente depuis 1966 ou 1968 ; ils sévissent encore à l'heure actuelle. Une esquisse des crues annuelles et exceptionnelles a été également menée.

La figure n° 53 montre que chaque sécheresse pluviométrique a coïncidé depuis le début du siècle avec une diminution notoire de l'écoulement annuel, ce qui est évidemment logique en régime exclusivement pluvial.

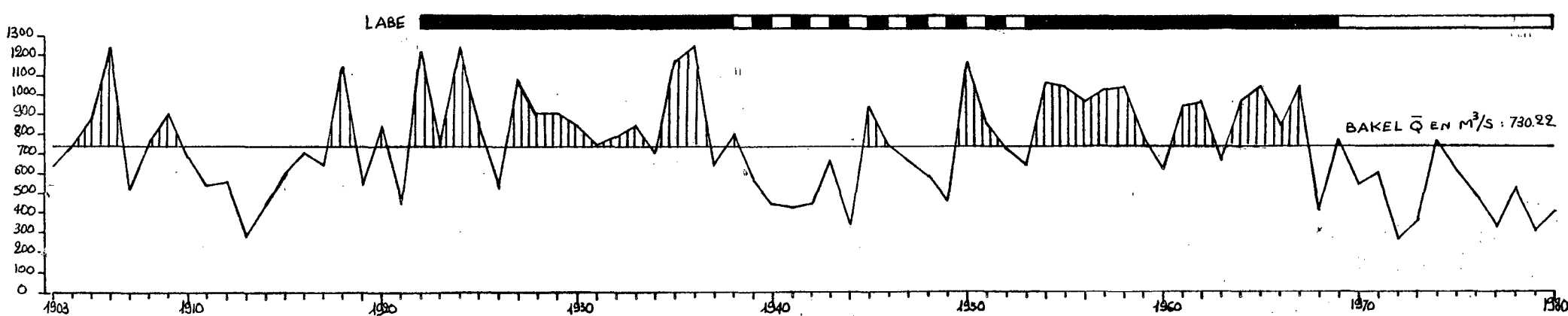
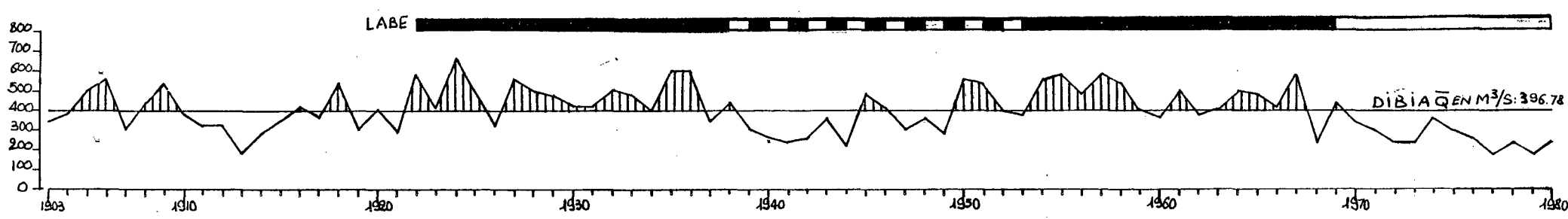
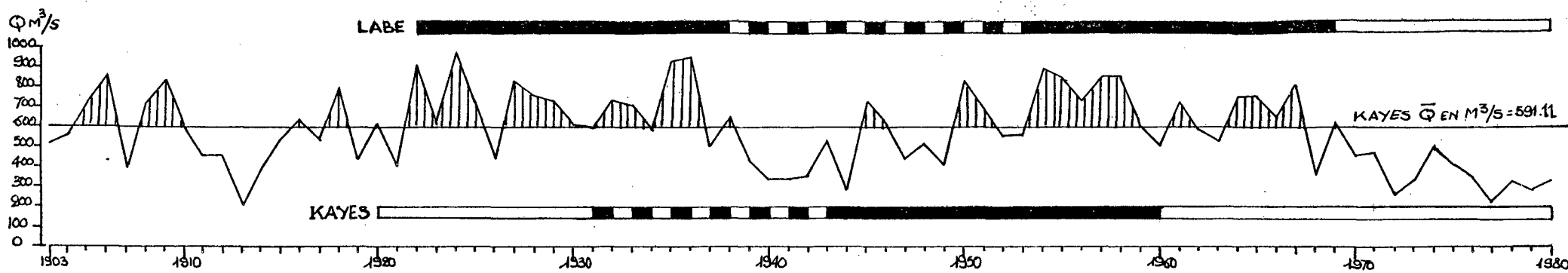
Mais c'est volontairement que nous n'étudions pas dans le détail les relations entre la pluie et les débits. La conformité des régimes pluviométriques et hydrologiques jusque dans leur variabilité et leur irrégularité, le lien entre précipitations et bilans hydrologiques, les variations de l'abondance, les formes extrêmes de l'écoulement liées à l'irrégularité des précipitations, enlèvent une part de l'intérêt d'une telle étude. Car en définitive tout est relation pluie-débit en domaine tropical.

On pourrait tenter de mettre en relation les lames d'eau écoulées et les précipitations ; l'étude serait néanmoins imprécise si l'on inclut pas, de pair avec les pluies, les divers facteurs de l'écoulement : superficie, pentes, couvert végétal, aptitude des terrains à la rétention et à la restitution ..., ce qui n'est pas aisé évidemment.

On aura noté aussi notre insistance sur l'irrégularité, l'immodération des phénomènes hydrologiques. Ces notions doivent être nuancées.

Nous avons voulu montrer qu'en domaine tropical, il s'agit d'une irrégularité interannuelle des totaux de pluie annuels et mensuels, des modules et des débits mensuels, donc d'une immodération des volumes enregistrés. Elles peuvent être extrêmement faibles ou démesurément importantes. Une immodération qui prend en compte les modifications extrêmes des régimes pluviométriques et hydrologiques.

Cependant, on note une régularité temporelle assez remarquable qui se traduit



— EVOLUTION INTERANNUELLE DES MODULES

▨ PERIODE EXCEDENTAIRE

□ PERIODE DEFICITAIRE

▬ EVOLUTION DES PERIODES PLUVIOMETRIQUES

■ PERIODE HUMIDE

▨ PERIODE "NORMALE"

□ PERIODE SECHE

EVOLUTION COMPAREE FIG 53
DE LA PLUVIOMETRIE ET DES MODULES

402-

par la stabilité des maximums et des minimums mensuels. Invariablement, en période sèche comme en période humide, quelque soit les modifications que peuvent connaître les régimes, le maximum mensuel intervient toujours au même moment pour la fréquence maximale : août pour les pluies et septembre pour les débits et pour tous les domaines du bassin. Le minimum mensuel des débits intervient en avril en domaine guinéen de transition mais toujours en avril pour la fréquence la plus élevée. Il est situé en mai pour le reste du bassin, mais il intervient toujours en mai pour la fréquence maximale.

Cette stabilité temporelle est due à la stabilité même des facteurs météorologiques et de la circulation atmosphérique (date et durée de la mousson, quelle que soit son "abondance pluviométrique").

Enfin, la sécheresse pour nous se pose sous deux aspects essentiels : la connaissance, l'étude des sécheresses climatiques sous tous leurs aspects permet une meilleure appréhension de l'évolution récente du climat en Afrique Occidentale. Le climat étant ainsi mieux connu (cf. M. LEROUX, 1982), il sera possible d'approfondir la conformité des régimes hydro-pluviométriques dans leur déjoration et donc l'étude des sécheresses et étiages.

La connaissance précise de ces phénomènes est en effet à la base de la maîtrise de l'eau indispensable au développement dans un continent à économie essentiellement agricole. Il s'agit ainsi d'une contribution capitale des spécialistes de l'eau au développement de l'Afrique.

Un second aspect de l'étude des sécheresses est à dégager des moyens de lutte contre cette calamité. Nous avons déjà signalé (A. A. SOW, 1982) les moyens mis en oeuvre pour lutter contre ce phénomène en Afrique sahélienne et le sens qu'on devrait leur donner. Nous disions qu'elle procède d'une connaissance précise du climat et des ressources en eau, citant M. LEROUX et P. ELOUARD.

