

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

GC. 0293

Projet de fin d'Etudes

Titre ETUDE HYDROMETEOROLOGIQUE D'UN BASSIN
VERSANT REPRESENTATIF:
LE FLEUVE SENEGAL

AUTEUR : BOURÉ DIOUF

DIRECTEUR : DANIEL TESSIER

GENIE : CIVIL

DATE JUIN 1986

À mes très chers parents et amis
Pour le soutien matériel et moral
Qu'ils m'ont cessé de m'apporter
Tout au long de mes études

Quisse cette dédicace être l'expression de ma reconnais-
sance éternelle et de mon attachement affectueux.

Remerciements

Il m'est aujourd'hui très agréable d'exprimer ma gratitude et mes plus vifs remerciements à l'ensemble des personnes qui, par leurs enseignements, leur soutien sans réserve et leurs encouragements m'ont aidé jusqu'à la réalisation de ce travail.

Je remercie tout particulièrement :

- Monsieur Daniel Tessier, professeur d'hydrologie à l'École Polytechnique, qui en dépit de ses lourdes tâches s'est constamment tenu informé et préoccupé de l'avancement de notre étude.

Je lui suis reconnaissant des suggestions, des remarques, des conseils prodigués et d'avoir accepté de diriger ce Projet de Fin d'Études.

- Monsieur le Colonel Lamine Cissé pour l'aide matérielle qu'il a bien voulu nous accorder.

- Madame Monique Leclair, technicienne au centre de calcul, de nous avoir initié avec clairvoyance et compétence au Lotus 1-2-3. Ses explications et ses suggestions nous ont toujours été profitables. Sa collaboration de M^r Tessier a été aussi très appréciée.

Je voudrais aussi remercier les organismes qui m'ont apporté leur appui en m'accueillant avec amitié dans leur centre. En l'occurrence l'Orstom, la Météorologie Nationale et le Ministère de l'Hydraulique. Je leur remercie pour leur chaleureuse disponibilité et les facilités accordées.

Enfin mes pensées vont à toute ma famille soucieuse de mon avenir et toujours préoccupée de mes études.

Sommaire

Dans le but d'atteindre les objectifs de notre étude, nous avons choisi d'articuler notre travail en cinq points :

- i) En premier lieu, nous avons entrepris une recherche bibliographique;
- ii) Ensuite, à partir d'un inventaire exhaustif des données physiographiques, hydrologiques, hydrogéologiques et météorologiques nous avons tenté de caractériser notre bassin;
- iii) la troisième phase a consisté en une analyse météorologique à l'aide de l'analyse des fréquences et de la conception d'un réseau optimal
- iv) la quatrième partie concerne l'analyse d'inondations
- v) Enfin la cinquième partie est constituée de la conclusion et des recommandations.

Par cette étude, nous avons élaboré deux outils de travail pour les gestionnaires en eau. Dans le but d'améliorer la précision de la courbe de fréquence composée et celle des débits moyens annuels versus aires des bassins, il est recommandé de poursuivre l'étude avec un plus grand nombre de bassins et des données plus récentes.

Table des matières

	Pages
Dédicace	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Chapitre I - <u>Introduction</u>	1
Chapitre II - <u>Revue de littérature</u>	3
2.1 Documentation météorologique	3
2.2 Documentation hydrologique	3
2.2.1 Monographies hydrologiques Oustom	3
2.2.2 Annuaires hydrologiques	5
Chapitre III - <u>Données hydrométéorologiques disponibles sur le fleuve Sénégal</u>	6
3.1 Cadre géographique du bassin versant	6
3.1.1 Topographie	6
3.1.2 Climatologie	6
3.1.3 Hydrographie	7
3.1.4 Géologie	8
3.1.5 Géomorphologie	9
3.1.5a Pédologie	10
3.1.6 Occupation du sol	10
3.1.6.1 Couvert forestier	10
3.1.6.2 Actions de l'homme	11
3.2 Données physiographiques	12
3.2.1 Caractéristiques de forme du bassin	12
3.2.1.1 Aire du bassin	12
3.2.1.2 Périmètre	12

3.2.1.3	Indice de compacité	12
3.2.1.4	Altitudes maximales et minimales	15
3.2.1.5	Rapport de relief	15
3.2.2	Caractéristiques du réseau hydrographique	18
3.2.2.1	Longueur du cours d'eau principal	18
3.2.2.2	Densité de drainage	18
3.2.2.3	Densité hydrographique	20
3.2.2.4	Ordre du cours d'eau	21
3.2.2.5	Rapport de confluence	22
3.2.2.6	Pente moyenne du cours d'eau principal	25
3.3	Réseau d'observation	27
3.3.1	Stations météorologiques	27
3.3.1.1	Observations météorologiques	27
3.3.1.2	Stations fonctionnelles	28
3.3.2	Stations hydrométriques	28
3.3.2.1	Observations hydrométriques	28
3.3.2.2	Stations fonctionnelles	29
3.4	Données météorologiques	30
3.4.1	Pluviométrie	31
3.4.2	Evaporation	37
3.4.3	Transpiration	39
3.4.4	Evapotranspiration	40
3.5	Données hydrologiques	41
3.5.1	Ruissellement	41
3.5.2	Infiltration	41
3.6	Données hydrogéologiques	42
3.6.1	Caractéristiques des nappes	42
3.6.2	Qualité de l'eau de la nappe phréatique	42
Chapitre II - Conception d'un réseau hydrométéorologique		44
4.1	Généralités	44

4.2 Densité	44
4.2.1	44
4.2.2 Calcul du réseau pluviométrique optimal	45
4.3 Emplacement	46
Chapitre V - <u>Analyse des fréquences</u>	47
5.1 Introduction	47
5.2 Description de la loi utilisée	47
5.3 Traitement statistique	48
5.3.1 Cas des crues	48
5.3.1.1 Saint Louis	49
5.3.1.2 Podor	52
5.3.1.3 Matam	54
5.3.2 Cas des étiages	57
5.3.2.1 Saint Louis	57
5.3.2.2 Podor	60
5.3.2.3 Matam	62
Chapitre VI - <u>Analyse d'inondations</u>	65
6.1 Choix des stations et de la période de retour	65
6.2 Données manquantes	65
6.3 Courbes individuelles de fréquence	69
6.4 Test d'homogénéité	70
6.5 Débit d'inondation	74
6.5.1 Quotient d'inondation	74
6.5.2 Relation débit moyen annuel - aire du bassin	76
Chapitre VII - <u>Conclusion et recommandations</u>	80
Annexe A - Graphiques du bassin versant	83
Annexe B - Evaporation et évapotranspiration	88
Annexe C - Détermination du facteur K	93
Annexe D - Courbes de fréquence	94
Annexe E - Hauteurs limnimétriques	104
Bibliographie	107

Liste des tableaux

	Pages
3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique	19
3.2 Profil longitudinal	25
3.3 Stations météorologiques	28
3.4 Stations hydrométriques	29
3.5 Pluviométrie de Saint Louis	31
3.6 Pluviométrie de Podor	33
3.7 Pluviométrie de Matam	35
3.8 Evaporation sur lac Colorado	37
3.9 Evaporation à l'appareil Piche	38
6.1 Coefficients de corrélation	66
6.2 Pente des droites de régression	67
6.3 Ordonnées à l'origine des droites de régression	67
6.4 Débits maxima annuels complétés	68
6.5 Fonction de distribution expérimentale	69
6.6 Test d'homogénéité	71
6.7 Quotients d'inondation	75
6.8 Débits moyens annuels et aires des bassins	76
6.9 Quotients d'inondation moyenne par rapport à la période de retour	78
C.1 Détermination du facteur "K" - distribution log-Pearson type III	93
E.1 Matrice de corrélation (données: hauteurs limnimétriques)	104
E.2 Pente des droites de régression (ht. limnimétriques)	104
E.3 Ordonnées à l'origine des droites de régression	105
E.4 Hauteurs limnimétriques complétés	106

Liste des figures

	Pages
3.1 Longueur maximale	16
3.2 Rapport de relief	17
3.3 Ordre des cours d'eau	21
3.4 Régression du nombre des cours d'eau en fonction de l'ordre	24
3.5 Profil longitudinal	26
3.6 Pluviométrie de Saint Louis	32
3.7 Pluviométrie de Podor	34
3.8 Pluviométrie de Matam	36
5.1 Fréquence des hauteurs maximales (St Louis)	51
5.2 Fréquence des hauteurs maximales (Podor et Matam)	56
5.3 Fréquence des hauteurs minimales (St Louis)	59
5.4 Fréquence des hauteurs minimales (Podor et Matam)	64
6.1 Test d'homogénéité, bandes de confiance ($\alpha = 0,05$)	72
6.2 Débit moyen annuel par rapport à l'aire du bassin	77
6.3 Courbe de fréquence composée	79
A Graphiques du bassin versant	83
B.1 Variations de l'évaporation mensuelle Piche (K, L, K)	91
B.2 Variations de l'évaporation mensuelle Piche (S, R, M)	92
D Courbes de fréquences	94

CHAPITRE I

Introduction

Il est bien connu de tous que l'eau est un des éléments essentiels pour la survie de toute forme de vie terrestre; que ce soit l'espèce humaine, animale ou végétale. Elle intervient aussi dans les activités agricoles et industrielles. En un mot l'eau est un élément de civilisation. Aussi, certains n'ont pas hésité à écrire (et cela à juste titre) que l'humanité et son histoire "sont avant tout une question d'eau."

Consciente de sa nécessité, la Conférence des Nations Unies sur l'Eau a déclaré la période 1980-90: "Décennie internationale de l'Eau."

Malheureusement, cette ressource indispensable à toute vie et à tout développement est très inégalement répartie. En plus de cela, certaines régions voient leur possibilité diminuer chaque jour. Notre sous-région, cadre de notre étude, n'a hélas pas échappé à certains de ces phénomènes dont la désertification.

Ainsi, depuis le début du siècle, le Sahel n'a cessé de gagner du terrain amoindissant ainsi les ressources en eau.

Paradoxalement, les besoins en eau du pays augmentent constamment par suite de l'expansion démographique, industrielle et agricole. Aussi une étude hydrométéorologique du fleuve Sénégal, le plus important des cours d'eau du pays, s'avère primordiale afin d'évaluer les ressources en eau dispo

mibles et de les exploiter de façon rationnelle.

Cette recherche hydrométéorologique vise :

- d'une part à la création de banques de données afin de prévoir le comportement du fleuve pendant les nombreuses applications dont il pourrait être l'objet;
- d'autre part à analyser et à interpréter les données recueillies afin de résoudre certains problèmes d'aménagement hydraulique rattachés au fleuve Sénégal.

Cette analyse permettra de rejoindre les objectifs suivants :

- préciser les facteurs quantitatifs du bilan hydrologique
- mettre en évidence certaines relations entre les caractéristiques physiographiques du bassin versant et les caractéristiques hydrologiques;
- définir avec le maximum de précision possible le dit bassin versant et ses caractéristiques climatiques

Les résultats de cette étude viseront à améliorer nos connaissances dans le domaine de la ressource eau au Sénégal pour ainsi fournir une information et un outil de travail aux gestionnaires en eau au moment de l'élaboration des projets d'aménagement hydraulique du territoire.

CHAPITRE II

Revue de littérature

Base de cette étude, la documentation est le travail préliminaire que nous avons entrepris. Cette première étape a consisté à la consultation des principaux documents traitant du bassin du fleuve Sénégal.

Dans l'objectif de situer le lecteur sur ce qui a été déjà fait, nous faisons un sommaire des principaux ouvrages consultés pour notre étude.

2.1 Documentation météorologique.

L'essentiel de cette documentation se retrouve dans les publications de la Météorologie Nationale. Comme information, nous trouvons, les mesures de nos différentes stations météorologiques (Cf 3.3.1.1 de notre étude)

2.2 Documentation hydrologique.

2.2.1 Monographies Hydrologiques Orstom

Avec la documentation hydrologique, des années antérieures à 1965, l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) a édité la Monographie hydrologique du fleuve Sénégal en neuf volumes ronéotypés. La rédaction a été assurée par C. Rochette avec la collaboration d'éminents experts. L'édition que nous avons consulté a été publiée en 1974.

Leur étude est basée sur la division du fleuve en deux

grandes parties : le Bassin du Sénégal Supérieur (en amont de Bakel) et le bassin du Sénégal Inférieur (en aval de Bakel).

Grosso modo, ce gigantesque travail de 4 parties peut se résumer ainsi :

1°) la 1^{ère} partie aborde les facteurs conditionnels du régime. Dans cette partie, il est fait mention des caractères physiques (relief, géologie, sols, réseau hydrographie, ... etc) et des facteurs climatiques (régime des vents, évaporation ... etc) de chacune des 2 parties.

2°) la 2^e partie intitulée les données d'observations hydrométriques se subdivise en plusieurs autres parties dont un inventaire des observations hydrométriques et les débits observés des différentes stations du Sénégal Supérieur et du Sénégal Inférieur.

Pour chaque station, on peut trouver les informations sur

- les coordonnées géographiques,
- l'histoire de la station,
- la liste des jaugeages,
- les courbes d'étalonnage,
- le tarage,
- etc

De plus, pour les stations du Sénégal Inférieur une analyse de revalorisation des données a été faite.

3°) la 3^e partie concerne l'analyse des éléments du régime hydrologique. Cette analyse est basée sur 3 points :

- les régimes des hauteurs limnimétriques (étude des crues,)
- les régimes des débits (étude des modules, du tarissement...)
- la marée. Sont pris en considération les problèmes concernant la marée et la pénétration de l'eau sa-

lée dans le Delta. (Caractéristiques relatives à la marée et sa propagation, évolution de la salinité, ... etc)

4°) Quant à cette dernière partie, elle n'est constituée que par les données numériques des différentes stations. Principalement elles concernent:

- les hauteurs limnimétriques dans la Vallée et le Delta,
- les débits observés dans le Haut Bassin,
- les débits observés dans la Vallée.

2.2.2 Les annuaires hydrologiques

Ils sont édités par la Direction des Etudes Hydrauliques du ministère de l'Hydraulique. Chaque annuaire est traité en année hydrologique. Il couvre la période allant du 1^{er} Mai X au 30 Avril X+1, X désignant une année quelconque. Les données de base publiées dans ces documents émanent du réseau hydrologique national.

Pour chaque station, l'utilisateur trouvera les données suivantes:

- les coordonnées géographiques,
- l'histoire de la station,
- les caractéristiques de l'année (module, débit spécifique, volume d'eau écoulée, lame d'eau équivalente),
- le tableau et le graphique des hauteurs moyennes journalières,
- le tableau et le graphique des débits moyens journaliers des sections tarées

Sont disponibles les annuaires de 1975 jusqu'à 1982

Des annuaires hydrologiques pourraient constituer une continuité de la Monographie éditée par l'Orstom bien que cette dernière contient quelques données météorologiques.

CHAPITRE III

Données hydrométéorologiques disponibles sur le bassin versant du fleuve Sénégal

3.1 Cadre géographique du bassin versant

3.1.1 Topographie

Le bassin versant du fleuve Sénégal se subdivise en deux parties distinctes :

- le bassin du Sénégal Supérieur, en amont de Bakel, est une région tourmentée et montagneuse. Le point le plus élevé est à une altitude de 1330m environ et l'altitude moyenne de la partie méridionale, la plus montagneuse, est sensiblement voisine de 1000m.
- le bassin du Sénégal Inférieur, en aval de Bakel, se présente comme une vaste étendue peu accidentée ne présentant çà et là que quelques reliefs plus marqués. Il convient de signaler le massif de l'Assaba entre les vallées du Gorgol et du Karakoro et dont les plus hauts points atteignent 400m environ.

3.1.2 Climatologie

Schématiquement nous distinguons deux ensembles :

- Le Sénégal Supérieur, situé entre les régions tropicales et les confins du Sahara, présente une grande diversité climatique. On passe du climat soudano-guinéen au Sud, au climat sahélo-saharien au Nord. Le climat sahélo-soudanais, intermédiaire, correspond au climat dominant de la majeure partie du bassin Supérieur.

- Quant au bassin Inférieur, il est compris entre les latitudes $14^{\circ}47'$ et $17^{\circ}30'$ et est soumis à un climat peu varié allant du type soudano-sahélien au Sud Est, au type sahélien au Nord et à l'Ouest

La durée de la saison des pluies diminue de la partie méridionale à la partie septentrionale du fleuve, d'où la faiblesse des apports que reçoit le Sénégal à l'aval de Bakel.

3.1.3 Hydrographie

Long de 1800 km, le Sénégal prend naissance dans le Nord de la Guinée, traverse la partie occidentale du Mali, puis constitue, sur tout le reste de son parcours, la ligne de frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. Ses principaux bassins constitutifs sont :

1°) En amont de Bakel

a) le Bafing

C'est la branche mère du Sénégal. Il prend sa source dans le massif du Fouta djallon, à quelques 800 m d'altitude. Il est long de 750 km. Comme affluents, il reçoit, le Bakoye, la Kolimbine, le Karakoro et la Falémé.

b) le Bakoye

Son bassin versant est de 85.600 km^2 . Il prend sa source à 760 m d'altitude dans la région des monts Menien. Il décrit de multiples méandres et reçoit comme affluents: le Baoulé (445 km). Il est long de 561 km

c) le Baoulé

Affluent principal du Bakoye, le Baoulé prend sa source à 750 m d'altitude dans la région Sud Est, de Bamako. Il est long de 632 km.

d) la Falémé

Appluent du Sénégal, elle prend sa source à 800m d'altitude dans une région de plateaux doléritiques. Elle présente beaucoup de méandres. Elle est longue de 625km

2°) En aval de Bakel

Dans cette partie, le Sénégal reçoit quelques affluents qui traversent des zones basses et marécageuses où ils dérivent de nombreux méandres. Ils prennent leur source dans le massif de l'Assaba.

Les principaux sont : le bras secondaire le Doué et les oueds Ghorfa, Niordé et le Gorgol

3.1.4 Géologie.

Du Sud au Nord, nous retrouvons les principales formations géologiques suivantes :

a) le socle ancien.

Il est composé en général de roches ayant subi un léger métamorphisme et appartenant surtout aux micaschistes supérieurs. On y distingue : des schistes, des quartzites, des métabasites, des granites, ... etc

b) le Paléozoïque

Ce sont des formations sédimentaires qui n'ont subi aucun métamorphisme. De plus elles ne contiennent pas de fossiles et recouvrent en discordance les formations précitées. On y distingue plusieurs séries :

i) l'infra-cambrien : se caractérise par des formations subhorizontales et est constitué principalement par des grès, des quartzites, des pelites et des calcaires.

ii) le Primaire qui se subdivise en 3 groupes de formations - le Cambrien Inférieur dont les formations sont cons

tituées de terrain d'origine sédimentaire et d'une succession de calcaires, grès, etc.

- le Cambrien Supérieur composé surtout de grès argileux rouges (Assaba)

- l'Ordovicien se caractérise par des grès blancs saccharoïdes qui constituent le Massif de l'Assaba

c) les Formations Tertiaires.

Elles sont représentées par l'Eocène Moyen et le Continental Terminal

i) l'Eocène Moyen : largement représenté dans le bassin Inférieur. Affleure en aval de Bakel (région de Matam).

Il est surtout constitué par des calcaires, des dolomites et argiles

ii) Le Continental Terminal : Affleure de Bakel à Daga ma - Il repose sur l'Eocène moyen marin

d) le quaternaire.

- On y trouve surtout des alluvions fluviales et des dunes

3.1.5 Géomorphologie

! Schematiquement, nous distinguons

- une succession de reliefs sub-tabulaires constitués de granites et de dolérites. Le réseau hydrographique a coupé ces plateaux en une succession de vallées en V. Les reliefs s'abaissent petit à petit vers le Nord.

- une région au relief moins accentué caractérisé par :

i) une succession de plateaux latéritiques de dimensions variables et une présence de nombreuses petites vallées en forme de couloirs ou de dépressions étroites et allongées à fond plat surtout en amont de Bakel.

ii) une vallée de largeur très variable et où le fleuve décrit par endroit de nombreux méandres.

3.1.5a Pédologie

La formation des sols ou pédogénèse fait intervenir plusieurs éléments dont : le climat, la nature du sous-sol et le relief. Les sols sont variés et n'offrent pas les mêmes possibilités agricoles.

On peut distinguer :

a) les sols ferralitiques

On les observe pratiquement qu'en zone soudano-guinéenne et ceci sur tout matériau. Ils sont rouges ou argileux.

b) les sols ferrugineux tropicaux

Surtout en zone soudanienne. Ils sont plus ou moins lessivés ou remaniés en fonction de la position topographique et la situation climatique.

c) les sols subarides.

Caractéristiques de la zone sahélienne. Ils sont sableux, argileux, bruns ou halomorphes.

Quant à ceux de la zone sahélo-saharienne, ils sont brun rouge de la classe des sols isohumiques développés sur sables dunaires qui enserrant assez étroitement la vallée.

La deuxième catégorie est propice à la culture de l'arachide.

Quant aux sols hydromorphes, ceux situés le long des vallées alluviales, lorsqu'ils ne sont pas salés sont propices aux cultures maraîchères et à la riziculture.

Par contre, là où affleurent les cuirasses ferrugineuses toute culture devient impossible, sinon difficile.

3.1.6 Occupation du sol.

3.1.6.1 Couvert forestier

La végétation reflète la variété climatique. Beau-

coup de classifications ont été faites. Cependant nous ne retiendrons que celle de J. Trochain qui répartit le couvert forestier en trois domaines :

i) Le domaine guinéen.

Il se caractérise par une forêt dense très dégradée.

ii) Le domaine soudanien

Il est caractérisé au Sud par une forêt claire qui devient progressivement une savane plus ou moins boisée en allant vers le Nord.

iii) Le domaine sahélier.

La végétation est constituée principalement par des espèces ligneuses peu nombreuses, rabougries et le plus souvent épineuses. Quelquefois, elles sont étalées en parasol, le feuillage étant réduit et caduc. Pendant la saison des pluies, cette végétation se caractérise par une pseudo-steppe ou une savane claire, arbustive ou arborée.

3.1.6.2 Actions de l'homme.

La végétation n'est pas à l'abri de l'homme. Ainsi,

i) les défrichements abusifs font courir un grand risque aux massifs forestiers.

ii) les feux de brousse consomment les herbages et se propagent bien malgré la faible densité du tapis herbacé causant ainsi des forêts trouées de clairières absolument dépourvues de végétation en saison sèche.

Cette végétation se dégradant de jour en jour, nous assistons à une avancée progressive du désert.

Cf annexe A pour les différentes illustrations

3.2 Données physiographiques

3.2.1 Caractéristiques de forme du bassin versant.

3.2.1.1 Aire

$$A = 338\,000 \text{ km}^2$$

3.2.1.2 Périmètre

Plusieurs méthodes de mesure s'offraient à nous. Nous avons fait la plus précise : le curvimètre

Trois mesures différentes ont été faites

$$l_1 = 173 \text{ cm}$$

$$l_2 = 173 \text{ cm}$$

$$l_3 = 174 \text{ cm}$$

Echelle : $1/2\,000\,000$

$$l_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^3 l_i}{3} = 173,3 \text{ cm}$$

$$P = 2 \cdot 10^6 \times 173,3 \times 10^{-5} = 3466 \text{ km}$$

avec P : périmètre du bassin

3.2.1.3 Indice de compacité

A superficies égales, des bassins de forme différente ne réagissent pas de la même manière à une pluie donnée. Aussi pour mieux décrire la forme d'un bassin certains auteurs ont défini des indices de compacité

1) Indice de compacité de Horton.

Cet indice exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin à la longueur du cours d'eau principal.

On le définit par la relation suivante :

$$ICH = \frac{A}{L^2} \quad (3.1)$$

où

ICH : indice de compacité de Horton

A : superficie du bassin versant, en km^2

L : longueur du cours d'eau principal, en km

Ainsi

$$\text{ICH} = \frac{338000}{1800^2} = 0,001$$

ii) Indice de compacité de Miller

On l'appelle aussi indice de sphéricité. Lorsque sa valeur tend vers l'unité, la forme du bassin ressemble à une sphère, ou s'approche de la forme circulaire.

Il est défini par

$$\text{ICM} = \frac{A}{A_c} \quad (3.2)$$

avec

ICM : indice de compacité de Miller

A : aire du bassin versant, en km^2

A_c : superficie d'un cercle dont le périmètre égale le périmètre du bassin versant ($A_c = \frac{P^2}{4\pi}$), en km^2

Soit

$$\text{ICM} = \frac{4\pi \times A}{P^2} \quad (3.3)$$

Faisons le calcul

$$\text{ICM} = \frac{4\pi \times 338000}{3466^2} = 0,35$$

Interprétation:

Compte tenu de cette indice ($\text{ICM} \neq 1$), nous pouvons dire que la forme du bassin versant n'est ni circulaire, ni sphérique.

iii) Indice de compacité de Gravelius

C'est l'indice le plus employé. Il est déterminé par le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin.

$$ICG = \frac{P}{P_c}$$

où

ICG: indice de compacité de Gravelius

P: périmètre du bassin versant, en km

P_c: périmètre du cercle, en km.

Faisons des transformations mathématiques

$$A_c = \pi R^2 = A ; A = \text{aire du bassin}$$

$$P_c = 2\pi R, \quad R: \text{rayon du cercle}$$

$$P_c = 2\sqrt{\pi} \times \sqrt{\pi R^2} = 2\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{A} = \frac{\sqrt{A}}{0,28}$$

La relation précédente devient

$$ICG = \frac{0,28 P}{\sqrt{A}} \quad (3.4)$$

Si cet indice tend vers l'unité, nous pouvons dire que le bassin versant est rond i.e possibilité de réponse rapide aux précipitations. S'il est supérieur à l'unité, le bassin est de type allongé.

Dans le cas présent,

$$ICG = \frac{0,28 \times 3466}{\sqrt{338000}} = 1,67$$

Interprétation

D'après cet indice, nous pouvons dire que le bassin est de type allongé. Ceci est confirmé par les 2 indices précédents (ICH et ICM)

3.2.1.4 Altitudes maximale et minimale

a) Dans le Haut Bassin

Altitude maximale : 1330m

Altitude minimale : 15m

b) Dans le bassin du Sénégal Inférieur

Altitude maximale : 400m

Altitude minimale : 0m

3.2.1.5 Rapport de relief

C'est le quotient du relief total du bassin à la longueur maximale du bassin mesurée dans le sens de l'écoulement d'un cours d'eau.

$$R_r = \frac{R_m}{L_m} \quad (3.5)$$

où

R_r : rapport de relief

R_m : relief total du bassin versant, en m

L_m : longueur maximale du bassin versant, en m

Déterminons chacun des termes de ce rapport.

i) La longueur maximale du bassin versant est évaluée en mesurant la distance entre l'exutoire et le plus éloigné du bassin.

ii) le relief total

Procédure

1°) Par une perpendiculaire à la ligne L_m et à l'endroit où le bassin a sa largeur maximale, on sépare le bassin en deux parties. Soit A l'intersection de cette perpendiculaire avec L_m fig 3.2

2°) Relevé des altitudes des points 1 et 2 qui sont les intersections de la perpendiculaire précédente avec

le contour du bassin

3°) Relevé de l'altitude du point 3 qui se situe à l'endroit le plus éloigné de l'exutoire.

