

MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS
SECONDAIRE ET SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

REPUBLIQUE DU MALI
UN PEUPLE - UN BUT - UNE FOI

E.N.I.
ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS
DER : GENIE-CIVIL

ORSTOM
INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT
EN COOPERATION
LABORATOIRE D'HYDROLOGIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme d'INGENIEUR DES SCIENCES APPLIQUEES

Option : AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

ETUDE DES VARIATIONS HYDROCLIMATIQUES SUR LE BASSIN VERSANT DU BANI DE 1950 A 1990

Présenté par :

MOUSSA DIABATE

Juin 1995 à Bamako

Dirigé par :

Dr MAHE G. (ORSTOM)

Dr OLIVRY J.C. (ORSTOM)

Dr DIARRA A.T. (ENI)

DEDICACE

A la mémoire de mon frère Arouna DIABATE (5^{ème} année hydrogéologie, ENI), que le destin a brutalement arraché à mon affection, que son âme repose en paix.

A mon père feu Mamadou DIABATE, paix à son âme.

A ma mère Djelissira DIABATE et à ma tante Koumba DIABATE qui ont consenti d'énormes sacrifices pour mes études.

A tous mes frères pour leurs soutiens indéfectibles.

SOMMAIRE

Remerciements	5
Symboles et Abréviations	6
Résumé	7
INTRODUCTION	8

CHAPITRE I~ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET CLIMATIQUE DU BASSIN-VERSANT DU BANI

I-1.CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DU BANI	11
I-1.1.Situation et relief	11
I-1.2.Réseau hydrographique	11
I-1.3.Sol et Sous-Sol	14
I-1.4.Couverture végétale	15
I-2.CLIMATOLOGIE	17
I-2.1.Le contexte climatique du bassin du Bani	17
I-2.2.Etude des facteurs climatiques	18
I-2.2.1.Régime des vents	18
I-2.2.2.Températures	19
I-2.2.3.Humidité relative	19

CHAPITRE II~ANALYSE DES DONNEES DE BASE SUR LE BASSIN DU BANI A DOUNA

II-1.ETUDE DES PRECIPITATIONS	26
II-1.1.Données de pluies	26
II-1.2.Description des précipitations sur le bassin et évolution sur la période 1950-1990	29

II-1.3.Détermination des précipitations sur le bassin	32
II-2.ETUDE DES DEBITS	36
II-2.1.Données de débits	36
II-2.2.Régime hydrologique du Bani à Douna	38
II-3.EVAPOTRANSPIRATION	43
Evapotranspiration potentielle	43

CHAPITRE III~ETABLISSEMENT DES BILANS HYDROLOGIQUES

III-1.LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL	47
III-1.1.Les termes du bilan	47
III-1.1.1.Lames d'eau écoulées et précipitations annuelles	47
III-1.1.2.Coefficient d'écoulement et déficit d'écoulement	48
III-2.LE BILAN MOIS PAR MOIS	50
CONCLUSIONS	52
REFERENCES	54
BIBLIOGRAPHIE	56
LISTE DES TABLEAUX	58
LISTE DES FIGURES	61

REMERCIEMENTS

Au mois de février 1994, le docteur Jean Claude Olivry, alors représentant de l'ORSTOM à Bamako, a su comprendre mes motivations et a accepté que je puisse trouver un sujet de stage dans le département d'Hydrologie au centre ORSTOM de Bamako. Depuis il n'a jamais cessé de me soutenir et de me conseiller dans toutes les situations, même les plus difficiles. C'est sur son initiative que je dois d'avoir effectué mes premières séries de jaugeages (juin à septembre, 1994) sur le bassin-versant de BELEKONI, dans la région de Bougouni. C'est avec beaucoup de reconnaissance que je lui adresse mes plus sincères remerciements.

Je tiens ensuite à remercier très chaleureusement le docteur Gil Mahé, chargé de recherche au centre ORSTOM de Bamako, directeur du présent ouvrage, et pour lequel il n'a jamais manqué de me prodiguer des conseils, mais également son soutien actif. Il m'a fait bénéficier sans retenue de sa clairvoyance, de son grand sens pédagogique et de son soutien moral empreint de bonne humeur. J'aimerais en retour qu'il soit assuré que j'ai pour lui le plus profond respect.

Le docteur Adama T Diarra, professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs, codirecteur du présent projet, il ne m'a jamais quitté des yeux durant l'élaboration de ce travail. Il m'a fait partager son expérience active de l'Hydrologie et m'a témoigné sa confiance en me faisant partager toutes ses idées. Qu'il trouve ici le témoignage de ma plus sincère reconnaissance.

J'adresse également mes plus sincères remerciements :

- au docteur Bamba Fatogoma, chercheur à l'ORSTOM, toujours disponible, il m'a fait part de sa grande expérience en informatique et de ses encouragements ;

- à monsieur Bricquet J P, responsable du laboratoire d'Hydrologie pour la documentation et les données de pluies qu'il a mises à mon service ;

- à Diarra M et Droux J P, qui m'ont enseigné mes premiers pas dans la technique de jaugeage au moulinet ;

- à la direction de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs et à tous mes professeurs ;

- à Touré M pour le regard critique qu'il a bien voulu apporter à la réalisation de ce travail en temps qu'hydrologue.

J'aimerais remercier particulièrement plusieurs personnes qui ont apporté leur contribution à cette étude. Je citerais tout d'abord, monsieur Ibrahim Diallo (dit Thiol) ; messieurs Housseini Maïga et Wélé Amadou de la DNHE ; Keïta Madany et Fofana de l'ASECNA ; mesdames Tandia Fanta Traoré et Touré Adam également de l'ASECNA.

J'adresse enfin ma reconnaissance la plus profonde à ma mère, à ma tante, à toute ma famille, et à mes amis pour leur soutien moral et matériel.

Que tous retrouvent dans le présent rapport l'expression de ma profonde gratitude.

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

ENI : Ecole Nationale d'Ingénieurs

ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

ASECNA : Agence pour la SECurité de la Navigation aérienne en Afrique et à Madagascar

EQUANIS : Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel

DNHE : Direction Nationale de l'Hydraulique et l'Energie

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

FIT : Front Inter-Tropical

T : Température moyenne

U : Humidité relative moyenne

e : Tension de vapeur d'eau

ew : Tension de vapeur d'eau saturante

P : Pluie

Q : Débit

N : Nombre d'observations

r : Coefficient de corrélation

P_{mi} : Précipitation moyenne de la station i

S_i : Surface arrosée par la station i

S : Surface du bassin-versant

W_i : Proportion de surface de la station i

De : Déficit d'écoulement

Le : Lamme d'eau écoulée

Ke : Coefficient d'écoulement

α : Coefficient de tarissement

RFU : Réserve facilement utilisable

RESUME

Depuis une vingtaine d'années, le bassin du Bani est soumis à un déficit pluviométrique important. Jusqu'à présent, le manque d'informations pluviométriques, et en particulier les lacunes dans les séries chronologiques n'ont pas permis d'analyses objectives, à grande échelle de la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur le bassin-versant du Bani à Douna.

La méthode statistique de corrélations entre stations voisines a permis de réaliser une telle analyse au pas de temps mensuel. En effet, grâce à cette méthode on a pu constituer 29 fichiers de pluies annuelles contenus dans les observations de 44 postes pluviométriques sur le bassin. Ces fichiers de pluies constituent ainsi des séries chronologiques complètes caractérisant l'ensemble de la pluviométrie annuelle sur le bassin de 1950 à 1990. Elles montrent une période d'environ 20 années de déficits pluviométriques.

De plus on a pu montrer à partir de la chronique des débits enregistrés à Douna (101600 km²) une décroissance persistante des écoulements. Cependant la baisse des pluies n'est que de 15% en 1981/90 par rapport à la moyenne de 1950-1990, alors que celle des écoulements est de 66%. La réduction des modules annuels peut être logiquement reliée à la diminution des apports souterrains : en 1981/90, des pluies de 27% inférieures à la moyenne de 1950/60 entraînent une diminution de 80% de la lame écoulée. Les variations du déficit d'écoulement sont assez peu significatives, la valeur moyenne interannuelle est de 1005 mm sur le bassin.

L'évapotranspiration potentielle moyenne atteint 1530 mm ; la plus faible valeur de l'ETP (107 mm) intervient au mois de décembre ; la valeur maximale (158 mm) est observée au mois d'août.

Le bilan mois par mois explique de façon simplifiée le comportement réel du bassin, il précise que l'évapotranspiration réelle est satisfaite pendant 5 mois de l'année (juin à octobre) ; la valeur moyenne interannuelle est de 885 mm.

Abstract

For twenty years, the Bani River basin experienced a serious rainfall deficit. Until now, the lack of rainfall information and the particular gaps in the chronological series have not permitted objective tests on a large scale of rainfall spatio-temporal variability on the slopes of the Bani River basin at Douna. The statistical method of correlation between neighbouring stations had permitted to realize such a monthly test. Indeed, thanks to this method, we were able to put together 29 files of annual rains from the observation of 44 rainfall stations on the basin. These files of rainfall constitute therefore some complete chronological series characterizing the whole of the annual rainfall on the basin from 1950 to 1990. They show a period of around 20 years of rainfall deficit. Moreover, we were able to show a lasting diminution of runoff at the station of Douna (101600 km²). However, considering the 1950/90 mean values, precipitations were reduced by 15% in 1981/90, while the runoff decreased by 66% during the same period. The reduction of mean annual discharges can be assumed to result of the reduction of the base flow : in 1981/90, 27% less rainfall, compared to the 1950/60 mean, produced an 80% decrease in runoff. The runoff deficit variations are not significant, the mean interannual value of runoff deficit for the basin is 1005 mm. The potential evapotranspiration average reaches 1530 mm ; the minimum mean of ETP (107 mm) appears in December, the maximum mean (158 mm) is observed in August. The balance explains in a simple form the real performance of the basin ; it specifies that real evapotranspiration is satisfied during 5 months (June to October), the average interannual value is 885 mm.

INTRODUCTION

Cette étude comme le laisse sous-entendre son intitulé, s'inscrit dans le cadre de la mise en oeuvre d'un vaste programme de recherche scientifique sur l'environnement et la qualité des apports du fleuve Niger au Sahel (EQUANIS), initié par l'ORSTOM à Bamako. Il s'agit de contribuer à l'amélioration des connaissances concernant les variations hydroclimatiques des bassins fluviaux.

L'objectif majeur est donc de présenter, sur la période 1950-1990, une étude des variations hydroclimatiques sur le bassin-versant du Bani à Douna. L'étude des déficits pluviométriques enregistrés depuis plus de vingt ans en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Sahel montre une péjoration climatique globale qui fait de ce thème un sujet préoccupant. Le Mali du fait de son appartenance au Sahel, est l'un des pays les plus cruellement touchés par ces déficits pluviométriques.

En effet, ces déficits se sont largement répercutés et généralement amplifiés dans l'écoulement des bassins fluviaux. Par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'elle suppose sur l'ensemble d'un bassin-versant, la variabilité de l'écoulement annuel est supposée constituer un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques.

Dans ce cadre de recherche, le Bani offre les plus longues séries chronologiques de modules à Douna.

Il s'agit donc :

- ⇒ de faire ressortir les grandes périodes récentes de variations climatiques, sachant que les bassins-versants sont les meilleurs intégrateurs de la variabilité spatiale des précipitations ;
- ⇒ de constituer un fichier de données hydroclimatiques du bassin ;
- ⇒ d'élaborer le bilan hydrologique du bassin ;
- ⇒ de comprendre les deux types de sécheresse.

De nombreuses études et notamment celles de Mahé (1992, 1993), Sircoulon et Olivry (1986), Olivry (1983, 1986, 1987), Olivry, Sircoulon et Touré (1992) ont permis de définir deux types de sécheresses au Sahel :

- la première situation traduit un déficit pluviométrique généralisé : c'est la sécheresse pluviométrique.
- la seconde qui est la conséquence de l'appauvrissement considérable des aquifères est due à une réduction de l'écoulement de base. et est appelée "sécheresse phréatique".

CHAPITRE I

ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET CLIMATIQUE DU BASSIN-VERSANT DU BANI

Dans ce premier chapitre on rappelle le schéma général du milieu physique et du contexte climatique du bassin-versant du Bani (ORSTOM, 1959 ; Rodier, 1964 ; Brunet-Moret et al/ 1986 ; Olivry, 1992.).

I-1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN-VERSANT DU BANI

I-1.1. Situation et relief

Le bassin du Bani fait partie intégrante du bassin supérieur du Niger. Il est limité vers l'est par le méridien de San, à l'ouest par celui de Bamako. Sa limite sud déborde légèrement sur les territoires de Côte d'Ivoire et du Burkina Faso. Sa limite nord est sensiblement parallèle au cours du Niger et située à une quarantaine de km au sud de celui-ci.

Le relief du bassin du Bani est peu accentué. Les reliefs les plus marqués se situent sur la bordure Sud du bassin, dans le massif du haut-Bagoé à l'ouest de Boundiali et dont les sommets culminent vers 800 m. La caractéristique essentielle du bassin est une pente très faible vers le nord-est entre les cotes 400 et 300 m où les seuls accidents sont, au sud du bassin ; des buttes latéritiques à surface horizontale fortement entaillées par le réseau hydrographique et, au nord d'une ligne Bougouni-Sikasso, des tables de grès.

I-1.2. Réseau hydrographique

Le Bani est constitué par la réunion du Baoulé et du Bagoé. Ces deux cours d'eau, prennent naissance dans la série des collines séparant le bassin du Niger des fleuves côtiers de Côte-d'Ivoire. L'ensemble drainé concerne le sud du Mali et le nord de la Côte d'Ivoire, le réseau hydrographique du Bani est présenté dans la figure I.1.

Le Baoulé prend sa source vers Odienné à la cote 450 m puis descend en pente douce vers le nord, vers le Niger. Méandres et plaines d'inondation commencent déjà à l'amont d'Odienné. Après un parcours d'environ 30 km, le Baoulé prend rapidement la direction sud-nord, avec une pente de 40 cm par km et reçoit sur sa rive droite un premier affluent (Banifing) ; la pente diminue fortement (20 cm par km), les méandres s'accroissent et un peu plus loin, le Baoulé reçoit sur sa rive droite le Dégou. Il passe à Bougouni à 500 km de la source ; les sinuosités prennent encore plus d'ampleur, la plaine d'inondation atteint une largeur de 800 à 1500 m. Peu après, il reçoit un second Banifing sur sa rive droite et un troisième sur sa rive gauche. Après un parcours relativement encaissé, le Baoulé prend la direction générale ouest-est et conflue avec le Bagoé un peu après Doïla, à 800 km de sa source.

Le Bagoé prend sa source au sud de Boundiali vers la cote 600 m. Elle descend en plaine suivant la direction sud-nord et présente très vite de larges plaines d'inondation et un cours sinueux. Il reçoit dans son cours moyen le Bafini en rive droite et sur sa rive gauche le Kankelaba puis un Banifing. La pente diminue, les

méandres s'accroissent et le Bagoé rejoint le Baoulé après un parcours de 700 km environ.