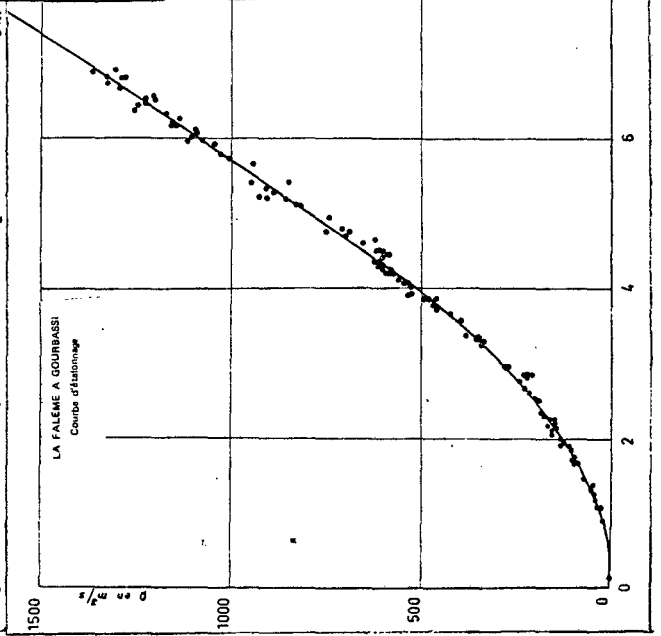
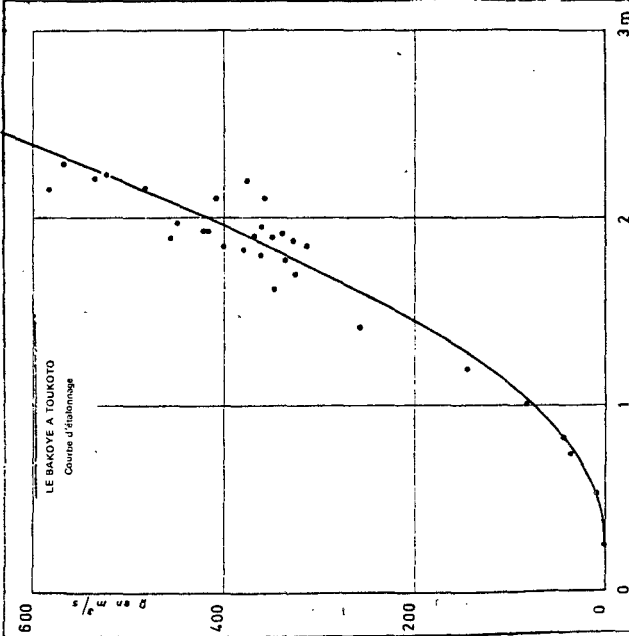
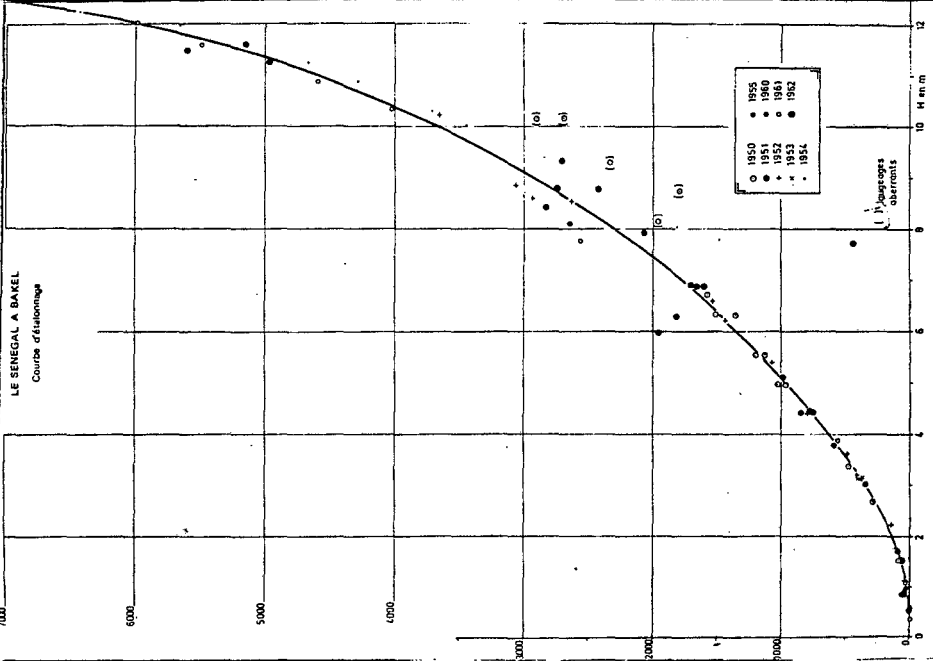
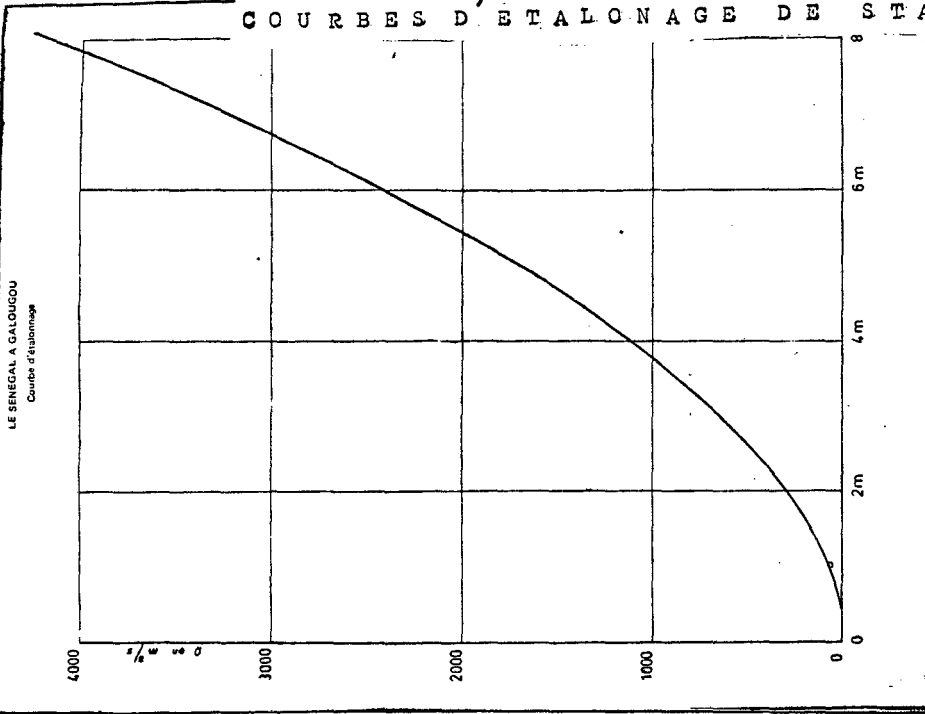
Cette lutte se pose ainsi en terme de gestion rigoureuse des disponibilités en eau de surface, actuellement bien réduites.

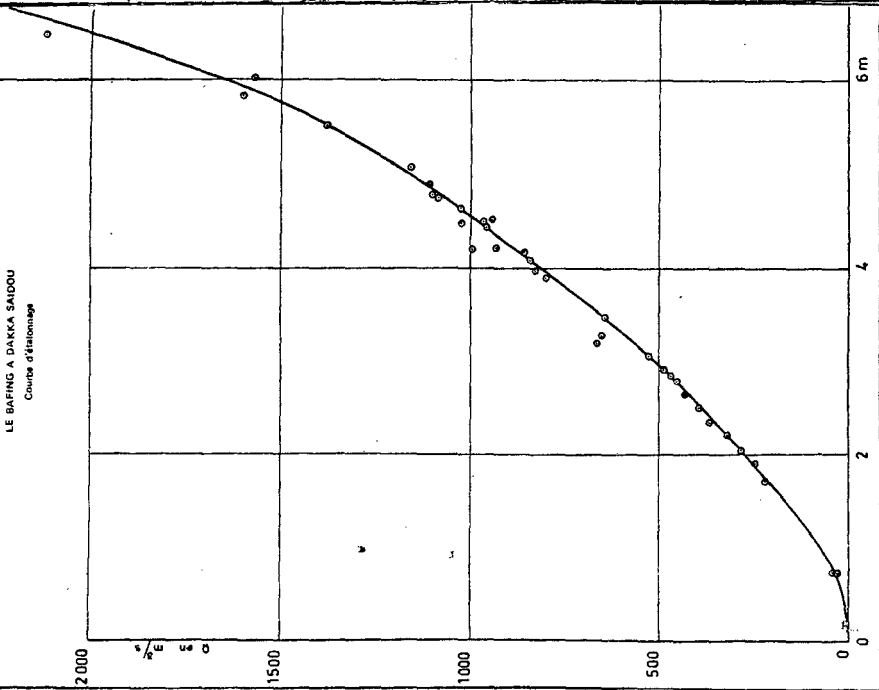
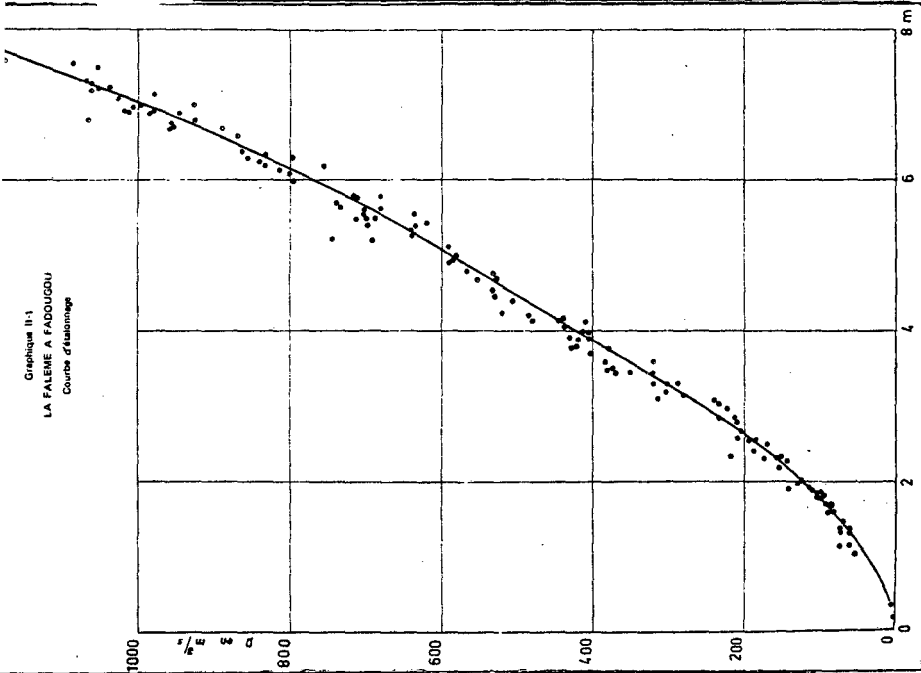
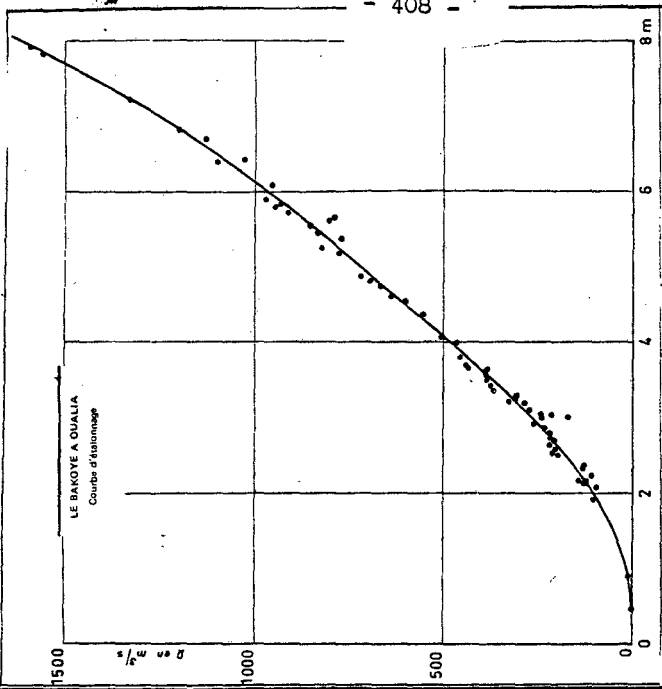
Ceci induit le problème de l'aménagement hydraulique dans le Bassin du Sénégal, que nous n'abordons pas pour les raisons indiquées en introduction, mais que nous pensons reprendre ultérieurement.