4°) Par deux perpendiculaires à la ligne L_m , on sépare chacune des deux parties du bassin versant en deux surfaces. Ces deux perpendiculaires sont tracées de telle sorte qu'elles divisent en deux longueurs égales les segments qui vont de la tête du bassin (point 3) à A et de A à l'exutoire. Ces deux perpendiculaires rencontrent le contour du bassin en différents points dont les altitudes sont relevées (points 4, 5, 6 et 7) cf fig 3.2

5°) On fait une moyenne de ces sept (7) altitudes

6°) En soustrayant de cette altitude moyenne l'élévation prise à l'exutoire, nous obtenons le relief total du bassin.

Schumm (1958) a utilisé ce rapport pour caractériser la topographie d'un bassin versant.

Ainsi, il a observé qu'un rapport de relief élevé caractérise un relief accidenté tandis qu'une faible valeur suppose une région où la topographie est plutôt plane.

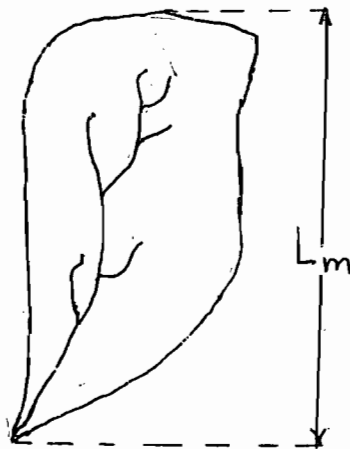
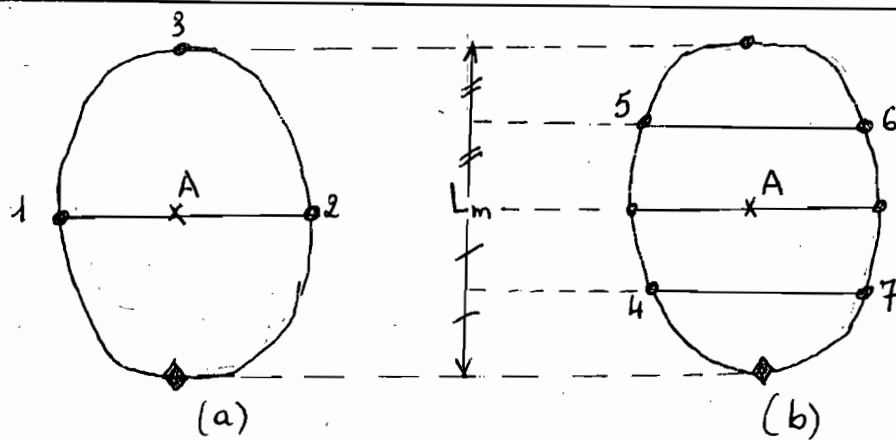


Fig. 3.1 Longueur maximale



○ Altitudes relevées
 ◆ Exutoire.

Fig. 3.2 Rapport de relief

En appliquant la même procédure à notre exemple, nous trouvons les résultats suivants.

i) Longueur maximale du bassin

3 mesures ont été faites sur un plan dont $E = 1/2\,000\,000$

$$l_1 = 40 \text{ cm}$$

$$l_2 = 41 \text{ cm}$$

$$l_3 = 41 \text{ cm}$$

$$l_{\text{moy}} = 40,7 \text{ cm}$$

$$L_m = 2 \cdot 10^6 \times 40,7 \times 10^{-2} = 814\,000 \text{ m}$$

ii) Relief total

Points	Élévation (m)
1	500
2	700
3	300
4	500
5	50
6	50
7	400

Appelons la moyenne de ces 7 valeurs par x

$$x = 357,14 \text{ m}$$

Élévation à l'exutoire : 50 m

$$R_m = 357,14 - 50 = 307,14 \text{ m}$$

iii) Rapport de relief

$$R_r = \frac{307,14}{814000} = 0,00037$$

Interprétation

D'après Schumm, notre topographie est plane.

3.2.2 Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant.

3.2.2.1 Longueur du cours d'eau principal

$$L = 1800 \text{ km}$$

3.2.2.2 Densité de drainage

Cette caractéristique représente la longueur des canaux d'écoulement par unité de surface. Elle s'exprime par le quotient de la somme cours d'eau sur l'aire du bassin. D'où la relation suivante

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A} \quad (3.6)$$

où

D_d : densité de drainage, en km^{-1}

l_i : longueur d'un cours d'eau, en km

n : nombre de cours d'eau

A : aire du bassin, en km^2

La densité de drainage dépend de plusieurs facteurs : la géologie, les caractéristiques topographiques et climatiques, ... etc

Beaucoup de chercheurs ont tenté de l'interpréter.

Fluves et sous-fluents	Longueur (km)	Altitude max (m)	Altitude min (m)	Dénivelée	Pente %
Sénégal-Bafing (a. Bakel)	1006	800	11	789	0,78
Bafing (amt Bafoulabé)	750	800	88	712	0,95
Tene (1)	136	1200	510	690	5,07
Kioma (1)	93	1000	500	500	5,37
Bakel (1)	114	725	240	485	4,25
Bale 2 (1)	138	500	190	310	2,24
Balinn-Ko (1)	164	600	135	465	2,83
Bakoye	561	760	88	672	1,19
Djinnko (2)	73	650	305	345	4,72
Kokoro (2)	82	375	307	68	0,83
Pauagama (2)	87	630	300	330	3,79
Baoulé (2)	632	500	155	345	0,55
Falémé	625	800	18	782	1,25
Kouloun-Ko (3)	56	500	225	275	4,91
Balinn-Ko (3)	165	750	115	635	3,85
Koula-Kabé (3)	182	680	110	570	3,13
Doundi (3)	70	450	100	350	5,00
Kolimbine + Wadou	310	130	15	115	0,37
Sénégal (depuis sa source)	1790	800	0	800	0,45
Sénégal (entre Bakel et St Louis)	784	12	0	12	0,015
Ghorfa	193	318	8	310	1,60
Gorgol blanc	345	340	4	336	0,97
Gorgol Noir	194	110	15	95	0,49

Tableau 3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique

Ainsi Strahler (1964) et Sinsley ont observé et conclu que les faibles valeurs indiquent un sol résistant à l'érosion ou très perméable et où le relief est peu accidenté; les valeurs fortes pour des sols facilement érodés et relativement imperméables, où les pentes sont fortes et où le couvert végétal est insuffisant.

D'après Langbein (1947), la densité de drainage des régions désertiques tend vers zéro. Elle atteint son maximum dans les régions montagneuses humides

Application numérique

$$\sum_{i=1}^{34} l_i = 9000 \text{ km}$$

$$D_d = \frac{9000}{338000} = 0,03 \text{ km}^{-1}$$

Interprétation

D'après Sinsley et Langbein, le relief est peu accidenté dans une région désertique

3.2.2.3 Densité hydrographique.

C'est le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Elle s'exprime par la relation suivante:

$$D_h = \frac{N}{A} \quad (3.7)$$

ou

D_h : densité hydrographique, en canaux/ km^2

N : nombre de canaux

A : aire du bassin

Application numérique

$$D_h = \frac{22}{338000} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ canaux/km}^2$$

Interprétation

Avec ces deux facteurs (D_d et D_h), nous voyons que notre bassin n'est pas bien desservi

3.2.2.4 Ordre du cours d'eau

Il s'agit d'une classification qui reflète la ramification d'un cours d'eau. Nous utiliserons l'approche de Strahler selon laquelle tous les tronçons de rivière formés par la réunion de deux cours d'eau d'ordre X sont d'ordre $X+1$. Si les ordres des tronçons sont différents, le cours d'eau résultant sera de l'ordre de celui le plus élevé.

Ainsi, un cours d'eau d'ordre n est un cours d'eau qui collecte :

- soit l'eau de cours d'eau d'ordre $n-1$
- soit l'eau de cours d'eau d'ordre n et d'ordre $n-1$

Exemples

- L'ordre 1 ne collecte l'eau d'aucun autre
- L'ordre 2 collecte l'eau de l'ordre 1

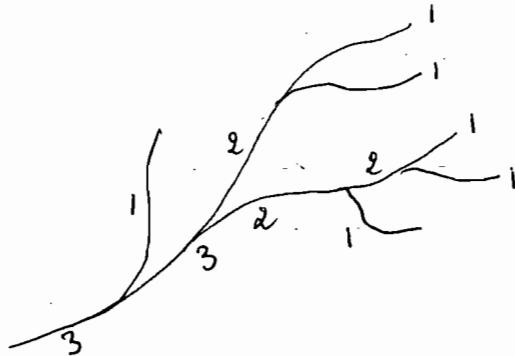


Figure 3.3 Ordre des cours d'eau

Application numérique

En appliquant la même procédure, nous avons trouvé que le Sénégal d'ordre 6

Interprétation

La faiblesse de la ramification confirme celle de la densité de drainage. Ainsi, nous avons un long temps de réponse.

3.2.2.5 Rapport de confluence

Expérimentalement Strahler a montré que, sur un bassin, la somme du nombre de cours d'eau d'un ordre donné constitue une série géométrique inverse dont le premier terme est l'unité, et la raison, le rapport de confluence. On définit ce dernier comme étant le quotient du nombre total de cours d'eau d'un certain ordre, N_x , et du nombre de cours d'eau d'ordre immédiatement supérieur, N_{x+1} .

Cette série peut s'écrire sous la forme suivante

$$N = 1 + R_c + R_c^2 + \dots + R_c^{n-2} + R_c^{n-1} \quad (3.8)$$

avec

N : nombre total de cours d'eau sur le bassin

R_c : rapport de confluence

n : ordre du cours d'eau principal

D'autre part, d'après la définition

$$R_c = \frac{N_x}{N_{x+1}} \quad (3.10)$$

ou N_x : nombre de cours d'eau d'ordre x

Notre série est de la forme

$$a + ar + ar^2 + \dots + ar^{n-1} = \frac{a(1-r^n)}{1-r}$$

En comparant avec la série précédente, nous trouvons $a=1$ et $r=R_c$

Par conséquent:

$$N = \frac{R_c^n - 1}{R_c - 1} \quad (3.11)$$

De plus,

$$N_x = R_c^{m-x} \quad (3.12)$$

Mathématiquement, cette dernière relation peut se représenter par une droite ayant, comme abscisse l'ordre des ruisseaux x , et comme ordonnée le logarithme à base 10 du nombre de ruisseaux d'ordre x ($\log_{10} N_x$). Cette droite s'écrit sous la forme

$$\log_{10} N_x = a - bx \quad (3.13)$$

A partir de là,

$$R_c = (\log_{10} b)^{-1} \quad (3.14)$$

D'après Strahler, il peut varier entre 3 et 5 pour une région où la géologie du sol n'a aucune influence. Cependant, ce rapport nous donne aussi des renseignements sur la densité de drainage lorsque l'influence de la géologie n'est plus négligeable. Ainsi, en présence d'un substratum rocheux couvert de dépôts meubles le réseau hydrographique se développe facilement. Par contre si la roche en place domine, la ramification s'intensifie lentement s'il s'agit d'une formation gréseuse; cette ramification est rapide sur un sol calcaire.

Application numérique

Ordre	N_x	$\text{Log}_{10} N_x$
1	632	2,8
2	83	1,92
3	28	1,44
4	9	0,95
5	3	0,48
6	1	0

$$R_c = \left| \frac{1}{\text{Log}_{10} 0,48} \right| = 3,14$$

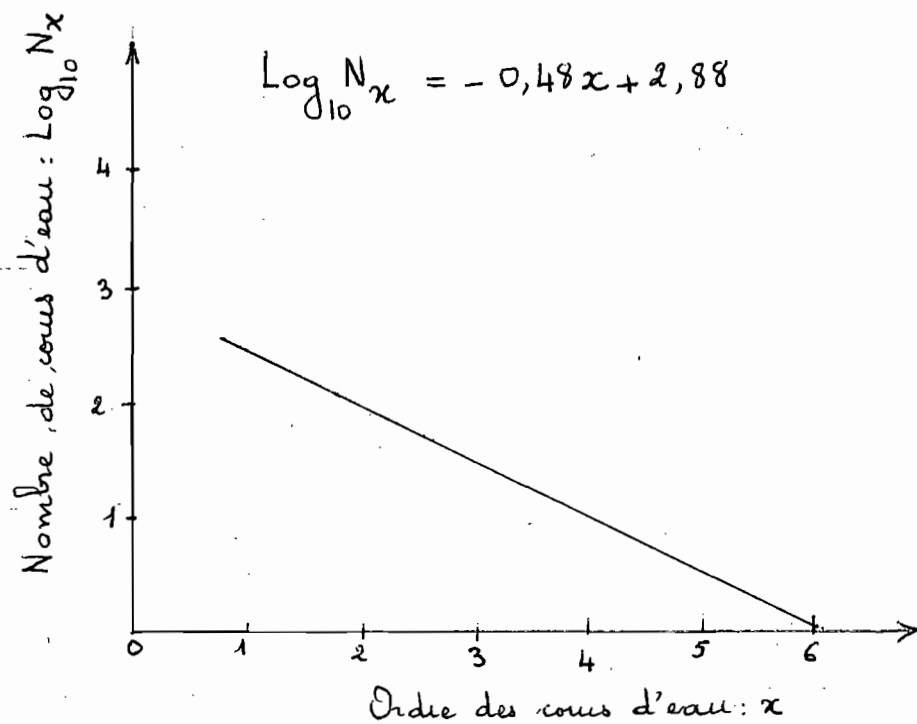


Fig. 3.4 Régression du nombre des cours d'eau en fonction de l'ordre

3.2.2.6 Pente moyenne du cours d'eau principal.

Cette pente est calculée d'après le profil longitudinal du cours d'eau principal. Elle représente la pente d'une ligne droite tracée de telle façon les aires S_1 et S_2 comprises entre elle et le profil soient égales.

Application numérique

i) Profil longitudinal

Distance à l'emboû chure (sur carte) (cm)	Distance réelle (km)	Elevation (m)
0	0	50
13	260	50
26	520	50
39	780	50
44	880	50
54	1080	300
61,6	1232	500
70	1400	500
75	1500	500
80	1600	500

Tableau 3.2 Profil longitudinal

ii) Pente

Calcul de la pente moyenne

$$\frac{82}{400} = 0,205 \text{ soit } 20\%$$

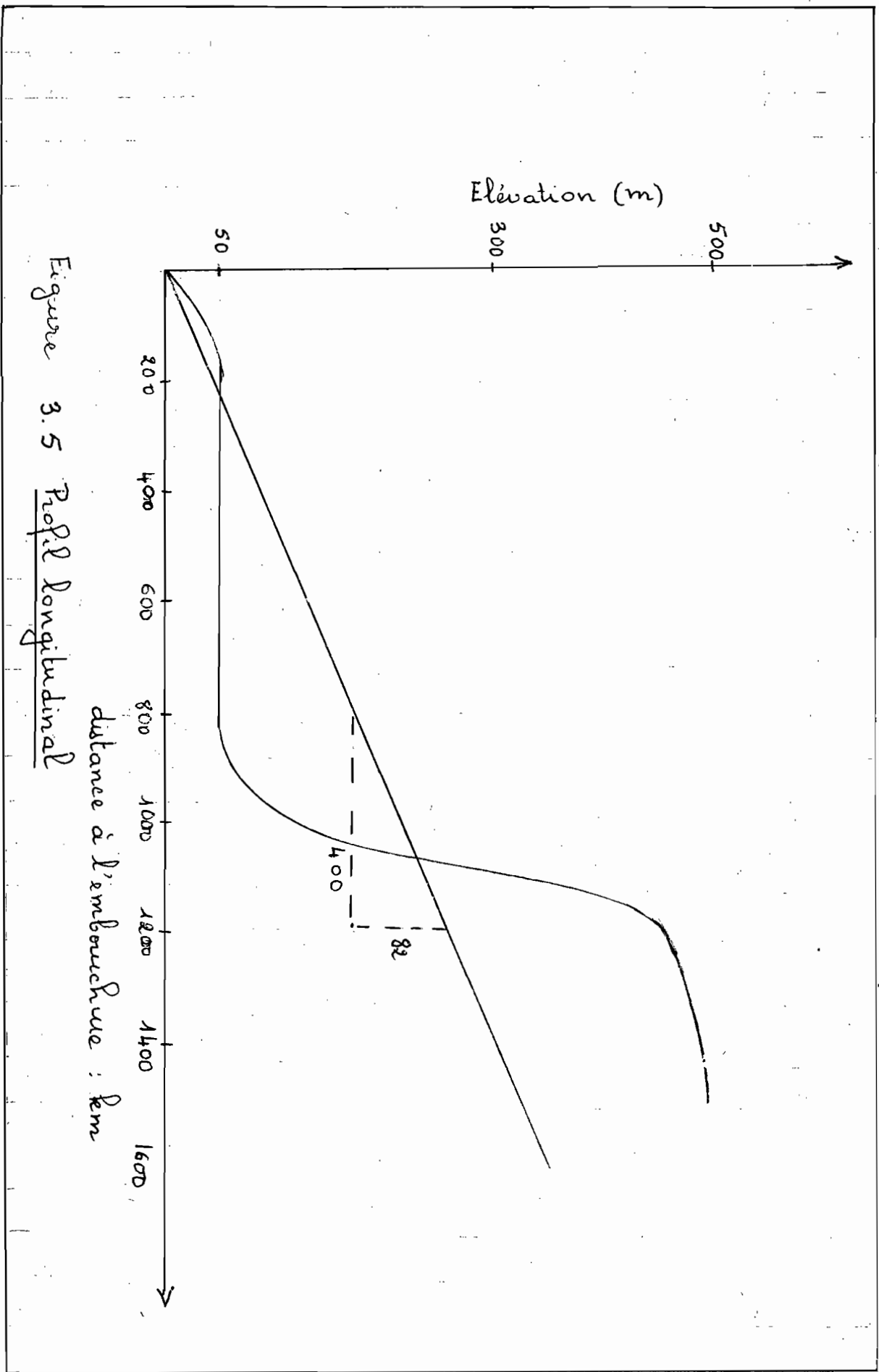


Figure 3.5 Profil Longitudinal
 distance à l'embouchure : km

3.3 Réseau d'observation

Dans le bassin sénégalais, le réseau d'observation est un réseau hydrométéorologique. Le dernier est défini comme étant un ensemble de stations distribuées dans l'espace auxquelles on mesure, pendant une durée indéfinie ou non, un certain nombre de paramètres concernant un ou plusieurs phénomènes hydrologiques ou météorologiques.

3.3.1 Stations météorologiques

3.3.1.1 Observations météorologiques

Faisons l'inventaire de toutes les mesures qu'on y fait ainsi que certaines de leurs caractéristiques.

a) Pluviométrie

- l'année de référence
- la hauteur (millimètres et dixièmes)
- nombre de jours de pluie
- la période (l'année et le mois)
- Pluviomètre enregistreur et pluviographe enregistreur.

b) Humidité de l'air

- Moyennes mensuelles des humidités relatives maximales, %
- Moyennes mensuelles des humidités relatives minimales, %
- Humidité minimale absolue, %
- Humidité maximale absolue, %

c) Pression atmosphérique

- Moyennes mensuelles des tensions de vapeur, en mb et 1/10

d) Température dans le sol (degrés, ...)

e) Température du sol

- Moyennes mensuelles des températures maximales ($^{\circ}\text{C}$ et 1/10)
- Moyennes mensuelles des températures minimales, $^{\circ}\text{C}$ et 1/10
- Températures minimales absolues, $^{\circ}\text{C}$ et 1/10

. Températures maximales absolues, ($^{\circ}\text{C}$ et $\frac{1}{10}^{\circ}\text{C}$)

f) Insolation

. Moyennes mensuelles de l'Insolation (heures, $\frac{1}{10}$ heures)

. De 1951 à 1970, pas d'observation

Installation de l'héliographe Campbell le 20 juillet 1972

g) Vent en altitude

. Moyennes en m/s et dixièmes

. Des relevés existent de 1951 à 1985

h) Pression au niveau de la mer.

. Moyennes mensuelles des pressions au niveau de la mer (en dixièmes et millibars)

. Des relevés existent de 1951 à 1985

3.3.1.2

Au total, ce réseau compte 3 stations météorologiques

Stations	Période de fonctionnement
Saint-Louis	1921 à 1985
Matam	1951 à 1985
Podor	1951 à 1985

Tableau 3.3 Stations météorologiques

3.3.2 Stations hydrométriques.

3.3.2.1 Observations hydrométriques.

Les observations comportent essentiellement des relevés ou enregistrements de hauteurs d'eau. Les hauteurs sont utilisées soit pour l'obtention des niveaux d'eau soit pour l'obtention des débits.

Actuellement les hauteurs de l'eau sont obtenues

- par lectures sur une règle graduée fine appelée échelle limni

- par un limnigraphe
3.3.2.2

Stations	Périodes d'observation
	1985
Bakel ^x	1952 →
Meatam ^x	1954 →
Kardi ^x	1903 1935 ——— 1954 1975 →
Galdé ^x	1954 →
Rogue ^x	1977 →
Podor ^{x+}	1903 ——— 1952 1976 →
Dagana ^x	1903 1935 ——— 1951 →
Kem Mou ^{x°}	1976 →
Richard Toll ^{x°}	1976 →
Rosso ^x	1951 1954 ——— 1976 →
Saint Louis ^{x°}	1976 →
Kidua ^{x+}	1903 ——— 1952 →
Doué à Ngoué ^x	1955 →
Tavouy à Richard Toll ^x	1949 ——— 1960 →
Ganente ^x	1949 ——— 1974 →

x Echelle limnimétrique

+ limnigraphe

° appareil enregistré

! → : Période concomitante : 1977 à 1985

Tableau 3.4 Stations hydrométriques.

3.4 Données météorologiques

3.4.1 Précipitation

Pour l'essentiel, les pluies tombent pendant l'hivernage; celles qui se déversent pendant la saison sèche sont extrêmement faibles. Cette région connaît certaines conditions d'alimentation pluviométrique très peu favorable.

Le régime des précipitations se caractérise par une diminution de leur intensité (355 mm à St Louis 800 mm au Sud) et de leur durée (St Louis a 5 mois de pluie, Bakel 6 à 7 mois, le Sud 8 mois) du Sud au Nord et par une grande variabilité interannuelle (Périodes d'abondance et de sécheresse alternent). C'est ainsi qu'à Saint Louis, l'écart entre l'année la plus pluvieuse 674,9 mm en 1912 et l'année la plus déficitaire 102,3 mm en 1977 est de loin supérieure à la normale (335 mm)

Il existe sur le bassin trois stations météorologiques fonctionnelles: Saint Louis, Podor et Matam

Saint Louis est la station pour laquelle "on dispose de la plus longue série chronologique d'observations des précipitations au Sénégal et en Afrique de l'Ouest. Les graphiques 3.6; 3.7 et 3.8 ont été obtenus par le logiciel

Lotus 1.2.3

Pour la pluviométrie générale, cf Annexe A, carte IV

Tableau N° 3-5

SAINT-LOUIS

ANNEE	H. moy (mm)	H. max (mm)	H. min (mm)
1950	28.6	172.2	0.3
1951	37.9	186.0	0.6
1952	32.3	195.6	0.6
1953	24.1	94.9	2.8
1954	31.1	217.4	5.4
1955	34.7	161.0	2.2
1956	18.8	73.9	6.6
1957	42.6	297.8	0.2
1958	26.4	280.2	0.4
1959	16.0	83.9	6.3
1960	21.6	135.7	43.2
1961	23.6	190.7	3.4
1962	27.6	242.2	5.6
1963	39.0	229.4	0.5
1964	26.9	183.3	61.3
1965	27.0	140.0	7.0
1966	36.4	197.9	9.3
1967	34.6	173.7	10.8
1968	19.4	101.3	0.2
1969	44.2	236.0	68.8
1970	15.0	67.2	12.9
1971	14.8	100.6	6.3
1972	12.7	80.2	6.6
1973	6.7	47.2	0.3
1974	16.4	79.7	0.5
1975	32.4	182.8	38.9
1976	17.2	123.2	0.2
1977	8.5	67.9	0.3
1978	34.5	222.7	0.2
1979	18.4	80.2	2.8
1980	24.5	137.3	0.6
1981	28.0	168.7	0.7
1982	16.0	92.7	3.8
1983	8.3	60.0	1.6
1984	9.1	65.0	0.2

STATION DE SAINT LOUIS

variation générale de la hauteur d'eau

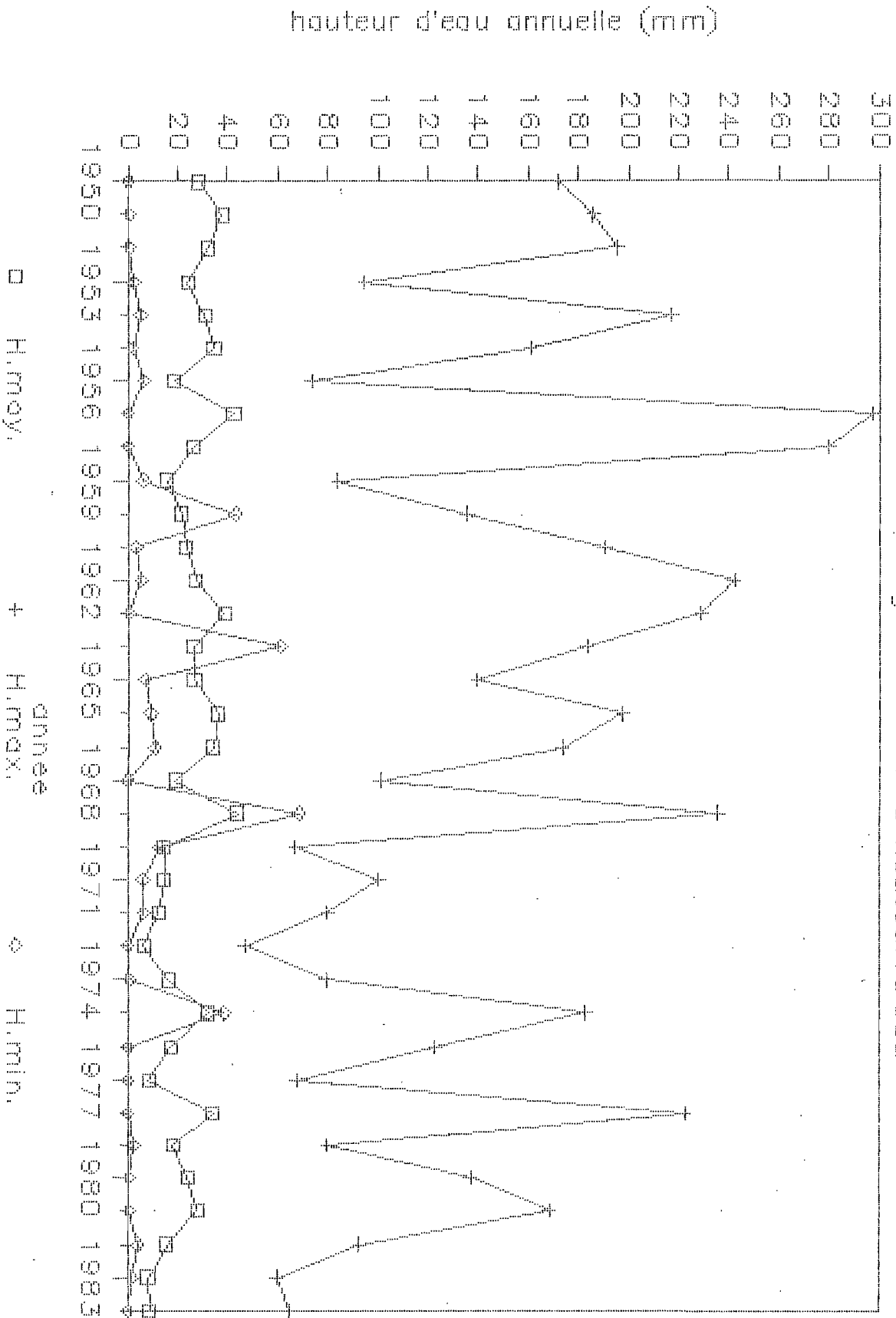


Tableau N° 3-6

PODOR

ANNEE	H. moy (mm)	H. max (mm)	H. min (mm)
1950	28.3	118.1	0.3
1951	33.2	197.7	0.3
1952	30.6	119.6	0.7
1953	28.1	119.1	0.1
1954	16.6	85.1	0.8
1955	66.1	314.8	0.3
1956	27.8	171.8	1.1
1957	23.2	114.1	0.6
1958	31.3	291.2	0.1
1959	18.6	95.5	0.3
1960	25.8	140.2	0.3
1961	25.7	182.3	12.7
1962	10.4	49.4	5.1
1963	27.4	136.8	4.5
1964	29.2	139.9	0.8
1965	28.5	184.5	0.2
1966	20.6	102.8	0.4
1967	22.6	139.7	24.9
1968	17.5	70.8	0.3
1969	36.0	215.4	30.7
1970	21.3	157.1	1.4
1971	11.4	91.5	1.2
1972	8.7	58.4	3.9
1973	12.1	87.3	0.9
1974	12.6	74.4	1.4
1975	18.9	98.3	0.1
1976	22.0	114.3	1.3
1977	11.0	97.7	0.9
1978	25.3	163.9	1.0
1979	27.2	143.0	0.4
1980	18.3	169.1	0.1
1981	18.3	169.0	0.1
1982	19.8	67.7	0.2
1983	24.3	239.0	1.1