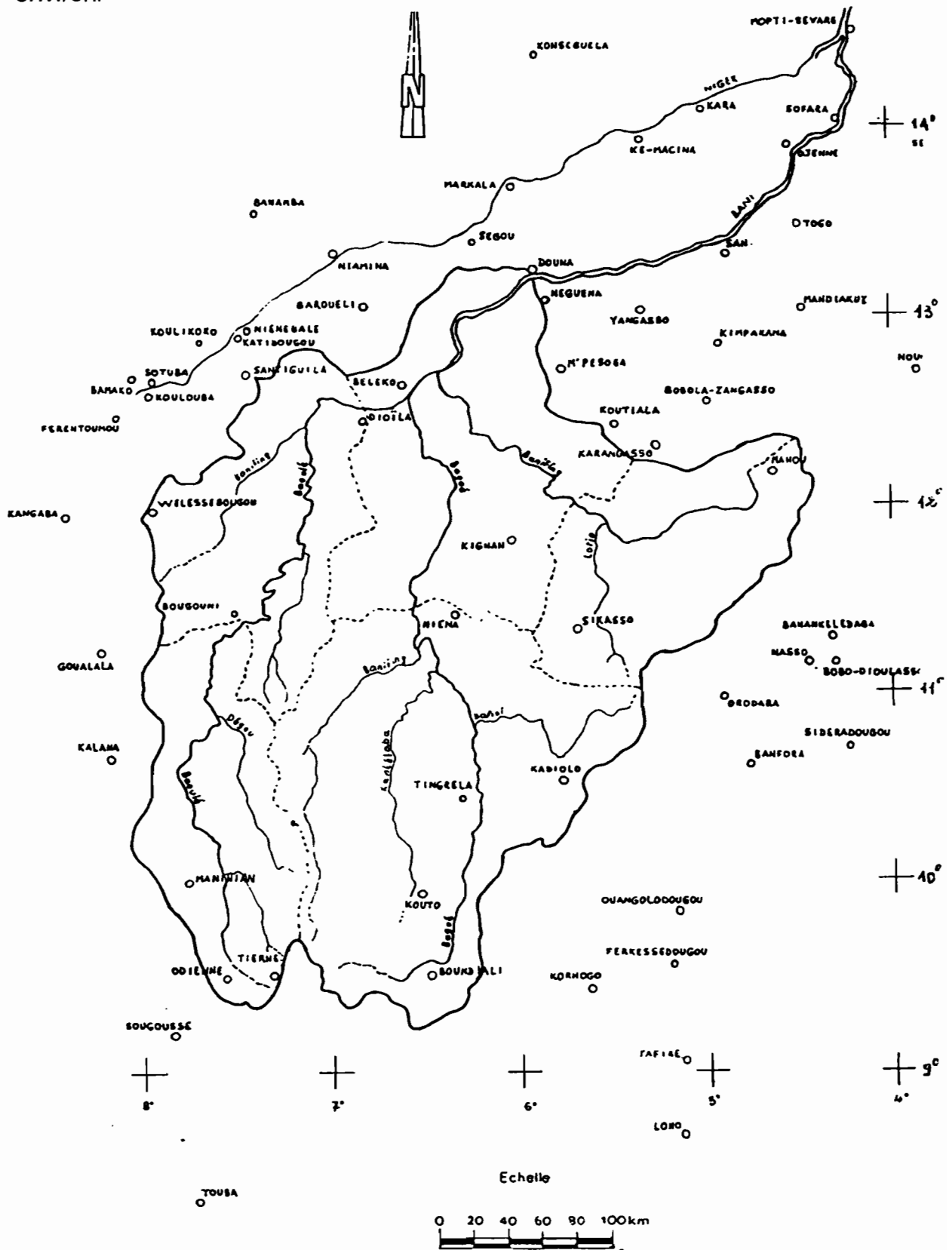


Figure 1.1

Réseau hydrographique du bassin versant du Bani

A 20 km en aval du confluent Baoulé-Bagoé, le Bani reçoit en rive droite le plus important de tous les Banifing qui draine la région de Sikasso. Après ce dernier affluent important, le Bani s'élargit de plus en plus, les sinuosités du lit apparent disparaissent presque et la plaine d'inondation devient de plus en plus large. Le Bani passe au voisinage de San, où il reçoit le Banifing de San, puis rentre dans la cuvette lacustre du Niger vers l'altitude 269 m.

En résumé, on peut dire que le réseau hydrographique du Bani présente des caractéristiques très homogènes. Les cours d'eau prennent naissance à faible altitude et drainent des régions à très faible relief (Fig. 1.2). Les vallées sont larges et plates, la pente du lit est très faible. Les berges du lit mineur sont taillées verticalement dans le sol limoneux des fonds de vallées. Le relèvement du plan d'eau en crue est important et peut atteindre 7 à 8 m. Le débordement est la règle générale, l'extension des plaines d'inondation importante, même en amont, à faible distance des sources. De ces caractéristiques générales résultent des crues amorties par les plaines d'inondation et un diagramme annuel de forme très régulière.

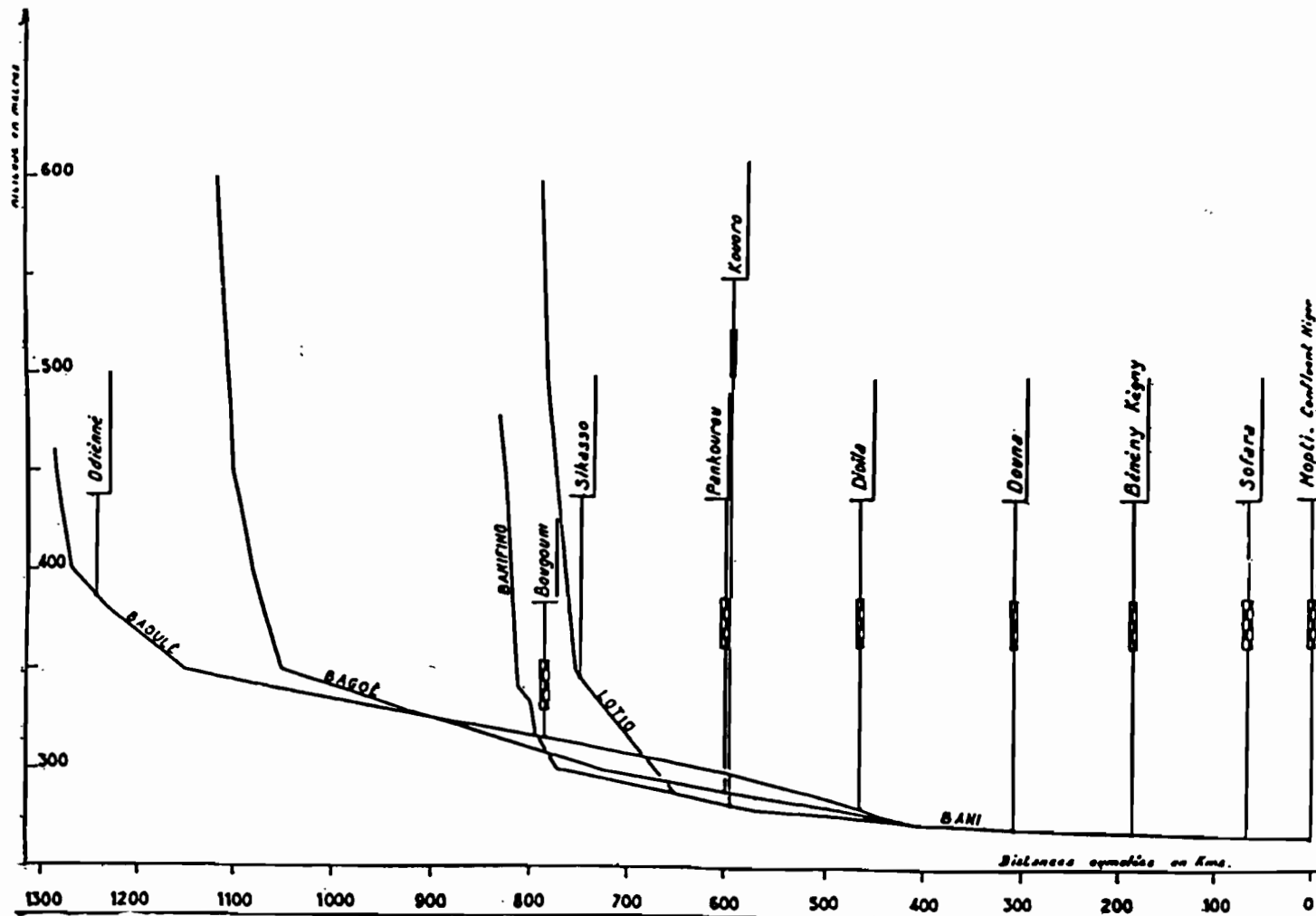


Figure 1.2

Profil en long du Bani et de ses affluents (d'après carte régulière au 1/200 000 e).

I-1.3.Sol et sous-sol

Les formations géologiques du bassin du Bani sont très anciennes. Le socle précambrien, granito-gneissique affleure dans toute la moitié sud-ouest du bassin.

Dans la région de Bougouni et de part et d'autre de la vallée du haut Bagoé, à l'est de Tingrela, le socle précambrien est recouvert de micaschistes ou quartzites pouvant être rattachées à l'étage birrimien.

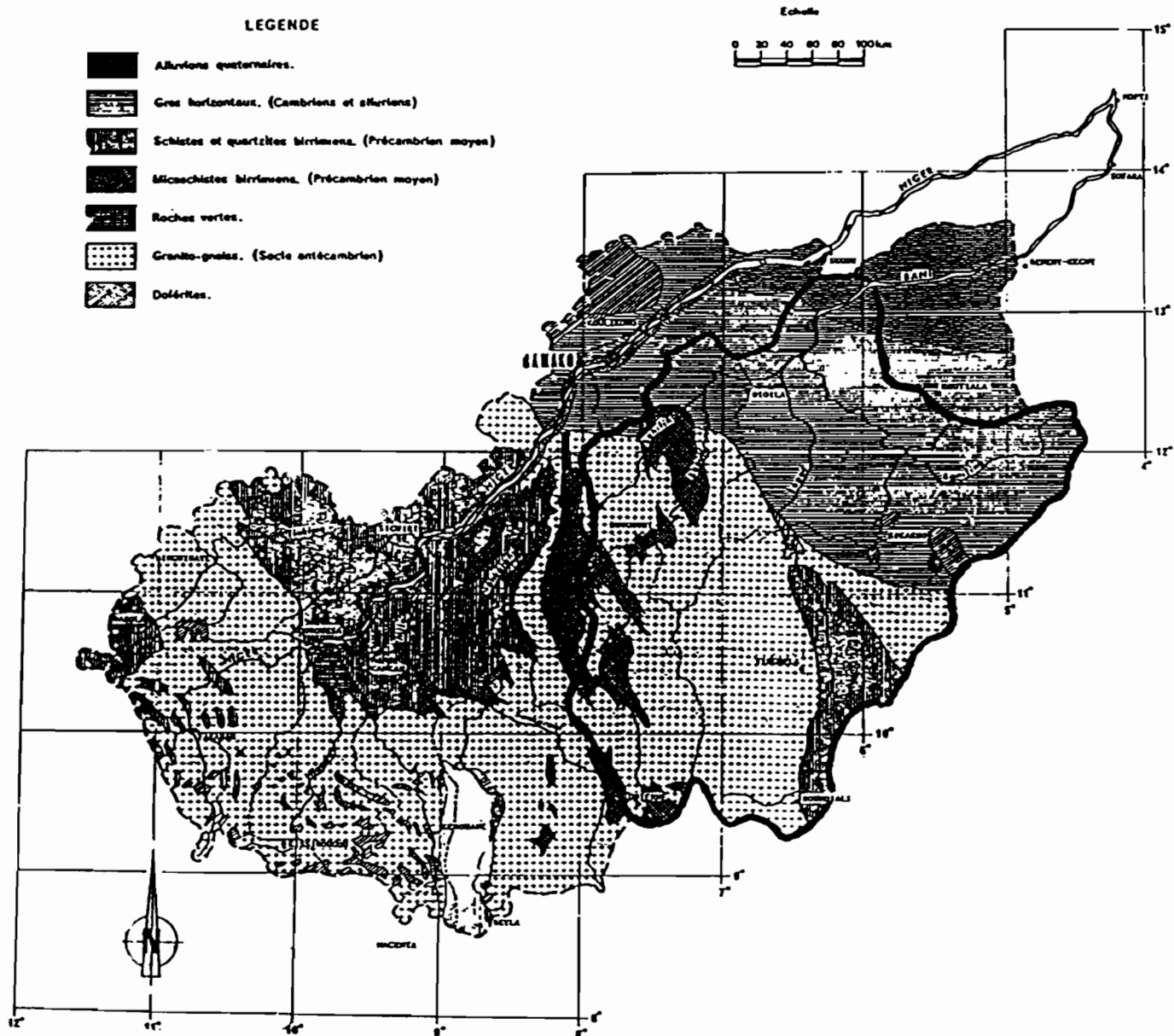


Figure I.3

Esquisse géologique du bassin versant du Bani

La partie nord du bassin est occupée par une extension vers l'est, des formations gréseuses des monts Mandingue.

La partie terminale du bassin, en aval de la station de Douna, est constituée par une vaste plaine alluviale quaternaire, amorce du delta intérieur du Niger.

En règle générale, la roche, profondément remaniée en surface, est recouverte d'une épaisse couche de produits d'altération.

Les granito-gneiss sont recouverts d'argiles latéritiques peu perméables. Le contact avec la roche mère est constitué par une zone arénique très perméable offrant de grandes possibilités de rétention.

Les terrains gréseux sont recouverts d'une latérite perméable qui s'est constituée au détriment des schistes plus récents. Dans certains cas, les grès sont à nu ou ferrugineux en surface, ils sont imperméables et donnent lieu à un très fort ruissellement.

Les formations birrimiennes ont subi, elles aussi, une latéritisation importante. La carapace latéritique, généralement cuirassée très dure, est fissurée, ce qui lui donne une certaine perméabilité. Les niveaux inférieurs sont constitués par des argiles plus ou moins perméables, présentant une capacité de rétention notable.

En résumé, le substratum du bassin du Bani est constitué de roches imperméables. L'altération latéritique est importante. Les réserves hydriques, constituées à la base de ces formations, peuvent donner naissance à des débits de restitution importants en saison sèche.

I-1.4. Couverture végétale :

Le bassin du Bani se situe entièrement en zone de savane. La savane est caractérisée par la prépondérance des végétaux herbacés qui se développent rapidement à la saison des pluies, mais se dessèchent ou meurent en fin de cycle. Suivant la durée et la vigueur de la saison sèche, on trouve des arbres et des arbustes de moins en moins denses, associés aux herbes.

Au sud, sensiblement pour la partie du bassin située en Côte-d'Ivoire, la savane est du type arboré classique (savane guinéenne). Le peuplement arbustif est assez dense, le tapis herbacé important. On y rencontre quelques galeries et îlots forestiers de peu d'étendue. Ce type de végétation remonte en bordure est du bassin sensiblement vers le nord pour atteindre la région de Sikasso (bassin supérieur du Bafini). Ce type de savane constitue une protection efficace du sol, freine considérablement le ruissellement, ce qui accroît encore le pouvoir de rétention du terrain.

Lorsqu'on se déplace vers le nord, la densité de la savane décroît, les galeries forestières disparaissent, la végétation prend un caractère xérophyle accusé. Cette végétation clairsemée n'offre plus qu'une faible opposition au ruissellement, surtout en début de la saison des pluies, alors que le tapis herbacé n'est pas encore reconstitué.

Enfin pour conclure cette présentation du milieu physique du bassin-versant du Bani, nous signalons que les divers facteurs constitutifs de la morphologie du bassin, mettent en évidence certaines caractéristiques dont : le relief peu accentué, les pertes d'inondation importantes, la couverture végétale oppose un frein efficace au ruissellement à partir du mois d'août, et inhibe tout ou partie de l'action érosive, les pentes sont faibles et homogènes.

De ces diverses caractéristiques résulte une influence modératrice générale sur le ruissellement. L'importance des pertes, retardera l'arrivée de la crue : il faudra attendre vraisemblablement un mois à un mois et demi après le maximum de pluviosité qui se situe généralement fin août pour voir le la crue du Bani se produire. Par contre les plaines d'inondation restituent en basses eaux une faible partie de ce qu'elle ont absorbé en crue.

I-2. CLIMATOLOGIE

I-2.1. Le contexte climatique du bassin du Bani

Le bassin du Bani est sous l'influence du climat tropical. Le climat tropical est caractérisé essentiellement par l'alternance de deux grandes saisons annuelles : la saison des pluies, centrée sur l'été boréal, et la saison sèche en hiver.

Cette alternance est assujettie aux interactions de deux masses d'air :

- l'air continental stable et sec de température élevée (harmattan) provenant de l'anticyclone saharien, et de direction générale nord-est .
- l'air maritime humide et instable qui forme la mousson et a une température relativement fraîche ; il est issu de l'Atlantique sud, sa direction sur le bassin est sud-ouest.

La zone de convergence intertropicale, à l'interface de ces deux masses d'air, forme un front dont la trace au sol constitue l'équateur météorologique. Ce front intertropical (FIT) se déplace lentement en latitude au cours de l'année, suivant les positions respectives des centres de hautes pressions (anticyclones de Sainte Hélène au sud, du Sahara et des Açores au nord), eux mêmes dépendant du mouvement saisonnier en déclinaison du soleil.

En janvier, le FIT est à sa position méridionale extrême vers 6° de latitude nord ; il amorce ensuite sa migration vers le nord en février-mars pour atteindre son maximum en latitude vers 20° nord en juillet-août ; il régresse ensuite vers le sud.

Dans le détail, les mécanismes de circulation des masses d'air sont beaucoup plus complexes (transferts énergétiques, courants-jets, circulation zonale, voir Mahé, 1993). Leur description sort du cadre de cette présentation et la circulation latitudinale suffit à expliquer, avec les déplacements concomitants des masses d'air pluvio-gènes, la durée et l'abondance plus ou moins grande des précipitations et l'extension des différentes zones climatiques intéressant le bassin du Bani. Du sud au nord, on peut distinguer deux grandes zones climatiques :

- **le domaine tropical guinéen** : qui concerne les têtes du bassin du Bani et de ses affluents. Le climat tropical de transition est appelé ici climat guinéen. Il est caractérisé par une saison sèche plus courte et moins aride (3 à 4 mois), et des précipitations annuelles beaucoup plus importantes (supérieures à 1500 mm). La température moyenne est de l'ordre de 25°C, l'humidité relative moyenne dépasse 50%.