Cependant, nous sommes conscients que " l'étude d'un fait physique, considéré comme une fin en soi, sort du domaine de la géographie quelle que soit son importance " (P. GEORGE, 1948).

ILLUSTRATIONS

COURBES D'ETALONAGE DE STATIONS



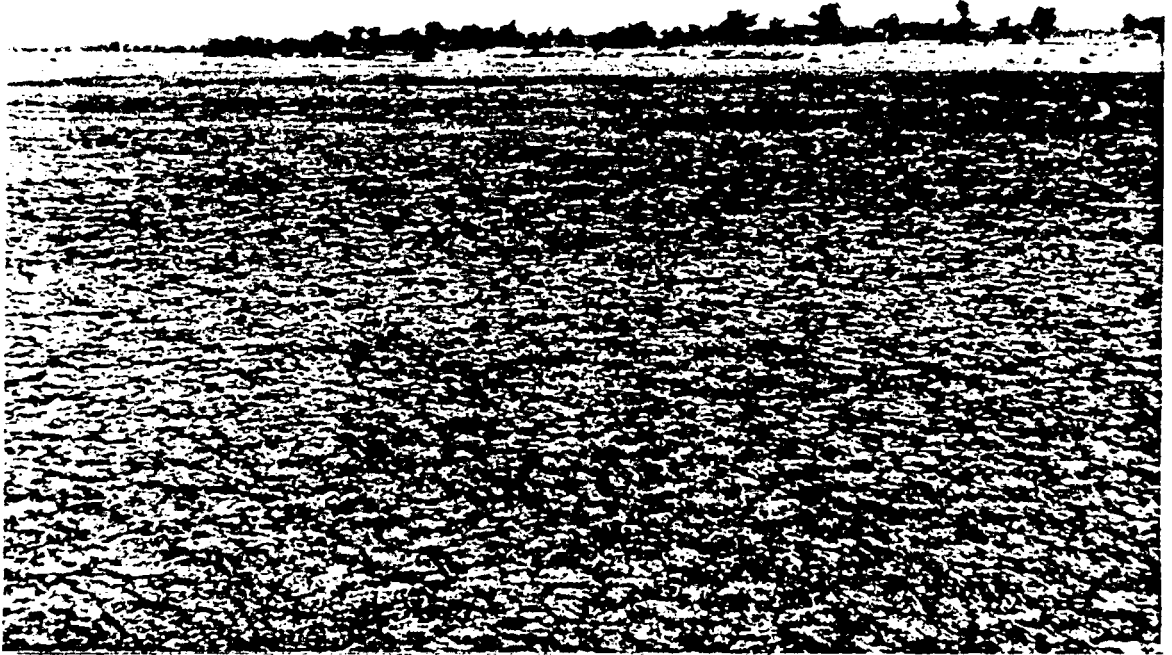




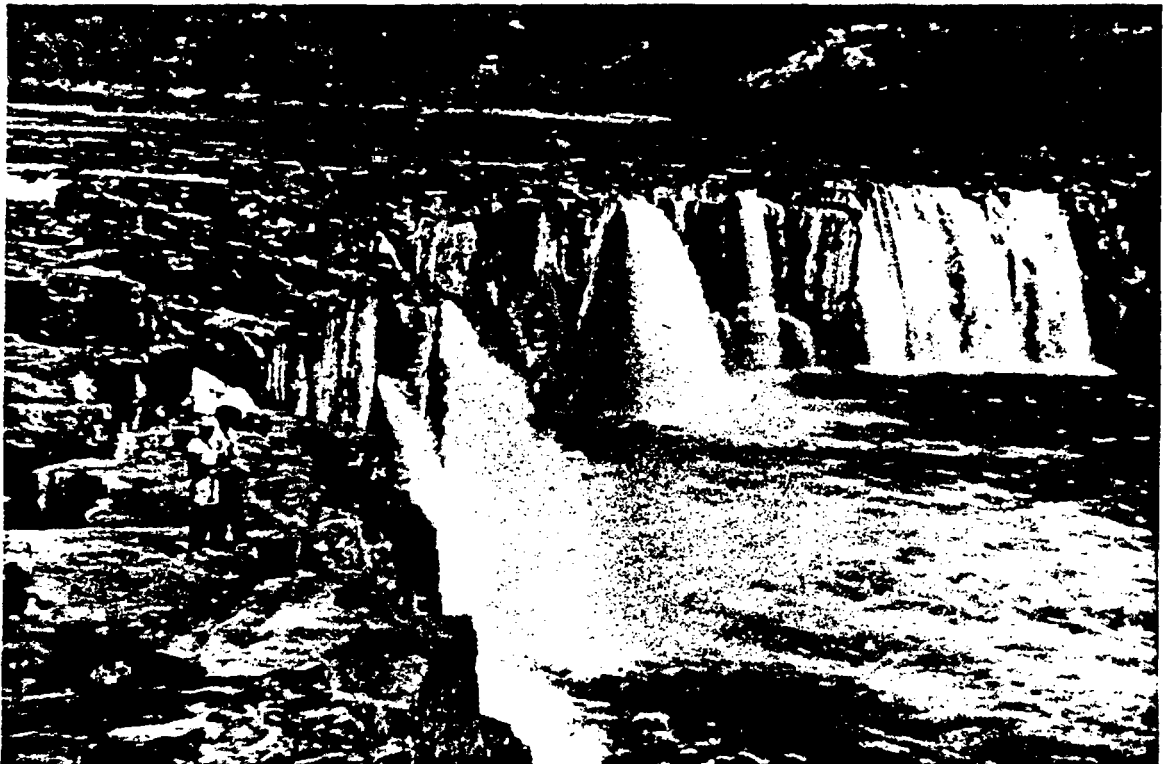
1.- HAUT BASSIN DU SENEGAL
Le plateau Mandingue méridional



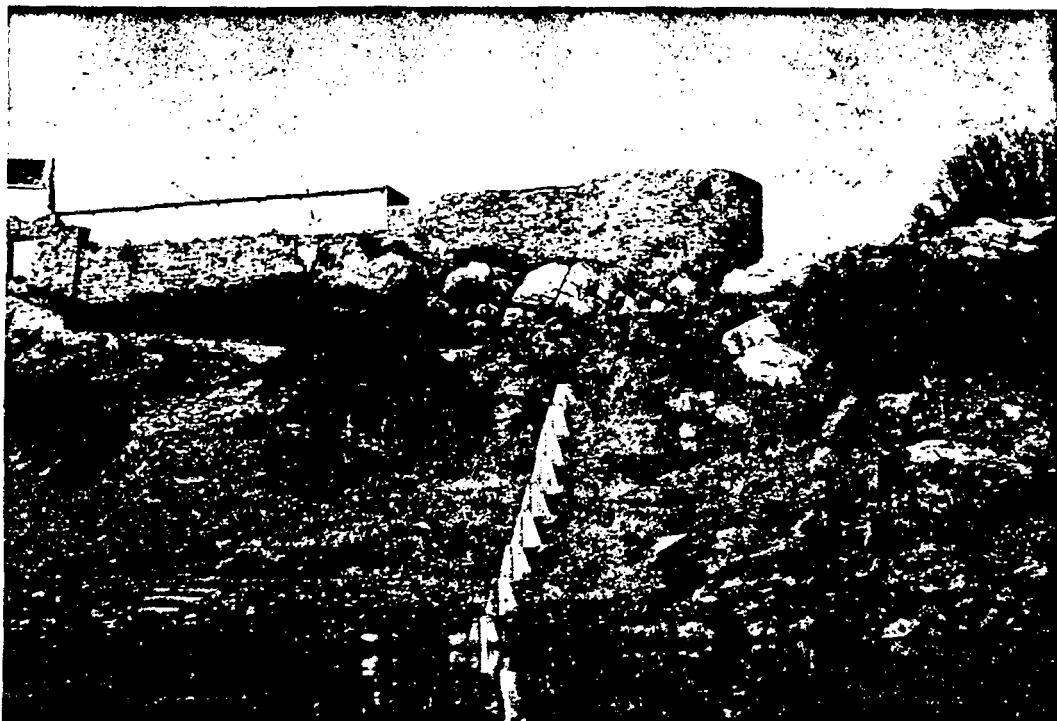
2.- HAUT BASSIN DU SENEGAL
La "falaise" de Tambaoura



