

# **THESE**

**présentée pour obtenir le grade  
de  
Docteur ès Lettres  
à  
l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse**

**Spécialité : Géographie physique. Mention : Hydrologie.**

**Par**

**N'golona GOUNDOUL**

**ETUDE DE LA RELATION "AVERSES - CRUES".  
APPLICATION D'UN MODELE GLOBAL ET ESSAIS  
DE MISE AU POINT D'UN MODELE DISTRIBUE  
SUR LE BASSIN VERSANT DU BAM-BAM (TCHAD)**

Soutenue le 16 octobre 1992 devant la commission d'examen composée de :

<b>MM.</b>	<b>R. GUIRAUD</b>	<b>Président</b>
	<b>J. RISER</b>	<b>Examineur, Directeur</b>
	<b>G. JACCON</b>	<b>Rapporteur</b>
	<b>J.M. MASSON</b>	<b>Rapporteur</b>
	<b>B. BLAVOUX</b>	<b>Examineur</b>
	<b>A. DAUPHINE</b>	<b>Examineur</b>



## **Avant Propos**

Mon désir de faire des études supérieures dans le domaine de l'eau est né lors d'un séjour au Nord du Tchad où j'ai été confronté au problème du manque d'eau. C'est ainsi que j'ai entrepris des études de Travaux Ruraux à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II à Rabat au Maroc où j'ai découvert l'Hydrologie.

Après mon diplôme d'Ingénieur, j'ai décidé d'approfondir mes connaissances en Hydrologie. C'est ainsi que j'ai pris contact avec le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique (L.H.M.) devenu aujourd'hui Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation (L.H.M.), à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc à Montpellier en France. Après mon DEA, j'ai souhaité faire de la recherche sur les régions sahéliennes. Le L.H.M. m'a mis alors en contact avec le Laboratoire d'Hydrologie de l'O.R.S.T.O.M., Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération où des spécialistes de l'Hydrologie de ces régions m'ont accueilli pour conduire mes recherches.

Enfin, l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse très ouverte sur les relations internationales avec notamment des spécialistes des régions semi-arides et arides, permet aujourd'hui la publication de ce travail.

Au cours de ce long périple, j'ai été soutenu et guidé par des amis et parents que je ne pourrai citer nommément, tant la liste est longue. Que tous trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Toutefois, je ne saurais passer sous silence les personnes sans qui ce travail n'aurait jamais eu lieu.

Mes remerciements vont d'abord à R. Guiraud Président du jury. Ses qualités humaines et sa passion pour les régions semi-arides et arides font l'objet de mon admiration. Pour tout ce que j'ai appris à son contact en France et sur le terrain au Tchad, j'aimerais qu'il reçoive ma gratitude.

J. Riser a accepté avec désintéressement d'être le directeur de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

G. Jaccon, Directeur de Recherches à l'ORSTOM a accepté la lourde tâche d'être rapporteur de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

J.M. Masson m'a fait bénéficier de son enseignement en année de DEA. Il m'a prodigué des précieux conseils dans ce présent travail. Il a aussi accepté d'être rapporteur de cette thèse, qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.

B. Blavoux, Président de l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse me fait l'honneur de juger ce travail. Je tiens à l'en remercier profondément.

A. Dauphiné a accepté de porter son jugement sur ce travail, je l'en remercie très vivement.

C'est à C. Boçquillon que je dois mes premiers pas en Hydrologie, je lui exprime mes vifs remerciements.

P. Ribstein a encadré et suivi le déroulement de ce travail, je lui adresse ma profonde gratitude.

H. Lubès a suivi chaque étape de la modélisation et a corrigé ce document, je lui adresse mes profonds remerciements.

J.P. Debuiche a réalisé la mise en forme du document, qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

Je remercie l'ensemble du personnel du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM pour ses diverses contributions à ce travail et sa sympathie.

J'exprime mes remerciements à MM : M. Monbaron, A. Roth et C. Schaller, amis et membres de Fraternité Tiers Monde (F.T.M.) pour leurs conseils et leurs encouragements.

Je remercie Mgr J.C. Bouchard et la Fondation Jean Paul II pour le Sahel pour leur soutien moral et matériel.

Je remercie enfin, Mania, mon épouse pour la lecture et la correction de ce document, et pour sa compréhension pendant de longues périodes de solitude.

## **Résumé**

D'une superficie de 1196 km<sup>2</sup>, le bassin versant du Bam-Bam est situé en région sahélienne et constitué de cinq bassins emboîtés de différentes tailles.

L'étude de la dynamique des pluies sur le bassin, reflète les caractéristiques pluviométriques (homogénéité des formes, répartition spatiale) du Sahel en général.

Un modèle hydrologique fondé sur la technique de l'hydrogramme unitaire est appliqué à chacun des bassins, avec comme objectif l'analyse et la prédétermination des crues.

Les résultats satisfaisants obtenus en approche globale, confirment dans une certaine mesure, la prépondérance du ruissellement rapide par rapport aux autres types d'écoulements (écoulement retardé, écoulement de base).

La tentative d'approche distribuée révèle l'importance d'un autre type d'écoulement que le ruissellement rapide pour les bassins de superficie supérieure à 100 km<sup>2</sup>.

Nous suggérons une démarche tenant compte d'autres facteurs (géomorphologiques, pédologiques) en vue d'une amélioration probable de la modélisation hydrologique dans le Sahel.

## **Mots clés**

Sahel

Bassin versant

Hydrogramme unitaire

Crue

Modèle pluie-débit

Prédétermination de crue



## **Abstract**

The Bam-Bam catchment area is about 1196 km<sup>2</sup>, it is located in the sahelian region and is comprised by five jointed watersheds of different surfaces.

The dynamic study of rainfalls reflects the characteristics of precipitation (homogeneity of form, spatial distribution) in the sahelian region in general.

A hydrological model based on the unit hydrograph technique is used with aim of analysing and predetermining the floods for each sub-watershed.

The results obtained by a lumped model approach show the predominance of surface runoff in comparison with the other types of runoff (base runoff, delayed runoff).

An attempt using a distributed model shows that, for the watersheds greater than 100 km<sup>2</sup>, direct runoff is not predominant.

In order to improve modelisation in the sahelian region, we suggest the application of a process which takes into account other factors (geomorphological, pedological).

## **Keywords**

Sahel

Catchment

Unit Hydrograph

Flood

Rainfall-Runoff modelling

Flood prediction



# SOMMAIRE

<b>Introduction.....</b>	<b>11</b>
<b>1ère Partie : Le milieu .....</b>	<b>17</b>
I - 1 - Géographie physique .....	20
I - 1 - 1 - Le Tchad.....	20
I - 1 - 2 - Le Bam-Bam.....	41
I - 2 - Pluviométrie .....	51
I - 2 - 1 - Equipement.....	51
I - 2 - 2 - Etude des précipitations .....	54
I - 3 - Hydrologie .....	71
I - 3 - 1 - Equipement hydrométrique.....	71
I - 3 - 2 - Détermination et définition des paramètres usuels .....	71
I - 3 - 3 - Données par bassin.....	75
I - 3 - 4 - Crues retenues.....	83
<b>2ème Partie : Approche globale Pluies-Débits.....</b>	<b>87</b>
II - 1 - La production.....	91
II - 2 - Le transfert.....	109
II - 3 - Validation .....	167
<b>3ème Partie : Essais d'approche distribuée.....</b>	<b>179</b>
III - 1 - Application aux différents cas de figure .....	181
Nouvelle méthodologie .....	192
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>207</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>213</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>223</b>
<b>Listes des figures .....</b>	<b>229</b>
<b>Listes des tableaux .....</b>	<b>235</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>239</b>



## **Introduction**



## Introduction

"L'hydrologie sahélienne au sud du Sahara est quelque peu déconcertante" : J. RODIER dans la préface de " Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina-Faso)", P. Chevallier et Al. (1985), donne l'image de l'hydrologie du Sahel. Tout hydrologue ayant séjourné dans cette région du monde, convient de la particularité de l'écoulement de ses cours d'eau. Durant au moins quelques heures de leurs écoulements, ces cours d'eau se transforment en lacs itinérants, faisant oublier pour quelques instants l'aridité quasi-permanente du Sahel. La rapidité avec laquelle cette eau ruisselante se résorbe est encore plus surprenante.

Malgré les hauteurs moyennes pluviométriques annuelles comprises entre 200 et 850 millimètres loin d'être négligeables et qui ne sont pas spécifiques au Sahel (une partie des régions tempérées ne reçoit guère plus 800 millimètres), la famine fait encore beaucoup de victimes dans cette région du monde. Il convient que toute amélioration des conditions de vie de ces régions passe par la maîtrise des eaux, l'agriculture et l'élevage étant encore les seules activités qui font vivre la population sahélienne.

La modélisation hydrologique connaît aujourd'hui un essor important avec le nombre sans cesse croissant de modèles de plus en plus sophistiqués comme le permettent les moyens de calcul actuels.

Ces modèles pour Bocquillon (1987) sont opportunistes, ils permettent de répondre à une question, mais ils ne cherchent pas à expliquer les mécanismes physiques qui concourent au fonctionnement d'un système hydrologique.

Le développement de ces modèles concerne surtout les pays tempérés où ils trouvent les informations et les moyens nécessaires pour leur mise en oeuvre. Cependant, cette évolution hydrologique a aussi atteint certaines autres régions du monde moins avancées comme le Sahel. Ribstein (1990) dans son étude "Modèles de crues et petits bassins sahéliens", cite les principales études hydrologiques de l'ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération qui s'est intéressé dès sa création dans les années quarante à cette région du monde.

La sécheresse actuelle qui dure depuis près de deux décennies, met cette région dans les premiers rangs de l'actualité scientifique.

Aujourd'hui encore des efforts continuent à se faire dans le domaine de la connaissance des processus hydrologiques au Sahel, hormis les programmes nationaux ou interrégionaux nous pouvons citer en exemple : HAPEX-Sahel (Hydrological Atmospheric Pilot Experiment) dont la composante hydrologique a pour objectif l'estimation des quantités d'eau stockées dans les différentes unités du système hydrologique dont un des volets, EPSAT Niger (Estimation des Pluies par Satellites) s'occupe de l'estimation des précipitations par satellites et radar.

Au début de leurs travaux, les hydrologues de l'ORSTOM n'ont pas bénéficié des moyens de calcul dont on dispose aujourd'hui ; notre travail consiste à appliquer dans un objectif précis explicité ci-après, des modèles plus sophistiqués avec un appui informatique conséquent pour apprécier leurs performances par rapport aux résultats des études antérieures.

L'objet de notre étude est la relation "Averses-crues" dont le domaine de définition et d'application sous un climat donné est fonction des trois principaux facteurs : le milieu, les précipitations et le débit.

#### Le milieu.

Le milieu est caractérisé par son étendue, son relief, ses sols, sa végétation.

En hydrologie, l'une des principales et constantes difficultés provient de la taille du bassin versant naturel, difficulté due au fait que l'on ne peut prétendre reproduire exactement sur un bassin naturel, les comportements obtenus sur une colonne de sols en laboratoire ou sur une superficie expérimentale très réduite.

Cette difficulté hydrologique liée à l'étendue des bassins a donné naissance à la notion de bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM qui a fait l'objet d'un recueil de données de base (Dubreuil P. et al., 1972).

A cette difficulté, s'ajoute l'état de surface du bassin versant avec des caractéristiques plus ou moins variables dans le temps et dans l'espace.

#### Les précipitations.

Ce sont les phénomènes atmosphériques qui sont à l'origine de la pluie. L'étude de ces phénomènes relève du domaine de la Météorologie.

Mais c'est au niveau du sol que la pluie intéresse l'hydrologue. La connaissance de la pluie à ce niveau dépend essentiellement de sa mesure. Si le problème d'appareil de mesure est désormais maîtrisé, il se pose encore le problème de la représentativité des points de mesure (c'est aussi une difficulté liée à l'étendue du bassin).

#### Le débit.

Le débit dépend de l'hydrographie. Les débits véhiculés dans les rivières sont sujets à des variations d'origines diverses ; ce sont des phénomènes mécaniques qui sont décrits à partir des équations fondamentales de la mécanique des fluides. Un modèle mathématique traduisant ces phénomènes est le système de Saint Venant. Son application sur une longueur d'un réseau hydrographique donné, nécessite les mesures des débits aux deux extrémités. La technologie permet aujourd'hui d'avoir de mesures de débits très précises.

L'importance des mesures en pluie comme en débit est primordiale pour toute étude hydrologique.

Il existe des modèles spécifiques à chacun des facteurs ci-dessus décrits (modèles géomorphologique pour le milieu, pluviométrique pour la pluie et hydraulique pour le débit ou l'écoulement en rivière). Nous n'abordons pas dans notre travail cet aspect spécifique mais la combinaison de ces trois facteurs qui conduit à la modélisation hydrologique.

Notre étude concerne le bassin versant du Bam-Bam à Tialozoudou (Tchad) constitué de cinq bassins imbriqués les uns dans les autres ou adjacents et porte sur les mécanismes de transformation de pluie en écoulement rapide. Elle comporte trois grandes parties.

Dans la première partie nous présentons le milieu physique de notre site d'étude après une brève description du territoire du Tchad ; nous faisons ensuite l'étude des précipitations notamment : la forme, le déplacement sur le bassin et la répartition spatiale ; nous terminons cette présentation par l'étude des caractéristiques des crues et des données hydrométriques.

La deuxième partie concerne l'application aux différents bassins du modèle hydrologique choisi en approche globale, avec la division désormais classique de type de modélisation hydrologique production d'une part et transfert de l'autre.

La troisième partie est consacrée à une interprétation et à une discussion des résultats obtenus et aborde d'autres voies de modélisations.

Nous terminons notre travail par une discussion sur ces différentes approches en essayant de dégager des avantages éventuels de l'une par rapport à l'autre et faire des propositions pour des améliorations possibles.



**1<sup>ère</sup> Partie**

**Le milieu**



La première partie de notre travail comporte trois chapitres qui sont :

- 1 - géographie physique,
- 2 - pluviométrie et
- 3 - hydrologie.

Dans le chapitre géographie physique nous présentons le Tchad dans le monde à travers une carte ainsi que le Tchad en Afrique. Ensuite nous décrivons brièvement les grands traits physiques du Tchad notamment le climat, la géologie, les sols et la végétation. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous présentons avec plus de détails les traits physiques du Bam-Bam, notre bassin d'étude.

Dans le chapitre pluviométrie, nous présentons l'équipement pluviométrique du bassin. Ensuite nous faisons l'étude des relevés pluviométriques et à partir des événements les plus importants, nous étudions la répartition spatiale des précipitations, la forme et le déplacement des averses sur le bassin.

Dans le chapitre hydrologie enfin, nous définissons les principales caractéristiques d'une crue. Puis nous faisons l'analyse et la critique des données hydrométriques bassin par bassin pour retenir les crues raisonnables qui serviront à notre étude.

## I - 1 Géographie Physique

Ce chapitre constitué de deux paragraphes, est consacré à la présentation du contexte géographique : le Tchad en général dans le premier paragraphe et le bassin versant du Bam-Bam avec plus de détails dans le deuxième.

### I - 1 - 1 - Le Tchad

Appartenant politiquement et économiquement à l'Afrique Centrale, le Tchad est plutôt connu comme pays du Sahel (que la sécheresse a propulsé dans les premiers rangs de l'actualité mondiale) avec le Burkina-Faso, le Cap Vert, la Gambie, la Guinée Bissau, le Mali, la Mauritanie, le Niger et le Sénégal dont il est le plus grand en superficie.

Le Tchad est situé tout entier dans l'hémisphère Nord, entre le 8° parallèle et le Tropique du Cancer, et entre le 14° et le 24° degré de longitude Est. Il appartient au monde des pays en voie de développement (figure I - 1). Le Tchad souffre aussi de l'enclavement (figure I - 2) ; enserré au nord par la Libye, à l'est par le Soudan, à l'ouest par le Cameroun, le Nigéria et le Niger et, au sud par la République Centrafricaine, il n'a aucune ouverture sur la mer, trait d'union entre les continents.

Couvrant une superficie de 1 284 000 km<sup>2</sup>, le Tchad connaît une grande diversité physique que nous décrivons dans les pages qui suivent.

Le Tchad est sous peuplé avec une population d'environ 5 000 000 d'habitants soit moins de 4 habitants au km<sup>2</sup> très inégalement répartie : l'ouest du Chari (figure I - 3) qui ne représente que 10 % du territoire regroupe 48 % de la population ; cette région est cependant loin d'être surpeuplée.

Cette faible population est par contre très diversifiée du point de vue langues. On compte douze groupes de langues regroupant plus de 200 dialectes (ce qui ne facilite pas la communication entre différents peuples).

La population tchadienne est à plus de 80% rurale et pratique essentiellement les activités économiques suivantes : agriculture, élevage et pêche. Les seules activités industrielles concernent la transformation de certains produits agricoles (coton, arachide, tabac) et de l'élevage (viande, fromage). La difficulté de l'industrialisation du Tchad a pour principale cause le manque d'énergie. Le pays est en effet actuellement dépourvu de sources d'énergie et doit donc importer des produits pétroliers dont la cherté ne garantit pas la rentabilité industrielle.

Le pays dispose cependant beaucoup de potentialités inexploitées même du point de vue hydrologique. Le Tchad possède en effet environ 3000 km de cours d'eau permanents dont les plus importants sont les fleuves Chari et Logone et aussi plusieurs lacs dont le plus grand donne son nom au pays.

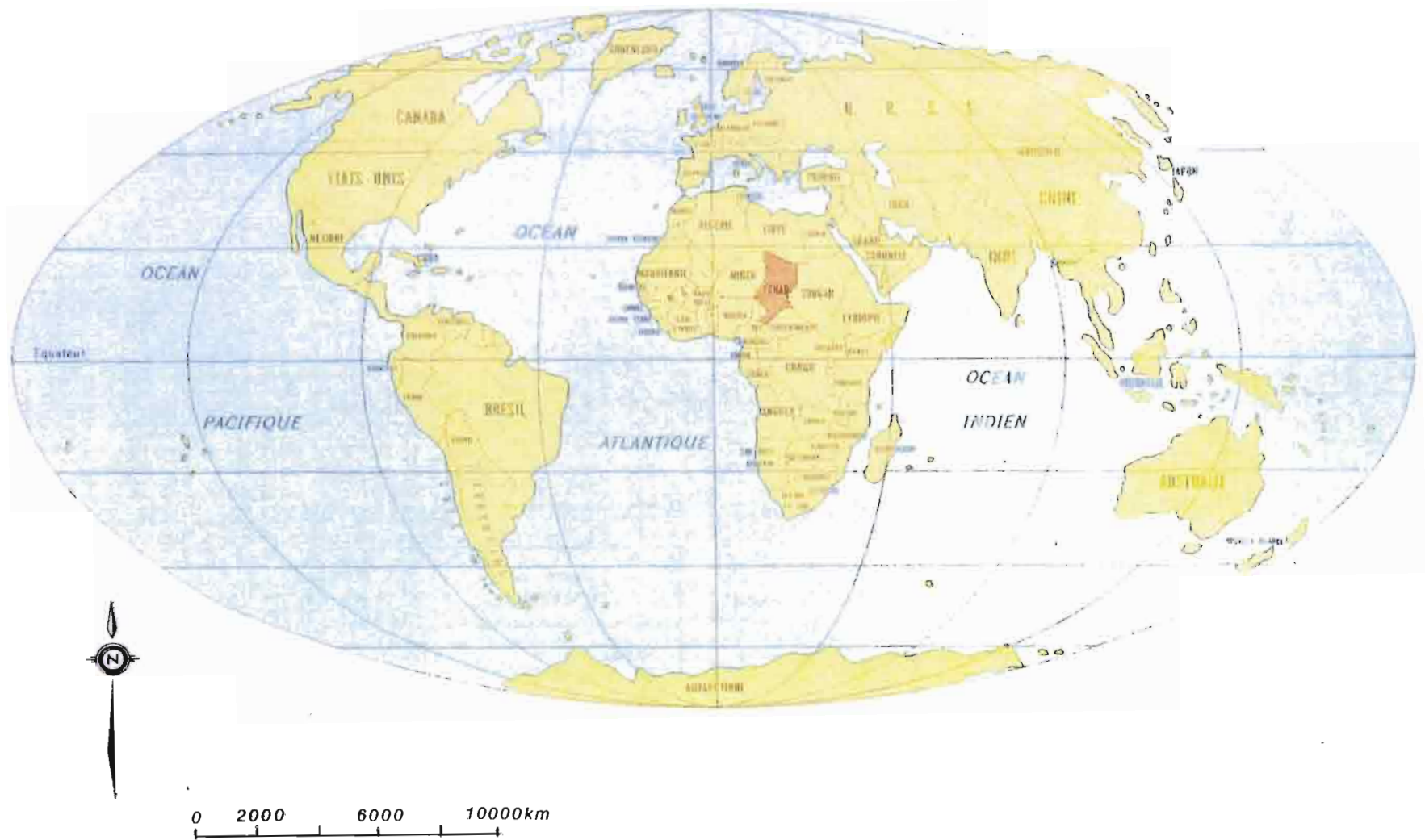
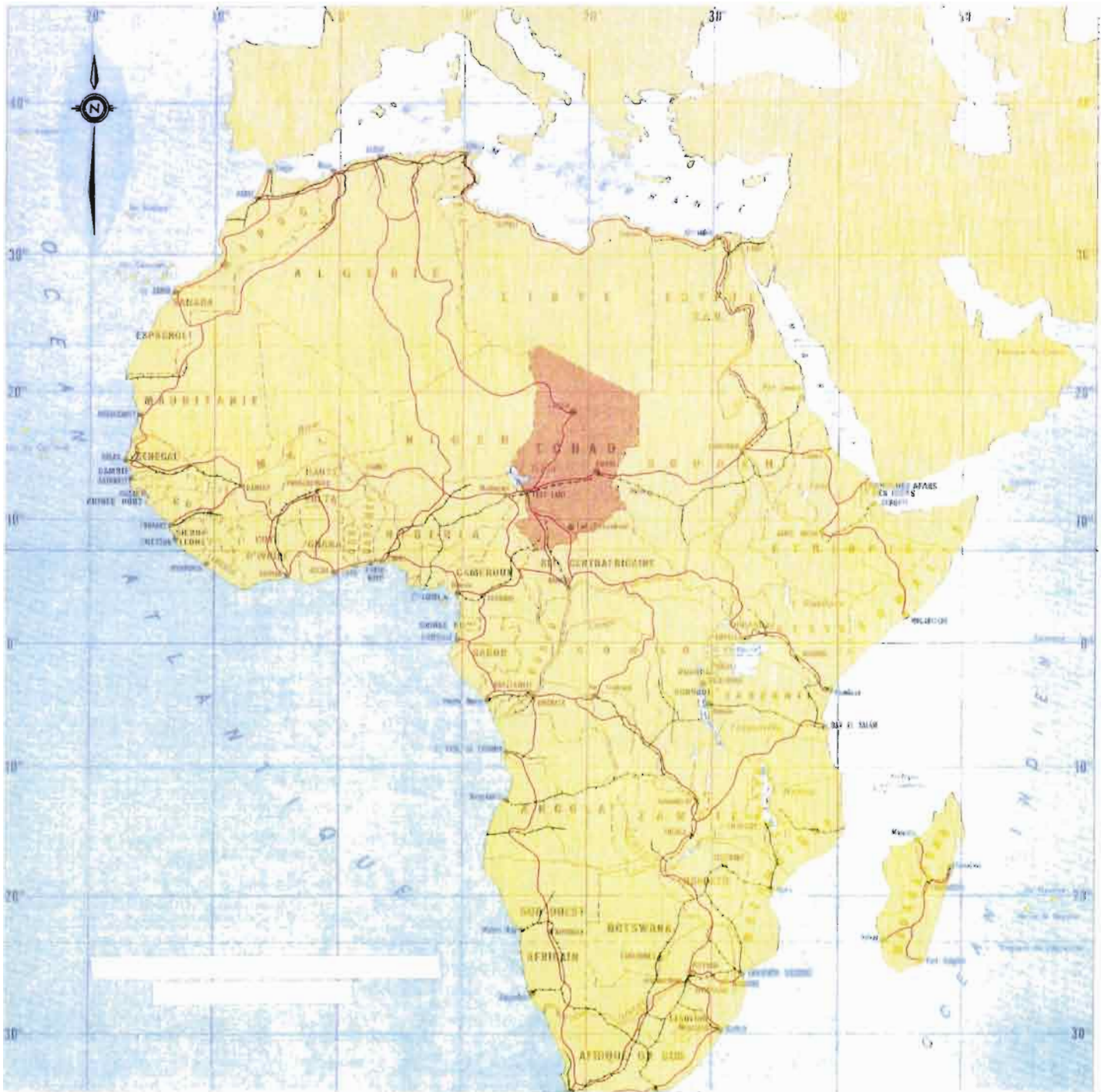


Fig-I-1- Le Tchad dans le monde

(Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972)



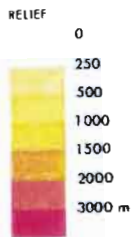


7.6

Fig-1-2- Le Tchad en Afrique

(Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972)





puits

zone inondable

ensablement intense

Bassin versant du Bam-Bam

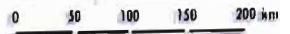
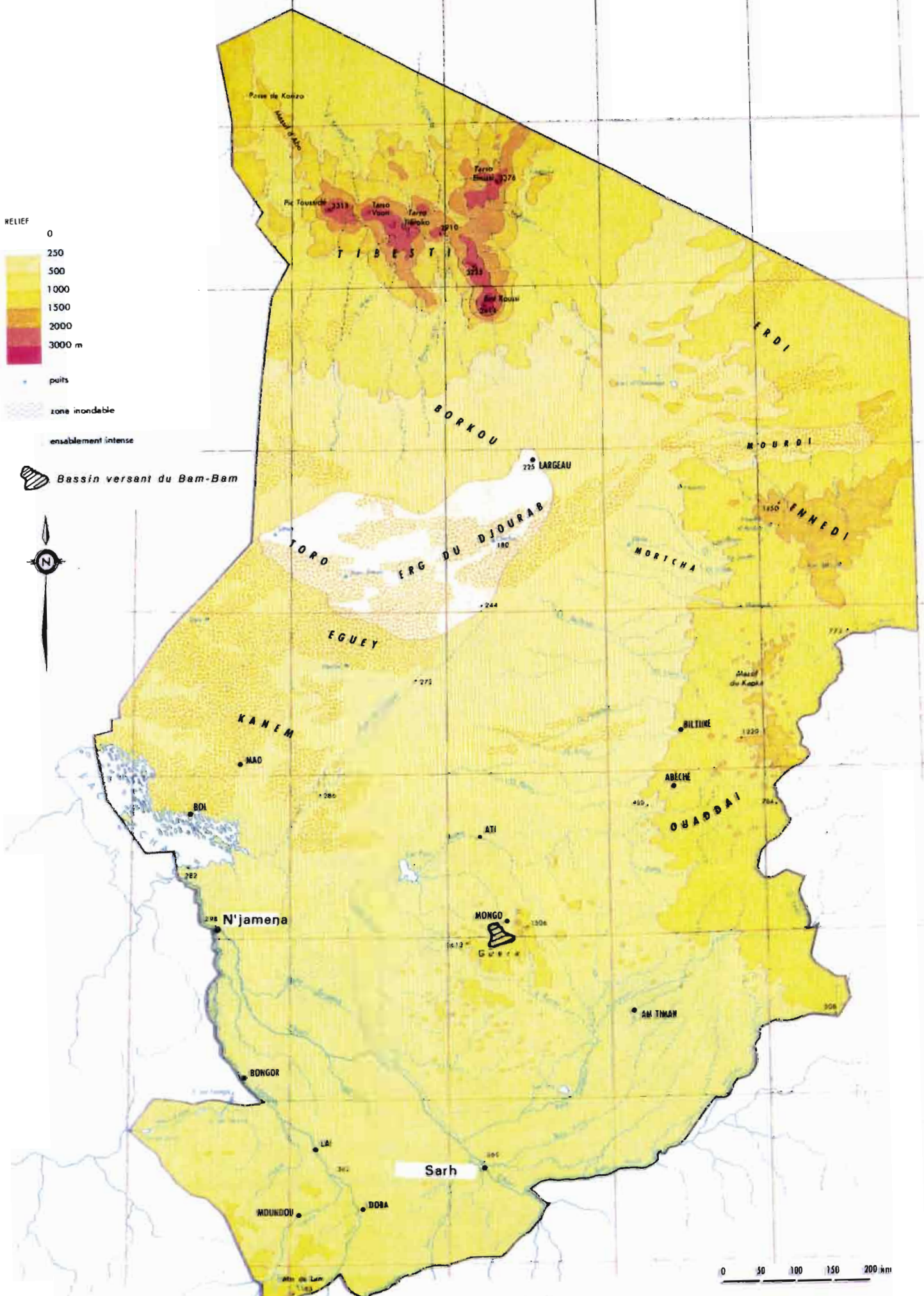


Fig-1-3- Le Tchad physique

(Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972)



### I - 1 - 1 - 1 - Climat

Le territoire tchadien connaît du Sud au Nord la succession des climats tropicaux à nuance sèche, où prédominent successivement et sans partage une saison sèche et une saison humide. La durée de chacune des saisons est strictement liée à la latitude. La quantité et la durée des pluies dépendent directement de la position occupée par les masses d'air qui s'affrontent et se déplacent en suivant la position zénithale du soleil.

La masse d'air continental sec, saharien, qui s'étend sur la Libye et le Sahara, envoie un flux d'alizé de secteur nord-est qui souffle durant toute la saison sèche et atteint le sud du pays en janvier-février.

La masse d'air humide en provenance du golfe de Guinée fournit un flux de mousson sud-ouest (il s'agit en fait de l'alizé austral dévié du sud-est au sud-ouest par le franchissement de l'équateur géographique). L'avancée de ce flux est maximum en août au nord du lac Tchad.

Cette masse d'air maritime se glisse en biseau sous la masse d'air continental. L'affrontement des deux masses détermine le front de convergence intertropical ou F.I.T. Celui-ci se déplace du sud au nord et du nord au sud en suivant, avec un léger décalage, les oscillations zénithales du soleil. Une large bande de direction grossièrement parallèle se trouve affectée par le passage du F.I.T. L'inclinaison du front de convergence donne à la masse humide pénétrant en coin sous la masse continentale sèche des épaisseurs progressivement croissantes du nord au sud. A chacune de ces épaisseurs correspond un type de temps caractéristique dont la manifestation se produit chronologiquement sur chacune des zones que cette masse d'air humide traverse (figure I- 4).

Si l'on schématise successivement, du nord au sud, les types caractérisés par le domaine de l'alizé continental, celui du biseau de mousson et celui de la masse de mousson, on obtient la succession :

- domaine de l'alizé sec : ciel clair, cirrus d'altitude, vent de sable ;
- domaine du biseau de mousson : vents de convection, tourbillons, plus au sud : cumulus et pluies de convection ;
- domaine de la masse de mousson : cumulus, orages, lignes de grains.

La succession des types de temps se déroule donc assez régulièrement au cours de l'année. De novembre à mars-avril, tant que dominant les hautes pressions continentales et le vent de nord-est (harmattan), le ciel est dégagé de nuages. Mais la violence du vent s'exerçant sur les sols desséchés soulève des voiles de poussière qui masquent le soleil une partie de la journée. Le

degré hygrométrique est très bas, l'évaporation intense. Dès le mois de mars-avril, le sud du territoire est le siège d'affrontements des grandes masses d'air. La mousson de sud-ouest qui avance en direction du tropique enfonce son coin sous la masse continentale, provoquant ainsi les premières tornades sèches, puis les premières pluies de convection. Cette première zone d'instabilité progresse du sud au nord : de Moundou, où elle se manifeste souvent dès le mois de mars, à N'Djaména, où elle arrive fin avril, début mai. Elle est suivie par la masse épaisse du flux de mousson qui atteint 1500 mètres au sol et développe des systèmes nuageux générateurs des pluies fréquentes (17 jours par mois) et abondantes. Durant trois mois : juillet, août, septembre, la zone des pluies s'étend sur tout le sud du Tchad. Le total des précipitations décroît régulièrement de la bordure montagneuse au sud, aux plaines dunaires des abords du lac Tchad au nord.

Dès la fin septembre, les pluies diminuent en fréquence et en quantité. La masse d'air humide se retire assez rapidement vers le sud. Le mois d'octobre est encore marqué par quelques orages dûs au passage à altitude de plus en plus basse du F.I.T. A la fin octobre, seule la masse d'air continental domine le sud du Tchad. La saison sèche s'installe et débute par l'intense évaporation des eaux épanchées pendant la saison des pluies.

Si l'on compare les manifestations climatiques dans le bassin du Tchad avec celles de la bande soudanienne qui lui correspond en Afrique Occidentale, on constate un décalage des isohyètes vers le sud. Il semble que la masse montagneuse de l'Adamaoua et du massif de Yadé au Cameroun retarde la pénétration du flux de mousson en direction du Tchad. Cependant, ces massifs bénéficient eux-mêmes des pluies très abondantes étalées sur une période plus large que celle du bassin.

Ainsi les précipitations commencent-elles plus tard et leur total est moins élevé à latitude égale au Tchad qu'en Afrique Occidentale.

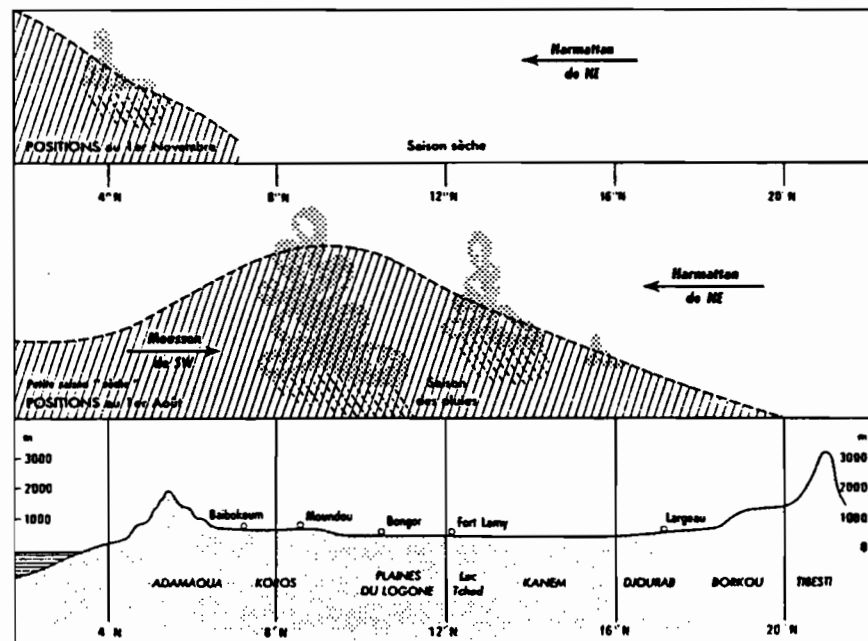
### **Types de climat**

Le Tchad classé pays du Sahel est en réalité soumis à trois grandes zones climatiques :

- La zone désertique au nord occupe plus de la moitié du territoire. Elle est limitée au sud par l'isohyète 350 mm. La saison des pluies diminue progressivement jusqu'à s'annuler dans les hautes latitudes. On peut diviser cette zone en trois variantes :

- + le climat subdésertique reçoit entre 200 et 350 mm de précipitations ;
- + le climat désertique tropical qui reçoit moins de 50 mm à 200 mm ;
- + le climat saharien à l'extrême nord, caractérisé par l'absence de pluie ou recevant moins de 50 mm.

- La zone sahélienne comprise entre les isohyètes 800 et 350 mm. La saison des pluies s'étend approximativement du 15 juin à fin octobre.
- La zone tropicale reçoit 800 à plus de 1100 mm avec une saison des pluies s'étendant approximativement du 1<sup>er</sup> juin au 15 novembre.



**Figure I - 4 : Position des masses d'air (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).**

### I - 1 - 1 - 2 - Géologie

Les roches les plus anciennes, précambriennes (d'âge moyen 1 milliard d'années) qui apparaissent sur le territoire du Tchad se trouvent à sa périphérie : granits et roches cristallophylliennes du Tibesti au nord, du Ouaddaï à l'est, des monts de Lam au sud. Elles apparaissent également par place au coeur de la cuvette où elles émergent de la sédimentation plus récente. La cuvette tchadienne serait morcelée en une série de petites cuvettes parallèles que les pointements cristallins permettent de délimiter par leurs orientations générales (NNE-SSW et ESE-WNW). Les sondages et la prospection aéromagnétique permettent de déceler la régularité du socle et son léger pendage vers le sud-ouest jusqu'à la frontière occidentale du Tchad. Au Précambrien appartiennent également les grès tibestiens formant les Tarsos (hauts plateaux) à l'intérieur du massif.

Les séries primaires (Cambro-Ordovicien, Dévonien et Carbonifère) n'apparaissent qu'au Nord du pays dans le Borkou, l'Ennedi dont elles constituent essentiellement les grands entablements gréseux. Les dépôts sont contemporains des premières manifestations de la vie dont les fossiles d'organismes animaux et végétaux sont témoins (Bilobite et Harlamia des grès tassiliens, poissons du Carbonifère).

Le Secondaire est peu représenté au Tchad :

- Au Nord de l'Ennedi, les grès de l'Erdi sont à raccorder à la série des grès de Nubie.
- Dans le Mayo-Kebbi (préfecture qui tient son nom d'un fleuve : figure I - 3) la série de Lamé marque l'extension la plus orientale de la transgression marine par le fossé de la Bénoué (Cénomaniens).

A l'exception des dépôts marins de l'Eocène au Nord du Tibesti, les formations tertiaires du Tchad sont essentiellement continentales et sont appelées Continental Terminal (CT). Le CT a bien été étudié au sud du Tchad où il couvre une partie importante des bassins du Logone et du Moyen Chari où l'on distingue :

- une série inférieure comprenant des grès ferrugineux (grès de Pala), des sables beiges avec cuirasses fossiles et niveaux d'argilites;
- une série moyenne de sables rouges;
- une série supérieure plus ou moins cuirassée.

Les séries du CT n'ont été conservées que dans les régions où elles étaient protégées par des formations indurées. Les interfluves appelés Koros (bas plateaux sablo-argileux) ont été cuirassés au cours du Quaternaire. Le niveau principal de ce cuirassement se suit depuis le socle cristallin méridional jusque dans la région du Mayo Kebbi. On le retrouve autour du Massif Central tchadien jusqu'au Ouaddaï.

Ce sont les formations quaternaires qui occupent la plus grande place au coeur du bassin du Tchad. Grâce aux études de l'ORSTOM et du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), la datation relative de ces formations a été précisée. La chronologie de leurs dépôts se confond avec les variations de niveau du lac Tchad liées aux variations climatiques du dernier million d'années. Les périodes humides ont favorisé le dépôt de diatomites et d'argiles, les périodes à saisons alternées ont été marquées par le dépôt d'alignements sableux deltaïques tandis que les périodes arides accumulaient les formations dunaires. D'autre part, plusieurs lignes de rivage et accumulations de deltas correspondant aux extensions et régressions successives du lac Tchad au cours du Quaternaire ont été identifiées par la présence des cordons sableux et par la nature des sédiments déposés. On peut dire que l'histoire quaternaire du Tchad se confond avec celle des variations de niveau du lac. L'extension lacustre la plus ancienne du Quaternaire atteignait au Nord le Borkou, à l'Est le Ouaddaï et le Massif Central, au Sud la région des Koros et le seuil cristallin du Mayo Kebbi par lequel les eaux du paléo-Tchad se sont à plusieurs reprises déversées en direction de l'Océan Atlantique par la voie de la Bénoué. Les dépôts correspondant à cette extension constituent la série argilo-sableuse à concrétions calcaires dont les limites sont cartographiées en alluvions du Quaternaire moyen. Une variation climatique vers la sécheresse entraîne le retrait du lac, la formation du premier delta du Chari (triangle Miltou-Bongor-Bokoro) et d'accumulations dunaires surtout visibles au Cameroun et au Nigéria. La seconde extension du lac (période humide) est donnée par le tracé du cordon lacustre (320 m). Au cours de cette période le déversement en direction de la Bénoué se rétablit par les lacs toubouris (lac Fianga et lac Tikem : figure I - 3) tandis que se dépose la série argileuse récente. Avec le retrait du lac se constitue le second delta du Chari. La dernière transgression est délimitée par le cordon sableux de la cote 278 - 290 m. L'actuel delta du Chari correspond au retrait des eaux du lac dans leurs limites actuelles.

Les figures I - 5 et I - 6 présentent la géologie et l'hydrogéologie du Tchad.



**QUATERNAIRE RÉCENT**

- Dunes actuelles
- Recouvrement éolien
- Alluvions récentes (limons, argiles)
- Dépôts lacustres Argiles
- Deuxième cordon
- Ancien rivage lacustre (320 m)

**QUATERNAIRE MOYEN**

- Dunes anciennes
- Alluvions anciennes (sables, graviers)
- Deuxième delta du Chari

**QUATERNAIRE ANCIEN**

- Premier delta du Chari
- Série du Moji et de Padelenge (argiles, diatomites)
- Villafranchien (sables, argiles, diatomites)

**TERTIAIRE**

- Continental terminal (argiles, grès argileux)
- Eocène marin

**ROCHES VOLCANIQUES**

- Volcans tertiaires et quaternaires

**SECONDAIRE**

- Continental intercalaire (essentiellement gréseux)
- Crétacé marin (grès, marnes, calcaires)

**PRIMAIRE**

- Carbonifère (marnes, grès, calcaires)
- Dévonien moyen et supérieur (grès)
- Cambro-Ordovicien et Dévonien inférieur (grès des Tessilis)

**PRÉCAMBRIEN**

- Infra-Cambrien
- Tibésien supérieur
- Tibésien inférieur
- Granite intrusif

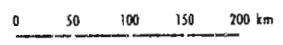
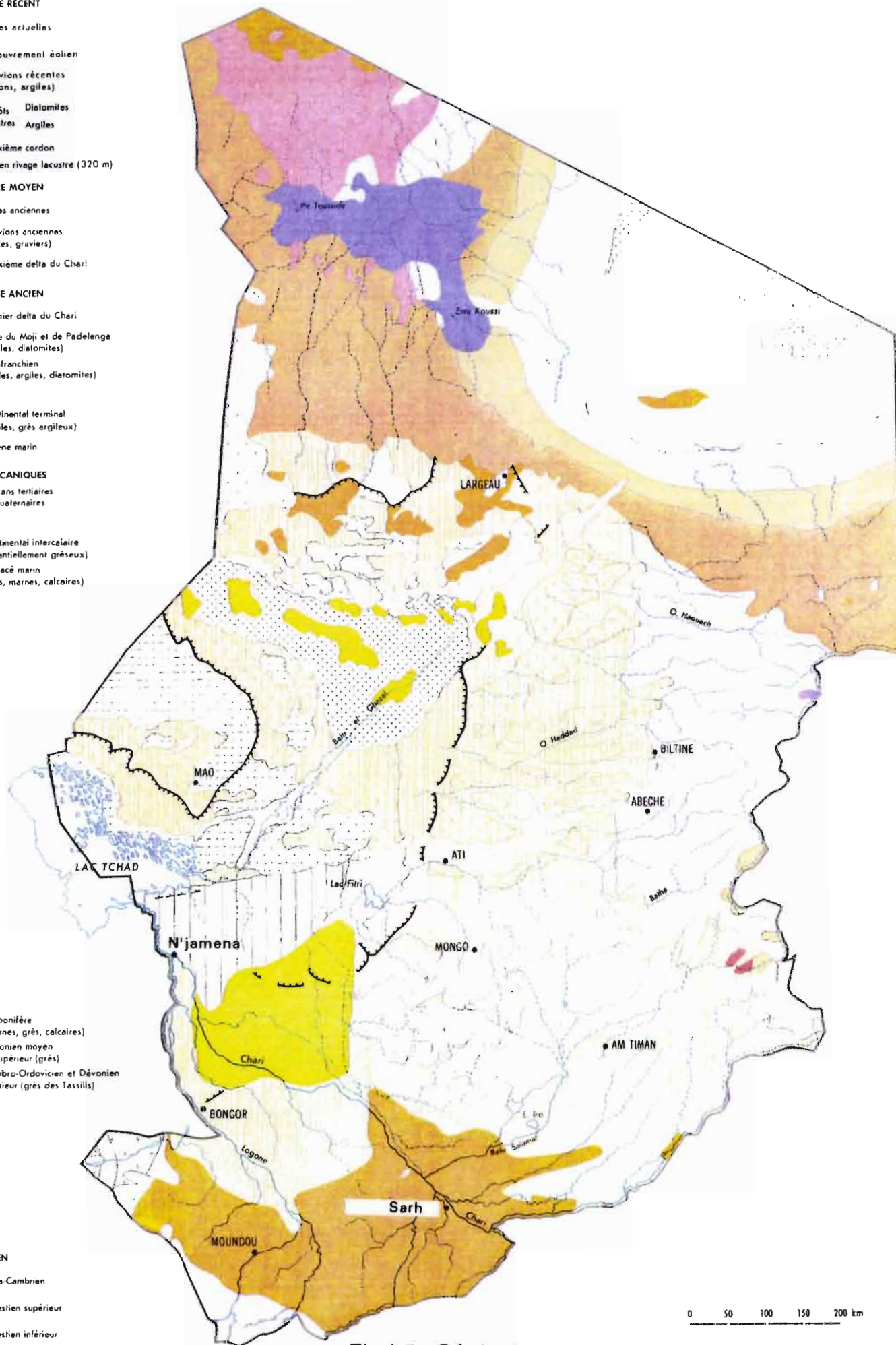


Fig-1-5- Géologie du Tchad

(Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972)



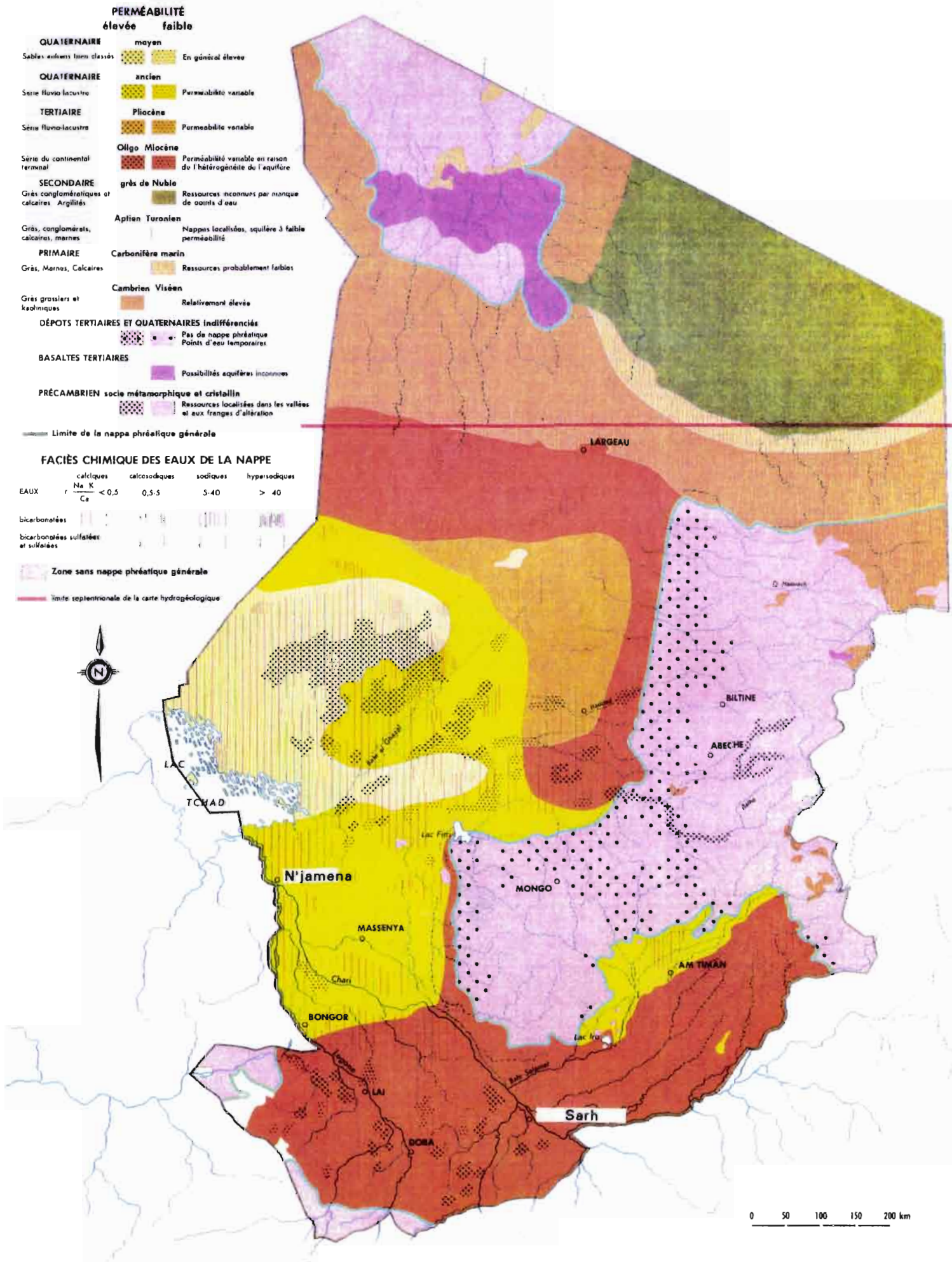


Fig-I-6- Tchad - Hydrogéologie

(Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972)



### I - 1 - 1 - 3 - Sols

Un certain nombre de facteurs entrent en jeu dans l'explication de la formation des sols : la nature de la roche-mère, les caractéristiques du climat, l'action de l'homme et la nature de la végétation. D'une façon générale, la roche-mère est plus profondément attaquée sous climat très humide et les sols sont alors relativement profonds (8 à 12 mètres). Lorsque, au contraire, une saison s'individualise nettement, l'attaque de la roche-mère est moins profonde et des cuirasses ferrugineuses peuvent se former par évaporation de l'eau et fixation du fer précédemment dissous.