- **le domaine tropical soudanien** : caractérisé par une saison sèche plus rigoureuse qui dure 6 à 7 mois, il est marqué par trois variantes :

1. le domaine sud-soudanien : centré sur les régions de Bougouni-Sikasso ; les précipitations annuelles sont comprises entre 1000 et 1500 mm, la température est de l'ordre de 27°C et l'humidité relative excède 50% ; la saison des pluies dure 5 à 7 mois.

2. le domaine nord soudanien : qui constitue une variante plus sèche avec des précipitations comprises entre 750 et 1000 mm, une humidité moyenne annuelle de l'ordre de 50% et des températures supérieures à 27°C ; la saison des pluies dure 4 à 5 mois .
3. le domaine sahélien : avec des précipitations comprises entre 400 et 750 mm et réparties sur 3 à 4 mois il intéresse les régions de Ségou, San, Djenné, et Mopti (température 28 à 30°C, humidité relative inférieure à 40%).

Pour toutes ces régions climatiques, la saison des pluies est centrée sur le mois d'août.

Cette zonalité latitudinale décrite ci-haut, s'étend sur tout le bassin du Bani et montre que le fonctionnement hydrologique du bassin est largement dépendant des conditions morphologiques et climatologiques propres au bassin, l'essentiel des ressources en eau provenant des régions beaucoup plus arrosées de l'amont.

I-2.2. Etude des facteurs climatiques

L'étude des facteurs climatiques aborde les caractéristiques relatives aux vents, aux températures, et à l'humidité relative. La pluie constituant le phénomène météorologique essentiel pour la connaissance du régime hydrologique, l'étude des précipitations fera l'objet d'une analyse beaucoup plus détaillée. Les stations de Bougouni, Sikasso, Koutiala, Ségou, San et Mopti ont été utilisées pour décrire les paramètres précités.

I-2.2.1. Régime des vents

Le tableau I.1 ci-après donne la répartition des vitesses du vent aux stations de Bougouni, Sikasso, Ségou, et Mopti.

Tableau I.1

vitesse (m s ⁻¹)	<1	2 à 4	5 à 6	7 à 14	15 à 21
Bougouni	168 j	156 j	32 j	9 j	0 j
Sikasso	256 j	109 j	0 j	0 j	0 j
Ségou	61 j	218 j	70 j	16 j	0 j
Mopti	158 j	144 j	45 j	17 j	0 j

Les vents sont beaucoup plus forts dans le domaine tropical soudanien que dans le domaine tropical guinéen. Il s'agit généralement de l'harmattan. En progressant vers le sud du bassin, l'influence de la mousson se traduit par un rafraîchissement estival de plus en plus marqué correspondant à l'augmentation de la nébulosité et à l'apparition de précipitations de plus en plus fréquentes. Outre les vents réguliers, mousson ou harmattan, qui soufflent pendant plusieurs heures, il y a lieu de tenir compte des coups de vents très courts qui précèdent les tornades ; ils donnent lieu à des vitesses très fortes et ont un effet beaucoup plus dévastateur que ces vents réguliers.

I-2.2.2. Températures

Les températures sont observées sur le bassin du Bani à six stations : Sikasso, Bougouni, Koutiala, Ségou, San, et Mopti.

Les températures moyennes annuelles sont plus basses au sud du bassin qu'au nord. La moyenne annuelle calculée sur 40 ans, de 1950 à 1989 est de l'ordre de 27°C sur le bassin, soit 26.8°C à Sikasso, et 28.3°C à Mopti.

La figure I.4, donne la répartition par décennie des températures moyennes entre le mois le plus chaud et le mois le froid. (voir aussi sur la figure I.5, l'évolution du nombre de mois de température supérieure à 27°C).

Ces figures montrent que :

- Les températures sont maximum en avril et mai, les valeurs moyennes mensuelles observées sur la période 1950-1989 atteignent 30.6°C à Sikasso, 30.8°C à Bougouni, 31°C à Koutiala, 32.8°C à San, 32.5°C à Ségou, et 33.2°C à Mopti.
- En décembre et janvier les températures diminuent : 23.6°C à Sikasso, 24.4°C à Bougouni, 23.2°C à Koutiala, 23.8°C à San, 24.0°C à Ségou, et 23.1°C à Mopti.
- Les variations de températures au cours d'une décennie restent fortes. L'écart entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est plus faible à Bougouni et plus fort à Mopti. On observe, 5.8 à 9.7°C en 1950-59, 6.2 à 10.2°C en 1960-69, 6.3 à 9.4°C en 1970-79, et 7.3 à 11.5°C en 1980-89.

La décennie 1980-89 a été pratiquement la plus chaude pour toutes les stations. Durant cette même décennie le nombre de mois de température supérieure à 27°C, est resté quasiment égal à 5 mois à Bougouni, Sikasso et Koutiala et 9 mois à San, Ségou et Mopti.

De cette étude de températures nous retiendrons que le bassin a connu de fortes variations de températures au cours des dix dernières années. Dans la partie sud du bassin l'influence du climat tropical de transition tempère les valeurs annuelles des températures. Par contre dans le nord du bassin les fortes variations sont davantage liées à la prépondérance du climat tropical.

I-2.2.3. Humidité relative

L'humidité relative est définie par le rapport entre la tension de vapeur d'eau (e) dans l'atmosphère et la tension de vapeur d'eau saturante à la même température (ew).

$$U\% = 100e/ew.$$

L'humidité relative moyenne annuelle est plus faible au nord du bassin du Bani qu'au sud, on a 44% à Mopti, et 60% à Sikasso.

La figure I.6, précise les variations saisonnières interannuelles sur la période 1950-1989. Elle montre que les variations de l'humidité relative sont liées à celles des températures et à la distribution des précipitations. On observe le minimum d'humidité au mois de mars (février pour Bougouni et Sikasso) où les moyennes mensuelles observées sur la période 1950-1989 atteignent 24% à Mopti, 27% à San, 29% à Ségou, 30% à Bougouni, 33% à Koutiala, et 36% à Sikasso. Une plage de valeurs maximales est observée en août avec 70% à Mopti, 78% à San, 79% à Ségou et Koutiala, 80% à Sikasso, et 81% à Bougouni.

Cette apparition générale du maximum d'humidité relative centrée sur le mois d'août est à rattacher au minimum des températures et à l'abondance des précipitations en cette période de l'année.

L'amplitude des variations entre le mois le plus sec (mars) et le mois le plus humide (août), montre des écarts moyens entre 42 et 48% à Sikasso, 48 et 52% à Bougouni, 42 et 52% à Koutiala, 48 et 52% à Ségou 48 et 53% à San, et 42 à 51% à Mopti.

Les deux premières décennies ont été relativement les plus humides pour toutes les stations, on observe au mois d'août plus de 60% à Mopti, environ 80% à Ségou, San et Koutiala, et plus de 80% à Bougouni et Sikasso.

La figure I.7 montre bien l'évolution du nombre de mois d'humidité inférieure à 50%. Nous pouvons en tirer les mêmes remarques que pour les températures : augmentation régulière du nombre de mois d'humidité relative inférieure à 50% dans le même sens que la latitude, vers le nord.

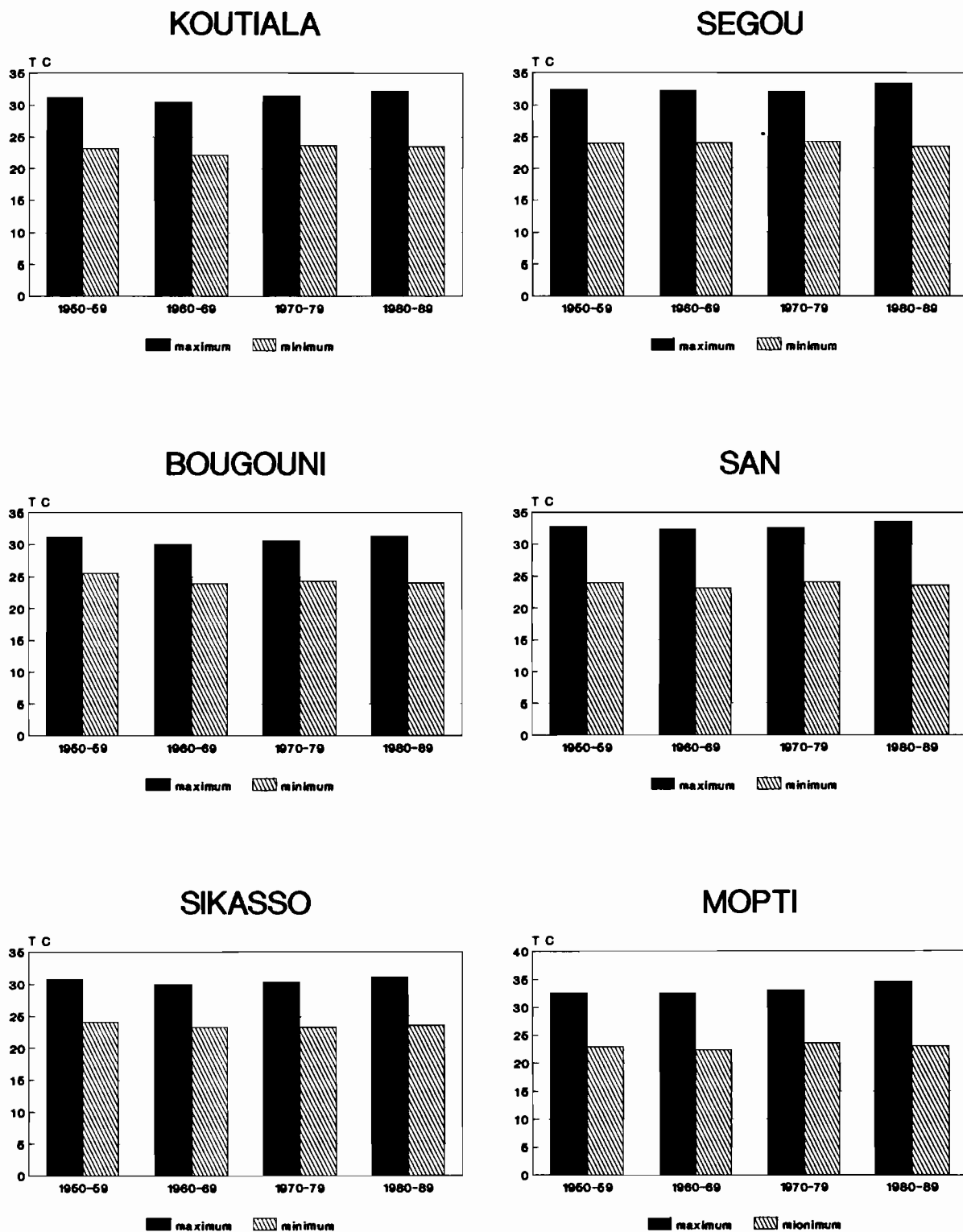
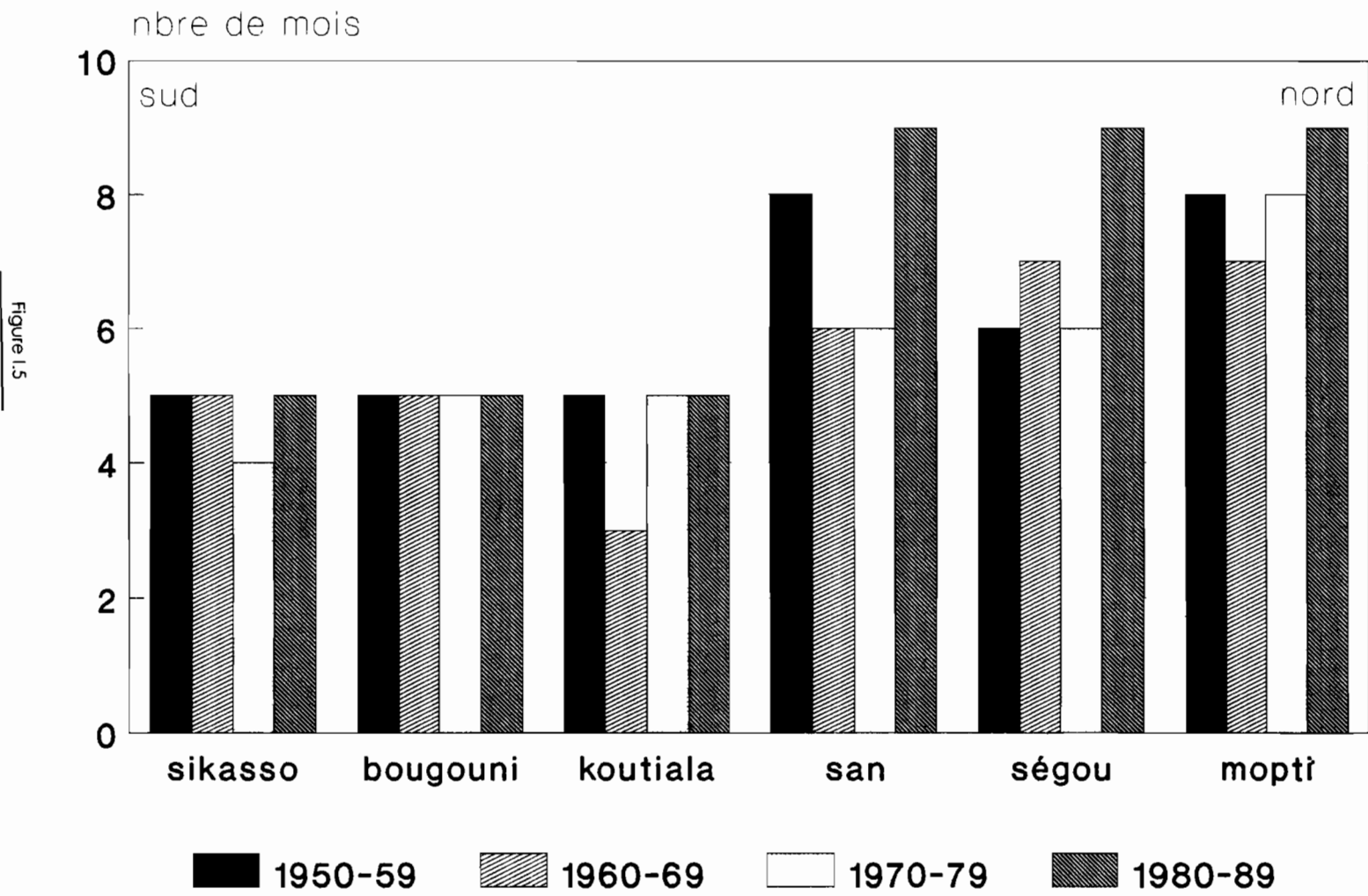


Figure 1.4

Températures moyennes mensuelles décennales des mois le plus chaud (avril, mai) et le plus froid (décembre, janvier)