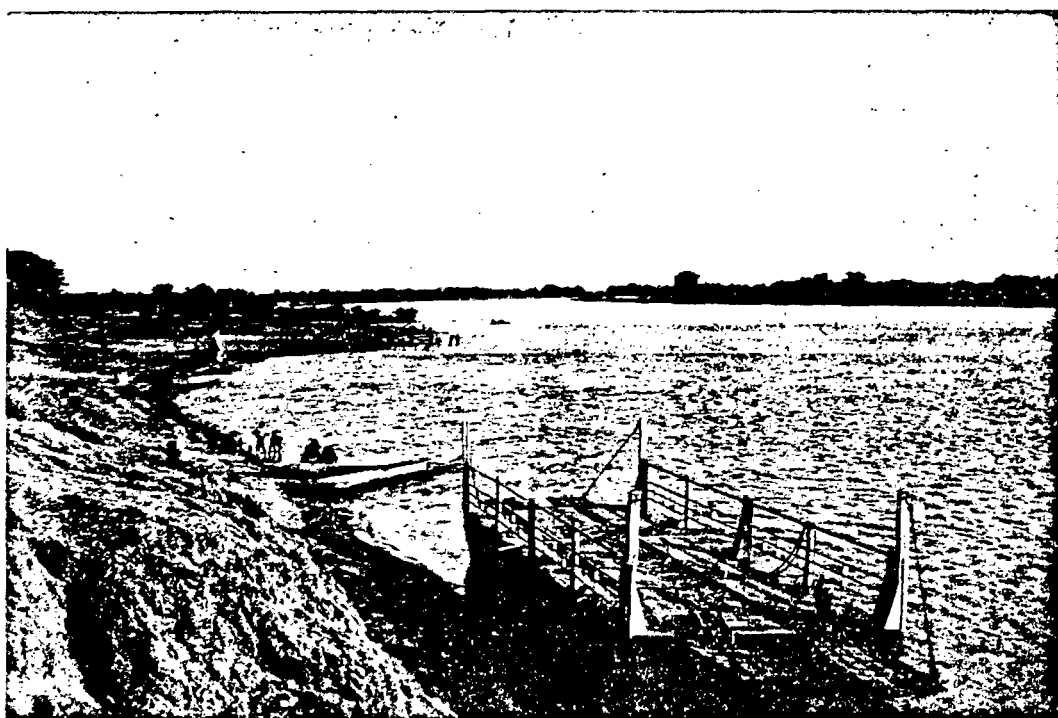
3.- HAUT BASSIN DU SENEGAL
Cuvette argileuse dans la vallée du Gorgol



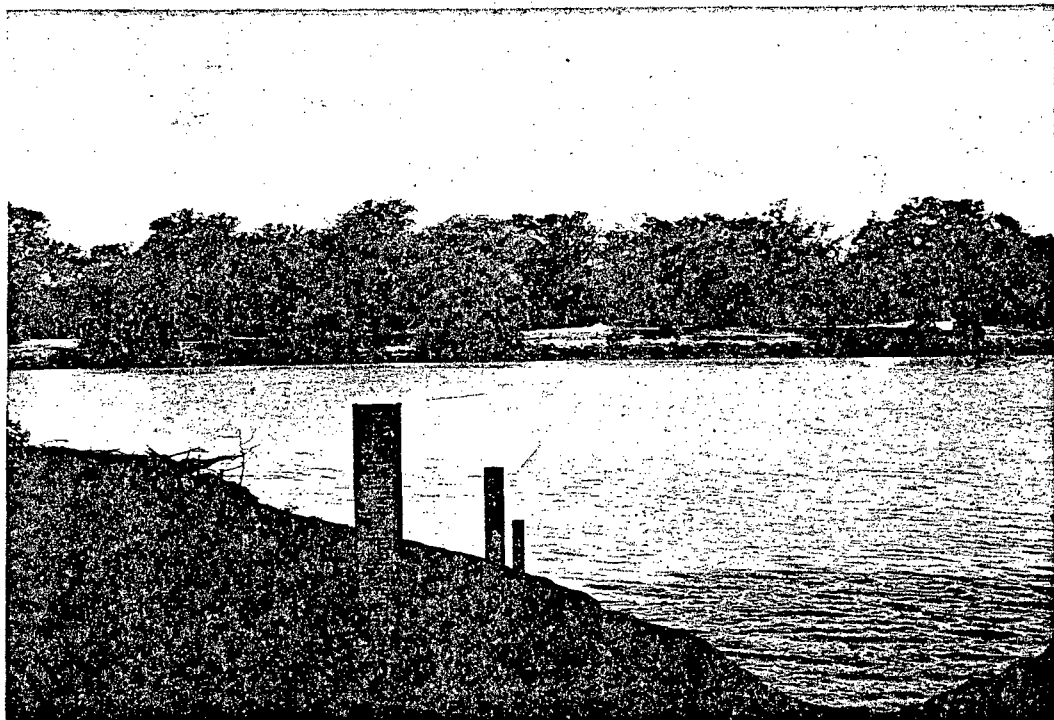
4.- HAUT BASSIN DU SENEGAL
Les chutes du Sénégal à Gouina



5.- COURS INFERIEUR DU SENEGAL
Le Fleuve Sénégal à Bakel



6.- COURS INFERIEUR DU SENEGAL
Le Fleuve Sénégal à Bakel



7.- COURS INFÉRIEUR DU SENEGAL
Le Fleuve Sénégal à Podor



8.- COURS INFÉRIEUR DU SENEGAL
Les dunes du Brakna



9.- Végétation de la basse-Falémé

DOCUMENTS DE PRESSE RELATIFS A LA SECHERESSE
ET AUX PROBLEMES DE L'EAU

La sécheresse, avec son corollaire, la pénurie alimentaire, risque de faire basculer l'Afrique de l'état de survie à l'état de famine.

Un fléau, pas une fatalité

Elisabeth Nicolini et Catherine N'Diaye



Au Sénégal. Et Dakar a soif...

Telle une malédiction, la sécheresse continue de frapper l'Afrique. Elle tue des hommes, des femmes, des enfants. Elle décime des troupeaux entiers. Selon un rapport publié le 19 janvier par la FAO (Food and Agriculture Organization), la famine menace 24 pays dont la population totale est de 150 millions d'habitants, en raison d'une baisse des récoltes céréalières de 8 % en 1983.

« Nous vivons la pire des quatorze années de sécheresse », déclarait en décembre 1983 M. Alioune Blondin Beye, ministre malien des Affaires étrangères. Depuis 1982,

le fléau touche le continent tout entier. Y compris l'Afrique australe naguère prospère. La pénurie alimentaire, sa principale conséquence, est telle qu'elle risque de faire basculer l'Afrique de l'état de survie à celui de famine.

Dans les régions sahéliennes traditionnellement arides, la situation empire. En Mauritanie, 15 000 tonnes à peine de céréales ont été récoltées en 1983 alors que 255 000 tonnes sont nécessaires pour nourrir la population. En 1982, la production avait été de 20 000 tonnes. Réserves nulles, chiffres alarmants auxquels s'en

ajoutent d'autres, aussi tragiques : les pertes de cheptel dans le sud du pays, zone d'élevage, sont de l'ordre de 25 à 30 %. La région de Rosso en particulier, où les éleveurs ont coutume de descendre avec leurs troupeaux, est devenue un véritable désert. Il a plu, mais très peu, 50 millimètres à peine, le quart du niveau normal. « Si nous arrivons à sauver un tiers du bétail cette année, ce sera un exploit », a affirmé un responsable de l'élevage de cette province.

Tout aussi critique la situation au Sénégal. Les récoltes de mil et de sorgho — nourritures de base des



à Louga

Un vœu exaucé

Une averse après les prières

C'est tôt le matin que les fidèles drapés de leurs plus beaux habits, ont convergé vers la grande mosquée, qui munis d'une petite natte, qui d'une peau. Sur tous les visages se lisait la joie infinie, d'avoir accompli le jeûne selon les prescriptions de l'Islam. Mais cette joie, on la savourait modestement, parce que la Korité est, avant tout, une fête d'humilité, de recueillement et de charité. C'est également un jour de grâce et de pardon.

L'Imam, Serigne Tidiane Sarr a fait son entrée dans la mosquée un peu avant 9 heures, presque au même moment que les autorités administratives conduites par le gouverneur, M. Moussa Ndoye, venues représenter le gouvernement à la prière.

Dans son sermon, Serigne Tidiane Sarr mettra l'accent sur

la nécessité pour tout musulman d'observer strictement les recommandations divines afin d'échapper au châtiment du jour dernier. Il s'élèvera avec véhémence contre la calomnie, la supercherie, l'escroquerie, l'abus de confiance. Il dira combien Dieu maudit les escrocs et combien il est sensible à la bonne foi de celui qui respecte ses engagements. Serigne Tidiane Sarr soulignera que la prière est le pilier essentiel de l'Islam et que celui qui ne la pratique pas régulièrement est encore pire qu'un incroyant. Il demandera à la foule de se conformer aux prescriptions de l'Islam, en étant juste, charitable, propre et de veiller également à l'éducation de tous ceux que Dieu a placés sous notre responsabilité.

L'imam mettra l'accent sur l'opportunité du repentir. Car,

ajoutera-t-il, « nul ne doit jamais désespérer de la clémence de Dieu. Quels que soient les péchés de l'individu, Dieu les lui pardonnera s'il se repentit sérieusement et s'il s'engage résolument et définitivement dans la voie du Sâjut.

Serigne Tidiane Sarr s'attardera longuement sur les principes qui régissent le «mouroukor». Selon l'Imam, il doit être de la nature de la base alimentaire du donateur. Il doit être remis aux nécessiteux à temps pour que ces derniers puissent passer une agréable Korité.

Serigne Tidiane Sarr a enfin prié pour que l'hivernage réponde aux espoirs. Il a également prié pour le bonheur et la santé du président Léopold Sédar Senghor, du Premier ministre, du gouvernement car, poursuit-il, «c'est grâce à leur

action réfléchie, lucide que nous avons la paix sans laquelle il nous serait difficile de pratiquer l'Islam, cette religion que nous plaçons au-dessus de tout».

En réponse, le gouverneur M. Moussa Ndoye a transmis à l'Imam et aux fidèles, les vœux du président de la République, du Premier ministre, du ministre de l'Intérieur et de tout le gouvernement. M. Moussa Ndoye a exhorté les musulmans à la concorde, avant d'insister particulièrement auprès des autorités spirituelles pour leur demander de s'atteler à la réconciliation de toute la population du Ndiambour, ce qu'il a ajouté-t-il, «la région de Louga est très jeune et elle a besoin de tous les bras valides pour se développer. L'Islam ne s'accommode pas de division. Nous devons resserrer nos rangs et

nous consacrer aux choses utiles».