Le Tchad est sous l'influence d'une zonation climatique qui conditionne quatre types principaux de sols :

- sols ferralitiques,
- sols ferrugineux tropicaux,
- sols subarides,
- sols désertiques.

Cependant, des nuances se dessinent dans les trois premiers cas selon l'inondation.

Dans les zones exondées, la distribution des sols est la suivante :

- Les sols ferralitiques couvrent une partie du Tchad méridional recevant de 1100 à 1300 millimètres de précipitations.
- Les sols ferrugineux tropicaux se partagent le Sud du Tchad avec les sols ferralitiques, mais deviennent majoritaires dans la zone soudanienne moins arrosée. D'importantes formations de cuirasses autour des Monts de Lam et à la périphérie du massif du Guéra, se prolongeant jusqu'à la frontière du Soudan.
- Les sols bruns rouges subarides sont constitués par les sables des dunes au Nord du treizième parallèle.
- Les sols gris désertiques sont si pauvres et si secs que la végétation est contractée. Les régions sahariennes qui en sont dotées, inaptées à l'agriculture, ne présentent d'intérêt pastoral que par l'existence de quelques puits jalonnant le parcours des caravanes (c'est essentiellement le domaine de passage des camelins).

Au Sud du douzième parallèle, dans le Bahr-El-Ghazal et au pied du Ouaddaï, l'hydrographie introduit de nouveaux types de sols du fait des inondations saisonnières :

- Les sols hydromorphes jalonnent le cours du Chari, du Logone et de leurs principaux affluents. L'apport limoneux des fleuves et l'humidité leur confèrent une fertilité intéressantes.

- Les vertisols des plaines d'inondation sont des argiles noires tropicales qui tapissent les fonds des zones marécageuses entre le Chari et le Logone, dans les marécages du Salamat et les zones basses du pourtour du Guéra.

- Les sols halomorphes ont connu des processus de salinisation qui les rendent pratiquement impropres à toute culture. Ils occupent, en règle générale, des zones de faibles inondations en aval du Bahr-El-Ghazal, dans le piedmont du Ouaddaï et au Nord du bassin alluvial Logone-Chari. Ils couvrent des étendues stériles dans les régions défavorisées par la pluviométrie et pour la plupart livrées à la transhumance des éleveurs.

Il reste les zones rocheuses du Tibesti, du Ouaddaï et du Guéra où de maigres sols d'érosion se logent entre les pointements granitiques, sur des superficies trop étroites pour que l'on puisse envisager une forte occupation agricole.

### I - 1 - 1 - 4 - Végétations

Les formations végétales qui se succèdent du Sud au Nord du Tchad s'ordonnent dans leur ensemble conformément à la zonation climatique qui découle de la durée de la saison des pluies et du total de celles-ci .

- **Le domaine soudano-guinéen** correspond au climat tropical humide accusant plus de 1000 millimètres de précipitations. Il englobe deux types de formation :

+ **La forêt claire à légumineuses et combrétacées** dominantes limitée à l'extrême sud du territoire ;

+ **La savane arborée forestière** formation dont la composition peut varier sur la proportion des espèces suivantes : *Isobertia doka*, *Prosopis africana*, *Anogeissus leiocarpus*, *Burkea africana*, *Butyrospermum parkii* (karité). Lorsque les mises en culture répétées font disparaître le couvert forestier, l'agriculteur conserve cependant certaines espèces : karité (*Butyrospermum*), caïlcédrat (*Khaya senegalensis*).

- **Le domaine soudanien** recevant de 1000 millimètres à 700 millimètres de précipitations correspondant à la formation des savanes soudaniennes plus ou moins boisées à combrétacées. On y trouve les espèces suivantes : *Anogeissus leiocarpus*, *Combretum glutinosum*, *Acacia sieberiana*, *Kaya senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Terminalia*, ... La conservation de certaines espèces peut donner aux espaces intensivement cultivés un aspect savane-parc à dominantes variées : *Faidherbia albida*, Rôniers (*Borrassus*), palmiers doums (*Hyphaene thebaïca*). Le tapis graminéen varie du Sud (*Andropogon gayanus* et *Pennisetum pedicellatum*) au Nord où dominant les espèces annuelles (*Hyparrhenia rufa*, *Ctenium elegans*, ...). L'inondation des plaines repousse la végétation vers les terres exondées. La densité du peuplement arboré est fonction de l'épaisseur de la nappe d'inondation. Certaines essences ligneuses parviennent à se maintenir quand l'inondation n'est pas trop profonde (*Bauhinia réticulata*, *Combretum glutinosum*, *Gardena termifolia*, *Terminalia macroptera*, *Mitragyna africana*).

- **Le domaine sahélo-soudanien** correspond à la marge sud du climat sahélien (précipitations comprises entre 700 et 500 millimètres) avec des incursions vers les domaines les plus secs au nord en fonction des sols et de l'alimentation en eau. La formation caractéristique est la savane arbustive où dominant les Acacias (*Acacia sénégale*, *Acacia scorpioides*, *Acacia seyal*) et autres arbustes épineux (*Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritania*, ...). Le tapis graminéen est composé d'andropogonées. Les anciennes jachères sont facilement repérables à la prolifération de *Calotropis procera*, rudérale caractéristique ainsi qu'aux repousses buissonnantes de doum (*Hyphaene thebaïca*).

- **Le domaine sahélien** correspond à la marge nord du climat sahélien et au climat subdésertique c'est-à-dire aux régions recevant moins de 500 millimètres de précipitations. Il est caractérisé par des formations basses, ouvertes ou pseudo-steppes. Les espèces dominantes sont les Aristidés (*Aristida mutabilis*, *A. pallida*, *A. stipoides*, *A. papposa*, ...) à côté d'autres graminées et certaines formations du domaine sahélo-soudanien.

- **Le domaine désertique** est caractérisé par des sols nus ; la végétation y est contractée. La seule présence végétale permanente ne se rencontre que dans les palmeraies les Ouadi à cause de l'eau à fleur de sol.

- **Les groupements appartenant à plusieurs domaines.**

Il s'agit de la végétation très clairsemée des sols de reg qui portent en surface un cailloutis quartzeux roulé de faible dimension sur des sols de texture argilo-sableuse, exceptionnellement argileuse et couverts localement par des plages de sables superficiels. Ces sols portent des associations particulières qui varient du Sud au Nord du territoire. Dans le Sud ils portent une savane arborée dégradée avec espèces déjà sahéliennes : *Balanites*, *Acacia seyal*, *Lanea humilis*. Vers le Nord *Lanea* cède la place à *Maerua crassifolia*.

Le vaste territoire du Tchad présente un aspect physique très varié, de l'aridité désertique au nord avec des sols nus, on passe progressivement à l'humidité tropicale correspondant au domaine soudano-guinéen au sud où la densité forte des forêts annonce les formations équatoriales.

## **I - 1 - 2 - Le Bam-Bam**

Le bassin du Bam-Bam étant notre site d'études, fait l'objet d'une présentation physique plus détaillée que le cadre général du Tchad.

### **I - 1 - 2 - 1 - Situation géographique**

Le bassin versant du Bam-Bam à Tialozoudou couvre une superficie de 1196 km<sup>2</sup>, de forme ovale assez régulière (figure I - 7).

La situation géographique de son centre est définie par les coordonnées suivantes :

Latitude = 12° N

Longitude = 18°30' E.

Il est situé à une dizaine de kilomètres au Sud-ouest du centre de Mongo chef lieu de la préfecture du Guéra (le Guéra est un massif montagneux appelé aussi Massif Central tchadien).

Il appartient à la zone sahélienne décrite dans le cadre général du Tchad.

Le Bam-Bam contribue à l'alimentation du lac Fitri, vaste delta marécageux du Batha (fleuve qui donne son nom à une préfecture du Tchad dont le chef lieu est Ati).

### **I - 1 - 2 - 2 - Relief et hydrographie**

Le relief sur l'ensemble du bassin est homogène. Son altitude générale décroît de 600 mètres au Sud (partie amont) à 402 mètres à la station principale Tialozoudou au Nord. Seul l'extrême Nord-ouest est très accidenté avec un massif particulièrement développé qui culmine à 881 mètres. On note aussi la présence de plusieurs ensembles de rochers granitiques d'altitude 700 à 800 mètres qui pointent dans la partie Sud du bassin. Par rapport à l'ensemble du territoire tchadien qui ressemble plutôt à une immense plaine, le bassin est situé en zone montagneuse, en bordure nord du massif du Guéra dont le sommet atteint 1613 mètres (figure I - 3).

Le réseau hydrographique est très dense dans les zones d'arènes par suite de l'imperméabilité des sols et de l'intensité de l'érosion en nappe. En plaine, les cours d'eau creusent dans les argiles de multiples lits ensablés aux nombreux méandres. En saison des pluies, par suite de débordements, les plaines argileuses sont inondées. En amont de la station principale de Tialozoudou, on observe l'existence de trois bras : le cours principal au centre et deux bras latéraux servant à véhiculer initialement les débits des moyennes et fortes crues, mais qui, à l'occasion, sont également utilisés au transit de petites quantités d'eau provenant des rivières affluentes. En période de fortes crues, les eaux s'étalent sur près de trois kilomètres en amont de Tialozoudou.

### I - 1 - 2 - 3 - Sols

Par rapport à l'ensemble du pays, le bassin versant du Bam-Bam est situé à la limite nord du type des sols ferrugineux tropicaux. Les roches qui y apparaissent sont du Précambrien. Les sols sur l'ensemble du bassin doivent leur origine aux îlots rocheux du Précambrien, qui ont donné naissance à des formes dégradées du granit. Ils sont très dépendants de la topographie : des sols squelettiques des massifs montagneux proprement dits, on arrive dans les parties basses ou dépressions aux sols contenant 40 à 50 % d'argile, pauvres en matières organiques et bien pourvus en éléments minéraux offrant des conditions favorables au ruissellement. Les types de sols suivants peuvent être définis (figure I - 8) :

#### - Sols sur alluvions récentes.

Ces sols localisés le long du Bam-Bam et de ses principaux affluents, inondés au moment de la crue, contiennent une forte proportion de limon et de sable fin, la quantité d'argile étant variable, plus faible sur les bourrelets de berge, plus forte dans les dépressions et en profondeur. Sauf cas de submersion, le ruissellement sur ces sols reste fonction de l'humectation superficielle. Ils représentent 7,7 % de l'ensemble des sols (figure I - 8, sols A).

#### - Sols argilo-sableux contenant des nodules calcaires.

Ces sols subissent une submersion en saison des pluies, soit par les eaux de pluies elles-mêmes, soit par les eaux de ruissellement provenant des surfaces voisines peu perméables. Ils apparaissent érodés et portent en surface des nodules calcaires de diamètre de deux à huit centimètres. Ces sols, à faible perméabilité, ont un mauvais drainage. Ils occupent 9 % de la superficie du bassin (figure I - 8, sols B).

#### - Sols argileux à nodules calcaires et cailloutis superficiels très érodés.

Ces sols sont très faiblement inondés en saison de pluies. De faible perméabilité, ils sont cependant capables d'absorber une bonne quantité d'eau avant de n'assurer qu'un mauvais drainage. Ils occupent 19,4 % du bassin (figure I - 8, sols C).

- Sols sableux contenant des débris de roches, ou plus ou moins sablo-argileux, peu épais reposant sur des granites.

L'ensemble érodé est peu perméable ; l'emmagasinement des eaux reste fonction de l'épaisseur de ces sols ; le drainage est bon. Ils représentent 13,8 % de la superficie du bassin (figure I - 8, sols D).

- Sols sablo-argileux à argilo-sableux d'épaisseur variable de tendance halomorphe.

La présence d'horizons plus ou moins profonds et peu perméables provoque, à la suite des pluies abondantes, un engorgement en eau du sol. La perméabilité de l'horizon supérieur sableux est forte en début de saison de pluies, puis elle diminue fortement jusqu'à rejoindre certaines années la faible valeur des couches profondes. Profonds, ces sols localisent les zones où l'eau est abondante et les sources nombreuses. Occupant 42,7 % de la superficie du bassin, ils sont de loin les plus répandus (figure I - 8, sols E).

#### Sols squelettiques

Les eaux de ruissellement sur ces îlots sont en partie absorbées par les sols sableux et détritiques des piémonts. Ils représentent 7,4 % du bassin et sont les moins répandus (figure I - 8, sols G).

La combinaison des propriétés de l'ensemble des sols du bassin lui confère une bonne perméabilité. Il faut toutefois retenir que la perméabilité est fonction de la profondeur des sols qui est en général faible sur le bassin.

Le tableau I - 1 présente les différents types de sols par bassin exprimés en pourcentage.

Bassin	Sol A : alluvions récentes	Sol B : vertisols argilo-sableux	Sol C : vertisols argileux	Sol D : sableux et peu profond	Sol E : argilo-sableux à tendance halomorphe	Sol G : massif granitique
Bidjir	0	0	0	4,1	82,5	13,4
Taya	0,7	0	0,9	27,5	66,5	4,4
Tounkoul	6	0	0	41,4	51,9	0,7
Mazera	8,2	3,8	11,5	26,6	44	5,9
Barlo	5,5	6,4	22,2	11,1	49,7	5,1
Tialozoudou	7,7	8,9	19,4	13,8	42,7	7,4

**Tableau I - 1 : Types et pourcentage des sols des différents bassins versants.**

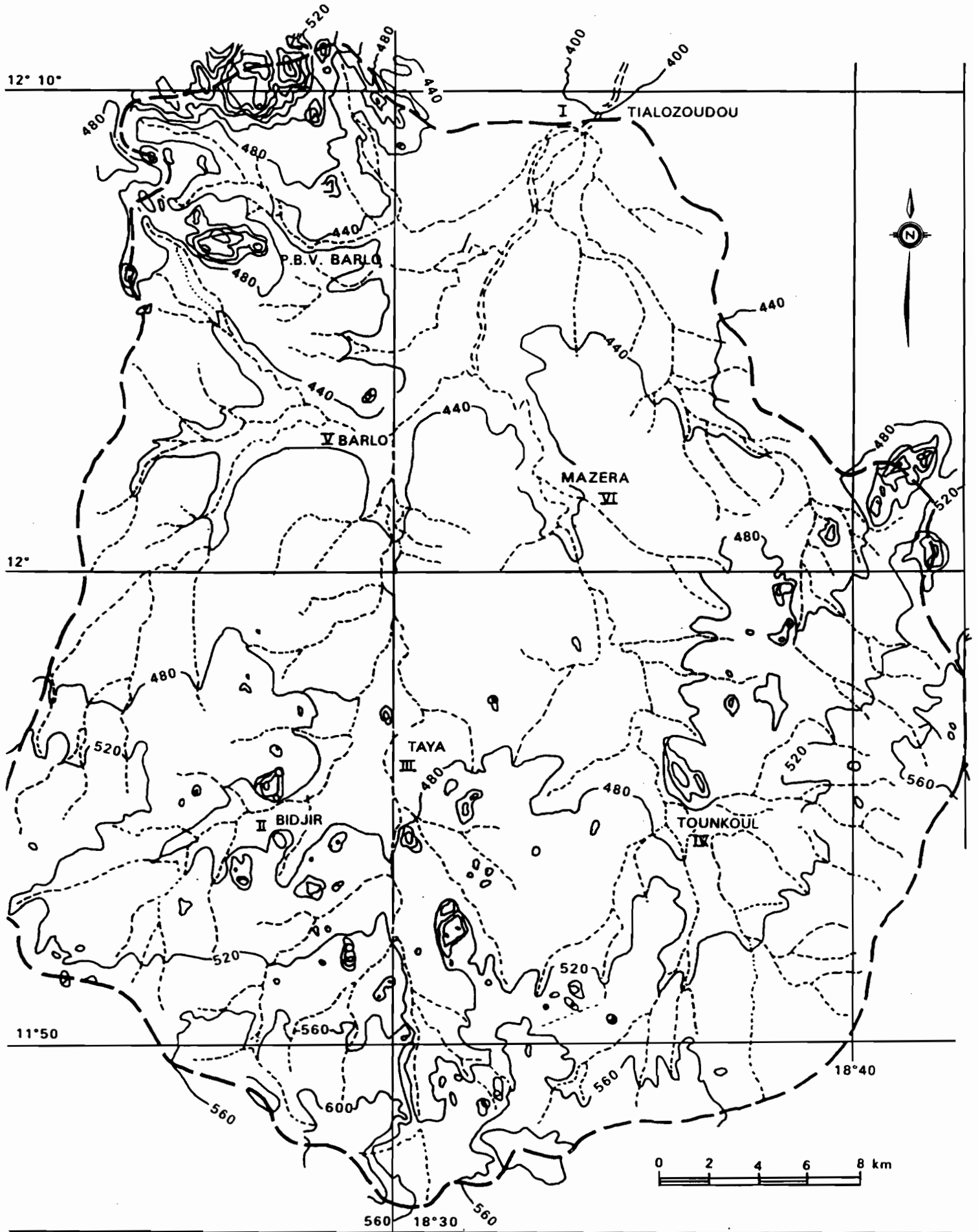


Fig-I-7- Le bassin versant du Bam-Bam à Tialozoudou

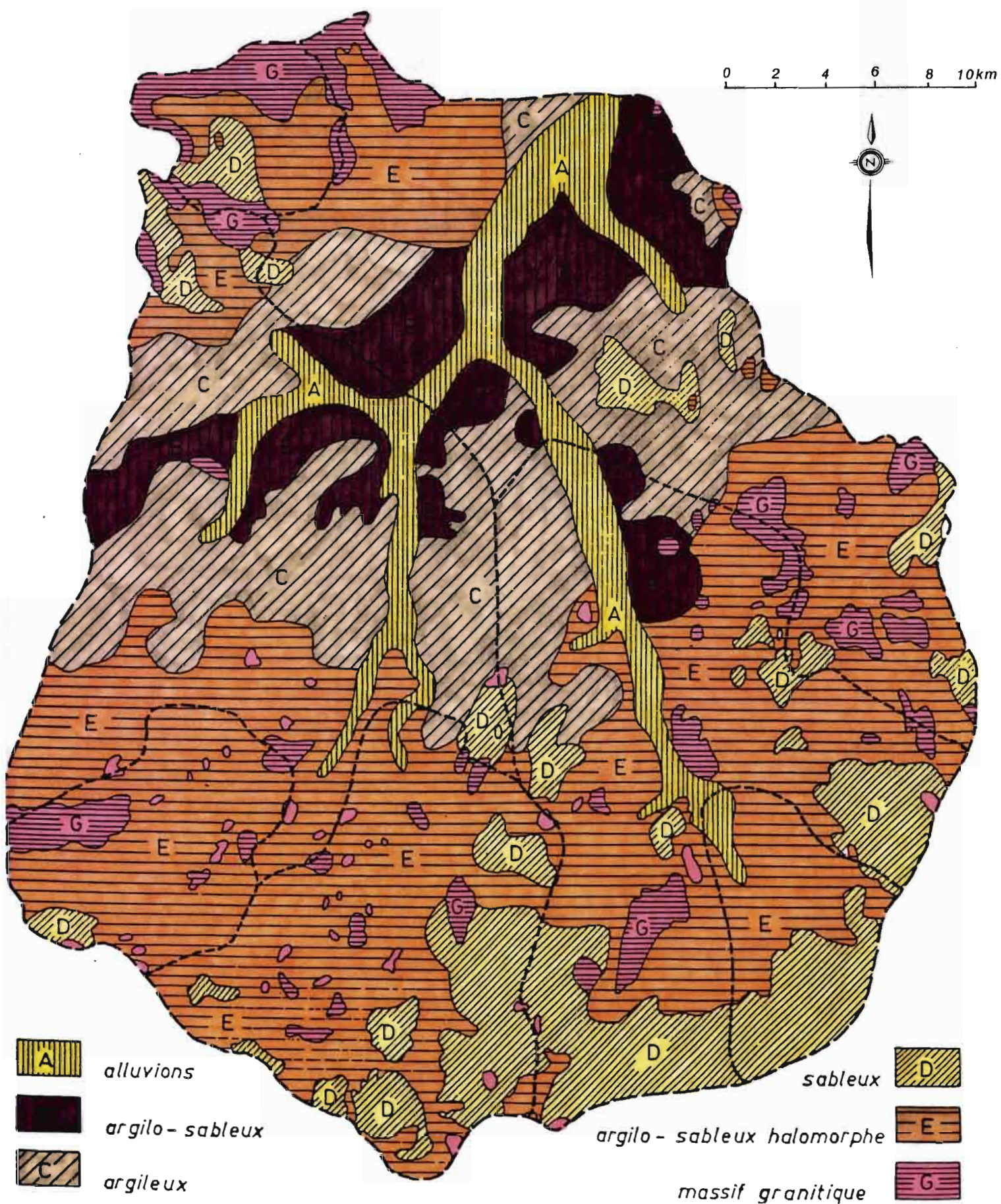


Fig-1-8- Carte pédologique du bassin versant du Bam-Bam



### I - 1 - 2 - 4 - Climat

La description du climat général du Tchad est faite au paragraphe I - I - 1 - 1. Le climat dans la région du Bam-Bam est caractérisé par deux saisons : une saison sèche de novembre à mai et une saison de pluies de juin à octobre.

#### - Précipitations

Environ 80 % des précipitations tombent en juillet, août et septembre par contre il ne tombe aucune goutte de pluie en décembre, janvier et février ( les précipitations sont étudiées en détail dans le paragraphe I - 2).

#### - Facteurs climatiques

La station climatique du service météorologique de Mongo située à une douzaine de kilomètres au nord-est du bassin nous fournit les données sur les facteurs climatiques et les précipitations. Cette station observée pendant une période continue de douze ans (1957 à 1966), permet d'évaluer les valeurs moyennes des principaux facteurs du climat.

#### - Température

Les moyennes mensuelles des températures maximales journalières varient de 29°6 C au mois d'août à 40°8 C au mois d'avril, celles des minimales de 18°4 C au mois de janvier à 26°4 C au mois d'avril. Le maximum et le minimum observés sur la période sont respectivement de 44°9 C et 8° C.

Température °C	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Maximum moyen	35,5	37,7	39,5	40,8	38,9	36,0	32,1	29,6	31,8	35,3	37,1	35,8
Minimum moyen	18,4	20,4	24,8	26,4	25,7	24,2	22,6	21,4	21,5	21,4	20,9	18,8
Moyenne	26,9	29,0	32,1	33,6	32,3	30,1	27,3	25,5	26,6	28,3	29,0	27,3
Maximum absolu	41,6	43,9	44,9	44,8	44,4	41,2	39,5	36,8	36,6	41,0	40,1	41,1
Minimum absolu	8,0	9,5	15,5	16,2	14,0	16,5	12,9	12,5	12,5	13,0	14,4	11,0

Tableau I - 2 : Températures moyennes et absolues relevées à la station de Mongo.

### - Hygrométrie

Les humidités relatives à 06 h TU varient de 28 % en février à 87 % en août et celles de 12 h TU de 15 à 67 % aux mêmes mois. Le tableau ci-après regroupe les humidités relatives moyennes de chaque mois.

Humidité relative (%)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
- 06 h TU	30	28	32	38	53	68	81	87	85	74	46	36
- 12 h TU	16	15	18	19	29	41	57	67	59	36	20	18

**Tableau I - 3 : Humidité relative relevée à la station de Mongo.**

### - Evaporation

L'évaporation journalière à l'évaporomètre Piche varie de deux millimètres par jour en août à quinze en mars. L'évaporation moyenne annuelle atteint 3150 millimètres.

### - Vents

La fréquence des directions des vents en saison sèche et en saison pluvieuse est indiquée sur la figure I - 7 pour différentes stations météorologiques du Tchad.

#### Vitesse

On peut distinguer cinq classes de vitesses. Le tableau suivant indique ces différentes classes avec le pourcentage des vents correspondants à Mongo.

Classe (m.s <sup>-1</sup> )	< 1	2 - 4	5 - 6	7 - 14	15 - 21
Pourcentage	59,1	33,6	4,6	2,6	0,04

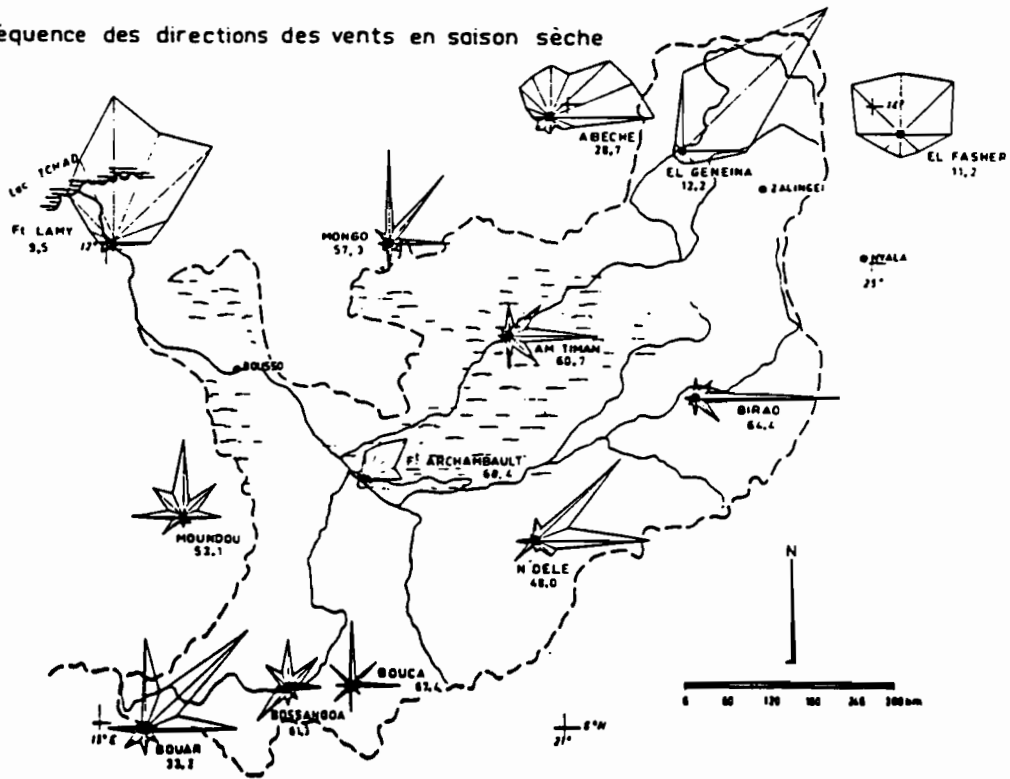
#### Direction

L'étude des directions des vents conduit à tracer les deux graphiques de la figure I - 9 Ces deux graphiques correspondent, l'un à la saison sèche, l'autre à la saison des pluies.

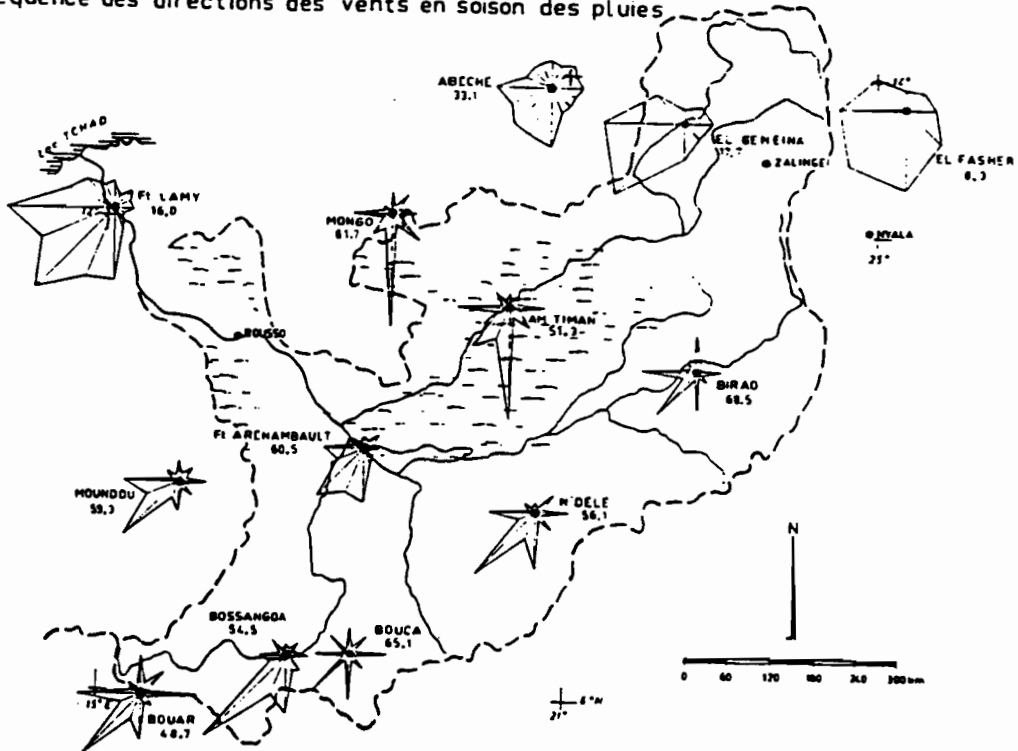
On constate que le vent à la station de Mongo a deux directions privilégiées : nord-nord-est en sèche et sud-sud-ouest en saison des pluies .

Le bassin du Bam-Bam est donc soumis à deux influences principales : influence saharienne en saison sèche et influence guinéenne en saison des pluies.

Fréquence des directions des vents en saison sèche



Fréquence des directions des vents en saison des pluies



(Monographies hydrologiques ORSTOM. Le bassin du fleuve Chari, 1974).

Fig- I-9- Fréquences des directions des vents

### I - 1 - 2 - 5 - Végétation

La végétation sur le bassin appartient au domaine sahélo-soudanien qui correspond à la marge sud du climat sahélien. La formation caractéristique est la savane arbustive où dominent les acacias et autres arbres épineux. On peut distinguer les formations suivantes :

#### - Végétations des petits massifs granitiques et des arènes

Sur ces sols, la végétation arborée est dense et constituée des petits arbres comme *Grewia Bicolor*. On y trouve également des plantes basses et, de place en place, des touffes d'*Andropogon Gayanus*.

- Sur des vastes étendues entre les ouadis, les petits massifs et les zones de dépressions, les sols sablo-argileux très plats sont couverts d'un tapis végétal de graminée à base de *Schoenefeldia Gracilis*. Les arbres sont rares et dispersés.

- Les terres de bas de pente, beaucoup plus argileuses, présentent des fentes de retrait polygonales. Contrairement aux sols précédents, ils restent inondés assez longtemps. Sur ces sols, on retrouve régulièrement l'acacia à fût rouge, l'*Acacia seyal*. Le sol est recouvert d'une graminée dense : *Rohboellia Exalta*. La densité arborée est forte.

- Enfin, les ouadis sont garnis sur les rives d'un grand nombre d'espèces arbustives. Ces arbres se prolongeant de chaque côté deviennent plus nombreux et plus resserrés.

En dehors de la végétation spontanée, on trouve çà et là quelques cultures, en particulier le mil et le berbéré (sorgho).

### - Conclusion

L'analyse des facteurs climatiques (température, vent, hygrométrie, évaporation) et la végétation donne au bassin sa place en zone sahélienne.

Nous pouvons noter toutefois la moyenne pluviométrique interannuelle élevée (plus de 800 millimètres) qui le situerait plutôt en zone tropicale. Les stations de N'Djaména et Bokoro situées à la même latitude dépassent à peine les 600 millimètres sur la même période. Cette particularité du bassin serait à imputer à sa situation en zone montagneuse avec au sud le mont Guéra qui culmine à 1613 mètres et à l'est le mont Abou Telfane culminant à 1506 mètres (figure I - 3).

## **I - 2 - Pluviométrie**

### **I - 2 - 1 - Equipement**

L'équipement initial du bassin (au début de la saison des pluies de 1963) est composé de 30 stations pluviométriques dont 5 sont équipées de pluviographes à augets basculeurs à rotation journalière, soit une densité d'environ un poste de mesure pluviométrique pour 40 km<sup>2</sup>. Les deux premières campagnes révèlent que cette densité de points de mesure convenable pour l'ensemble du bassin l'est moins pour la partie amont qui accuse une forte pente. Ainsi, pour préciser les mesures, sept nouveaux pluviomètres ont été implantés sur cette partie en 1966 ; ce qui porte à 37 le nombre de points d'observations pluviométriques sur le bassin (figure I - 10).



## Bassin versant du Bam-Bam

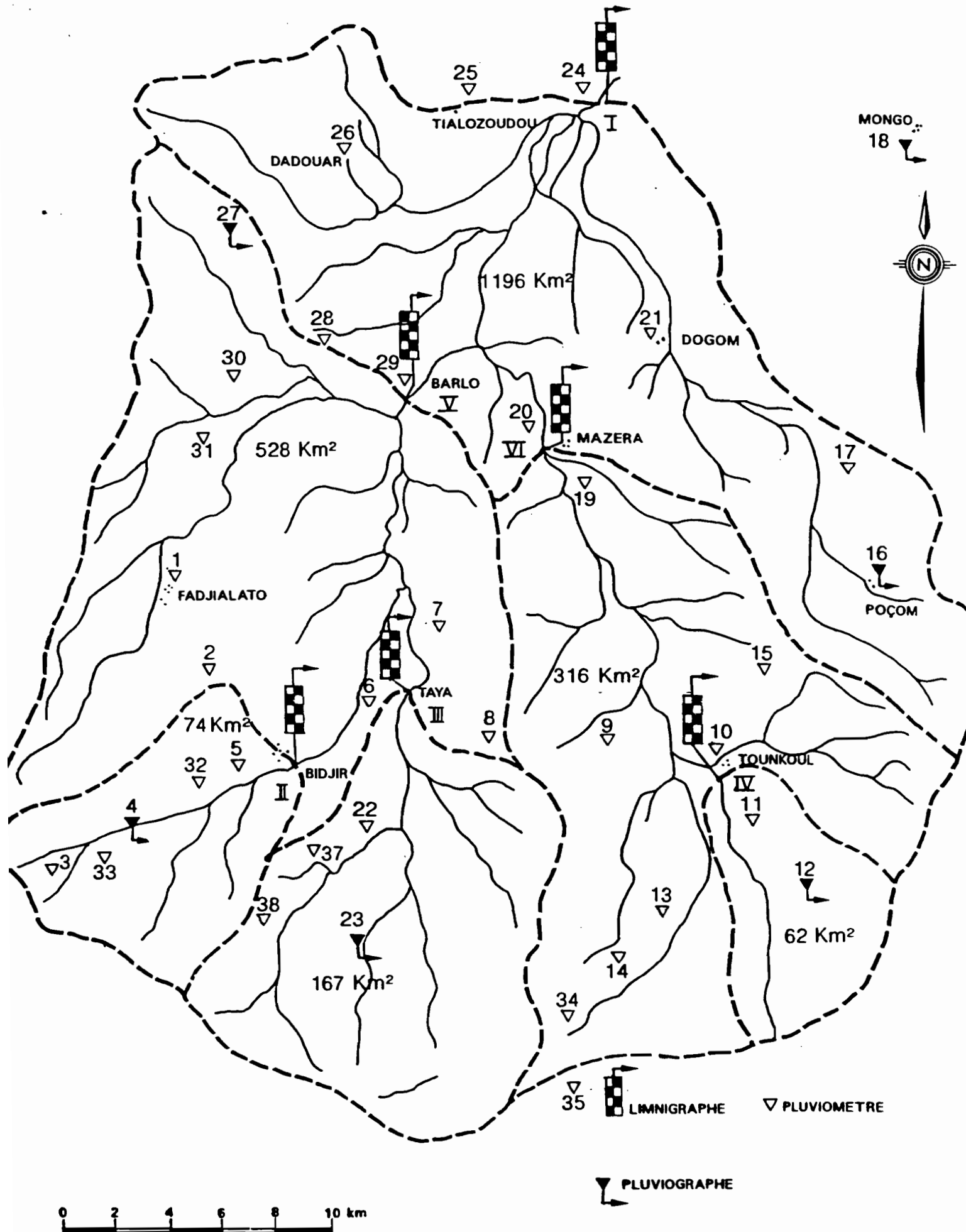


Fig-I-10- Équipement pluviométrique et hydrologique

## **I - 2 - 2 - Etude des précipitations**

La station météorologique de Mongo observée depuis 1950, nous fournit les principales informations sur le régime pluviométrique. Sur les relevés dont nous disposons (de 1950 à 1988), le nombre moyen de jours de pluie est de 64 jours par an ; la hauteur moyenne annuelle est de 836 millimètres.

En général les pluies sont concentrées (80 à 95%) en juillet, août et septembre (les hauteurs maximales étant observées en août) ; pendant les mois de décembre, janvier et février elles sont strictement nulles et extrêmement faibles en mars, avril et novembre. Les mois de mai et de juin constituent une période de transition entre la saison sèche et la saison des pluies.

### **I - 2 - 2 - 1 - Situation par rapport à la longue série**

Le bassin a été observé pendant une période continue de 4 ans (de 1963 à 1966) ce qui du point de vue statistique semble peu élevé. Pour nous rendre compte de la représentativité de ces observations, nous les avons comparées à la longue série que nous disposons sur deux postes :

Mongo situé à 10 kilomètres du bassin, observé pendant 32 ans,

Dadouar sur le bassin, observé pendant 14 ans.

#### **- Moyenne interannuelle**

La moyenne interannuelle est de 760 mm sur les 32 années et de 823 mm pendant la période d'étude à Mongo ; à Dadouar elle est de 643 mm sur la longue série et de 757 mm pendant la période d'étude. La différence entre les deux séries de données (période d'étude et longue série) semble très élevée. Aussi, nous avons procédé à l'analyse des moyennes décennales plus détaillée que la moyenne globale.

#### **- Moyennes décennales**

Pour faire l'analyse des moyennes décennales, nous avons procédé de la manière suivante :

- constitution des décennies de base (exemple : 1950-1959, 1960-1969...) ;
- dénombrement pour chaque décennie des années d'observation effectives.

Nous obtenons les résultats des tableaux I - 4 (Mongo) et I - 5 (Dadouar).

Décennie	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1988
Nombre d'années d'observation	10	9	8	5
Moyenne (mm)	841	825	701	560

**Tableau I - 4 : Moyennes pluviométriques décennales à Mongo.**

Nous constatons que pour la décennie :

1950-1959, toutes les années ont été observées ;

1960-1969, nous avons une année manquante, 1968 ;

1970-1979, deux années manquantes, 1978 et 1979 ;

1980-1988 décennie incomplète, 4 années manquantes sur 9 : 1980, 1981, 1982 et 1983.

Suivant ces moyennes, les décennies 1950-1959 et 1960-1969 sont du même ordre d'humidité. Par contre, il y a une baisse sensible à partir de la décennie 1970-1979, s'accroissant encore au cours de la décennie 1980-1988.

Décennie	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1988
Nombre d'années d'observation	0	4	1	9
Moyenne (mm)		757	686	588

**Tableau I - 5 : Moyennes pluviométriques décennales à Dadouar.**

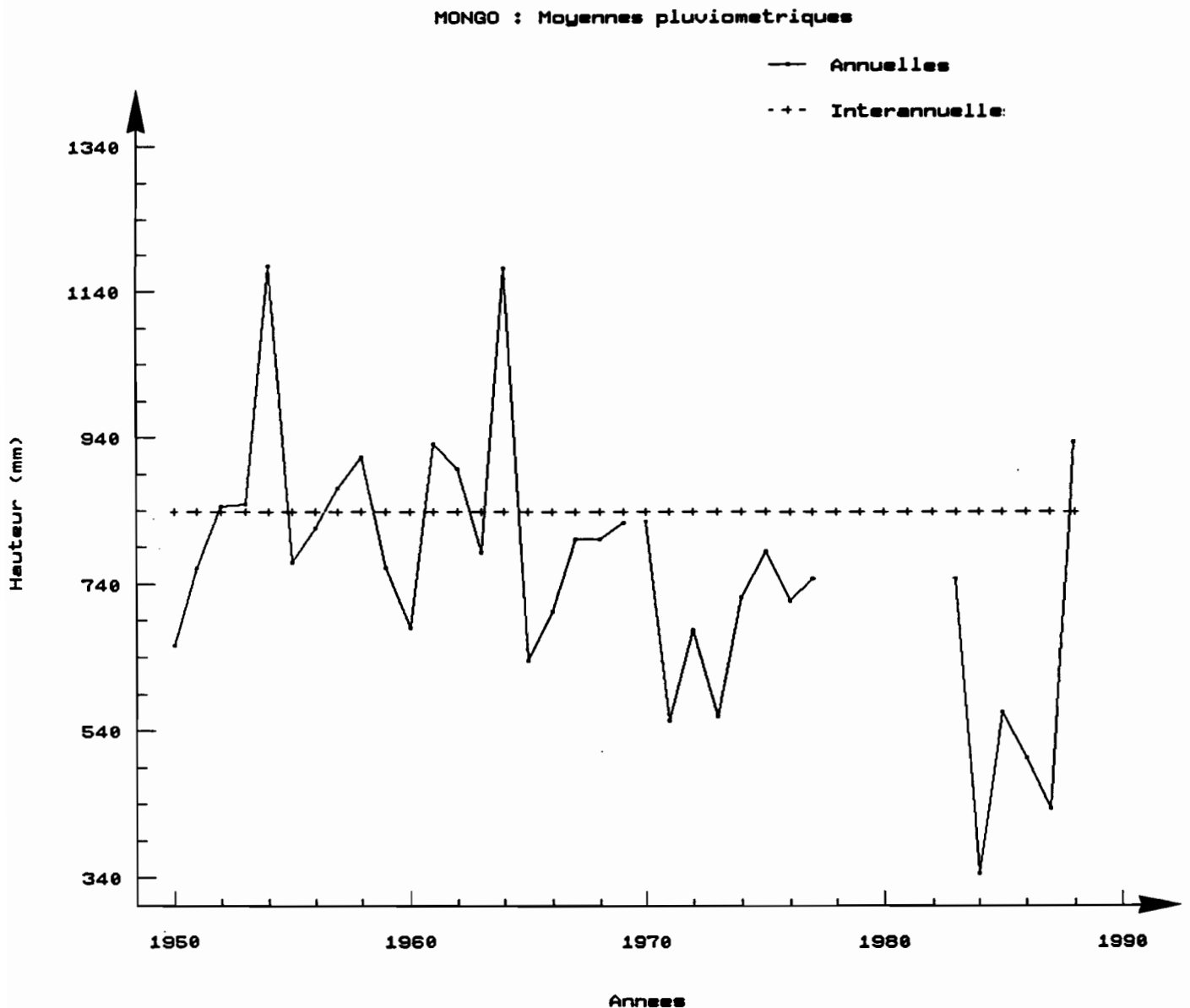
A Dadouar, il n'y a aucune observation au cours de la décennie 1950-1959, 4 observations au cours de la décennie 1960-1969 qui correspondent à la période d'étude, une seule au cours de la décennie 1970-1979 et la période 1980-1988 entièrement observée.

Dans les deux cas (Mongo et Dadouar), les moyennes pluviométriques baissent sensiblement de la décennie 1960-1969 à la décennie 1980-1988.

Cette tendance est incertaine pour les deux dernières décennies du fait des données incomplètes d'une part et de la guerre d'autre part.

Ainsi, la série de Dadouar ne se prête pas à une bonne comparaison car les seules observations dont on dispose des décennies hors sécheresse actuelle sont celles de la période d'étude. Il nous reste donc la série de Mongo. La figure I -11 représente les moyennes pluviométriques annuelles et la moyenne pluviométrique interannuelle à Mongo.

Suivant la série de Mongo, la moyenne de la décennie 1960-1969 dans laquelle se place la période d'étude est de 825 millimètres et celle de la période d'étude de 823 millimètres. Nous pouvons conclure que la période d'étude représente correctement la longue série que l'on aurait pu avoir sur l'ensemble du bassin.



**Figure I - 11 : Moyennes pluviométriques annuelles et interannuelle à Mongo.**

### I - 2 - 2 - 2 - Répartition spatiale

Les pluies sont mesurées à 37 points répartis sur 1196 km<sup>2</sup> ; ce qui nous oblige à effectuer certaines interpolations pour connaître la valeur moyenne en chaque sous bassin.

De nombreuses méthodes d'interpolation sont utilisées en hydrologie pour l'analyse de la répartition spatiale des données ponctuelles.

Dans notre cas, la densité relativement élevée des postes pluviométriques fait que toutes les méthodes se valent : nous employons ici la méthode des fonctions splines qui présente l'avantage de conduire des courbes d'aspect très lisse, "agréable à l'oeil". C'est une méthode d'interpolation linéaire. La figure I - 12 nous montre deux représentations (les unités sont en mm-1).

Le terme "spline" désignait, à l'origine, la languette métallique flexible utilisée par les architectes navals et les ingénieurs aéronautiques pour faciliter le tracé d'une courbe régulière passant par une série de points donnés. Ses propriétés élastiques garantissaient la continuité de la pente et de la courbure aux points imposés, les segments de courbe joignant ces points ayant, en première approximation, une allure polynomiale du troisième degré. Cet ajustement polynomial par morceaux d'une courbe plane a été facilement adapté au calcul par ordinateur.

Nous avons appliqué cette méthode d'interpolation des fonctions splines sur les 32 événements journaliers les plus importants relevés aux cours des 4 années de mesure.