Evolution du nombre de mois de températures supérieures à 27°C par décennies



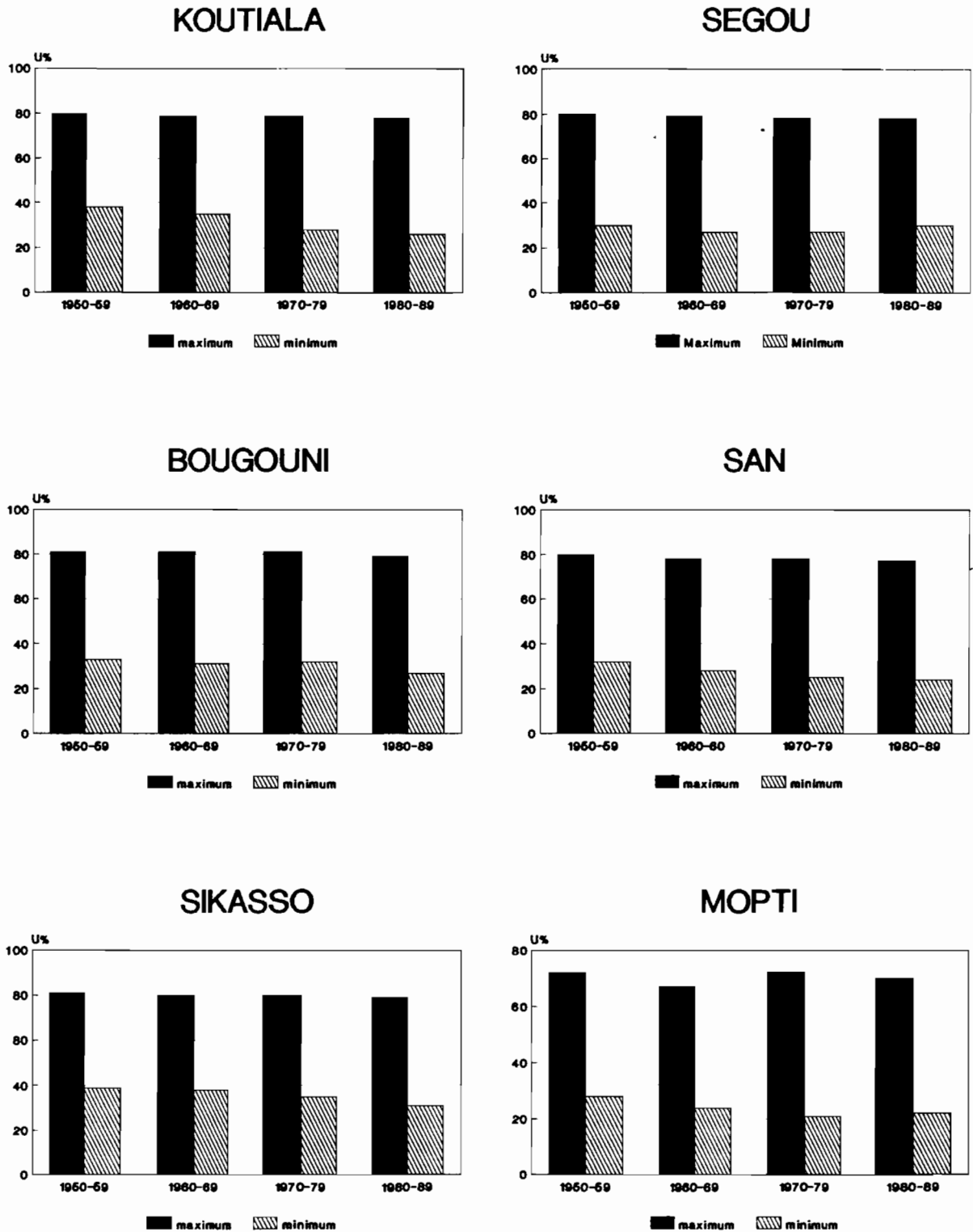
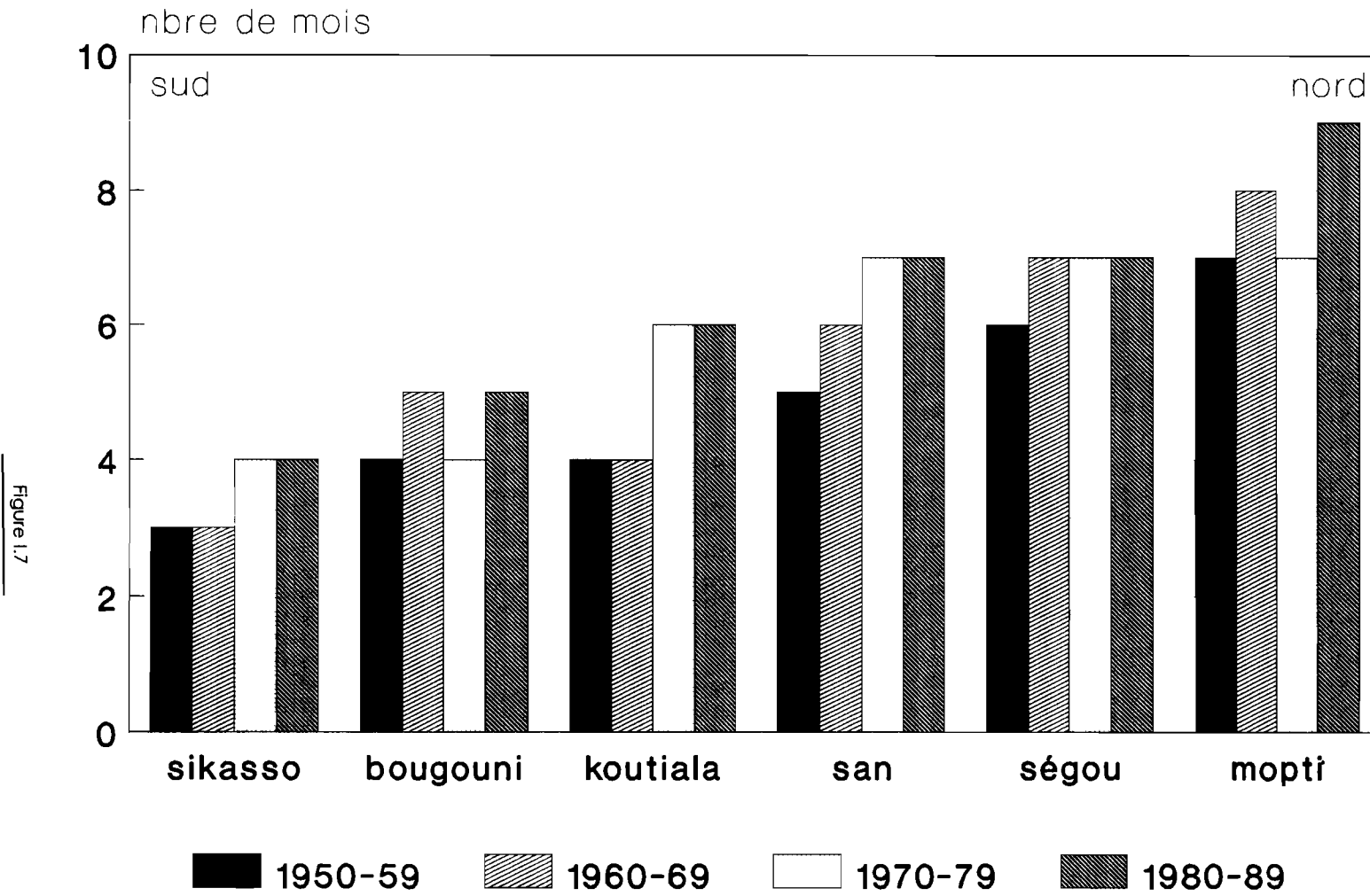


Figure I.6

Humidités relatives moyennes mensuelles décennales des mois le plus sec (mars) et le plus humide (août)

Evolution du nombre de mois d'humidité inférieure à 50% par décennies



CHAPITRE II

ANALYSE DES DONNEES DE BASES SUR LE BASSIN DU BANI A DOUNA

II-1. ETUDE DES PRECIPITATIONS

II-1.1. Données de pluies

En hydrologie, les changements des conditions climatiques moyennes sont encore perçus à travers l'analyse des longues séries pluviométriques.

Tandis que la pluie mesurée à un poste n'est représentative que des précipitations aux environs immédiats de ce poste, le débit mesuré en un point donné d'un cours d'eau, est représentatif de l'activité pluviométrique moyenne sur toute la surface du bassin-versant correspondant. Dans ces conditions il est utile de s'intéresser aux pluies comme phénomène météorologique essentiel pour la connaissance du régime hydrologique.

Cependant toutes les données de pluies ne peuvent faire l'objet d'une étude hydrologique fiable, compte tenu du fait que la plupart présente des séries d'observation assez courtes. Cela nous conduit à une phase indispensable avant toute étude qui consiste à effectuer une critique et une reconstitution des données manquantes.

Nous avons au total 44 postes pluviométriques répartis à l'intérieur du bassin et autour de celui-ci à assez faible distance, mais notre choix a porté sur 29 postes pluviométriques possédant des données fiables sur des périodes d'observation d'au moins 25 ans. Une carte (figure II 1) situe les stations choisies par rapport à la zone d'étude, le tableau II 1 donne le nom des stations, leurs coordonnées géographiques et la date de leur mise en service.

Toutefois, même au niveau des stations utilisées, on constate des discontinuités dans les enregistrements. Ainsi, pour combler les lacunes et étendre de façon optimale les informations complètes que l'on possède sur un grand nombre de stations, sur la période 1950-1990, nous utilisons la méthode statistique de corrélations entre stations voisines.

Cette méthode suppose que l'on tienne compte de tous les postes disponibles, sous peine de perdre toute information, étant entendu que les méthodes statistiques (méthodes de corrélations) ne permettent pas de reconstituer réellement l'information absente, mais permettent de compléter le fichier en fonction de sa structure spatio-temporelle, afin d'assurer la cohérence du traitement statistique ultérieur.

A titre d'exemple, on peut citer les corrélations entre :

- Odienné et Manignan : $P_{\text{Manignan}} = 0.954 P_{\text{Odienné}} + 92.5$; $N = 23$;
 $r = 0.829$.

- Beleko et Doïla : $P_{\text{Beleko}} = 0.648 P_{\text{Doïla}} + 294.6$; $N = 37$;
 $r = 0.796$.

- Dionkélé-N'dorola et Bobodioulasso : $P_{\text{Dionkélé}} = 0.759 P_{\text{Bobo}} + 206$; $N = 34$;
 $r = 0.998$.

P = pluie ; N = nombre d'observations ; r = coefficient de corrélation.

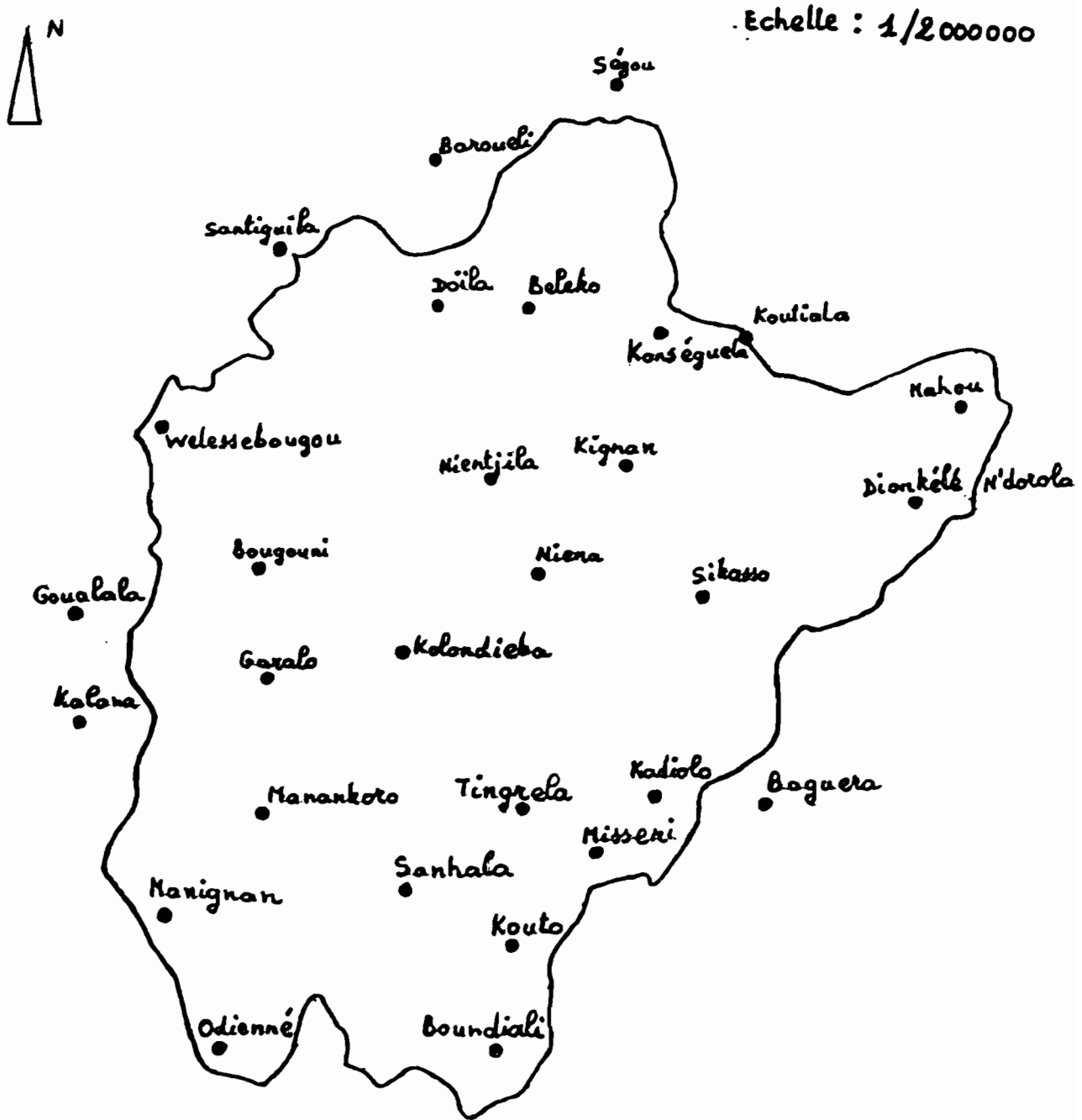


Figure II.1

Postes pluviométriques du Bassin du Bani à Douna

Tableau II.1
Liste des stations pluviométriques du bassin du Bani à Douna

Stations	Latitude	Longitude	Altitude	Mise en service
Ségou	13°24'	6°09'	288	1907
Baraoueli	13°04'	6°50'	309	1922
Beleko	12°29'	6°25'	306	1946
Santiguila	12°43'	7°27'	355	1954
Doïla	12°29'	6°48'	315	1939
Koutiala	12°23'	5°28'	344	1921
Konséguela	12°24'	5°53'	346	1952
Welessebougou	11°59'	7°55'	356	1954
Mahou	12°08'	4°38'	330	1951
Kignan	11°51'	6°01'	348	1953
Nientjila	11°48'	6°33'	340	1960
Bougouni	11°25'	7°30'	350	1921
Niena	11°25'	6°21'	348	1953
Sikasso	11°21'	5°41'	374	1907
Dionkélé-N'dorola	11°45'	4°49'	342	1953
Goualala	11°13'	8°14'	350	1945
Kalana	10°47'	8°12'	379	1951
Garalo	10°59'	7°26'	360	1960
Kolondiéba	11°06'	6°54'	328	1960
Manankoro	10°27'	7°27'	360	1960
Tingrela	10°29'	6°24'	356	1953
Kadiolo	10°33'	5°46'	350	1953
Baguera	10°32'	5°25'	315	1961
Misseni	10°19'	6°05'	347	1960
Manignan	10°00'	7°30'	393	1960
Kouto	9°54'	6°25'	360	1963
Odienné	9°30'	7°34'	434	1921
Sanhala	10°02'	6°51'	380	1962
Boundiali	9°31'	6°28'	421	1922

Les fichiers de pluies ainsi constitués sont optimisés sur la période 1950-1990 et utilisés pour décrire les variations interannuelles et calculer les pluies moyennes sur le bassin dans l'optique du calcul du bilan hydrologique. Le pas de temps est le mois, afin de pouvoir reconstituer de façon plus fiable certaines valeurs annuelles. Il n'est cependant pas procédé à une extension systématique des séries de données mensuelles.

II-1.2. Description des précipitations sur le bassin et évolution sur la période 1950-1990

Pour l'ensemble du bassin limité à Douna la pluviométrie moyenne annuelle s'élève à 1145 mm sur la période 1950-1990. Les isohyètes pour la période (figure II.2) vont d'environ 1550 mm au Sud (1554 mm à Manignan) à environ 700 mm au nord (677 mm à Ségou légèrement au nord du bassin). Les valeurs moyennes extrêmes calculées sur la période 1950-1990 passent de 1472 mm en 1954 à 913 mm en 1987.

Sur le plan de la répartition mensuelle des précipitations, les stations d'Odienné et Kouto ont une situation représentative du sud du bassin, les stations de Bougouni et Sikasso caractérisent le centre du bassin et Doïla et Mahou, le nord. La figure II.3 précise l'histogramme moyen de ces six stations.

Cette figure montre que la répartition mensuelle de la pluie suit la même loi sur l'ensemble du bassin-versant du Bani : maximum de pluviosité en août, minimum en janvier. Seules varient la durée et la rigueur de la saison sèche qui, de 3 à 4 mois au sud du bassin, se prolonge jusqu' à 6 à 7 mois au nord.

La durée et l'abondance de la saison des pluies se modifient progressivement du sud au nord du bassin.

Au sud du bassin, en amont des zones inondables, il pleut 8 à 9 mois par an, de mars à novembre. Mais les mois de mars et novembre sont peu arrosés (moins de 50 mm).

Au centre du bassin, à Bougouni et à Sikasso, il faut attendre le mois d'avril pour voir se produire les premières pluies ; la saison des pluies ne dure que 7 mois : d'avril à octobre.

Au nord du bassin, à Doïla et à Mahou, la saison des pluies commence en mai et dure 5 à 6 mois.

Pour toutes les stations, la fin de la saison des pluies survient en octobre ou novembre. Le mois d'août reste le mois plus arrosé, mais les précipitations recueillies au cours de ce mois diminuent du sud au nord : comprises entre 300 et 350 mm au sud, elles dépassent 300 mm au centre et restent quasiment inférieures à 300 mm au nord.

Depuis 1950 , les totaux annuels évoluent suivant une tendance décroissante. La tendance à la baisse est particulièrement accusée depuis 1971 avec des valeurs presque toujours inférieures à la moyenne (voir figure II.5 du paragraphe II-2.2). Malgré une amélioration relative dans les années 1975 et 1976, les précipitations annuelles restent toujours déficitaires. La moyenne de la période 1950-1960 est de 16% plus élevée que la moyenne de 1950-1990, entre 1961 et 1970 l'excédent moyen est de 6%, entre 1971 et 1980, le déficit est de 8%, et durant la dernière décennie le déficit passe à 15%.