M. Ndoye a mis l'accent sur la nécessité de réhabiliter les vertus cardinales qui faisaient la force du Sénégal d'autrefois, car sans elles, la société voguera vers la perte. C'est une tâche qui nous concerne tous et à laquelle nous devons consacrer une partie de notre temps.

Le gouverneur a convié les fidèles à prier pour que l'hivernage s'achève bien. Ainsi, toute l'assistance a communiqué dans la ferveur pour demander à Dieu une pluie fécondante, afin de rétablir la situation déjà inquiétante.

Aussitôt une averse très dense a arrosé la terre assoiffée du Ndiambour, faisant renaître une grande lueur d'espoir.

Rinary FALL

Les gouttes de... l'espoir

Alors que les pluies de la semaine dernière n'avaient occasionné pratiquement pas de semis d'arachide exceptée la sous-préfecture de Nguékhokh, avec les pluies diluviennes qui ont arrosé l'ensemble de la région dans la nuit du jeudi au vendredi, l'hivernage semble désormais bien installée.

Hivernage précoce certes comme nous l'ont précisé les techniciens de l'Agriculture mais qui permet doré et déjà de semer les variétés hâtives notamment la 55.437 à cycle court. Pour la région de Thiès où la date normale des semis est fixée aux environs du 25 juin avec une pluviométrie égale ou supérieure à 25 mm cet hivernage pas comme les autres n'est pas sans autoriser de sérieuses appréhensions. Deux alternatives à en croire le responsable régional de l'Agriculture M. Fall sont possibles. Si les pluies continuent jusqu'en septembre il y a des risques de regermination comme tenu de la variété hâtive. Et l'autre alternative, à savoir que les pluies s'arrêtent plus tôt, risque aussi d'occasionner des pertes de niveau des récoltes. Autre problème lié à cette pluviomé-

trie précoce, celui de l'évacuation des graines qui accuse déjà d'un retard certain au même titre que la mise en place des facteurs de production que sont l'engrais et le matériel agricole.

La mise en place des semences effectuée à 75 % dans la région et qui devait se terminer depuis hier, ajoutée à une pluviométrie générale dans l'ensemble de la région et de l'ordre de 72, 8mm à Thiès, 46,8 mm à Mbour et 24,6 mm à Ti-vauane, sont autant de facteurs qui permettent de croire à un démarrage général des semis pour l'arachide car pour le mil tous les semis aussi bien à sec que sur terres mouillées sont effectués depuis les premières pluies de la semaine dernière.

Si l'eau a fait renaître l'espoir au sein du paysanat il n'en reste pas moins vrai que celle-ci qui a doré et déjà atteint un niveau rarement égalée en si peu de temps, a surpris. Et au niveau de Thiès où pourtant existe un programme entamé depuis belle lurette pour l'évacuation des eaux de pluie, l'état des rues mais aussi, et surtout du marché, n'est pas sans poser de sérieux pro-

blèmes tant aux bonnes ménagères qu'aux automobilistes. Si l'on ne constate aucun dégât majeur exceptées quelques cases qui n'ont pas su résister, un pont presque coupé aux alentours de Takhikav, il se pose cependant un sérieux problème d'assainissement. Pour les automobilistes, signalons l'accident qui s'est produit jeudi soir aux environs de Méckhé occasionné par les pluies et qui a fait deux morts (Habibatou Mbengue demeurant à Saint-Louis et Ibrahim Diallo habitant la Sicap Dieuppeul) et de nombreux blessés.

C'est le moment d'attirer l'attention des automobilistes sur les risques encourus par ceux d'entre eux qui n'auront pas pris les précautions élémentaires (essuie-glace, pneus, lumière etc.)

En tout cas, l'hivernage, même précoce, semble bien installée. Les gouttes de l'espoir pourvu qu'elles durent et s'arrêtent au moment opportun, éloigneront peut être et à jamais, le spectre de la sécheresse auquel les caprices d'un climat souvent fantaisiste nous avait quelque peu habitué.

Amadou GAYE

Des prières pour un hivernage pluvieux

Conformément aux récentes recommandations des chefs religieux, la communauté musulmane de Thiès a tenu à dire des prières qui rentrent dans le cadre des prières du Saint-Coran, et destinées à implorer Dieu pour qu'il déverse sur la terre l'eau nécessaire à l'agriculture et à la vie.

En effet, paysans et citadins sont aujourd'hui profondément inquiets par l'absence persistante de pluie pour le début d'une saison sur laquelle repose l'économie du pays en grande partie. Une rapide tournée à travers le paysage qui relie Thiès et Mbour par la piste de Sanghé est édifiante. Loin du panorama reconfortant des jeunes pousses d'arachides et de mil qui tapissent d'ordinaire les champs, les cultures sont ici caractérisées par une germination disparate bloquée juste après l'éclosion de la graine.

Si cette situation persiste, les nouvelles pousses meurent sans être des plantes et ne pouvant plus restituer la graine éciatée. Les cultivateurs sont conduits ainsi au comble du désespoir, rêvant à chaque fois d'être surpris par le ciel au moindre passage

d'un gros nuage. A longueur de journée, dans le décor neutre de la brousse, troupeaux de bœufs, de moutons et de chèvres errent. Quant aux petits éleveurs qui entretiennent tout au plus quelques moutons et chèvres à domicile, la solution est de sauter d'urgence en ville.

Pour les uns c'est l'occasion de se ravitailler en foin et autre aliment de bétail. Ce jeune villageois nous confie qu'il n'a en fait acheté que le foin qu'il avait cédé aux citadins après les dernières récoltes. Naturellement le prix a triplé : 750 frs le sac. C'est dire par conséquent que la sécheresse qu'on avait relegué aux chapitres des cauchemars n'est pas encore partie. Dans l'anti-chambre de l'hivernage elle a introduit de nouveau son spectre de famine et de soif. C'est donc fort de l'adage qui dit que «l'homme propose, Dieu dispose» que les populations des villages et des villes se sont consacrées à des prières dans les mosquées pour implorer pardon et demander à Dieu le maître suprême de nous accorder des pluies porteuses de prospérité.

Sidy Mohamed NDIAYE

Assèchement. Le barrage hydro-électrique ghanéen d'Akossombo, près de la frontière togolaise, pourrait cesser de fonctionner dès le mois d'avril. Parce que la sécheresse a provoqué une baisse considérable du lac Volta qui alimente le barrage. Déjà, Accra, la capitale, est privée d'électricité vingt heures par jour. La récolte de riz a été, en 1983, inférieure de 90 % à la normale ; la mortalité infantile augmente de façon dramatique depuis deux ans et les cas de kwashiorkor (maladie due à la malnutrition) ont progressé de 25 % dans le centre du pays.

JEUNE AFRIQUE N° 1212 — 28 MARS 1984

La sécheresse, les feux de brousse, la peste bovine, le manque d'insecticides et d'engrais, autant de calamités qui rendent urgente la prise de décisions concertées.

Vingt-deux pays d'Afrique, comptant plus de cent cinquante millions d'habitants (1), risquent de se trouver à plus ou moins brève échéance dans une situation d'extrême détresse économique et de disette, en raison de la détérioration de leurs disponibilités alimentaires : cette sinistre prévision a été annoncée, le 19 octobre, à Rome, par le directeur général de la F.A.O., Edouard Saouma, qui s'adressait aux représentants des vingt-deux pays affectés, de trente-cinq pays donateurs, ainsi qu'aux délégués des principales institutions de financement et des organismes compétents des Nations unies, réunis à un haut niveau pour débattre du problème des besoins alimentaires exceptionnels de certains Etats africains.

Edouard Saouma, qui a demandé que des « initiatives concertées soient prises de toute urgence pour éviter que la situation ne prenne un tour encore plus catastrophique dans les pays affectés au cours des prochains mois », a repris les conclusions du rapport de situation établi par le groupe d'action spécial F.A.O. - P.A.M., créé en avril dernier, ainsi que celles émanant du système global d'information et d'alerte rapide sur l'alimentation et l'agriculture de la F.A.O. Ces deux rapports démontrent l'imminence d'une crise des disponibilités alimentaires en Afrique du Sud, de l'Ouest et de l'Est, résultant de facteurs à la fois naturels et humains.

Parmi ces facteurs figurent la sécheresse prolongée qui a frappé certains pays, durant deux ou trois campagnes agricoles consécutives, une pluviométrie insuffisante, tardive ou interrompue, des foyers de peste bovine, ou d'autres maladies animales, des phénomènes ex-

(1) Il s'agit des pays suivants : Angola, Bénin, Botswana, Cap-Vert, Ethiopie, Gambie, Ghana, Guinée, Lesotho, Mali, Mauritanie, Mozambique, République centrafricaine, Sao Tomé e Principe, Sénégal, Somalie, Swaziland, Tanzanie, Tchad, Togo, Zambie et Zimbabwe.

Sécheresse en Australie

CANBERRA. — Les pays du Sahel africain ne sont pas les seuls à subir les ravages de la sécheresse. L'Australie, ce far-west de l'Océanie, en est également victime depuis trois ans au moins.

Les campagnes, presque partout, ne sont que terres desséchées, rivières à sec et abreuvoirs vides. Les semailles, faute d'eau, ne produisent pas. Dans les régions les plus touchées (Victoria et Nouvelle-Galles du Sud) les éleveurs ne se donnent même plus la peine d'enterrer les carcasses de moutons. D'autres abattent au fusil des milliers de bêtes dans l'espoir de sauver ce qu'ils peuvent de leur troupeau. Les villes, notamment la capitale, où l'eau est rationnée, se couvrent parfois d'une pellicule de poussière : de la terre arrachée aux champs, parfois à des centaines de kilomètres, et transportée par le vent du désert.

L'année écoulée, la production agricole a baissé de moitié et ce pays traditionnellement exportateur de blé a dû en acheter aux Etats-Unis et au Canada.