Nous pouvons signaler que chacun de ces événements a été observé sur l'ensemble du bassin comme le témoignent les points de mesure qui présentent tous des relevés non nuls (sauf deux cas sur les 32 où 2 et 3 points n'ont pas été relevés, ce sont respectivement les événements du 26 juillet 1963 et du 21 août 1964). Le tableau I - 6 nous donne la hauteur moyenne et la date de ces événements.

Les cartes isohyètes obtenues ont été analysées de la manière suivante : pour chaque événement nous avons noté la localisation (Nord, Sud,...) du noyau et ensuite nous avons fait le décompte de l'ensemble. Cette analyse révèle que le sud-ouest est mieux arrosé que le reste du bassin. Quelques exemples de cartes isohyètes (figure I - 12) représentant les événements des 31 août 1963 et 18 août 1964 reflètent cette tendance confirmée par la moyenne interannuelle de tous les événements (figure I - 13).

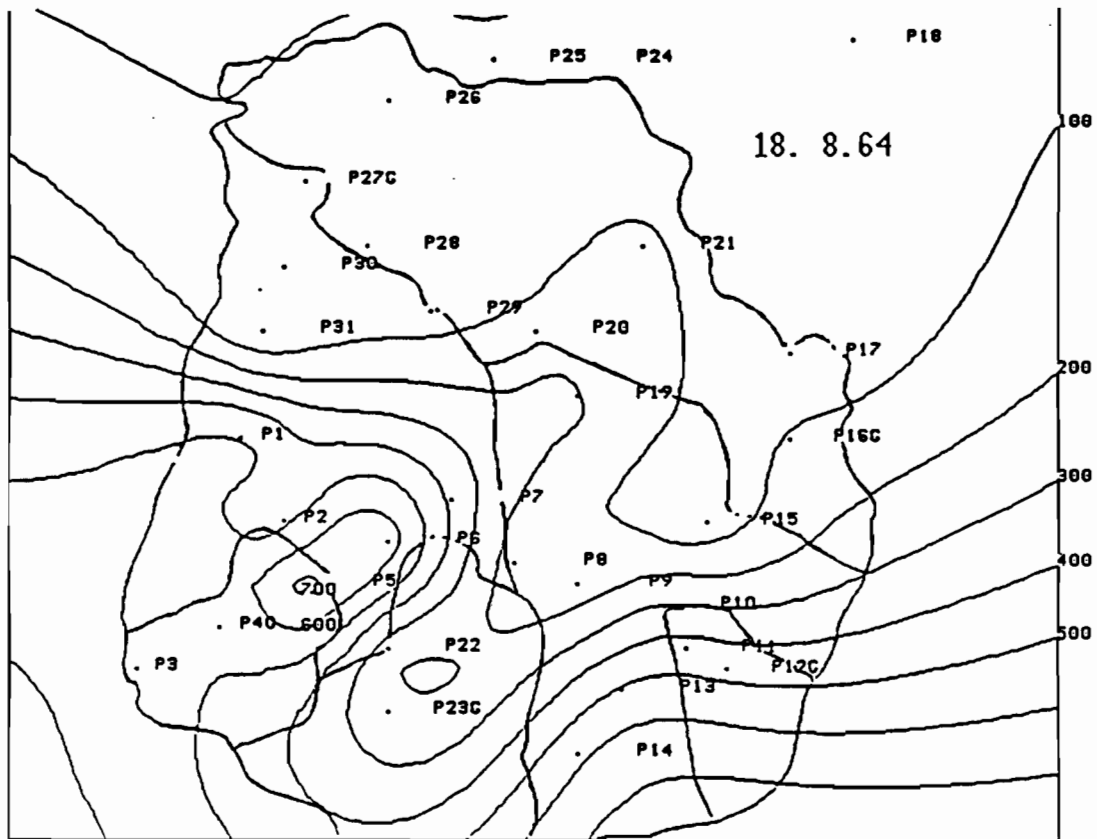
Cette même tendance peut être reliée à la direction des vents dans la zone qui nous est donnée par la station de Mongo située au Nord-est du bassin. Pendant la saison des pluies à Mongo, les vents viennent du Sud Sud-ouest (figure I - 9), traduisant le flux d'air humide venant du golfe de Guinée (souffle de la mousson).

N°	Date	Moyenne (mm)
1	26-07-1963	22,8
2	04-08-1963	41,9
3	11-08-1963	25,3
4	22-08-1963	37,6
5	31-08-1963	26,2
6	18-07-1964	19,6
7	20-07-1964	22,5
8	24-07-1964	23,7
9	27-07-1964	23,7
10	28-07-1964	26,7
11	08-08-1964	19,8
12	11-08-1964	27,6
13	17-08-1964	32,2
14	18-08-1964	25,1
15	20-08-1964	35,4
16	21-08-1964	32,5
17	26-08-1964	26,2
18	27-08-1964	31,6
19	30-08-1964	25,5
20	09-09-1964	20,7

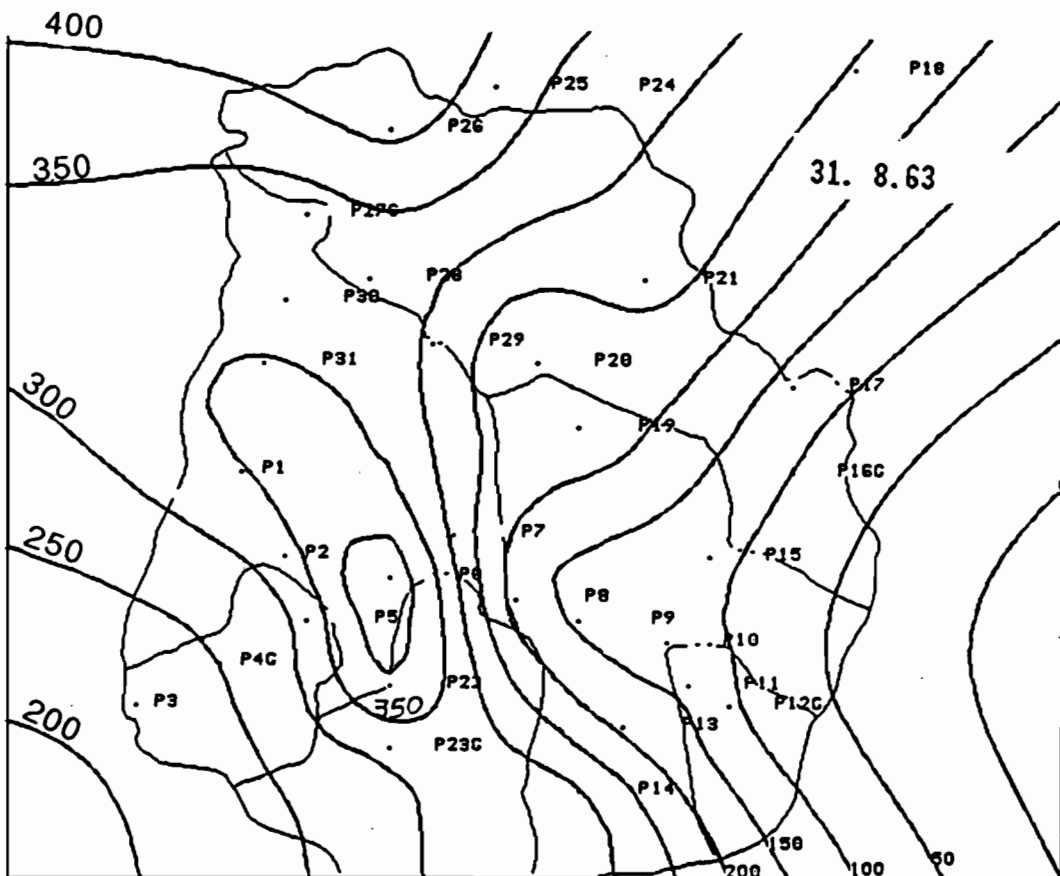
**Tableau I - 6 : Les plus importants événements pluviométriques.**

N°	Date	Moyenne(mm)
21	11-09-1964	32,9
22	23-07-1965	24,7
23	27-07-1965	20,4
24	11-08-1965	33,0
25	29-08-1965	24,6
26	01-09-1965	31,0
27	03-09-1965	22,1
28	21-07-1966	35,9
29	12-08-1966	45,2
30	15-08-1966	38,5
31	16-08-1966	35,1
32	13-09-1966	23,5

**Tableau I - 6 (suite) : Les plus importants événements pluviométriques.**



0 4 8 12 16 (km)



0 4 8 12 16 (km)

Fig-I-12- Répartition spatiale des pluies suivant la fonction spline



### I - 2 - 2 - 3 - Déplacement des averses sur le bassin

Nous venons de voir la répartition spatiale des averses, il est maintenant question de savoir comment elles se déplacent sur le bassin. Ce sont donc des données pluviographiques que nous utilisons. Nous rappelons que le bassin est équipé de cinq pluviographes à augets basculeurs dont la rotation est journalière.

Notre analyse a porté sur l'ordre d'arrivée des 45 plus importantes averses observées au moins à trois des cinq pluviographes. Une averse se différencie d'une autre par une durée pendant laquelle la hauteur de précipitation est inférieure à un seuil donné. Dans notre cas la durée est de 40 minutes et le seuil de 0,1 millimètre. Pour ce faire nous avons :

- découpé la hauteur de l'averse en pas de temps fixe de 20 minutes ;
- noté l'ordre d'arrivée des pluies aux 5 postes. Les notes vont donc de 1 à 5, mais si plusieurs postes sont atteints simultanément, on leur donne la même note correspondant à leur ordre d'arrivée (1 s'ils arrivent en première position, 2 pour la deuxième position, ...) ;
- fait le décompte du nombre de fois où les pluies atteignent en première, deuxième et dernière position un poste (tableau I - 7).

Pluviographe	1 <sup>ère</sup> position	2 <sup>ème</sup> position	5 <sup>ème</sup> position
4	10	12	3
12	17	8	0
16	11	16	2
23	11	13	2
27	4	3	10

**Tableau I - 7 : Ordre d'arrivée des averses.**

D'après ce tableau, le poste 12 situé plus au Sud-est arrive largement en tête ; suivi simultanément des postes 16 et 23 si on ne considère que la première et la dernière position. Si l'on tient compte de la deuxième position, le poste 16 prend seul la première place. Le pluviographe 16 est situé un peu plus à l'Est que le 12 et environ 12 km au Nord ; par contre le pluviographe 23 est à peu près sur la même latitude que ce dernier et environ 17 km à l'Ouest. Le poste 4 arrive ensuite et le 27 en dernière position (figure I - 14).

D'après cette analyse, les pluies se déplacent du Sud-est vers le Nord-ouest. Cette constatation est plus certaine pour la moitié sud où sont situés trois des cinq pluviographes et bien répartis d'Est en Ouest. Cette tendance s'inscrit dans la circulation atmosphérique générale de la région (Dhonneur, 1984 ; Roux, 1987).



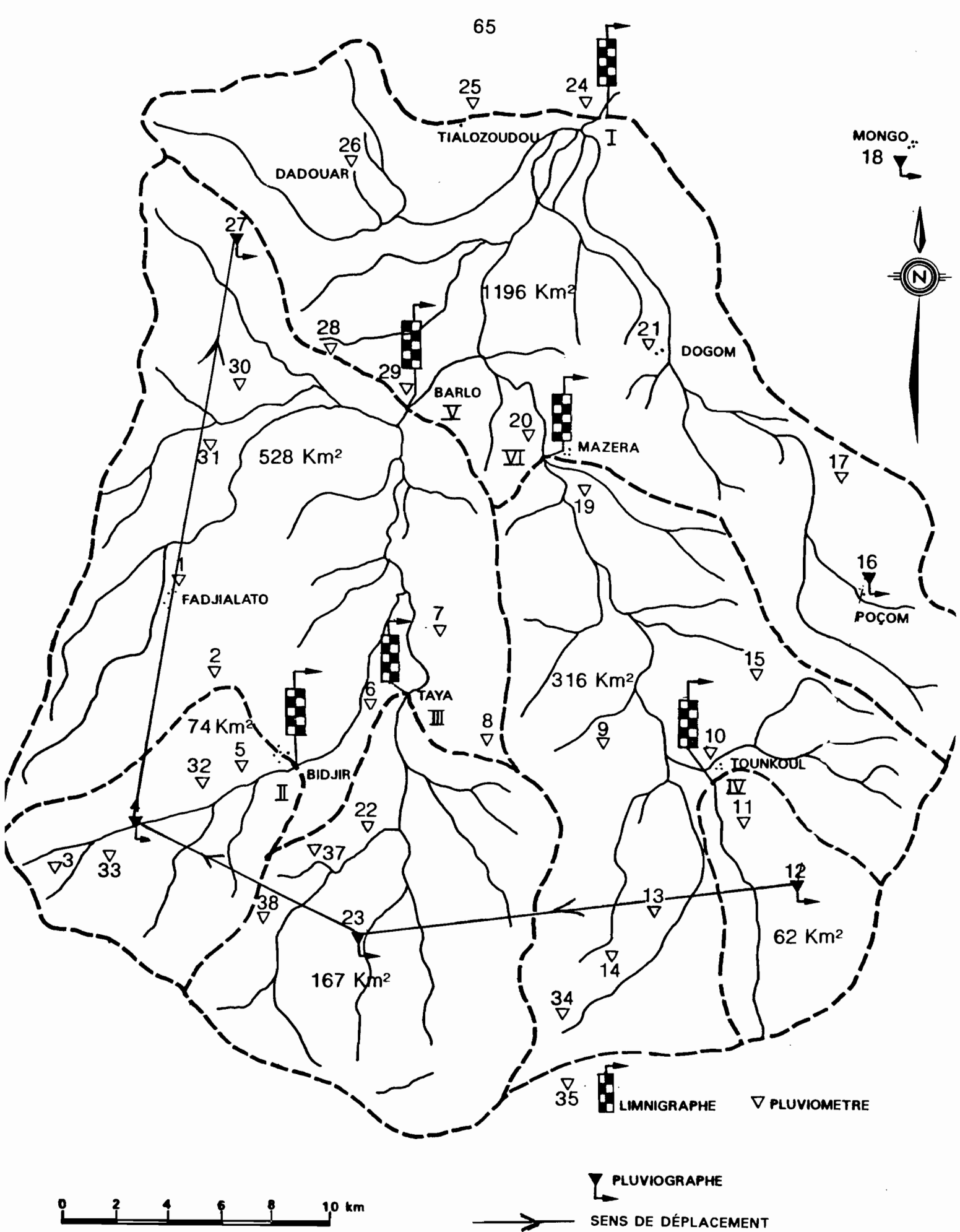


Fig-I-14- Sens de déplacement des averses

#### I - 2 - 2 - 4 - Forme temporelle des averses

La forme temporelle des averses est étudiée à partir de la répartition dans le temps des intensités des pluies. La littérature hydrologique (Chevallier et al., 1985 ; Mietton, 1988), identifie en simplifiant trois grands types d'épisodes pluvieux dans la zone sahélienne.

- Type 1. Ce sont des pluies brutales à leur début (l'intensité maximum dépasse le plus souvent  $60 \text{ mm.h}^{-1}$  et peut aller jusqu'à  $140 \text{ mm.h}^{-1}$ ) durant 10 à 30 minutes et qui peuvent s'arrêter à ce stade ; dans ce cas la hauteur est faible à moyenne (10 à 40 mm); ou, au contraire suivies d'une traîne variable en intensité mais d'une durée qui atteint plusieurs heures, la hauteur moyenne est alors élevée (au-dessus de 40 mm). La transition entre ces deux phases peut correspondre à une inflexion progressive de la courbe d'enregistrement ou à une rupture nette de pente.

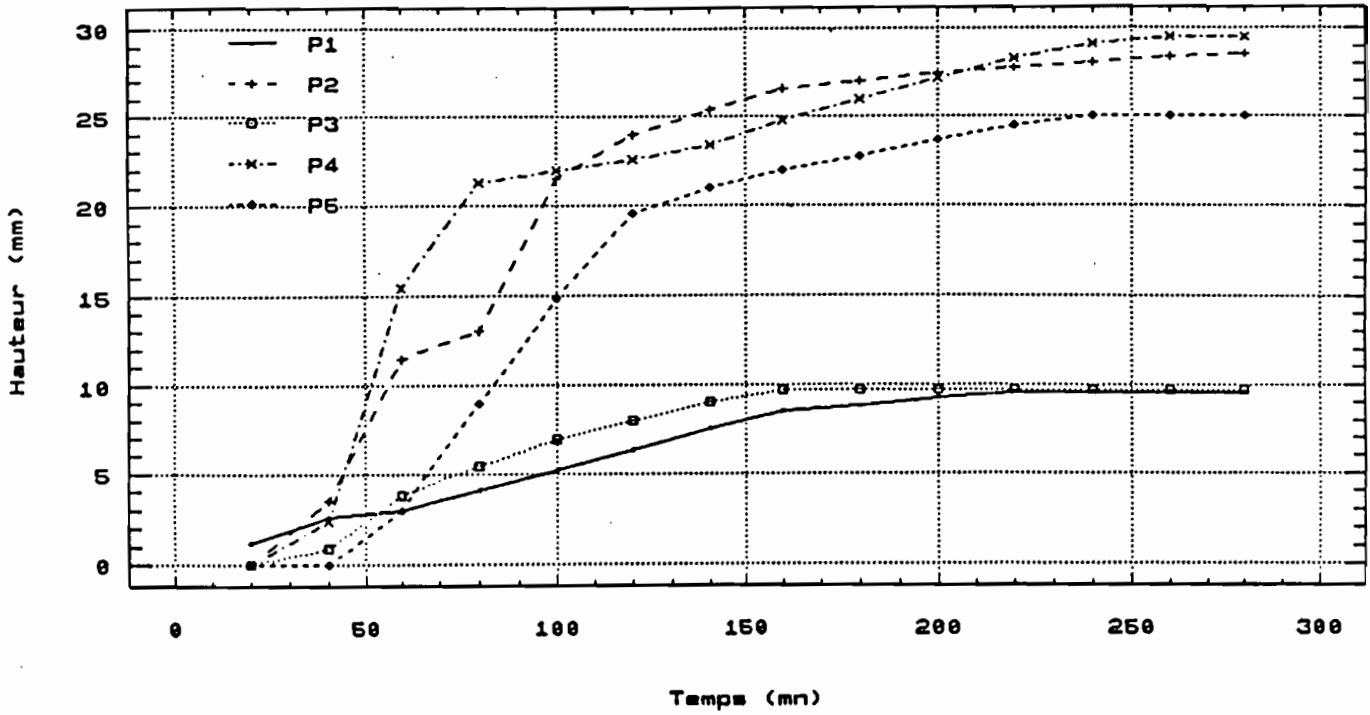
- Type 2. Ce sont des pluies d'assez longue durée (plusieurs heures), d'intensité moyenne à plusieurs maximums au cours d'une même averse ou à quelques heures d'intervalle, deux ou trois fois en 24 heures.

- Type 3. Ce sont des petites pluies, fines et persistantes, particulièrement appréciées des agriculteurs. Elles sont observées surtout en milieu de saison de pluies. Elles ne sont jamais très importantes en volume.

Nous avons analysé la forme des hyétogrammes cumulés des 41 plus importantes averses observées au moins à 4 des 5 pluviographes :

- La plupart des événements ont un début plus ou moins brutal et finissent toujours par une traîne (figures I - 15). Sur ces graphiques sont représentés les relevés des cinq pluviographes ; nous arrêtons la représentation lorsque les critères d'individualisation (définis au paragraphe précédent) sont réunis à la fois pour les cinq pluviographes. Ces averses peuvent être classées dans le type 1.

31 AOUT 1963



11 AOUT 1964

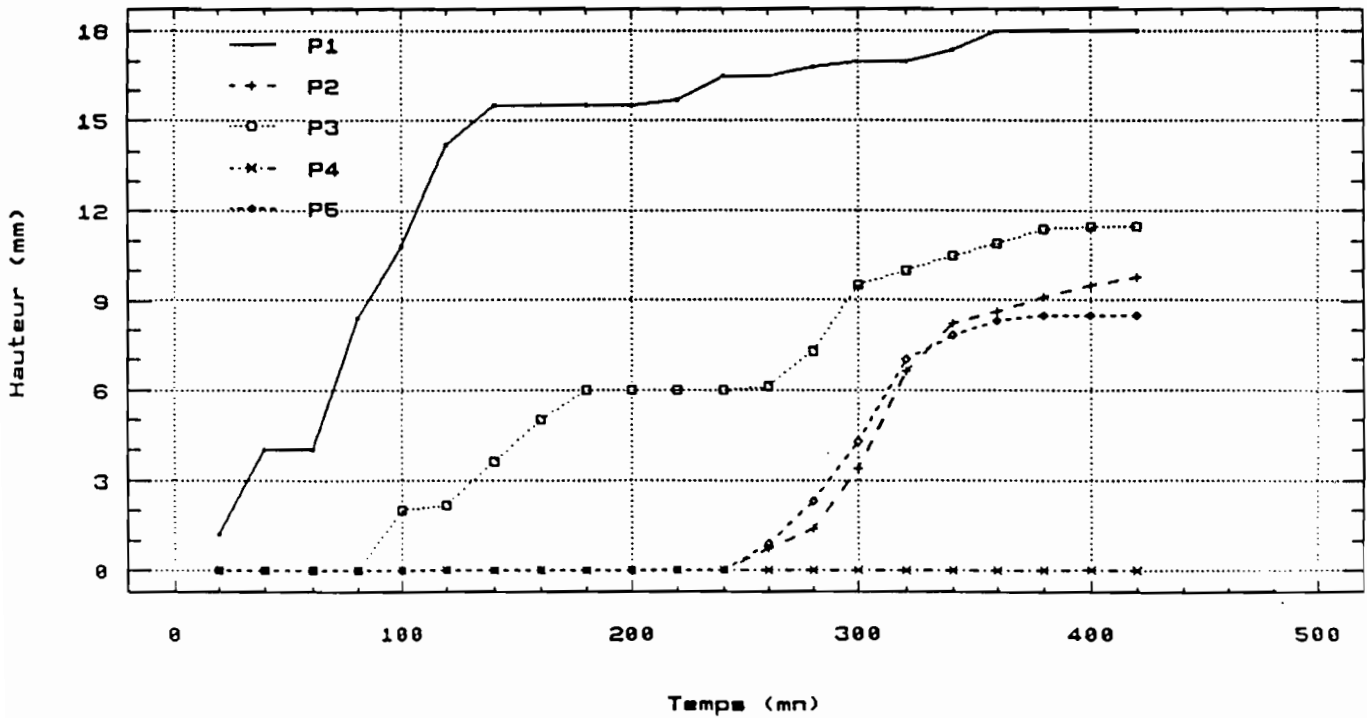


Fig-1-15- Hyétogrammes cumulés



## Conclusion

Les averses que nous avons étudiées ressemblent par leurs structures à des pluies de lignes de grains que décrivent plusieurs auteurs (Mietton, 1988 ; Thauvin et Lebel, 1990) entre autres. Ces averses semblent bien être provoquées par des lignes de grains dont la description nous vient de Chauvelier (1975) dans "Lignes de grains et précipitations au Sénégal", nous citons : "Observé du sol, le passage d'une ligne de grains s'effectue selon un 'scénario' bien précis dont les principaux moments sont communs à presque toutes les lignes. A l'avant de la ligne, le ciel est généralement clair à peu nuageux. Seuls quelques cumulus caractéristiques de certaines zones peuvent être notés. Puis, progressivement, apparaissent par l'est des nuages supérieurs de type cirrus et cirro-cumulus. Les vents de surface, d'abord faibles et en principe de secteur sud-ouest, se calment pour devenir nuls. L'horizon en direction de l'est se charge alors de nuages très épais (cumulo-nimbus, altocumulus) formant une large barre noire, zébrée d'éclairs, qui semble se rapprocher à grande vitesse. Le passage du grain (c'est-à-dire du cumulo-nimbus) au-dessus de l'observateur s'exprime par une brutale saute de vent. Les rafales d'est atteignent 60 à 80 km/h soulevant des poussières ou sable et tordant les arbres. La nébulosité est devenue totale et durant quelques moments, dans le flamboiement des éclairs et le fracas terrifiant du tonnerre, un ciel d'encre déverse de véritables trombes d'eau, barrant la visibilité à quelques mètres, déchaînant le ruissellement. Au bout de quelques minutes, les éléments se calment. L'intensité des précipitations faiblit et le tonnerre s'éloigne vers l'ouest. Le ciel reste encore couvert pendant plusieurs heures par des nuages de type altocumulus et altostratus qui donnent dans la plupart des cas de petites pluies fines. Le vent est retourné au sud-ouest, mais la chute brutale de température, qui a lieu au passage du grain, le rend agréable et ce d'autant plus que les quelques heures précédant le passage de la ligne avaient été marquées par un temps plus lourd et plus pénible que de coutume".

Dans cette description, nous retrouvons la description générale des pluies de ligne de grains.

Les pluies de lignes de grains sont généralement décrites comme des pluies brutales (fortes intensités : entre 60 et 140 mm/h en moyenne) en début d'averse durant entre 10 et 30 minutes, suivie d'une traîne de faible intensité qui peut durer plusieurs heures.

Ces pluies de lignes de grains selon Mietton (1988) dans son étude sur le Burkina Faso sont moins durables et moins fréquentes que les autres types de pluies (60 %) qui sont :

- des pluies composites, à plusieurs maximums d'intensité, se succédant au cours d'une même averse ou à quelques heures d'intervalle, deux ou trois fois en 24 heures ,
- des tornades exceptionnelles par leur hauteur et leur intensité très fortes,

- des petites pluies nombreuses mais peu efficaces, inférieures en effet dans leur grande majorité à 20 mm, voire à 10 mm, de plus ou moins longue durée et de faible à très faible intensité ( 1 à 5 mm/h avec des pointes possibles de 20 à 30 mm/h).

Dans notre cas sur un total de 205 averses enregistrées sur notre bassin, les 41 que nous avons étudiées dans le cadre de la forme temporelle se révèlent être des pluies de lignes de grains. Ces événements qui sont les plus forts et ayant occasionné les plus fortes crues représentent en nombre 20% du total mais 30% de hauteur moyenne annuelle. Ce qui peut nous permettre de dire, malgré le caractère non exhaustif de notre étude des averses, que les pluies de lignes de grains sont plus importantes en hauteur sur notre bassin et ce sont elles qui créent les crues les plus importantes.

### **I - 3 - Hydrologie**

Dans ce chapitre, après avoir défini et présenté les principales caractéristiques hydrologiques des bassins versants, nous analysons les données hydrologiques disponibles pour chacun des bassins d'études.

#### **I - 3 - 1 - Equipement hydrométrique**

Le bassin est équipé de 6 stations hydrométriques (figure I - 10) : Tounkoul, Taya, Bidjir, Mazera, Barlo et Tialozoudou.

Dans le Sud du bassin, les trois stations de Bidjir, Taya et Tounkoul sont équipées de limnigraphes à mouvement journalier. Chacun de ces appareils est doublé d'une échelle limnimétrique. Ces trois stations, implantées en tête du réseau hydrographique, permettent donc de suivre le début du ruissellement.

Au Nord, à l'exutoire du bassin, se trouve la station principale de Tialozoudou. Cet exutoire est constitué d'un bras principal et de deux bras secondaires indépendants. Malgré le faible débit des deux bras secondaires, il est apparu nécessaire d'en suivre l'écoulement. La station est ainsi équipée de trois limnigraphes à mouvement journalier doublés des échelles limnimétriques.

Afin de suivre le passage des crues depuis la tête du réseau jusqu'à l'exutoire, deux stations intermédiaires ont été implantées. L'une, la station de Barlo est située sur l'affluent qui draine les bassins de Bidjir et Taya ; l'autre, la station de Mazera, est mise en place sur l'affluent qui provient de Tounkoul. Toutes les deux stations sont à mi-chemin entre la station principale et celles qui sont en tête du bassin. Elles sont équipées de limnigraphes longue durée.

#### **I - 3 - 2 - Détermination et définition des paramètres usuels**

Le facteur principal en modélisation hydrologique est la crue. Nous allons dans ce paragraphe définir et présenter les principales caractéristiques d'une crue (figure I - 16).

Nous profitons aussi pour rappeler les définitions donner aux différentes parties d'une averse donnant lieu à du ruissellement.

La détermination des paramètres de crue est faite selon la méthode de Roche (1963) qui consiste à assimiler la courbe de montée de la crue à une droite et la courbe de décrue à une exponentielle.

Ainsi les hydrogrammes de crue observés sont décomposés de la manière suivante :

- élimination des ruissellements préliminaires en prolongeant linéairement la courbe de montée jusqu'à l'intersection avec l'écoulement de base initial ;
- recherche du point d'intersection en coordonnées semi-logarithmiques de la droite représentative du ruissellement ( ou plutôt de leur prolongement) ;
- l'hydrogramme délimité par ces deux points et les deux prolongements des courbes de montée et décrue, ainsi que la droite reliant les deux points, définit l'hydrogramme de ruissellement.

Les principaux paramètres que nous retenons sont les suivants :

- Le volume ruisselé ( $V_r$ ).

Le volume d'eau ruisselé ( $V_r$ ) est le volume délimité par l'hydrogramme ci-dessus défini. C'est le volume de la crue correspondant au ruissellement pur. Il est égal au volume de la pluie nette (définition ci-dessous) et on le mesure sur l'hydrogramme enregistré à l'exutoire après séparation des écoulements. Il lui correspond une lame ruisselée  $L_r$ .

$$L_r = V_r \cdot A^{-1}$$

$A$  est la superficie du bassin.

- Le volume d'eau écoulé ( $V_e$ ).

Le volume d'eau écoulé ( $V_e$ ) correspond à tout écoulement enregistré à la station. Au volume écoulé, correspond une lame écoulée  $L_e$ .

$$L_e = V_e \cdot A^{-1}$$

- Le volume d'eau précipitée ( $V_p$ ).

Le volume d'eau précipitée ( $V_p$ ), est la lame précipitée moyenne ( $L_p$ ) rapportée à la superficie du bassin.  $L_p$  est calculée à partir du pluviographe le mieux situé par rapport au bassin versant.

$$V_p = L_p \cdot A$$

- Le temps de concentration ( $t_c$ ).

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut l'estimer en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie efficace (définition ci-dessous) et la fin du ruissellement.

- Le temps de réponse ( $t_r$ ).

C'est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie efficace de la pointe de l'hydrogramme observé à l'exutoire.

- Le temps de base ( $t_b$ ).

C'est la durée du ruissellement (longueur sur l'abscisse : axe des temps, de la base de l'hydrogramme de ruissellement).

- Le temps de montée ( $t_m$ ).

C'est la durée qui s'écoule entre le début de l'arrivée à l'exutoire du ruissellement apparent et le maximum de l'hydrogramme de ruissellement.

- La pluie efficace

C'est la partie de l'averse ayant donné lieu à du ruissellement, autrement dit c'est la pluie qui n'a pas été totalement infiltrée, évaporée ou interceptée. Elle est définie par son volume ou sa hauteur, sa durée dont on déduit son intensité moyenne.

- La pluie utile

La pluie efficace est en général difficile à définir a priori. On lui substitue alors la notion de pluie utile qui désigne la partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement. Sa détermination est une question d'appréciation de l'hydrologue. On associe à la notion de pluie utile celles de volume de pluie utile, hauteur de pluie utile, durée de pluie utile et d'intensité de pluie utile.

- La pluie nette ou pluie excédentaire

C'est la partie de l'averse qui a ruisselé. Son volume est donc égal au volume total de l'averse diminué du volume de la pluie qui s'est infiltrée, s'est évaporée ou a été interceptée c'est-à-dire au volume de ruissellement.

- La précipitation préliminaire

C'est la partie de l'averse précédant la pluie efficace.

- Les précipitations antérieures

Ce sont les averses qui ont précédé l'averse étudiée, chacune étant prise dans l'intervalle de temps, en heures ou jours. La pluie préliminaire et les précipitations antérieures sont des facteurs déterminants de l'état de saturation du terrain au début du ruissellement.

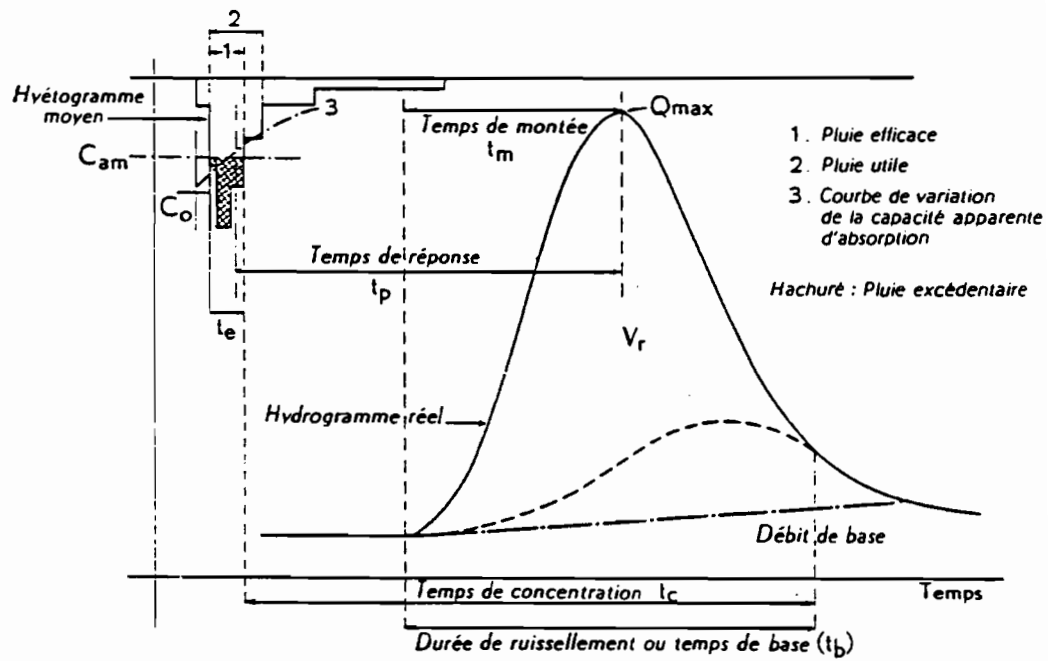


Fig-I-16- Principaux paramètres d'une crue

(Roche, 1963; Hydrologie de surface)

### I - 3 - 3 - Données par bassin

Il s'agit des mesures hydrométriques faites au cours des 4 campagnes d'observation sur les différentes stations. Les caractéristiques physiques des bassins que contrôlent ces stations sont présentées dans le tableau I - 8.

Bassin	Coordonnées à l'exutoire ----- Lat. : Long.		superficie  km <sup>2</sup>	indice de compacité	longueur du rectangle équivalent (km)	indice global de pente (m/km)	altitude ----- Max. : Base	
Bidjir	11°55'	18°27'	74	1,18	12,6	8	754	470
Taya	11°57'	18°30'	167	1,19	18,5	6,5	754	460
Toukoul	11°55'	18°37'	62	1,13	8,5	7,1	560	480
Mazera	12°02'	18°33'	316	1,21	26,8	4,3	675	430
Barlo	12°03'	18°30'	528	1,26	37,5	3,5	754	425
Tialozoudou	12°09'	18°34'	1196	1,15	43,6	3,4	881	402

Tableau I - 8 : caractéristiques physiques des bassins versants.

### - Le bassin de Tounkoul

Avec une superficie de 61,3 km<sup>2</sup>, il est le plus petit des sous-bassins du Bam-Bam. A l'amont, on trouve des sols peu épais, sableux ou sablo-argileux contenant des débris de roche et reposant sur des granites. Ces sols érodés sont peu perméables et représentent 41 % de la superficie. Ensuite il y a des sols sablo-argileux à argilo-sableux à tendance halomorphe, plutôt perméables mais dont la perméabilité est fonction de la profondeur et de l'engorgement des horizons sous-jacents peu perméables (51,9 % de la superficie). A l'aval, la plaine d'inondation est composée des sols sur alluvions récentes (6 % de la superficie) dont la capacité d'infiltration est fonction de l'humectation superficielle (figure I - 6). Son altitude varie de 560 à 480 mètres. Il est équipé de deux pluviomètres et d'un pluviographe.

#### - Crues observées

Sur les 4 années, 48 crues ont été observées :

7 en 1963, 22 en 1964, 12 en 1965 et 7 en 1966.

Le débit maximum observé à la station est de 58 m<sup>3</sup>/s.

Le temps de réponse de ce petit bassin est extrêmement variable de 1 h à 8 h. Mais pour la majorité des crues, il est voisin de 2 heures.

Les temps de montée sont de l'ordre de trois heures mais relativement courts pour les crues d'importance modérée se produisant lorsqu'il n'y a pas d'écoulement à la station.

Les temps de base varient de 4,5 heures à 9 heures. Pour les crues les plus importantes, le temps de base varie de 7,5 heures à 9 heures. Les temps les plus longs proviennent des crues complexes.

Les valeurs des volumes et hauteurs annuels relevées sont consignées dans le tableau I - 9 ci-après.

Année	V <sub>p</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>e</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>r</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	L <sub>r</sub> (mm)	L <sub>e</sub> (mm)	L <sub>p</sub> (mm)
1963	41561	194	89	1,45	3,16	678
1964	58296	9003	3355	54,73	146,86	951
1965	50818	2998	1277	20,83	48,91	829
1966	40152	1014	618	10,08	16,54	655

**Tableau I - 9 : Tounkoul : volumes et lames d'eau annuels.**

L'année 1964 avec 951 millimètres de hauteur moyenne est l'année la plus humide, elle fournit aussi le plus grand nombre de crues parmi lesquelles les plus importantes ; 1966 est l'année la plus sèche avec 655 millimètres de hauteur moyenne.

La moyenne pluviométrique interannuelle de 778 millimètres est la moins élevée après Mazera, le bassin intermédiaire dans lequel il s'imbrique.

### - Le bassin de Bidjir

Le bassin de Bidjir couvre une superficie de 74,2 km<sup>2</sup>. Les sols sont peu différents de ceux de Tounkoul avec toutefois des affleurements granitiques à l'amont (12 % de la superficie). Les sols sableux et sablo-argileux sont peu étendus (3 % de la superficie) et la plus grande partie du bassin est occupée par les sols sablo-argileux à argilo-sableux à tendance halomorphe (85 % de la superficie).

Il est équipé de deux pluviomètres et d'un pluviographe observés pendant quatre campagnes de 1963 à 1966. Au cours de l'année 1966, deux pluviomètres supplémentaires ont été implantés portant à cinq le nombre de points de mesures pluviométriques.

#### - Crues observées

En 4 années d'observation, on dénombre 49 crues réparties comme suit :

8 en 1963, 28 en 1964, 5 en 1965 et 8 en 1966.

Le débit maximum observé est de 168 m<sup>3</sup>/s.

Les temps de réponse varient de deux à cinq heures mais pour les fortes crues, il est de l'ordre de trois heures.

Le temps de montée est l'ordre du temps de réponse environ deux heures lorsque le réseau est en eau et pour des fortes crues.

Le temps de base est d'environ 7 heures.

#### Volumes et lames d'eau annuels

L'année 1963 avec 684 millimètres de moyenne pluviométrique est la plus sèche et 1964 la plus humide avec 1079 millimètres.

La moyenne interannuelle de 816 millimètres est la plus élevée de tous les bassins.

Les relevés sont consignés dans le tableau I - 10.

Année	$V_p(10^3m^3)$	$V_e(10^3m^3)$	$V_r(10^3m^3)$	$L_r(mm)$	$L_e(mm)$	$L_p(mm)$
1963	50753	162,5	119,6	1,61	2,19	684
1964	80062	9566	6056,5	81,62	128,92	1079
1965	55650	187,6	109,4	1,47	2,53	750
1966	55798	981,2	769,8	10,37	13,22	752

**Tableau I - 10 : Bidjir : volumes et lames d'eau annuels.**

#### **- Le bassin de Taya**

Sa superficie est de 167 km<sup>2</sup>. Les sols les plus étendus sont les sols sablo-argileux à argilo-sableux à tendance halomorphe (66,5 %) localisés surtout sur le flanc sud-est du bassin et à l'amont, ensuite viennent les sols sableux peu profonds (27,5 %) et quelques affleurements granitiques (4,4 % de la superficie). Il est équipé de trois pluviomètres et d'un pluviographe dès 1963 et deux pluviomètres supplémentaires implantés en 1966 soit six points de mesures pluviométriques.

#### **- Crues observées**

Au cours des 4 années d'observation, 45 crues ont été observées :

7 en 1963, 19 en 1964, 10 en 1965 et 9 en 1966.

Le débit maximum observé est de 70 m<sup>3</sup>/s.

Le temps de réponse des crues est de l'ordre huit heures pour des grosses crues bien individualisées. Cependant il peut être de l'ordre de 1 heure pour des averses localisées à l'aval.

Les temps de montée varient d'une demi-heure à dix heures suivant la position du centre de l'averse sur le bassin versant et l'importance du débit maximal.

Les temps de base sont très variables, le temps moyen est de l'ordre de treize heures.

#### **Volumes et lames d'eau annuels**

Le tableau I - 11 regroupe les relevés des 4 campagnes d'observation.

Année	V <sub>p</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>e</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>r</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	L <sub>r</sub> (mm)	L <sub>e</sub> (mm)	L <sub>p</sub> (mm)
1963	105377	107,3	101,7	0,6	0,6	631
1964	180026	14300	7825	46,9	85,6	1078
1965	133600	1080	599	3,6	6,5	800
1966	121242	895	665,7	4,0	5,4	726

**Tableau I - 11 : Taya : volumes et lames d'eau annuels.**

L'année 1963 avec 631 millimètres de pluviométrie moyenne est l'année la plus sèche ; 1964 est la plus humide avec 1078 millimètres.

La moyenne pluviométrique interannuelle de 809 millimètres le situe en deuxième position après Bidjir qui lui est adjacent du côté ouest.

#### **- Le bassin de Mazera**

Sa superficie est de 316 km<sup>2</sup> englobant le bassin de Tounkoul (61,3 km<sup>2</sup> de surface). Ces sols sont donc ceux de Tounkoul c'est-à-dire des sols sableux ou sablo-argileux peu épais (26,6 % de la superficie), des sols sablo-argileux à argilo-sableux à tendance halomorphe (44 % de la superficie), des sols sur alluvions récentes (8,2 % de la superficie) avec en plus des vertisols argilo-sableux à argileux subissant des submersions en saison des pluies, apparaissant érodés avec une faible perméabilité et un mauvais drainage (11,5 % de la superficie) et des affleurements granitiques (5,9 % de la superficie). Il est équipé de 9 pluviomètres et d'un pluviographe de 1963 à 1965, et deux pluviomètres supplémentaires ont été implantés en 1966.

#### **- Crues observées :**

On dénombre 46 crues avec cependant des lacunes dans les observations aux cours des années 1965 et 1966 :

9 crues en 1963, 28 en 1964, 4 en 1965 et 5 en 1966.

Le débit maximum observé est de 99,8 m<sup>3</sup>/s.

Le temps de réponse varie de trois à quatre heures pour les averses centrées à l'aval, et de neuf à dix heures pour celles d'amont ; il est de sept heures pour une pluie homogène.

Le temps de montée est de l'ordre de quatre heures.

Le temps de base varie de dix-huit à vingt trois heures.

### Volumes et lames d'eau annuels

Par suite des lacunes aux cours de l'année 1965 il n'a pas été possible de donner les volumes écoulés et ruisselés à cette station pendant les 4 campagnes d'observation.

Nous donnons dans le tableau I - 12 ce qui a pu être relevé. Sur ce tableau, "X" indique les données manquantes.

Année	V <sub>p</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>e</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>r</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	L <sub>r</sub> (mm)	L <sub>e</sub> (mm)	L <sub>p</sub> (mm)
1963	204452	551	439	1,4	1,7	647
1964	273340	29169	21308	67,4	92,3	865
1965	245848	X	X	X	X	778
1966	222780	3355	2712	8,6	10,6	705

**Tableau I - 12 : Mazera : volumes et lames d'eau annuels.**

Contrairement aux volumes écoulés et ruisselés, les hauteurs moyennes annuelles précipitées sont connues. L'année 1963 est la plus sèche avec une moyenne de 647 millimètres, 1964 la plus humide avec 865 millimètres. La moyenne interannuelle de 749 millimètres le situe en dernière position.

### - Le bassin de Barlo

Sa superficie est de 528 km<sup>2</sup> ; Bidjir et Taya sont ses sous-bassins et occupent 241,2 km<sup>2</sup> de sa surface. Les sols les plus étendus sont à l'image de ces deux sous bassins : des sols sablo-argileux à argilo-sableux (49,7 % de la superficie), viennent ensuite des vertisols argilo-sableux à argileux (28,6 % de la superficie), puis les sols sableux peu profonds (11,1 % de la superficie), les sols sur alluvions récentes (5,5 % de la superficie) et les affleurements granitiques (5,1 % de la superficie). Il est équipé de 12 pluviomètres et 3 pluviographes de 1963 à 1965 ; 5 pluviomètres supplémentaires en 1966.

### - Crues observées

On dénombre 45 crues : 13 en 1963, 11 en 1964, 6 en 1965 et 15 en 1966 (le nombre de crues des années 1964 et 1965 n'est pas exhaustif à cause des lacunes dans les observations).

Le débit maximum observé est de 90 m<sup>3</sup>/s.

Le temps de réponse varie en moyenne de 8 à 10 heures ; parfois 4 heures pour les averses centrées à l'aval et jusqu'à 16 heures pour des averses centrées à l'amont quand les débits sont peu importants.

Le temps de base varie de 18 à 21 heures.

#### Volumes et lames d'eau annuels

Comme Mazera, la station de Barlo comporte des lacunes aux cours de l'année 1964 et ne dispose d'aucune mesure hydrométrique en 1965. Le tableau I - 13 regroupe les observations faites aux cours des 4 campagnes. En 1964 les relevés ne concernent que la période du 29 août au 23 septembre. "X" indique les données manquantes.

Année	$V_p(10^3m^3)$	$V_e(10^3m^3)$	$V_r(10^3m^3)$	$L_r(mm)$	$L_e(mm)$	$L_p(mm)$
1963	359040	5520	3979	7,5	10,5	680
1964	541200	23217	18393	34,8	44	1025
1965	388080	X	X	X	X	735
1966	382272	10531,6	8036,7	15,2	20	724

**Tableau I - 13 : Barlo : volumes et lames d'eau annuels.**

Les lames précipitées moyennes annuelles sont par contre connues. L'année 1963 est la plus sèche avec une moyenne de 680 millimètres et 1964 la plus humide avec 1025 millimètres. La moyenne interannuelle de 791 millimètres le place en troisième position après Bidjir et Taya qui constituent sa partie amont.

### - Le bassin de Tialozoudou

C'est la station principale qui contrôle une superficie de 1196 km<sup>2</sup>. (Ces sols sont décrits dans le paragraphe I - 1 - 2 - 3 et son équipement pluviométrique au paragraphe I - 2 - 1).

#### - Crues observées

Au cours des 4 années d'observation, 205 averses ont été enregistrées pendant les mois de juillet, août et septembre mais seulement 63 d'entre elles ont donné lieu à des crues notables :

14 en 1963, 29 en 1964, 11 en 1965 et 9 en 1966.

Le débit maximum observé est de 185 m<sup>3</sup>/s.

Le temps de réponse varie de 9 à 10 heures pour des averses centrées à l'aval, de 16 à 18 heures pour celles centrées à l'amont, et de 12 à 13 heures pour des pluies relativement homogènes. Par contre, des débordements très importants peuvent allonger un temps de réponse à plus de 20 à 24 heures lorsque les débits maximaux instantanés atteignent ou dépassent 100 - 120 m<sup>3</sup>/s. A l'opposé, lorsque le terrain remplit des conditions de ruissellement favorables, des averses centrées à l'aval peuvent engendrer des temps de réponse inférieurs à 8 heures.