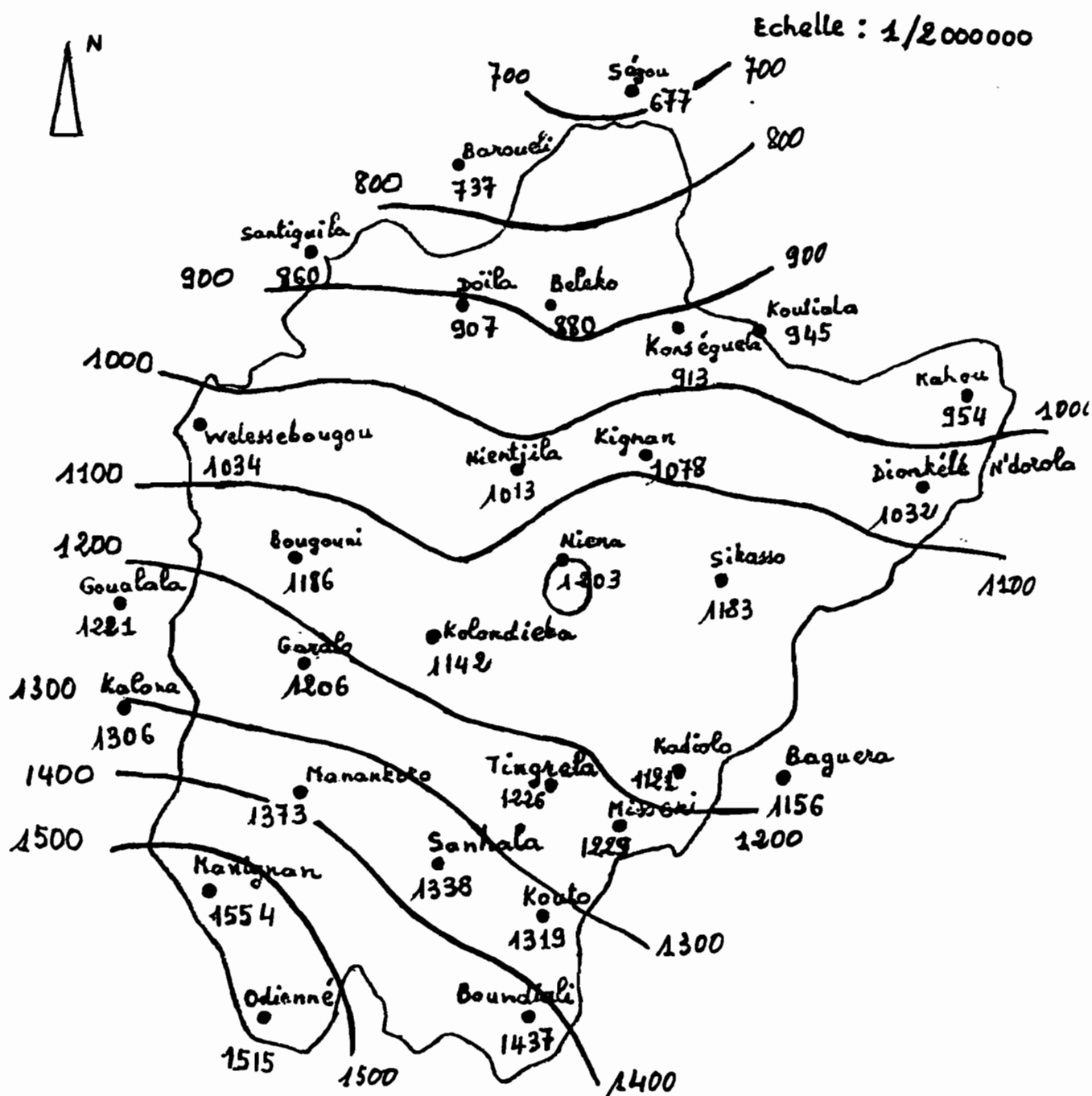


Figure II.2
Isohyètes interannuelles sur la période 1950-1990

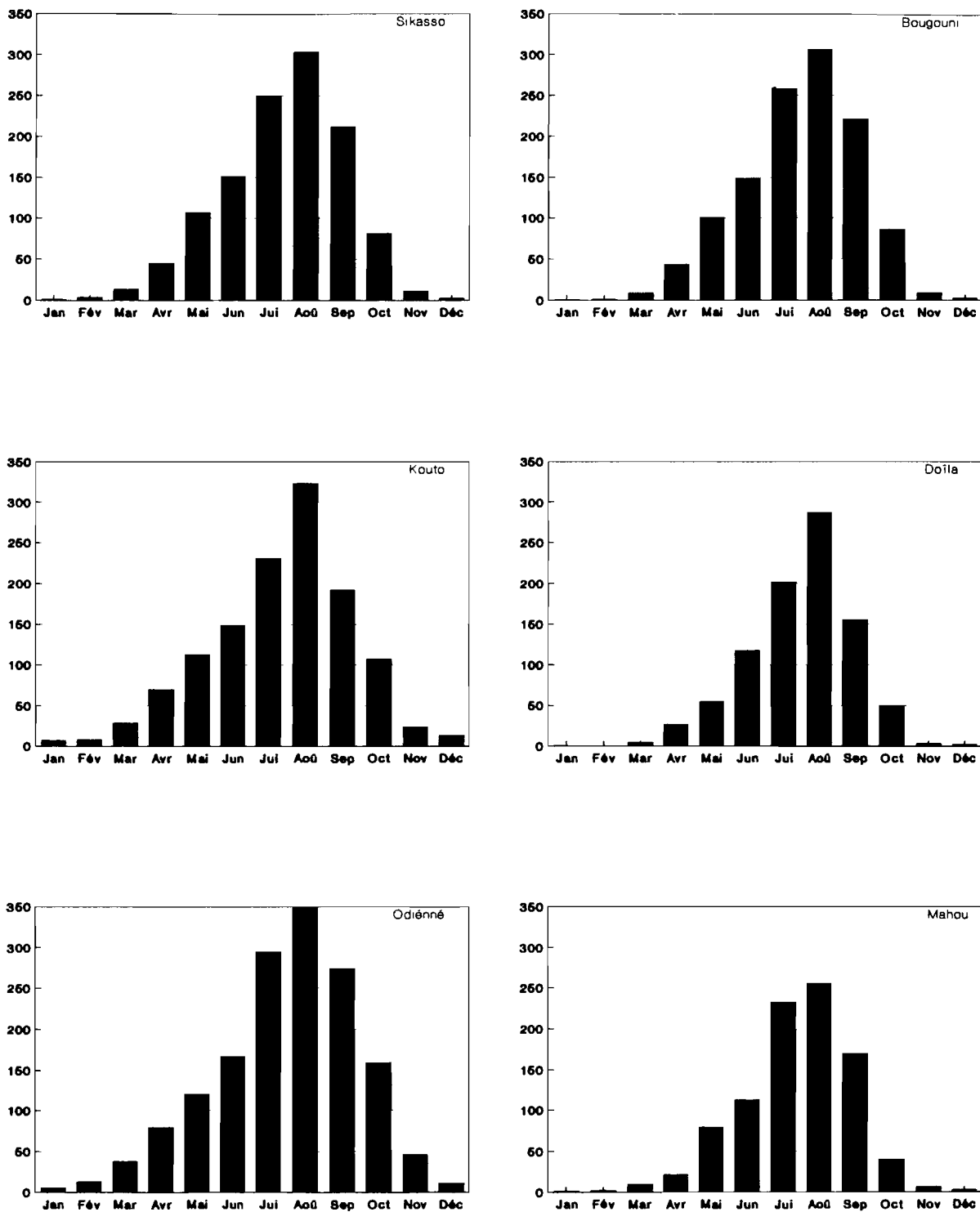


Figure II.3

Pluies mensuelles interannuelles sur le bassin du Bani à Douna (en mm)

II-1.3. Détermination des précipitations sur le bassin

La hauteur de précipitation moyenne intéressant le bassin du Bani à Douna a été déterminée par la méthode des polygones de Thiessen.

La méthode de Thiessen est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à sa zone d'influence géométriquement déterminée, telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance horizontale, du pluviomètre correspondant que tout autre pluviomètre (Roche, 1963). La méthode s'exprime par la formule suivante :

$$P_{mi} = \sum (P_i \cdot W_i) \quad \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

P_{mi} = est la précipitation moyenne de la station i

W_i = est la proportion de surface de la station i : $W_i = S_i/S$.

S_i = surface arrosée par la station i .

S = surface totale du bassin.

La figure II.4 montre les polygones de Thiessen pour la détermination de la pluie moyenne sur le bassin. Le tableau II.2 donne les coefficients de Thiessen des différents postes pluviométriques. Dans les tableaux II.3 et II.4 figurent les hauteurs de précipitations moyennes sur l'ensemble de la période 1950-1990.

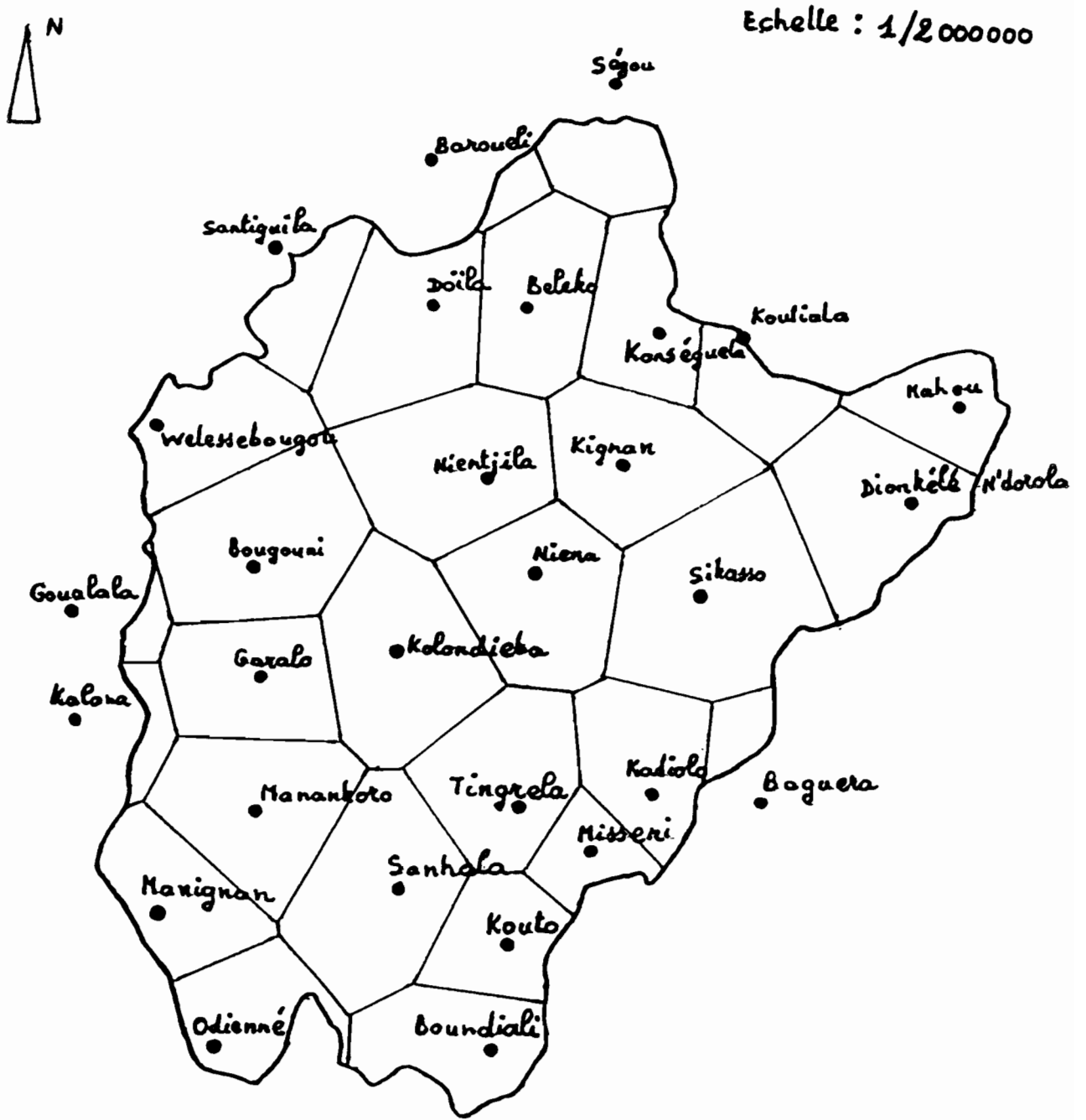


Figure II.4
Polygones de Thiessen

Tableau II.2

Coefficients de Thiessen des postes pluviométriques du bassin-versant du Bani à Douna

Stations	Superficie (km ²)	Coefficient (en %)
Ségou	2115	2.08
Baraoueli	598	0.59
Beleko	4053	3.99
Santiguila	2098	2.07
Doïla	4759	4.68
Koutiala	2208	2.17
Konséguela	3219	3.17
Mahou	2469	2.43
Kignan	4626	4.55
Nientjila	5562	5.47
Bougouni	5781	5.69
Niena	4736	4.66
Sikasso	6935	6.83
Goualala	506	0.50
welessebougou	3548	3.49
Kalana	843	0.83
Manankoro	5031	4.95
Misseni	1567	1.54
Kadiolo	3565	3.51
Garalo	3834	3.77
Kolondiéba	5477	5.39
Dionkélé-N'dorola	4938	4.86
Baguera	834	0.82
Tingrela	4424	4.35
Manignan	3362	3.31
Kouto	2595	2.56
Sanhala	5654	5.57
Odienné	2772	2.73
Boundiali	3497	3.44

Tableau II.3

Pluies moyennes mensuelles calculées par Thiessen sur le bassin du Bani à Douna en périodes humide (1950-1970) et sèche (1971-1990)

Périodes	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1950-1970	2	5	15	49	87	157	255	332	229	91	22	6
1971-1990	1	3	15	42	96	131	214	256	180	71	9	3
1950-1990	2	4	16	45	91	144	235	296	204	78	16	4

Tableau II.4

Hauteurs de précipitations moyennes annuelles sur le bassin du Bani à Douna de 1950-1990.

Année	Pluie moy	Année	Pluie moy
1950	1395	1971	1064
1951	1426	1972	1014
1952	1294	1973	869
1953	1408	1974	1091
1954	1472	1975	1187
1955	1391	1976	1213
1956	1152	1977	917
1957	1407	1978	1078
1958	1273	1979	1079
1959	1156	1980	1000
1960	1225	1981	1079
1961	1169	1982	968
1962	1289	1983	817
1963	1170	1984	858
1964	1358	1985	929
1965	1176	1986	1011
1966	1211	1987	913
1967	1197	1988	1080
1968	1142	1989	1026
1969	1235	1990	1041
1970	1150		

moyenne de 1950-1990 : 1145mm

II-2. ETUDE DES DEBITS

II-2.1. Données de débits

Le sujet de ce présent paragraphe est le calcul des apports annuels et interannuels du Bani à Douna, sur la période 1950-1990. Notre intérêt se porte également sur l'analyse de la variabilité spatiale interannuelle des écoulements. Cet aspect particulier du problème nous entraîne à l'analyse des séries de débits à la station de Douna la plus représentative du fleuve depuis le début des années 1950.

De cette analyse, on constate que les séries de débits à Douna contiennent certaines données manquantes. Ainsi, pour combler les lacunes, nous utilisons la méthode de reconstitution exposée ci-dessous (d'après Mahé, 1993).

Sachant que nous cherchons à obtenir des modules annuels, si un ou plusieurs mois manquent pour le calcul du module, nous adoptons l'une ou l'autre solution selon que les mois à reconstituer sont des mois d'étiage ou de crue :

- étiage : en régime tropical, les débits d'étiages sont souvent nuls ou très faibles. On peut compléter les valeurs manquantes par les moyennes interannuelles ou par des valeurs nulles.

- crue : en période de montée ou de descente des eaux, en dehors de la pointe de crue, on peut établir à la même station des corrélations entre les débits d'un mois et du mois suivant ou précédent, à condition de ne pas utiliser des mois d'étiage, à la variabilité trop faible par rapport au mois à reconstituer.

Ainsi nous avons cherché une corrélation entre les mois de juillet et août à Douna :

avec X_i = débits moyens du mois d'août.

Y_i = débits moyens du mois de juillet.