STATION DE PODOR

variation generale de la hauteur d'eau

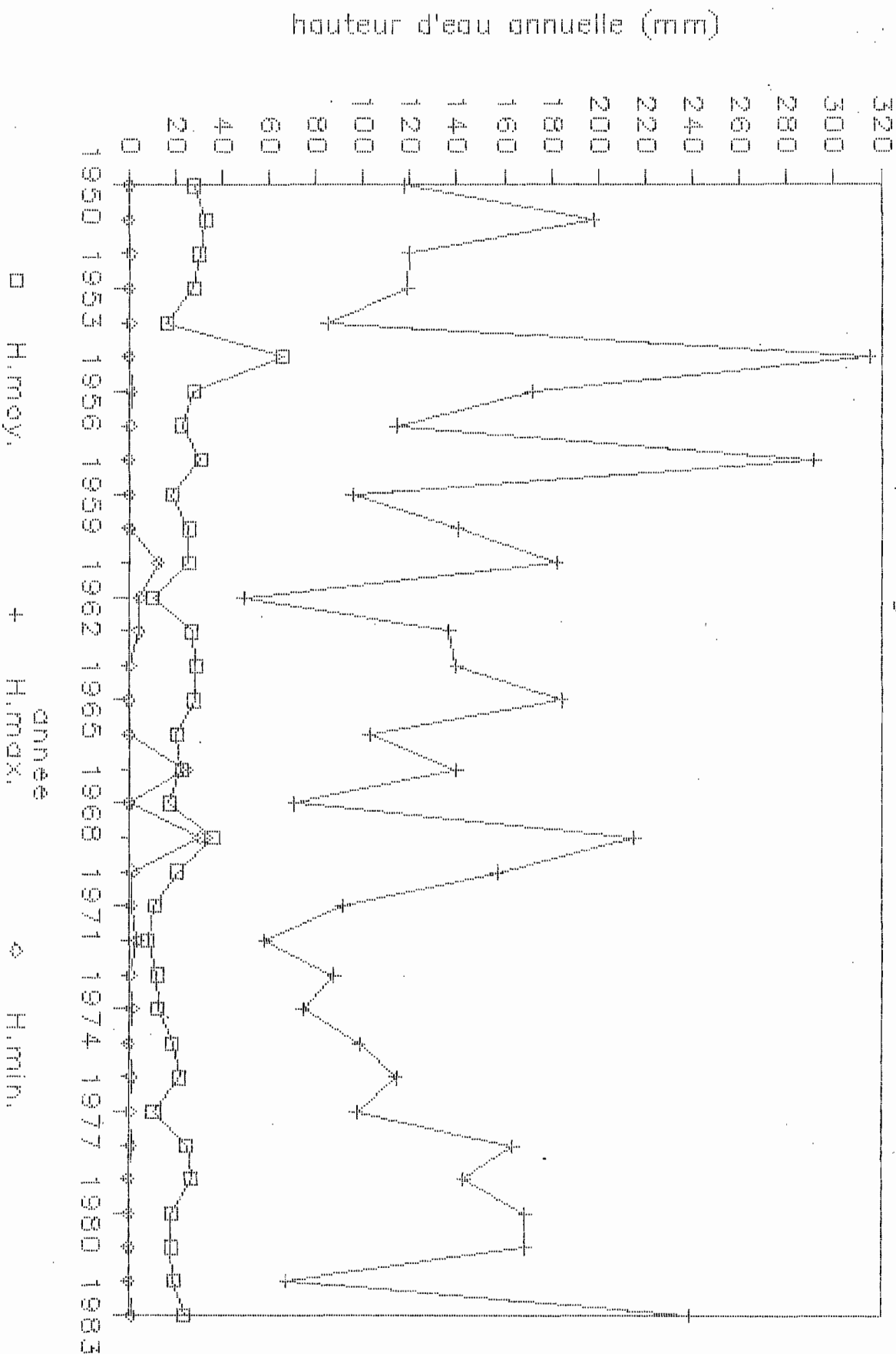


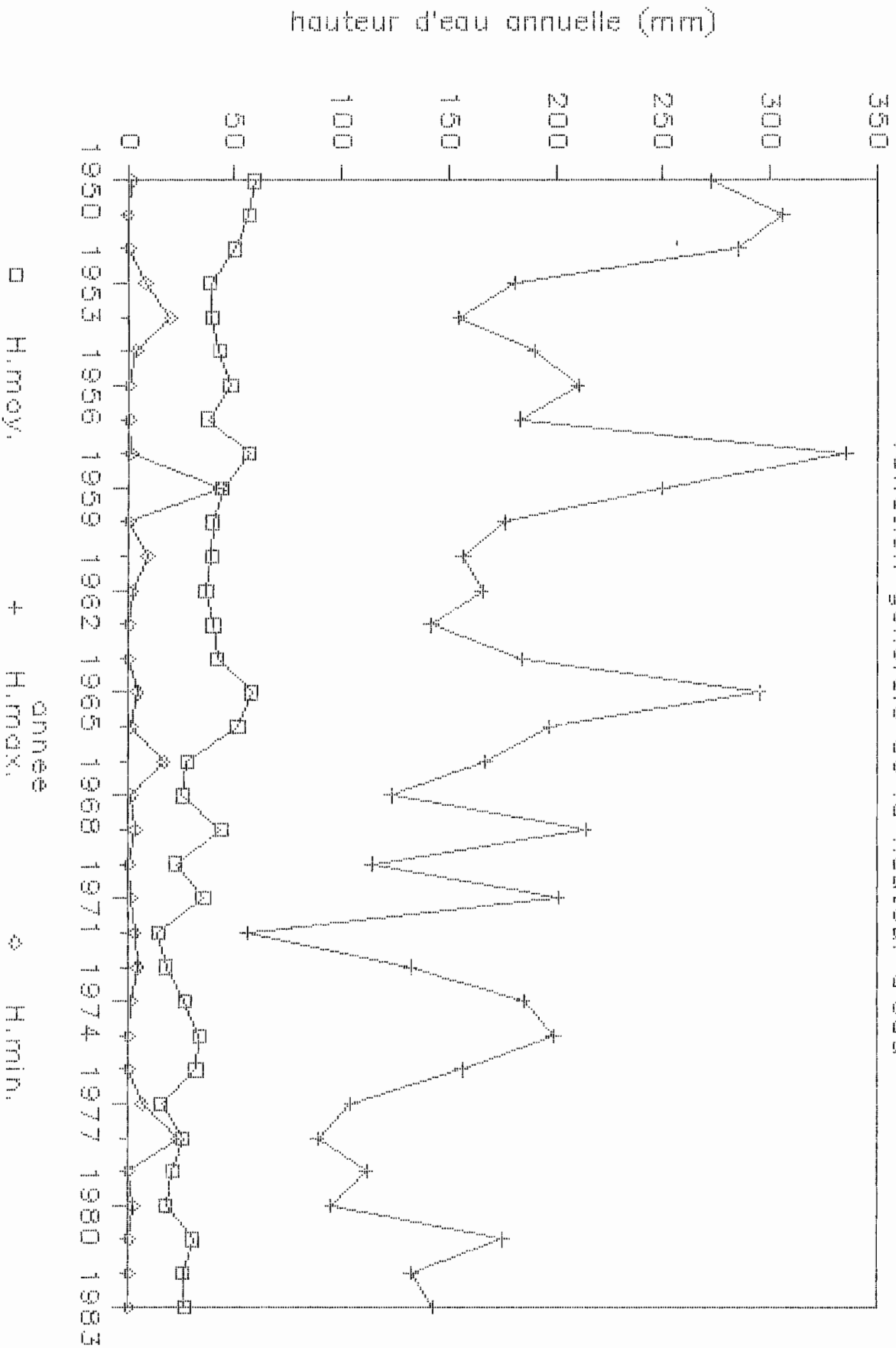
Tableau 3-7

MATAM.			
ANNEE	H. moy (mm)	H. max (mm)	H. min (mm)
1950	59.5	272.8	2.1
1951	56.8	306.4	0.2
1952	50.3	285.3	0.5
1953	39.2	181.2	8.5
1954	40.0	155.3	20.1
1955	43.1	190.0	4.3
1956	48.6	210.5	0.6
1957	37.7	184.1	1.0
1958	57.4	336.0	1.5
1959	44.8	250.1	44.1
1960	40.4	176.1	0.6
1961	40.0	157.3	9.7
1962	37.1	166.2	2.6
1963	40.5	142.3	1.0
1964	42.2	185.0	1.0
1965	58.4	295.2	5.0
1966	52.0	197.5	2.0
1967	28.4	168.0	17.5
1968	25.7	123.5	2.0
1969	44.5	214.0	4.0
1970	23.1	114.5	0.5
1971	35.9	201.5	2.0
1972	14.3	56.0	3.5
1973	18.3	133.0	5.0
1974	27.3	185.5	2.0
1975	34.0	199.5	1.0
1976	32.5	157.0	1.0
1977	16.2	105.0	7.0
1978	26.6	89.2	24.4
1979	21.6	112.4	0.8
1980	18.2	95.6	2.7
1981	30.9	175.8	0.9
1982	26.3	133.2	1.0
1983	27.0	143.2	0.7

3-7

STATION DE MATAM

variation generale de la hauteur d'eau



3.4.2 Evaporation

L'évaporation est le processus physique au cours duquel un liquide se transforme en vapeur. Elle dépend de plusieurs facteurs dont les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du liquide et la température. Cette dernière, fonction de la radiation solaire, est inégalement reçue par la terre. Ainsi, à partir de l'équateur, la chaleur solaire diminue progressivement vers les pôles, avec un taux de diminution très difficile à évaluer en raison du nombre et de la complexité d'autres facteurs physiques ou d'environnement qui sont fonction du gradient de latitude et du gradient hypsométrique.

Malgré toutes ces difficultés, des tentatives pour l'évaluer et la mesurer ont été entreprises.

Sur le fleuve Sénégal, les deux méthodes directes de mesure de l'évaporation suivantes :

- l'appareil Piche

et le bac Colorado : section $0,28 \text{ m}^2$; $h = 0,45 \text{ à } 0,91 \text{ m}$;

$C_b = 0,78$. On l'enfonce dans le sol, la hauteur visible 10 cm ont fourni quelques résultats.

• Evaporation sur bac Colorado (mm)

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Férou					260	189	140						
Kene	212	249	301	321	301	231	146	109	126	155	192	198	2540
Kou Haïna	223	297	353	369	394	339	223	161	165	205	228	205	3162
Aleg	236	243	335	363	387	372	298	261	219	245	249	251	3459

Tableau 3.8 Evaporation sur bac Colorado

On peut estimer grossièrement que l'évaporation potentielle annuelle varie d'environ 1500 mm dans les zones qui reçoivent

à plus de 3000 mm dans l'extrême Nord du bassin.
De plus, les 2 stations Keur-Maïène et Aleg (toutes dans la vallée du Sénégal) ont une allure de variation identique: maximum principal en mai-juin, minimum en août et maximum secondaire en octobre-novembre.

Evaporation moyenne (mm) mesurée à l'appareil Piche

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Kayes	287	311	392	410	416	252	127	75	72	131	212	259	2944
Kenieba	241	263	292	278	221	116	66	49	51	71	118	180	1946
Labé	259	276	295	241	153	82	55	48	51	82	126	198	1866
Matam	264	281	383	394	423	365	223	130	126	168	225	236	3218
Rosso	300	316	417	415	418	344	244	188	164	226	251	265	3548
St Louis	291	344	355	295	245	200	168	145	143	183	260	317	2946

Tableau 3.9 Evaporation à l'appareil Piche

Les données sont assez difficilement exploitables et ne procurent que des indications qualitatives sur l'intensité de l'évaporation potentielle. Elles montrent cependant que dans le delta, l'évaporation de Février à Juin est nettement plus faible à Saint-Louis qu'aux 2 autres stations (Rosso et Matam). Cela résulte des températures plus fraîches qui règnent sur le littoral pendant cette période. Dans cette zone, l'accroissement de l'évaporation potentielle avec la latitude est assez importante.

Quelque soit la méthode de mesure utilisée, nous constatons que les variations de l'évaporation suivent celle de la température et vont en sens inverse de la pluviométrie.

En plus des méthodes de mesure, l'évaporation peut être approchée par la relation suivante :

$$E_m = a + bt + ct^2 + dt^3 + \dots \quad (3.15)$$

où

E_m : évaporation annuelle maximale possible en mm

t : température moyenne annuelle en °C

a, b, c, d, \dots : coefficients d'ajustement.

Beaucoup de formules sont utilisées pour la détermination de l'évaporation. Cependant, leur usage doit se faire avec prudence et la plupart du temps à titre comparatif. Parmi la multitude nous n'en retiendrons que deux :

a) Mailtonne

$$E_m = 30(10 + t) \quad (3.16)$$

b) Tuoc

$$E_m = 320 + 25t + 0,05t^3 \quad (3.17)$$

Beaucoup d'auteurs ont montré que la formule de Tuoc s'applique aux pays du Sahel.

Faisons le calcul comparatif.

Matam $t = 29,3^\circ\text{C} \rightarrow E_m = 2311 \text{ mm}$

St Louis $t = 25^\circ\text{C} \rightarrow E_m = 1726 \text{ mm}$

Podor $t = 28,6^\circ\text{C} \rightarrow E_m = 2205 \text{ mm}$

Il se dégage clairement l'écart entre ces 2 types de valeur.

3.4.3 Transpiration

C'est le phénomène par lequel les plantes absorbent une quantité d'eau du sol qui est restituée partiellement sous forme de vapeur par la surface des feuilles.

D'après Horton, la hauteur d'eau exhalée par

transpiration peut être estimée par la formule suivante

$$T_r = \frac{h d N E}{8600} \quad (3.18)$$

où

T_r : transpiration par hectare (mm)

d : diamètre du tronc moyen de l'arbre à 127 cm de hauteur par rapport au sol (en m)

h : hauteur de l'arbre (en m)

N : nombre d'arbres par hectare

E : hauteur moyenne d'évaporation (en mm)

Hormis l'évaporation, nous ne disposons pas de valeur pour les autres paramètres. Aussi, cette quantité n'a pas été calculée.

3.4.4 Évapotranspiration

Le terme réfère au volume d'eau exsudé par évaporation et transpiration dans une région donnée.

Il existe beaucoup de méthodes pour estimer l'évapotranspiration. Mais elles sont toutes d'application limitée.

Celle de Blaney et Criddle est ainsi formulée

$$E_p = 2,54 FK = 2,54 \sum k_f \quad (3.19)$$

où

E_p : évapotranspiration en cm K : coefficient d'évapotransp.

k_f : coefficient mensuel d'évapotranspiration.

F : somme, pour la saison, des facteurs mensuels ($f = TP/100$)

T : température moyenne mensuelle en °F

P : durée moyenne mensuelle du jour exprimée en %

de la somme, pour l'année, des 12 durées moyennes mensuelles

Par manque de données de certains paramètres, cette quantité n'a pas été évaluée

3.5 Données hydrologiques

3.5.1 Ruissellement

Le ruissellement représente le mouvement de l'eau sur une région ou surface donnée.

Il s'exprime soit en volume (m^3), soit en hauteur d'eau (mm) par rapport à une surface.

Les relevés se font au niveau des stations hydrométriques et les données sont disponibles dans des annuaires hydrologiques édités par la Direction des Etudes Hydrologiques du Ministère de l'hydraulique.

3.5.2 Infiltration

L'infiltration est définie comme étant la partie de l'eau de précipitation qui est absorbée par le sol et dirigée vers les couches inférieures.

Parmi les nombreux facteurs qui influencent la capacité d'infiltration du sol, citons :

- l'épaisseur de la couche saturée de sol,
- l'humidité du sol,
- la couverture végétale,
- la température, ... etc

Il existe deux méthodes pour la mesure de l'infiltration

- les infiltromètres
- l'analyse hydrographique

Cette dernière est la plus employée. En effet, elle permet de calculer l'infiltration par décomposition des hydrogrammes d'avesnes produisant un ruissellement défini.

Qu'au niveau de notre bassin, aucune mesure d'infiltration n'a été faite. Ceci explique le manque de données.

3.6.1 Caractéristiques des nappes

i). Du point de vue de la capacité de rétention en eaux, les roches du Haut Bassin sont le plus souvent imperméables. Dans le Sénégal Inférieur, c'est tout à fait le contraire.

ii) Les principales nappes aquifères sont:

- les nappes alluviales.

Elles sont de différentes dimensions selon la position géographique. Ainsi, dans le Haut Bassin, elles sont limitées dans l'espace et constituent de petites retenues naturelles. Par contre, dans les sédiments argileux-gréseux du Bas Sénégal, l'extension est plus grande.

- les nappes d'arènes

On les retrouve dans les niveaux altérés des granites et des schistes. Elles se situent dans le Haut Bassin.

Toutes ces nappes sont alimentées principalement par les eaux de pluie (infiltration dans les alluvions...)

3.6.2 Qualité de l'eau de la nappe phréatique.

Avec la faible pluviométrie de ces dernières années accompagnées d'une très grande évaporation, les nappes s'appauvrissent de plus en plus et favorisent l'infiltration saline qui altère la qualité des eaux. C'est ainsi que le premier forage exécuté au Sénégal en 1904 et atteignant une profondeur de 427 mètres n'a pu être exploité efficacement car on y avait trouvé de l'eau saumâtre. Cette tentative effectuée à Saint-Louis n'a pas été renouvelée, les études ultérieures ont en

effet démontré que toute la zone deltaïque ne reçoit pas d'eau souterraine potable. Ceci confirme le manque d'information sur les échanges hydrauliques entre le fleuve et la nappe alluviale et la non disponibilité de données hydrogéologiques.

Toutefois, des puits de route, durée, sont creusés et les deux principales caractéristiques, sont :

- . 6 m dans le Continental Terminal
- . 170 m dans le Paléocène
- . 300 m dans le Maestrichien

CHAPITRE IV

Conception d'un réseau optimal hydrométéorologique

4.1 Généralités

Le principal objectif d'un réseau est de connaître les différentes caractéristiques de la précipitation et de fournir des données nécessaires à la conception et à la planification de projets hydrauliques.

La nature de chaque réseau est fonction du phénomène observé, du but des observations, de facteurs tels économiques, etc.

4.2 Densité

4.2.1

La densité d'un réseau dépend principalement des facteurs suivants :

i) les objectifs de recherche :

Ainsi le géographe pourra se contenter d'un réseau peu dense pour l'établissement des modules pluviométriques.

Par contre, pour l'étude des crues consécutives à de courtes mais intenses averse, l'Ingénieur se verra dans l'obligation de multiplier les pluviomètres. Il en serait de même dans le tracé des isohyètes afférentes à une seule averse.

ii) la variabilité des précipitations.

La densité d'un réseau est plus forte en montagne qu'en plaine en raison de la plus grande hétérogénéité spatiale des précipitations et de la nuosité plus forte.

4.2.2 Calcul du réseau pluviomètre optimal.

Le problème se présente sous forme statistique.

A l'aide d'une simple moyenne arithmétique, nous évaluons la hauteur moyenne de pluie sur une région. Ainsi, le nombre optimal de pluviomètres est donné par

$$N = \left(\frac{C_v}{p} \right)^2 \quad (4.1)$$

avec

N : nombre optimal de pluviomètres

p : pourcentage d'erreur admissible

C_v : le coefficient de variation des hauteurs de pluie aux stations pluviométriques existantes (%)

Le dernier paramètre (i.e C_v) est déterminé par

$$C_v = \frac{100 s}{\bar{x}} \quad (4.2)$$

où

$$s: \text{écart type} \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum x_i^2 - n\bar{x} \right] \quad (4.3)$$

\bar{x} : moyenne

x_i : hauteur moyenne

n : nombre de stations déjà existantes

En remplaçant C_v par sa valeur, le nombre optimal de pluviomètres est donné par

$$N = \left(\frac{100 s}{\bar{x} p} \right)^2 \quad (4.4)$$

Détermination du nombre de stations

Pour cela, nous prenons les relevés (i.e moyenne annuel le) des 3 stations - Année de référence 1980.

Les relevés sont en mm

Matam : $X_i = 18,2$

St Louis : $X_i = 24,5$

Podor : $X_i = 18,3$

$$\bar{X} = 20,33 \rightarrow n\bar{X}^2 = 3 \times (20,33)^2 = 1240,33$$

$$\sum X_i^2 = 1266,38 \quad n-1 = 3-1 = 2$$

$$\leadsto s^2 = \frac{1}{2} [1266,38 - 1240,33] = 13,025$$

$$\leadsto s = 3,609$$

En conclusion

$$\text{si } p = 10\% \rightarrow N = 3,15 \simeq 4$$

$$\text{si } p = 5\% \rightarrow N = 12,6 \simeq 13$$

$$\text{si } p = 15\% \rightarrow N = 1,4 \simeq 2$$

4.3 Emplacement

La répartition des pluviomètres résultera d'un compromis entre :

- 1°) les distances relatives séparant les divers postes pluviométriques.
- 2°) la nécessité d'implanter les postes pas trop loin des lieux habités (i.e. accessibilité)
- 3°) la proximité des autres postes hydrométriques.
- 4°) les impératifs d'économie

CHAPITRE V

Analyse des fréquences

5.1 Introduction

La probabilité liée à la date à laquelle une hauteur donnée est atteinte ou non est souvent indispensable à certains projets. C'est le cas des projets hydro-agricoles notamment en riziculture lorsqu'on désire connaître la période optimale à laquelle le riz doit être repiqué, c'est-à-dire la période pendant laquelle la cote adoptée dans le projet comme cote maximale du riz (cote dépassée pendant n jours avec une probabilité a) sera atteinte et la probabilité correspondante. Des projets comme celui du Canal du Cajor sont concernés par une telle approche. Dans ce but, on considère des hauteurs fixes échelonnées et on étudie la répartition statistique des dates auxquelles ces hauteurs sont atteintes ou non. Les fréquences considérées sont des fréquences réelles. On obtient ainsi la probabilité pour qu'une hauteur donnée soit atteinte ou non avant telle ou telle date, ou au cours d'une période déterminée.

5.2 Description de la loi utilisée.

Pour résoudre ce problème, l'analyse statistique nous propose plusieurs lois, dont celles de Pearson. Les dernières représentent des structures analytiques simples et de forme assez souple pour s'ajuster facilement à de nombreux types de courbes expérimentales. Beaucoup d'hydrologues ont travaillé avec les lois de Pearson

C'est ainsi que l'américain Foster a conclu que la loi Log-Pearson type III s'ajuste le mieux.