Le temps de montée varie selon l'importance de la crue et la taille des averses. Cependant, on note des temps de montée extrêmement brefs (environ trois heures), même pour une averse centrée sur la partie tiers du bassin. Il peut être excessivement long par suite des successions d'averses dans le temps et des conséquences du débordement (variant entre 18 et 26 heures).

Les temps de base varient de 22 et 54 heures ; le plus faible est celui d'une crue localisée ; le plus fort, celui d'une crue complexe. Aussi, prendrons-nous comme valeur probable la fourchette 27 - 34 heures.

#### Volumes et lames d'eau annuels

Les relevés sont consignés dans le tableau I - 14 suivant :

Année	V <sub>p</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>e</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>r</sub> (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	L <sub>r</sub> (mm)	L <sub>e</sub> (mm)	L <sub>p</sub> (mm)
1963	478200	10420	8133	6,8	8,7	690
1964	739320	113304	76021	63,5	94,7	995
1965	600747	9771	7608,2	6,4	8,2	716
1966	493829	16899,8	1421,1	11,8	14,1	723

**Tableau I - 14 : Tialozoudou : volumes et lames d'eau annuels.**

Les volumes écoulés et ruisselés ne concernent que les mois de juin, juillet et août ; les volumes précipités portent sur toute l'année. Comme tous les bassins, l'année 1963 est la plus sèche avec une moyenne de 690 millimètres et 1964 la plus humides avec 995 millimètres. La hauteur moyenne interannuelle des pluies est de 781 millimètres.

### I - 3 - 3 - Crues retenues

Au cours des 4 campagnes de mesure, au moins une quarantaine de crues ont été observées par bassin mais toutes ne sont pas intéressantes pour notre étude pour des raisons suivantes :

- débit très faible (au premier abord le débit minimum retenu est  $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  pour tous les bassins. Ce critère s'est révélé très limitant pour les bassins amont, nous l'avons finalement limité aux seuls bassins aval. Pour les bassins amont, nous avons tenu compte outre les crues importantes des faibles crues mais qui sont importantes aux bassins aval.),

- pluie génératrice non relevée,
- hydrogramme mal relevé.

Après des critiques tenant compte des points ci-dessus, les crues sur toutes les stations hydrologiques du bassin que nous avons retenues sont regroupées dans le tableau I - 15 où "X" indique les données manquantes.

Evénement	Débit de pointe ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )					
	Tialozoudou	Barlo	Bidjir	Taya	Mazera	Tounkoul
04-08-1963	28	19,9	0,6	X	0	0
11-08-1963	73	46,9	2,9	1,8	4,6	0,5
22-08-1963	38,6	32,2	0	0	0,8	0,3
24-08-1963	18,6	4,4	4,1	1,8	8,9	0,1
31-08-1963	12,2	11,4	0	0,6	0	0
02-09-1963	0	12,8	0	0	0	0
03-09-1963	12,6	0	0	0	0	0
05-09-1963	20,1	14,4	0	0	4,2	0

Tableau I - 15 : crues retenues pour l'étude de chaque bassin.

Événement	Débit de pointe (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )					
	Tialozoudou	Barlo	Bidjir	Taya	Mazera	Tounkoul
18-07-1964	11,4	X	0	0	2,6	4,7
22-07-1964	32,2	X	0	0	6,5	0
24-07-1964	46	X	7,9	2,5	14,6	0
28-07-1964	21,7	X	0	0,3	9,2	0
03-08-1964	3	X	24	0	0,4	0
04-08-1964	4	X	11	0	2,2	0
07-08-1964	0	X	13,2	0	5	0
10-08-1964	28,6	X	3,1	0	3,7	4
11-08-1964	78	X	0,6	0	12,6	2
15-08-1964	26,8	X	13,2	10,5	11,3	4,2
17-08-1964	98	X	2,7	0	41	1,1
18-08-1964	65	X	90	26,2	25,5	41
20-08-1964	185	X	5,2	15	99,8	33 ; 22,6
21-08-1964	185	X	45,5	28,3 ; 10,5	X	13,4 ; 6,6
25-08-1964	25,1	X	3,3	4,1	14,3	7
26-08-1964	104	X	168	14,3	53,8	4,3
27-08-1964	146	X	115	70	98,5	56,8
29-08-1964	79	50	29	36,5	26,2	2,3
30-08-1964	117	75	54,4	69	62,3	58
01-09-1964	60	56	3,3	11,8	10	2,1

**Tableau I - 15 (suite) : crues retenues pour l'étude de chaque bassin.**

Événement	Débit de pointe (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )					
	Tialozoudou	Barlo	Bidjir	Taya	Mazera	Toukoul
02-09-1964	64	39,5	3	7,7	61,4	1,3
09-09-1964	0	12,3	7,2	5,1	1,6	1,5
11-09-1964	150	90	8,6	31,1	50	14,6
22-09-1964	0	12,7	0	0	0	0
23-09-1964	40,8	27,5	0	0	17,6	0
27-07-1965	3,1	17,9	0	0	X	7
11-08-1965	40	0	0	1,2	21,6	2,4
14-08-1965	3,4	0	1	0,4	10,4	11,8
29-08-1965	6,9	X	0	0	X	36,6
30-08-1965	11,3	X	0	0	X	11
01-09-1965	37,3	X	2,2	2,8	X	24,5
03-09-1965	31 ; 33,5	X	5	3,5	X	10,8
09-09-1965	0	X	0,7	8,6	X	2,3
23-07-1966	22,8	27,7	9,5	0	0	0
12-08-1966	26,2	24,6	0	1,4	8	10,7
15-08-1966	68	53,6	4,7	2,5	16,5	9,4 ; 8,5
16-08-1966	156	84	24	4,5	44,7	20,4
18-08-1966	17,8	9,8	15,5	3,7	12,6	7,6
31-08-1966	0	0	15,5	5,4	0	0
10-09-1966	20,7	26,4	0	8,2	0	0,5

**Tableau I - 15 (fin) : crues retenues pour l'étude de chaque bassin.**

## Conclusion

De cette présentation physique, nous pouvons retenir les enseignements suivants :

Du point de vue relief, hormis les bassins amont (Toukoul, Bidjir et Taya), l'ensemble du bassin présente une pente faible et ressemble plutôt à une plaine. Cette partie aval presque plane et très étendue aura des incidences sur le ruissellement rapide.

Du point de vue pédologique, les trois bassins amonts sont constitués à plus de 50 % des sols argilo-sableux à tendance halomorphe (Bidjir 82,5 %, Taya 66,5 % et Toukoul 51,9 %), le reste est partagé entre les sols sableux peu profonds et les sols squelettiques de massif granitique. Les bassins intermédiaires Mazera et Barlo sont aussi homogènes de point de vue pédologique ; on retrouve dans chacun d'eux les mêmes types de sols à proportions variables. La proportion des sols argilo-sableux à tendance halomorphe est aussi la plus élevée mais reste en dessous de 50 %.

L'ensemble du bassin du Bam-Bam à Tialozoudou par sa structure physique : des petits bassins de moins de 100 km<sup>2</sup>, en passant par des bassins intermédiaires de quelques centaines de km<sup>2</sup> au grand bassin de plus 1000 km<sup>2</sup>, offre un site d'études hydrologiques à des échelles d'espace très variées.

Dans le chapitre suivant, nous entreprenons l'étude du fonctionnement hydrologique des sous-bassins.

**2<sup>ème</sup> PARTIE**

**APPROCHE GLOBALE**

**" PLUIES - DEBITS "**



## II - APPROCHE GLOBALE " PLUIES-DEBITS "

Après la présentation physique de notre bassin et l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques, nous abordons dans cette partie l'étude du fonctionnement hydrologique proprement dite.

L'appréhension d'un système hydrologique complexe, se fait généralement par des modèles qui sont une représentation simplifiée du système. Ces modèles hydrologiques ont des objectifs très variés qui vont de la prévision et l'annonce des crues à l'évaluation et la gestion des ressources en eau. Ces modèles peuvent être physiques, analogiques ou mathématiques. Dans notre cas, nous utilisons les modèles mathématiques : le comportement du système hydrologique est représenté à l'aide d'un certain nombre d'équations mathématiques.

Une autre classification se fonde sur l'appréhension des échelles spatiales et temporelles. On appellera modèle distribué (ou à discrétisation spatiale) un modèle qui a des entrées, des sorties ou des caractéristiques du système distribuées dans l'espace. Par opposition, un modèle global ne tient compte d'aucune variabilité spatiale. Au niveau temporel, un modèle par événement est activé pour chaque crue et s'oppose aux modèles en continu pour lesquels une crue n'est qu'un moment particulier d'un processus continu. La modélisation par événement permet de négliger l'évapotranspiration par exemple, mais nécessite une condition aux limites supplémentaire, l'humidité initiale du bassin.

Compte tenu de nos données, le modèle global par événement s'impose pour notre étude. La discussion et l'interprétation des résultats vont être faites suivant les données qualitatives du milieu suivantes :

- Le sol : le ruissellement de surface considéré comme part essentielle de l'écoulement dans le réseau hydrographique en dehors des périodes d'étiage est fonction du sol. En effet, la capacité d'infiltration d'un sol ou capacité d'absorption diminue pendant la pluie et permet de définir sur le hyétogramme la pluie excédentaire ou pluie nette comme étant celle qui dépasse à chaque instant la capacité d'absorption du sol et qui est quantitativement égale au volume d'eau du ruissellement qui s'écoule rapidement à l'exutoire d'un petit bassin versant.

- La végétation : le concept ruissellement de surface facteur essentiel de l'écoulement dans le réseau hydrographique, reste dominant dans la communauté hydrologique internationale. Cependant, certains scientifiques spécialisés dans le domaine forestier en climat tempéré s'en démarquent. Selon Hewlett et Hibbert (1967), le nouveau paradoxe hydrologique s'énonce ainsi : "la discussion à propos de l'écoulement d'un bassin versant commence généralement par l'affirmation que l'écoulement est le produit du ruissellement de surface et

que les autres types d'écoulement ne sont que des rares exceptions à cette règle générale. L'approche inverse est peut-être plus logique en zone forestière : partir de l'hypothèse que tout l'écoulement est constitué d'écoulement sub-superficiel (subsurface flow) jusqu'à preuve évidente du contraire".

Sans entrer dans ce concept forestier de l'écoulement, il est certain que la végétation a une incidence sur le ruissellement donc sur l'écoulement.

- le relief : la définition, la forme, la superficie d'un bassin versant sont déterminées par le relief. L'influence du relief sur l'écoulement est une évidence.

- le réseau hydrographique siège de l'écoulement, conditionne nécessairement ses caractéristiques.

L'approche globale par événement va être appliquée à chacun de nos bassins. Dans un souci de comparaison des différents bassins entre eux, les hypothèses de calcul sont les mêmes pour tous les bassins. Ainsi, pour des raisons qui sont explicitées au paragraphe II - 2 - 1, le pas de temps de calcul retenu ne nous a pas permis de modéliser le grand bassin de Bam-Bam à Tialozoudou dans son ensemble (ce qui aurait nécessité un temps de calcul informatique déraisonnablement élevé). L'étude porte donc sur les cinq bassins : Barlo, Mazera, Taya, Bidjir et Tounkoul.

La plupart des modèles pluie-débit développés ces derniers temps par les hydrologues grâce aux moyens de calcul informatique mis à leur disposition, sont basés sur les mécanismes qui les séparent en deux parties : la production d'une part et le transfert de l'autre. La production ou fonction de production transforme les pluies brutes en pluies nettes qui engendrent les débits écoulés à l'exutoire au moyen du transfert ou fonction de transfert.

Comme nous l'avons signalé en introduction générale, un modèle permet de répondre à une question, son choix se fait donc en fonction des objectifs que l'on se fixe. Dans notre étude nous recherchons la validation des modèles conçus sur des écoulements dans les pays tempérés vis-à-vis des écoulements dans le Sahel dans un but de prédétermination des crues. L'outil recherché devra nous permettre de comparer le fonctionnement des différents bassins. La comparaison porte notamment sur les caractéristiques suivantes : les lames écoulées, les formes de crues et les débits de pointe.

Dans la première partie de ce chapitre nous faisons une présentation générale du concept de production, ensuite nous présentons la méthode de production choisie pour notre étude et enfin son application aux différents bassins.

Dans la deuxième partie nous présentons la méthode de transfert choisie et terminons par son application aux différents bassins.

## II - 1 - La production

La fonction de production est la partie de la modélisation hydrologique qui transforme la pluie brute en pluie nette.

Nous rappelons que la pluie nette est la partie de la pluie brute qui arrive par ruissellement de surface à l'exutoire. C'est donc ce qui reste de la pluie brute après déduction de toutes les pertes. Les pertes correspondent à l'infiltration dans les couches superficielles du sol, à l'interception par la végétation, au stockage dans les flaques, à la reprise par évaporation ...

Cette diversité des pertes nous donne une idée de la difficulté de les quantifier. Cette difficulté ne se mesure pas seulement aux différents termes des pertes mais aussi à l'échelle d'espace.

Sur une parcelle, toute l'eau qui s'infiltré est considérée comme perdue pour le ruissellement et toute l'eau qui ruisselle est supposée contribuer à la formation des crues (Masson, 1986). Si à l'échelle de la parcelle il est possible de mesurer les différents termes des pertes, à l'échelle du bassin versant il est seulement possible de mesurer en différents points les termes du bilan hydrique, mais l'intégration dans l'espace de ces mesures et de leur variabilité s'avère très difficile car la plupart des phénomènes ne sont pas continus (Ribstein, 1990). De plus certains processus physiques apparaissent sur un bassin versant alors qu'ils n'existaient pas à l'échelle de la parcelle. Par exemple, l'eau qui ruisselle en amont du bassin peut se réinfiltrer à l'aval si les différences de perméabilité le permettent. A l'inverse, l'eau infiltrée à l'amont peut ressortir à l'aval par suite d'un accident topographique ou d'une hétérogénéité pédologique, on parle alors d'exfiltration. C'est dire combien il est difficile de cerner les pertes, le concept de fonction de production est donc une représentation très grossière de la réalité. C'est aussi cette difficulté qui explique le foisonnement des modèles dont certains, comportant un nombre très élevé de paramètres nécessitent pour leur application des données d'une qualité très bonne qui ne sont pas toujours disponibles.

Il faut signaler pour cela qu'au Sahel, l'absence de nappe souterraine proche de la surface, le relief peu accentué, les pluies très intenses lors du passage des lignes de grains et les organisations pelliculaires superficielles sont des facteurs qui rendent le ruissellement de surface prépondérant par rapport à des phénomènes de type exfiltration. Ce qui justifie dans notre cas, le choix des modèles robustes ayant un nombre très limité de paramètres donc moins exigeants.

## II - 1 - 1 - Définition et justification de la méthode choisie.

Avec l'essor du calcul informatique, beaucoup de méthodes d'estimation de la fonction de production ont été développées. Nous pouvons citer par exemple les méthodes suivantes qui présentent l'avantage d'avoir déjà été utilisées dans des conditions proches de la nôtre et d'avoir peu de paramètres à identifier :

- La Capacité d'Absorption Moyenne (CAM) appelée aussi ( $\phi$ -index) par les anglosaxons (voir Morel-Seytoux, 1981), est l'une des plus classiques fonctions de production et qui a été le plus utilisée par les hydrologues de l'ORSTOM sur les petits bassins sahéliens. Elle comporte deux paramètres à identifier.

- La fonction de production PREVIK (PREvision Indice de Kohler) (Dujardin, 1980), mise au point pour des systèmes d'annonce de crues sur des petits bassins versants. Le nombre de paramètres à identifier est de cinq.

- La fonction de production proposée par Guillot et Duband (1980) avec quatre paramètres à identifier.

- La fonction de production proposée par Lorent (1975) qui comporte cinq paramètres à identifier.

- La fonction de production proposée par Girard et al. (1981). Cette fonction a été mise au point pour un modèle à discrétisation spatiale. Elle comporte quatre paramètres à identifier.

- La fonction de production de Holtan (1961). Cette fonction est basée sur la capacité d'infiltration d'un sol. Le nombre de paramètres à identifier est de cinq.

- La fonction de production du Soil Conservation Service ou SCS (U.S.D.A. 1972). Elle présente trois paramètres à identifier.

Ces fonctions de production dérivent toutes d'une capacité d'infiltration limite du sol, caractéristique valable pour des pluies très intenses en début d'averse et qui restent toujours supérieures à la capacité d'infiltration (Morel-Seytoux, 1981). Comme nous l'avons montré au paragraphe I - 2 - 2 - 4, les fortes pluies de notre zone d'étude sont le plus souvent très intenses au début et présentent un corps d'averse assez homogène. Elles respectent donc les conditions d'utilisation basées sur la capacité d'infiltration.

Nous avons choisi pour notre étude la fonction de production du Soil Conservation Service qui présente le nombre le moins élevé de paramètres à identifier et facile à mettre en oeuvre.

### Expression analytique du SCS.

La fonction de production du SCS a été développée par le Soil Conservation Service pour estimer l'écoulement de surface relatif à une averse sur de petits bassins mais elle peut être appliquée à de grands bassins. Deux notions essentielles constituent la base de cette méthode :

- le potentiel maximum de rétention  $S$  : la hauteur d'eau retenue dans le bassin sur la durée de l'averse est inférieure à une valeur  $S$  qui est le potentiel maximum de rétention,
- l'abstraction initiale : tant que la précipitation  $P$  comptée depuis le commencement de l'averse est inférieure à un taux  $I_a$  d'abstraction initiale, aucun écoulement ne se produit. L'écoulement potentiel est ensuite  $P - I_a$ .

L'expression analytique de la SCS peut être représentée par l'équation suivante valable pour une crue :

$$\frac{L_r - P + I_a}{S} = \frac{L_r}{P - I_a}$$

Dans laquelle :

- $P$  = lame d'eau précipitée
- $L_r$  = lame d'eau ruisselée
- $I_a$  = pluie d'imbibition.  $(P - I_a)$  représente la lame écoulee potentielle maximale
- $S$  = rétention maximale potentielle.

Cette même expression analytique calée sur sol sec devient :

$$L_r = \frac{(P - \alpha S)^2}{P + (1 - \alpha)S}$$

Ribstein a montré que  $\alpha$  tend vers 0 pour la plupart des petits bassins du Sahel qu'il a étudiés (dont Tounkoul et Bidjir). En adoptant cette valeur de  $\alpha$  on obtient l'expression suivante :

$$L_r = \frac{P^2}{P + S}$$

$S$  est le seul paramètre de la fonction.

Cette dernière expression nous permet de calculer directement le paramètre  $S$ .

$$S = \frac{P^2}{L_r} - P$$

Le ruissellement, cause essentielle de l'écoulement est d'après la plupart de la communauté hydrologique fonction de l'état d'humidité du sol. Cet constat est particulièrement vrai dans le cadre du Sahel. L'Indice des Précipitations Antérieures ou IPA est un indicateur très utilisé au Sahel pour définir l'humidité initiale d'un bassin avant chaque crue.

En considérant que S rétention maximale potentielle est fonction de l'IPA, nous avons fait une étude corrélative entre S et les IPA correspondants.

Il y a plusieurs formulations pour l'Indice des Précipitations Antérieures (Séguis, 1986), et pour notre étude nous utilisons la formule de Kohler (Kohler et Linsley, 1951) :

$$IPA_j = (IPA_i + P_i)K^n$$

Avec  $n = (j-i)$  jours

et  $K < 1$

$IPA_j = IPA$  avant l'averse de hauteur moyenne  $P_j$  qui suit immédiatement l'averse de hauteur moyenne  $P_i$ .

La valeur initiale de IPA c'est-à-dire avant la première pluie de l'année est nulle.

## II - 1 - 2 - Application aux différents bassins

En Hydrologie, la validité d'un modèle impose deux opérations essentielles pour son application : le calage et la validation.

- Le calage consiste à identifier sur un bassin versant les paramètres d'une fonction susceptible de représenter et reproduire le fonctionnement hydrologique de ce bassin. L'échantillon de crues sur lequel se fait cette opération dit échantillon de calage, doit être représentatif c'est-à-dire comporter toutes les variétés de crues que peut produire le bassin versant concerné.

- La validation est l'opération qui consiste à reconstituer avec les paramètres d'une fonction de production identifiés par calage, les crues d'un autre échantillon dit de validation. Les crues composant ce dernier échantillon étant différentes de celles composant l'échantillon de calage. La validation fait appel à une fonction de transfert qui se charge de la transformation en débit des résultats de la production.

L'application porte sur l'échantillon des crues retenues (paragraphe I - 3 - 4). Pour chaque bassin, les crues sélectionnées ont été réparties en deux échantillons, un pour le calage et un pour la validation. Cette répartition a été guidée par le souci d'avoir des crues de tous les types dans les deux échantillons. Les caractéristiques prises en compte sont : hauteur de pluie, lame ruisselée, débit de pointe et indice des précipitations antérieures. Il faut éviter de caler sur certaines catégories de crues, des crues fortes par exemple, et de valider sur une autre catégorie, comme par exemple des crues plus faibles. Les échantillons ainsi constitués serviront aussi au calage de la fonction de transfert. L'identification de l'hydrogramme unitaire avec la méthode de transfert choisie (chapitre II - 2) nécessitant un assez grand nombre de crues, nous avons composé nos échantillons dans les proportions d'environ deux tiers de crues en calage pour un tiers en validation.

Ce paragraphe concerne l'opération de calage de la fonction de production mise en oeuvre bassin par bassin.

### Le bassin de Tounkoul

L'échantillon de calage est constitué de 11 crues. Le coefficient S du SCS est calculé crue par crue ainsi que les IPA correspondants suivant la procédure exposée au paragraphe II - 1 - 1. Les IPA sont calculés pour trois valeurs du coefficient de décroissance K (0,9 ; 0,61 et 0,1).

Ces valeurs de S et des IPA calculées sont regroupées dans le tableau II - 1 qui suit :

Evénement	S	IPA		
		0,9	0,61	0,1
18-07-1964	1537*	8	4	0,1
26-08-1964	150	117	20	1,4
27-08-1964	112	114	17	1
30-08-1964	107	125	20	1
11-08-1965	765*	56	12	0,5
14-08-1965	265	72	21	3,4
29-08-1965	295	35	3	0
30-08-1965	300	71	26	2,4
01-09-1965	181	81	22	0,5
12-08-1966	1125*	20	1	0,1
16-08-1966	287	80	34	7
Moyenne	212 ; 466*	70	17	1,9

**Tableau II - 1 : Tounkoul : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9)**

Les valeurs de S varient globalement entre 100 et 300 millimètres. Seules trois valeurs (marquées d'une étoile " \* " dans le tableau précédent) sur onze diffèrent énormément des autres faisant passer la moyenne de 212 à 466 millimètres.

Ces valeurs très élevées de S correspondent aux cas particuliers des crues de faible débit. Cette constatation est vraie pour les deux crues de 2,7 et 4,7 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. La troisième de 10,6 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> est importante pour un petit bassin comme Tounkoul. Son comportement (valeur élevée de S) est dû à la pluie moyenne qui lui donne naissance. Elle est en effet provoquée par une pluie de 44,6 millimètres de hauteur qui se situe parmi les plus importantes enregistrées sur le bassin. Mais survenant après un antécédent pluviométrique très faible, elle ne donne lieu qu'à un ruissellement qui peut être considéré comme négligeable (3 % au lieu de 22 %, ruissellement moyen des pluies de la même importance). Il va de cette constatation que le paramètre S est en relation étroite avec l'antécédent pluviométrique.

Nous avons ensuite cherché à déterminer cette relation entre S et les IPA pour les trois valeurs du coefficient de décroissance K citées plus haut. Le meilleur ajustement est obtenu pour K = 0,9 avec des fonctions exponentielles. Nous obtenons la relation suivante :

$$S = \text{Exp}(7,21 - 0,021\text{IPA}).$$

Avec un coefficient de corrélation (Coef = -0,91) de 91 %.

La figure II - 1 représente S en fonction des IPA avec K=0,9.

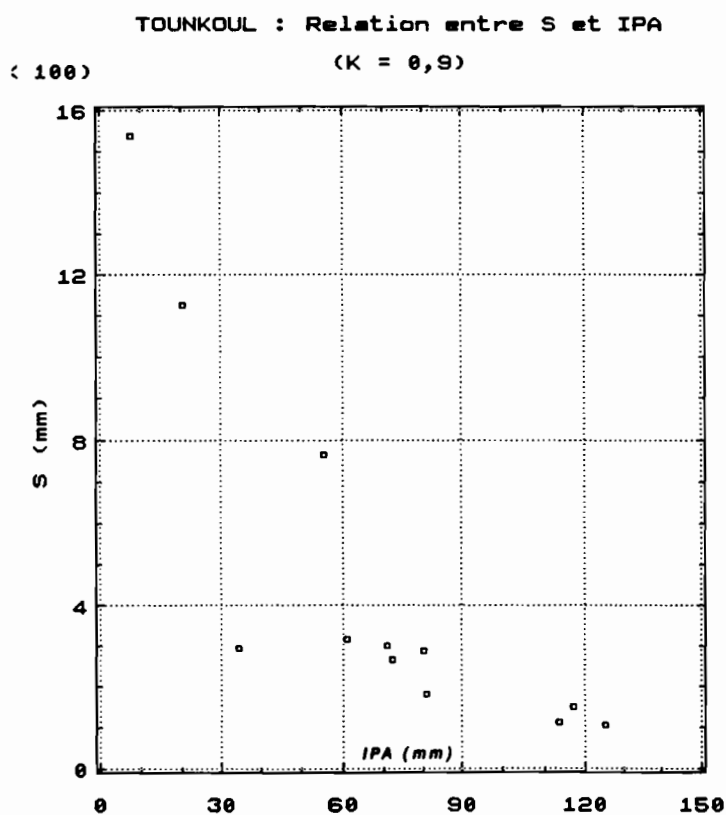


Figure II - 1 : Tounkoul : Relation entre S (SCS) et IPA.

## Le bassin de Bidjir

Pour Bidjir, l'échantillon total est composé de 16 crues dont 4 sont retenues pour la validation.

Les valeurs de S calculées crue par crue sur l'échantillon de calage et les IPA correspondants pour trois valeurs de K (0,9 ; 0,61 et 0,1) sont consignées dans le tableau II - 2.

Evénement	S	IPA		
		0,9	0,61	0,1
03-08-1964	385	41	5	0,2
07-08-1964	196	69	14	0,2
18-08-1964	87	95	19	2,3
21-08-1964	36	141	48	7,2
26-08-1964	65	118	17	2
29-08-1964	22	150	26	0,3
30-08-1964	26	148	25	1,5
09-09-64	213	79	6	0,5
11-09-1964	262	89	14	0,6
23-07-1966	429	58	26	28
18-08-1966	224	94	27	0,5
31-08-1966	244	54	5	0,1
Moyenne	182	95	17	3.6

Tableau II - 2 : Bidjir : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9)

La valeur moyenne de S est de 204 millimètres. Contrairement à Tounkoul, on n'observe pas de valeurs de S très élevées. Les valeurs minimale et maximale sont respectivement 22 et 429 millimètres contre 107 et 1537 millimètres à Tounkoul.

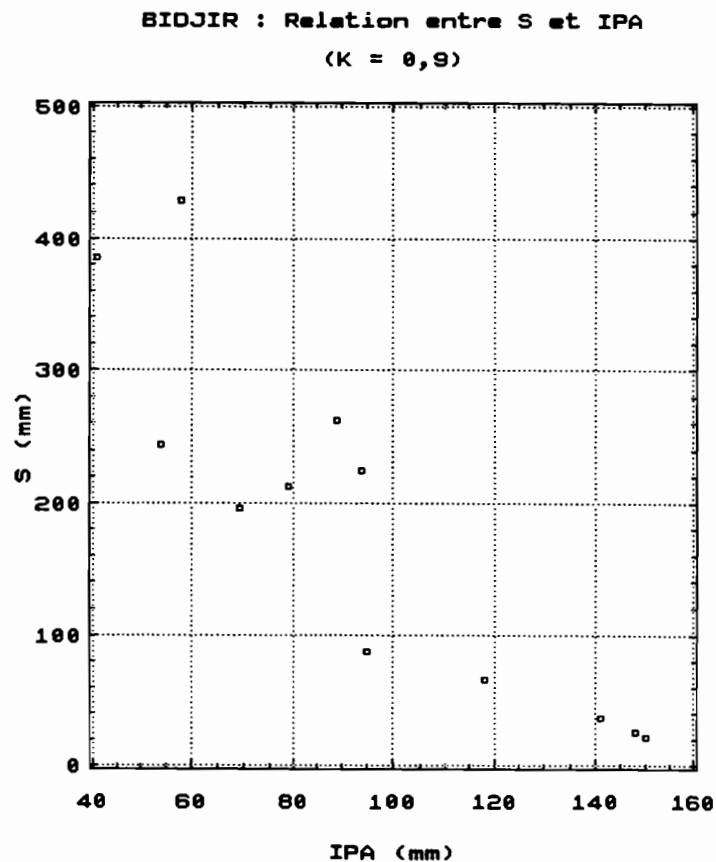
L'ajustement de fonction exponentielle entre S et les IPA donne la meilleure corrélation avec  $K=0,9$ .

La relation obtenue est la suivante :

$$S = \text{Exp}(7,33 - 0,026\text{IPA})$$

Le coefficient de corrélation (Coef) de 95 % est plus élevé qu'à Tounkoul.

La figure II - 2 représente S en fonction des IPA avec  $K = 0,9$



**Figure II - 2 : Bidjir : Relation entre S (SCS) et IPA.**

## Le bassin de Taya

Le nombre des crues composant l'échantillon total est de 12 dont 9 sont utilisées pour le calage. Les valeurs de S calculées crue par crue et les IPA correspondants pour les trois valeurs de K sont consignés dans le tableau II - 3.

Evénement	S	IPA		
		0,9	0,61	0,1
18-08-1964	116	87	14	1
20-08-1964	140	100	21	1
21-08-1964	92	114	29	3,3
27-08-1964	55	104	21	1,8
29-08-1964	83	115	21	0,3
30-08-1964	25	127	22	1,7
01-09-1964	83	124	20	0,2
11-09-1964	202	86	13	0,4
09-09-1965	672	65	4	0
Moyenne	163	100	18	1,1

**Tableau II - 3 : Taya : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9)**

La valeur moyenne de S de 163 millimètres, reste du même ordre que Tounkoul et Bidjir. Hormis une valeur particulièrement très élevée, S varie entre 25 et 200 ; la moyenne dans ce cas est alors de 100 millimètres. Les valeurs minimale et maximale sont respectivement 25 et 672 millimètres.

Comme pour Tounkoul et Bidjir, la meilleure corrélation est obtenue pour  $K = 0,9$  ; l'expression de la relation est la suivante :

$$S = \text{Exp}(8,69 - 0,039\text{IPA})$$

Le coefficient de corrélation de 87 % est plus petit qu'à Tounkoul et Bidjir.

La figure II - 3 représente S en fonction des IPA pour  $K = 0,9$ .

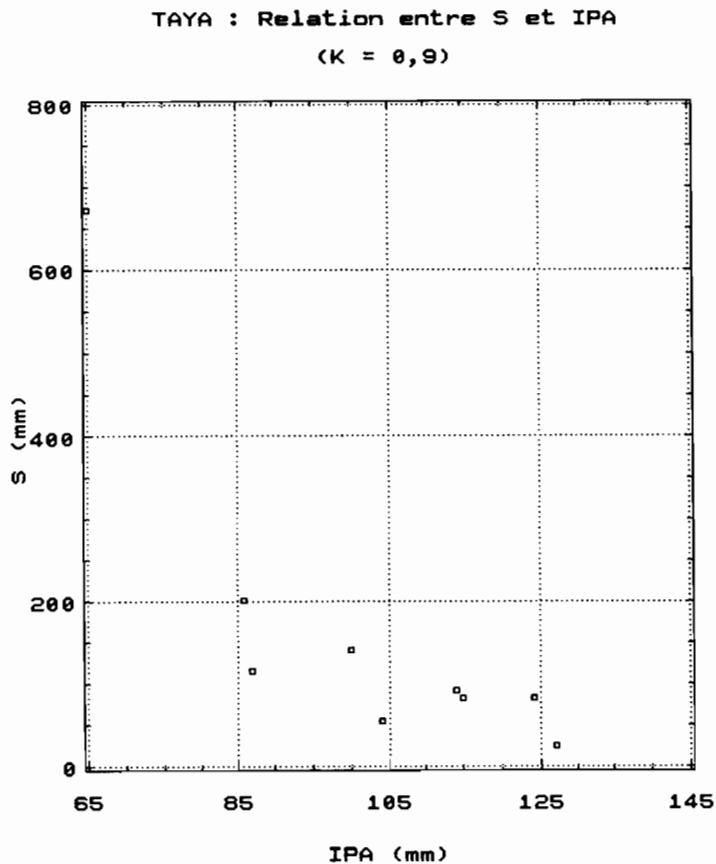


Figure II - 3 : Taya : Relation entre S (SCS) et IPA.

### Le bassin de Mazera

L'échantillon total est constitué de 18 crues dont 6 sont retenues pour la validation.

Les valeurs de S calculées crue par crue et les IPA correspondants pour les trois valeurs de K sont regroupés dans le tableau II - 4.

Evénement	S	IPA		
		0,9	0,61	0,1
24-07-1964	502	34	7	0,1
11-08-1964	315	60	11	0,5
15-08-1964	267	74	14	0,4
17-08-1964	61	70	10	0,1
26-08-1964	60	110	18	1,5
27-08-1964	83	117	23	2,1
29-08-1964	76	124	21	0,3
30-08-1964	61	125	22	1,6
02-09-1964	23	115	15	1
23-09-1964	403	38	1	0,1
15-08-1966	975	58	11	0
16-08-1966	184	92	38	10
Moyenne	251	85	16	1,5

**Tableau II - 4 : Mazera : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9)**

S reste du même ordre de grandeur que les autres bassins. Sa valeur moyenne est 251 avec un minimum de 23 et un maximum de 975.

Comme pour les autres bassins, la meilleure corrélation de S en fonction des IPA est obtenue avec  $K = 0,9$ .

$$S = \text{Exp}(7,27 - 0,027\text{IPA})$$

Le coefficient de corrélation de 81 % est le plus faible des quatre bassins déjà étudiés.

La figure II - 4 représente S en fonction des IPA pour  $K = 0,9$ .

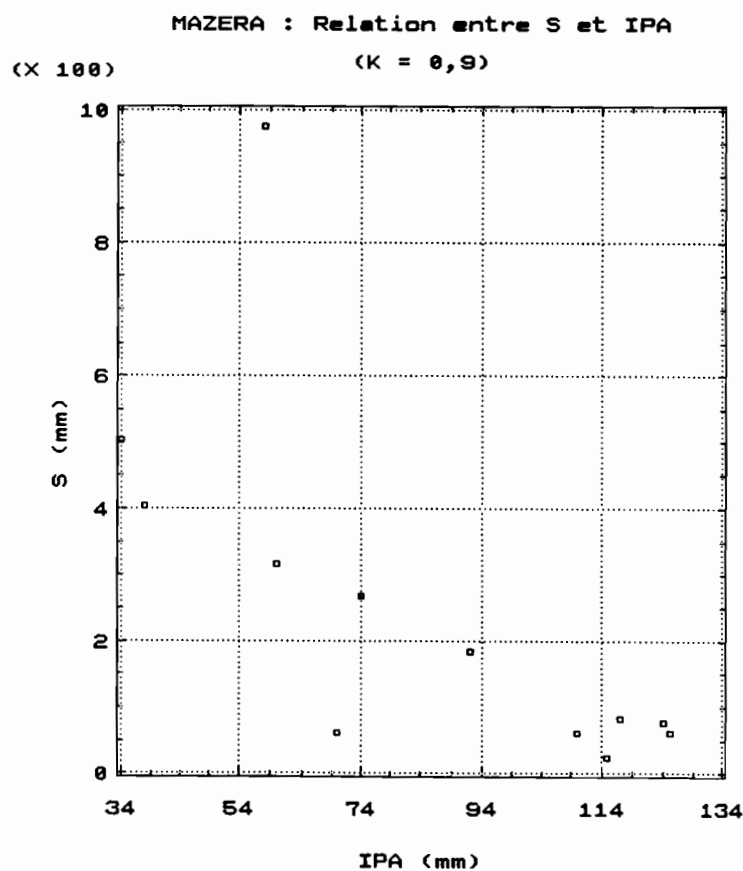


Figure II - 4 : Mazera : Relation entre S (SCS) et IPA.

## Le bassin de Barlo

L'échantillon total est constitué de 19 crues dont 5 sont retenues pour la validation.

Les valeurs de S calculées crue par crue et les IPA correspondants pour les différentes valeurs de K choisies sont consignées dans le tableau II - 5 suivant :

Evénement	S	IPA		
		0,9	0,61	0,1
04-08-1963	1314*	30	4	0,1
11-08-1963	165	53	8	0,2
31-08-1963	1350*	33	2	0
05-09-1963	54	56	8	0
29-08-1964	78	121	21	0,2
30-08-1964	26	128	26	2,1
01-09-1964	31	120	17	0,2
02-09-1964	42	118	17	1
09-09-1964	395	68	6	0,4
11-09-1964	86	75	12	0,4
23-09-1964	85	41	6	0,9
23-07-1966	297	61	25	1,8
13-08-1966	1110*	28	5	0,6
16-08-1966	146	81	33	9
Moyenne	128 ; 370*	72	14	1.2

**Tableau II - 5 : Barlo : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9).**

La valeur moyenne de S, 370 millimètres est du même ordre que les autres bassins. Trois valeurs particulièrement élevées (ces valeurs sont marquées d'une étoile " \* " dans le tableau précédent) diffèrent des onze autres qui font une moyenne de 100 millimètres.

La meilleure corrélation entre S et IPA est aussi obtenue pour  $K = 0,9$  donnant la relation est suivante :

$$S = \text{Exp}(7,24 - 0,03\text{IPA})$$

avec un coefficient de corrélation de 80 %.

La figure II - 5 représente S en fonction des IPA pour  $K = 0,9$ .

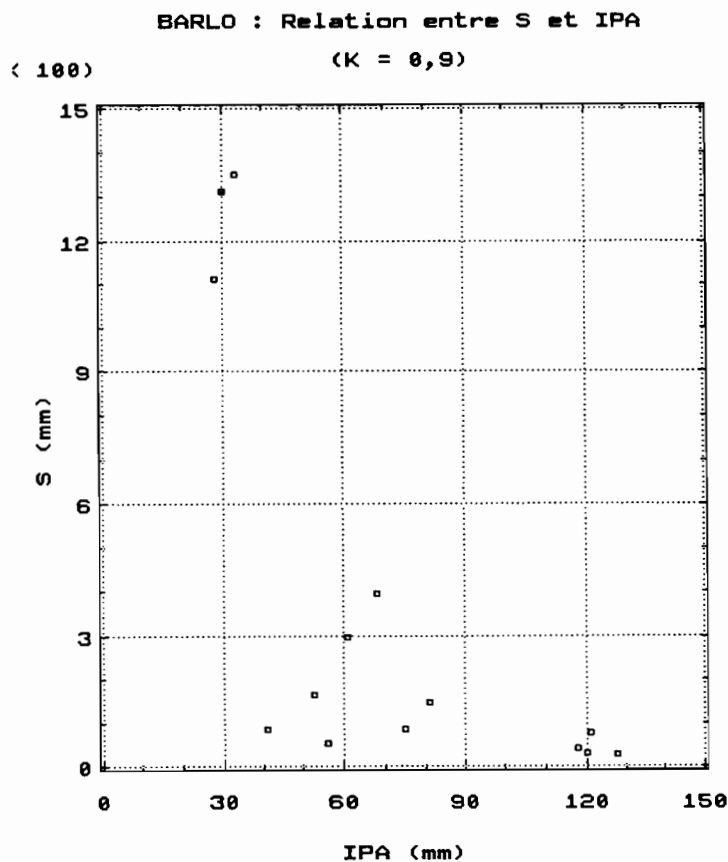


Figure II - 5 : Barlo : Relation entre S (SCS) et IPA.

## Conclusion

La production, nous le rappelons est le processus de la transformation de la pluie brute en pluie nette qui arrive par ruissellement de surface à l'exutoire, autrement dit la part de la pluie qui concourt au ruissellement de surface. Cette fraction des précipitations peut être appréciée par un coefficient  $K_r$  que l'on appelle coefficient de ruissellement. Le coefficient de ruissellement d'un bassin pour une averse donnée est le rapport de la lame ruisselée par la lame moyenne précipitée au cours de cette averse. Ce coefficient nous permettra d'exprimer les enseignements que nous tirons de l'application de la fonction de production.

Les principaux enseignements que nous retenons de l'application du SCS fonction de production choisie, nous sont donnés par S, coefficient de la fonction.

- La valeur moyenne de S est du même ordre pour tous les bassins.

- Pour des valeurs de S supérieures à 500 millimètres, le coefficient de ruissellement  $K_r$  est inférieur à 5%. Dans le cas du bassin de Bidjir, S n'atteint pas la valeur de 500 millimètres. La valeur la plus élevée obtenue sur ce bassin est de 429 millimètres, il lui correspond alors un coefficient de ruissellement 4,8%. Si S atteignait la valeur de 500 millimètres,  $K_r$  serait forcément inférieur à 5%.

- Pour S inférieur à 100 millimètres, le coefficient de ruissellement est toujours supérieur à 10%. Il nous faut signaler le cas du bassin de Tounkoul où S est toujours supérieur à 100 millimètres. Sur ce bassin, il n'est pas aisé de trouver une limite de S donnant un fort coefficient de ruissellement comme le montre l'exemple des crues du 26 août 1964 et 30 août 1965 : la première pour une valeur de S de 150 millimètres, on relève un coefficient de ruissellement de 5,6 % tandis que la deuxième avec S égal à 300 millimètres donne un coefficient de ruissellement de 8,2 %. Ce qui semble paradoxal si nous ne considérons que le seul coefficient S. C'est du côté des lames d'eau précipitée que nous sommes allés chercher l'explication : la première crue est provoquée par une averse de 9 millimètres de hauteur moyenne contre 27 millimètres pour la deuxième. La lame d'eau précipitée l'emporte ici devant S. Il faut cependant se garder de généraliser ce cas comme le prouve l'exemple suivant : une lame d'eau précipitée de 45 millimètres ne donne qu'un coefficient de ruissellement de 3,8 % (crue du 12 août 1966).

L'expression analytique de  $K_r$  :

$$K_r = \frac{P}{P + S} \quad (P = \text{lame moyenne précipitée})$$

montre que :

- pour des valeurs de P égales,  $K_r$  diminue quand S augmente.
- pour des valeurs de S égales,  $K_r$  augmente avec P.

Nous cherchons pour notre part à savoir s'il existe ou non des valeurs limites de S nous permettant d'apprécier  $K_r$  sans considérer P.

Suivant nos résultats nous pouvons dire que :

- Pour des valeurs extrêmement élevées de S, nous avons des ruissellements extrêmement faibles. La valeur minimale de S pour des faibles ruissellements (inférieurs à 5%) peut être estimée à 500 millimètres.

- Pour des valeurs extrêmement faibles de S, nous avons des ruissellements relativement forts. Il apparait aussi l'existence d'un seuil de S pour lequel le ruissellement est très important. Avec les données dont nous disposons, il est de 120 millimètres environ pour un coefficient de ruissellement supérieur à 10%. Pour des valeurs plus élevées de S (300 millimètres environ), les ruissellements sont aussi importants si les IPA sont supérieurs à 80 millimètres (avec  $K = 0,90$ ).

En examinant les valeurs des IPA, il apparait aussi l'existence d'un seuil pour lequel le ruissellement est important. Ce seuil est variable d'un bassin à un autre : 70 millimètres pour Barlo, 105 millimètres pour Mazera, 110 millimètres pour Taya, 90 millimètres pour Bidjir et 80 millimètres pour Tounkoul. Cette variation des IPA ne s'ordonne suivant aucun paramètre simple.

L'intensité de la relation existant entre le coefficient S et les IPA est traduite pour chaque bassin par une fonction exponentielle. Cette relation est meilleure pour K, coefficient de décroissance égal à 0,90. Dans chaque cas le coefficient de corrélation est au moins égal à 80% (80% à Barlo, 82% Mazera, 87% à Taya, 91% à Tounkoul et 94% à Bidjir). La corrélation sans être proportionnelle à la superficie des bassins (Bidjir qui est plus grand que Tounkoul a le coefficient de corrélation le plus élevé), est plus grande pour les plus petits bassins. La complexité du fonctionnement d'un bassin versant augmente avec sa superficie.



## II - 2 - Le transfert

Après la fonction de production, nous présentons la fonction de transfert. La fonction de transfert est la partie de la modélisation hydrologique qui transforme les pluies nettes en débits écoulés à l'exutoire.

### II - 2 - 1 - Définition et justification de la méthode de transfert choisie.

Nous avons choisi pour l'identification du transfert la méthode DPFT : Différence Première de la Fonction de Transfert qui doit son origine à Guillot et Duband (1980). Elle est mise au point pour des bassins versants de 100 à 3000 km<sup>2</sup>. Avant de donner les principes de base de la méthode, nous allons présenter les notations que nous utilisons.

Notations :

- $n$  : durée constante (en nombre de pas de temps) des crues
- $m$  : durée constante (en nombre de pas de temps) des pluies
- $T$  : mémoire du système ou durée de la fonction de transfert
- $N$  : nombre d'épisodes pris en compte
- $Q_l(k)$  : débit total à l'instant  $k$  pour l'Evénement  $l$
- $dq_l(k)$  : différence première du débit total observé entre les instants  $(k-1)$  et  $k$  pour le  $l$ -ième épisode
- $PB_l(i)$  : pluie brute exprimée sous forme de volume d'eau cumulé entre les instants  $(i-1)$  et  $i$  pour le  $l$ -ième épisode
- $PN_l(i)$  : pluie nette exprimée sous forme de volume d'eau cumulé entre les instants  $(i-1)$  et  $i$  pour le  $l$ -ième épisode
- $h(j)$  : coefficient de la fonction de transfert moyenne à l'instant  $j$ .
- $dh(j)$  : coefficient de la différence première de la fonction de transfert moyenne entre les instants  $(j-1)$  et  $j$ .

$$dh(j) = h(j) - h(j-1)$$

Avec les notations précédentes, les indices  $i, j, k$  et  $l$  respectent les conditions suivantes :

$$\begin{array}{ll} 1 < i < m & 1 < j < T \\ 1 < k < n & 1 < l < N \end{array}$$

$$n = m + T - 1$$

La méthode est basée sur les hypothèses suivantes : entre la pluie nette  $PN(i)$  sur l'intervalle de temps  $i$  et le débit  $Q(i)$  à la fin de cet intervalle, il existe une fonction de transfert linéaire représentée de manière discrète par les éléments  $H_i$  d'un vecteur  $H(i = 1, \dots, T)$ .

$$\text{On a : } Q(i) = \sum_{j=1}^T H_j PN(i-j+1)$$

La méthode travaille sur les variations de débits et des coefficients de la fonction de transfert d'où son nom de Différences Premières de la Fonction de Transfert.

$$\begin{array}{l} dq(i) = Q(i) - Q(i-1) \\ h_i = H_i - H_{i-1} \end{array}$$

On a :

$dq(i) = \sum_{j=1}^T h_j PN(i-j+1)$
--------------------------------------

Cette méthode a fait l'objet de plusieurs travaux (Versiani, 1983 ; Lubès, 1985 ; Nalbantis, 1987 ; Ribstein 1990), nous ne la présenterons donc pas en détail.

Cependant, pour comprendre notre algorithme de calcul, nous rappellerons les points ci-après.