On trouve une régression linéaire. :

$$Q_{\text{juillet}} = 0.16 \times Q_{\text{août}} + 9.09 \quad N = 38. \quad r = 0.86.$$

Le fichier de débits ainsi constitué est optimisé sur la période 1950-1990 (voir tableau II.5)

Tableau II.5

Débits moyens mensuels en année hydrologique du Bani à Douna en m³.s⁻¹

année	avr	mai	jui	juill	aout	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mars	année
1950	16,6	15,1	31,1	169,1	1000	2600	2580	1220	317	144	83,1	40,5	685
1951	13,6	10,2	7,79	150,7	885	2270	2790	2280	1000	308	163	83,7	830
1952	36,1	21,5	19,3	177	966	2230	3330	2080	534	252	136	73,8	821
1953	39,5	28,4	92,5	349	1840	3160	2620	1120	414	229	131	72,6	841
1954	43,8	30,1	66,3	298	1520	3170	2940	1780	703	298	181	110	928
1955	68,3	41,5	74,7	308	2140	2800	2590	1350	534	278	159	91,8	870
1956	57,8	35,8	36,6	61,5	807	2170	2000	848	325	158	91	55,8	554
1957	30,8	26,7	51,1	206	1350	2660	2870	1730	488	242	148	74,9	823
1958	38,3	24,5	37,9	296	1490	3080	2270	1060	485	209	104	54,1	762
1959	18,9	12	30,8	49,5	866	2540	2510	758	281	139	78	42,5	610
1960	22,6	27,6	25,4	276	1080	2250	2430	881	307	145	82,3	46,5	631
1961	23,5	17,1	23,6	178	1390	2920	2170	641	216	104	61,3	35,4	648
1962	20,5	22,2	32,1	110	662	2160	2290	942	356	167	89,2	51,5	575
1963	26,9	25,7	27	90,9	613	1840	1990	1120	319	149	78,3	42,3	527
1964	19	35,5	50,3	195	1490	3190	3190	1190	403	259	153	90,1	855
1965	51,6	33	68,8	304	1060	1970	2190	887	293	143	81,9	44,1	594
1966	20,4	15,1	26,9	39,9	421	1880	2550	1210	326	149	82	46,1	564
1967	21,8	17,1	26,2	92,3	1230	3000	2660	1320	360	184	97,6	58,3	756
1968	36,8	30,8	51,3	265	871	1770	1420	624	360	124	64,1	34,7	471
1969	16,4	12,2	29,3	266	1090	2130	1610	938	303	131	71	34,6	553
1970	16,8	13,3	28,4	90,6	867	2410	2100	540	180	80,6	47,8	27,3	533
1971	15,6	10,4	13,2	141	652	1790	1230	307	120	64,7	32,7	15,7	366
1972	9,8	10	55	87,8	323	729	514	198	76,7	34,5	16,1	7,32	172
1973	3,88	4,04	11	31,8	518	815	347	108	45	16,3	7,36	3,24	159
1974	2,05	1,69	6,13	134	884	1450	945	245	83,8	35,4	15,6	6,95	317
1975	3,95	29	30,2	77,6	594	1510	1490	417	141	63,5	31,5	13,4	367
1976	8,29	18,1	40,2	41,8	367	555	688	806	263	93,8	51,9	21,1	246
1977	9,41	5,01	14,4	54,2	149	701	645	209	62,3	24,5	10,5	4,47	157
1978	2,54	44,2	19,1	81,6	465	858	730	278	92,6	43,4	18,6	7,42	220
1979	2,63	2,27	47	71,9	373	1280	862	295	108	46,9	21,6	8,07	260
1980	3,04	3,43	22,7	62,8	423	1120	618	183	72,7	42,4	26,1	6,82	215
1981	2,44	14,2	21,1	86,1	793	1420	828	229	85,1	38,3	18	6,98	295
1982	3,52	7,22	36,1	83,5	365	753	418	276	70,3	29,3	10,6	3,63	171
1983	1,62	3,58	20,7	47,2	140	288	241	67,6	23	7,38	2,64	0,91	70
1984	0,27	0,02	54,1	24,1	99,1	254	288	84,9	24,5	7,46	2,28	0,77	70
1985	0,1	0	7,69	104	311	657	519	131	40,8	44	3,76	1,28	152
1986	0,36	0,27	14,5	61	216	590	393	115	38,1	10,9	3,94	1,24	120
1987	0,26	0	8,18	21,9	151	335	339	115	29,7	7,05	2,81	0,93	84
1988	0,18	0	6,15	169	500	1190	810	225	62,8	20,2	8,54	3,48	250
1989	1,18	0,51	1,38	35,7	370	1010	577	151	46,7	16,5	7,36	2,06	185
1990	0,46	0,13	3,18	123	640	553	381	119	43,5	14	4,1	1,05	157
moy	17	16	31	134	780	1709	1560	709	245	111	60	32	450

II-2.2. Régime hydrologique du Bani à Douna

Le bassin du Bani dont les limites sud se situent près d'Odienné et Boundiali en Côte d'Ivoire, couvre une superficie totale de 101600 km² à la station de Douna ouverte en 1922, et observée de manière continue, avec celle de Bénény Kégny, depuis seulement le début des années 50.

Jusqu'à la période récente, on a pensé que la variabilité de l'écoulement annuel constituait, par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'il suppose sur l'ensemble d'un bassin-versant, un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques (Olivry, 1983, 1986, 1987). Mais après une longue période de plusieurs années de déficit pluviométrique, les relations entre les rivières et nappes peuvent être considérablement modifiées, de telle sorte que pour un même total pluviométrique le débit correspondant sera plus faible au point que dans la période la plus récente les paramètres hydrologiques ne sont plus en phase avec la variation pluviométrique annuelle (figure II.5).

La chronique des modules du Bani a été représentée sur la figure II.6. Le fleuve a connu depuis le début des années 50, des périodes d'écoulement déficitaire par rapport à la moyenne de 1950-1990 : en 1956, en 1963 et 68 et, enfin à partir des années 70. Sept années d'abondantes précipitations donnent des débits excédentaires, de 1951 à 1955, puis les années 1957 et 1964.

Soulignons qu'après les minimums absolus de 1983, 84, le module le plus bas sur le Bani est celui de 1987.

Les débits, comme la pluviométrie, diminuent depuis 1950 et se répartissent globalement autour de deux paliers de valeurs. Le premier couvre la période 1950/1970 : les modules sont presque toujours au dessus de la moyenne depuis 1950. Le second couvre la décennie 70 jusqu'en 1990, période pendant laquelle les débits sont largement déficitaires.

Sur la période 1950-1990, le débit moyen interannuel calculé sur 41 ans est de 450 m³ s⁻¹ soit un module spécifique (ramené à l'unité de surface) de 4.43 l s⁻¹ km⁻². Avec une hauteur de précipitation interannuelle estimée à 1145 mm, le coefficient d'écoulement moyen est de 11.5% ; la reprise par évaporation serait de 1005 mm.

La variabilité saisonnière des débits montre une longue période de faibles écoulements. Pendant 5 mois, de février à juin, les débits des basses eaux représentent moins de 3 % de l'écoulement annuel. Environ un tiers de l'écoulement annuel transite en septembre, et près des trois quarts d'août à octobre. La remontée des débits s'annonce brusquement en juillet, mais ne devient vraiment significative qu'au mois d'août. Le coefficient mensuel du mois d'août est de 14 %, il passe à 32 % en septembre et 29 % en octobre.

A l'étiage, on a pu observer dans les années récentes un arrêt de l'écoulement. La crue du Bani atteint le souvent son maximum dans la seconde quinzaine de septembre ou début octobre. Le tableau II.6 regroupe les débits moyens mensuels interannuels par décennie et sur la période 1950-1990 (année hydrologique). Ce tableau montre bien l'étalement de l'étiage dans le temps, qui de 4 à 5 mois au cours des décennies 50 et 60, se prolonge jusqu'à 7 à 8 mois dans les 20 dernières années.

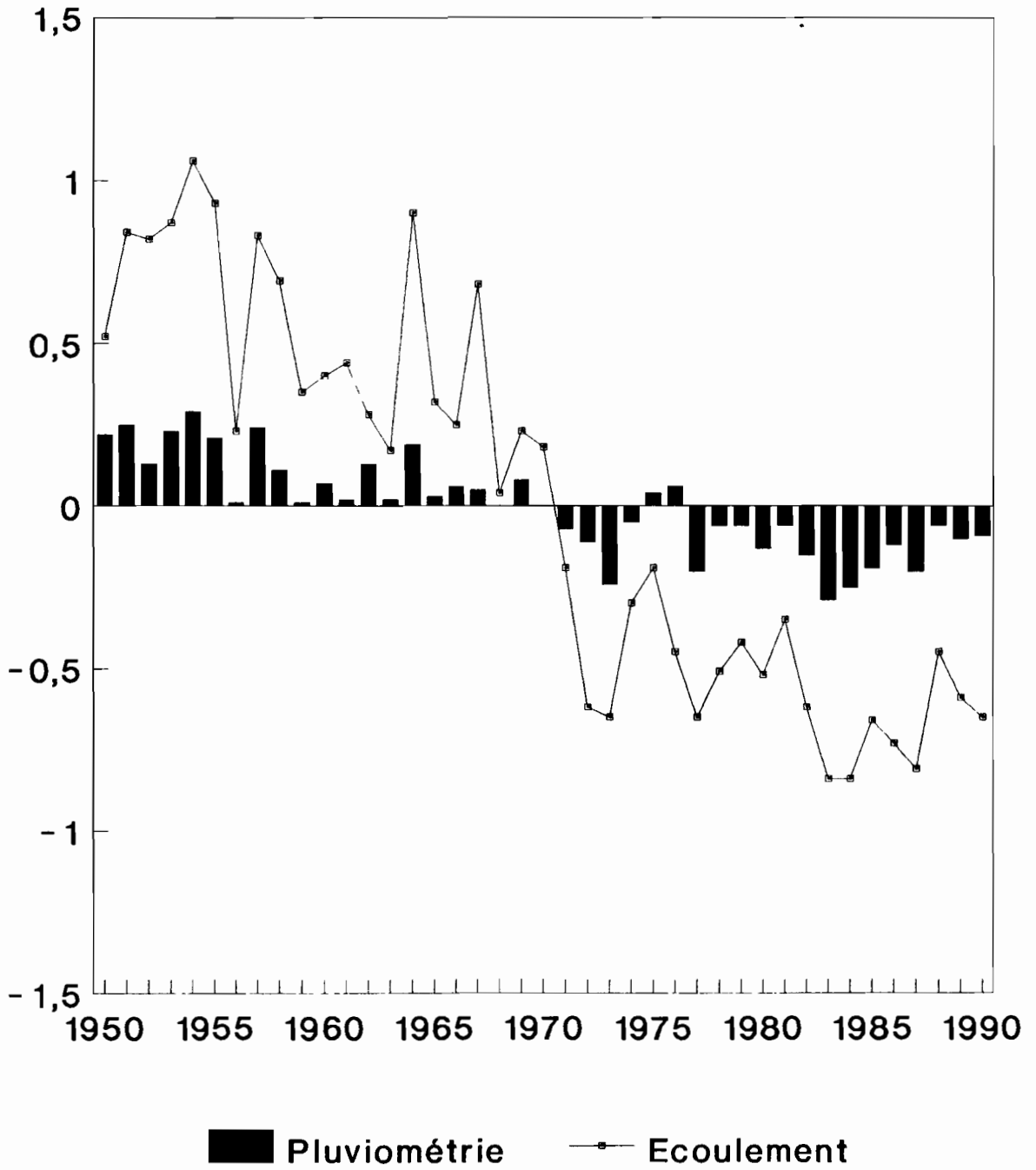


Figure II.5

Index pluviométrique et variation de l'écoulement sur le Bani à Douna exprimés en écart à la moyenne

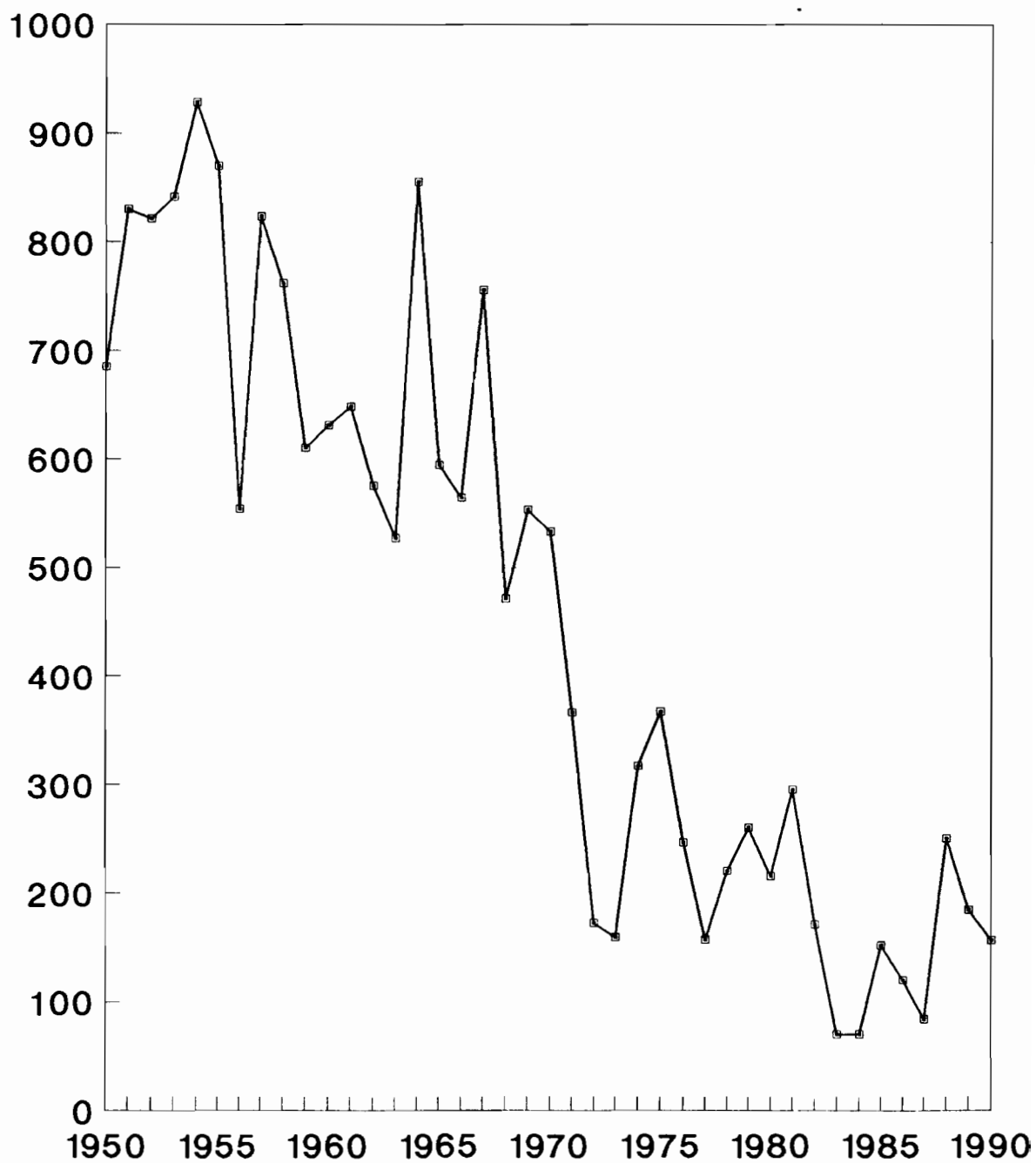


Figure II.6

Evolution des modules annuels, depuis 1950 du Bani à Douna (en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Tableau II.6

Débits moyens mensuels interannuels à Douna calculés par décennie et sur la période 1950-1990.

Décennies	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	Année
1950-60	35	25	43	213	1268	2630	2630	1373	490	218	123	68	760
1961-70	25	22	36	163	969	2327	2217	941	312	149	83	46	608
1971-80	6	13	26	78	475	1081	807	305	107	47	23	9	248
1981-90	1	3	17	76	359	705	479	151	46	20	6	2	155
1950-90	17	16	31	134	780	1709	1560	709	245	111	60	32	450

Le régime hydrologique du Bani est directement influencé par celui des précipitations qu'il intègre sur son bassin, mais subit en même temps un effet retard du cumul des déficits pluviométriques. L'explication du phénomène serait dans l'épuisement progressif des aquifères des bassins-versants et d'une accélération considérable de la phase de tarissement (Olivry, 1983, 1986, 1987). Rappelons que le coefficient moyen de tarissement du Bani à Douna est de 0.023 j^{-1} , entre 1950 et 1975 ; il passe à 0.03 j^{-1} à la fin des années 70 et à 0.04 j^{-1} à la fin des années 80 (Olivry *et al.*, 1992). La figure II.7 montre le tarissement du Bani à Douna ; l'augmentation du coefficient de tarissement du simple au double, signifie d'après Olivry que l'apport des basses eaux des nappes phréatiques du bassin (écoulement de base) a considérablement diminué. Un retour à un écoulement identique à celui d'avant 1970 supposerait une reconstitution des réserves nécessitant des précipitations abondantes pendant plusieurs années.