LUNDI 14 FÉVRIER 1983

ceptionnels d'infestation des cultures, la pénurie d'insecticides et d'engrais.

« En Afrique de l'Ouest, la situation a été aggravée par la persistance, inhabituelle pour la saison, de l'harmattan, vent sec qui a favorisé la propagation des feux de brousse, et par un niveau de pluies qui, dans certaines régions de plusieurs Etats du Sahel, semble égal ou même inférieur à celui de 1973. En Afrique australe, la production de cultures vivrières s'annonce, en 1983-1984, et pour la deuxième année consécutive, particulièrement faible. Et l'on assiste à un effondrement des stocks alimentaires.

Parmi les autres facteurs négatifs, Edouard Saouma a rappelé l'afflux de réfugiés dans certaines régions, ou, dans d'autres cas, les retours massifs d'émigrés, ainsi que les troubles civils et la persistance de l'insécurité dans les campagnes. « Il faut comprendre, a-t-il ajouté, que ces difficultés exceptionnelles s'abattent sur un système de production agricole déjà extrêmement fragile en Afrique. La population continue d'augmenter plus vite que la production vivrière. La consommation par habitant ne cesse de diminuer depuis des années, alors que les importations alimentaires ont triplé en dix ans. En raison de la récession mondiale et de la faiblesse des marchés étrangers, de nombreux pays d'Afrique n'ont même plus la capacité de couvrir leurs importations alimen-

BIBLIOGRAPHIE

- Analyse des données. Publications de l'A.R.M.E.P. n° 28, Paris, 248 p.
- Annuaire pluviométrique du C.I.A.E.H.
Précipitations de l'origine des postes à 1965 (Mali, Mauritanie, Sénégal). O.R.S.T.O.M., Paris, 871 p.
- Annuaire hydrologiques de l'O.R.S.T.O.M.
Paris, années 1970 à 1973, 493 p.
- Annuaire hydrologiques de la D.E.H.
Sénégal, années 1979 et 1980.
- AHMAR (A. O.), 1976
La sécheresse et le programme de l'O.M.V.S. in " Colloque sur la désertification au Sud du Sahara ". N.E.A, Dakar, pp. 166 - 168.
- ARLERY (R.), GRISSOLET (H.), GUILMET (B.), 1973
Climatologie. Méthodes et pratiques. Paris, Bruxelles, Montréal, 2e édition, 434 p., 106 figures, 60 tab., annexes.
- ASECNA, 1976
La structure continue de l'Equateur météorologique sur l'Afrique intertropicale. Dakar, Bureau des études de la D.E.M., pub. n° 29.
- AUBERT (G.) et SEGALIEN (P.), 1966
Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. O.R.S.T.O.M., pédologie, Fr ..., vol. 4 n° 4 p. 97 - 112.
- AUDRY (P.), 1961
Etude pédologique du cercle du Guidimaka. (R.I.M.) O.R.S.T.O.M., Dakar Hann.
- BALLO (A.), 1984
Les modalités de l'écoulement fluvial en domaine tropical humide africain. L'exemple des bassins du Niger et du Bani. Doct. 3e cycle, Univ. Nancy II, 133 p., 33 fig.
- BASSOT (J.P.), 1966
Etude géologique du Sénégal oriental et de ses confins guinéo-maliens. Mém. B.R.G.M. n° 40, 322 p.
- BEAUDET (G.), MICHEL (P.), NAHON (D.), OLIVA (P.), RISER (J.) et RUELLAN (A.), 1976
Formes, formations superficielles et variations climatiques récentes du Sahara Occidental. Rev. géo-phys. et géol. dyn. n° 18, pp. 157 - 173.

- BERNIER (J.), 1964
La prévision des bas débits. Ass. de Berkeley. Ass. int. hydro. sci. pub. n° 63, pp. 340 - 351, 6 fig.
- BIROT (P.), 1968
Précis de géographie générale. Armand Colin, Paris.
- BRASSEUR (G.), 1952
Le problème de l'eau au Sénégal. Etudes sénégalaises, St Louis, n° 4, 99 p., 7 fig., photos.
- BRUNET-MORET (Y.), 1969
Etude de quelques lois statistiques utilisées en " hydrologie ". Cah. O.R.S.T.O.M., série hydro., vol. VI, n° 3, 99 p.
- BRUNET-MORET (Y.), 1971
Etude de l'homogénéité des séries chronologiques des précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. Cah. O.R.S.T.O.M., Paris, série Hydro., vol. XIII n° 3, p. 147 - 165.
- CHAMARD (P.C.) et SALL (M.), 1977
Le Sénégal. Géographie. N.E.A., Dakar, 96 p., fig., tabl.
- Colloque de Nouakchott, 1973
La désertification au Sud du Sahara. N.E.A., Dakar - Abidjan, 212 p., fig., tabl.
- DEMANGEOT (J.), 1984
Les milieux " naturels " du globe. Paris, Masson, col. géo., 250 p., 80 fig., photos.
- DESCHAMPS (H.)
Le Sénégal et la Gambie. P.U.F., Que sais-je n° 597.
- DUBREUIL (P.), 1974
Initiation à l'analyse hydrologique. Paris, Masson, 216 p., 40 fig.
- ELOUARD (P.), 1964
Notions élémentaires d'hydrologie et problèmes de l'eau au Sénégal. Notes africaines n° 102, Dakar, I.F.A.N., pp. 45 - 48.
- ELOUARD (P.), 1973
Oscillations climatiques de l'holocène à nos jours en Mauritanie atlantique et dans la vallée du Sénégal. In : Colloque de Nouakchott, N.E.A., Dakar, pp. 27 - 86.
- ESTIENNE (P.), GODARD (A.), 1979
Climatologie. Armand Colin, 366 p., 129 fig.
- FRECAUT (R.), 1964
Eléments d'hydrologie continentale. Classification des régimes fluviaux. Paris, C.D.U., 231 p., 30 fig., 1 carte h-t.

- FRECAUT (R.), 1974
Les variabilités de l'écoulement fluvial en milieu tropical humide.
Annales de Géo. n° 457, t/ 83 mai-juin, pp. 241 - 259, 2 fig.
- FRECAUT (R.), PAGNEY (P.), 1982
Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. Paris, Masson,
240 p., 44 fig., 9 tab.
- GARNIER (R.), 1973
Recherches sur les causes des sécheresses. L'Equateur météorologi-
que. Colloque sur la désertification, pp. 75 - 81.
- GESLIN (H.) et BOUCHET (R.), 1959
La sécheresse de l'année 1959 dans la moitié Nord de la France.
C.R., acad. agricole, n° 15, pp. 723 - 728.
- GIRAUD (J.M.) et ROSSIGNOL (D.), 1973
Recherches de cycles dans les pluies annuelles de Dakar (1901 - 1972)
et du Sénégal (1924 - 1972). In : colloque sur la désertification.
- GOUROU (P.), 1966
Les pays tropicaux. P.U.F. 4e édition, Paris.
- Groupe Chadule, 1974
Initiation aux méthodes statistiques en géographie. Masson et Cie,
191 p.
- GUILCHER (A.), 1970
Précis d'hydrologie marine et continentale. Masson et Cie.
- HUBERT (H.), 1921
Eaux superficielles et souterraines au Sénégal. Paris, Larose, 31
p.
- HUETZ de LEMPS (A.), 1970
La végétation de la terre. Inst. étud. géo., Masson, Paris.
- La houille blanche, 1980
Relations pluies - débits. N° spécial 4-5, 355 p., fig.
- LAMBERGEON (D.), 1977
Relation entre les pluies et les pressions en Afrique Occidentale.
P.D.E.M. ASECNA, Dakar, n° 57.
- LABORDE (J.P.), 1979
Eléments d'hydrologie de surface. T. 1 et t. 2, cours E.N.S.G.A.P.N.
polytech. Lorraine, Nancy.
- LEBORGNE (J.), 1979
Un exemple d'invasion polaire sur la région mauritano-sénégalaise
du 16 au 22 déc. 1968. Extrait annales de géo., fac. lettres,
Dakar.

- LEROUX (M.), 1968
Les invasions d'air d'origine sur l'Ouest de l'Afrique Occidentale.
TER. Départ. géo., Univ. Dakar.
- LEROUX (M.), 1970
La dynamique des précipitations en Afrique Occidentale. ASECNA,
Dakar, P.D.E.M. n° 23.
- LEROUX (M.), 1976
Processus de formation et d'évolution des lignes de grains de
l'Afrique tropicale septentrionale. Rech. de clim. trop. n° 1.
Départ. géo. fac. lettres et sci. Univ. Dakar.
- LEROUX (M.), 1980
Le climat de l'Afrique tropicale. Doct. d'état, 3 t., Dakar, 1 427
p., 353 fig.
- LO (H. M.), 1982
La pluviométrie et les effets de la sécheresse dans le bassin de
la Gambie. Mém. D.E.A., Univ. Nancy II, 50 p., 13 fig.
- LOUP (J.), 1974
Les eaux terrestres. Paris, Masson et Cie, 171 p., 48 fig.
- Marchés tropicaux et méditerranéens. La mise en valeur du Bassin du Fleuve
Sénégal. N° spécial 1 849, avril 1981.
- MEBARKI (A.), 1982
Le Bassin du Kébir Rhumel (Algérie). Hydrologie de surface et
aménagement des ressources. Doct. 3e cycle, Univ. Nancy II, 304 p.,
44 fig., travaux du Laboratoire de géo. phys. de Nancy II, vol.
n° II.
- MICHEL (P.), 1973
Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique.
Doct. d'état, O.R.S.T.O.M., 3 t., 753 p., 170 fig., cartes h-t.,
photos.
- MAYMARD (J.)
Etudes pédologiques dans la vallée du Sénégal. Bull. miss. aménag.
Sénégal, St Louis, n° 112, 38 p., 8 fig.
- OLIVRY (J.C.), 1982
Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et
aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée
(débits et P mm). O.R.S.T.O.M., centre Dakar Hann, 46 p., 9 fig.,
7 tab.
- OLIVRY (J.C.), 1984
Régimes hydrologiques des fleuves et rivières au Cameroun. Doct.
d'état, Univ. Montpellier, 3 t., fig., tabl., cartes h-t.
- O.M.V.S., 1976
Développement de la recherche agronomique dans le Bassin du Fleuve
Sénégal. Mali, Mauritanie, Sénégal, agro. météo., rapport technique
n° 2, 171 p., 25 fig.