En faisant l'hypothèse d'une fonction de transfert moyenne, il est possible de présenter l'équation précédente sous la forme d'un système d'équations correspondant à  $N$  événements ayant chacun une durée constante de crue  $n$ . Ce système en écriture matricielle donne la relation suivante :

$$[dq] = [PN] [dh] \quad (1)$$

dimensions :  $(nN,1) \quad (nN,T) \quad (T,1)$

Le fondement de la DPFT repose sur l'idée que les pluies nettes sont des inconnues du système qu'il faut identifier sur N événements non unitaires. Cette recherche des pluies nettes se fait en considérant le système précédent écrit sous la forme de N produits matriciels qui s'écrit pour l variant de 1 à N :

$$[dq_i] = [dh] \cdot [PN_i] \quad (2)$$

Dimensions  $(n,1) \quad (n,m) \quad (m,1)$

Pour notre calcul, nous utilisons la version de la méthode proposée par Lubès (1985) que Ribstein (1990) a repris dans ses travaux .

#### Algorithmes utilisés.

Dans notre version, les deux systèmes précédents sont résolus par un algorithme des moindres carrés qui est équivalent à une résolution en corrélation multiple si on prend en compte un terme constant. C'est un algorithme de corrélation multiple qui était proposé dans la version originale (Guillot et Duband, 1980).

On initialise le système (1) avec des pluies brutes. Le système s'écrit alors :

$$[dq] = [PB].[dh] + [e1] \quad (3)$$

$[e1]$  est un vecteur des écarts résiduels entre les variations observées des débits et les variations calculées par le système (1).

La résolution du système (1) par les moindres carrés consiste à minimiser le produit matriciel :

$$[e1]^T \cdot [e1] \quad [e1]^T \text{ signifie matrice transposée.}$$

Les coefficients  $dh(k)$  de la DPFT sont identifiés par le produit :

$$[dh] = [ [PB]^T \cdot [PB] ]^{-1} \cdot [PB]^T \cdot [dq] \quad (4)$$

On calcule ensuite les corrections  $ep_1$  à appliquer aux pluies brutes pour avoir une première estimation des pluies nettes ; il s'agit de la méthode "correction des pluies nettes" qui donne des résultats équivalents à la méthode de déconvolution directe du système (2).

$$[PN_i] = [PB_i] + [ep_i]$$

En résolvant le système (2) avec l'équation précédente, on peut estimer les valeurs  $ep_i$  et une première approximation des pluies nettes.

$$[ep_i] = [ [dh]^T \cdot [dh] ]^{-1} \cdot [dh]^T \cdot [e1_i] \quad (5)$$

Le vecteur  $e1_i$  est le vecteur des écarts résiduels du système (3) pour le  $i$ -ième Evénement.

Avec les pluies nettes obtenues par le système (5), on peut recalculer une nouvelle estimation de la DPFT par le système (4). On continue les itérations jusqu'à obtenir un coefficient de corrélation élevé entre variations de débits observées et variations calculées.

Avec la DPFT finale, on déconvolue à partir du système (2) pour obtenir les pluies nettes :

$$[PN_i] = [ [dh]^T \cdot [dh] ]^{-1} \cdot [dh]^T \cdot [dq_i] \quad (6)$$

La DPFT présente l'avantage de s'appliquer sans imposition à priori, ni d'une technique de séparation des écoulements qui est toujours délicate, ni surtout d'une expression analytique de la fonction de production.

Son principal inconvénient tient dans son algorithme de calcul qui utilise des matrices quasi singulières. Pour éviter une trop grande instabilité numérique, il faut imposer des contraintes issues de nos connaissances hydrologiques.

Ces contraintes sont les suivantes :

- Forme de la fonction de transfert. Tous les auteurs qui ont utilisé la DPFT ont noté l'apparition d'oscillations numériques sur la "queue" de la fonction de transfert, oscillations auxquelles on ne peut trouver une signification hydrologique. Ces oscillations peuvent être supprimées en imposant un modèle de tarissement du type "exponentielle décroissante".

- Coefficients de la fonction de transfert positifs. C'est une contrainte qui paraît logique d'un point de vue hydrologique ; en effet un coefficient négatif conduirait, pour une pluie nette non nulle à une diminution du débit total.

- Fonction de transfert unitaire. Si les calculs sont faits avec des pluies et des débits exprimés dans la même unité, la loi de la conservation des volumes impose que la fonction de transfert ait une aire égale à 1.

- Pluies nettes positives. Comme les pluies nettes représentent la fraction de la pluie brute qui arrive par ruissellement direct à l'exutoire, des valeurs négatives n'ont aucune signification hydrologique. Les pluies nettes de la DPFT ne sont utilisées que pour l'identification du transfert uniquement. Dans le modèle complet ce sont les pluies nettes de la fonction de production du SCS qui sont pris en considération.

- Coefficient de ruissellement inférieur à 1. C'est aussi une contrainte logique du point de vue de la conception de la fonction de production.

Toutes les applications de la méthode ont montré une bonne convergence de l'algorithme (Ribstein, 1990). En conséquence, ces contraintes ne seront pas imposées dans l'algorithme (moindre carrés avec contrainte) mais entre les étapes de calcul en modifiant les valeurs estimées de façon à se rapprocher des relations imposées dans l'étape suivante de l'itération.

Nous signalons que nous avons adopté un pas de temps de calcul de vingt minutes, de façon à identifier au moins quatre coefficients de la fonction de transfert dans la montée de l'hydrogramme unitaire comme le proposait Nalbantis (1987).



## II - 2 - 2 - Application aux différents bassins

Dans notre programme informatique de la DPFT (inspiré du travail de Lubès, 1985), le calcul est basé sur un algorithme du type corrélation multiple dont les paramètres à définir sont :

- longueur constante  $n$  des crues,
- longueur constante  $m$  des pluies,
- pas de temps  $K_p$  du début de lissage,
- possibilité d'appliquer deux méthodes de lissage de la queue de la fonction de transfert,
- prise en compte ou non du terme constant de la corrélation,
- application ou non de la contrainte : coefficients de la fonction de transfert positifs,
- application ou non de la contrainte : pluie nette inférieure à pluie brute à chaque pas de temps,
- application ou non de la contrainte : fonction de transfert normée,

De plus, les deux dernières contraintes peuvent s'appliquer à toutes les itérations, ou seulement à la dernière itération.

Mais nous avons voulu aussi étudier la DPFT en faisant varier l'échantillon des données, tout en restant dans le cadre des crues sélectionnées pour le mode calage des modèles. Comme on peut l'imaginer, le nombre de combinaisons possibles est trop grand pour les tester toutes. C'est pourquoi nous inspirant des travaux de Lubès (1985) et Nalbantis (1987), nous avons choisi un "mode normal" d'application de la DPFT et limité les combinaisons à tester par rapport à ce mode normal.

Ce mode normal est défini comme suit :

- pour chaque bassin, les longueurs de pluie et de crue sont les plus faibles possibles tout en gardant toutes les pluies et toutes les variations significatives des débits ;
- c'est la méthode de lissage "exponentielle décroissante" qui est appliquée, elle est calculée à partir du point  $K_p$  et du point  $(K_p-1)$  ;
- le terme constant de la corrélation est pris en compte à toutes les itérations ;
- les coefficients de la fonction de transfert sont toujours positifs ;
- les pluies nettes ne sont pas inférieures aux pluies brutes à chaque itération ;

- les pas de temps de calcul ont été définis au préalable de façon à avoir 4 à 5 pas de temps dans la montée des crues ;
- la fonction de transfert est normée à chaque itération,
- l'échantillon utilisé est l'échantillon complet de calage ;
- les pluies brutes en entrée sont les pluies observées à tous les pluviographes du bassin corrigées par la pluie moyenne.

Comme dans le cas de la production, l'application de la fonction de transfert porte ici sur le calage. Nous utilisons les mêmes échantillons que ceux de la production. Nous rappelons que les événements sont divisés en pas de temps de vingt minutes pour le calcul.

Nous utilisons les notations suivantes dans les tableaux des données et caractéristiques du transfert :

- $Q_p$  = débit de pointe,
- $T_b$  = temps de base,
- $t_m$  = temps de montée,
- D. forts = échantillon de crues à débits forts,
- D. moyens = échantillon de crues à débits moyens,
- D. faibles = échantillon de crues à débits faibles.

## Le bassin de TOUNKOUL.

L'échantillon de calage est constitué de 11 crues (paragraphe II - 1 - 2). Nous utilisons en entrée de la fonction, les relevés du pluviographe 12 (figure I - 8) corrigés par la pluie moyenne du bassin.

### Echantillonnage

Les crues qui constituent l'échantillon de calage ont un débit variant de  $2,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à  $58 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , un intervalle de variation qui semble très grand. Aussi pour nous rendre compte de son influence, nous avons constitué les échantillons suivants en fonction de la valeur du débit :

- échantillon des débits forts constitué des crues dont le débit est supérieur à  $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits moyens (appelés ainsi à cause de leur valeur intermédiaire entre les débits faibles et les débits forts) constitué des crues dont le débit est compris entre 10 et  $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits faibles constitué des crues dont le débit est inférieur ou égal à  $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Avant cette application, nous allons analyser les crues notamment leur forme.

### Analyse des crues

#### Débits forts :

Les 4 crues constituant cet échantillon sont consignées dans le tableau II - 6 - 1.

Evénement	$Q_p$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
27-08-1964	56,8	15,1
30-08-1964	58	13,9
29-08-1965	36,6	6,4
01-09-1965	24,5	7,5

Tableau II - 6 - 1 : Crues à forts débits (Toungoul).

La crue du 01 - 09 - 1965 qui est la plus faible de cet échantillon, est une crue double. Le premier sommet moins marqué est très faible ( $11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) devant le deuxième ( $24,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Celle du 27 - 08 - 1964 présente un palier remarquable (presque horizontal sur trois pas de temps) en début de décrue. Les deux autres sont des crues simples sans singularité apparente.

#### Débits moyens:

Cet échantillon est aussi constitué de 4 crues regroupées dans le tableau II - 6 - 2.

Evénement	$Q_p \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$	Lame ruisselée (mm)
14-08-1965	11,8	1,9
30-08-1965	11	2,2
12-08-1966	10,4	1,7
16-08-1966	20,4	3,8

**Tableau II - 6 - 2 : Crues à débits moyens (Toukoul).**

Deux crues composant cet échantillon sont des crues doubles ; l'une (crue du 14-08-1965) a le premier sommet très faible devant le deuxième tandis que l'autre a son premier sommet plus important que le deuxième. Les deux dernières sont des crues simples. Notons que les débits de pointe des crues de cet échantillon sont plus homogènes.

#### Débits faibles :

Trois crues constituent cet échantillon (tableau II - 6 - 3).

Evénement	$Q_p \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$	Lame ruisselée (mm)
18-07-1964	4,7	0,4
26-08-1964	4,3	0,5
11-08-1965	2,3	0,4

**Tableau II - 6 - 3 : Crues à débits faibles (Toukoul).**

Toutes les crues sont simples. Celle du 26-08-1964 présente trois paliers bien marqués en montée, par contre celle du 11-08-1965 qui monte régulièrement, présente des discontinuités en décrue.

### Lissage

L'opération de lissage a porté sur l'échantillon global de calage. Suivant l'allure de la fonction de transfert, nous avons fait le lissage aux différents temps suivants : 800, 400, 320 et 280 minutes. A 800 et 400 minutes, on note des instabilités sur la queue des fonctions de transfert (figures II - 6 - 1 et II - 6 - 2). A 320 minutes, ces instabilités disparaissent ; à 280 minutes il n'y a pas d'amélioration notable par rapport à 320 minutes (figures II - 6 - 3 et II - 6 - 4). Nous avons donc adopté le lissage de la fonction de transfert à partir de 320 minutes.

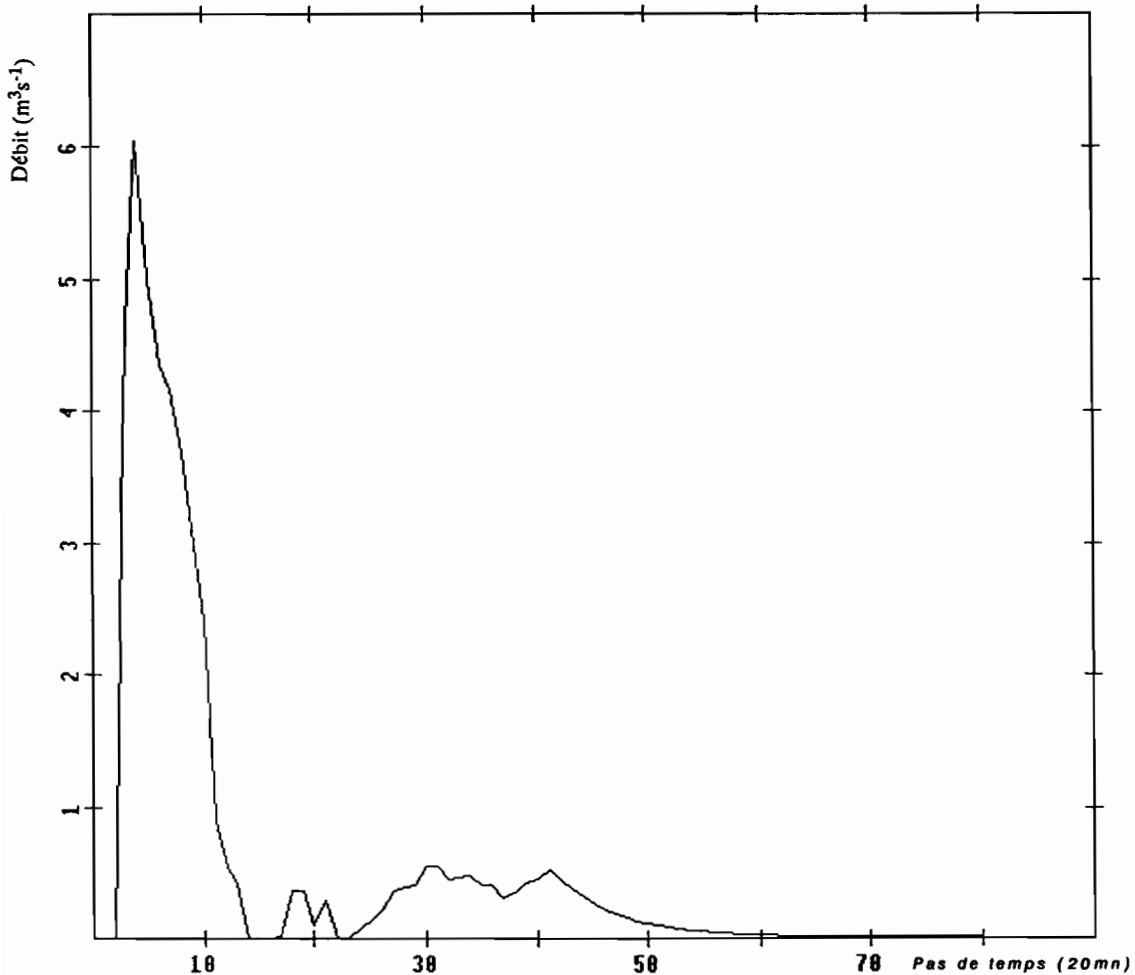


Figure II - 6 - 1 : Lissage à partir de 800 minutes (Toukoul).

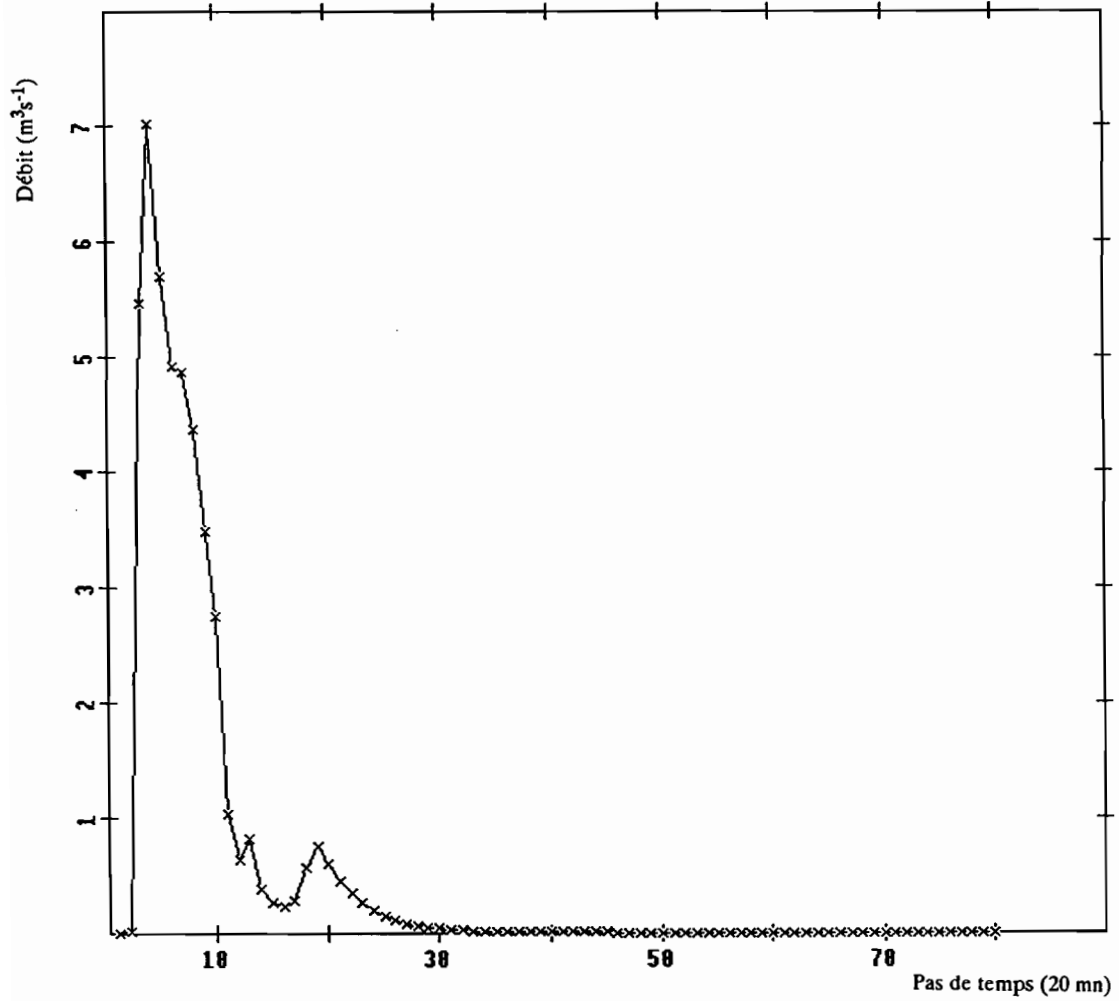


Figure II - 6 - 2 : Lissage à partir de 400 minutes (Toukoul).

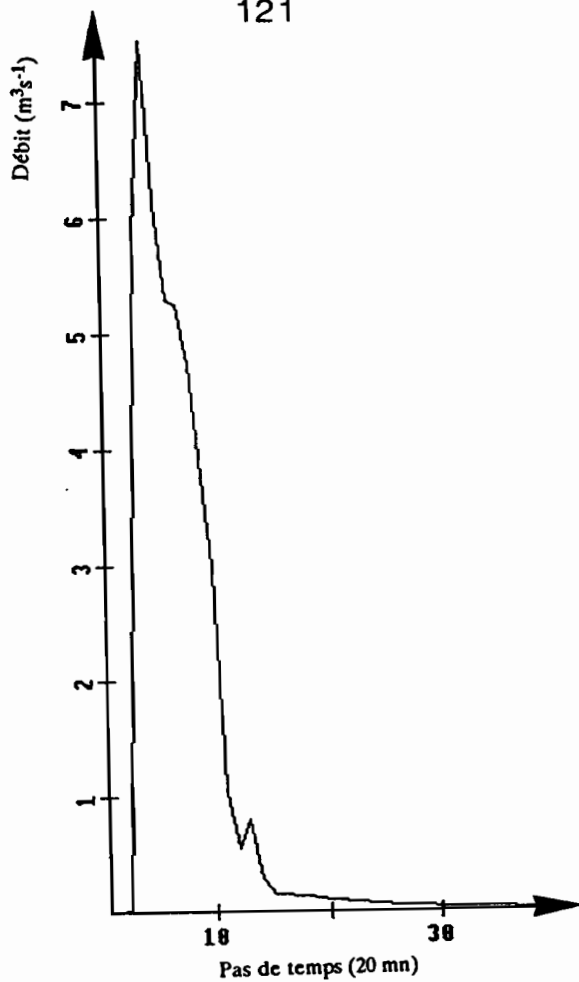


Figure II - 6 - 4 : Lissage à partir de 400 minutes (Toukoul).

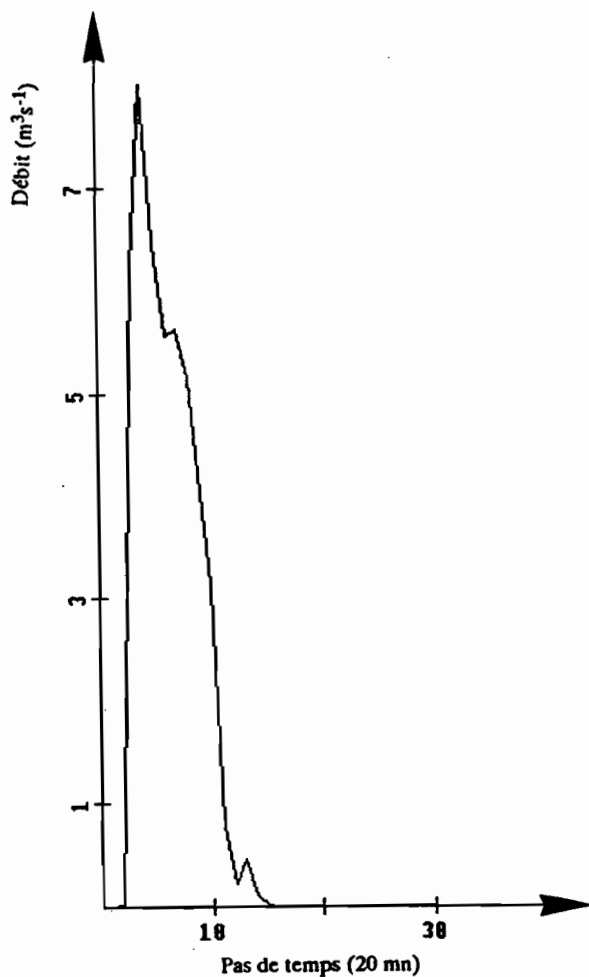


Figure II - 6 - 4 : Lissage à partir de 400 minutes (Toukoul).

### Analyse des fonctions de transfert (FT)

Les FT des différents échantillons ont la même allure. Les seules différences notables viennent de la FT des débits forts qui présente deux sommets et celle des débits faibles qui présente une remontée bien distincte de la queue.

A un pas de temps près, les temps de montée sont les mêmes que celui de l'échantillon global ; celui des débits faibles est en avance et ceux des débits forts et moyens sont en retard. Quant aux temps de base, ceux des débits moyens et faibles sont les mêmes avec un pas de temps de retard sur celui de l'échantillon global et un pas de temps d'avance sur celui des débits forts.

Les caractéristiques des FT obtenues avec les différents échantillons sont consignées dans le tableau II - 6 - 4.

Echantillon	Global	D. forts	D. moyens	D. faibles
Qp (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	7,5	6,7	8,5	10,5
Tm (mn)	80	100	120	60
Tb (mn)	240	280	260	260

**Tableau II - 6 - 4 : Tounkoul : Caractéristiques des fonctions de transfert.**

On constate que le débit de pointe des FT des différents échantillons varie en sens inverse de la moyenne des débits de pointe des crues qui les composent (tableau II - 6 - 5).

Echantillon	D. faibles	D. moyens	Global	D. forts
Moyenne (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	4	13	22	44
Qp (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) des FT	10,5	8,5	7,5	6,7

**Tableau II - 6 - 5 : Tounkoul : Débit moyen des différents échantillons et débit de pointe des fonctions de transfert.**

Les FT semblent être influencées par les écarts entre les débits d'un même échantillon plutôt que par la forme crues ( crues composées). On le constate bien dans le cas des débits faibles où toutes les crues sont simples mais la FT présente deux parties distinctes, les crues à débits moyens sont pour la moitié des crues composées mais la FT ne présente pas deux sommets et le cas des fortes crues, une seule sur quatre est composée mais la FT présente deux sommets. Pour l'échantillon global, le nombre élevé des crues l'emporte sur leur hétérogénéité en valeur de débits de pointe.

La figure II - 6 - 5 représente les FT des différents échantillons.

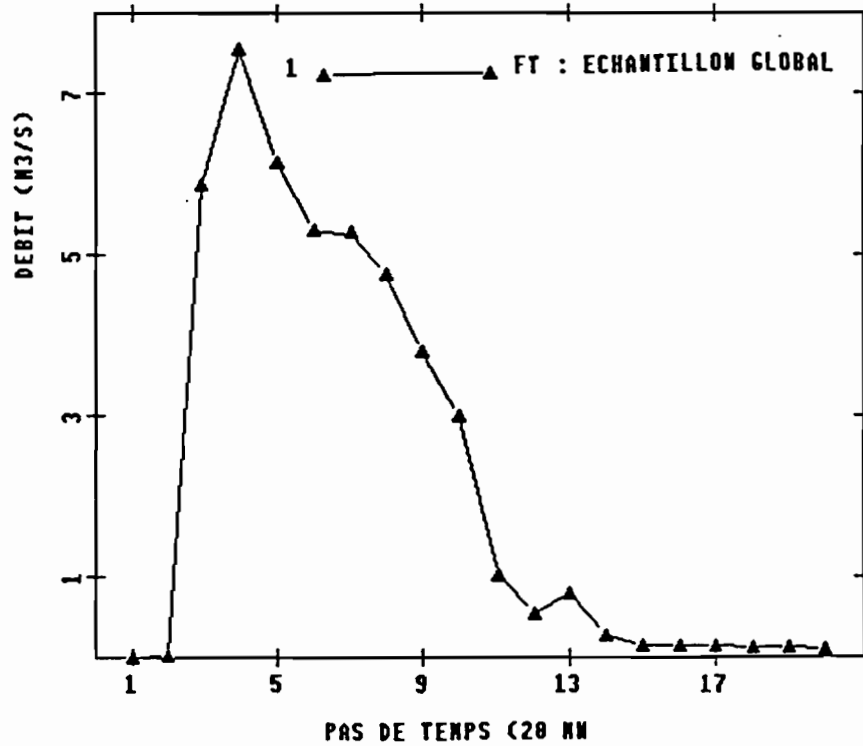
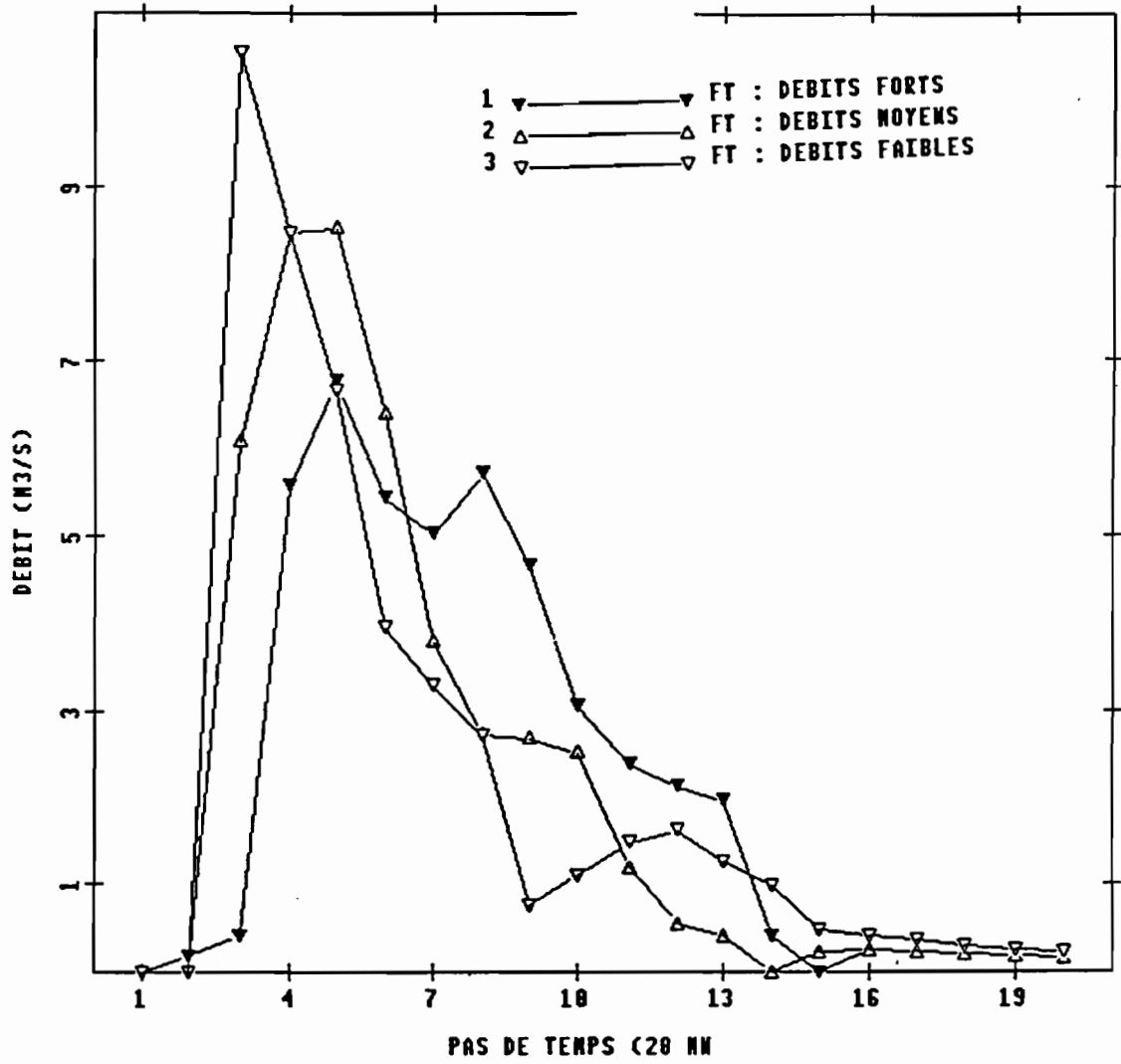


Figure II - 6 - 5 : Fonctions de transfert des différents échantillons sur le bassin de Tounkoul.

## Le bassin de BIDJIR

L'échantillon total est constitué de 16 crues dont 4 sont retenues pour la validation, les 12 autres constituant l'échantillon de calage. Les relevés du pluviographe 4 corrigés par les pluies moyennes correspondantes du bassin constituent les entrées du système.

### Echantillonnage

Pour les mêmes raisons que Tounkoul, nous avons constitué les échantillons suivants à partir de l'échantillon global de calage :

- échantillon des débits forts constitué des crues dont le débit de pointe est supérieur à  $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits moyens constitué des débits compris entre 10 et  $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits faibles constitué des crues dont le débit est inférieur à  $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

### Analyse des crues

#### Echantillon des débits forts

Toutes les crues composant cet échantillon sont simples (la crue du 30-08-1964 présente des discontinuités bien marquées en début de montée). Le plus fort débit de pointe est de  $168 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  tandis que le plus faible est de  $45,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  soit un rapport de près de 4. Le tableau II - 7 - 1 renferme la date et le débit de pointe de l'ensemble des crues composant cet échantillon. On remarque que ces événements sont concentrés sur un intervalle de 12 jours.

Evénement	$Q_p \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$	Lame ruisselée (mm)
18-08-1964	90	12,5
21-08-1964	45,5	7,7
26-08-1964	168	20
30-08-1964	52,9	7,3

**Tableau II - 7 - 1 : Crues à forts débits (Bidjir).**

#### Echantillon des débits moyens

Cinq crues consignées dans le tableau II - 7 - 2 constituent cet échantillon.

Evénement	$Q_p$ ( $m^3s^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
03-08-1964	15,6	1,5
07-08-1964	12,8	1,6
29-08-1964	27,7	3,5
18-08-1966	14,7	2,2
31-08-1966	15,3	2,4

**Tableau II - 7 - 2 : Crues à débits moyens (Bidjir).**

Deux crues ont une forme particulière constituée de deux parties : une première partie qui est une petite ondulation suivie d'un palier horizontal qui dure plus longtemps que la montée et ensuite une deuxième partie beaucoup plus importante avec l'allure d'une crue simple normale. Les débits de pointe des crues varie de  $12,8 m^3s^{-1}$  à  $27,7 m^3s^{-1}$ .

#### Echantillons des débits faibles

Toutes les crues sont simples avec des débits de pointe homogènes variant de  $7,2$  à  $9,5 m^3s^{-1}$ . Le tableau II - 7 - 3 nous donne la date et le débit de pointe de ces crues.

Evénement	$Q_p$ ( $m^3s^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
09-09-1964	7,2	1,5
11-09-1964	8,6	1,5
23-07-1966	9,5	1,2

**Tableau II - 7 - 3 : Crues à débits faibles (Bidjir).**

#### Lissage

Sur l'échantillon global, nous avons appliqué le lissage à partir des temps : 800, 320, 300, 280 et 260 minutes (figures II - 7 - 1 à II - 7 - 4). C'est le lissage à partir de 280 minutes qui donne le plus de satisfaction et que nous avons adopté pour notre étude.

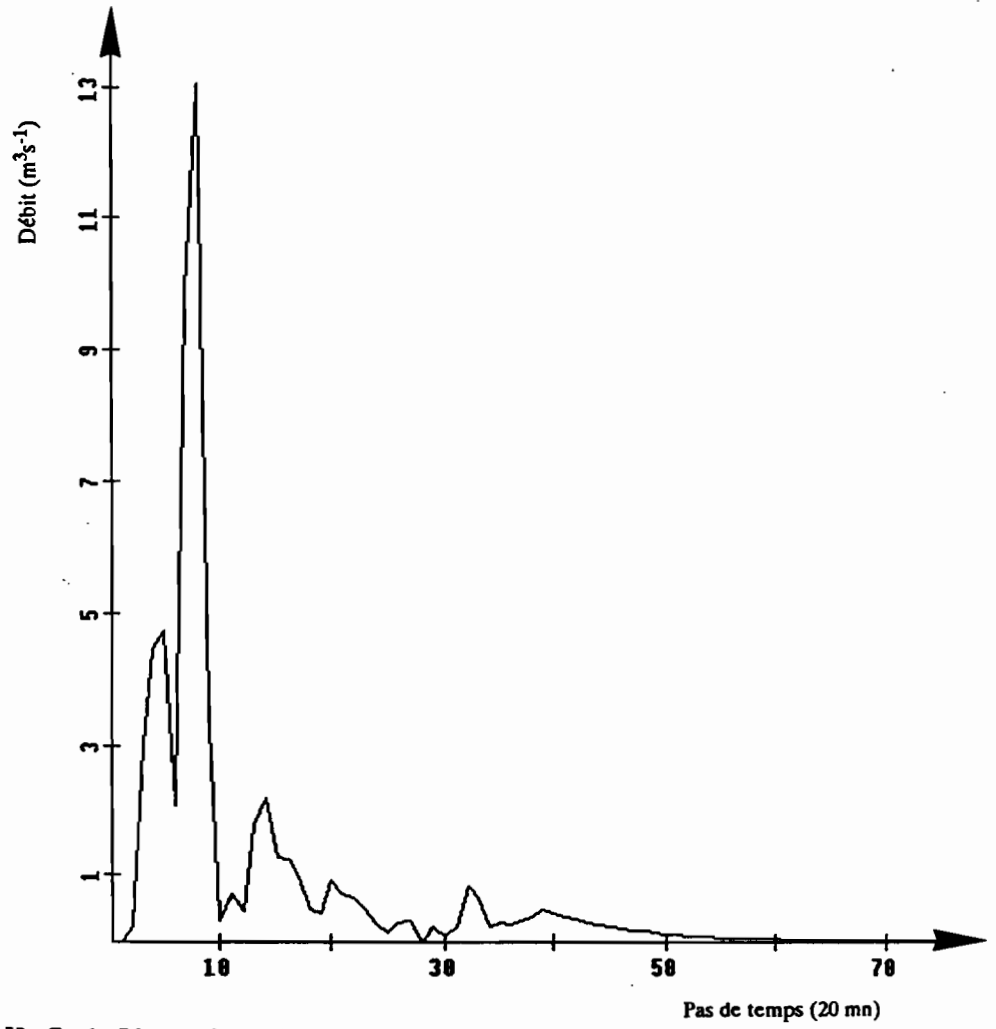


Figure II - 7 - 1 : Lissage à partir de 800 minutes (Bidjir).

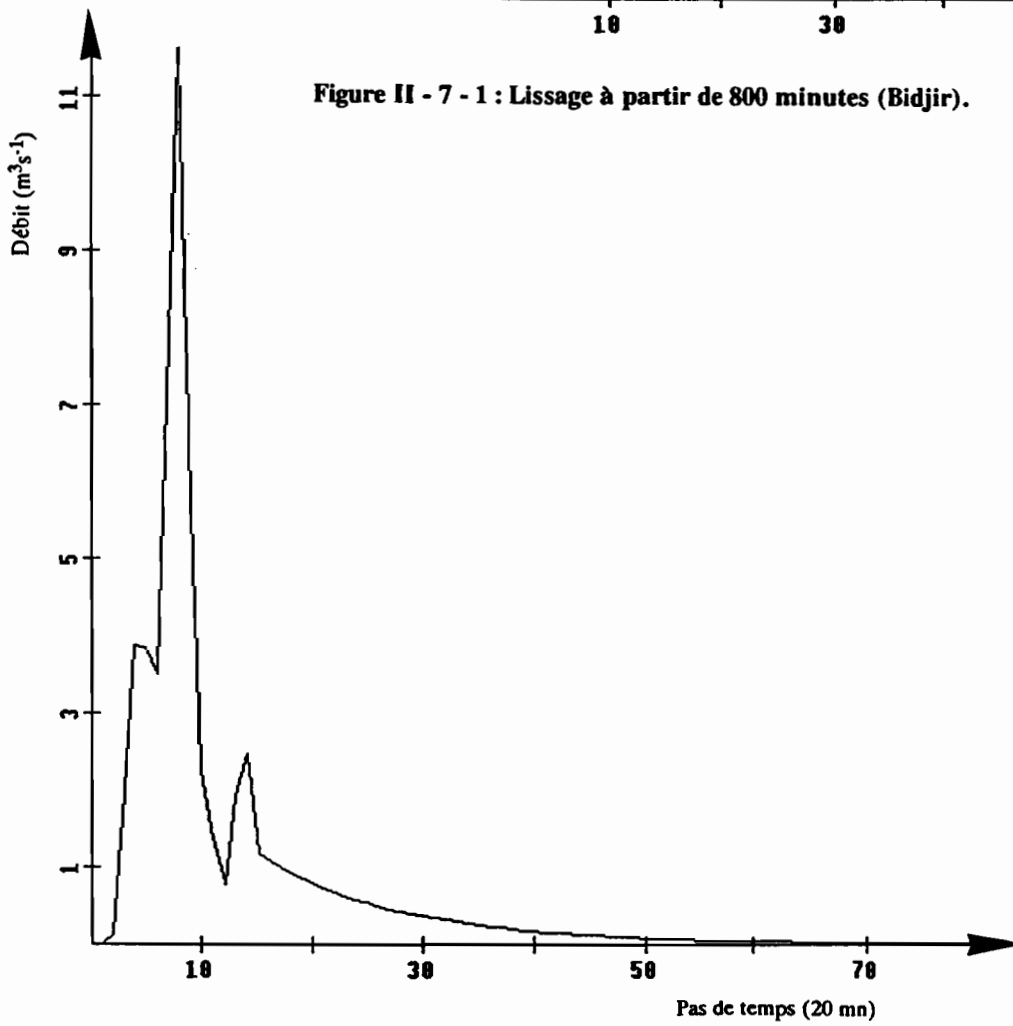


Figure II - 7 - 2 : Lissage à partir de 320 minutes (Bidjir).

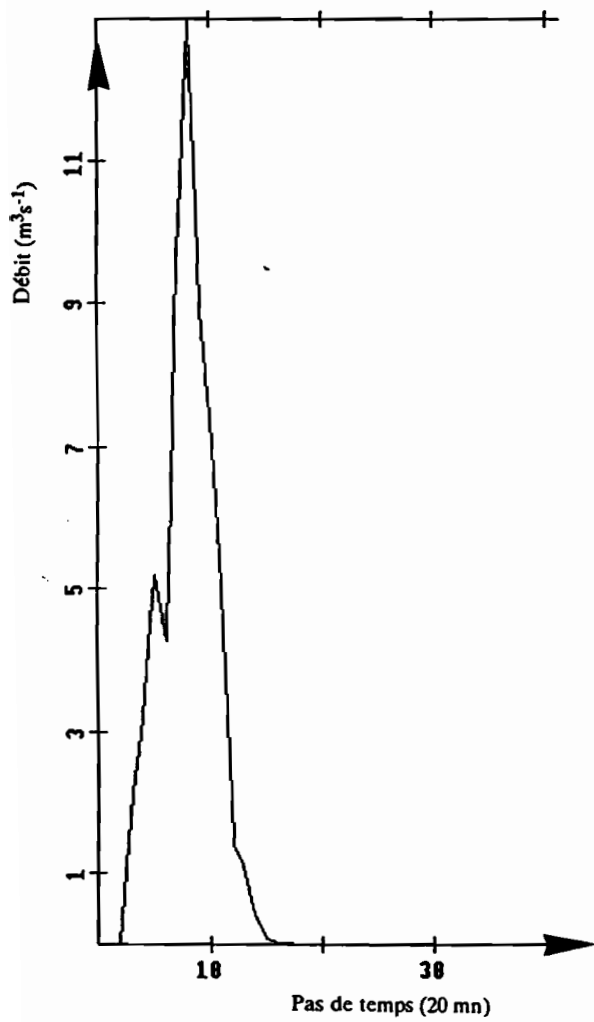


Figure II - 7 - 3 : Lissage à partir de 280 minutes (Bidjir).

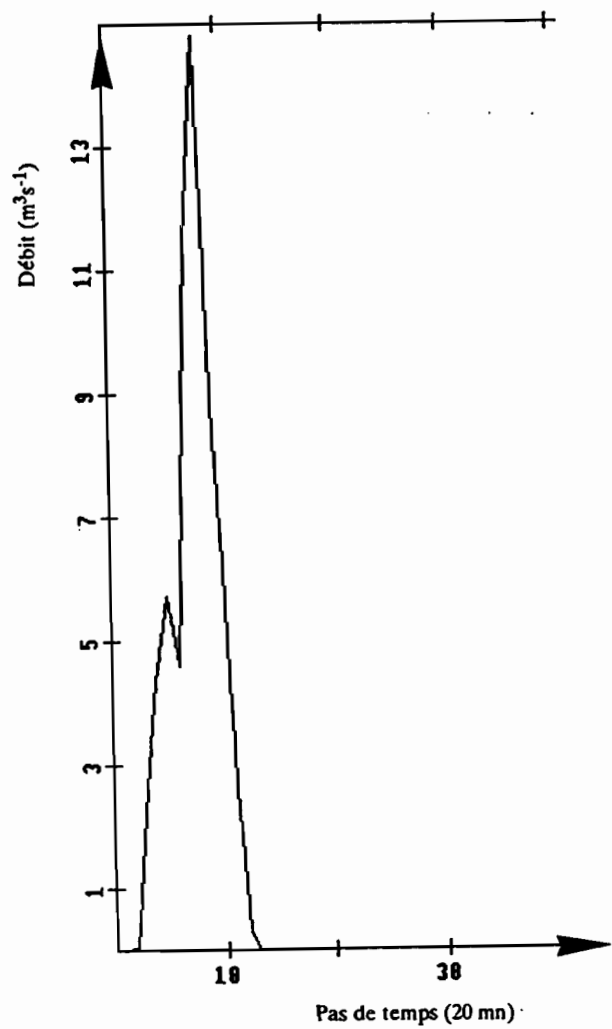


Figure II - 7 - 4 : Lissage à partir de 240 minutes (Bidjir).

### Analyse des FT

Les FT des différents échantillons ont la même allure. Seule la FT de l'échantillon des débits moyens se différencie des autres. Elle présente deux parties : la première partie monte rapidement en deux pas de temps pour stagner en palier pendant trois pas de temps, la deuxième partie est semblable à celles des autres échantillons (montée et descente normales). Cette composition du transfert s'explique par la forme des crues constituant cet échantillon analysées plus haut.

Le tableau II - 7 - 4 regroupe les caractéristiques des FT de ces différents échantillons :

Echantillon	Global	D. forts	D. moyens	D. faibles
Qp (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	12,9	10,4	7,4	10,6
Tm ( mn )	160	160	180	120
Tb ( mn )	500	440	520	260

**Tableau II - 7 - 4 : Caractéristiques des fonctions de transfert (Bidjir).**

Contrairement à Tounkoul, il ne se dégage pas une tendance nette de variation du débit de pointe des FT en fonction des débits moyens des échantillons qu'elles représentent : le débit moyen de l'échantillon des faibles crues onze fois plus petit que celui des fortes crues, sont représentés par des FT ayant le même débit de pointe ; tandis que la FT de l'échantillon global a le débit de pointe le plus élevé et celle de l'échantillon des débits moyens, le plus faible (tableau II - 7 - 5).

La figure II - 7 - 5 représente les FT des différent échantillons.