Pour utiliser cette loi, il suffit de calculer :

1°) la moyenne

$$\overline{\text{Log } X} = \frac{\sum \text{Log } X}{n} \quad (5.1)$$

2°) la déviation standard

$$\sigma_{\text{Log } X} = \sqrt{\frac{\sum (\text{Log } X - \overline{\text{Log } X})^2}{n-1}} \quad (5.2)$$

3°) le coefficient "skew" asymétrie

$$g = \frac{n \sum (\text{Log } X - \overline{\text{Log } X})^3}{(n-1)(n-2)(\sigma_{\text{Log } X})^3} \quad (5.3)$$

4°) la valeur de x pour une probabilité donnée est calculée par la formule :

$$\text{Log } X = \overline{\text{Log } X} + K \sigma_{\text{Log } X} \quad (5.4)$$

avec

X : hauteur d'eau

n : nombre de relevés

K : coefficient dans la table C-1 Annexe C page 93

5.3 Traitement statistique

Nous appliquerons le traitement suivant dans chacun des deux cas et ceci à chacune des trois stations

5.3.1 Cas des crues

5.3.1.1 Saint Louis

Année	X (mm)	Log X	$(\text{Log}x - \overline{\text{Log}x})^2$	$(\text{Log}x - \overline{\text{Log}x})^3$
1950	172,2	2,236	0,014	0,0016
1951	186	2,27	0,023	0,0034
1952	195,6	2,291	0,03	0,0051
1953	94,9	1,977	0,02	-0,0029
1954	217,4	2,337	0,048	0,01
1955	161	2,207	0,039	0,0078
1956	73,9	1,869	0,062	-0,016
1957	297,8	2,474	0,13	0,045
1958	280,2	2,447	0,11	0,035
1959	83,9	1,924	0,038	-0,0074
1960	135,7	2,132	0,00017	0
1961	190,7	2,28	0,026	0,0042
1962	242,2	2,384	0,07	0,019
1963	229,4	2,36	0,058	0,014
1964	183,3	2,263	0,021	0,003
1965	140	2,146	0,00073	0,00002
1966	197,9	2,296	0,031	0,0055
1967	173,7	2,24	0,015	0,0018
1968	101,3	2,006	0,013	-0,0014
1969	236	2,373	0,064	0,016
1970	67,2	1,827	0,085	-0,025
1971	100,6	2,002	0,014	-0,0016
1972	80,2	1,904	0,046	-0,0099
1973	47,2	1,674	0,2	-0,088
1974	79,7	1,901	0,048	-0,01
1975	182,8	2,262	0,02	0,0029
1976	123,2	2,091	0,00078	-0,000022

1977	67,9	1,832	0,082	-0,000022
1978	222,7	2,348	0,052	0,012
1979	80,2	1,904	0,046	-0,0099
1980	137,3	2,138	0,00036	0
1981	168,7	2,227	0,012	0,0012
1982	92,7	1,967	0,023	-0,0035
1983	60	1,778	0,12	-0,04
1984	65	1,813	0,094	-0,029
Σ		74,18	1,656	-0,081

Calcul des paramètres

$$\cdot \overline{\text{Log } X} = 2,119$$

$$\cdot \sigma_{\text{Log } X} = \sqrt{\frac{1,656}{34}} = 0,221$$

$$\cdot G = \frac{35 \times (-0,081)}{34 \times 33 \times (0,221)^3} = -0,2$$

$$\cdot \text{Log } X = 2,119 + 0,221K$$

Exemple d'application : Période de retour de 2 ans \rightarrow

$$K = 0,033 \rightarrow \text{Log } X = 2,126293 \rightarrow X = 133,7 \text{ mm}$$

Nous représentons sous forme de tableau

	2	2,3	5	10	25
K	0,033	0,387	0,85	1,258	1,68
X (mm)	133,7	160,2	202,7	249,5	309,2

Probabilité ou dépassement

100 99.9 99.8 1 99 98 95 0,1 90 80 70 0,025 60 50 40 30 20 0,01 10 5 2 0,01 1 0,5 0,2 0,1 0,05 0,01

Hauturs annuelles maximales, mm

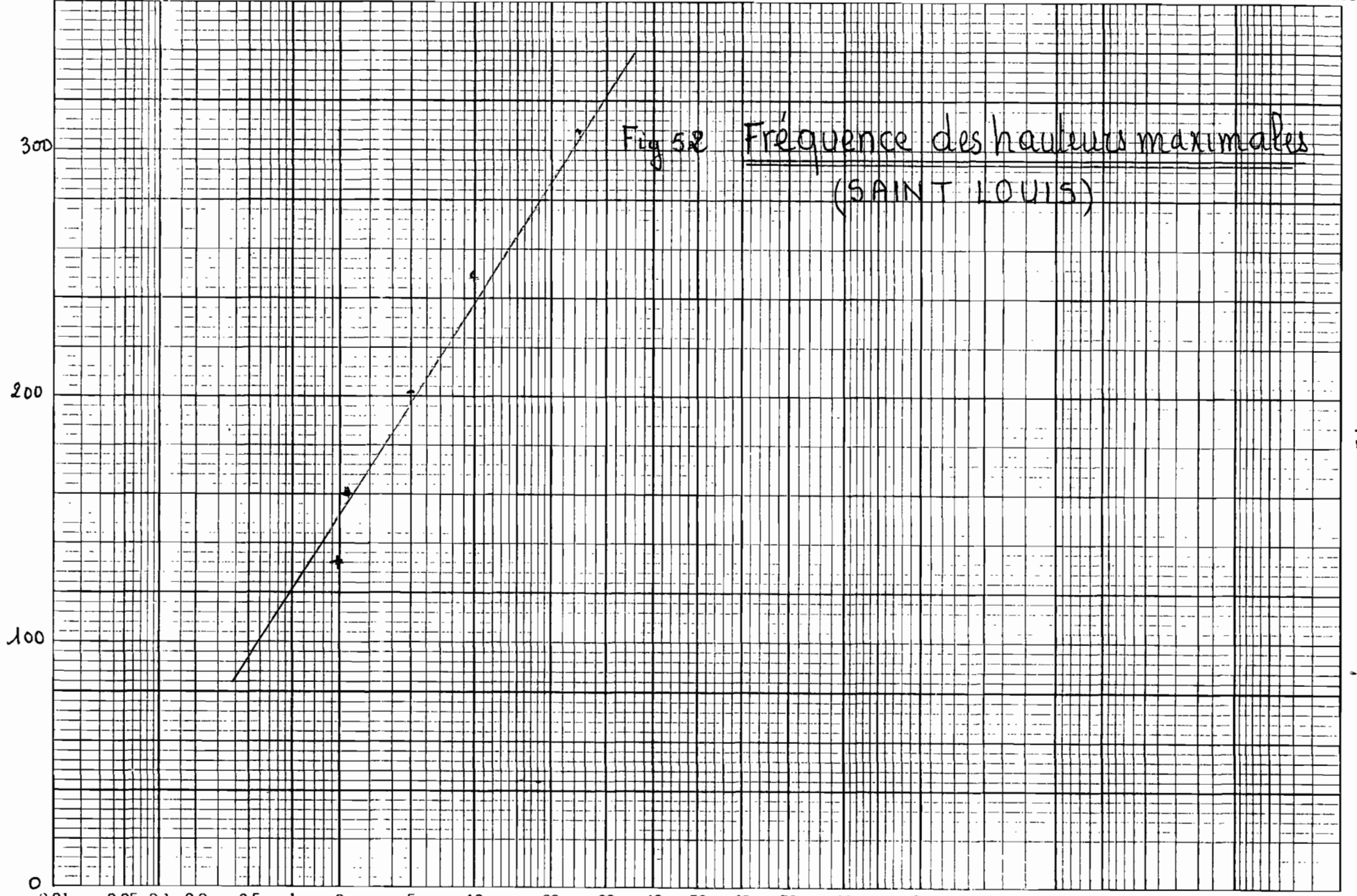


Fig 52 Fréquence des hauteurs maximales
(SAINT LOUIS)

0 0.01 0.05 0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99.8 99.9 99.99

Intervalle de récurrence T_r , années

Annæ	X(mm)	Log x	$(\text{Log}x - \text{Log}\bar{x})^2$	$(\text{Log}x - \text{Log}\bar{x})^3$
1950	118,1	2,072	0,0009	-0,00027
1951	197,7	2,296	0,038	0,0073
1952	119,6	2,078	0,00058	-0,00014
1953	119,1	2,076	0,00068	-0,00018
1954	85,1	1,93	0,03	-0,0051
1955	314,8	2,498	0,16	0,062
1956	171,8	2,235	0,018	0,0024
1957	114,1	2,057	0,002	-0,00091
1958	291,2	2,464	0,13	0,048
1959	95,5	1,98	0,015	-0,0018
1960	140,2	2,147	0,002	0,000091
1961	182,3	2,261	0,025	0,004
1962	49,4	1,694	0,17	-0,068
1963	136,8	2,136	0,0012	0,000039
1964	139,9	2,146	0,0019	0,000085
1965	184,5	2,266	0,027	0,0044
1966	102,8	2,012	0,0081	-0,00073
1967	139,7	2,145	0,0018	0,00008
1968	70,8	1,85	0,064	-0,016
1969	215,4	2,333	0,0534	0,0123
1970	157,1	2,196	0,0088	0,00083
1971	51,5	1,961	0,0199	-0,0028
1972	58,4	1,766	0,113	-0,03793
1973	87,3	1,941	0,0259	-0,0042
1974	44,4	1,842	0,0529	-0,0122
1975	98,3	1,992	0,0121	-0,00133
1976	114,5	2,059	0,00185	-0,00008

1977	97,7	1,99	0,0125	-0,0014
1978	163,9	2,214	0,0125	0,0014
1979	143	2,155	0,0028	0,00015
1980	169,1	2,228	0,0158	0,002
1981	169	2,228	0,0158	0,002
1982	67,7	1,83	0,074	-0,02
1983	239	2,378	0,0762	0,021
Σ		71,486	1,199	-0,003645

Calcul des paramètres

• $\overline{\text{Log} X} = 71,486/34 = 2,102$

• $\sigma_{\text{Log} X} = \left(\frac{1,199}{33} \right)^{1/2} = 0,191$

• $G = \frac{34 \times (-0,003645)}{33 \times 32 \times (0,191)^3} = -0,017 \approx 0$

• $\text{Log} X = 2,102 + 0,191K$

	2	2,3	5	10	25
K	0	0,0842	0,842	1,282	1,751
X(mm)	126,5	131,2	183,2	222,3	273,2

5.3.1.3 Matam

Année	X	LogX	$(\text{Log}x - \overline{\text{Log}x})^2$	$(\text{Log}x - \overline{\text{Log}x})^3$
1950	272,8	2,436	0,0445	0,0094
1951	306,4	2,486	0,0681	0,0178
1952	285,3	2,455	0,0529	0,0122
1953	181,2	2,258	0,0011	0,00003
1954	155,3	2,191	0,0012	-0,00004
1955	190	2,279	0,0029	0,0002
1956	210,5	2,323	0,0096	0,0009
1957	184,1	2,265	0,0016	0,0001
1958	336	2,526	0,0906	0,0273
1959	250,1	2,398	0,0299	0,0052
1960	176,1	2,246	0,0004	0,00001
1961	157,3	2,197	0,0008	-0,00002
1962	166,2	2,221	0,00002	$-6,4 \cdot 10^{-8}$
1963	142,3	2,153	0,0052	-0,0004
1964	185	2,267	0,0018	0,0001
1965	295,2	2,47	0,06	0,0147
1966	197,5	2,296	0,005	0,0004
1967	168	2,225	0	0
1968	123,5	2,092	0,0177	-0,0024
1969	214	2,33	0,011	0,0012
1970	114,5	2,059	0,0276	-0,0046
1971	201,5	2,304	0,0062	0,0005
1972	56	1,748	0,2275	-0,1085
1973	133	2,124	0,0102	-0,001
1974	185,5	2,268	0,0018	0,0001
1975	199,5	2,3	0,0056	0,0004
1976	157	2,196	0,0008	-0,00002

1977	105	2,021	0,0416	-0,0085
1978	89,2	1,95	0,0756	-0,0208
1979	112,4	2,051	0,0303	-0,0053
1980	95,6	1,98	0,06	-0,0147
1981	175,8	2,245	0,0004	0,00001
1982	133,2	2,124	0,0102	-0,001
1983	143,2	2,156	0,0048	-0,0003
	Σ	75,64	0,30692	-0,07703

Calcul des paramètres

$$\cdot \overline{\text{Log} X} = 2,225$$

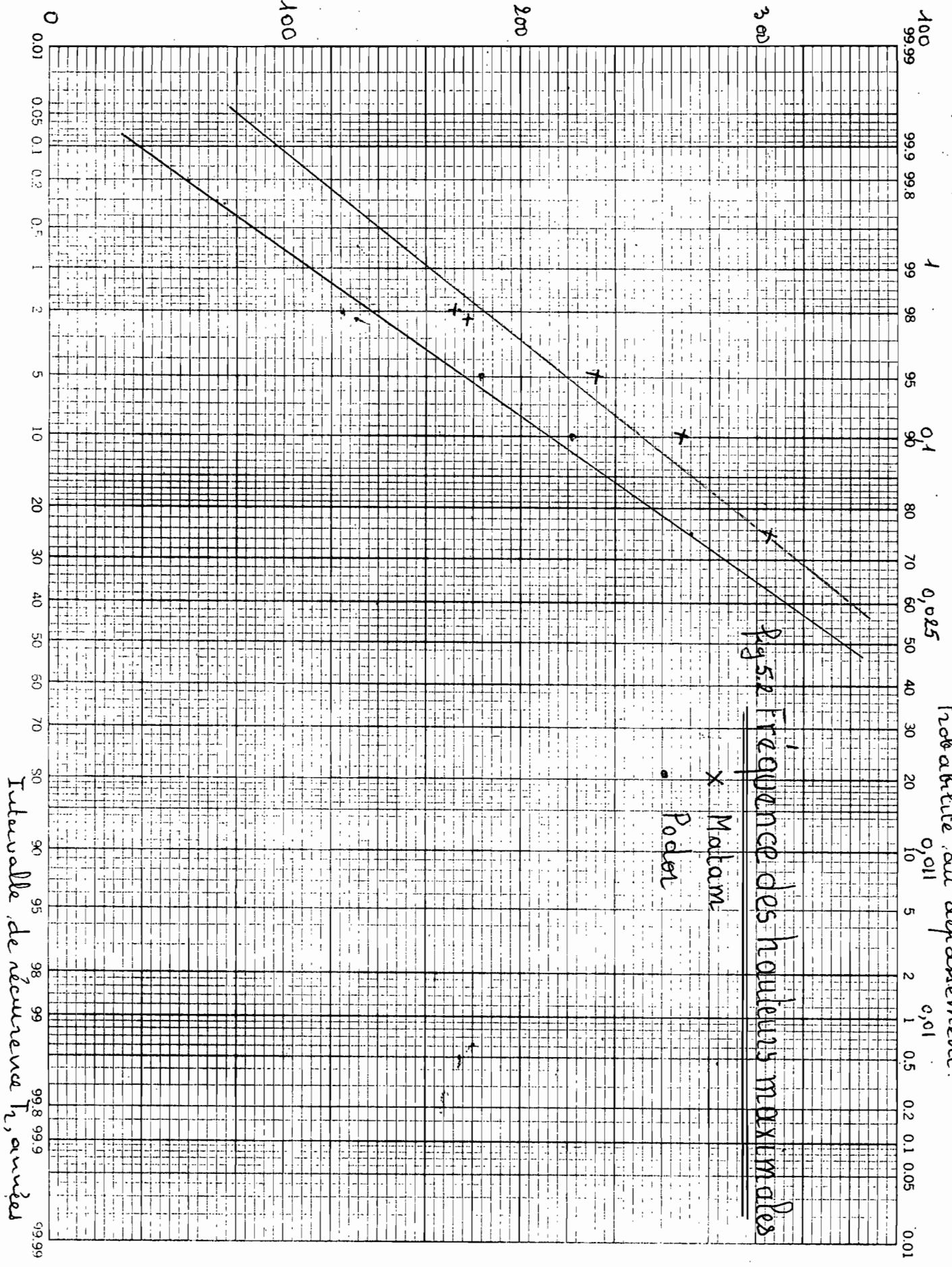
$$\cdot \sigma_{\text{Log} X} = \sqrt{\frac{0,30692}{33}} = 0,166$$

$$\cdot G = \frac{-0,077 \times 34}{33 \times 32 \times (0,166)^3} = -0,54 \approx -0,5$$

$$\cdot \text{Log} X = 2,225 + 0,166K$$

T_n	2	2,33	5	10	25
K	0,082	0,159	0,856	1,216	1,567
X(mm)	173,2	178,4	232,9	267,2	305,6

Hauteurs annuelles maximales, mm



K. M. PROBABILITY X 90 DIVISIONS
KEUFFEL & ESSER CO. MADE IN U.S.A.

46 8000

Probabilité au dépassement.

Fig. 5.2. Fréquence des hauteurs maximales

x Maltam

• Podet

Intervalle de récurrence T_2 , années

5.3.2 Pas des étiages

5.3.2.1 Saint Louis

Année	X(mm)	Log X	$(\text{Log} X - \overline{\text{Log} X})^2$	$(\text{Log} X - \overline{\text{Log} X})^2$
1950	0,3	-0,523	0,711	-0,599
1951	0,6	-0,222	0,294	-0,159
1952	0,6	-0,222	0,294	-0,159
1953	2,8	0,447	0,0161	0,002
1954	5,4	0,732	0,17	0,0699
1955	2,2	0,342	0,00048	0,00001
1956	6,6	0,820	0,25	0,125
1957	0,2	-0,699	1,0384	-1,058
1958	0,4	-0,398	0,516	-0,37
1959	6,3	0,799	0,2294	0,1099
1960	43,2	1,635	1,7292	2,2739
1961	3,4	0,531	0,0445	0,0094
1962	5,6	0,745	0,1806	0,0768
1963	0,5	-0,301	0,3856	-0,2395
1964	61,3	1,787	2,1521	3,1571
1965	7	0,845	0,2756	0,1447
1966	9,3	0,968	0,4199	0,2721
1967	10,8	1,033	0,5084	0,3625
1968	0,2	-0,699	1,0384	-1,058
1969	68,8	1,838	2,3043	3,498
1970	12,9	1,11	0,6241	0,4930
1971	6,3	0,799	0,2294	0,1099
1972	6,6	0,820	0,25	0,125
1973	0,3	-0,523	0,711	-0,599
1974	0,5	-0,301	0,3856	-0,2395

1975	38,9	1,59	1,6129	2,0483
1976	0,2	-0,699	1,0384	-1,058
1977	0,3	-0,523	0,711	-0,599
1978	0,2	-0,699	1,0384	-1,058
1979	2,8	0,447	0,0161	0,002
1980	0,6	-0,222	0,294	-0,159
1981	0,7	-0,155	0,226	-0,107
1982	3,8	0,58	0,0676	0,0176
1983	1,6	0,204	0,0134	-0,0016
1984	0,2	-0,699	1,0384	-1,058
	Σ	11,187	20,81428	4,3755

Calcul des paramètres

$$\cdot \overline{\text{Log} X} = 0,391 \simeq 0,32$$

$$\cdot \sigma_{\text{Log} X} = \sqrt{\frac{20,81428}{34}} = 0,782$$

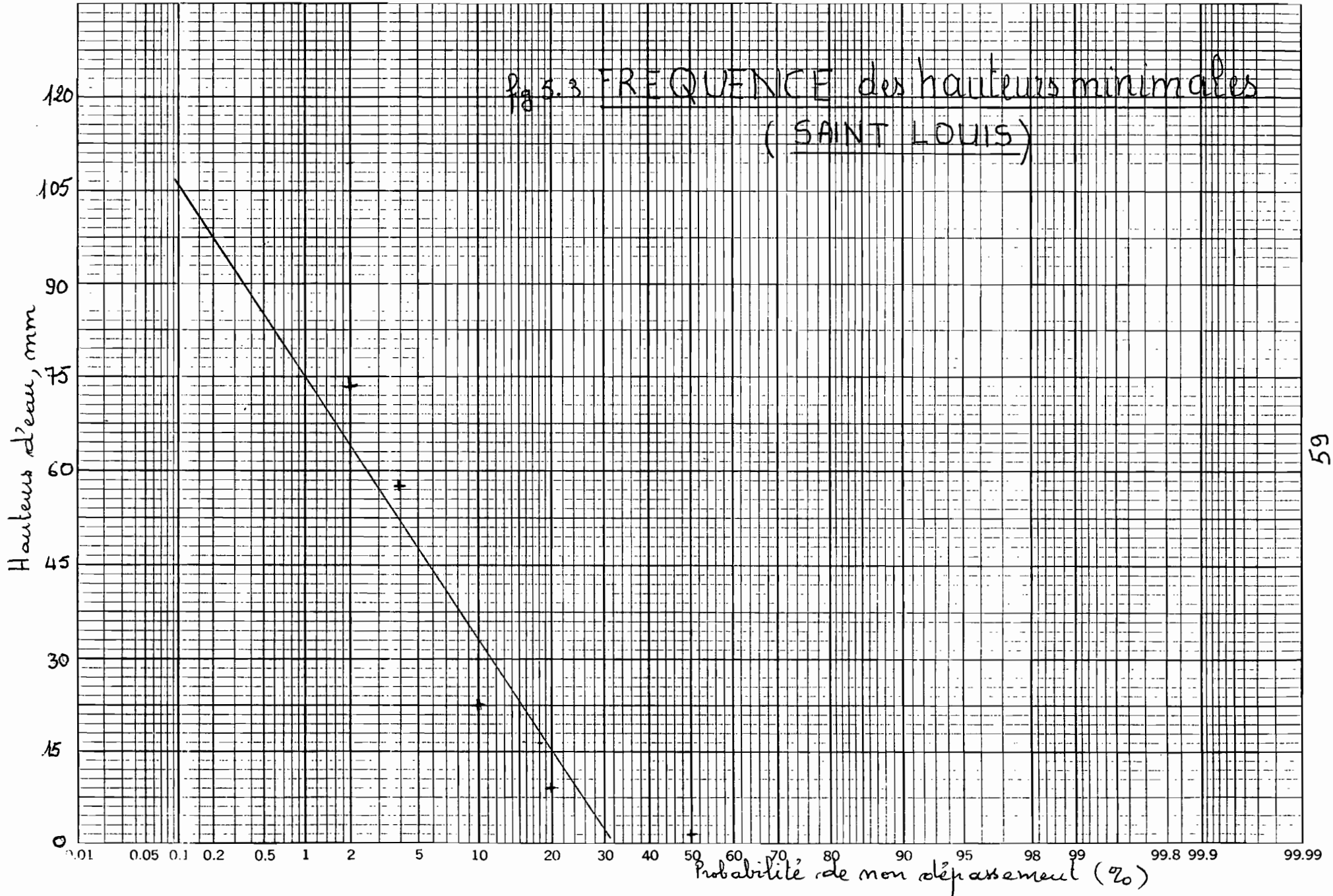
$$\cdot G = \frac{4,3755 \times 35}{34 \times 33 \times (0,782)^3} = 0,285 \simeq 0,3$$

$$\cdot \text{Log} X = 0,32 + 0,782 K$$

P(%)	2	4	10	20	50
K	2,21	1,849	1,309	0,823	-0,0435
X (mm)	111,7	58,3	22,1	9,2	1,9

Intervalle de réérence T_r , années.

1,0001 1,001 1,01 1,02 1,05 1,11 1,25 1,43 1,67 2 2,5 3,33 5 10 20 50 100 500 10000
99.99 99.9 99.8 99 98 95 90 80 70 60 50 40 30 20 10 5 2 1 0.5 0.2 0.1 0.05 0.01



5.3.2.2 Podon

Année	X(mm)	Log X	$(\text{Log} X - \overline{\text{Log} X})^2$	$(\text{Log} X - \overline{\text{Log} X})^3$
1950	0,3	-0,5229	0,0264	-0,0654
1951	0,3	-0,5229	0,0264	-0,0654
1952	0,7	-0,1549	0,0012	-0,00004
1953	0,1	-1	0,7744	-0,6815
1954	0,8	-0,0969	0,00053	0,000012
1955	0,3	-0,5229	0,0264	-0,0654
1956	1,1	0,0414	0,026	0,0042
1957	0,6	-0,2219	0,0104	-0,00106
1958	0,1	-1	0,7744	-0,6815
1959	0,3	-0,5229	0,0264	-0,0654
1960	8,3	0,9191	1,0797	1,1219
1961	12,7	1,1038	1,4977	1,8329
1962	5,1	0,7075	0,6848	0,5666
1963	4,5	0,6532	0,5978	0,4622
1964	0,8	-0,0969	0,00053	0,000012
1965	0,2	-0,699	0,3352	-0,1941
1966	0,4	-0,3979	0,0772	-0,0215
1967	24,9	1,3962	2,2989	3,4856
1968	0,3	-0,5229	0,4133	-0,2657
1969	30,7	1,4871	2,5828	4,1508
1970	1,4	0,1461	0,0708	0,0188
1971	1,2	0,0792	0,0397	0,0079
1972	3,9	0,5911	0,5057	0,3596
1973	0,9	-0,0458	0,0055	0,00041
1974	1,4	0,1461	0,0708	0,0188
1975	0,1	-1	0,7744	-0,6815
1976	1,3	0,1139	0,0547	0,0128

1977	0,9	-0,0458	0,0055	0,00041
1978	1	0	0,0144	0,0017
1979	0,4	-0,3979	0,0772	-0,0215
1980	0,1	-1	0,7744	-0,6815
1981	0,1	-1	0,7744	-0,6815
1982	0,2	-0,699	0,3352	-0,1941
1983	0,1	-1	0,7744	-0,6815
	Σ	-4,0858	15,53756	6,996

Calcul des paramètres

$$\cdot \overline{\text{Log}x} = -0,12$$

$$\cdot \sigma_{\text{Log}x} = \sqrt{\frac{15,53756}{33}} = 0,686$$

$$\cdot G = \frac{34 \times 6,996}{33 \times 32 \times (0,686)^3} = 0,6977 \approx 0,7$$

$$\cdot \text{Log}x = -0,12 + 0,686K$$

P(%)	2	4	10	20
K	2,406	1,966	1,332	0,79
X(mm)	33,9	16,9	6,2	2,6

5.3.2.3 Malam

	X (mm)	$\text{Log } X$	$(\text{Log } X - \overline{\text{Log } X})^2$	$(\text{Log } X - \overline{\text{Log } X})^3$
1950	2,1	0,3222	0,00095	-0,000029
1951	0,2	-0,699	1,1067	-1,164
1952	0,5	-0,301	0,4277	-0,2797
1953	8,5	0,9294	0,3322	0,1915
1954	20,1	1,3032	0,9028	0,8579
1955	4,3	0,6335	0,0787	0,0221
1956	0,6	-0,2218	0,3304	-0,19
1957	1	0	0,1246	-0,044
1958	1,5	0,1761	0,0313	-0,0055
1959	44,1	1,6444	1,667	2,1537
1960	0,6	-0,2218	0,3304	-0,1899
1961	9,7	0,9868	0,4017	0,2546
1962	2,6	0,415	0,0038	0,00024
1963	1	0	0,1246	-0,044
1964	1	0	0,1246	-0,044
1965	5	0,699	0,12	0,0414
1966	2	0,301	0,0027	-0,00014
1967	17,5	1,243	0,7921	0,705
1968	2	0,301	0,0027	-0,00014
1969	4	0,6021	0,062	0,0154
1970	0,5	-0,301	0,4277	-0,2797
1971	2	0,301	0,0027	-0,00014
1972	3,5	0,544	0,0365	0,007
1973	5	0,699	0,12	0,0414
1974	2	0,301	0,0027	-0,00014
1975	1	0	0,1246	-0,044
1976	1	0	0,1246	0,044

1977	7	0,8451	0,2422	0,1192
1978	24,4	1,3874	1,07	1,1068
1979	0,8	-0,097	0,2025	-0,0911
1980	2,7	0,4314	0,0061	0,00048
1981	0,9	-0,0458	0,159	-0,0634
1982	1	0	0,1246	-0,044
1983	0,7	-0,1549	0,258	-0,131
	Σ	12,0188	9,86885	2,8578

Calcul des paramètres

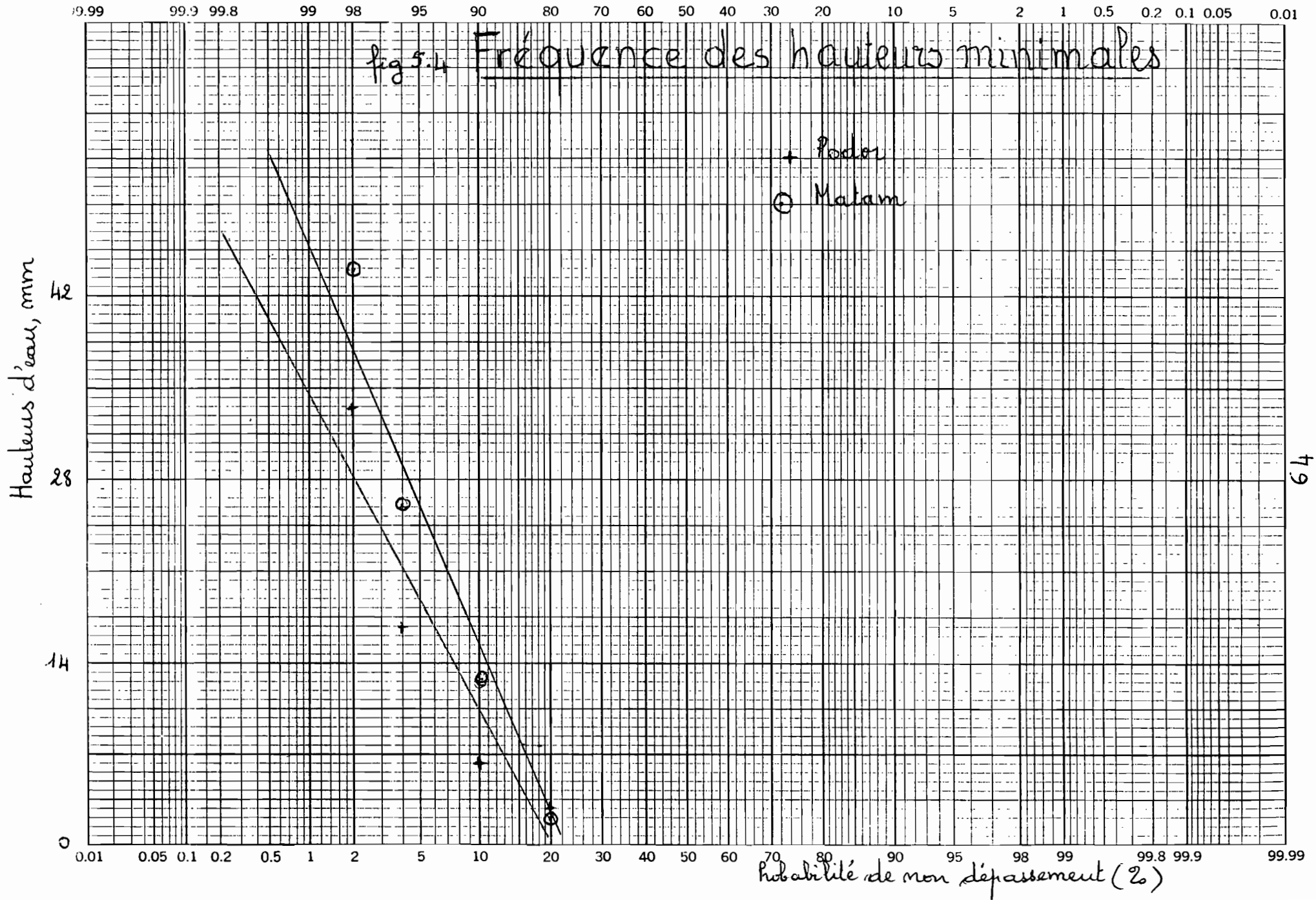
$$\cdot \overline{\text{Log}x} = 0,353$$

$$\cdot \sigma_{\text{Log}x} = \sqrt{\frac{9,86885}{33}} = 0,547$$

$$\cdot G = \frac{34 \times 2,8578}{33 \times 32 \times (0,547)^3} = 0,562 \approx 0,6$$

$$\cdot \text{Log}x = 0,353 + 0,547K$$

P(%)	2	4	10	20	50
K	2,359	1,939	1,328	0,800	-0,099
X(mm)	44	25,9	12	6,2	2



CHAPITRE VI

Analyse d'inondations

Son objectif est de calculer la fréquence et la grandeur des débits d'inondations.