- PAGNEY (P.), 1976
Les climats de la terre. Paris, Masson, 150 p., 56 fig., 3 pl.
- PARDE (M.), 1968
Fleuves et rivières. Paris, Armand Collin, Coll. U², 5e édition, 245 p., 18 fig.
- PEIRERA (B. S.) et VAN ES, 1962
Rapport de la mission C.C.T.A. / F.A.M.A sur les hauts plateaux du Fouta-Djalón (Guinée). Vol. II pédologie.
- PEIRERA (B. S.), 1964
Reconnaissance pédologique du Ferlo Sud. Rapport O.R.S.T.O.M. centre de Dakar - Hann, 42 p., 4 fig., 1 c.
- PEDELABORDE (P.), 1970
Introduction à l'étude scientifique du climat. T. 1 et t. 2, SEDES Paris.
- PEGUY (CH. P.), 1970
Précis de climatologie. Paris, Masson et Cie.
- PEIRERA (B. S.), 1974
Etudes des sols dans le bassin. In : monographie du Bassin du Sénégal. O.R.S.T.O.M. Paris, pp. 25 - 33 et 56 - 62, 1 fig.
- PEIRERA (B. S.), 1966
Note explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1 / 200 000, feuille Tambacounda et Bakel Sud. Rapport O.R.S.T.O.M., centre Dakar Hann, 52 p., 3 cartes coul. h-t.
- RACINE (J.B.) et REYMOND (H.), 1973
L'analyse quantitative en géographie. P.U.F. Coll. sup. 316 p.
- REMEMIERAS (G.), 1980
L'hydrologie de l'ingénieur. Paris Eyrolles, 456 p., fig., tabl.
- RIOU (C.), 1975
La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. Doct. d'état. Mem. O.R.S.T.O.M. n° 80, 236 p., 99 fig.
- ROCHETTE (C.), 1974
Le Bassin du Sénégal. Mono. hydro. O.R.S.T.O.M. n° 1, 325 p., 45 fig., annexes numériques, cartes h-t.
- RODIER (J.), 1976
Dernières études sur les sécheresses à l'échelle continentale. La Houille Blanche n° 6/7, pp. 533 - 536.
- ROUGERIE (G.), 1959
Latérisation et pédogénèse intertropicales. Esquisse d'une mise au point des données actuelles. Inf. géo. fasc. n° 5, pp. 199 - 205.
- ⁿ
SCHELL (R.), 1960
Note sur la végétation et la flore des plateaux gréseux de la moyenne Guinée et de leurs abords. Rev. gen. botan. Fr. t. 67, pp. 325 - 399, 14 fig., 4 pl.

SERRA (L.), 1960

Caractéristiques et causes des sécheresses. Fréquences d'apparition. Ass. d'Helsinki, Ass.int. d'hydro. sci. Pub. n° 51, pp. 48 - 99, 7 fig.

SIRCOULON (J.), 1976

Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses " 1913 " et " 1940 ". Cah. O.R.S.T.O.M., série hydro., pp. 75 - 174, 30 fig.

SIRCOULON (J.), 1976

Les sécheresses et étiages. La récente sécheresse des régions sahéliennes. La Houille Blanche n° 6/7, pp. 537 - 548, 15 fig.

SÆUK (A.), 1962

Le heug ou pluie de saison sèche au Sénégal. Annales géo. fac. lettres Dakar n° 385, pp. 225 - 246, 12 fig.

SOW (A. A.), 1982,

Le Nord-Ouest du Sénégal et la sécheresse 1968 - 1974. Contribution à l'étude des sécheresses en Afrique. Mém. D.E.A, Univ. Nancy II, 51 p., 4 fig., tabl.

TRICART (J.) et CAILLEUX (A.), 1960

Le modelé des régions sèches. Fasc. 1. Le milieu morpho-climatique. Les mécanismes génétiques des régions sèches. Centre doc. univ. Paris, 129 p.

TRICART (J.) et CAILLEUX (A.), 1960

Le modelé des régions chaudes. Forêts et savanes. Traité de géomorph., t. 5, 322 p., 64 fig., photo.

TOUPET (C.), 1973

L'évolution du climat de la Mauritanie du Moyen-Age jusqu'à nos jours. Coll. de Nouakchott, pp. 56 - 63.

VOGT (J.), 1959

Aspect de l'évolution morphologique récente de l'Ouest africain. Ann. géogr. Fr. n° 367, pp. 193 - 206, 2 fig.

ARTOGRAPHIE DE BASE

- 1.- Carte pédagogique du Sénégal au 1/1.000.000 dressée par R. Maignien et collaborateurs (1965). Centre O.R.S.T.O.M. Dakar-Hann

- 2.- Carte administrative de la République du Mali au 1/2.500.000

- 3.- Cartes topographiques au 1/200.000
 - a) feuille de Bafoulabé
 - b) feuille de Kita
 - c) feuille de Siguiri
 - d) feuille de Kaédi
 - e) feuille de Matam
 - f) feuille de Dagana
 - g) feuille de Bafing
 - h) feuille de Sélibabi
 - i) feuille de Podor
 - j) feuille de Dabola

LISTE DES FIGURES ET CARTES

Figure N°	Intitulé	Page
	Paysages du bassin du Sénégal.....	I 18
	Etats riverains du bassin du Sénégal....	24
X	Coupes géologiques à travers le bassin ..	28
	Surfaces d'aplanissement, glacis et terasses	33
	Evolution de la basse vallée	34
	Profils en long du Sénégal en amont du Bakel.....	44
	Coupe schématique de la basse vallée.....	46
	Courbes hysométriques dans le bassin	50
Y	Les Nappes phréatiques de la vallée du Sénégal.....	67
	Relation pluie et latitude.....	86
	Principe de l'homogénéisation des données..	98
	Ajustement à l'échelle annuelle.....	I 04
	Ajustement à l'échelle mensuelle.....	I 06
	Régression linéaire à l'échelle annuelle...	I 10
	Régression linéaire à l'échelle mensuelle..	I 10
	Profil pluviométrique.....	I 24
	Evolution du C.V. annuel.....	I 25
	Variabilité interannuelle des précipitations.	I 27
	Variabilité interannuelle des précipitations.	I 28
	Circulation atmosphérique générale.....	I 38
	Variation saisonnière de la circulation..... générale	I 38
	Positions moyennes du F.I.T.....	I 40
	Facteur dynamique de la zone intertropicale..	I 42

SUITE : LISTE DES FIGURES ET CARTES

Figure N°	Intitulé	Page
4	Caractères de la série pluviométrique de référence.....	I54
5	Périodes humides et périodes sèches.....	I58
6	Les oscillations climatiques en Afrique occidentale.....	I66
7	Déficit moyen de la période de sécheresse...	I74
8	Variabilité des précipitations en Afrique occidentale.....	I86
9	Répartition spatiale des stations de la régression.....	I92
0	Evolution des facteurs thermiques.....	2I0
I	E.T.P.(Penmann) et E.T.P.(Turc) évolution comparée.....	220
2	Evolution Pmm E.T et E.T.P.....	224
3	Séries hydrométriques de référence.....	242
4	Ajustement des débits moyens annuels.....	252
5	Hydraulicité en pourcentage sur la période : 195I-1980 à Dakka Saïdou.....	268
6	Hydraulicité sur la période 195I-1980 à FADOGOU.....	273
7	Hydraulicité en pourcentage sur la période : 195I-1980 à GALOUGO.....	28I
8	Hydraulicité en pourcentage sur la période I55I-I580 dans le bassin du Sénégal.....	293
9	Hydraulicité en pourcentage sur la période 195I-1980 à BAKEL.....	296
0	Modules du Sénégal à BAKEL.....	3I8
I	Variations mensuelles des débits à BAKEL.....	328

SUITE : LISTE DES FIGURES ET CARTES

Figure N°	Intitulé	Page
2	Variations mensuelles des débits à DAKKA SAIDOU.....	334
3	Variations mensuelles des débits à GALOUGO.....	348
4	Variations mensuelles des débits à DIBIA.....	346
5	Evolution des C.M.D. 1903-1980.....	324
6	Distribution statistique des débits maximaux mensuels dans le bassin.....	362
7	Distribution statistique des débits maximaux mensuels dans le bassin.....	364
8	Distribution statistique des débits maximaux mensuels des débits journaliers à BAKEL.....	368
9	Evolution inter-annuelle des pointes de crues à BAKEL (1903-1980).....	372
0	Variations journalières des débits pour la crue 1922.....	374
1	Evolutions mensuelles de la pluviométrie en mm. et des débits moyens en M3/s.....	385
2	Etude du tarissement dans le bassin.....	387
3	Evolution comparée de la pluviométrie et des volumes.....	402
Cartes N°		
1	Carte de situation du bassin.....	4
2	Hysométrie et cadre morpho-structural.....	14
3	Chevelu hydrographique.....	22
4	Géologie et tectonique.....	26
5	Unités hydrologiques.....	48
6	Lithologie.....	60
7	Sols et végétation.....	72
8	Cartes de pluies moyennes : 1931-1960.....	84