Echantillon	D. faibles	D. moyens	Global	D. forts
Moyenne (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	8	17	39	89
Qp (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) des FT	10,5	7,4	12,9	10,4

**Tableau II - 7 - 5 : Débit moyen des différents échantillons et débit de pointe des fonctions de transfert (Bidjir).**

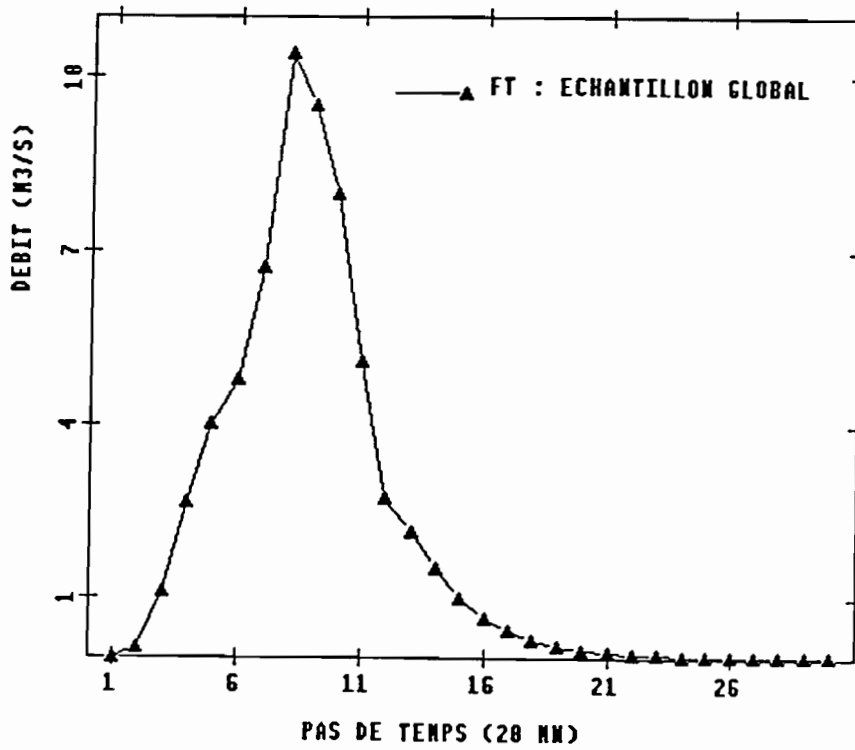
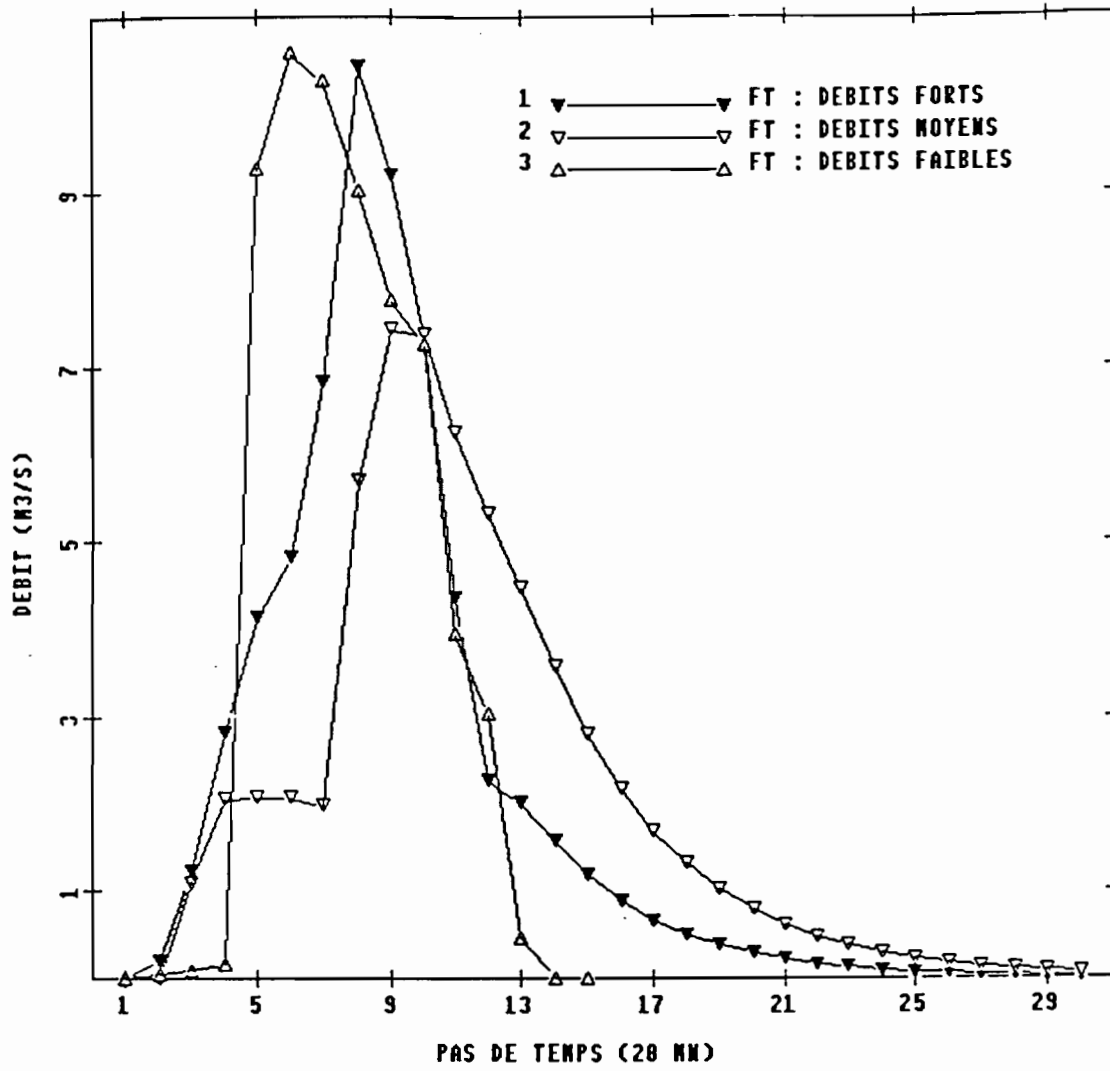


Figure II - 7 - 6 : Fonctions de transfert des différents échantillons (Bidjir).

## Le bassin de TAYA

L'échantillon global de calage est constitué de 12 crues. Les entrées du système sont constituées par les relevés du pluviographe 23 corrigés par les pluies moyennes correspondantes du bassin.

### Echantillonnage

A partir de l'échantillon global de calage nous avons constitué trois autres échantillons en fonction de la valeur des débits :

- échantillon des débits forts constitué des crues dont le débit de pointe est supérieur à  $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits moyens constitué des crues dont le débit de pointe est compris entre  $10$  et  $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits faibles constitué des crues dont le débit de pointe est inférieur à  $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

### Analyse des crues

#### Débits forts

Toutes les 4 crues composant cet échantillon sont des crues simples. Elles présentent toutes trois niveaux de propagation marqués par des cassures (changements de pente) plus ou moins nettes de l'hydrogramme en montée. Les débits de pointe varient de  $28,2$  à  $69 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  soit du simple au plus du double. Le tableau II - 8 - 1 nous donne la date et le débit de pointe des crues composant cet échantillon.

Evénement	$Q_p$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
21-08-1964	28,2	3,1
29-08-1964	36,5	4,2
30-08-1964	69	9,6
11-09-1964	31	3,1

Tableau II - 8 - 1 : Taya : Crues à forts débits.

On remarque que trois crues sur quatre sont concentrées dans un intervalle de temps de dix jours inclus dans l'intervalle de douze jours de fortes crues du bassin de Bidjir.

#### Débits moyens

Comme les plus fortes crues, les crues moyennes présentent aussi plusieurs niveaux d'arrivée. Une crue sur quatre est composée (crue double). Les débits de pointe varient de 10,4 à 14,9  $m^3s^{-1}$ . Le tableau II - 8 - 2 présente la date et le débit de pointe de ces événements. Nous pouvons remarquer que tous ces événements ont lieu dans l'intervalle de douze jours.

Evénement	$Q_p$ ( $m^3s^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
20-08-1964	15	1,5
21-08-1964	10,5	0,8
26-08-1964	14,3	1,7
01-09-1964	11,8	1,4

**Tableau II - 8 - 2 : Taya : Crues à débits moyens.**

#### Débits faibles

Toutes les crues sont simples avec des débits de pointe variant de 5,2 à 8,6  $m^3s^{-1}$ . On remarque toujours les cassures plus ou moins timides de l'hydrogramme en montée. C'est donc une particularité du bassin de Taya. La date et le débit de pointe sont consignés dans le tableau II - 8 - 3.

Evénement	$Q_p$ ( $m^3s^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
02-09-1964	7,7	0,6
09-09-1964	5,1	0,7
09-09-1965	8,6	0,9
10-09-1966	8,2	0,8

**Tableau II - 8 - 3 : Taya : Crues à débits faibles.**

### Lissage

Comme pour les deux bassins précédents nous avons appliqué la DPFT sur l'échantillon global de calage afin de déterminer le temps de lissage ; mais la fonction de transfert à la différence de l'allure générale (oscillations de la queue) présente trois parties bien distinctes qui semblent représenter chacune un transfert indépendant (figure II - 8 - 1). Le choix d'un pas de temps de lissage n'est pas simple dans ce cas. nous avons recomposé l'échantillon en soustrayant trois crues qui sont très différentes des autres (elles sont faibles et composées). Nous obtenons une fonction de transfert composée de deux parties distinctes (figure II - 8 - 2). En soustrayant de nouveau deux crues les plus faibles, nous obtenons une fonction de transfert simple (figure II - 8 - 3).

Tenant compte de ces essais, nous avons adopté un temps de lissage de 760 minutes.

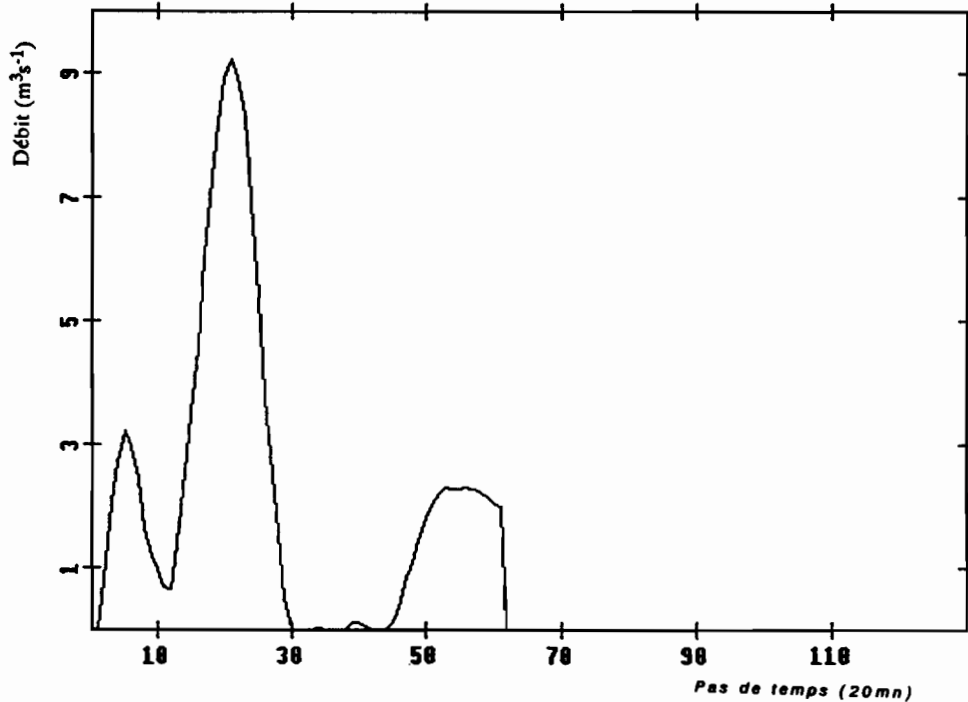


Figure II - 8 - 1 : Fonction de transfert de l'échantillon global sans lissage (Taya).

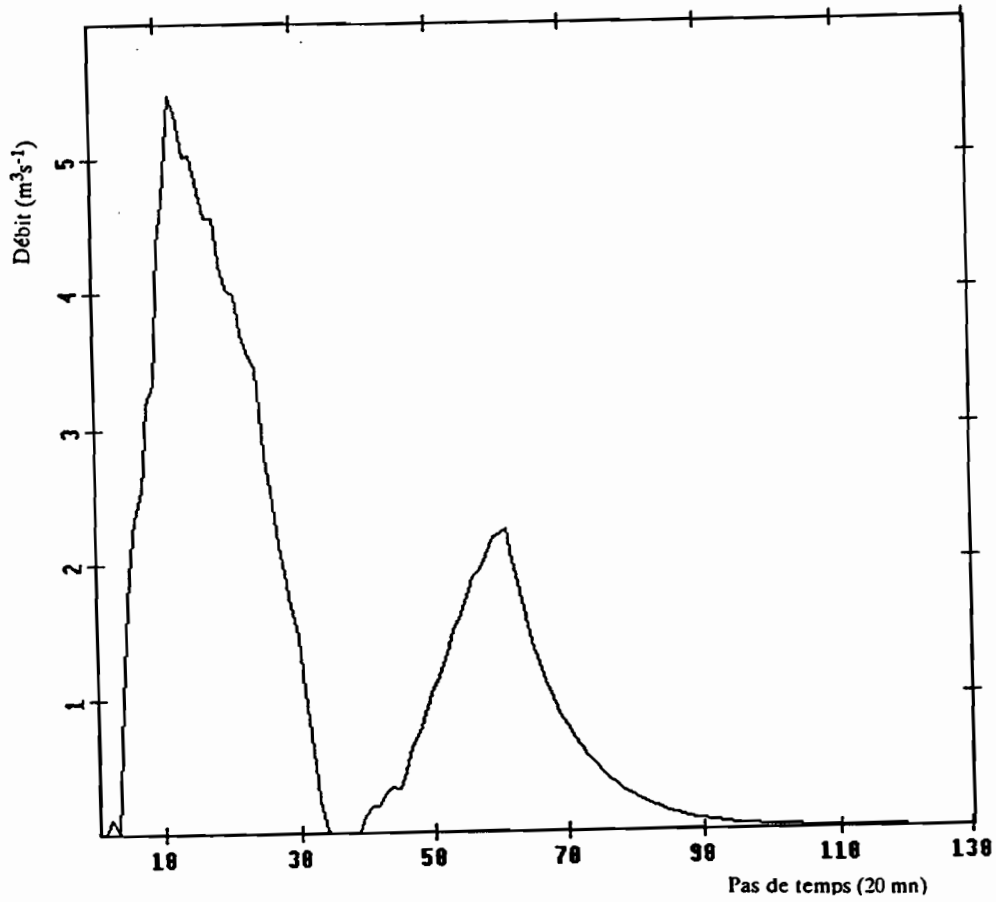


Figure II - 8 - 2 : Fonction de transfert de l'échantillon global (moins 3 crues faibles et composées) sans lissage (Taya).

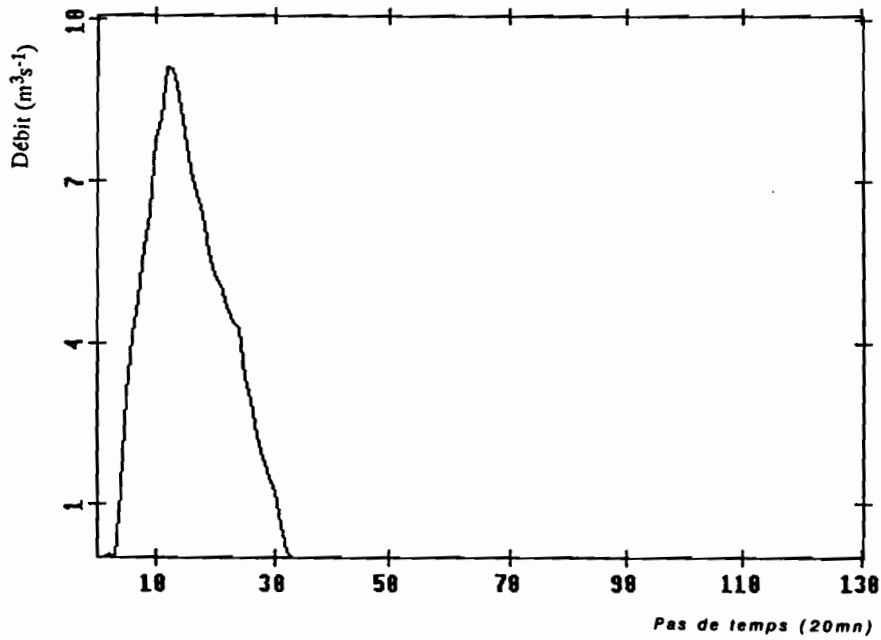


Figure II - 8 - 3 : Fonction de transfert de l'échantillon global (moins crues faibles et composées) sans lissage (Taya).

### Analyse des FT

La FT de l'échantillon des débits faibles a particulièrement retenu notre attention par son allure en dents de scie malgré le lissage que nous avons appliqué (figure II - 8 - 4 a).

En recomposant l'échantillon avec une seule crue en moins, nous obtenons une FT totalement différente de la première (figure II - 8 - 4 b).

Ce comportement du bassin vis à vis des petites crues, nous a amené à analyser la structure de son réseau hydrographique. Nous avons constaté que le réseau hydrographique du bassin est constitué de deux bras amont d'importance comparable qui se joignent aux deux tiers de la longueur principale du réseau ; l'un drainant la partie sud-sud-est, l'autre la partie sud-sud-ouest. A l'aval, peu avant l'exutoire arrive en rive droite, un autre affluent de même importance qui, lui, draine la partie nord-est.

Les petites crues seraient donc les réponses des zones drainées par ces trois bras suite à des averses de moindre importance bien localisées. On ne pourrait cerner le transfert des faibles crues qu'en étudiant chaque bras du réseau séparément.

La FT de l'échantillon des débits moyens présente quant à elle, des oscillations dans sa phase de montée et une décrue normale (Figure II - 8 - 5).

La FT de l'échantillon des débits forts marque à peu près au milieu de la montée, une inflexion sur un pas de temps et ensuite une remontée moins forte que la première partie. La décrue présente quelques accidents plus ou moins marqués (Figure II - 8 - 6).

D'après cette analyse des FT des différents échantillons, nous pouvons affirmer que les faibles crues ne sont pas représentatives de l'ensemble du bassin de Taya, nous pouvons les exclure de notre échantillonnage que nous voulons représentatif. Le nouvel échantillon retenu pour le calage est constitué de 9 crues.

Compte tenu de la structure hydrographique du réseau et du nombre peu élevé de crues, nous ne tiendrons compte que de ce dernier échantillon pour l'étude du bassin de Taya.

Nous avons ainsi testé la stabilité de la FT en composant des sous-échantillons de 5, 6, 7, et 8 crues. La FT de l'échantillon à 5 crues diffère notablement de celle de l'échantillon global. A partir de 6 crues, la différence devient insignifiante. Nous pouvons conclure que le nombre de crues composant l'échantillon global de calage suffit à donner une image stable du transfert à Taya.

Les caractéristiques de la FT obtenue : débit de pointe, temps de montée et temps de base de l'échantillon global ont pour valeurs respectives ;  $9,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , 440 minutes et 640 minutes.

La figure II - 8 - 7 représente la FT de l'échantillon global.

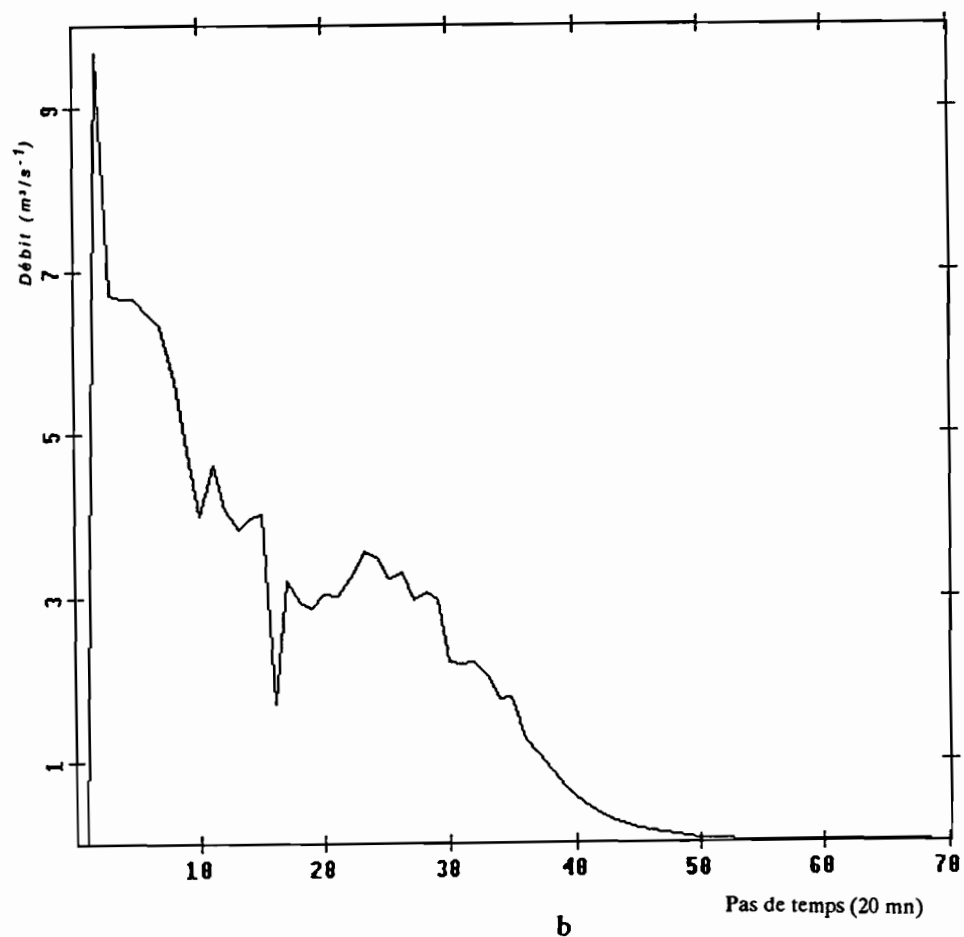
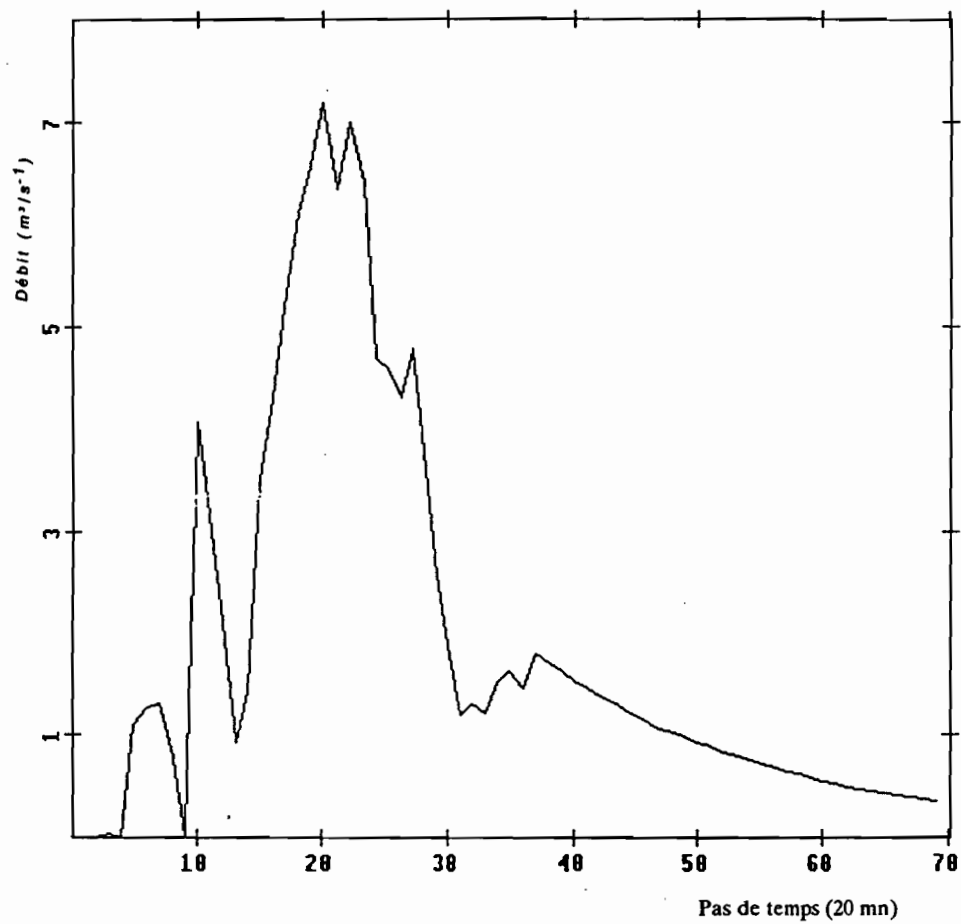


Figure II - 8 - 4 : Fonctions de transfert de l'échantillon des crues à faibles débits (Taya).

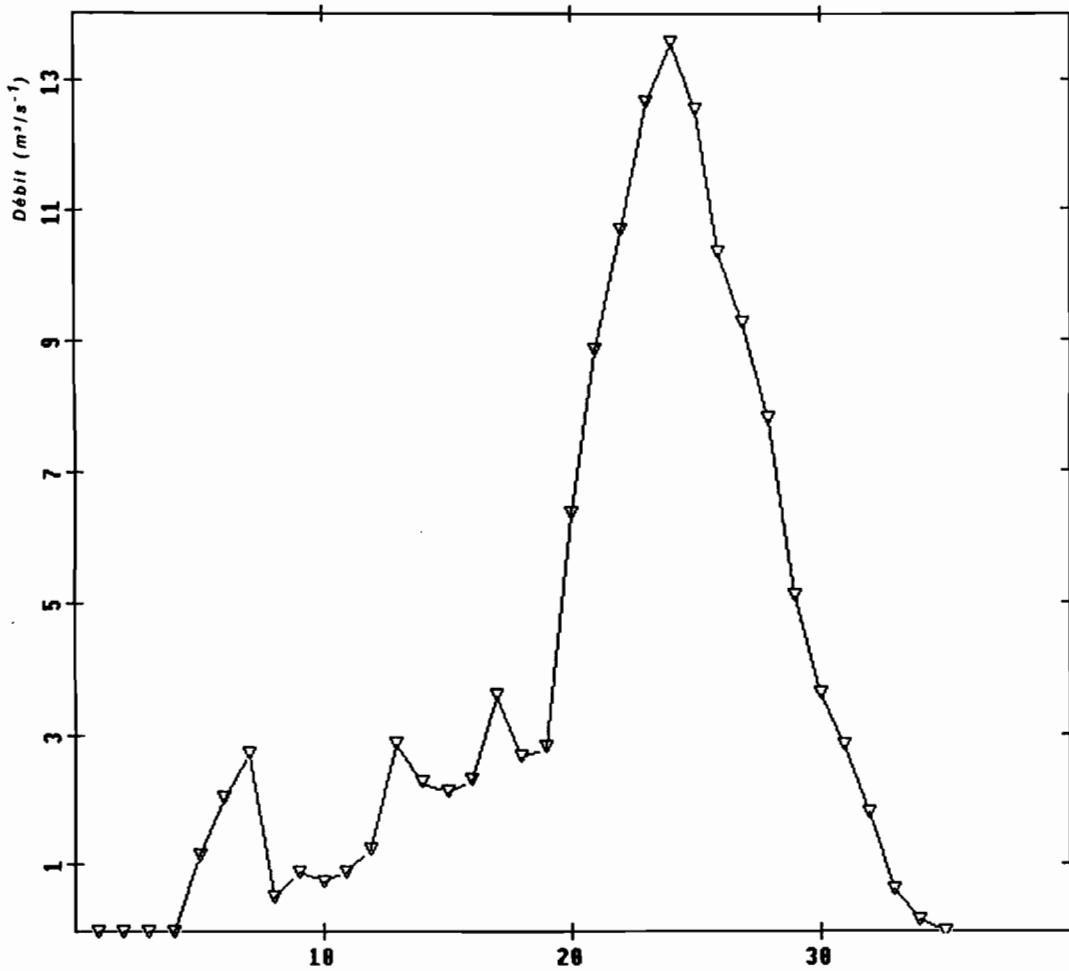


Figure II - 8 - 5 : Fonction de transfert de l'échantillon des crues à débits moyens (Taya).

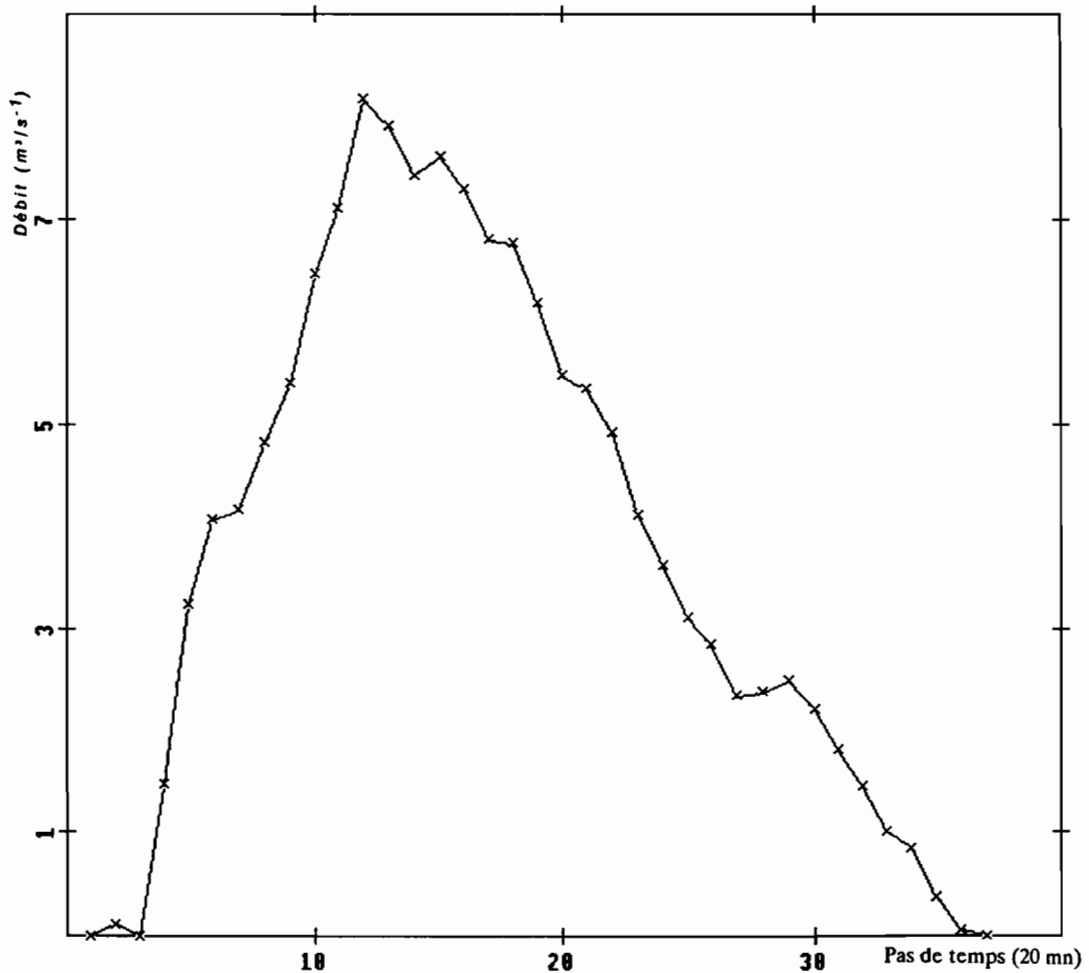


Figure II - 8 - 6 : Fonctions de transfert de l'échantillon des crues à forts débits (Taya).

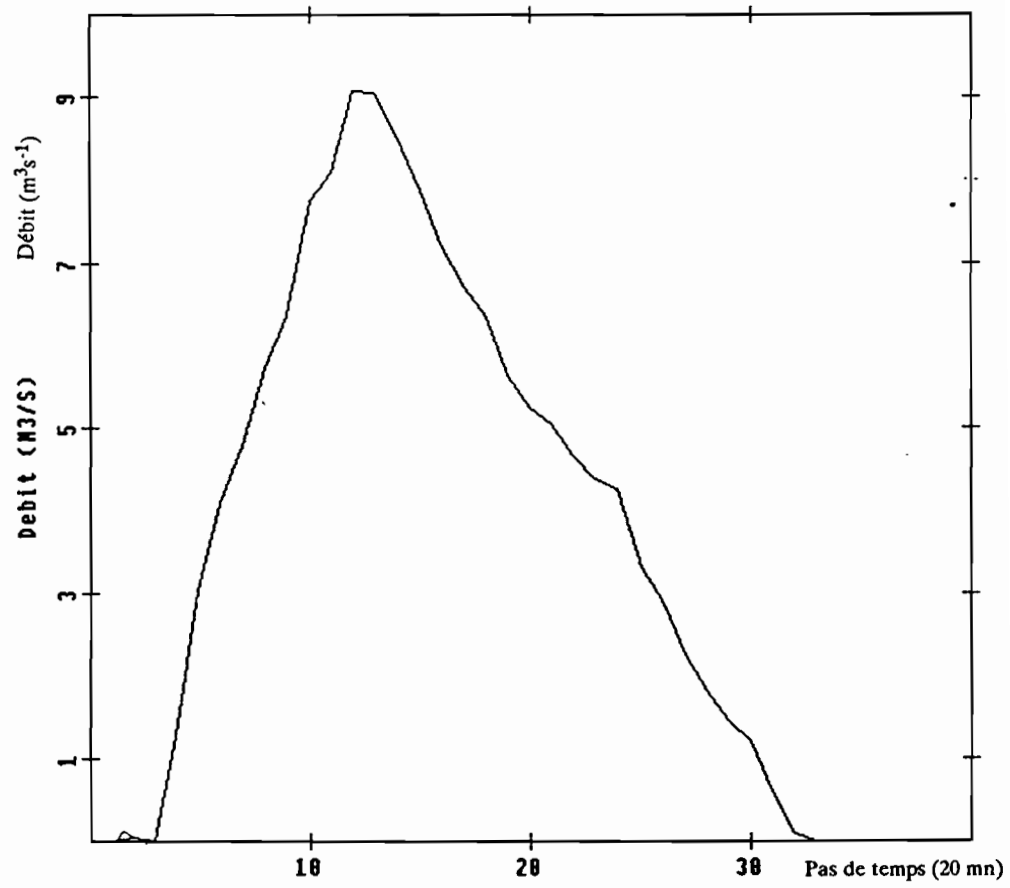


Figure II - 8 - 7 : Fonction de transfert de l'échantillon global de calage (Taya).

## Le bassin de MAZERA

L'échantillon global de calage est constitué de 12 crues. Les relevés du pluviographe 12 corrigés par les pluies moyennes correspondantes du bassin constituent les entrées du système.

### Echantillonnage

Nous avons constitué à partir de l'échantillon global trois échantillons différents en fonction de la valeur des débits :

- échantillon des débits forts constitué des crues dont le débit de pointe est supérieur à  $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits moyens constitué des crues dont le débit de pointe est compris entre 20 et  $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ,
- échantillon des débits faibles constitué des crues dont le débit de pointe est inférieur à  $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

### Analyse des crues

#### Débits forts

Les 4 crues composant cet échantillon sont regroupées dans le tableau II - 9 - 1. On remarque que tous les événements composant cet échantillon se sont produits dans l'intervalle de huit jours.

Evénement	$Q_p \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$	Lame ruisselée (mm)
26-08-1964	53,6	4,8
27-08-1964	98,3	12,8
30-08-1964	57	6,3
02-09-1964	61,4	3,7

**Tableau II - 9 - 1 : Mazera : Crues à forts débits.**

Toutes les crues sont simples mais elles présentent au moins deux niveaux d'arrivée marqués par de changements brusques de pente de l'hydrogramme en montée ; le premier flot est

souvent plus fort (pente plus forte) que les suivants. Les débits de pointe varient de 53,6 à 98,3  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

#### Débits moyens

Cet échantillon est constitué de trois crues regroupées dans le tableau II - 9 - 2.

Evénement	$Q_p$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
17-08-1964	40,6	3,8
29-08-1964	26,1	2,6
16-08-1966	44,6	5,5

**Tableau II - 9 - 2 : Mazera : Crues à débits moyens.**

Toutes les crues ont tendance à être des crues doubles mais une seule a les deux parties bien distinctes (crue du 17-08-1964).

#### Débits faibles

Le tableau II - 9 - 3, regroupe les cinq crues composant cet échantillon.

Evénement	$Q_p$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
24-07-1964	14,5	0,7
11-08-1964	12,6	2,0
15-08-1964	10	0,5
23-09-1964	17,6	0,9
16-08-1966	16,5	1,6

**Tableau II - 9 - 3 : Mazera : Crues à débits faibles.**

A l'exception de la crue du 23 - 09 - 1964, toutes les autres sont des crues doubles avec les deux parties plus ou moins bien distinctes. Les débits de pointe varient de 10 à 17,6  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

### Lissage

Nous avons effectué plusieurs essais de lissage à différents temps, les meilleurs résultats sont obtenus au temps de 320 minutes. C'est donc ce temps qui a été retenu pour notre étude.

### Analyse des FT

Les différentes caractéristiques des FT sont consignées dans le tableau II - 9 - 4.

Echantillon	Global	D. forts	D. moyens	D. faibles
$Q_p$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	27,1	21,8	22,9	30,8
$T_m$ (mn)	180	180	240	100
$T_b$ (mm)	320	680	660	280

**Tableau II - 9 - 4 : Mazera : Caractéristiques des fonctions de transfert.**

Toutes les FT ont une décroissance normale à l'exception de celle de l'échantillon des débits faibles qui présente un palier vers la fin de la décroissance. Par contre les montées sont toutes différentes : la FT de l'échantillon des débits faibles monte très rapidement et présente deux sommets, le premier étant plus important que le deuxième ; celle des débits moyens présente un pic au premier tiers de la montée, remonte en S jusqu'au milieu pour ensuite reprendre une remontée normale ; la FT des débits forts présente un palier bien marqué à mi-chemin de la montée et celle de l'échantillon global ne présente qu'un point d'inflexion. Cette dernière FT traduit un comportement plus stable. La figure II - 9 représente les FT des différents échantillons.

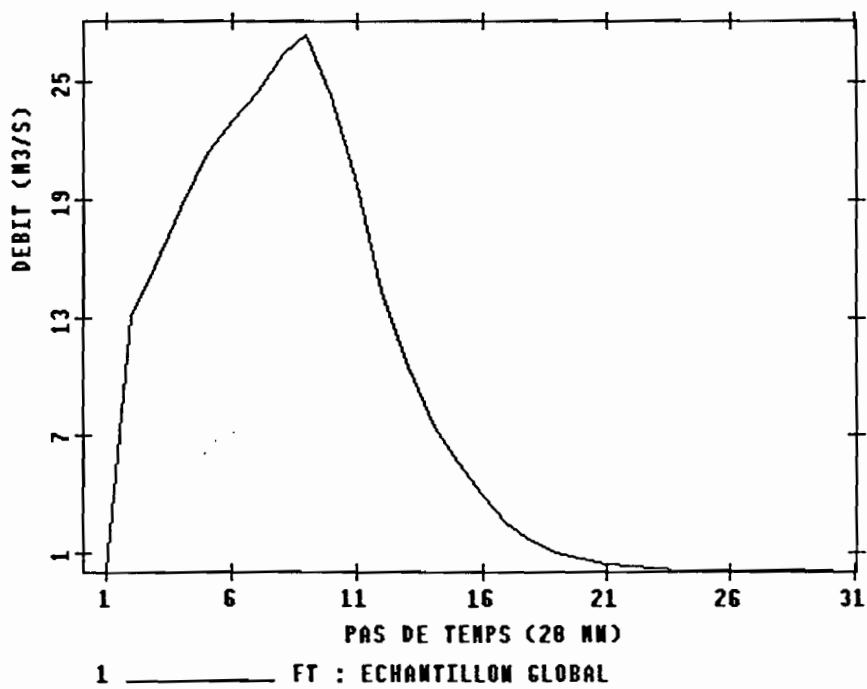
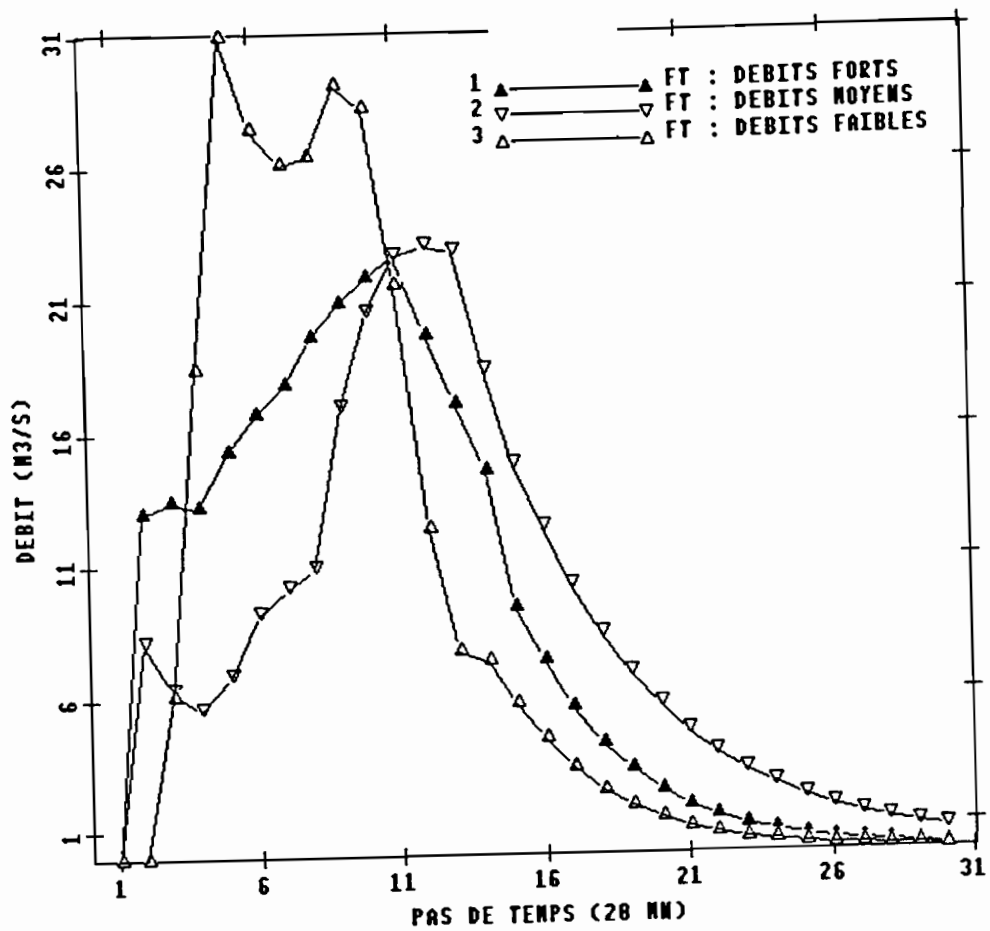


Figure II - 9 : Fonctions de transfert des différents échantillons (Mazera).

## Le bassin de BARLO

L'échantillon total est constitué de 19 crues ; nous en utilisons 14 pour le calage et réservons les 5 autres pour la validation. Nous employons en entrée les moyennes arithmétiques à chaque pas de temps des relevés des pluviographes 4, 23 et 27 corrigées par les pluies moyennes correspondantes du bassin.

### Echantillonnage

A partir de l'échantillon global de calage, nous avons constitué trois nouveaux échantillons en fonction de la répartition spatiale des événements pluviométriques responsables des crues retenues. Le bassin de Barlo par sa forme et son étendue s'y prête bien. Nous avons ainsi 4 échantillons suivants :

- échantillon global constitué de toutes les crues de calage,
- échantillon nord constitué des crues causées par des événements pluviométriques concentrés dans la partie nord du bassin,
- échantillon sud constitué des crues provoquées par des événements pluvieux concentrés dans la partie sud du bassin,
- échantillon intermédiaire constitué des crues provoquées par des épisodes pluvieux bien répartis sur le bassin ou localisés en son centre.

### Analyse des crues

#### Echantillon intermédiaire

Les 4 crues composant cet échantillon sont retenues dans le tableau II - 10 - 1.

Evénement	$Q_p$ ( $m^3s^{-1}$ )	Lame ruisselée (mm)
29-08-1964	50,0	4,5
30-08-1964	75,0	9,5
11-09-1964	90,0	9,7
16-08-1966	53,6	6,8

**Tableau II - 10 - 1 : Barlo : Crues de l'échantillon intermédiaire.**

La crue du 16-08-1966 est une crue triple : la première partie bien individualisée est très petite devant les deux autres, la deuxième étant elle-même petite devant la dernière. Les autres crues sont simples et surviennent dans l'intervalle de douze jours. Les débits varient de 50 à 90 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

#### Echantillon sud

Le tableau II 10 - 2 renferme les cinq crues composant l'échantillon :

Evénement	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Lame ruisselée (mm)
11-08-1963	46,9	2,2
01-09-1964	56,0	3,7
02-09-1964	39,5	3,3
09-09-1964	12,3	1,1
23-07-1966	27,7	1,9

**Tableau II - 10 - 2 : Barlo : Crues de l'échantillon sud.**

Trois crues de cet échantillon surviennent dans l'intervalle de huit jours. Toutes les crues sont simples exceptée celle du 09-09-1964 qui est une crue double. Les débits de pointe des crues varient de 27,7 à 56 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> avec une exception cependant, une crue de débit faible (12,3 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>).

#### Echantillon Nord

Toutes les crues composant cet échantillon sont des crues simples. Les débits de pointe varient de 11,4 à 27,5 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Elles sont consignées dans le tableau II - 10 - 3.

Evénement	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Lame ruisselée (mm)
04-08-1963	19,9	1,4
31-08-1963	11,4	0,7
05-09-1963	14,4	0,7
23-09-1964	27,5	1,9
13-08-1966	24,6	1,2

**Tableau II - 10 - 3 : Barlo : Crues de l'échantillon nord.**

Comme nous l'avons souligné plus haut, nous nous sommes basés sur la répartition spatiale des événements pluviométriques pour composer les différents échantillons de test de stabilité du transfert à Barlo. Suivant ce critère, les plus faibles crues se retrouvent dans l'échantillon nord, les moyennes dans l'échantillon sud et les plus fortes dans l'échantillon intermédiaire. Ainsi, nous nous retrouvons dans la même classification que les autres bassins à savoir la composition en fonction de la valeur des débits. Suivant la répartition spatiale des pluies nous pouvons avoir des renseignements précis sur l'importance en débit des crues à la station de Barlo.

### Lissage

Pour le bassin de Barlo, le meilleur résultat de lissage est obtenu au temps de 600 minutes que nous avons adopté pour notre étude.

### Analyse des FT

La FT de l'échantillon global présente un petit pic avant le sommet principal (maximum), la descente est saccadée (escaliers très irréguliers); celle de l'échantillon intermédiaire présente aussi un petit pic avant le maximum formé de deux pointes, en descente on note deux paliers bien accidentés ; l'échantillon sud a une FT qui présente deux pics bien pointus avant le maximum lui-même aussi pointu, la descente est en dents de scie très irrégulières ; l'échantillon nord a une FT dont la montée se fait en deux parties : la première peu importante devant la deuxième ne présente que des oscillations, la deuxième qui constitue la part importante du transfert comporte deux sommets, la descente par contre est assez régulière.

Les caractéristiques des FT des différents échantillons sont regroupées dans le tableau II - 10 - 4. La figure II - 10 représente les FT des différents échantillons.