6.1 Choix des stations et de la période d'étude

Pour ce genre d'étude, il faut :

1) le choix d'un certain nombre de stations sur une période d'enregistrements minimale de 10 ans.

Pour notre cas, nous avons choisi 10 stations sur une période de 14 ans

2) le relevé des débits maximaux annuels.
cf tableau

6.2 Données manquantes.

Après le relevé des données originales, la première étape consistera à estimer les données manquantes. On peut y parvenir par une régression linéaire. Et pour cela, il nous ^{faudra} construire la matrice de corrélation et de régression en utilisant toutes les combinaisons possibles des enregistrements pris deux à deux. Ainsi pour chaque combinaison de stations ayant des données complètes, on calculera successivement :

- le coefficient de corrélation
- la droite de régression.

Après ce calcul, la méthode d'estimation a été appliquée.

Calcul du coefficient de corrélation

Analytiquement, le coefficient de corrélation entre deux stations A et B ayant pour débit max X et Y respectivement est donné par la relation suivante:

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (6.1)$$

où

\bar{X} (\bar{Y}): moyenne des débits de A (B)

Dans notre étude, nous avons plutôt utilisé les programmes du logiciel Lotus 1.2.3

Nous présentons ci-contre les résultats.

	Kidira	Bakel	Matam	Dagana	Kayes
Kidira	1	0,84	0,73	0,71	0,7
Bakel	0,84	1	0,93	0,87	0,93
Matam	0,73	0,93	1	0,89	0,93
Dagana	0,71	0,87	0,89	1	0,82
Kayes	0,7	0,93	0,93	0,82	1

Tableau 6.1 Coefficients de corrélation

Calcul de la droite de régression

Analytiquement l'équation de la droite est donnée par:

$$y = ax + b \quad (6.2)$$

Comme précédemment, le Lotus 1.2.3 a été utilisé et nous présentons les résultats sous forme de deux tableaux:

- pentes des droites de corrélation
- ordonnées à l'origine des droites de régression

	Kidua	Bakel	Matam	Dagana	Kayes
Kidua	1	0,42	0,42	1,34	0,41
Bakel	1,68	1	1,07	3,02	1,25
Matam	1,32	0,84	1	2,85	1,13
Dagana	0,43	0,24	0,29	1	0,32
Kayes	0,85	0,64	0,75	2,02	1

Tableau 6.2 Pente des droites de régression

	Kidua	Bakel	Matam	Dagana	Kayes
Kidua	0	-159,69	184	-1515,25	348
Bakel	1840,74	0	526,18	-2738,74	61,14
Matam	1745,5	30,81	0	-3138,80	-302,89
Dagana	1779,43	1383,5	1357,83	0	1341,42
Kayes	2478,36	809,5	877,26	-1175,04	0

Tableau 6.3 Ordonnées à l'origine des droites

Procédure d'estimation des données manquantes.

- i) la proximité géographique
- ii) Parmi les combinaisons affectant une série, le choix se porte sur l'une d'elles qui donne le plus grand coefficient de corrélation
- iii) l'équation de régression issue de cette combinaison est utilisée pour compléter la série manquante

En guise d'application numérique, complétons Goubessi.

$$y = -159,69 + 0,42x$$

Pour 1952, $x = 5340 \rightarrow y = 2083,11 \text{ m}^3/\text{s}$

La même procédure a conduit au tableau suivant complété.

	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965
Goubachi	(2083)	(1966)	(1536)	1680	1480	1495	1345	1465	1420	810	1875	1250	1090	1675
Kidina	2680	1995	1250	2695	1885	2660	2170	1980	1880	1135	3100	1950	1200	2850
Bakel	5340	5060	4180	6610	4630	6050	5660	6910	5460	3550	7030	4120	3550	7180
Matam	4000	4050	3040	5770	4560	5180	4650	6410	4610	2930	5710	3740	3070	5620
Salde	(2518)	1795	2237	3329	3243	3088	3027	3337	3070	2281	3278	2783	2112	3260
Dagana	2535	2445	2155	2885	2880	3160	2845	3100	2615	2160	2910	2560	2235	3195
Toukoto	(715)	288	(666)	1030	(546)	579	530	965	500	(181)	(609)	(366)	660	970
Oualia	(1980)	(1959)	(1869)	1656	1302	1763	1251	1656	1368	1899	(2291)	1352	1044	2930
Kayes	3980	3930	3710	5070	3895	4890	4185	6265	4425	3480	4740	3325	2660	5060
Dakka Saïdine	(2084)	1490	1220	1851	2020	2920	1985	3450	1600	1039	(2793)	1510	1460	1685

(...) Données complétées

Tableau 6.4 Débits maxima annuels complétés (m³/s)

6.3 Courbes individuelles de fréquence

Les débits de chacune des stations sont ordonnées par ordre décroissant. La période de retour de chaque débit est calculée par la formule:

$$T_n = (m+1)/m \quad (6.3)$$

où T_n : période de retour

m : nombre d'années enregistrées

m : rang du débit.

La probabilité de dépassement est calculée par la relation $F = 1/T_n$ et celle de non dépassement par $p = 1 - F$

A titre d'exemple, nous présentons les résultats de la station de Goubassi.

X (m ³ /s)	m	$T_n = (m+1)/m$	$F = 1/T_n$	$P = 1 - F$
2083	1	15	0,07	0,93
1966	2	7,5	0,13	0,87
1875	3	5	0,2	0,8
1680	4	3,75	0,27	0,73
1675	5	3	0,33	0,67
1596	6	2,5	0,4	0,6
1495	7	2,14	0,47	0,53
1465	8	1,88	0,53	0,47
1480	9	1,67	0,6	0,4
1420	10	1,5	0,67	0,33
1345	11	1,36	0,74	0,26
1250	12	1,25	0,8	0,2
1090	13	1,15	0,87	0,13
810	14	1,07	0,93	0,07

Tous ces résultats sont représentés par des graphiques

Tableau 6.5 Fonction de distribution expérimentale

6.4 Test d'homogénéité

Le test nous permet de vérifier si les pentes des courbes individuelles de fréquences ne s'écartent pas trop de la pente de la courbe composée par les N stations. Pour obtenir cette pente, on calcule le facteur d'uniformité par la relation :

$$K = \frac{\sum Q_{10}/Q_{2,33}}{N} \quad (6.4)$$

dans laquelle

K : coefficient d'uniformité

$Q_{x(y)}$: le débit max pour une période de retour de $x(y)$ ans.

N : le nombre de stations

Ces différents débits sont relevés sur les courbes individuelles de fréquence. Ainsi pour chaque station, le débit uniformisé est obtenu par

$$Q_k = K Q_{2,33} \quad (6.5)$$

où

Q_k : débit uniformisé (m^3/s)

K : facteur d'uniformité

$Q_{2,33}$: débit pour une période de retour de 2,33 années

Pour chaque débit uniformisé, on cherche son T_{rk} correspondante et ceci à l'aide des courbes individuelles de fréquence. Ensuite, on détermine le nombre d'années d'enregistrement requis.

Tous ces résultats sont montrés au tableau suivant.

Pour les différents graphiques, cf Annexe D

	Q_{10}	$Q_{2,33}$	$Q_{10}/Q_{2,33}$	Q_k	T_{rk}	m
Goubassi	2000	1556	1,285	2062	15	11
Kidia	3010	2039	1,476	2702	5	14
Bakel	7050	5600	1,259	7420	17	14
Mbatam	6250	4662	1,341	6177	17,5	14
Saldé	3417	2867	1,192	3799	50	13
Dagana	3167	2733	1,159	3621	160	14
Coukoto	1000	660	1,515	874	3	8
Dualia	2467	1867	1,321	2474	10	10
Kayes	5600	4499	1,245	5961	12,5	14
Dakka Saïdou	3200	2200	1,454	2915	5,5	12

Tableau 6.6. Test d'homogénéité

D'après la relation (6.4),

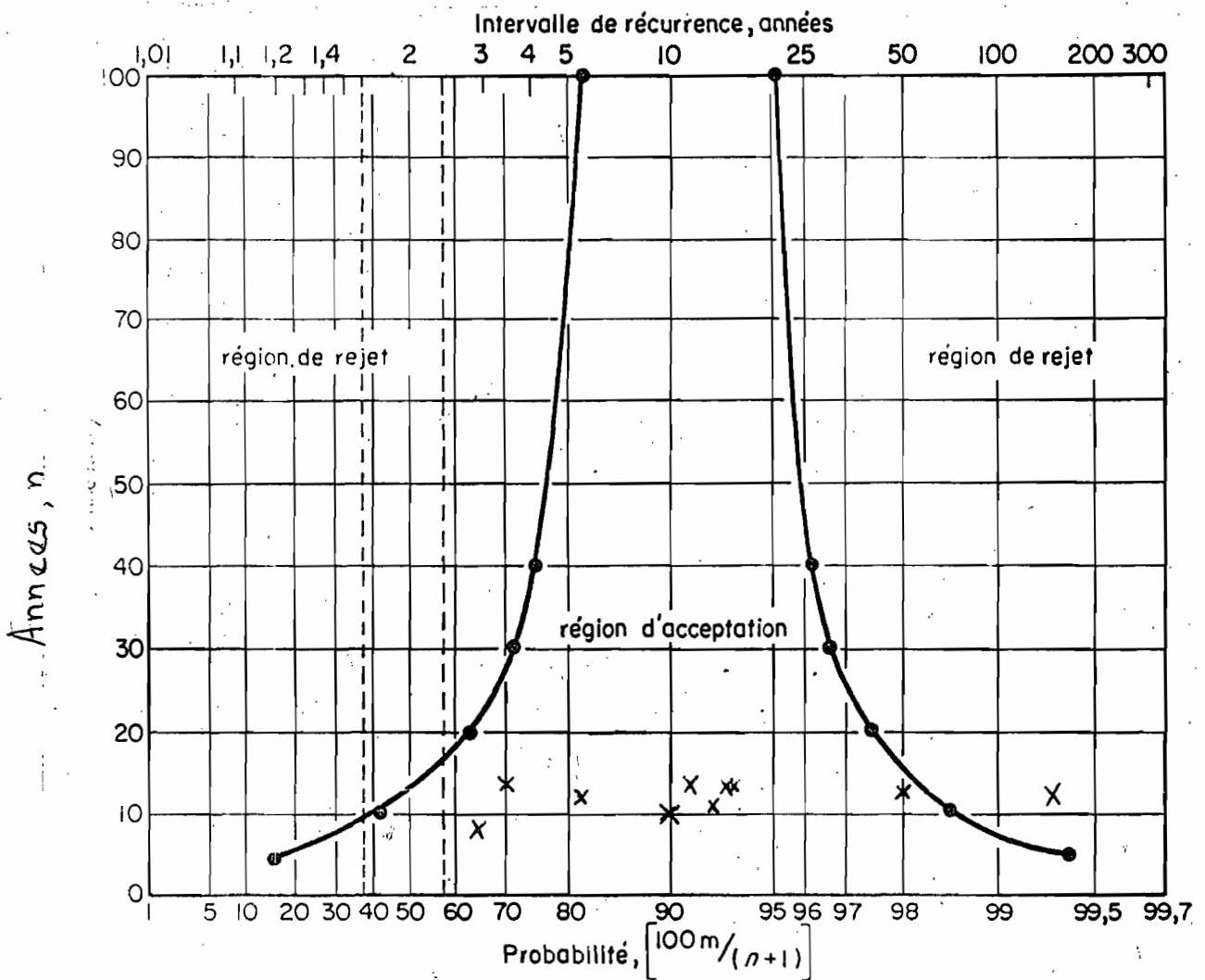
$$K = 1,325$$

De plus, m = nombre d'années d'enregistrement pour chaque station.

Pour vérifier l'homogénéité des différentes stations, nous employerons la distribution de Gumbel. Ainsi, sur du papier semi-log où la bande de confiance à 95% a été déjà tracé nous porterons les coordonnées de chaque station qui sont m et T_{rk} .

cf graphique de la page suivante.

Fig. 6.1 - Test d'homogénéité, bandes de confiance, ($\alpha = 0,05$)



Constatations

À partir du graphique 6.1, nous pouvons faire les constatations suivantes :

- i) les points représentant les différentes stations sont très éparpillés.
- ii) Dagana se trouve dans la zone de rejet.

Interprétations

Ainsi, nous venons de voir que Dagana n'est pas homogène i.e qu'elle n'est pas de la même population. Ses fluctuations pourraient s'expliquer par :

- la position géographique et le relief de ce milieu.
- le caractère sahélier de la pluviométrie

Dans la suite du traitement, la station non homogène ne sera pas prise en compte

6.5 Débit d'inondation

Pour déterminer ce débit d'inondation, il nous faut au préalable :

- déterminer le quotient d'inondation
- déterminer la droite de régression des débits en fonction des aires des bassins.

6.5.1 Quotient d'inondation

Il est défini comme étant le rapport entre chacun des débits annuels et le débit moyen annuel ($Q_{2,33}$).

On ordonne chaque série de quotient de chaque station en ordre décroissant. Ainsi donc, à chaque quotient donné correspond un rang bien déterminé dans cet ordonnancement et par voie de conséquence un intervalle de récurrence. Pour chaque intervalle de récurrence i.e pour chaque rang, nous faisons la moyenne des 9 stations. Cette moyenne le quotient d'inondation moyenne Q_{im}

Cf Tableau

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Gowbassi	1,34	1,26	1,2	1,08	1,08	1,02	0,96	0,95	0,94	0,91	0,86	0,8	0,7	0,52
fidira	1,52	1,4	1,32	1,31	1,3	1,06	0,98	0,97	0,96	0,92	0,92	0,64	0,59	0,56
Sabal	1,28	1,26	1,23	1,18	1,08	1,01	0,98	0,95	0,9	0,83	0,75	0,74	0,63	0,63
Matam	1,37	1,24	1,22	1,2	1,11	1,0	0,99	0,98	0,87	0,86	0,8	0,66	0,65	0,63
Salde	1,16	1,16	1,14	1,14	1,13	1,08	1,07	1,06	0,97	0,88	0,8	0,78	0,74	0,63
Toukoto	1,56	1,47	1,46	1,08	1,0	1,0	0,92	0,88	0,83	0,8	0,76	0,55	0,44	0,27
Qualla	1,57	1,23	1,06	1,05	1,02	1,0	0,94	0,87	0,87	0,73	0,72	0,7	0,67	0,56
Kages	1,39	1,13	1,12	1,09	1,05	0,98	0,93	0,88	0,87	0,86	0,82	0,77	0,74	0,59
Dokra Saldan	1,57	1,33	1,27	0,95	0,92	0,9	0,84	0,76	0,73	0,69	0,68	0,66	0,55	0,47
Z	12,76	11,48	11,02	10,08	9,69	9,05	8,61	8,3	7,94	7,48	7,11	6,27	5,71	4,86
Σm	1,42	1,28	1,22	1,12	1,08	1,0	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,7	0,63	0,54

Tableau 6.7 Quotients d'annulation

6.5.2 Relation débit moyen annuel - Superficie du bassin

Bassin Versant	Superficie (km ²)	Q _{2,33} (m ³ /s)
Goubassi	17100	1556
Kidia	28900	2039
Bakel	218000	5600
Matam	230000	4662
Saldé	259500	2867
Boukoto	16500	660
Oualia	85600	1867
Koyes	157400	4499
Dakka Saïdou	15700	2200

Tableau 6.8 Débits moyens annuels et aires des bassins
Analytiquement et à l'aide d'une régression linéaire, nous trouvons :

$$Q_{2,33} = 0,01A + 1426,35$$

avec un coefficient de corrélation $r = 0,79$

A: aire du bassin (km²)

Q_{2,33}: débit moyen annuel (m³/s)

Son erreur relative moyenne est de 25%

Graphiquement, nous constatons que les différents points sont très éparpillés, chose confirmée par l'erreur relative.

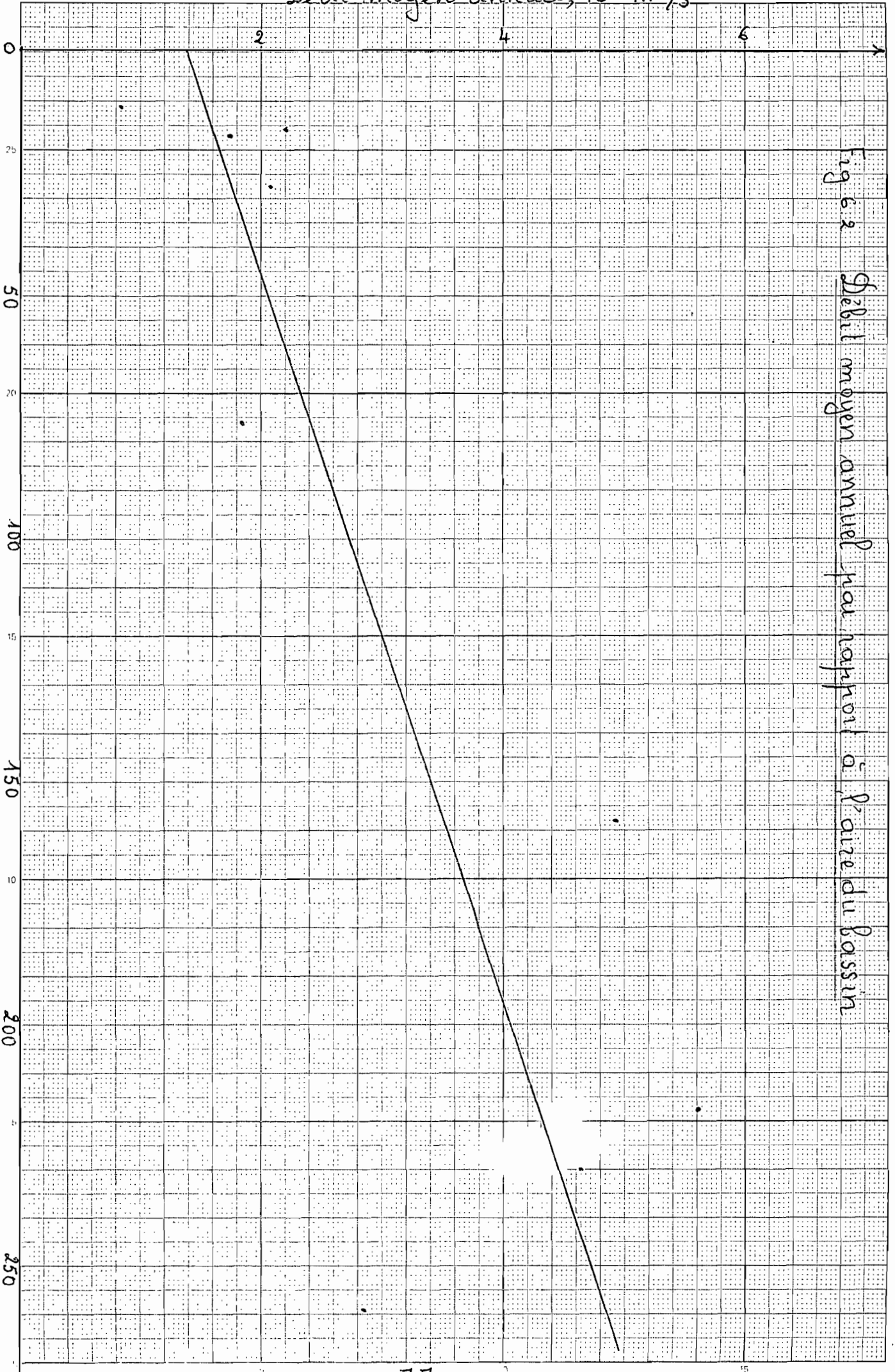
Malgré tout, compte tenu de l'objectif visé i.e. déterminer un débit moyen annuel approximatif, aussi l'hypothèse d'une droite est acceptable.

N.B Les résultats sont à prendre avec précaution

Débit moyen annuel, $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$

Fig 62 Débit moyen annuel par rapport à l'aire du bassin

Aire du bassin, 10^3 km^2



m	Q_{im}	T_r
1	1,42	15
2	1,28	7,5
3	1,22	5
4	1,12	3,75
5	1,08	3
6	1,0	2,5
7	0,96	2,14
8	0,92	1,88
9	0,88	1,67
10	0,83	1,5
11	0,79	1,36
12	0,7	1,25
13	0,63	1,15
14	0,54	1,07

Tableau 6.9 Quotients d'inondations moyenne par rapport à la période de retour

En graphique, nous avons représenté Q_{im} par rapport à T_r et la droite obtenue est la courbe de fréquence composée Cf graphique 6.3

Nous utiliserons cette courbe si nous voulons obtenir le débit correspondant à une certaine période de retour. Pour y parvenir, on détermine au préalable le $Q_{2,33}$ à l'aide du graphique 6.2 ; Ensuite, on se reporte sur la courbe de fréquence composée pour déterminer le quotient d'inondation de la période de retour concernée. Le résultat sera le produit de $Q_{2,33}$ par Q_{im}

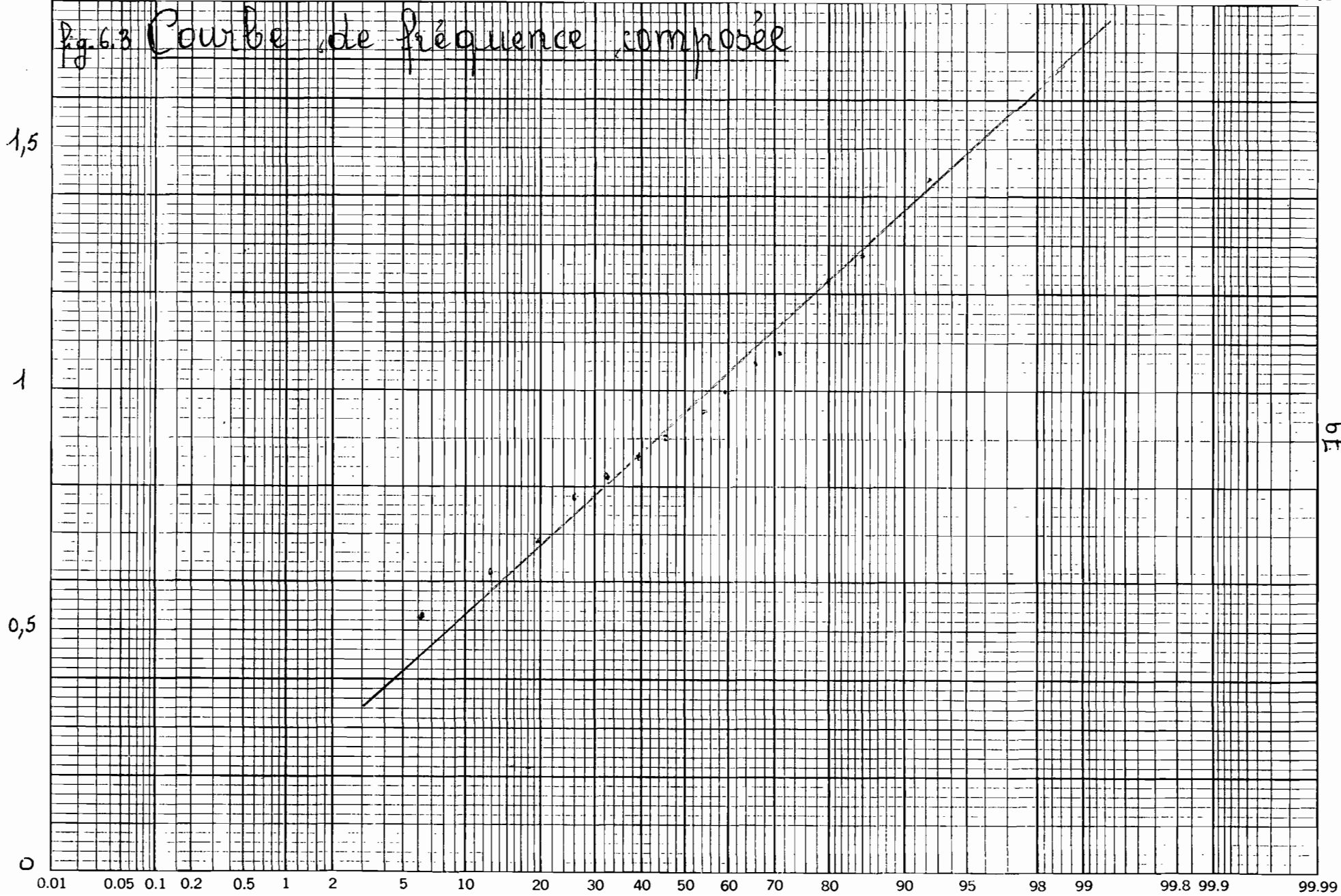
N.B. Résultat à prendre avec beaucoup de précaution

Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	200	1000	10000			
99,99	99,9	99,8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01

Fig. 6.3 Courbe de fréquence composée

Quotients d'inondation moyenne



CHAPITRE VII

Conclusion et recommandations

Cette étude nous a permis d'une part, de caractériser notre bassin, d'autre part de mettre à la disposition des gestionnaires en eau un outil de travail précieux.