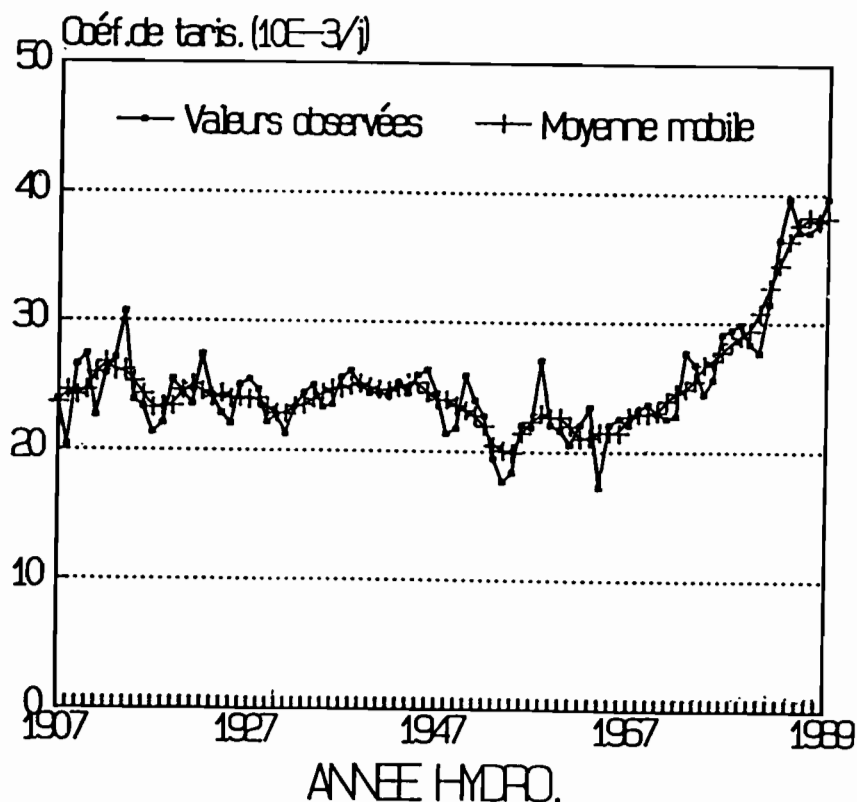


Figure II.7

Evolution des coefficients de tarissement du Bani à Douna (d'après Touré 1990)

Rappelons que le coefficient de tarissement d'une nappe traduit à la fois ses caractéristiques géométriques (dimensions) et ses caractéristiques physiques (perméabilité).

L'application de la loi de Darcy permet d'écrire :

$$\alpha = \frac{K.P.s}{S.L}$$

K = est la perméabilité.

P = est la porosité du matériau aquifère.

s = est la section d'échange nappe-rivière.

L = est la largeur de la nappe.

S = est la superficie du bassin-versant.

II.3. EVAPOTRANSPIRATION

Les phénomènes d'évaporation interviennent dans le cycle hydrologique dès le moment où les précipitations atteignent la surface du sol. L'eau s'évapore aussi des surfaces d'eau de toutes dimensions (flaques, mares, étangs, lacs, ruisseaux, rivières et fleuves).

L'évaporation a lieu aussi au niveau des couches superficielles du terrain, soit que l'eau provienne des pluies récentes infiltrées à faible profondeur, soit qu'elle provienne par capillarité de la nappe phréatique.

Par définition, l'évaporation d'une surface est un phénomène énergétique qui fait passer l'eau de la phase liquide à la phase vapeur.

On nomme transpiration, ce même phénomène de vaporisation de l'eau quand il se produit au niveau de la surface d'un végétal.

Evaporation et transpiration transforment donc l'énergie incidente (solaire et thermique) en chaleur latente de vaporisation.

L'action combinée de ces deux processus donne ce qu'on appelle évapotranspiration. C'est surtout l'estimation de la quantité d'eau évapotranspirée qui va nous intéresser dans ce chapitre. Elle peut être mesurée directement (mesure sur bac par exemple) ou indirectement (par les formules).

Evapotranspiration potentielle. : (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin-versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

Il y'a plus de 30 méthodes empiriques pour évaluer l'ETP. Les méthodes les plus importantes sont :

- Penman
- Blaney-Criddle
- Rayonnement
- le bac

Le choix de la méthode dépend principalement du type de données climatiques disponibles.

Ainsi, notre choix a porté sur les valeurs de l'ETP, calculées par la méthode de Penman.

L'évapotranspiration potentielle moyenne a été calculée mois par mois sur le bassin du Bani par la méthode de Thiessen. Nous avons retenu les résultats de l'ETP calculée par la formule de Penman à Ségou, Koutiala, Bougouni et Sikasso, sur la période 1951-1990. Pour Odienné et Boundiali, l'ETP a été estimée à partir des valeurs calculées pour Ségou, Bougouni et Sikasso.

L'estimation de l'évapotranspiration a fait l'objet d'un découpage du bassin de manière à n'utiliser que des stations synoptiques (Ségou, Koutiala, Bougouni, Sikasso, Odienné et Boundiali). Pour des raisons de contraintes pratiques, nous avons fait la moyenne des valeurs des stations de Bougouni et Sikasso et Odienné et Boundiali.

Ainsi l'évapotranspiration moyenne mensuelle sur la période 1950-1991 est présentée dans le tableau II.7, le tableau II.8 et la figure II.8 montrent le poids des stations et le découpage du bassin pour le calcul de l'ETP. La connaissance de l'ETP permet d'évaluer l'ETR (évapotranspiration réelle).

Tableau II.7
Evapotranspiration moyenne de 1950-1991.

	Ségou	Koutiala	Bougouni Sikasso	Odienné Boundiali	ETP moy en mm
Propor surface en %	2.66	27.48	40.73	29.13	
jan	149	129	122	97	117
fev	161	144	130	100	126
mars	192	186	159	127	158
avr	187	189	156	127	157
mai	187	187	156	126	157
juin	165	162	131	99	131
juillet	144	138	121	100	120
août	131	124	113	96	112
sept	126	128	115	105	116
oct	136	133	123	111	123
nov	141	122	113	87	109
dec	132	113	111	92	107
Total	1851	1755	1550	1267	1532

Tableau II.8
Poids des stations pour l'ETP. :

Stations	Surfaces partielles (km ²)	proportions des surfaces en (%)
Ségou	2709	2.66
Koutiala	27918	27.48
Bougouni/Sikasso	41379	40.73
Odienné/Boundiali	29594	29.13
Surface Totale	101600	100

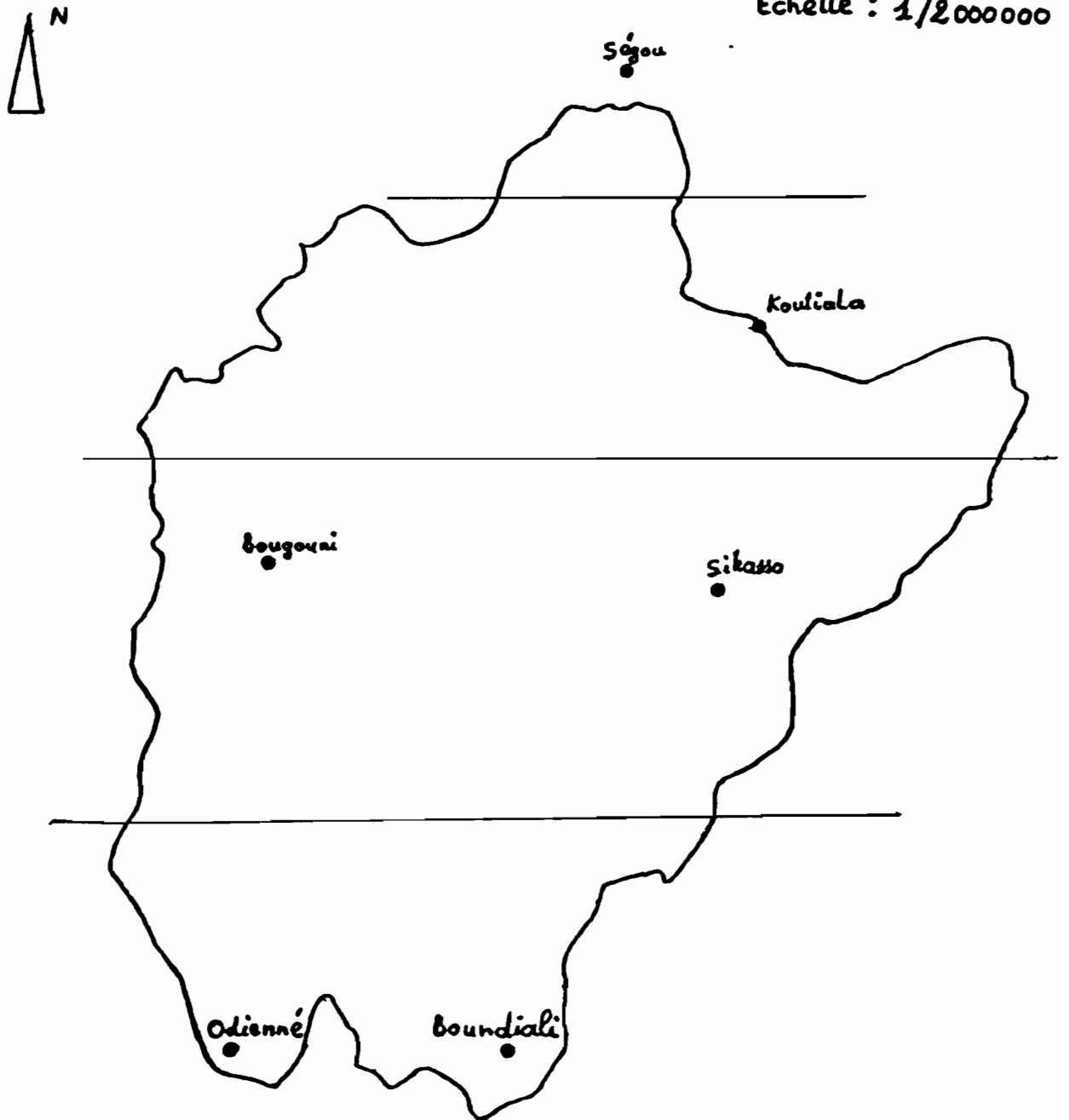


Figure II.8

Découpage du bassin pour le calcul de l'ETP

CHAPITRE III

ETABLISSEMENT DES BILANS HYDROLOGIQUES

Les bilans hydrologiques que nous présentons dans le présent projet, sont effectués par différence entre les pluies moyennes et les écoulements sur le bassin-versant du Bani à Douna ; il s'agit donc des déficits d'écoulement.

Deux périodes de 20 ans ont été prises en compte ; l'une de 1950 à 1970, se situant pendant la période humide du Bani ; l'autre de 1971 à 1990 est largement déficitaire et comprend les années les plus déficitaires de la série (1983, 84 et 87). Chacune de ces périodes a été découpée en décennies. Nous signalons dans ce qui suit, que nous avons considéré la période 1950-1960 (11 ans) comme décennie afin d'avoir au total 4 décennies sur toute la période d'étude 1950-1990.

La comparaison est faite sur la moyenne de ces quatre décennies afin de mettre en évidence les grandes lignes de l'évolution du fonctionnement hydrologique dans le bassin-versant du Bani. L'information a été traitée au pas de temps mensuel pour l'ensemble de l'information hydrologique.

III.1. LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL

L'équation du bilan hydrologique s'écrit :

$$P = Le + ETR + R_1 - R_0$$

Dans laquelle P est la hauteur moyenne des précipitations annuelles en mm reçues sur le bassin.

Le est la lame d'eau annuelle écoulée en mm mesurée à l'exutoire, c'est à dire le volume écoulé rapporté à la superficie du bassin, soit à une hauteur comparable à la hauteur de précipitation.

ETR est l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm.

R_1 et R_0 sont respectivement les lames en mm mises en réserves (stockées) dans le sol ou les nappes souterraines et restituées par ces mêmes aquifères au cours d'une période donnée.

III.1.1. Les termes du bilan

III.1.1.1. Lames d'eau écoulées et précipitations annuelles

La lame d'eau écoulée Le correspond à la hauteur qu'atteindrait le volume écoulé à l'exutoire d'un bassin-versant s'il était également réparti sur la surface (S) de ce bassin.

Son expression est donnée par la formule suivante :

$$Le(mm) = \frac{Q \times 31.56 \times 1000}{S}$$

Les lames écoulées ont été calculées pour chaque année hydrologique et mises en régression avec la hauteur de précipitation de l'année correspondante. On trouve

pour l'ensemble du bassin limité à Douna, l'équation de la droite de régression et le coefficient de corrélation ci-après :

$$Le = 0.46P - 386.62 \quad r = 0.921$$

On remarque qu'il y' a une corrélation étroite entre les lames écoulées et la pluviométrie. On peut donc considérer que cette expression de Le est une bonne approche des relations hydropluviométriques du bassin dans l'éventail des précipitations annuelles observées.

III.1.1.2. Coefficient d'écoulement et déficit d'écoulement

Le coefficient d'écoulement Ke interannuel constitue une caractéristique du régime hydrologique du bassin du Bani, ne dépendant que de la lame coulée interannuelle et de la hauteur de pluie moyenne interannuelle reçue par le bassin.

$$Ke(\%) = \frac{Le}{P} \times 100$$

Le déficit d'écoulement De correspond à la consommation d'eau par évapotranspiration à laquelle s'ajoute la différence entre le stock d'eau mise en réserve dans les aquifères souterrains (R_1) et le volume restitué provenant de ces mêmes aquifères (R_0).

$$De = P - Le = ETR + R_1 + R_0$$

Dans le bilan hydrologique annuel, stockage et restitution des réserves tendent à s'équilibrer pour une longue période d'observation ($R_1 \# R_0$), et le déficit d'écoulement moyen représente alors le seul paramètre ETR, valeur moyenne de l'évapotranspiration réelle de la région.

$$De = P - Le = ETR$$

Sur le bassin du Bani, l'évapotranspiration réelle serait donc d'environ 1005 mm. Cette valeur reste quasiment inférieure à l'évapotranspiration potentielle calculée mois par mois par la formule empirique de Penman et dont la valeur annuelle dépasse 1500 mm. Cette grande différence entre les valeurs du déficit d'écoulement interannuel et de l'évapotranspiration potentielle mérite d'être soulignée. **Elle implique que l'évapotranspiration potentielle n'est pas satisfaite sur le bassin du Bani ($ETP > De$)**. L'étude du bilan mois par mois va nous permettre de préciser le comportement du bassin et nous confirmera que l'évapotranspiration réelle est très différente de l'évapotranspiration potentielle telle que calculée par Penman.

Le tableau III.1 ci-après réunit les bilans hydrologiques décennaux établis sur 41 ans. On verra que ces distributions montrent le regroupement des valeurs actuelles dans une gamme très déficitaire.

Tableau III.1
Bilans hydrologiques décennaux :

Décennies	1950-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1950-1990
Débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	760	608	248	155	450
Volume 10^9 m^3	24.0	19.2	7.8	4.9	14.2
Pluie (mm)	1328	1210	1051	972	1145
Lame d'eau (mm)	236	189	77	48	140
Déficit (mm)	1092	1021	974	924	1005
Ke (%)	17.7	15.6	7.2	4.8	11.5

L'examen de ce tableau, en regard des écarts par rapport aux moyennes établies sur la période 1950-1990 montre que le déficit est plus marqué durant les 20 dernières années avec paroxysme en 1981-1990. Durant cette même décennie, la baisse des précipitations en valeur nette est de 173 mm par rapport à 1950-1990, soit en valeur relative une baisse de 15 %. Mais le passage d'un total pluviométrique de 1145 mm à 972 mm occasionne une diminution de 66 % de la lame écoulée, de 58 % du coefficient d'écoulement et de 8 % du déficit d'écoulement.

Sur la période 1981-1990, la baisse des pluies moyennes sur le bassin représente 27 % par rapport à 1950-1960, le déficit d'écoulement baisse de 15 %, la lame d'eau est alors fortement diminuée (80 %) de sorte que le coefficient d'écoulement passe à 4.8 %.

Depuis 1970, l'appauvrissement en eau du Bani n'a pas cessé d'augmenter. Il passe à $6.4 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ pour la décennie 1971-1980 et $9.3 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ pour la décennie 1981-1990, soit en valeurs relatives respectivement 45 % et 66 % des apports à Douna.

On remarque tout de même que la baisse du déficit d'écoulement se rapproche de celle des précipitations ; Par contre la baisse des écoulements est nettement plus accentuée par rapport à celle des précipitations observées sur l'ensemble du bassin du Bani à Douna. Cette tendance persistante à la baisse doit être soulignée car elle montre une dégradation durable du régime hydrologique du fleuve malgré un retour assez sensible à de meilleures conditions de précipitations.