Echantillon	Global	Intermédiaire	Sud	Nord
$Q_p$ ( $m^3s^{-1}$ )	20,4	21,9	21,8	36,9
$T_m$ ( mn )	200	180	320	300
$T_b$ ( mn )	560	560	600	500

**Tableau II - 10 - 4 : Barlo : Caractéristiques des fonctions de transfert.**

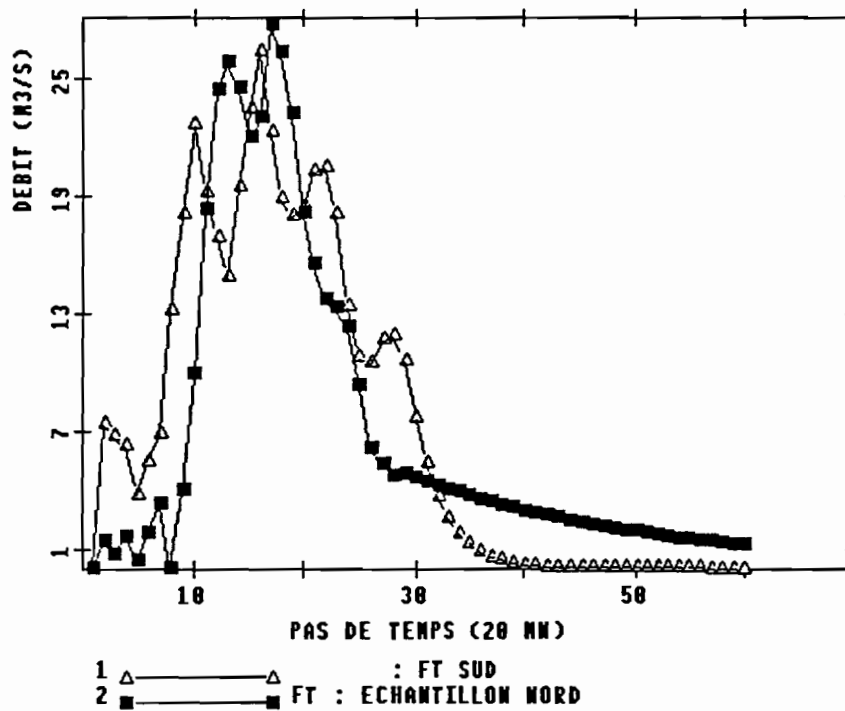
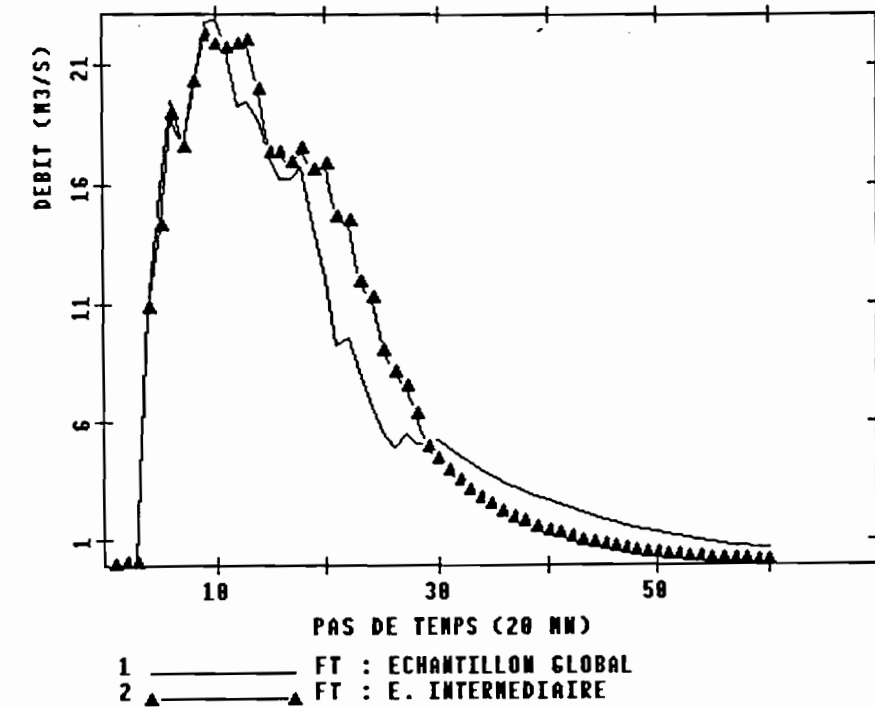


Figure II - 10 : Fonctions de transfert des différents échantillons (Barlo).

### II - 2 - 3 - Comparaison des fonctions de transfert

Au terme de cette approche globale de calage, nous allons comparer les résultats de l'analyse de la FT des différents bassins entre eux, afin de voir s'il s'en dégage des causes de variations. Nous ne considérons que les résultats des échantillons globaux à partir desquels sont constitués tous les autres. Notre discussion porte sur les caractéristiques ci-après des fonctions de transfert unitaires :

- temps de montée ( $T_m$ ),
- débit de pointe ( $Q_p$ ),
- temps de base ( $T_b$ ).

Les valeurs de ces caractéristiques sont regroupées dans le tableau II - 11 qui suit :

Caractéristiques	Tounkoul	Bidjir	Taya	Mazera	Barlo
$T_m$ (mn)	80	160	240	180	190
$T_b$ (mn)	240	300	620	320	560
$Q_p$ (mm)	0.17	0.17	0.06	0.10	0.05

Tableau II - 11 : Caractéristiques des fonctions de transfert des différents bassins.

Les causes possibles de ces variations sont la superficie, le relief, la pédologie. C'est donc sur ces caractéristiques des bassins que nous allons baser notre analyse des différences des fonctions de transfert.

#### Influence de la superficie

A l'exception du bassin de Taya, on note les tendances générales suivantes :

- le temps de montée augmente avec la superficie ;
- le débit de pointe a tendance à augmenter quand la superficie diminue. Tounkoul et Bidjir ayant le même débit de pointe, nous pouvons raisonner en fonction de classes de superficie. En considérant les classes de 100 km<sup>2</sup> en 100 km<sup>2</sup>, Bidjir et Tounkoul se retrouvent bien dans la même classe (donc dotés du même débit de pointe) et la tendance du débit de pointe qui augmente quand la superficie diminue, plus affirmée ;
- le temps de base a une tendance nette d'augmenter avec la superficie.

En tenant compte de la forme des fonctions de transfert ; de tous les bassins seule celle de Barlo présente quelques oscillations malgré son échantillon global de calage qui détient le

nombre le plus élevé des crues. Ces oscillations pourraient être attribuées à la grandeur de la superficie de Barlo, facteur apparent qui le différencie vraiment des autres bassins.

D'après ces constats, il apparaît évident que la superficie donne la tendance générale du transfert d'un bassin par rapport à un autre. Elle n'est certes pas la seule cause de variations du transfert, le cas de Taya le prouve bien.

#### Influence du relief

L'influence du relief sur l'hydrogramme est une évidence. Une pente plus forte correspond à une durée plus faible de concentration des eaux de ruissellement dans le réseau de drainage vers le cours principal. Il est question dans notre cas de voir cette influence entre différents bassins. Deux facteurs de comparaison possible de l'influence du relief des différents bassins entre eux, sont l'indice global de pente et la dénivelée spécifique (tableau II - 12). Nous rappelons que l'indice global de pente  $I_g$  d'un bassin versant est le rapport de la dénivelée totale  $D$  par la longueur du rectangle équivalent  $L$  ; et la dénivelée spécifique  $D_s$ , produit de l'indice global de pente par la racine carrée de la superficie du bassin versant  $A$ .

$$I_g = D.L^{-1}$$

$$D_s = I_g.A^{1/2}$$

Bassin	Barlo	Mazera	Taya	Bidjir	Toukoul
Indice global de pente (m/km)	3,4	4,3	6,5	8	7,1
Dénivelée spécifique (m)	80	76	84	69	56

**Tableau II - 12 : Relief : Indice global de pente et dénivelée spécifique.**

En considérant l'indice global de pente qui nous indique la tendance générale du relief, il ne se dégage pas un ordre très net de variation des caractéristiques des fonctions de transfert des différents bassins suivant ce facteur. Nous allons examiner la dénivelée spécifique qui, elle, nous renseigne sur l'uniformité du relief de l'ensemble d'un bassin versant (plus la dénivelée spécifique est élevée, moins le relief est uniforme).

Suivant les valeurs de la dénivelée spécifique ; Taya se place en tête des bassins suivi respectivement de Barlo, Mazera, Bidjir et Tounkoul (ces derniers se classent dans le même ordre suivant leur superficie). En rapportant ces dénivelées spécifiques aux caractéristiques des fonctions de transfert, nous pouvons faire les constats suivants :

les temps de montée et de base augmentent avec la dénivelée spécifique tandis que le débit de pointe diminue quand celle-ci augmente. Il faut cependant souligner l'égalité des débits de pointe des fonctions de transfert de Tounkoul et Bidjir qui n'ont pourtant pas la même dénivelée spécifique. Cette particularité, sans mettre en doute la relation nette entre la dénivelée spécifique et les caractéristiques du transfert, fait penser à l'existence d'un seuil de pente à partir duquel le débit de pointe tendrait vers une limite (ce seuil serait dans notre cas un intervalle de dénivelées comprenant celles de Bidjir et Tounkoul qui sont respectivement 69 et 56 mètres). L'influence du relief est nette mais ne pourrait expliquer à elle seule les différences entre les fonctions de transfert. Notons que le bassin de Taya avec la dénivelée spécifique se comporte comme les autres.

#### Influences pédologiques

Nous considérons deux types de sol (sableux, peu profonds et argilo-sableux à tendance halomorphe) qui font entre 61 et 94% des sols de chaque bassin (tableau II - 13).

Bassin	Barlo	Mazera	Taya	Bidjir	Tounkoul
Sols sableux (%)	11	27	28	4	41
Sols argilo-sableux (%)	50	44	66	83	52
Total	61	71	94	87	93

**Tableau II - 13 : Pourcentage des deux types de sol les plus répandus : sableux et argilo-sableux.**

Suivant la répartition des deux types de sol, Taya et Tounkoul (94 % et 93 %) auraient les mêmes caractéristiques de transfert, suivis de près par Bidjir (87 %), ensuite viendraient Mazera (71 %) et Barlo (61 %) en dernier ou l'ordre contraire. L'un ou l'autre de ces ordres n'est vérifié que si Taya est exclu de l'échantillon. Dans ce cas, le temps de montée et le temps de base varient en sens inverse du pourcentage des deux types de sols tandis que le débit de

pointe varie dans le même sens à ceci près que Bidjir et Tounkoul ont le même débit de pointe pour des pourcentages différents. Il faut pour que ce dernier constat soit totalement vrai, constituer des classes de pourcentage de répartition des types de sols de telle façon que Bidjir et Tounkoul se retrouvent dans la même classe. Il ressort de cette analyse une influence nette de la répartition des sols sur les caractéristiques du transfert mais qui ne peut à elle seule expliquer tous les mécanismes.

D'après cette analyse comparative du transfert des différents bassins suivant leurs caractéristiques physiques, le bassin de Taya ne se situe pas dans la tendance générale qui s'en dégage. La particularité de ce bassin s'est déjà révélée lors de l'approche globale du transfert suite à laquelle nous avons fait une analyse de son réseau hydrographique. Son comportement ne pourrait donc être généralisé. Hormis ce cas particulier, les renseignements que nous tirons de cette analyse nous semblent logiques et peuvent être traduits comme suit :

- Plus la superficie d'un bassin est grande, plus les temps de montée et de base de la fonction de transfert sont élevés et son débit de pointe plus faible.

- Plus le relief d'un bassin est uniforme, plus le débit de pointe de la fonction de transfert est élevé et les temps de montée et de base faibles.

- Plus les sols sableux peu profonds (peu perméables) et les sols sablo-argileux à argilo-sableux à tendance halomorphe sont répandus, plus le débit de pointe de la fonction est élevé et les temps de montée et de base faibles.

Nous pouvons noter aussi le fonctionnement des bassins par classe de superficie et de relief qui s'observe sur les bassins de Bidjir et Tounkoul. Suivant nos résultats, Bidjir et Tounkoul se situent dans la même classe aussi bien en ce qui concerne la superficie que le relief. On pourrait alors parler des classes suivantes :

- en superficie (km<sup>2</sup>);

0 à 100	100 à 200	200 à 400	400 à 600
Bidjir Tounkoul	Taya	Mazera	Barlo

- en relief (on considère l'indice global de pente en m/km) ;

3 à 4	4 à 5	5 à 7	7 à 9
Barlo	Mazera	Taya	Bidjir Toukoul

Aucun des trois facteurs : superficie, relief et sol n'apparaît comme étant le plus influent. Sauf peut-être le relief qui par la dénivelée spécifique, rend le comportement du bassin de Taya compatible avec les autres du point de vue transfert. Cette analyse confirme bien la complexité des mécanismes qui régissent le fonctionnement des bassins versants.

Dans une perspective d'une approche distribuée, nous allons comparer la forme des fonctions de transfert obtenues en approche globale des bassins amont à celle des bassins avals qui les emboîtent. Nous avons donc à comparer les fonctions de transfert de Bidjir et Taya à celle de Barlo, ensuite la fonction de transfert de Toukoul à celle de Mazera (figure II - 11). Nous pouvons souligner les constatations suivantes :

- la similitude assez nette entre le transfert à Toukoul et Mazera malgré la très faible superficie du premier devant le deuxième (19%). La faiblesse et le décalage du débit de pointe de l'hydrogramme de Mazera dans le temps par rapport à celui de Toukoul semble bien logique en ruissellement généralisé.

- à Barlo, on ne reconnaît pas la part du transfert de Bidjir et Taya dans la forme des hydrogrammes ; malgré l'importance de la superficie de ces deux derniers voisine de la moitié de celle de Barlo. Il nous paraît illogique du point de vue ruissellement généralisé que le sommet de la fonction de transfert à Barlo soit en avance sur celle de Taya et arrive en même temps que celle de Bidjir. Par contre, il est plus logique que le débit de pointe des fonctions de transfert à Bidjir et Taya soient plus élevés que celui de Barlo.

Après cette comparaison des fonctions de transfert, nous allons analyser leur aptitude à la reconstitution des crues de calage. Nous signalons que nous sommes encore dans le cadre du calage et que nous ne faisons pas intervenir la fonction de production du SCS à ce stade.

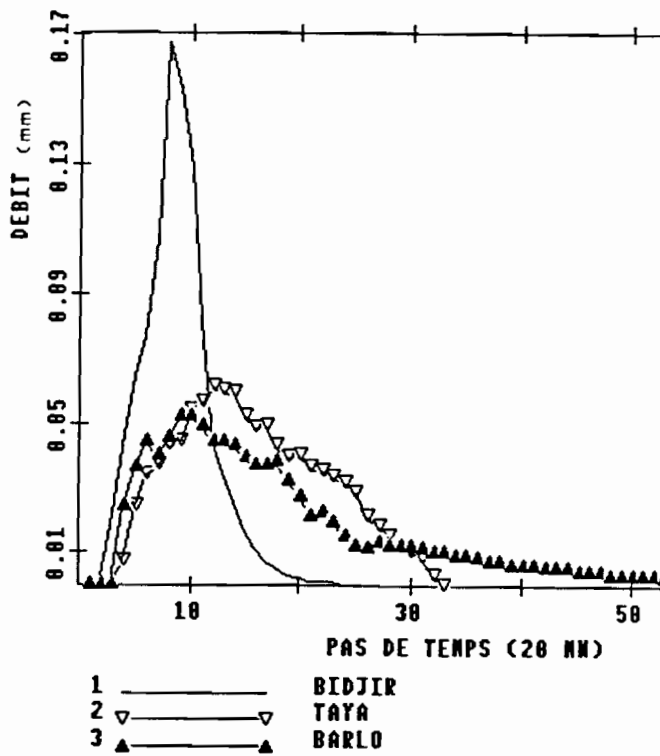
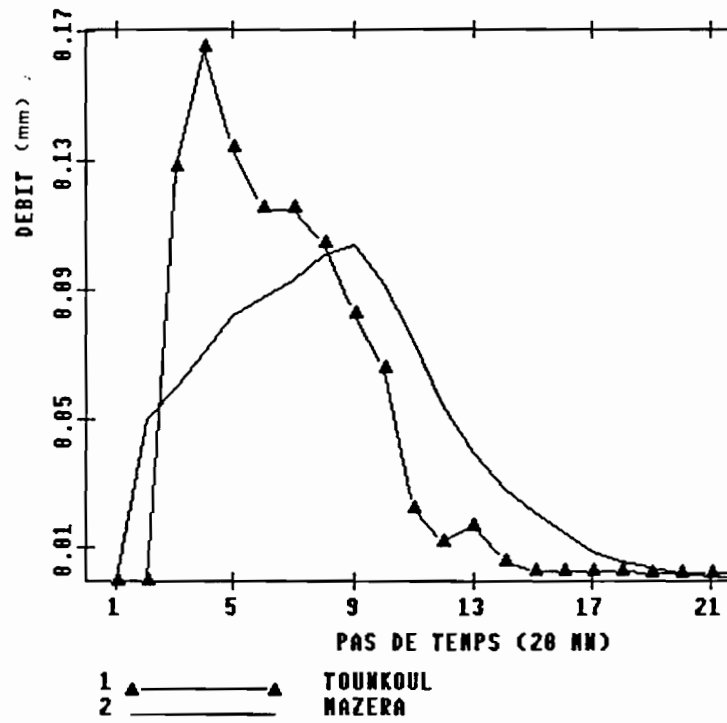


Figure II -11 : Fonctions de transfert des échantillons globaux des différents bassins.

## II - 2 - 4 - Reconstitution des crues.

Nous analysons la reconstitution des crues par la fonction de transfert identifiée par la DPFT. Les pluies nettes sont identifiées par la DPFT et varient d'un pas de temps à l'autre.

La figure II - 12 représente pour chaque bassin (hormis le bassin de Taya), d'une part une crue et sa reconstitution par la FT d'un sous-échantillon (échantillons constitués en fonction de la valeur des débits ou de la répartition spatiale des pluies) de l'échantillon global de calage et d'autre part la même crue et sa reconstitution par la FT de l'échantillon global de calage.

On peut noter les tendances suivantes générales pour tous les bassins :

la forme des crues est fidèlement reconstituée ;

Les débits de pointe sont correctement reproduits. Les petites différences que l'on note entre les débits observés et les débits calculés sont négatives pour les faibles crues et positives pour les plus fortes (sauf pour Taya où elles sont toutes négatives). Autrement dit, les débits des faibles crues sont surestimés et ceux des fortes sous-estimés. L'écart est moindre pour les crues dont la valeur du débit de pointe est intermédiaire. Ces constats concernent les échantillons globaux ; ils s'observent aussi pour des échantillons constitués en fonction de la valeur des débits de pointe mais la différence est plus faible dans certains cas.

La fin de la décrue est en général sous-estimée pour les deux plus petits bassins Tounkoul et Bidjir.

En conclusion, les essais sur les différents échantillons montrent une stabilité correcte de la fonction de transfert. Le coefficient de corrélation entre variables réelles et variables estimées est très bon : 89% pour Barlo, 96% pour Mazera, 90% pour Taya, 97% pour Bidjir et 99% pour Tounkoul ; ce pour les échantillons globaux. Il est encore meilleur pour les échantillons constitués en fonction des débits homogènes.

Il nous reste alors à procéder à la validation de ces résultats.

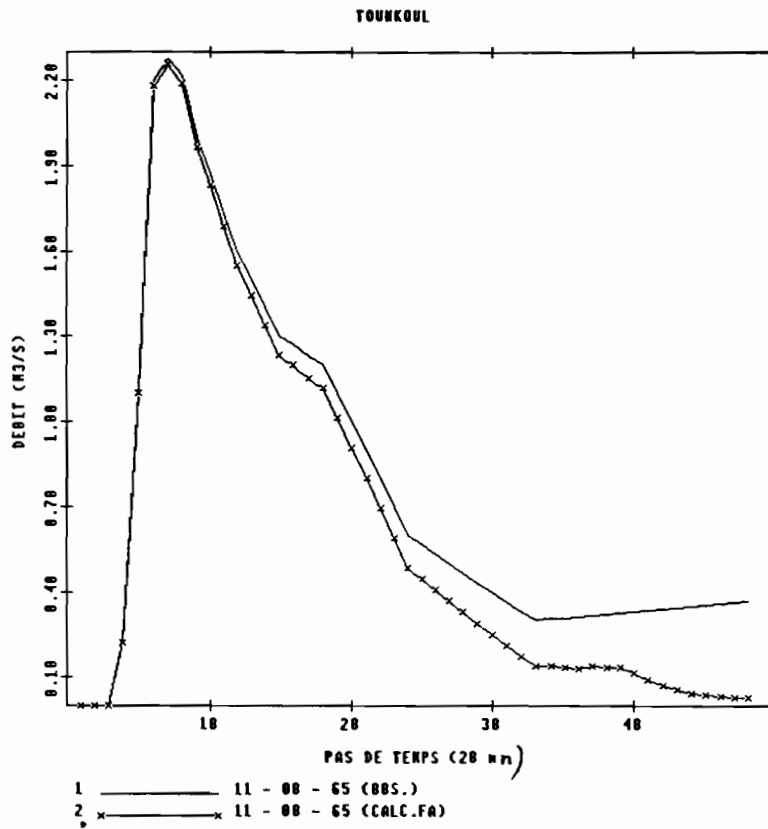
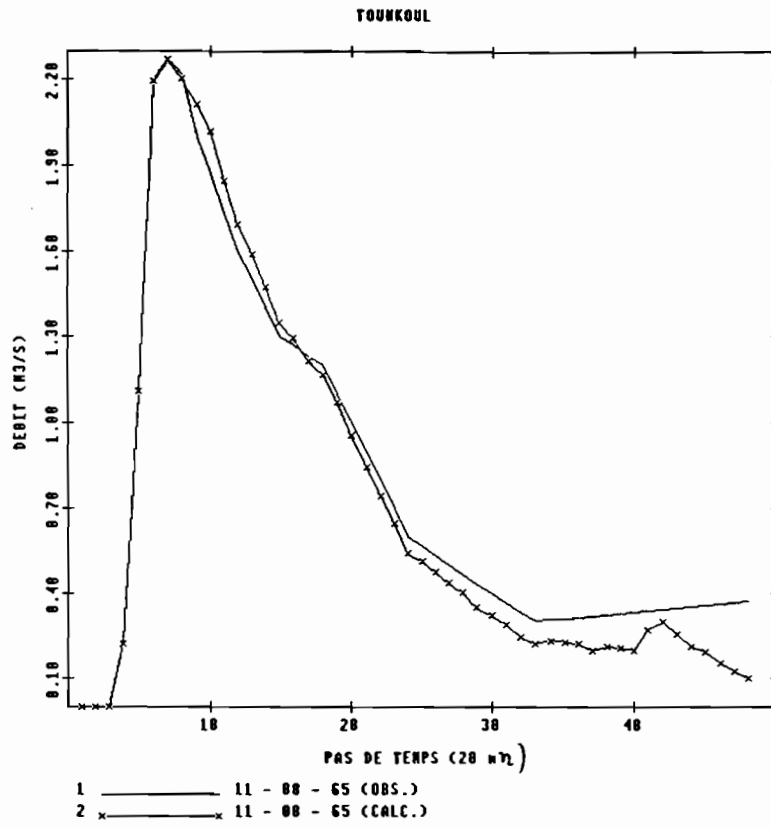


Figure II - 12 - 1 : Crues observées et simulées.

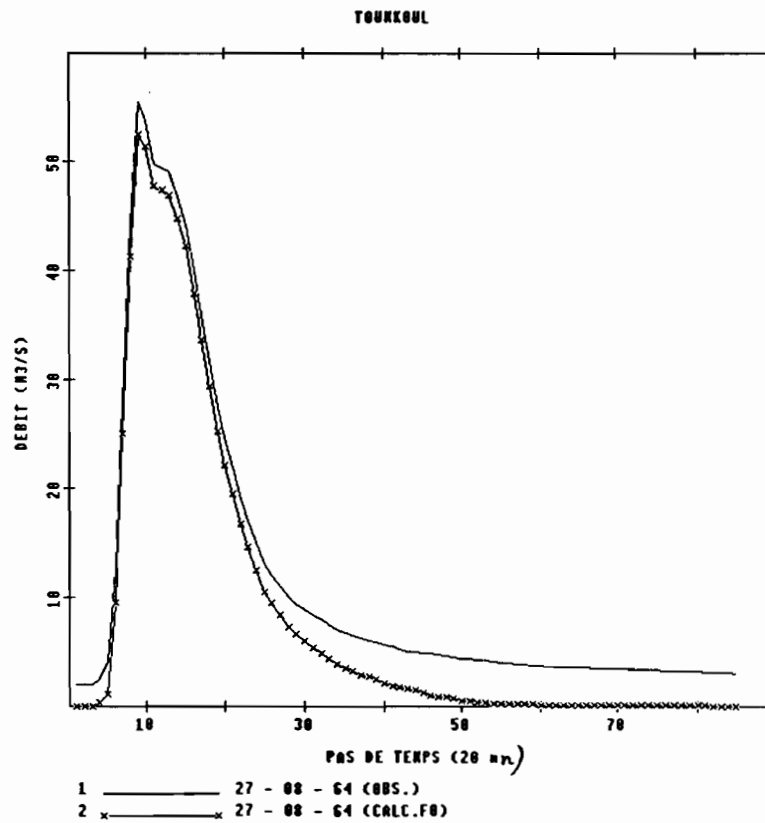
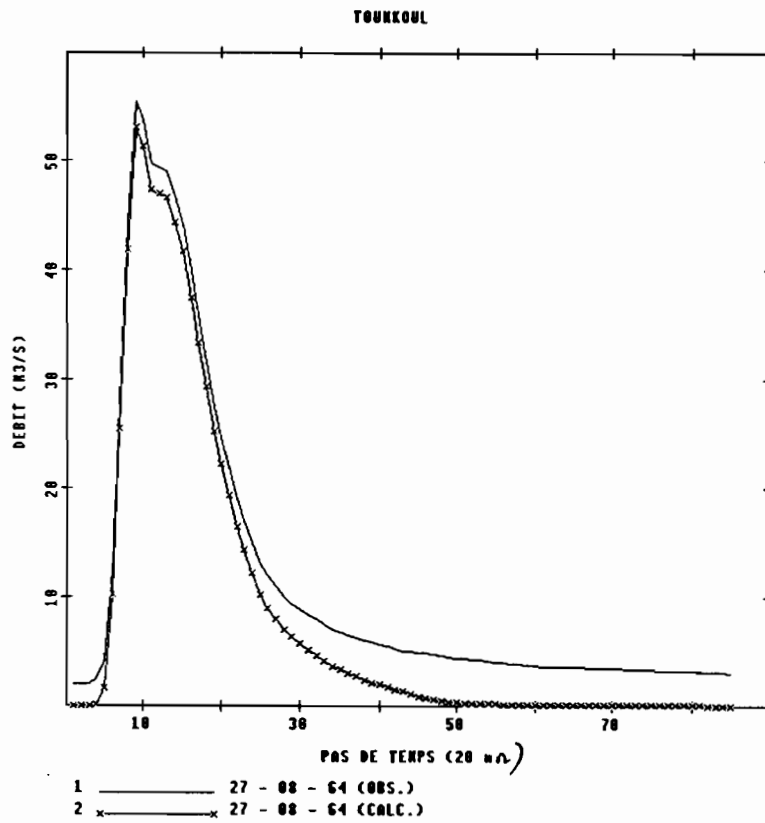
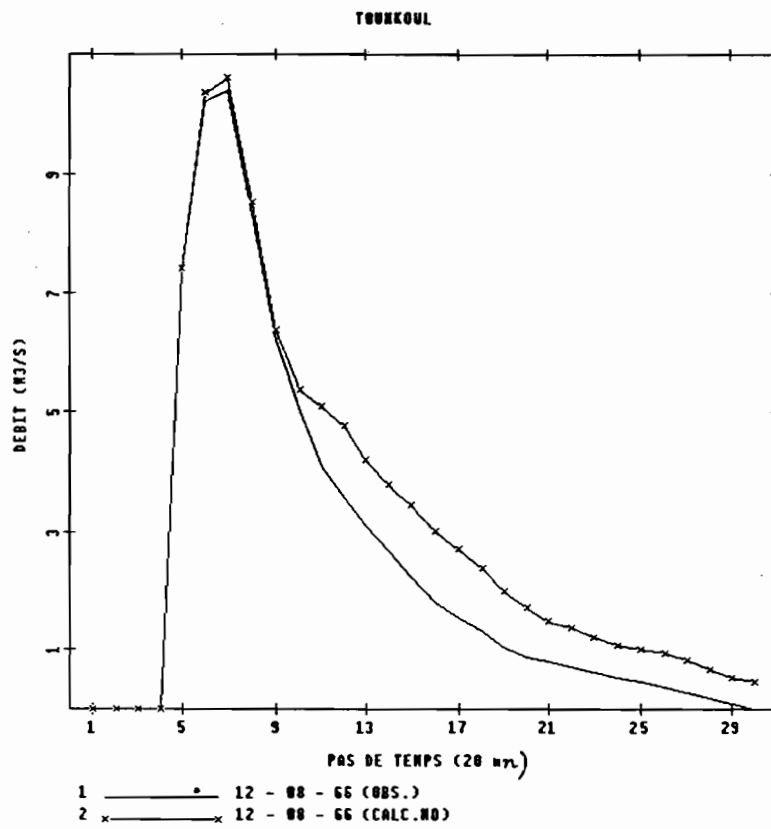
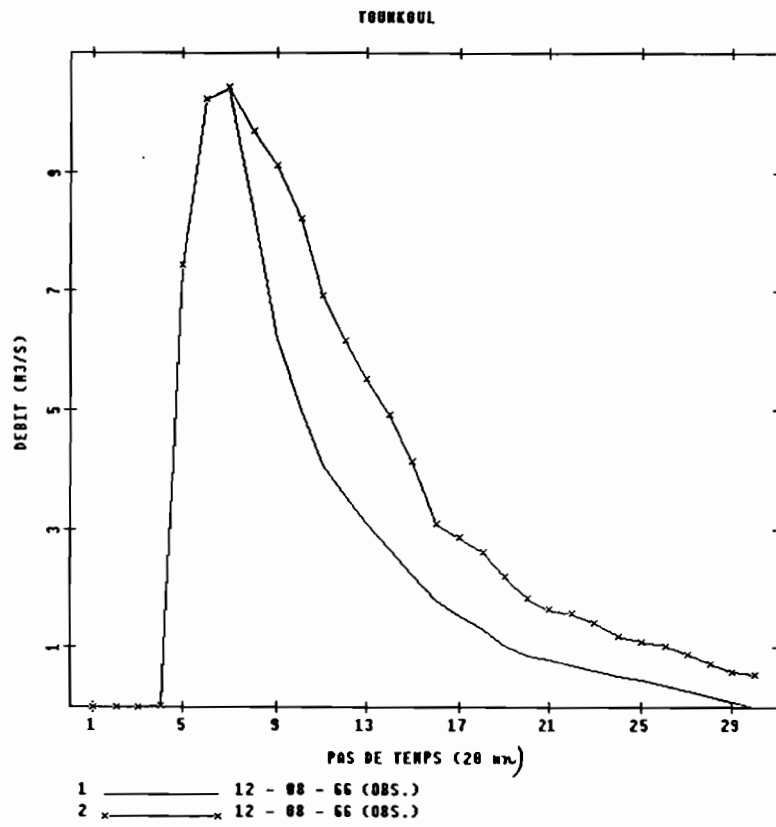


Figure II - 12 - 2 : Crues observées et simulées (suite).



**Figure II - 12 - 3 : Crues observées et simulées (suite).**

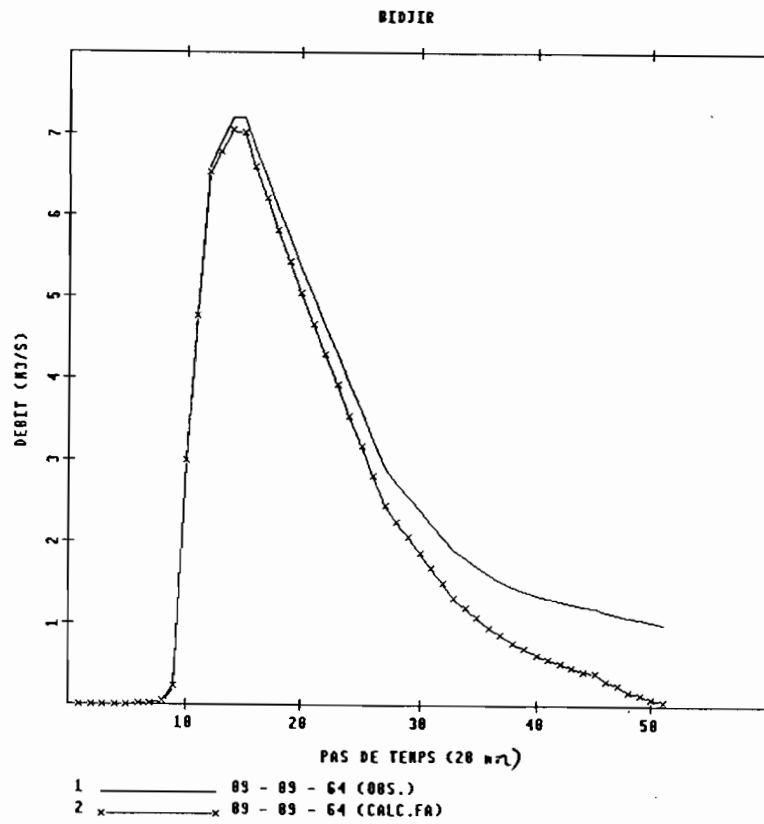
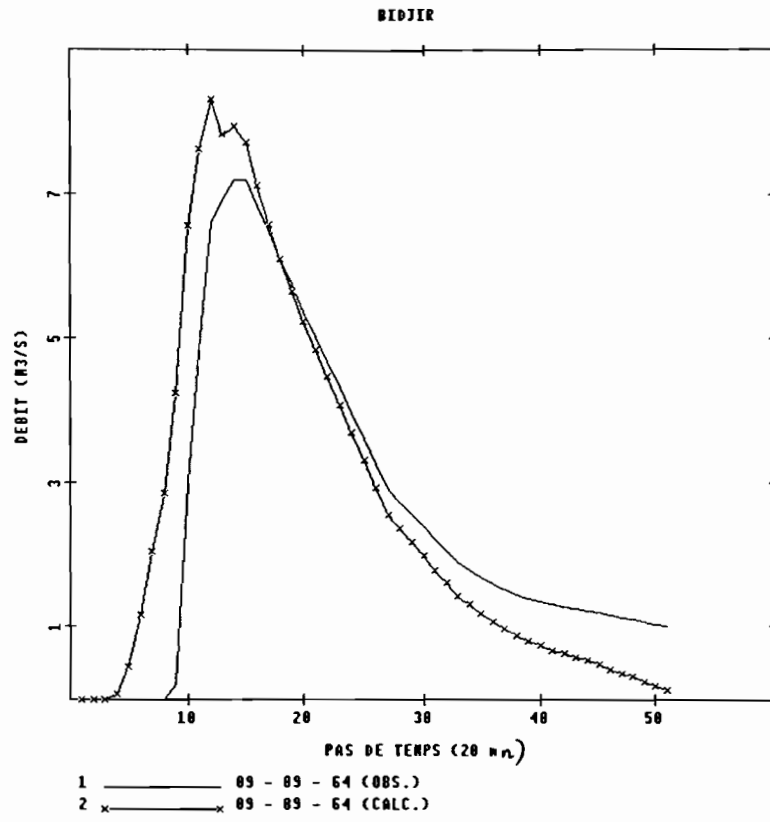


Fig-II-12-4-: Crues observées et simulées (suite).

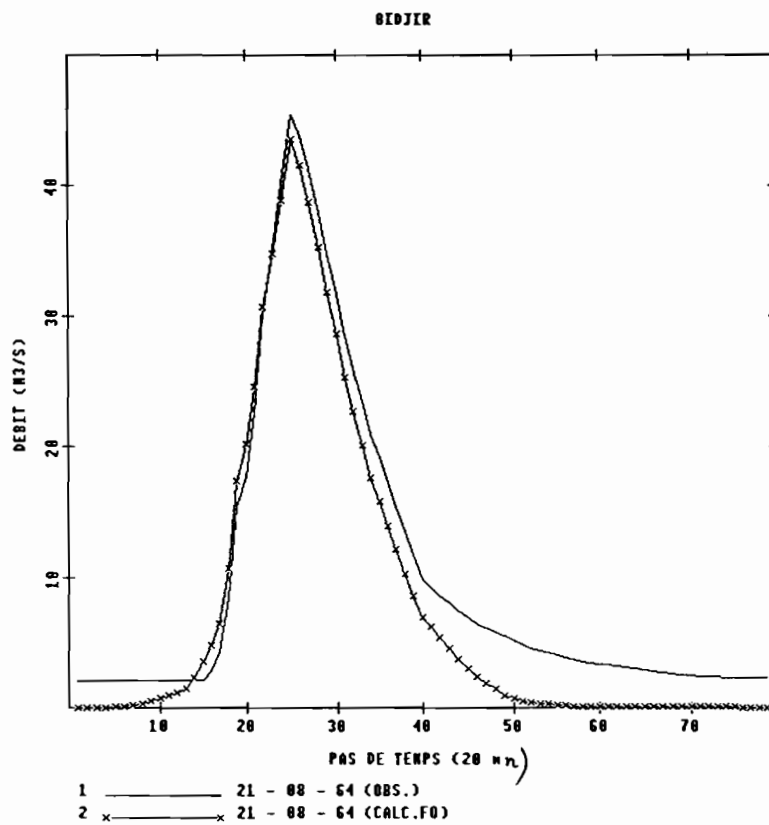
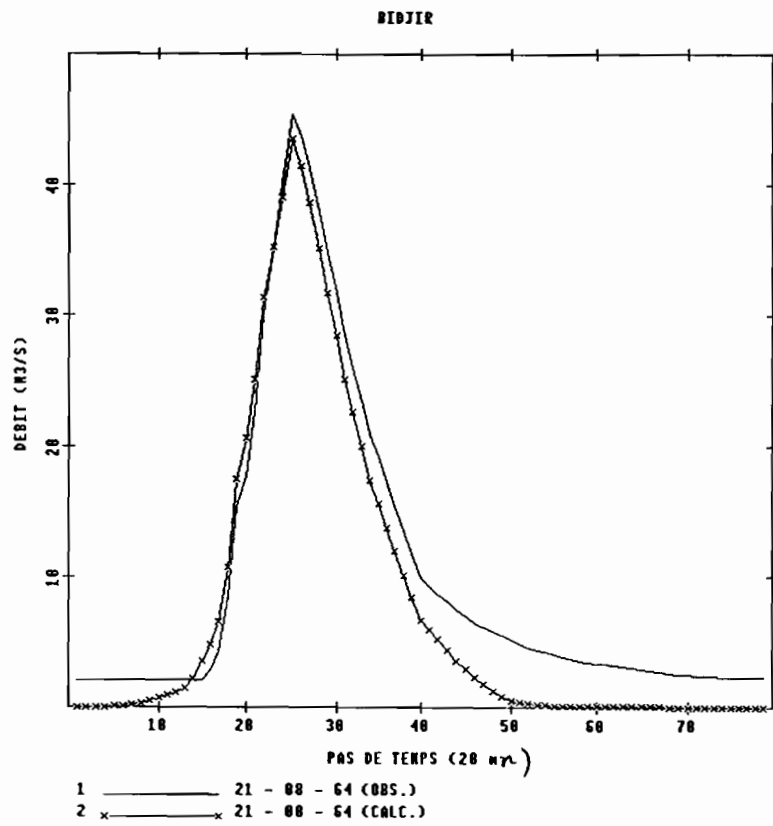


Fig-II-12-5- : Crues observées et simulées (suite).

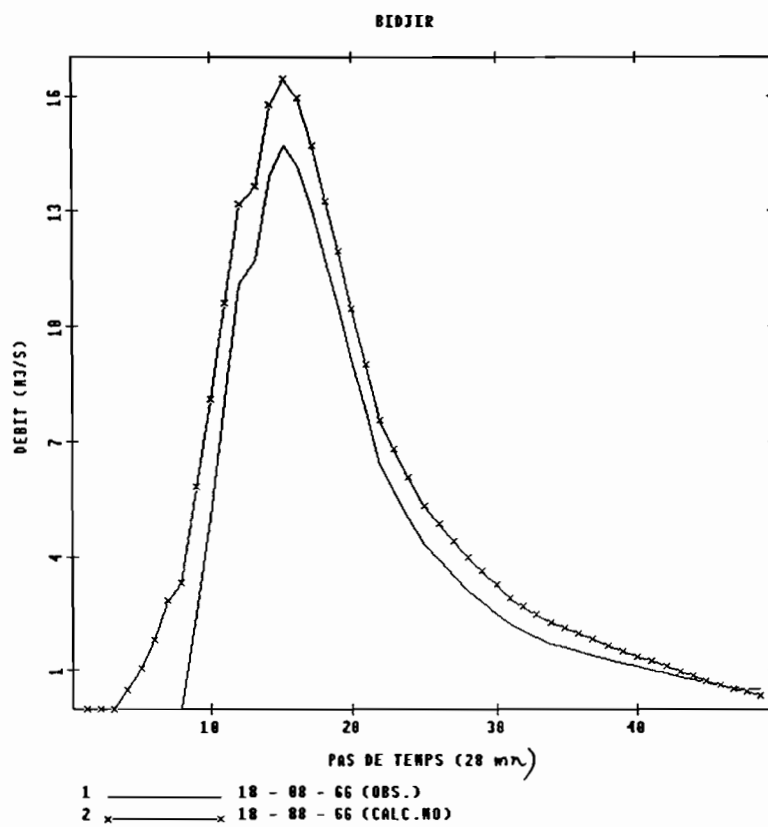
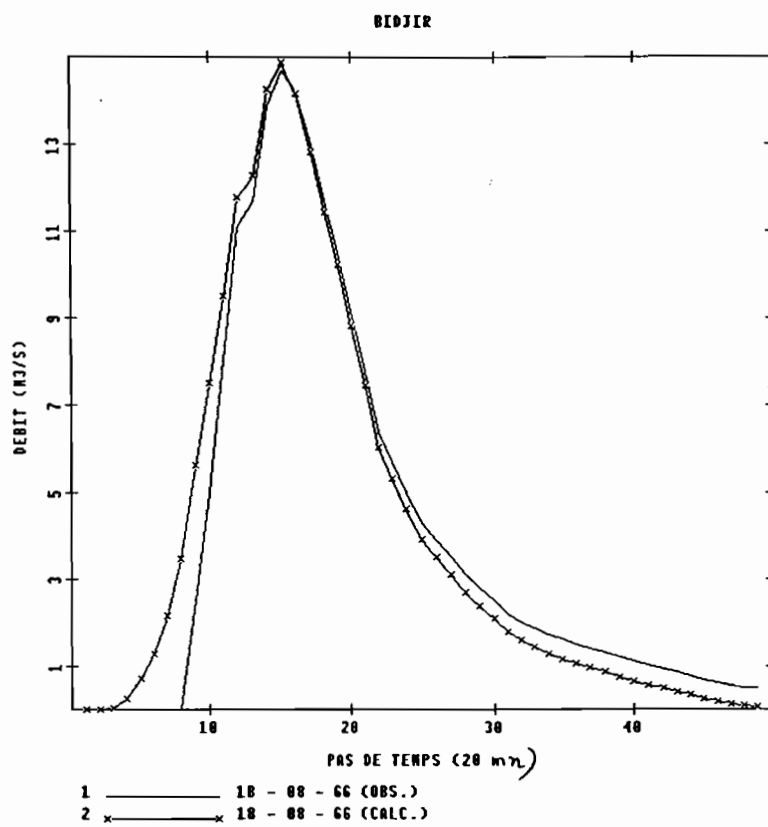


Fig-II-12-6- : Crues observées et simulées (suite).



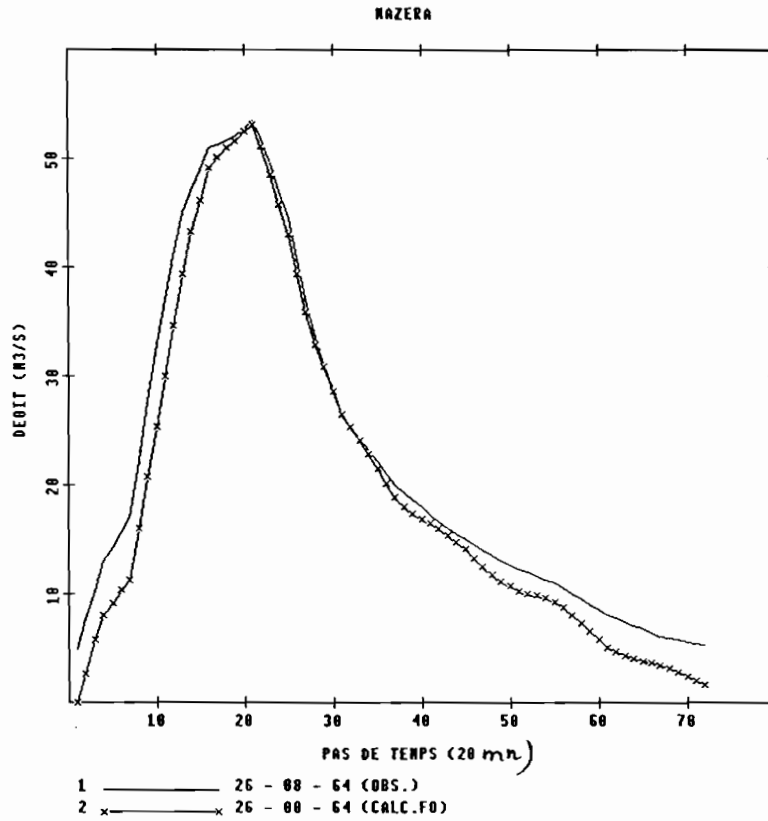
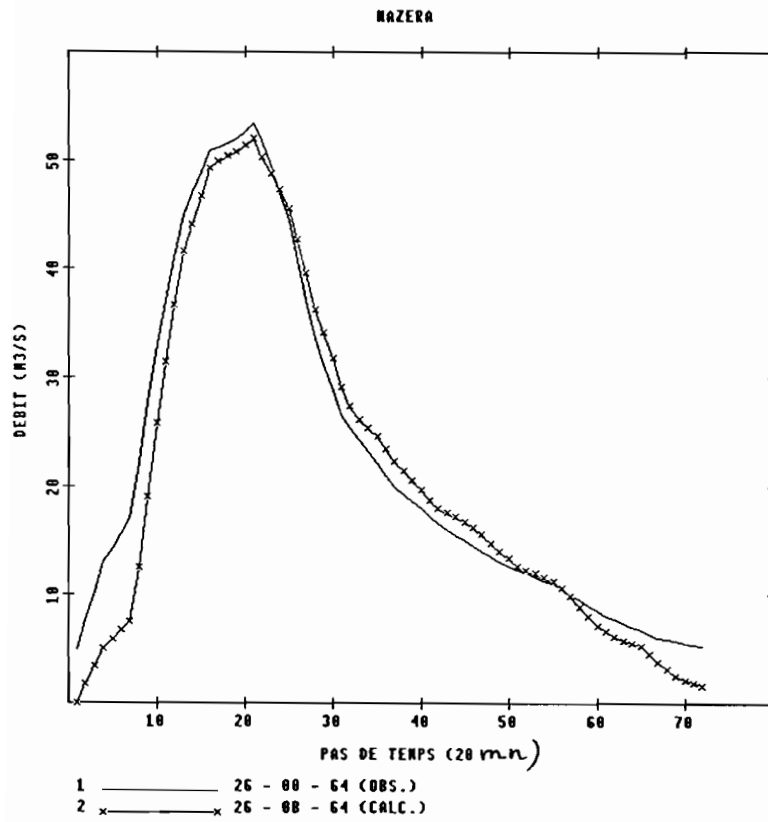


Fig-II-12-8- : Crues observées et simulées (suite).