Ainsi nous avons abouti à un bassin de forme allongée, de relief relativement peu accidenté et dont la densité du réseau hydrographique et du réseau d'observation est faible. Le problème de tout outil de travail est la fiabilité des résultats obtenus; le notre i.e les courbes de fréquence (des crues et des étiages) et la courbe de fréquence composée n'est pas exempt à cette règle.

Il convient de signaler les difficultés rencontrées dues principalement au manque de statistiques précises. Cela a eu comme corollaire la non détermination de certaines caractéristiques du bassin - Certains tests statistiques n'ont pu être effectués. A cause de cet état, il se pose un problème de validité pour certains tests traités. De plus, cette situation pourrait être une des causes de la limite de l'utilisation de notre courbe de fréquence composée.

Ainsi apparaît nettement, dans le cadre de telles études, la nécessité d'une banque de données précises, continues et récentes. Aussi nous recommandons vivement un suivi permanent du fleuve en vue de créer une banque de données.

Une fois ces conclusions pratiques dégagées, il s'avère nécessaire de faire des recommandations pour l'amélioration d'une part de la qualité et de la quantité des

eaux souterraines; d'autre part de la précision de la courbe de fréquence composée et de la relation débit moyen annuel - aire des bassins.

i) Eaux souterraines.

Compte tenu des méfaits des eaux saumâtres (malformations dentaires, décalcification des eaux, troubles nerveux, paralysie, etc...), de l'inégalité de la pluviométrie et de la forte évaporation que connaît cette zone, comme solution nous recommandons la recharge artificielle. Cette technique bien menée permettra d'accroître les ressources en eaux souterraines et en même temps améliorera la qualité de ces eaux. Mais vu l'inexistence de projets ayant des statistiques fiables dans le pays (il n'y a qu'une tentative à Oga Babou dans la région de Mbou), dans le court terme, on pourrait se tourner du côté des techniques de déminéralisation. Mais là encore, il faudrait au préalable une étude pour le choix d'une technique adaptée, peu onéreuse et d'entretien facile. L'osmose inverse pourrait convenir.

ii) Réseau optimum.

Par réseau optimum, nous entendons un réseau qui est tout juste suffisant pour l'exécution d'un calcul donné. Ainsi, il s'avère que tout est lié en grande partie aux objectifs poursuivis.

- Stations hydrométriques

A cause des conditions économiques du pays, pas de recommandations particulières. Nous estimons que 15 stations sont suffisantes pour connaître le régime du fleuve. Nous insisterons plutôt sur un suivi permanent.

- Réseau pluviométrique

La forte variabilité du phénomène pluviométrique exige une forte densité des pluviomètres pour assurer une précision donnée. Compte tenu des conditions économiques du pays, une précision de 10% nous semble suffisante. Aussi nous recommandons une station à Bakel pour les raisons suivantes:

- l'existence d'une station climatologique en ce point
- la position géographique (zone frontalière)

Mais à long terme, il faudrait en installer graduellement dans le Haut Bassin

Ici, il convient de signaler que les pluviomètres sont obtenus par dons; du moins c'est qui nous a fait croire. Toujours est-il que les coûts d'implantation ne sont pas disponibles, ce qui justifie l'inexistence d'une étude économique. Cela nous aurait permis de faire des recommandations plus pertinentes.

iii) Courbe de fréquence composée

Pour parfaire notre outil de travail, les recherches doivent s'orienter sur les points suivants:

- la recherche d'une loi qui semble le mieux s'appliquer au phénomène pour la station de Dagana
- un meilleur ajustement pour la relation débits moyens annuels - aires des bassins
- le même cheminement, mais avec des données plus récentes

ANNEXE A

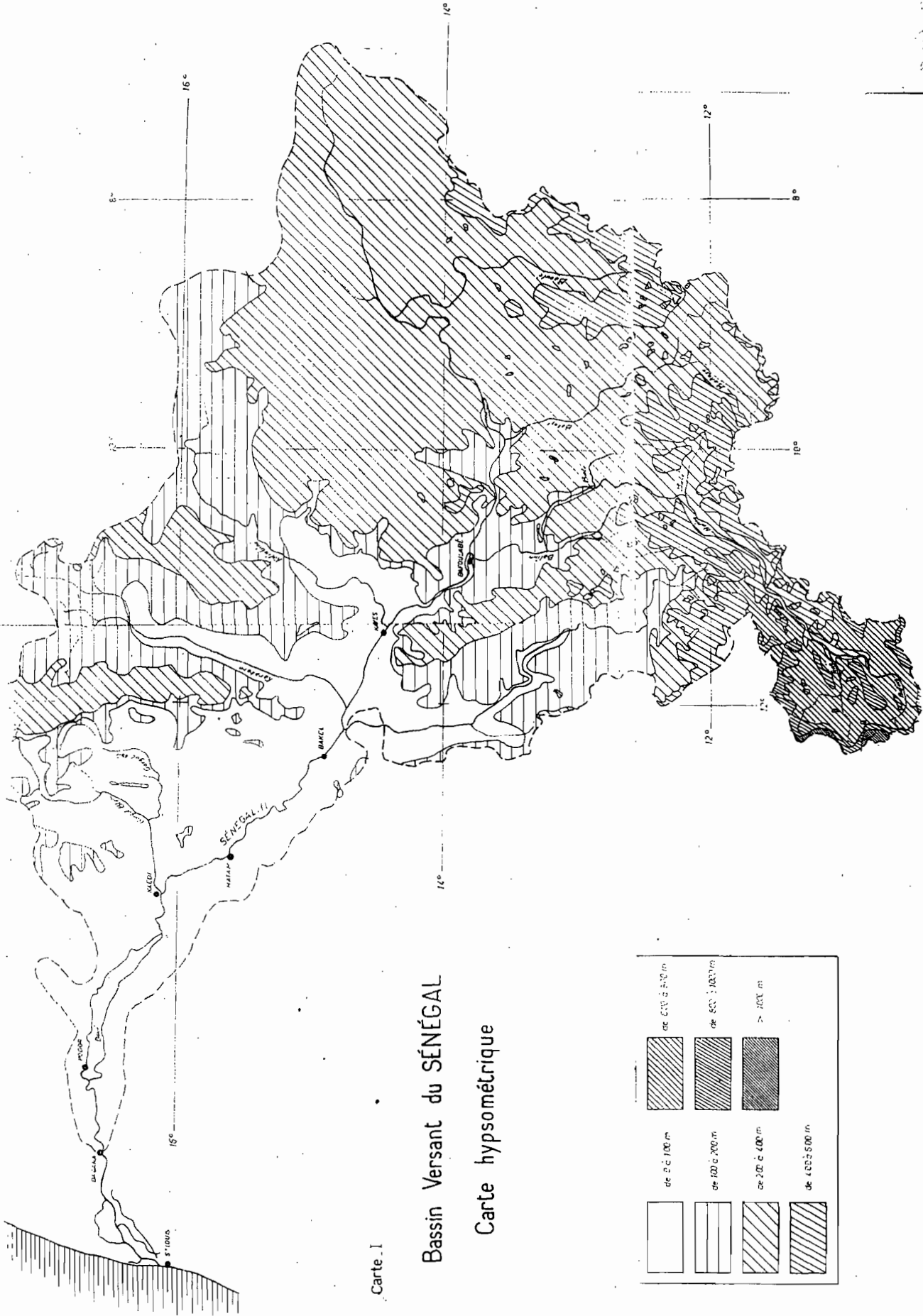
Graphiques du bassin versant

Carte I - Carte hypsométrique

Carte II - Carte hydrographique

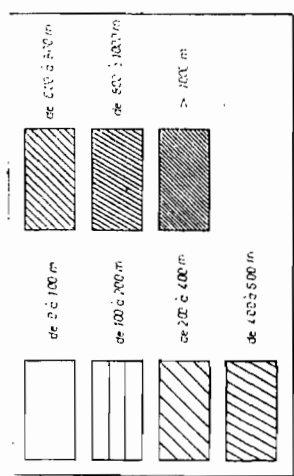
Carte III - Carte géologique

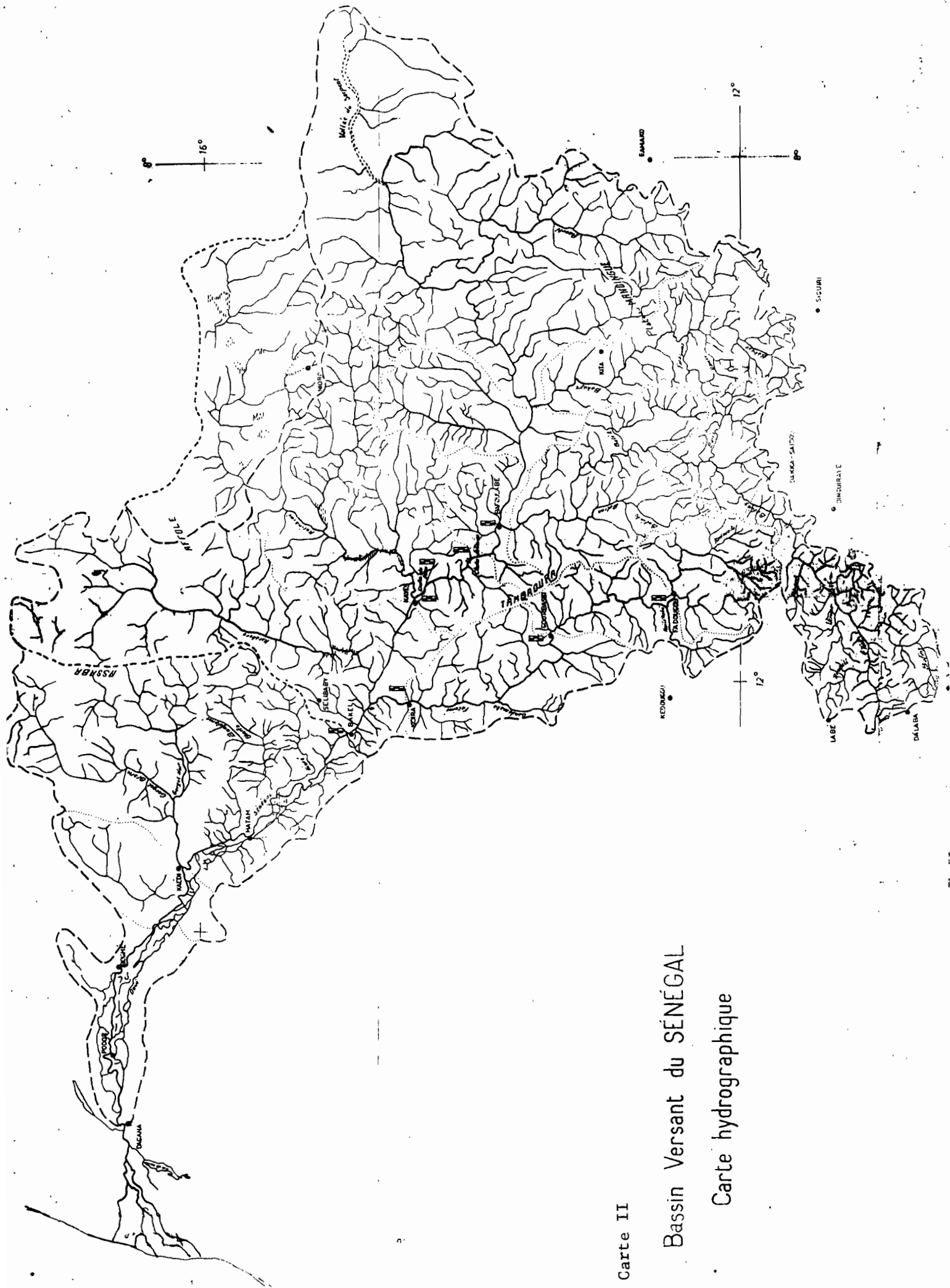
Carte IV - Isohyètes moyennes annuelles



Carte. I

Bassin Versant du SÉNÉGAL Carte hypsométrique

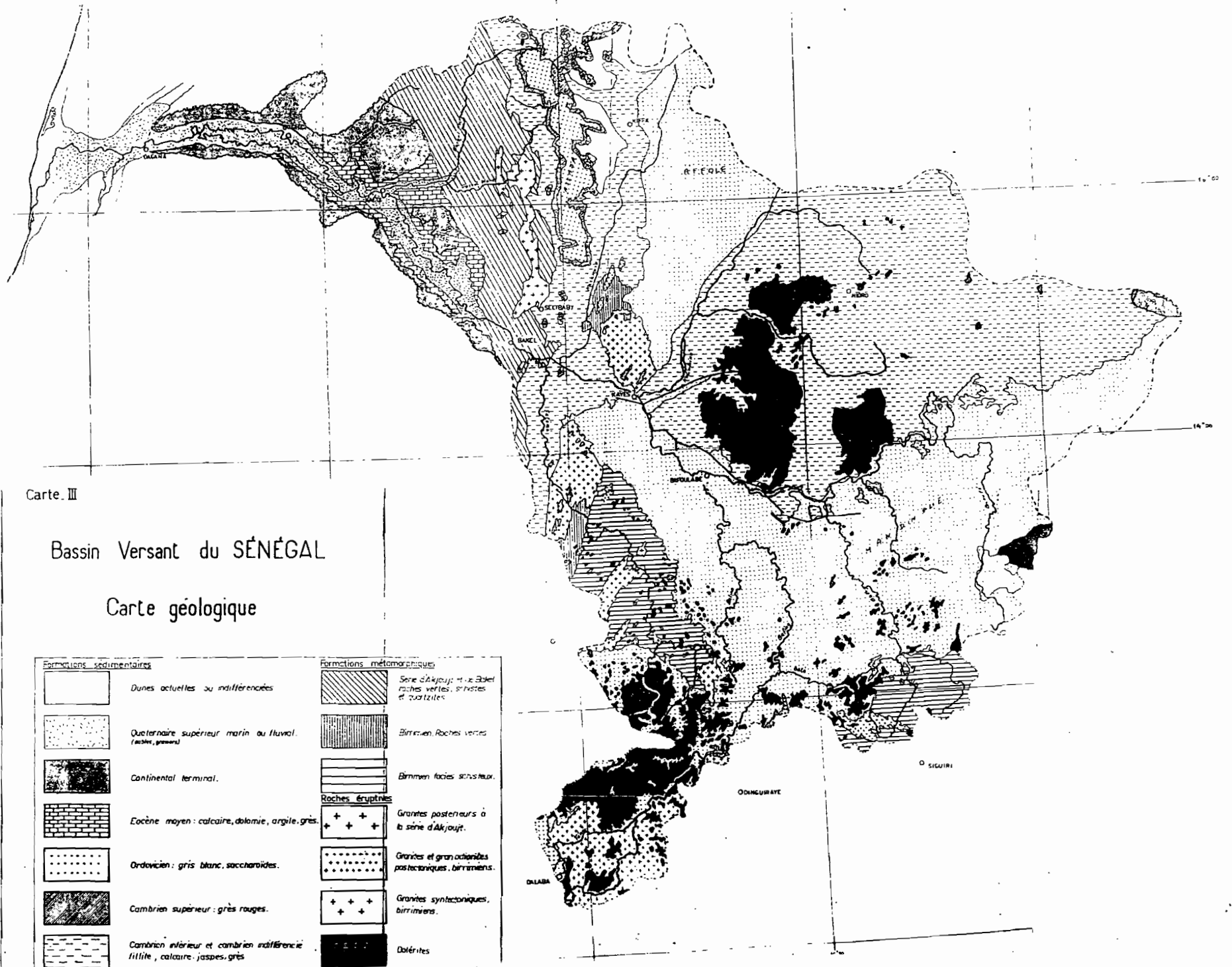




Carte II

Bassin Versant du SÉNÉGAL

Carte hydrographique

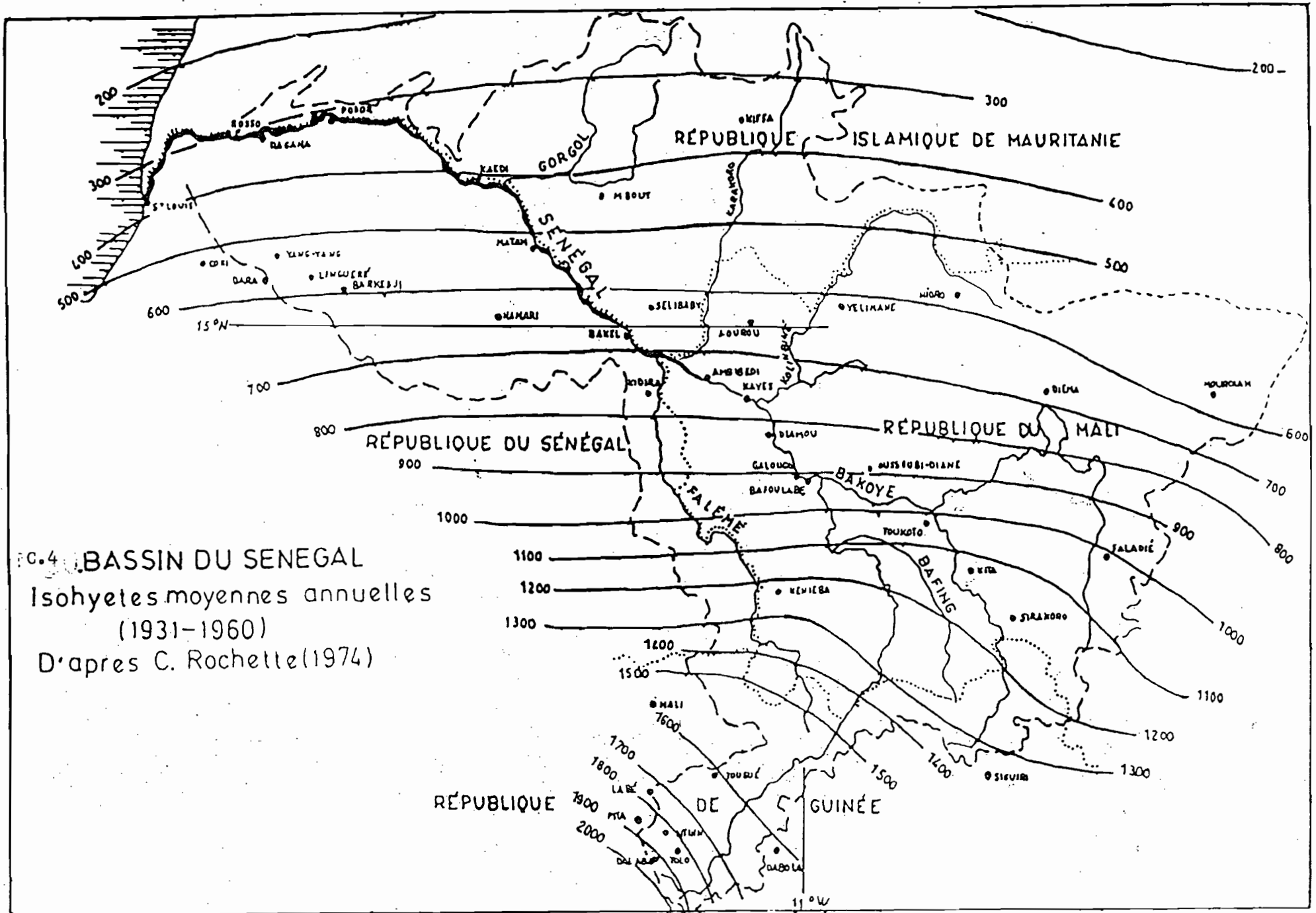


Carte III

Bassin Versant du SÉNÉGAL

Carte géologique

Formations sédimentaires	Formations métamorphiques
Dunes actuelles ou indifférenciées	Série d'Akjouj: m. x. Ebet, roches vertes, schistes et quartzites
Quaternaire supérieur marin ou fluvial (sables, graviers)	Birrimien: Roches vertes
Continental terminal.	Birrimien faciès schisteux.
Eocène moyen: calcaire, dolomie, argile-grès.	Roches éruptives
Ordovicien: grès blanc, saccharoïdes.	Granites postérieurs à la série d'Akjouj.
Cambrien supérieur: grès rouges.	Granites et granodiorites post-tectoniques, birrimiens.
Cambrien inférieur et cambrien indifférencié: tillite, calcaire, jaspes, grès.	Granites syntectoniques, birrimiens.
	Dolérites



C.4 BASSIN DU SENEGAL
 Isohyetes moyennes annuelles
 (1931-1960)
 D'apres C. Rochette (1974)

ANNEXE B

Évaporation et évapotranspiration

Évaporation

Évaporation sur eau libre.

Elle est mesurée au moyen des bacs Colorado. Ces derniers constituent des bacs de fer d'un mètre carré environ de superficie remplis d'eau presque jusqu'au bord, et enterrés au ras du sol. Des volumes d'eau périodiquement ajoutés pour remplir un bac donnent, déduction faite des pluies mesurées par ailleurs, la valeur de l'évaporation sur eau libre. Nous avons constaté que des bacs disposés en différents points d'une même région climatique pouvaient donner des résultats assez divergents : ceci est dû à l'influence des "microclimats" (différence de ventilation et d'insolation, etc...)

Évaporation Piche

C'est celle que l'on mesure avec l'appareil Piche. Cet appareil se compose d'un tube rempli d'eau, obturé à sa base par un diaphragme de papier poreux, à travers lequel l'eau s'évapore.

Des mesures d'évaporation Piche sont considérées comme très imprécises. Des anomalies proviennent de ce que les appareils Piche ne sont pas exactement comparables entre eux. (A un moment donné, on a substitué une éprouvette courbe à une éprouvette droite, puis changé à nouveau à partir de 1955) et aussi de ce que, comme - t-on, les observateurs emploient parfois, au lieu de l'eau distillée, et quand leur provision en est épuisée, de l'eau de pluie plus ou moins minéralisée qui, par évapora

tion, imperméabilise l'opercule de papier filtre.

D'après les données sur le bassin du Sénégal et d'autres de l'Afrique, nous pouvons dire, en règle générale, que l'évaporation Piche est nettement supérieure à l'évaporation sur eau libre. En raison de l'irrégularité des résultats Piche, l'adoption d'un coefficient uniforme de réduction est extrêmement discutée. On admet tout de même que, pour nos régions, ce coefficient est de l'ordre 0,6

En dépit des ces inconvénients, l'appareil Piche est utilisé dans beaucoup de stations météorologiques.

Indice d'aridité

En fonction de la température et de la quantité de pluie, on a essayé de caractériser la plus ou moins grande aridité d'une région. La formule la plus usitée est celle du géographe français de Martonne

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

dans laquelle

I: indice d'aridité

P: précipitations annuelles (mm)

T: température moyenne (°C)

En guise de comparaison,

Saint Louis $T = 25^{\circ}\text{C}$ $P = 23,6\text{mm}$ $\rightarrow I = 0,67$

Matam $T = 29,3^{\circ}\text{C}$ $P = 40\text{mm}$ $\rightarrow I = 1,02$

Ce résultat confirme ce qui a été dit la distribution pluviométrique et donne une idée de cet écart

Evapotranspiration

Comme nous l'avons vu au 3.4.4, cette notion fait intervenir

non seulement l'évaporation à partir du sol humide ou mouillé, mais aussi la transpiration des plantes. Elle varie donc en fonction de la nature et de la densité du couvert végétal.