D'après Pouyaud (1987), sur des petits bassins-versants de superficie inférieure à 500 km^2 où l'écoulement est presque constitué exclusivement de ruissellement superficiel, les caractéristiques de l'écoulement ne sont pas modifiées par la diminution de la pluviométrie.

Pour le Bani à Douna (101600 km^2), l'origine de la modification du régime hydrologique doit être cherchée préférentiellement dans l'écoulement de base. En effet, **la longue période récente de déficits pluviométriques observés sur le bassin a eu pour effet un intense tarissement du fleuve qui se traduit par une réduction considérable de l'écoulement de base. De ce fait les relations pluies-débits y sont modifiées vers une diminution du coefficient d'écoulement.**

Des études de Olivry, Sircoulon et Touré (1992), sur le fleuve Sénégal et beaucoup d'autres cours d'eau dans la région tropicale expliquent bien le phénomène : on parle de fleuves malades d'Afrique, de l'épuisement progressif des aquifères des bassins-versants et d'une accélération considérable de la phase de tarissement.

III.2. LE BILAN MOIS PAR MOIS

L'équation du bilan qui s'écrit : $P = Le + ETR + R_1 - R_0$, dans laquelle $R_1 \neq R_0$ permet à partir d'hypothèses simples de préciser le cycle de l'eau à l'échelle du mois tout au long de l'année.

On suppose :

-avec Penman, que l'évapotranspiration potentielle est satisfaite lorsqu'elle est inférieure à la hauteur de précipitation. On aura $ETR = ETP$.

-avec Thornthwaite, que la satisfaction de l'ETP est prioritaire par rapport à l'écoulement, c'est à dire qu'il n'y aura pas d'écoulement tant que l'ETP n'est pas complètement satisfaite, on aura $ETR = ETP$. Par ailleurs le remplissage de la RFU (réserve facilement utilisable) est également prioritaire sur l'écoulement. Autrement dit, même si l'ETP est satisfaite, si la RFU = 0 ou n'a pas atteint la capacité maximale, il n'y aurait pas d'écoulement.

De ces hypothèses, on établit le bilan à l'échelle mensuelle en faisant le raisonnement suivant :

-Si pluie > ETP, l'évapotranspiration réelle est satisfaite ($ETR = ETP$), et la quantité $P - ETP$ sera affectée à la RFU.

-Si pluie < ETP, toute la pluie sera affectée à l'ETR ($P = ETR$) ; si l'ETR n'atteint pas l'ETP, on va puiser dans la RFU (jusqu'à la vider) toute l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR.

Ainsi le bilan mois par mois sera calculé par la méthode de Thornthwaite basée sur la notion de réserve facilement utilisable. Le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau qui est la RFU. Cette eau peut être reprise par évaporation par l'intermédiaire des plantes. Généralement la RFU à l'échelle du mois varie de 0 à 200 mm, mais nous prendrons dans le cadre de notre étude une valeur moyenne de 100 mm.

Tableau III.2

Bilan hydrique mois par mois sur le Bani à Douna en mm

	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	Année
Pluie mm	45	91	144	235	296	204	78	16	4	2	4	16	1135
Lame mm	0	0	1	4	21	44	41	18	7	3	1	1	141
Déficit (mm)	45	91	143	231	275	160	37	-2	-3	-1	3	15	994
ETP mm	157	157	131	120	112	116	123	109	107	117	126	158	1532
RFU mm	0	0	13	100	100	100	55	0	0	0	0	0	
ETR mm	45	91	131	120	112	116	123	71	4	2	4	16	835

Les différents termes du bilan ont été réunis dans le tableau III.2. Les hauteurs pluviométriques mensuelles ont été obtenues par la méthode de Thiessen. Les lames écoulées sont calculées à partir des débits moyens mensuels. Le déficit d'écoulement peut devenir négatif (excédent d'écoulement pendant la saison sèche) ; c'est le cas en novembre, décembre et janvier. L'évapotranspiration potentielle moyenne a été calculée mois par mois par la méthode de Thiessen.

On note que l'évapotranspiration réelle est quasiment satisfaite sur le bassin pendant 5 mois de l'année (de juin à octobre) ; on note également que les valeurs du déficit d'écoulement restent significatives pendant 4 mois de l'année (de juin à septembre), elles montrent que la demande évaporatoire est largement satisfaite sur le bassin pendant cette période de l'année. Durant cette période, les déficits d'écoulement sont plus représentatifs de l'évapotranspiration réelle ou même potentielle. Les déficits d'écoulement traduisent d'après Pouyaud (1987), ***la part consommée de l'eau consommable par évapotranspiration, et sont donc davantage liés à la pluviométrie, que caractéristiques du bassin lui-même.***

CONCLUSIONS

Au terme du présent mémoire, nous retenons que :

Le bassin du Bani subit l'incidence du cumul de déficits pluviométriques répétés depuis une vingtaine d'années. Alors que la baisse des précipitations semble stabilisée, voire moins importante, l'écoulement du fleuve continue à s'appauvrir dans des proportions importantes.

Si les conditions du ruissellement superficiel ont été peu modifiées durant les 20 dernières années, l'écoulement souterrain a lui fortement diminué comme l'indique l'augmentation du coefficient de tarissement. La baisse des nappes est évidente.

Ce panorama peu réjouissant de l'actuelle situation climatique suppose quant à la maîtrise des maigres ressources en eau dont disposent les populations de développer une politique d'aménagements hydrauliques et une agriculture irriguée seules garanties d'une production alimentaire gravement touchée par la dégradation des conditions climatiques sur le bassin.

Le retour à des écoulements plus soutenus en saison sèche suppose d'abord la reconstitution des aquifères. Celle-ci ne peut être immédiate et cela s'est bien vu dans la faible incidence d'une meilleure pluviométrie sur le tarissement.

A la sécheresse pluviométrique se surimpose avec un décalage pluriannuel une sécheresse spécifique qu'on pourrait appeler "sécheresse phréatique".

Les réactions des nappes sont plus lentes dans la restitution des basses-eaux ; et dans les bonnes conditions de pluviosité, l'amélioration du régime des basses-eaux devrait demander un temps comparable à celui qui a conduit à son actuelle dégradation.

Enfin, la très forte diminution des coefficients d'écoulement depuis 1970 doit inciter à beaucoup de prudence dans la reconstitution des écoulements par corrélation pluies-débits annuels, ceci malgré un bon coefficient de corrélation.

REFERENCES

BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P. et MOLINIER M. (1986) Monographie hydrologique du fleuve Niger, Tome I : Niger supérieur 396 p., Coll monog. Hydrol. n°8, ORSTOM, Paris.

M. ROCHE. (1963) : Hydrologie de surface. Gauthier-Villars Ed. ORSTOM., Paris., 429 p.

MAHE G et OLIVRY J.C. (1991) : "Les changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuelle", in Hydrology for the Water Management of Large Rivers Basins. *IAHS Publ, n° 201, PP 163-172.*

MAHE G. (1993) : Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *Coll. Etudes et Thèses. ORSTOM Paris. 438 p.*

OLIVRY J C. (1993) : Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique Intertropicale, in « L'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frecaut », Madeleine Griselin Ed, Presses Universitaires de Nancy, 1993. *PP 181-190.*

OLIVRY J. C., BRICQUET J.P., BAMBA F. et DIARRA M. (1993) : Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In *PEGI-INSU/ORSTOM. Colloque "Grands Bassins Fluviaux" 22, 23 et 24 novembre 1993-Paris. pp. 251-266.*

OLIVRY J.C. (1986) : Fleuves et Rivières du Cameroun. Thèse d'Etat. MESRES-ORSTOM., *Coll Monog Hydrol n°9, ORSTOM, Paris, 733 p.*

OLIVRY J.C. (1987) : Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. (*Proc. Vancouver Symp. Août 1987) 501-512, IAHS Publ. n° 168.*

OLIVRY J.C., SIRCOULON J. et TOURE M. (1992) : The ill rivers of africa. In Colloque ICID. Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regioes semi-aridos. Fortaleza (Brazil), 4p

ORSTOM. (1959) : Aménagement de la plaine de SAN-EST. Etude hydrologique du Banifing de SAN. ORSTOM., Service Hydrologique, Ministère de l'Agriculture., Service du Genie-rural. 80 p

RODIER J. (1964) : Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. Mémoire n°6, ORSTOM, Paris, 137 p.

TOURE M. (1990) : Etude des variations du débits du fleuve Niger à Koulikoro. *Coll Mémoire de fin d'étude. ENI, hydraulique. 62 p*

BIBLIOGRAPHIE

BALEK J., JONES J.P., SKOFTELAND. E. (1989) : Notes de cours de formation pour techniciens en hydrologie (tomes I,II,III), J.P.Jones Ed, Unesco, Paris 1989.

DUBREUIL P. (1974) : Initiation à l'analyse hydrologique, Masson et Cie Ed, ORSTOM., 216 p.

ENI-ENSUP-ORSTOM. (1992) : "Ressources en eau souterraine du Mali". *In Cahiers de formation à la recherche. Publ n° 2, 24 P*

MEHDIAN M H. (1991) : Evapotranspiration Potentielle et Réelle. Aperçu des méthodes et des mesures. Minimémoire de stage linguistique. IAM/ORSTOM, Montpellier., 9 p.

WOTLING G. (1994) : Analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson Africaine de 1951 à 1989. Application de la méthode du vecteur régionale (M V R). Mémoire de DEA national d'hydrologie. Université de Montpellier-II/ORSTOM., 121 p.

ZAKI S A. et AMADOU A I. (1992) : Comparaison du bilan hydrologique de la cuvette lacustre du Niger en périodes Humides et Sèches. Coll Mémoire de fin d'étude. Hydraulique.,76p

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1

Répartition des vitesses de vent aux stations de Bougouni, Sikasso, Ségou et Mopti.

CHAPITRE II

Tableau II.1

Liste des stations pluviométriques du bassin du Bani à Douna.

Tableau II.2

Coefficients de Thiessen des postes pluviométriques du bassin-versant du Bani à Douna.

Tableau II.3

Pluies moyennes mensuelles calculées par Thiessen sur le bassin du Bani à Douna en périodes humide (1950-1970) et sèche (1971-1990).

Tableau II.4

Hauteurs des précipitations moyennes annuelles sur le bassin du Bani à Douna de 1950 à 1990.

Tableau II.5

Débits moyens mensuels en année hydrologique du Bani à Douna en m^3s^{-1} .

Tableau II.6

Débits moyens mensuels interannuels à Douna calculés par décennie et sur la période 1950-1990.

Tableau II.7

Evapotranspiration moyenne de 1950 à 1951.

Tableau II.8

Poids des stations pour le calcul de l'ETP.

CHAPITRE III

Tableau III.1

Bilan hydrologiques décennaux.

Tableau III.

Bilan hydrique mois par mois sur le Bani à Douna.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1

Réseau hydrographique du bassin-versant du Bani.

Figure I.2

Profil en long du Bani et de ses affluents (d'après la carte régulière au 1/200 000 e)

Figure I.3

Esquisse géologique du bassin-versant du Bani.

Figure I.4

Températures moyennes mensuelles décennales des mois le plus chaud (avril, mai) et le plus froid (décembre, janvier).

Figure I.5

Evolution du nombre de mois de températures supérieures à 27°C par décennies.

Figure I.6

Humidités relatives moyennes mensuelles décennales des mois le sec (mars) et le plus humide (août).

Figure I.7

Evolution du nombre de mois d'humidité inférieure à 50% par décennies.

CHAPITRE II

Figure II.1

Postes pluviométriques du bassin du Bani à Douna.

Figure II.2

Isohyètes interannuelles sur la période 1950-1990.

Figure II.3

Pluies mensuelles interannuelles sur le bassin du Bani à Douna (en mm).

Figure II.4

Polygones de Thiessen.

Figure II.5.

Index pluviométrique et variation de l'écoulement sur le Bani à Douna exprimés en écart à la moyenne.

Figure II.6

Evolution des modules annuels, depuis 1950 du Bani à Douna.

Figure II.7

Evolution des coefficients de tarissement du Bani à Douna (d'après Touré, 1990).

Figure II.8

Découpage du bassin pour le calcul de l'ETP.

STUDY OF HYDROCLIMATOLOGICAL VARIATIONS ON THE BANI RIVER BASIN FROM 1950 TO 1990

Abstract

For twenty years, the Bani River basin experienced a serious rainfall deficit. Until now, the lack of rainfall information and the particular gaps in the chronological series have not permitted objective tests on a large scale of rainfall spatio-temporal variability on the slopes of the Bani River basin at Douna.

The statistical method of correlation between neighbouring stations had permitted to realize such a monthly test. Indeed, thanks to this method, we were able to put together 29 files of annual rains from the observation of 44 rainfall stations on the basin. These files of rainfall constitute therefore some complete chronological series characterizing the whole of the annual rainfall on the basin from 1950 to 1990. They show a period of around 20 years of rainfall deficit.

Moreover, we were able to show a lasting diminution of runoff at the station of Douna (101600 km²). However, considering the 1950/90 mean values, precipitations were reduced by 15% in 1981/90, while the runoff decreased by 66% during the same period. The reduction of mean annual discharges can be assumed to result of the reduction of the base flow : in 1981/90, 27% less rainfall, compared to the 1950/60, mean produced an 80% decrease in runoff. The runoff deficit variations are not significant, the mean interannual value of runoff deficit for the basin is 1005 mm.

The potential evapotranspiration average reaches 1530 mm ; the minimum mean of ETP (107 mm) appears in December, the maximum mean (158 mm) is observed in August.

The balance explains in a simple form the real performance of the basin ; it specifies that real evapotranspiration is satisfied during 5 months (June to October), the average interannual value is 885 mm.

RESUME

Depuis une vingtaine d'années, le bassin du Bani est soumis à un déficit pluviométrique important. Jusqu'à présent, le manque d'informations pluviométriques, et en particulier les lacunes dans les séries chronologiques n'ont pas permis d'analyses objectives, à grande échelle de la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur le bassin-versant du Bani à Douna.

La méthode statistique de corrélations entre stations voisines a permis de réaliser une telle analyse au pas de temps mensuel. En effet, grâce à cette méthode on a pu constituer 29 fichiers de pluies annuelles contenus dans les observations de 44 postes pluviométriques sur le bassin. Ces fichiers de pluies constituent ainsi des séries chronologiques complètes caractérisant l'ensemble de la pluviométrie annuelle sur le bassin de 1950 à 1990. Elles montrent une période d'environ 20 années de déficits pluviométriques.

De plus on a pu montrer à partir de la chronique des débits enregistrés à Douna (101600 km²) une décroissance persistante des écoulements. Cependant la baisse des pluies n'est que de 15% en 1981/90 par rapport à la moyenne de 1950-1990, alors que celle des écoulements est de 66%. La réduction des modules annuels peut être logiquement reliée à la diminution des apports souterrains : en 1981/90, des pluies de 27% inférieures à la moyenne de 1950/60 entraînent une diminution de 80% de la lame écoulée. Les variations du déficit d'écoulement sont assez peu significatives, la valeur moyenne interannuelle est de 1005 mm sur le bassin.

L'évapotranspiration potentielle moyenne atteint 1530 mm ; la plus faible valeur de l'ETP (107 mm) intervient au mois de décembre ; la valeur maximale (158 mm) est observée au mois d'août.

Le bilan mois par mois explique de façon simplifiée le comportement réel du bassin, il précise que l'évapotranspiration réelle est satisfaite pendant 5 mois de l'année (juin à octobre) ; la valeur moyenne interannuelle est de 885 mm.

Abstract

For twenty years, the Bani River basin experienced a serious rainfall deficit. Until now, the lack of rainfall information and the particular gaps in the chronological series have not permitted objective tests on a large scale of rainfall spatio-temporal variability on the slopes of the Bani River basin at Douna. The statistical method of correlation between neighbouring stations had permitted to realize such a monthly test. Indeed, thanks to this method, we were able to put together 29 files of annual rains from the observation of 44 rainfall stations on the basin. These files of rainfall constitute therefore some complete chronological series characterizing the whole of the annual rainfall on the basin from 1950 to 1990. They show a period of around 20 years of rainfall deficit. Moreover, we were able to show a lasting diminution of runoff at the station of Douna (101600 km²). However, considering the 1950/90 mean values, precipitations were reduced by 15% in 1981/90, while the runoff decreased by 66% during the same period. The reduction of mean annual discharges can be assumed to result of the reduction of the base flow : in 1981/90, 27% less rainfall, compared to the 1950/60 mean, produced an 80% decrease in runoff. The runoff deficit variations are not significant, the mean interannual value of runoff deficit for the basin is 1005 mm. The potential evapotranspiration average reaches 1530 mm ; the minimum mean of ETP (107 mm) appears in December, the maximum mean (158 mm) is observed in August. The balance explains in a simple form the real performance of the basin ; it specifies that real evapotranspiration is satisfied during 5 months (June to October), the average interannual value is 885 mm.