SUITE : LISTE DES CARTES

te N°	Intitulé	Page
	Domaines et régions climatiques.....	88
	Equipement hydropluviométrique.....	102
	Les liaisons pluviométriques.....	100
	Carte des stations retenues.....	114
	Profil pluviométrique moyen de la série de référence.....	120
	Cartes des déficits moyens des années de sécheresse.....	176
	Carte des isohyètes 1931-1960;..... Carte comparative.....	202
	Carte des isohyètes : 1951-1980 Carte comparative.....	202
	Carte des isohyètes : 1951-1980.....	204
	Carte des isohyètes : 1970-1980.....	206
	Carte de profils ombrothermiques.....	212
	Carte de synthèse des facteurs de l'écoulement..	233
	Le réseau hydrométrique.....	238
	Le domaine guinéen ou de transition du bassin du Sénégal à DAKKA-SAIDOU.....	266
	Bassin du Sénégal à GALOUGO.....	278
	Evolution des modules moyens dans le bassin....	308
	Carte de synthèse de l'écoulement moyen	395

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°	Intitulé	Page
I	Données caractéristiques physiques dues au bassin.....	40
2	Dénominations climatiques dans le bassin.....	87
3	Origine des données pluviométriques.....	X 94
4	Caractéristiques de la série d'étude.....	96
5	Période et coefficients correctifs aux stations de base.....	I01
6	Caractéristiques des stations de base.....	I05
7	Coefficient de variation aux stations de base....	I08
8	Comparaison des normales pluviométriques.....	II5 et II6
9	S.T.B. de l'analyse des P.M.M. annuels.....	II8
10	Importance cumulée en pourcentage des mois de saison de pluie.....	I22
11	Présentation des S.T.B. de l'analyse I.V.C.V.-C.P..	I26
12	Variable U.....	I31
13	Etude annuelle fréquentielle des pluies.....	I32
14	Durée de retour des précipitations extrêmes.....	I33
15	Etude fréquentielle mensuelle des pluies.....	Y I34
16	Coefficient d'irrégularité inter-annuel.....	I36
17	Bassin du Sénégal : pluie moyenne annuelle, périodes humides et périodes sèches.....	X I60 et I61
18	Ecart à la moyenne 1951-1980 en pourcentage.....	I68
19	Ecart par rapport aux trois moyennes.....	I70
20	Présentation des stations de la régression multiple..	I90
21-22	Régression linéaire.....	I94 et I95
23	Coefficient de corrélation multiple.....	I97

SUITE : LISTE DES TABLEAUX

leau N°	Intitulé	Page
24	Lames d'eau moyennes précipitées : Période I95I-I980.....	204
25	Lames d'eau moyennes : Période I970-I980.....	206
26	Facteur thermique dans le bassin.....	208
27	Valeurs caractéristiques moyennes annuelles en régime sahélien.....	2I5
28	Valeurs caractéristiques moyennes des tempé- ratures en régime nord-soudanien.....	2I6
29	Humidité relative et E.T.P. valeur moyenne....	2I8
30	Evaporation et évapotranspiration selon Turc..	222
3I	Les facteurs de l'écoulement et leurs influ- ences.....	228
32	Coefficients de variation mensuels et annuels.	244
33	Coefficient de corrélation mensuel.....	248
34	Corrélations annuelles entre stations.....	250
35	Information sur les stations hydrométriques...	254
36	Coefficient de représentativité des périodes du bilan.....	262
37	Comparaison des modules dans le bassin du Sénégal.....	263
38	Valeurs moyennes et termes du bilan à DAKKA-SAIDOU.....	265
39	Modules fréquentiels sur la période I95I-I980..	269
40	Valeurs moyennes et termes du bilan I95I-I980..	27I
4I	Modules fréquentiels sur la période 70-80 à DAKKA-SAIDOU.....	27I
42	Valeurs caractéristiques et termes du bilan à FADOGOU.....	272

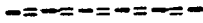
SUITE : LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°	Intitulé	Page
43	Modules fréquentiels sur la période : 1951-1980 à FADOGOU.....	274
44	Valeurs et termes du bilan à FADOGOU : période : 1970-1980.....	275
45	Modules fréquentiels sur la période 1970-1980 à FADOGOU.....	276
46	Valeurs caractéristiques et termes du bilan à GALOUGO.....	279
47	Valeurs et caractéristiques moyennes de l'écoulement à KAYES.....	280
48	Modules fréquentiels en M3/S à GALOUGO.....	282
49	Valeurs caractéristiques et termes du bilan à GALOUGO (1970-1980).....	283
50	Modules fréquentiels en M3/S sur la période 1970-1980.....	283
51	Valeurs caractéristiques de l'écoulement à DIBIA (1951-1980).....	285
52	Valeurs caractéristiques de l'écoulement à TOUKODO.....	287
53	Valeurs caractéristiques et termes du bilan à BAKEL : 1951-1980.....	295
54	Modules fréquentiels en M3/S à BAKEL (51-80)..	297
55	Valeurs caractéristiques et termes du bilan à BAKEL (1970-1980).....	298
56	Modules fréquentiels en M3/S à BAKEL (70-80)...	299
57	Valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement sur la période 51-80 dans le bassin.....	300
58	Valeurs caractéristiques de l'écoulement DAGANA (1903-1964).....	301
59	√ Bilan hydraulique moyen (51-80) dans le bassin..	302
60	Modules fréquentiels sur la période 51-80 dans le bassin.....	304
61	Valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement annuel : valeurs extrêmes de 51 à 80.....	306
62	Valeurs caractéristiques moyennes de l'écoulement (1903-1980).....	310

SUITE : LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°	Intitulé	Page
63	Débit annuel fréquentiel dans le bassin du Sénégal.....	312
64	Valeurs caractéristiques moyennes et valeurs extrêmes dans le bassin du Sénégal(I903-I980)...	314
65	Modules fréquentiels dans le bassin : I03-I980.....	316
66	Données du régime du Sénégal à BAKEL.....	322
67	Données du régime du Sénégal à DAKKA-SAIDOU.....	332
68	Données du régime du Sénégal à GALOUGO.....	338
69	Coefficient mensuel de débit dans le bassin du Sénégal I903-I980.....	350
70	Bassin du Sénégal : débits fréquentiels mensuels (I903-I980).....	353
71	Bassin du Sénégal : étude des débits maximaux mensuels (I903-I980).....	356
72	Coefficient d'irrégularité des maximums dans le bassin du Sénégal.....	363
73	Etudes fréquentielles des débits maximaux.....	366
74	Crues exceptionnelles dans le bassin du Sénégal, valeur journalière en M3/S.....	370
75	Temps et vitesses de propagation du débit journalier.....	373
76	Valeurs extrêmes des maximaux mensuels I903-I980..	376
77	Etude des minimums mensuels I903 - I980.....	378
78	Caractéristiques du tarissement.....	387
79	Volume drainable au début du tarissement	389

// ISTE DES ILLUSTRATIONS



	Page
Courbes d'étalonnage	
1.- Courbes à Toukoto, Bakel, Galougo et Gourbassi	407
2.- Courbes à Dakka-Saïdou, Fadougou et Oualia	408
3.-	
Liste des photographies	
1.- Le plateau Mandingue	409
2.- La Falaise de Tambaoura	409
3.- Cuvette argileuse dans la vallée du Gorgol	410
4.- Les chutes du Sénégal à Gouina	410
5.- Le Sénégal à Bakel	411
6.- Le Sénégal à Bakel	411
7.- Le Sénégal à Podor	412
8.- Les dunes du Brakna	412
9.- Végétation de la basse-Falémé	413
Coupures de documents de presse relatifs au problème de l'eau	415

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....I
INTRODUCTION.....5

PREMIERE PARTIE

LES CARACTERES PHYSIQUES DU BASSIN DU SENEGAL
LES FACTEURS DE L'ECOULEMENT

CHAPITRE I - LA DIVERSITE DES PAYSAGES DU BASSIN DU SENEGAL.....I3
 Les paysages du bassin.....I3
 1. Le Haut-Bassin;.....I5
 2. La vallée ou Cours Inférieur.....I7

CHAPITRE II - LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET LE BASSIN DU SENEGAL..... 2I
 A/ Le réseau hydrographique..... 2I
 B/ Le Bassin du Sénégal..... 24
 1. Les eaux stagnantes..... 25
 2. La géologie et les héritages du passé..... 27

CHAPITRE III - LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN DU
 SENEGAL..... 39
 A/ Les caractéristiques physiques principales..... 39
 1. Les formes des bassins.....42
 2. Le relief et l'hypsométrie.....43
 3. Les indicis de pentes et profils en long.....45
 B/ Les unités hydrologiques.....47
 1. Le bassin de la Falémé.....49

2. Le bassin du Bafing.....	51
3. Le bassin du Bakoye.....	52
4. Le bassin du Baoulé.....	53
5. Le bassin du Sénégal.....	54

<u>CHAPITRE IV</u> - LES FACTEURS LITHOLOGIQUES.....	59
<u>Les zones de perméabilité et les systèmes</u> <u>aquifères.....</u>	61
1. Le Haut-Bassin imperméable.....	62
2. Les nappes de la vallée ou Cours Inférieur	64

<u>CHAPITRE V</u> - LES FACTEURS PEDOLOGIQUES ET BIOGEOGRAPHIQUES...	71
A/ <u>L'étude des sols du bassin.....</u>	73
1. Les sols subarides.....	73
2. Les sols ferrugineux tropicaux.....	74
3. Les sols ferralitiques.....	75
4. Les sols intrazonaux.....	76
5. Bref aperçu sur le cuirassement.....	77
B/ <u>Les formations végétales.....</u>	78
1. Les steppes sahéliennes.....	78
2. Les savanes soudaniennes.....	79
3. Les forêts et savanes guinéennes.....	80
4. La végétation azonale.....	81

<u>CHAPITRE VI</u> - LA DIVERSITE CLIMATIQUE DU BASSIN DU SENEGAL...	83
A/ <u>La délimitation climatique.....</u>	85
Domaines et régions climatiques.....	86
B/ <u>La critique des données pluviométriques.....</u>	93
1. L'acquisition des données et le réseau de postes.....	93
2. L'homogénéisation et les liaisons pluvio- métriques.....	97
3. Le comblement des lacunes.....	103