Dans le but d'estimer l'évapotranspiration des régions sahéliennes et désertiques, beaucoup d'experts négligent la part de la végétation dans le déficit évapotranspiratoire et proposent des formules empiriques et semi-empiriques dont la plus utilisée est celle de Turc qui s'écrit :

$$E = \frac{P}{(0,9 + P^2) - (300 + 25T + 0,05T^2)^{0,5}}$$

où

E: évapotranspiration réelle (mm)

P: hauteur de précipitation moyenne annuelle (mm)

T: température moyenne annuelle (°C)

En guise de comparaison,

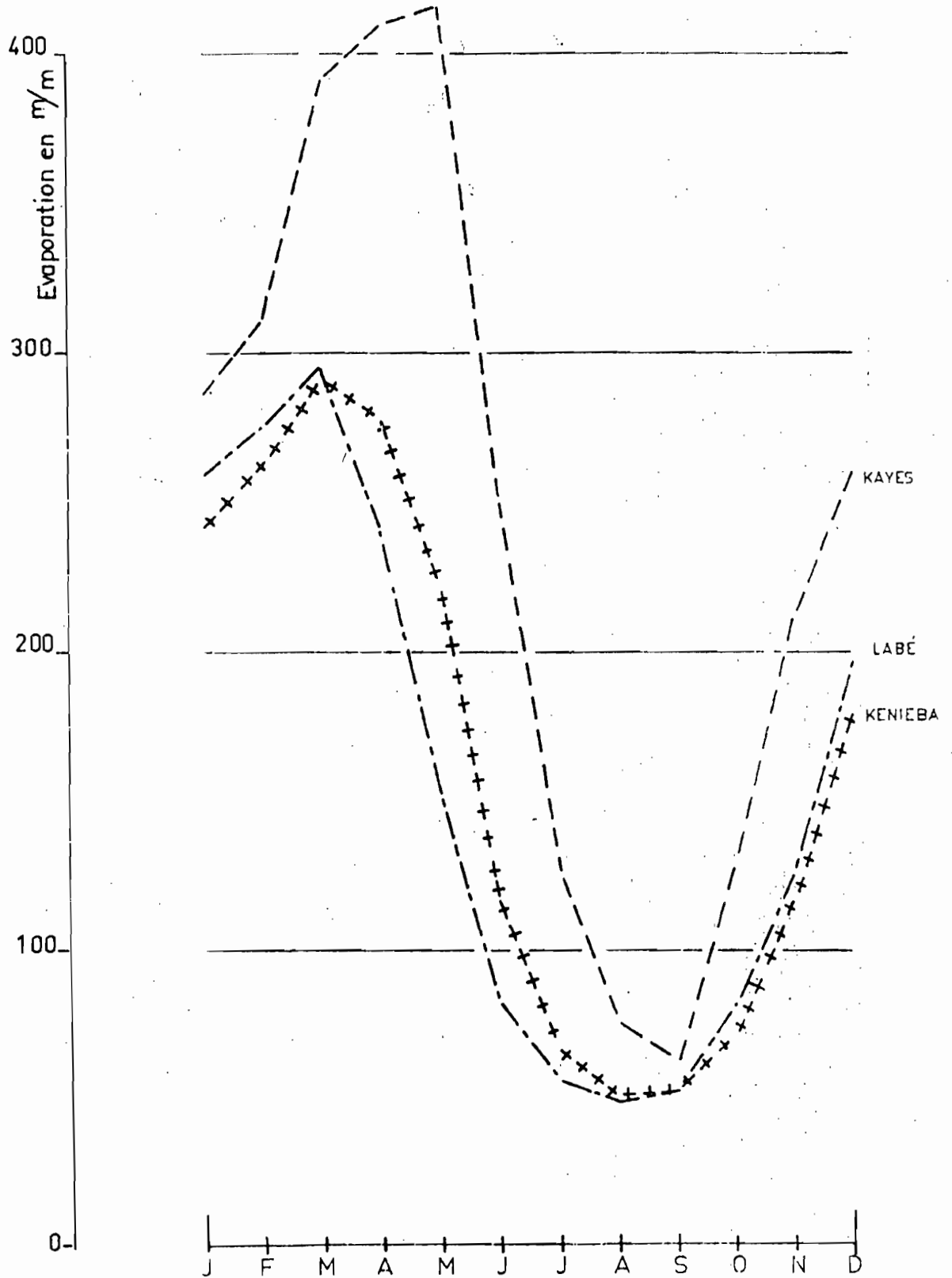
Saint Louis (1961) $T = 25^\circ\text{C}$ $P = 23,6\text{mm}$ $\rightarrow E = 0,045\text{mm}$

Matam (1961) $T = 29,3^\circ\text{C}$ $P = 40\text{mm}$ $\rightarrow E = 0,06\text{mm}$

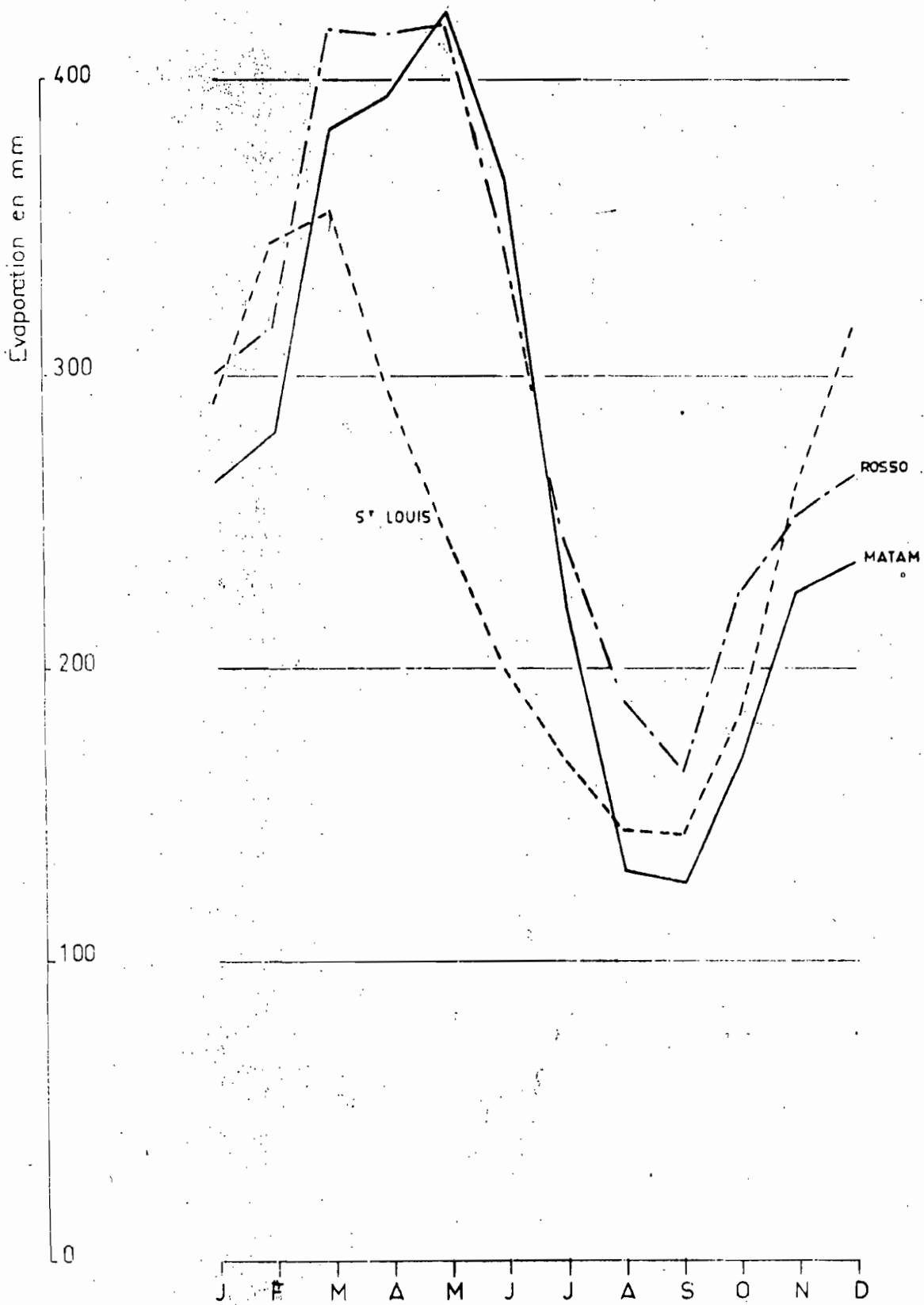
Dans les pages suivantes, vous trouverez les graphiques représentant les variations de l'évaporation mensuelle
Piche d'après C. Rochette

Graphique B.1

VARIATIONS DE L'EVAPORATION MENSUELLE PICHE



Graphique . B.2
VARIATIONS DE L'EVAPORATION MENSUELLE PICHE



ANNEXE C

Tableau C.1 - Détermination du facteur "K" - distribution log-Pearson type III -

Coefficient of Skew (g)	Recurrence Interval in Years							
	2	5	10	25	50	100	200	1000
	Percent Chanco of Occurrence							
	50	20	10	4	2	1	0.5	0.1
3.0	-0.396	0.420	1.180	2.278	3.152	4.051	4.970	7.350
2.5	-0.360	0.518	1.250	2.262	3.048	3.845	4.652	6.600
2.2	-0.330	0.574	1.284	2.240	2.970	3.705	4.444	6.200
2.0	-0.307	0.609	1.302	2.219	2.912	3.605	4.298	5.910
1.8	-0.282	0.645	1.318	2.193	2.848	3.499	4.147	5.560
1.6	-0.254	0.675	1.329	2.163	2.780	3.388	3.990	5.390
1.4	-0.225	0.705	1.337	2.128	2.706	3.271	3.828	5.110
1.2	-0.195	0.732	1.340	2.087	2.626	3.149	3.661	4.820
1.0	-0.164	0.758	1.340	2.043	2.542	3.022	3.489	4.540
.9	-0.148	0.769	1.339	2.018	2.498	2.957	3.401	4.395
.8	-0.132	0.780	1.336	1.998	2.453	2.891	3.312	4.250
.7	-0.116	0.790	1.333	1.967	2.407	2.824	3.223	4.105
.6	-0.099	0.800	1.328	1.939	2.359	2.755	3.132	3.960
.5	-0.083	0.808	1.323	1.910	2.311	2.686	3.041	3.815
.4	-0.066	0.816	1.317	1.880	2.261	2.615	2.949	3.670
.3	-0.050	0.824	1.309	1.849	2.211	2.544	2.856	3.525
.2	-0.033	0.830	1.301	1.818	2.159	2.472	2.763	3.380
.1	-0.017	0.836	1.292	1.785	2.107	2.400	2.670	3.235
0	0	0.842	1.282	1.751	2.054	2.326	2.576	3.090
-.1	0.017	0.836	1.270	1.716	2.000	2.252	2.482	2.950
-.2	0.033	0.850	1.258	1.680	1.945	2.178	2.388	2.810
-.3	0.050	0.853	1.245	1.643	1.890	2.104	2.294	2.675
-.4	0.066	0.855	1.231	1.606	1.834	2.029	2.201	2.540
-.5	0.083	0.856	1.216	1.567	1.777	1.955	2.108	2.400
-.6	0.099	0.857	1.200	1.528	1.720	1.880	2.016	2.275
-.7	0.116	0.857	1.183	1.483	1.663	1.806	1.926	2.150
-.8	0.132	0.856	1.166	1.448	1.606	1.733	1.837	2.035
-.9	0.148	0.854	1.147	1.407	1.549	1.660	1.749	1.910
-1.0	0.164	0.852	1.128	1.366	1.492	1.588	1.664	1.800
-1.2	0.195	0.844	1.086	1.282	1.379	1.449	1.501	1.625
-1.4	0.225	0.832	1.041	1.198	1.270	1.318	1.351	1.465
-1.6	0.254	0.817	0.994	1.116	1.166	1.197	1.216	1.280
-1.8	0.282	0.799	0.945	1.035	1.069	1.087	1.097	1.130
-2.0	0.307	0.777	0.895	0.959	0.980	0.990	0.995	1.000
-2.2	0.330	0.752	0.844	0.888	0.900	0.905	0.907	.910
-2.5	0.360	0.711	0.771	0.793	0.798	0.799	0.800	.802
-3.0	0.396	0.636	0.660	0.666	0.666	0.667	0.667	.668

ANNEXE D

Courbes de fréquences

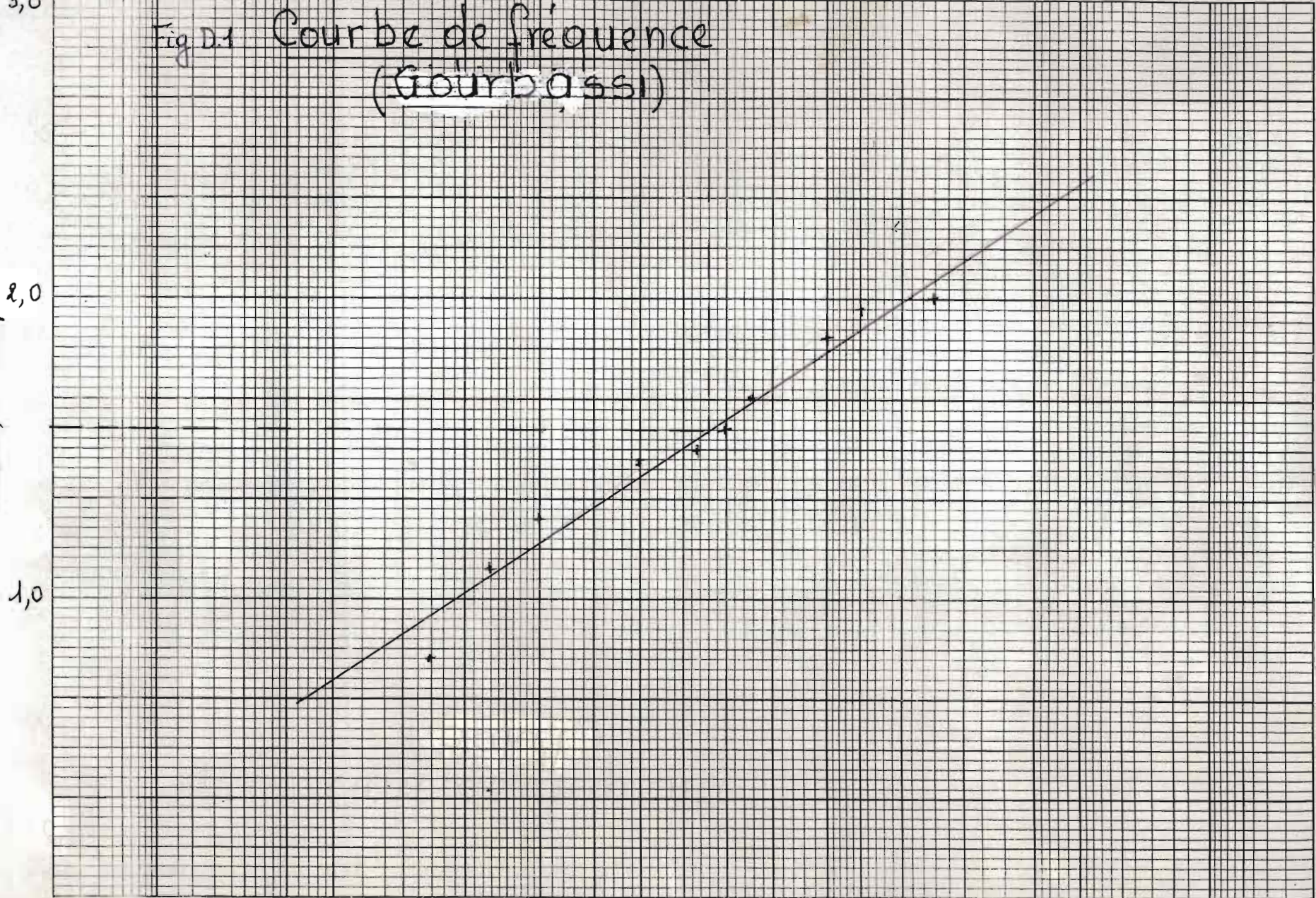
- D.1 Goubassi
- D.2 Kidira
- D.3 Bakel
- D.4 Matam
- D.5 Saldé
- D.6 Dagana
- D.7 Koukoto
- D.8 Oualia
- D.9 Bayes
- D.10 Dakka Saïdou

Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	200	500	10000			
99,99	99,9	99,8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01

Fig. D.1 Courbe de fréquence
(Gourbassi)

Débit, $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$



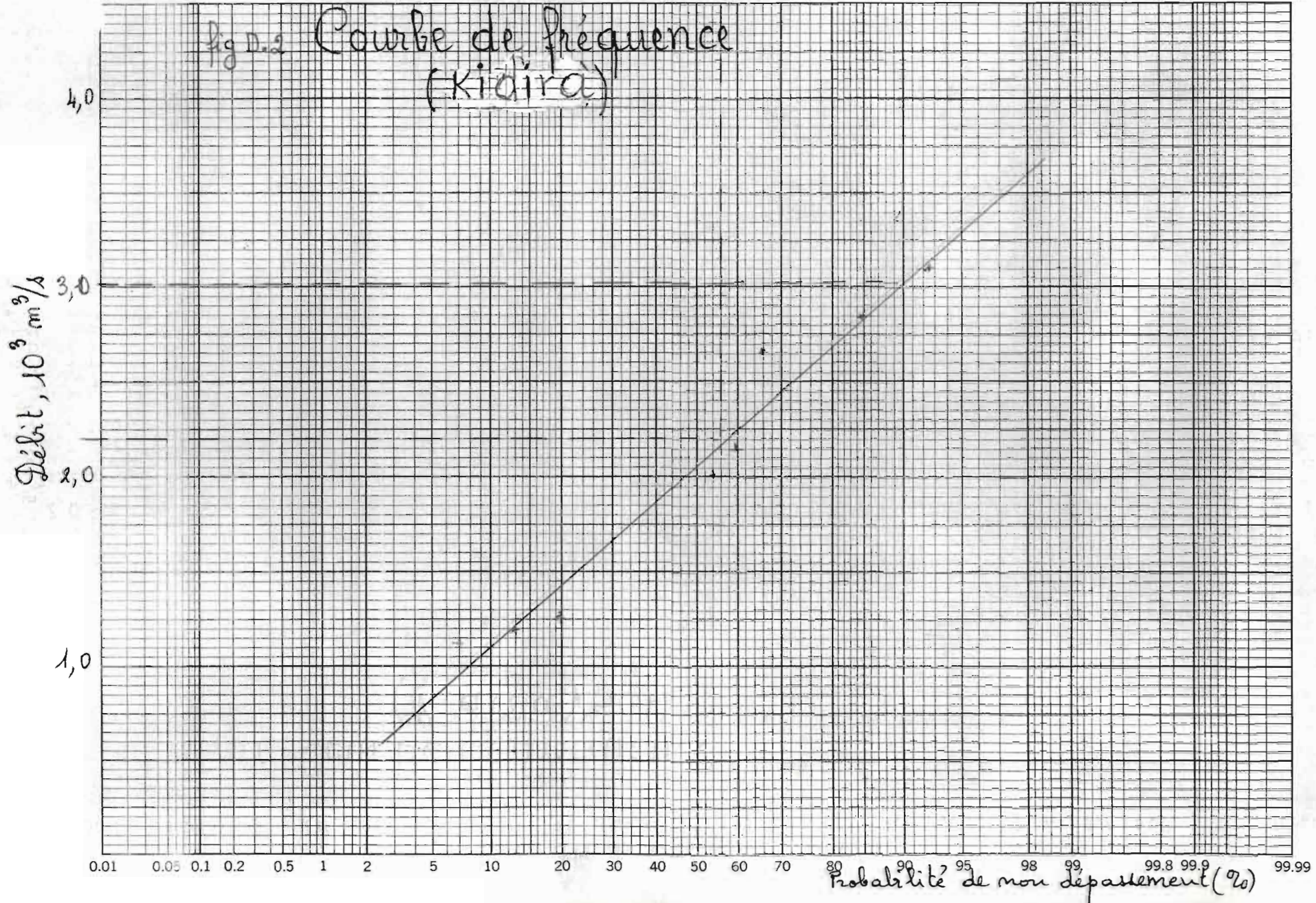
0.01 0.05 0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99.8 99.9 99.99

Probabilité de non dépassement

Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	200	500	10 000			
99,99	99,9	99,8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01

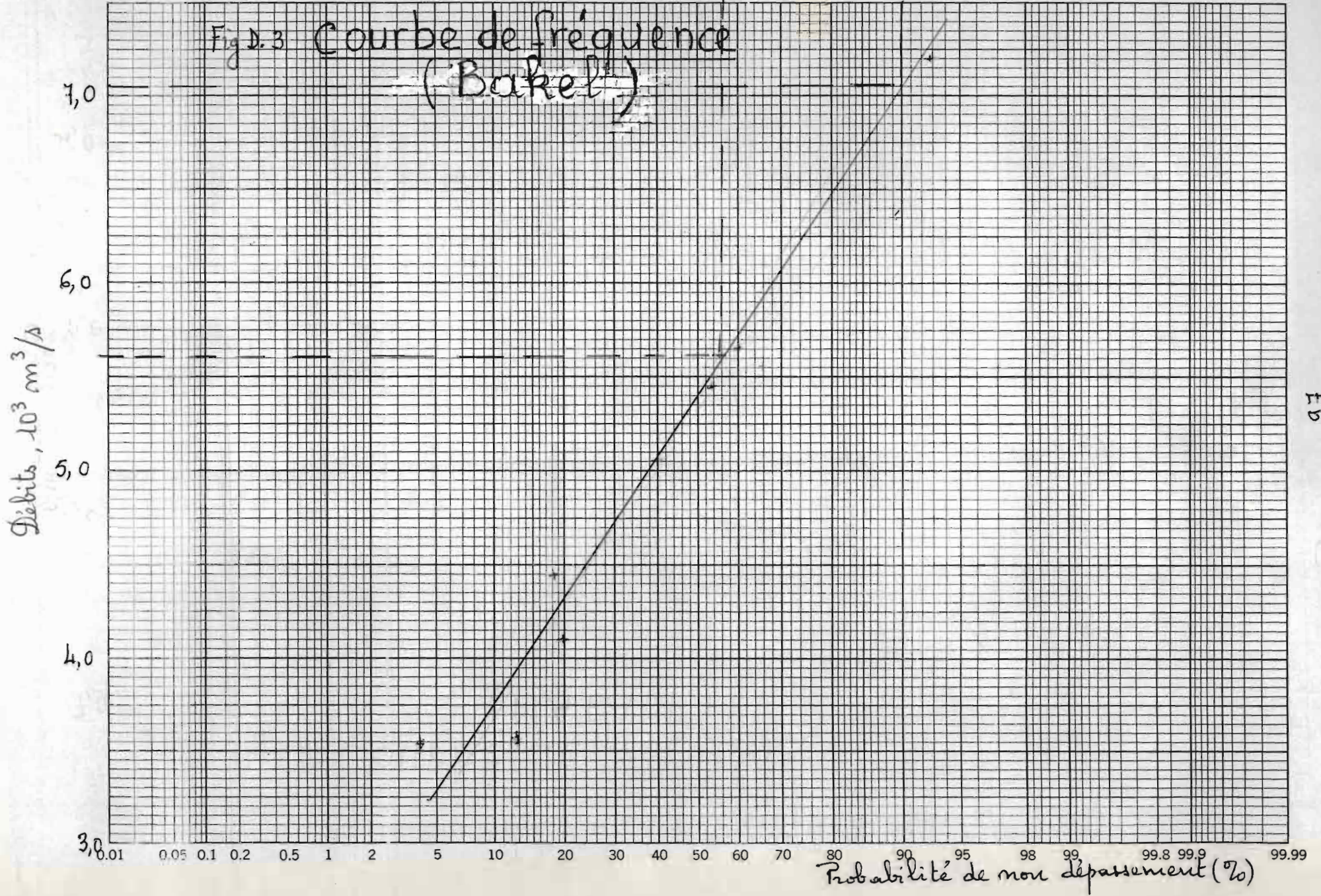
fig D.2 Courbe de fréquence
(Kidira)



Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	200			10000		
99.99	99.9	99.8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.01

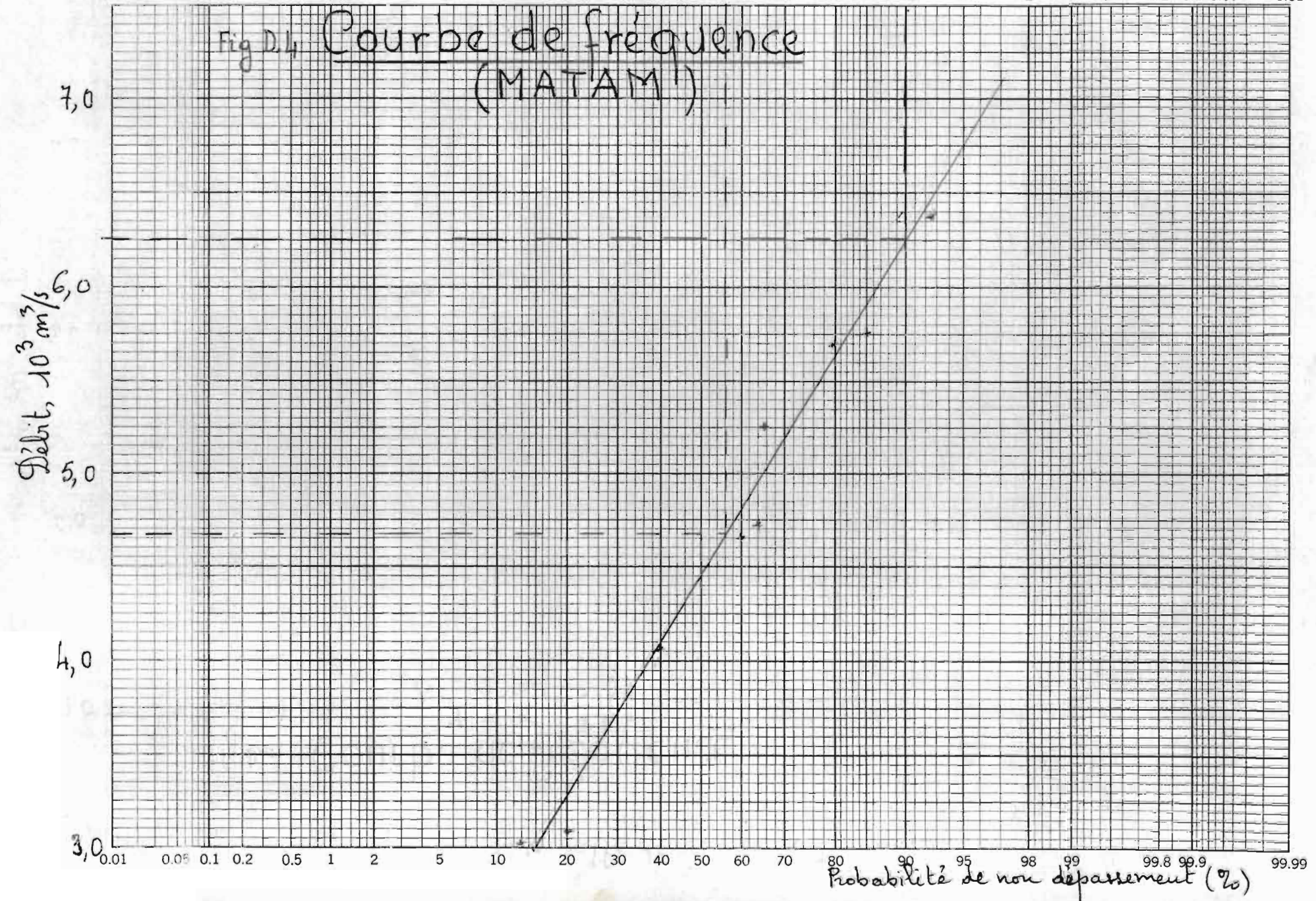
Fig. 3 Courbe de fréquence
(Baker)



1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	200	500	1000			
99.99	99.9	99.8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.01

Intervalle de récurrence T_r , années

Fig D4 Courbe de fréquence
(MATAM')

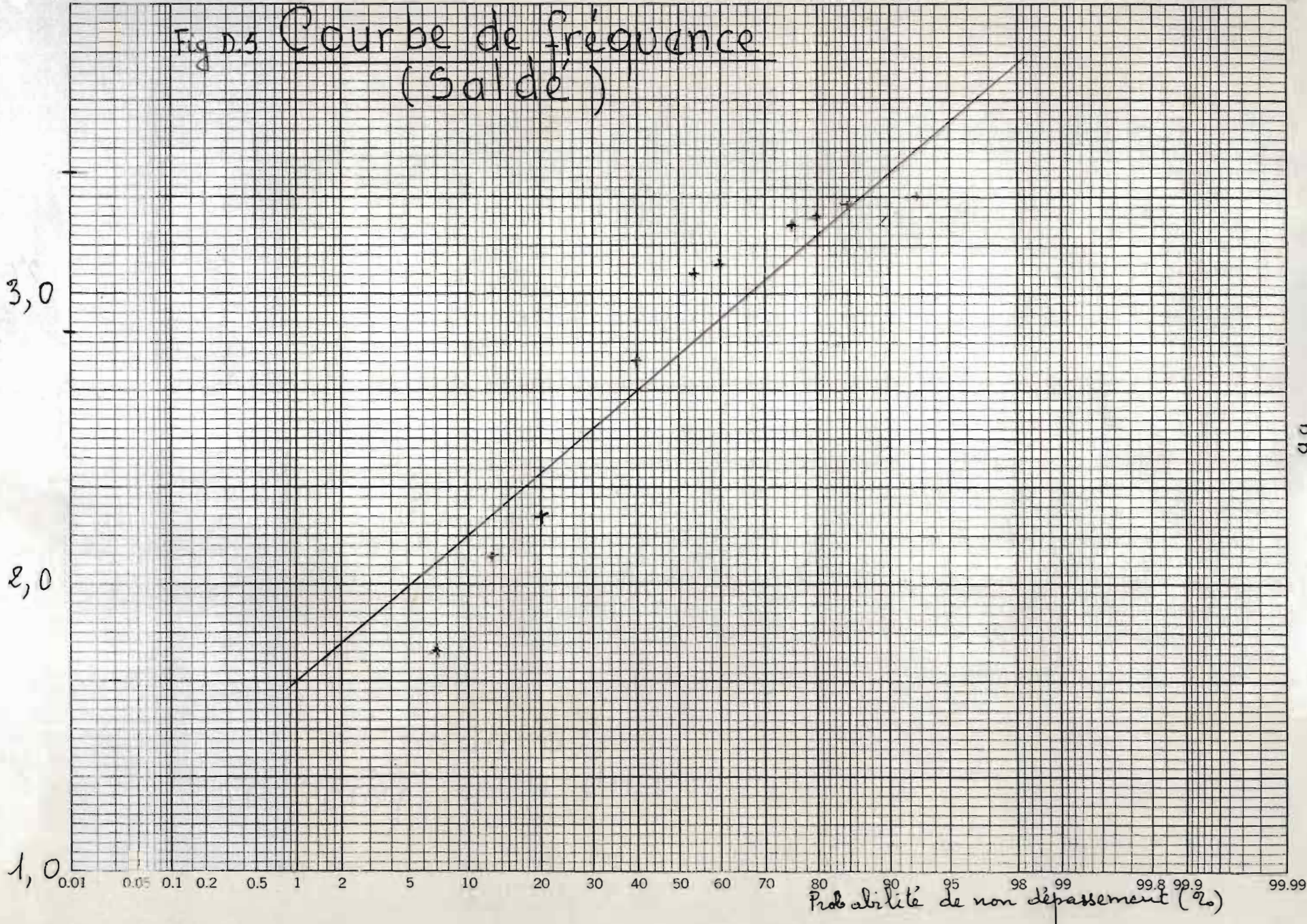


1,0001 1,001 1,01 1,02 1,05 1,11 1,25 1,43 1,67 2,5 3,33 5 10 20 50 100 200 1000 10 000
 99.99 99.9 99.8 99 98 95 90 80 70 60 50 40 30 20 10 5 2 1 0.5 0.2 0.1 0.05 0.01

Intervalle de récurrence T_r , années

Fig. D.5 Courbe de fréquence
(Salé)

Débit, $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$

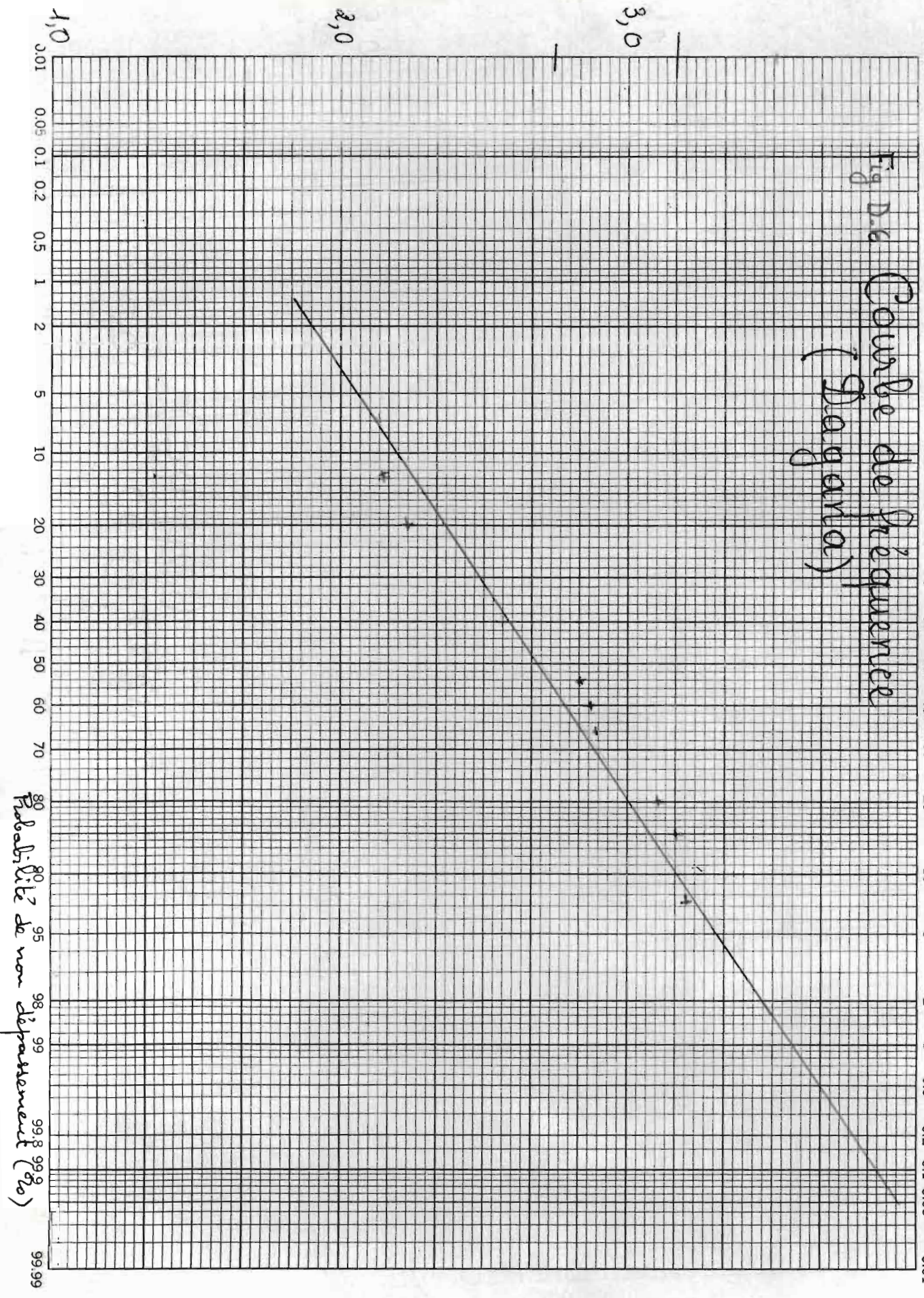


Inhauville de réserve T_n, années

99.99	1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	200	500	10 000	

Fig. D.6 Courbe de fréquence
(Shagarna)

Debit, 10³ m³/s



Probabilité de non dépassement (%)

Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	100	500	10 000					
99,99	99,9	99,8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01

Fig D.3 Courbe de fréquence
(Qualia)

Débit, $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$

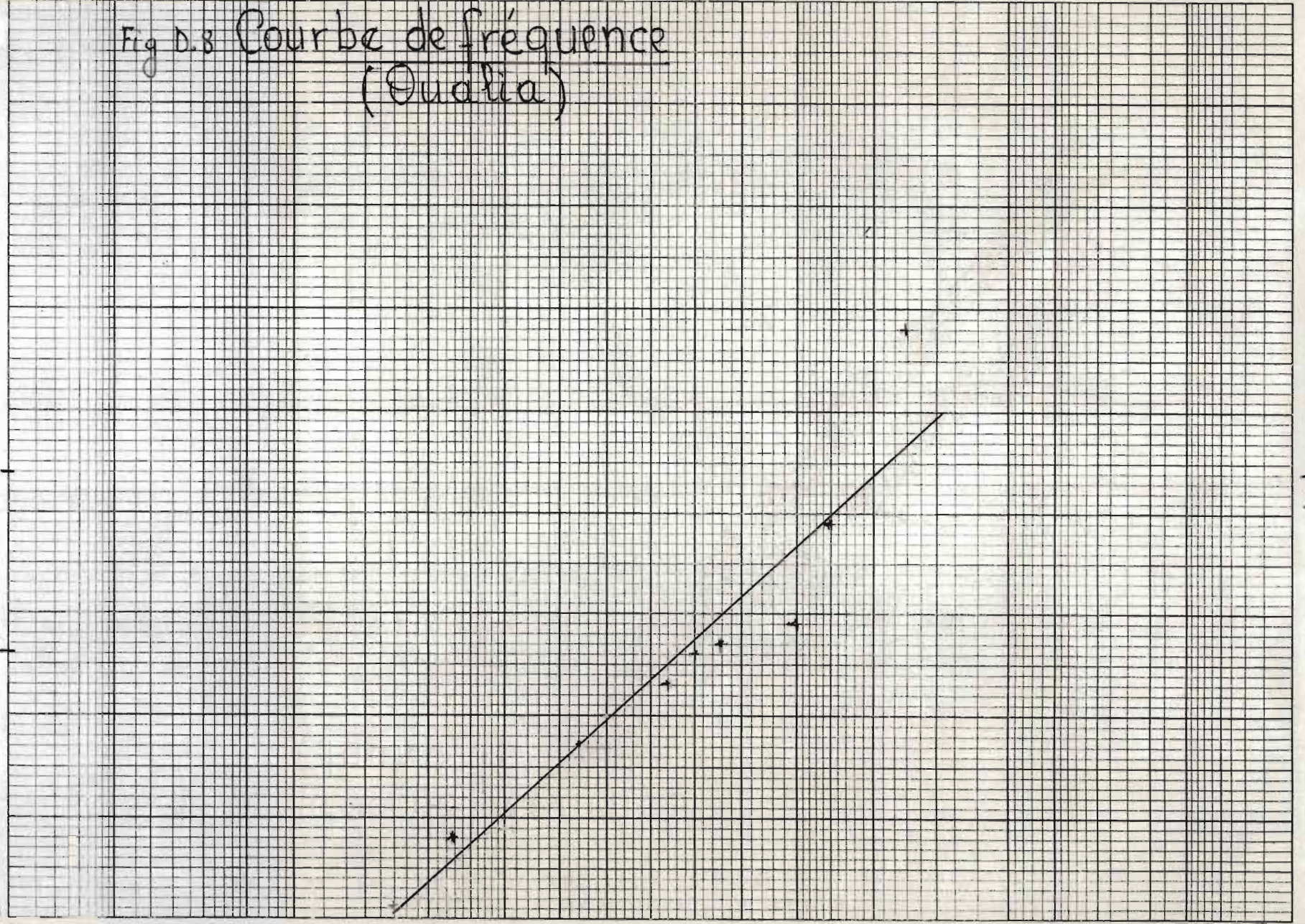
3,0

2,0

1,0

0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,8 99,9 99,99

Probabilité de non dépassement (%)



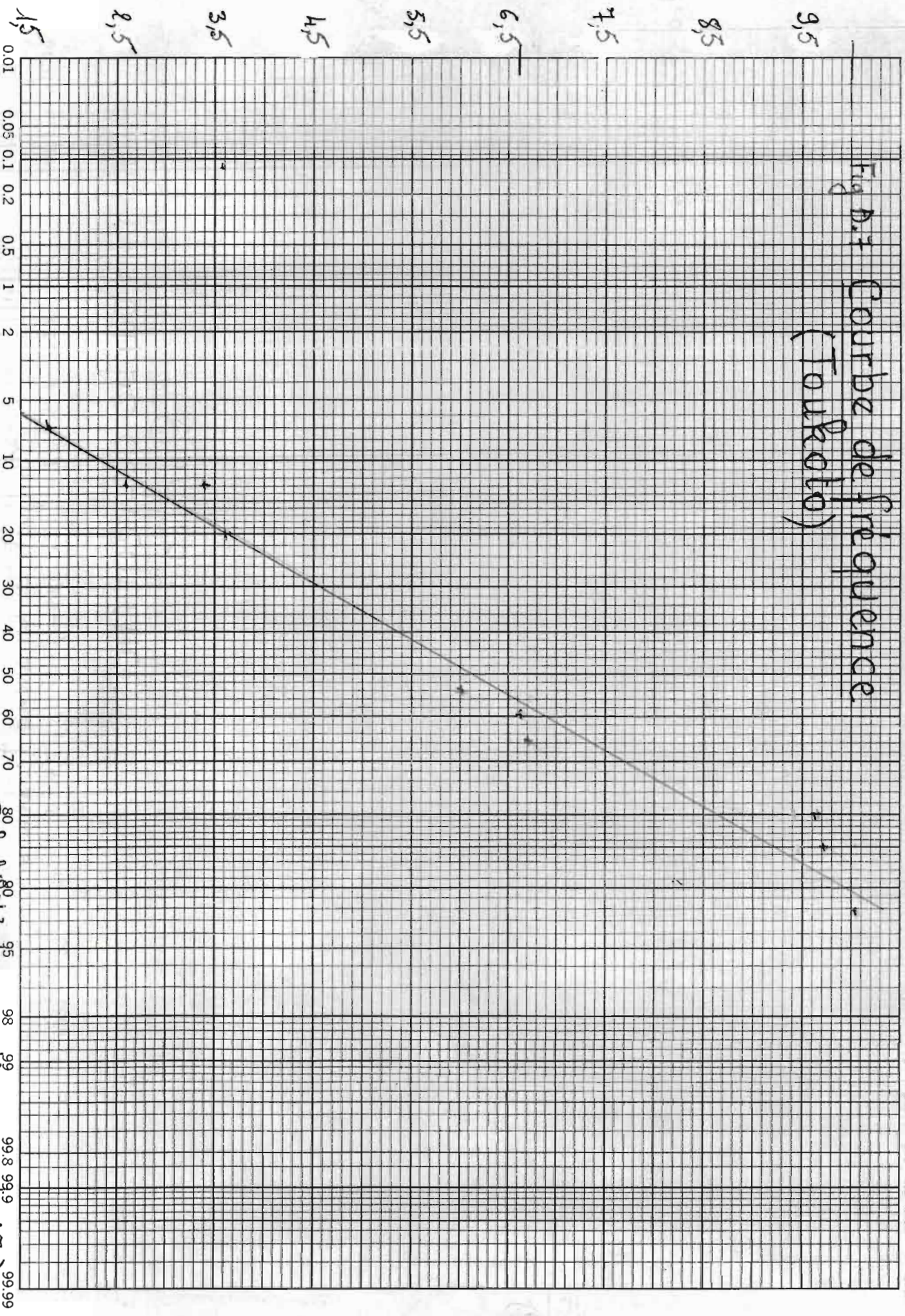
101

1,0001 1,001 1,01 1,02 1,05 1,11 1,25 1,43 1,67 2 2,5 3,33 5 10 20 50 100 200 1,000 10,000

Invariable de récurrence T_r , années

Fig. A.7 Courbe de fréquence
(Toukoto)

Débit, $10^8 \text{ m}^3/\text{s}$

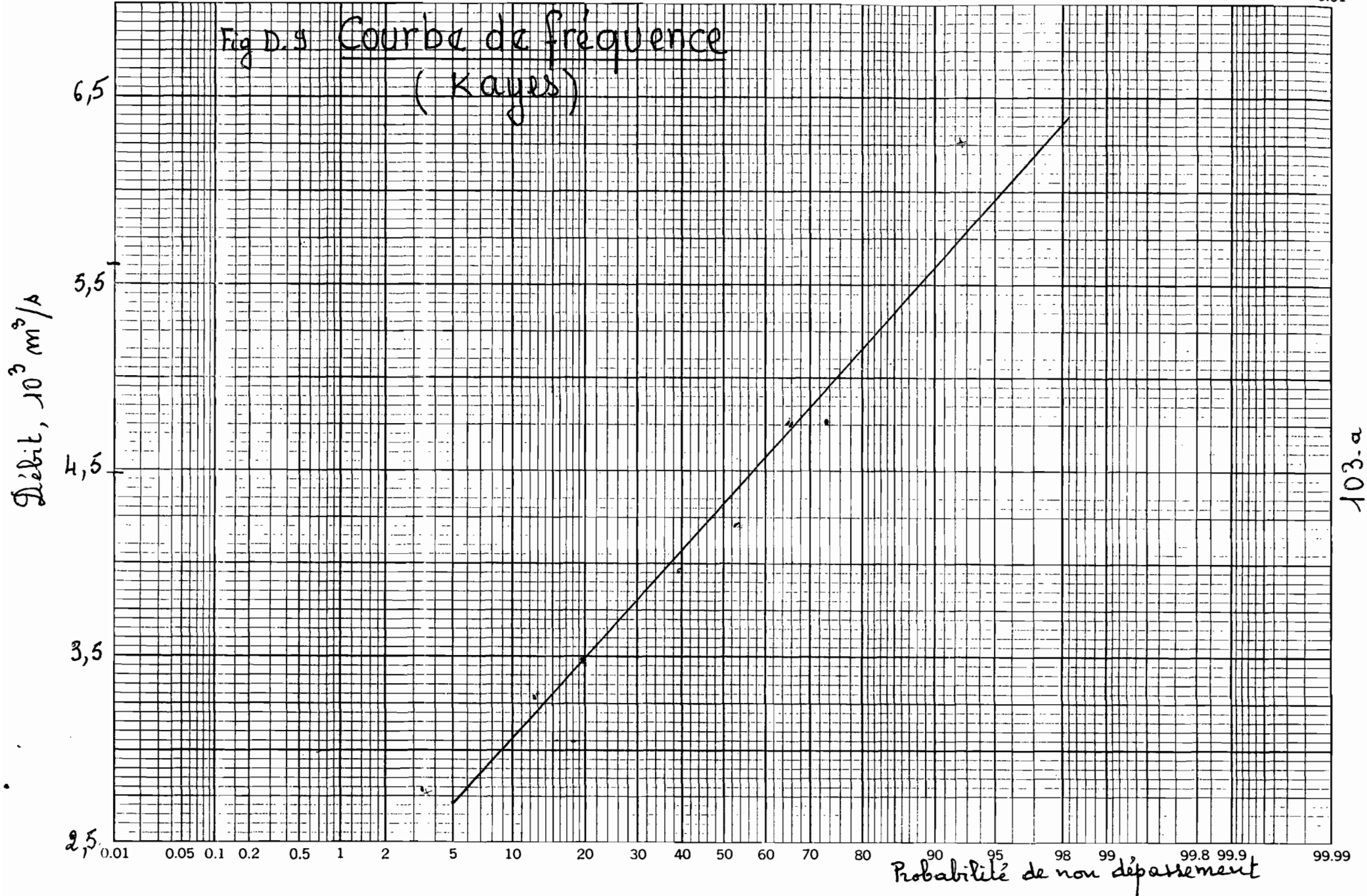


Probabilité de non dépassement (%)

Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001	1,001	1,01	1,02	1,05	1,11	1,25	1,43	1,67	2	2,5	3,33	5	10	20	50	100	1000	10000				
99.99	99.9	99.8	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.01

Fig D. 9 Courbe de fréquence
(Kays)

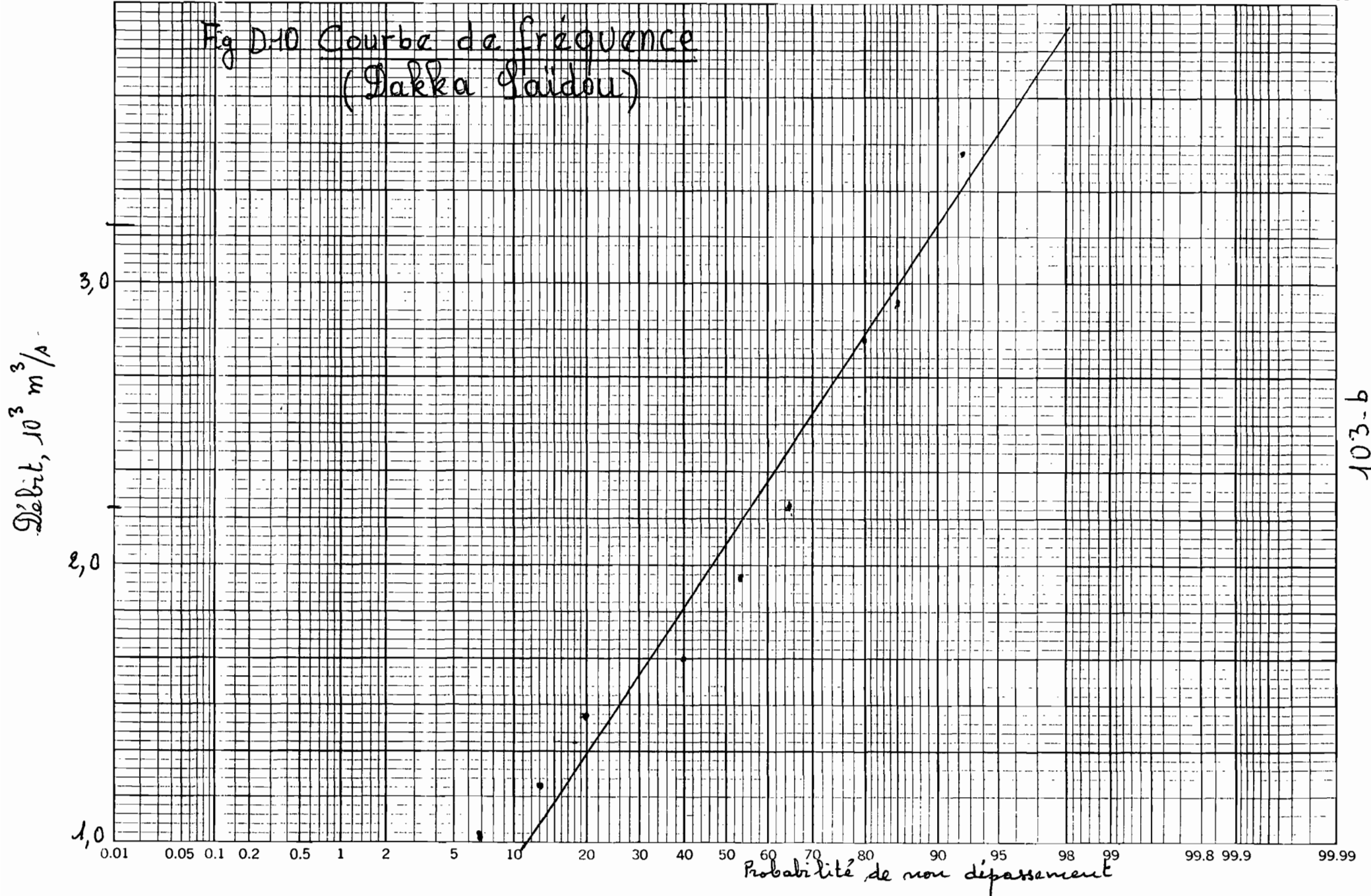


103-a

Intervalle de récurrence T_r , années

1,0001 1,001 1,01 1,02 1,05 1,11 1,25 1,43 1,67 2 2,5 3,33 5 10 20 50 200 1000 10000
99.99 99.9 99.8 99 98 95 90 80 70 60 50 40 30 20 10 5 2 1 0.5 0.2 0.1 0.05 0.01

Fig D-10 Courbe de fréquence
(Dakka Gaidou)



103-b

ANNEXE E

Hauteurs limnimétriques

La procédure du chapitre 6 a été appliquée et nous présentons ci-contre les différents résultats.

Table E.1 Matrice de corrélation

	Bakel	Matam	Dagana	Rich.Toll	Rosso	Kidua
Bakel	1	1	0,69	0,43	0,81	0,62
Matam	1	1	0,69	0,43	0,81	0,62
Dagana	0,69	0,69	1	0,26	0,48	0,33
Richard Toll	0,43	0,43	0,26	1	0,74	$4,76 \cdot 10^{-2}$
Rosso	0,81	0,81	0,48	0,74	1	0,62
Kidua	0,62	0,62	0,33	$4,76 \cdot 10^{-2}$	0,62	1

Tableau E.2 Pentes des droites de régression

	Bakel	Matam	Dagana	Ric.Toll	Rosso	Kidua
Bakel	1	1,812	0,005	0,373	4,942	0,412
Matam	0,542	1	0,003	0,131	2,559	0,225
Dagana	56,11	102,507	1	-1,216	233,254	23,66
Richard Toll	0,09	0,112	$-3 \cdot 10^{-5}$	1	0,894	-0,164
Rosso	0,167	0,289	$7,64 \cdot 10^{-4}$	0,118	1	0,07
Kidua	1,039	1,892	$5,77 \cdot 10^{-3}$	-1,62	5,251	1

T.E3. Ordonnées à l'origine des droites de régression.

	Bakel	Matam	Dagana	Ri.Toll	Rosso	Kidica
Bakel	0	-4,717	7,326	6,832	-1,877	5,415
Matam	2,675	0	6,648	6,548	1,894	5,607
Dagana	-362,65	-633,12	0	72,404	-382,65	-61,77
Richard Toll	1,596	1,563	2,334	0	0,6	3,245
Rosso	0,65	-4,4	1,886	1,663	0	1,547
Kidica	-2,453	-7,432	5,148	9,328	-4,63	0

Tableau E.4 () Données manquantes (m) complètes
 Hauteurs limnimétriques max (m)

1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Bakel	10,19	7,08	7,87	6,22	8,65	7,71	6,94
Mbam	8,13	6,57	7,02	5,96	7,45	6,8	6,34
Diagara	3,13	2,29	2,52	2,09	2,66	2,75	2,24
Boadi	7,54	6,4	6,74	5,87	(6,98)	6,74	6,13
St Louis	(2,38)	(1,83)	1,36	(2,0)	1,08	1,29	1,23
Saldé	8,53	7,22	7,11	7,59	7,76	(7,27)	7,06
Bodou	5,15	3,8	3,81	4,13	(4,49)	4,42	3,72
Sikh. Bell	2,63	1,91	1,94	2,14	1,72	2,35	1,87
Kosso	2,38	1,71	1,74	1,99	1,73	2,10	1,63
Koulikou	8,55	4,28	5,49	6,05	6,12	6,09	4,83
Boyaka	(7,59)	(7,34)	6,52	(6,66)	6,04	(6,66)	6,48

BIBLIOGRAPHIE

- C. TOBES et V. OURYVAEV, Les bassins représentatifs et expérimentaux, Unesco, 1970, 380 pages
- H. ANDREAE, Nouveaux procédés de mesure en hydrologie, Dunod, 1970, 190 pages
- C. ROCHETTE, Le bassin du fleuve Sénégal, série Monographies hydrologiques Orstom, Orstom, 1974, 442 pages
- LECLERC ANDRE, L'hydrologie de l'Ingénieur, Notes du cours d'hydrologie (1.322), Ecole Polytechnique de Montréal, 1970, 149 pages
- REMENIERAS GASTON, L'hydrologie de l'Ingénieur, Eyrolles, deuxième édition, 1980, 456 pages
- LINSLEY, R. F. KHOLER, M. A. et PAULHUS, J. H., Hydrology for Engineers, Mc Graw Hill Book Co, 1958, 340 pages
- GRAY, D. M., Manuel des principes d'hydrologie, Secrétariat comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, 1972, 13 sections
- LLAMAS JOSE, Hydrologie générale : principes et applications Gaetan Morin, 1985, 487 pages
- D. E. H., Les annuaires hydrologiques, publications de la Direction des Etudes Hydrauliques du Ministère de l'Hydraulique
- TESSIER D., GIGNA C. et J. ROUSSELLE, Caractéristiques physiographiques des petits bassins versants des régions de l'Estrie et des Bois Francs, H. P. 58, Ministère de l'Environnement Québec, 1958, 67 pages
- "Les archives de la Météorologie Nationale"