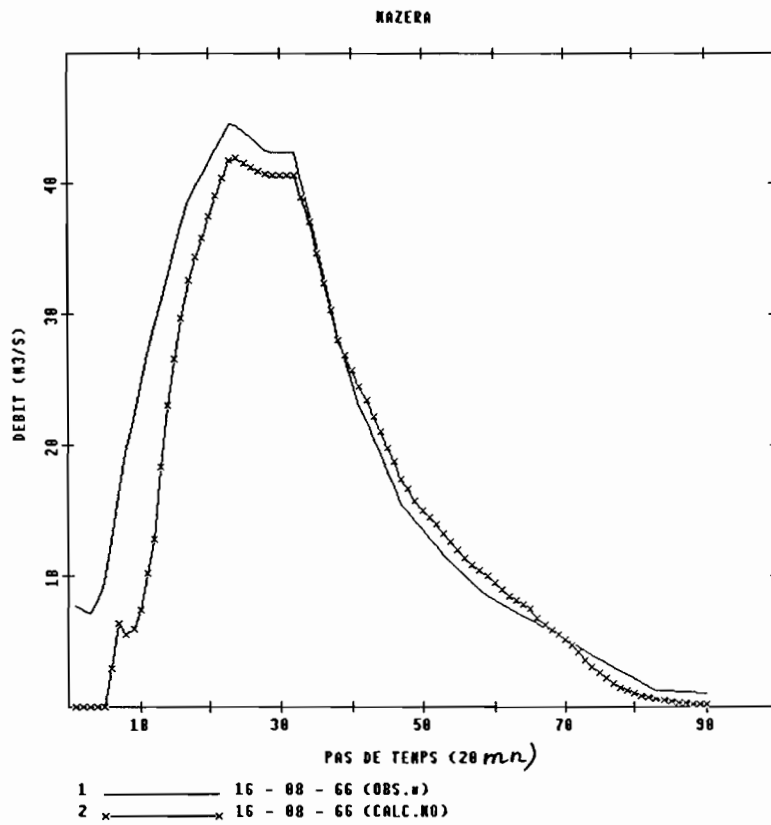
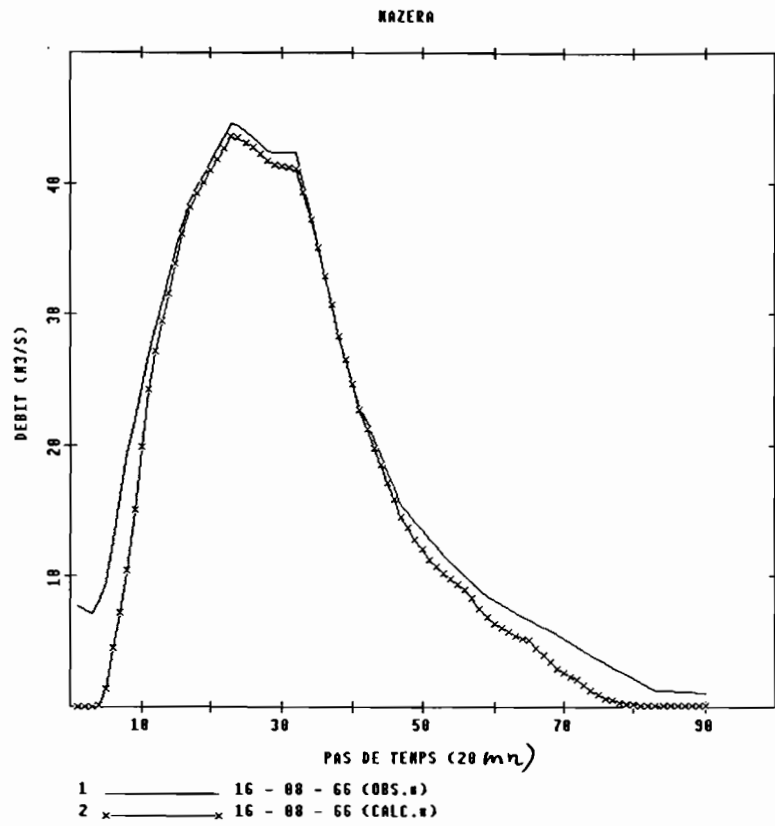


Fig-II-12-9- : Crues observées et simulées (suite).

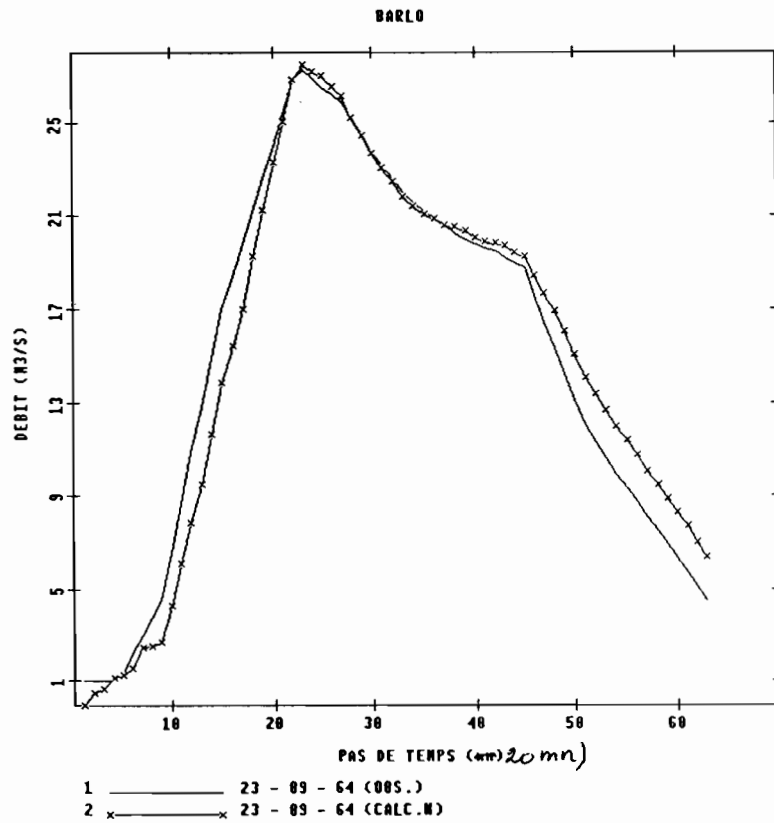
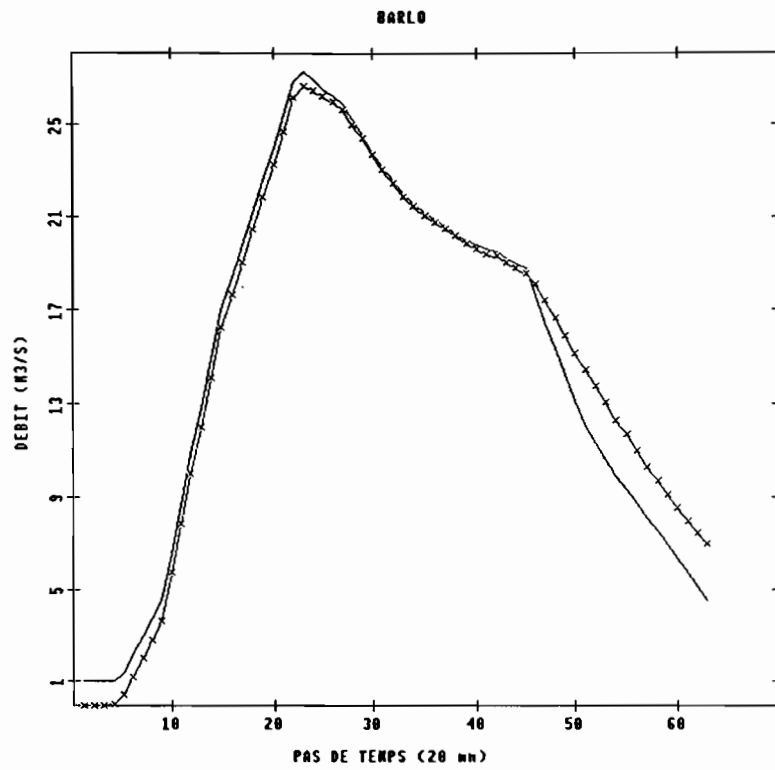


Fig-II-12-10 : Crues observées et simulées (suite).

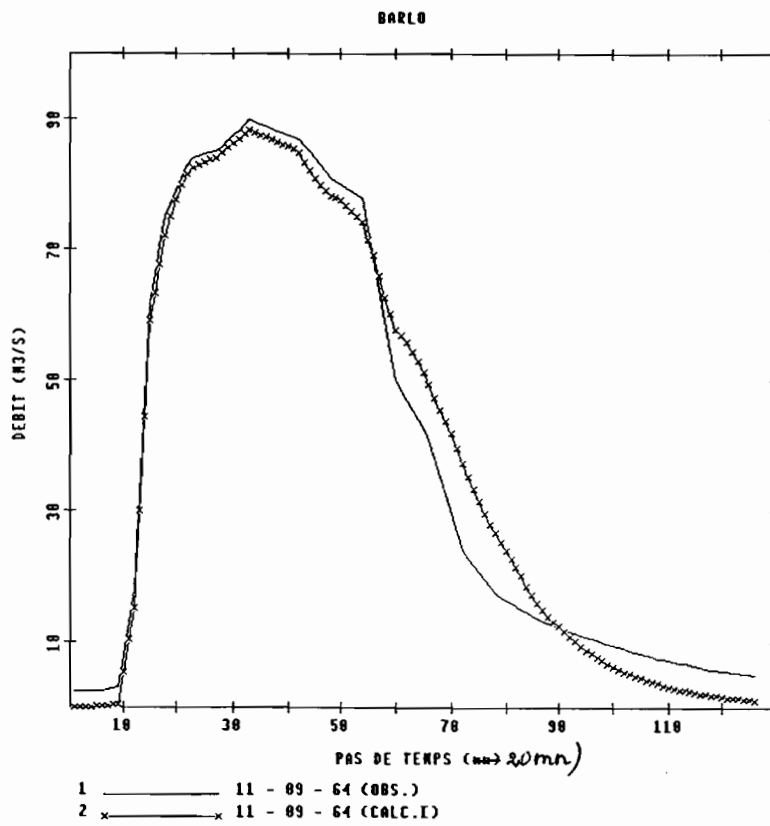
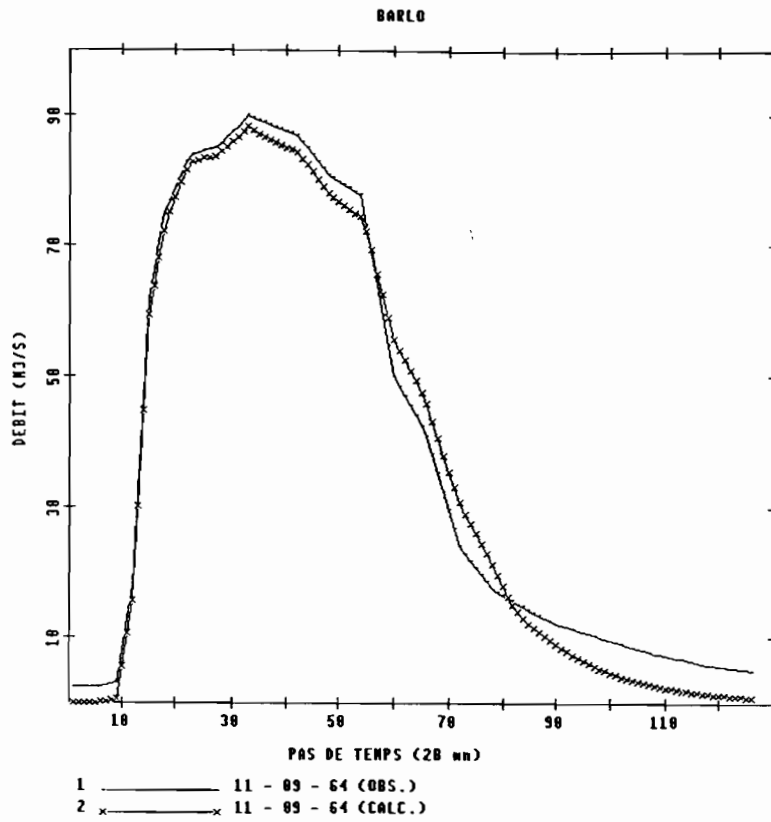


Fig-II-12-11 : Crues observées et simulées (suite).

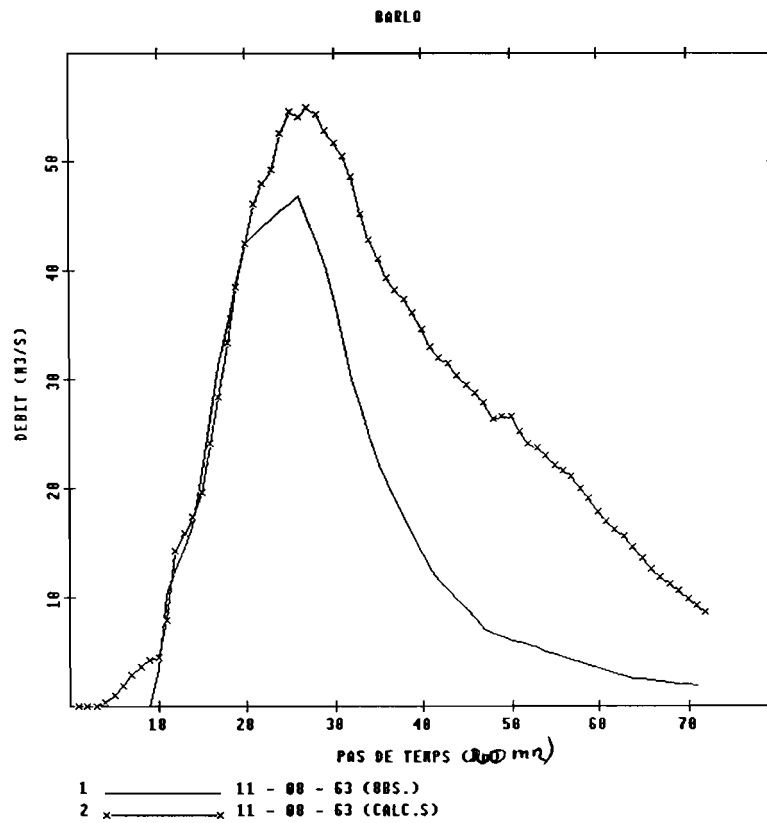
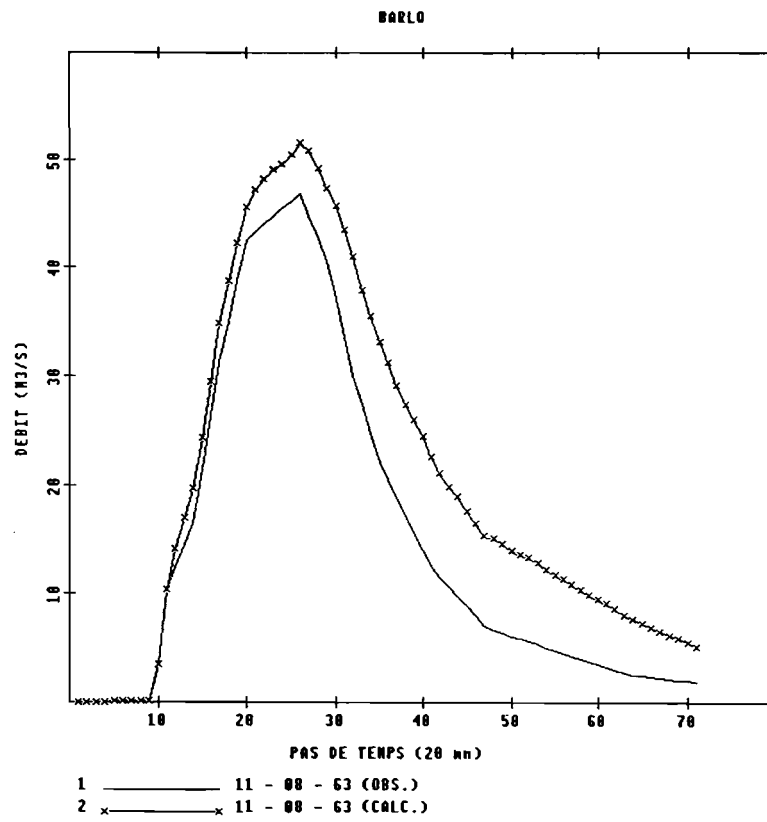


Fig-II-12-12 : Crues observées et simulées (suite).

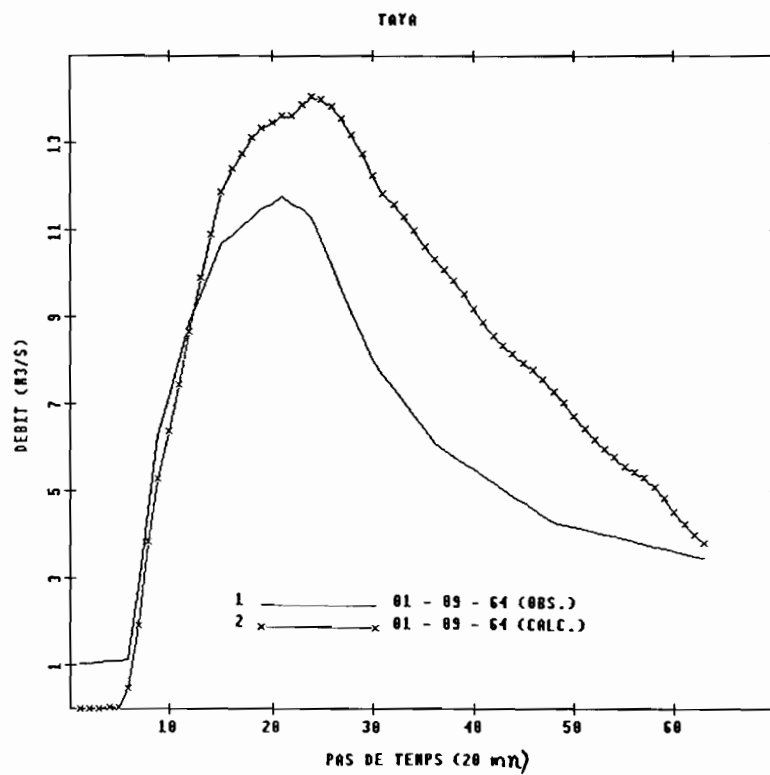
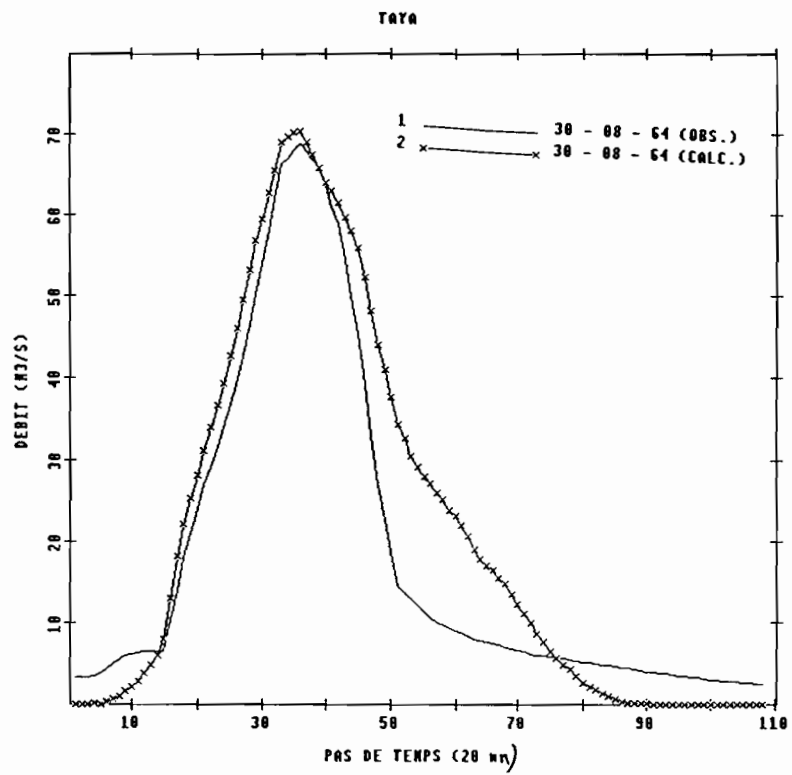


Fig-II-12-13 : Crues observées et simulées (suite).

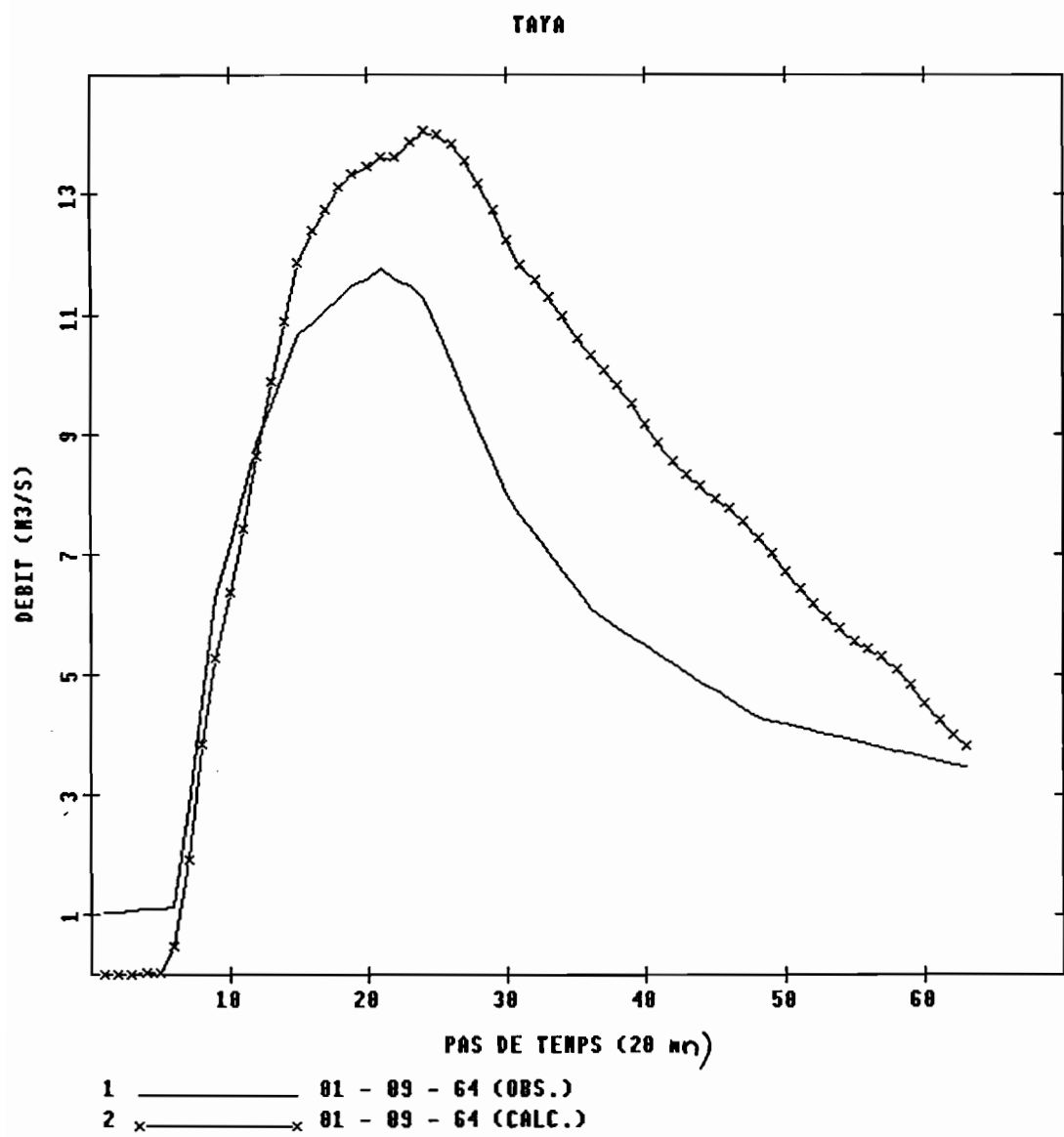


Fig-II-12-14 : Crues observées et simulées (fin).

## II - 3 - Validation

Après avoir identifié les paramètres des fonctions de production et de transfert, nous procédons dans ce qui suit à leur validation. La validation est l'opération qui consiste à reconstituer avec les expressions des fonctions obtenues sur un échantillon de crues donné (échantillon de calage), les crues d'un autre échantillon (échantillon de validation). Les dernières crues étant différentes des premières.

Parmi les nombreux critères permettant d'évaluer les résultats des modèles qui existent, nous avons choisi celui de Nash dont l'expression ne comporte pas de termes pouvant rendre l'opération impossible comme par exemple zéro au dénominateur d'une part et d'autre part, ce critère s'est révélé être le plus significatif des critères employés pour l'appréciation des résultats des modèles sur les petits bassins du Sahel (Ribstein, 1990). Cette expression du critère proposé par Nash et Sutcliffe (1970) est la suivante :

$$C_{qj} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{oj}(k) - Q_{cj}(k))^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{oj}(k) - Q_{mj})^2} \quad (1)$$

Avec :

$n$  : longueur constante des crues à modéliser,

$Q_{oj}(k)$  et  $Q_{cj}(k)$  : débits instantanés, respectivement observé et calculé, pour la crue  $j$  au pas de temps  $k$  ;

$Q_{mj}$  : débit moyen de la crue  $j$ .

Ce critère tend vers 1 pour une bonne adéquation du modèle, et devient négatif si le modèle est moins bon que la simple moyenne. Pour l'adéquation des fonctions de production, le critère de Nash et Sutcliffe est calculé pour un ensemble d'événements à modéliser suivant l'expression :

$$C_{lr} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Lr_{oi} - Lr_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (Lr_{oi} - Lr_m)^2} \quad (2)$$

Avec :

$N$  : nombre de crues à modéliser,

$L_{ro_i}$  et  $L_{rc_i}$  : les lames ruisselées (ou écoulées !) respectivement observée et calculée, pour la crue  $i$  ;

$L_{rm}$  : lame ruisselée moyenne des  $N$  événements.

### II - 3 - 1 - Validation de la fonction de production

Pour apprécier l'adéquation de la fonction de production, nous avons calculé le critère  $C_{1r}$  (expression (2)). C'est l'expression du critère de Nash et Sutcliffe calculé pour l'ensemble de l'échantillon de validation des différents bassins. La valeur du critère est supérieure à zéro et proche de 1 pour la plupart des bassins. Pour les bassins de Taya, Tounkoul, Mazera et Bidjir, cette valeur va de 0,51 à 0,93 ; l'adéquation du modèle est donc bonne. Pour le bassin de Barlo qui accuse une faible valeur de 0,23 ; la relation entre la lame ruisselée calculée et la lame ruisselée observée est pourtant bonne en calage. La faible valeur du critère serait due aux valeurs extrêmement élevées de  $S$  rencontrées sur ce bassin et utilisées dans l'ajustement avec les IPA ou au problème de séparation des écoulements pour ce bassin grand de 528 km<sup>2</sup> et dont le débit de base est relativement important.

Le tableau II - 14 rappelle le nombre de crues de validation de chaque bassin et la valeur du critère  $C_{1r}$ .

Bassin	Barlo	Mazera	Taya	Bidjir	Tounkoul
Nombre de crues de validation	5	6	3	4	5
Critère $C_{1r}$ (%)	23	78	51	93	72

**Tableau II - 14 : crues de validation et critère  $C_{1r}$  d'adéquation du modèle de production.**

### II - 3 - 2 - Validation du modèle complet

L'opération de calage nous a permis d'obtenir des expressions séparées des fonctions de production d'une part et de transfert de l'autre. Nous allons maintenant procéder à la validation du modèle complet qui consiste à associer l'expression de la fonction de production avec celle de la fonction de transfert suivant la théorie de la modélisation hydrologique soulignée plus haut en rajoutant le débit de base.

Le critère permettant d'apprécier l'adéquation du modèle complet que nous avons utilisé est celui de Nash (expression (1)). Nous rappelons que l'adéquation est bonne quand la valeur de ce critère tend vers 1. Dans notre cas et pour l'échantillon de validation, cette valeur est plutôt proche de 0 que de 1 pour tous les bassins (à l'exception de Bidjir dont la valeur est 0,83), ce qui traduit un mauvais comportement du modèle.

En analysant les crues observées et leur reconstitution par le modèle complet, nous pouvons remarquer que les débits de pointe diffèrent largement. Le modèle les sous-estime systématiquement pour tous les bassins sauf Mazera, et ils sont de toutes les façons reproduits avec un grand décalage dans le temps.

Les tendances générales suivantes peuvent être retenues :

- le modèle réagit avec avance : les crues reproduites ont pour la plupart trois à cinq pas de temps au moins (60 à 100 minutes) d'avance sur les crues observées ;

- le modèle est très sensible aux cassures (mêmes très faibles) en montée et réagit en créant un sommet. Une crue simple présentant la moindre cassure en montée, est reconstituée en crue composée ;

- la forme des crues est très mal reconstituée. Le modèle ne reproduit véritablement la forme des crues composées que si les sommets sont croissants (la forme d'une crue double n'est reproduite que lorsque le deuxième sommet est plus grand que le premier) ou lorsque la séparation entre les différents sommets est bien distincte (des crues composées qui peuvent être considérées comme distinctes au vu de la séparation nette et plus ou moins longue entre les différents sommets). La figure II - 12 présente pour chaque bassin une crue de validation et sa reconstitution.

D'après ces constats, le modèle complet ne reflète en rien le comportement des fonctions de production et de transfert qui le composent (qui ont donné des bons résultats séparément) malgré la conservation des volumes. Nous allons rechercher les causes possibles de cette différence de comportement.

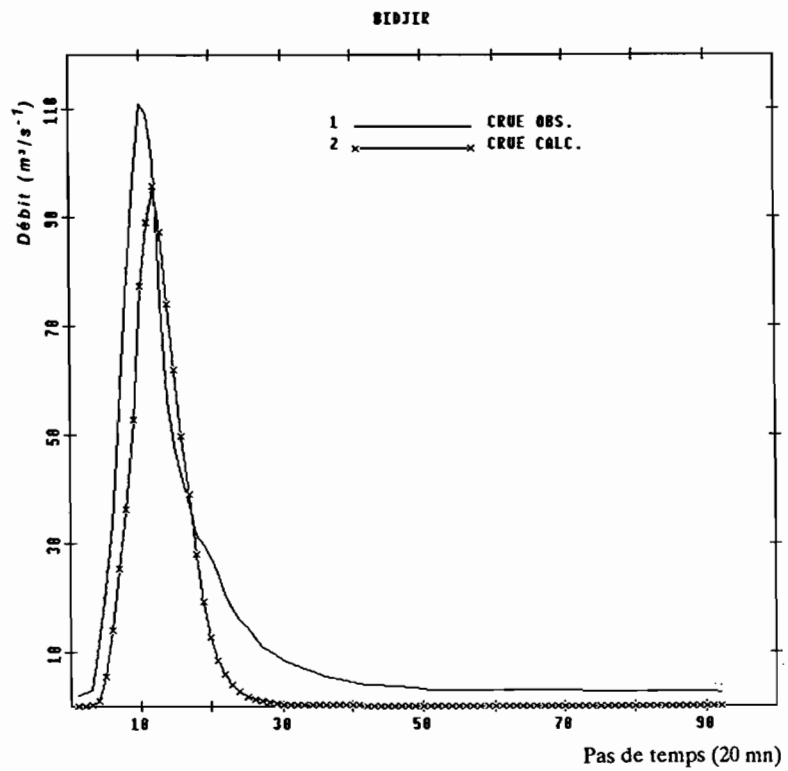
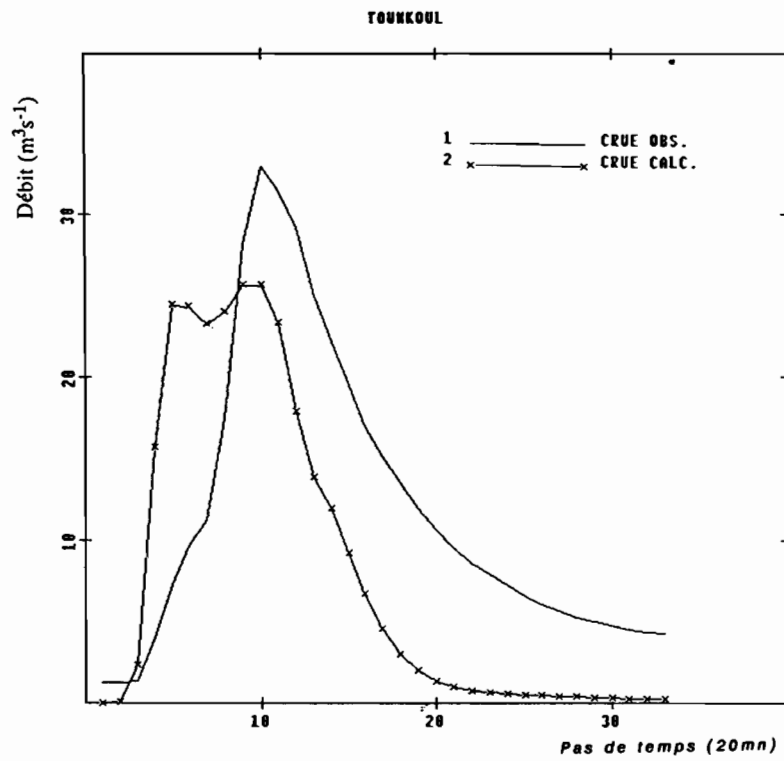


Fig-II-13-1 : Crues observée et reconstituée par le modèle complet.

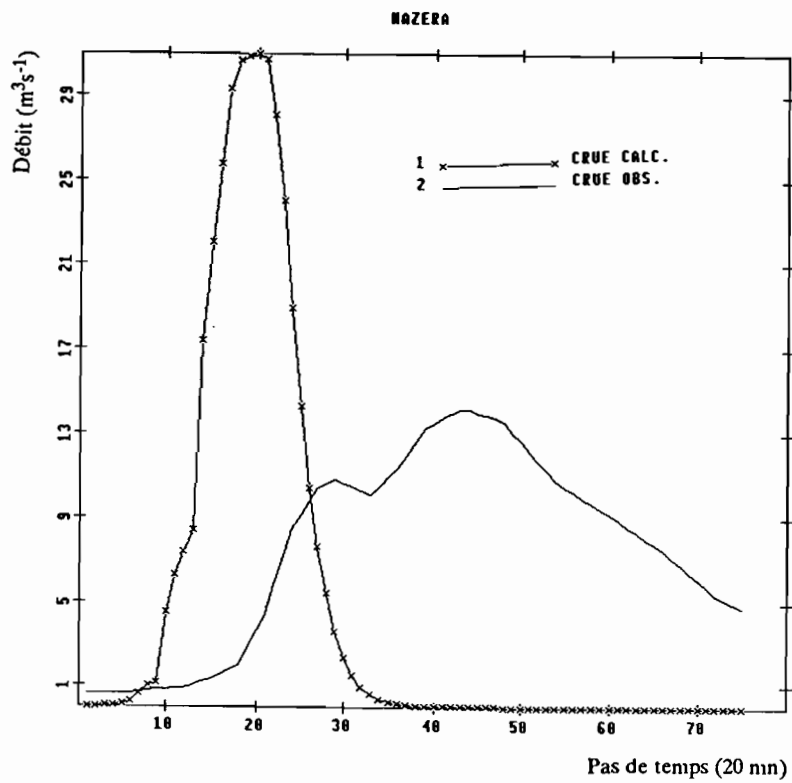
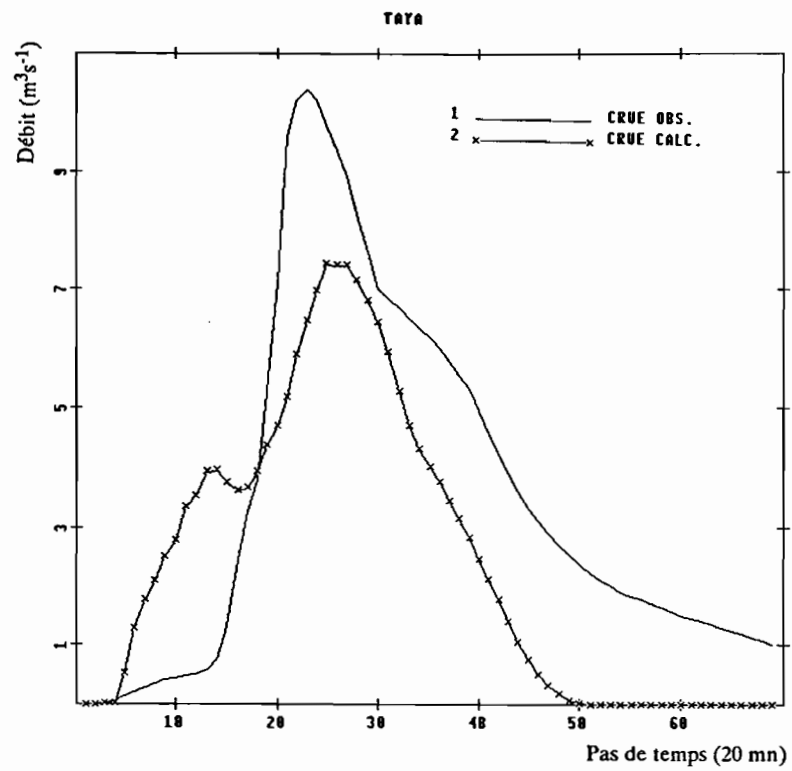


Fig-II-13-2 : Crues observée et reconstituée par le modèle complet (suite).

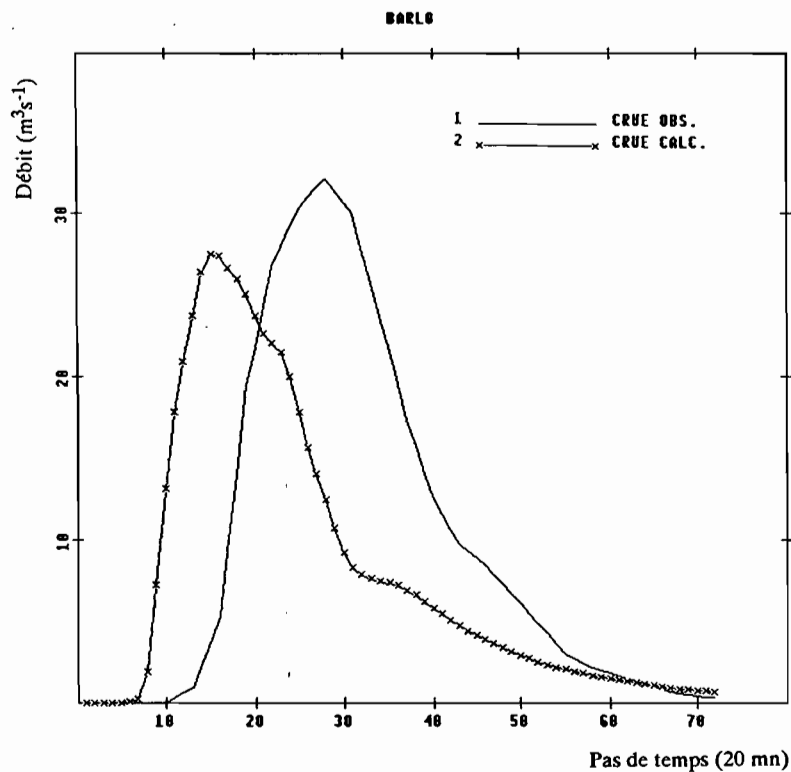


Fig-II-13-3- : crues observée et simulée par le modèle complet (fin).

### Analyse de l'entrée du système

Dans le modèle complet, l'entrée est constituée des pluies nettes obtenues par la fonction de production qui vont alimenter la fonction de transfert qui se chargera de leur transformation en débits écoulés à l'exutoire. Elles conditionnent nécessairement le comportement du modèle. C'est nous avons choisi de commencer notre recherche des causes du mauvais comportement du modèle complet par elles (pluies nettes).

En examinant les hyétogrammes des pluies nettes générées par la fonction de production et ceux de la fonction de transfert (la figure II - 13), nous remarquons qu'ils ne présentent aucune similitude, tant du point de vue de la durée que de l'intensité. La fonction de production donne des pluies nettes bien calées sur les pluies brutes tandis que la fonction de transfert produit des pluies nettes qui durent très longtemps après les pluies brutes. L'intensité des pluies nettes de la fonction de production est beaucoup plus élevée que celles de la fonction de transfert mais la hauteur moyenne reste plus faible. Il paraît évident que l'on n'obtiendrait pas les mêmes résultats en remplaçant l'une par l'autre.

Les pluies nettes de la fonction de production du SCS semblent plus réalistes puisqu'elles n'apparaissent seulement qu'à la suite d'une pluie brute. Par contre la DPFT produit des pluies nettes qui ont pour cause une pluie brute mais persistent même lorsque cette dernière s'arrête (figure II - 13 : pluie nette DPFT). Ce comportement ne saurait être justifié si nous nous limitons à la seule considération de la production sans la relier au transfert (mais la production n'a de sens que par la relation avec le transfert).

Nous avons repris le calage de la fonction de transfert en fixant la contrainte suivante : pluies nettes inférieures aux pluies brutes à chaque itération, ce qui est plus plausible en terme de production.

Les pluies nettes calculées avec cette contrainte par la fonction de transfert sont très semblables à celles de la fonction de production du SCS par la forme (figure II - 14) mais avec des intensités plus élevées. La hauteur moyenne reste donc plus grande.

Les résultats obtenus diffèrent largement de ceux des calculs sans cette contrainte. Les valeurs des caractéristiques de la fonction de transfert ne sont plus les mêmes et la reconstitution des crues moins bonne. Nous pouvons nous rendre compte de la variation du coefficient de corrélation entre variables réelles et variables estimées dans les deux cas (sans contrainte et avec contrainte pluies nettes inférieures aux pluies brutes à chaque itération) en regardant le tableau II - 15.

Bassin	Barlo	Mazera	Taya	Bidjir	Toukoul
Coefficient sans contrainte (%)	89	96	90	97	99
Coefficient avec contrainte (%)	75	51	71	93	95

**Tableau II - 15 : coefficients de corrélation avec et sans contrainte sur la pluie nette de la DPFT.**

La chute de la valeur du coefficient de corrélation est très grande pour les bassins de plus de 100 km<sup>2</sup> de superficie (elle va de 14 % pour le bassin de Barlo à 45 % pour celui de Mazera). Cette baisse n'est pas proportionnelle à la superficie. Les petits bassins de moins de 100 km<sup>2</sup> (Bidjir et Toukoul) ne sont pas très affectés par cette contrainte mais on note tout de même une différence en baisse de précision de 4 % pour chacun d'eux.

Nous avons de nouveau procédé à une validation du modèle complet avec les nouvelles fonctions de transfert. Nous obtenons les valeurs du critère Cq de Nash suivantes : 31% pour

Barlo, 86% pour Mazera, 57% pour Taya, 93% pour Bidjir et 35% Tounkoul. Ces valeurs du critère sont globalement meilleures comparées à la corrélation obtenue en calage.

Nous pouvons toutefois noter deux grandes surprises :

la première concerne le bassin de Mazera. Pour ce bassin, la relation obtenue en validation est de loin meilleure que celle du calage (51% en calage contre 86% en validation). Les crues sont mieux reconstituées en validation qu'en calage, ce qui semble tout à fait illogique ou alors cela pourrait signifier que le transfert parfait de Mazera, dans ce cas le coefficient de corrélation n'aurait pas une telle valeur ;

la deuxième provient du bassin de Tounkoul. Ce bassin qui est le plus petit, présente la meilleure corrélation en calage (95%) par contre à la plus mauvaise valeur du critère de validité de Nash en validation (35%). Ces valeurs du critère traduisent l'instabilité du modèle de transfert par rapport à cette contrainte sur les pluies nettes.

L'ensemble des résultats posent le problème de la production (pluies nettes) dans les modèles complets. Si l'hypothèse : pluies nettes inférieures aux pluies brutes est justifiée en chaque point de mesure pluviométrique, il n'en va pas de même en ce qui concerne l'ensemble du bassin versant (problème de la représentativité des points de mesure) surtout sous régime pluviométrique sahélien où les pluies peuvent être localement très brutales. Par contre le problème ne se pose pas en ce qui concerne le débit. Les mesures à une station hydrométrique représente bien la totalité de la production de la superficie du bassin versant contrôlée par cette station (sous réserve que les mesures sont bien faites ; cette remarque est aussi valable pour les mesures pluviométriques). Partant de ce point de vue, nous pouvons considérer que la DPFT en reproduisant correctement le débit et la forme des crues nous permet d'aborder la troisième partie qui constitue une tentative de modélisation en approche distribuée.

### Conclusion

Nous pouvons retenir de cette approche globale, le bon fonctionnement du modèle de production et du modèle de transfert.

En production, nous avons montré que l'indice des précipitations antérieures (IPA) est un bon indicateur de l'état initial avant les crues. Un indice de Kohler avec un coefficient de décroissance de 0,90 améliore considérablement les résultats.

En transfert, nous avons montré la stabilité de la fonction de transfert en faisant varier la composition de l'échantillon de calage.

Les bons résultats obtenus avec chaque modèle isolé, ne se retrouvent plus dans le modèle complet. Ce comportement pourrait signifier les limites du type de modélisation utilisée, limites dues aux concepts séparés de production et de transfert. Il pourrait aussi s'agir des limites des modèles globaux appliqués à petits pas de temps.

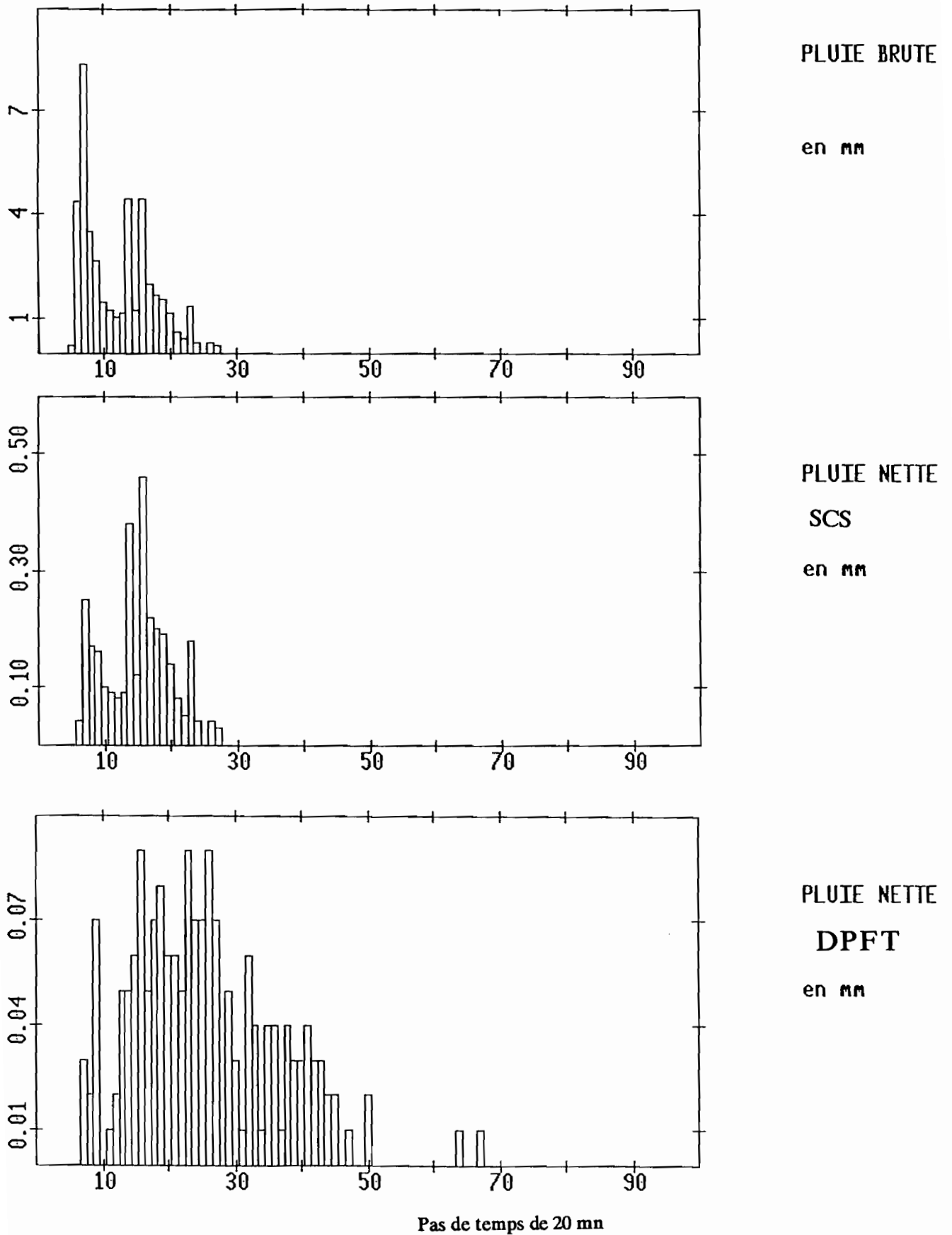


Fig-II-14-1 : Pluie brute et pluies nettes correspondantes par la méthode SCS et La méthode DPFT.

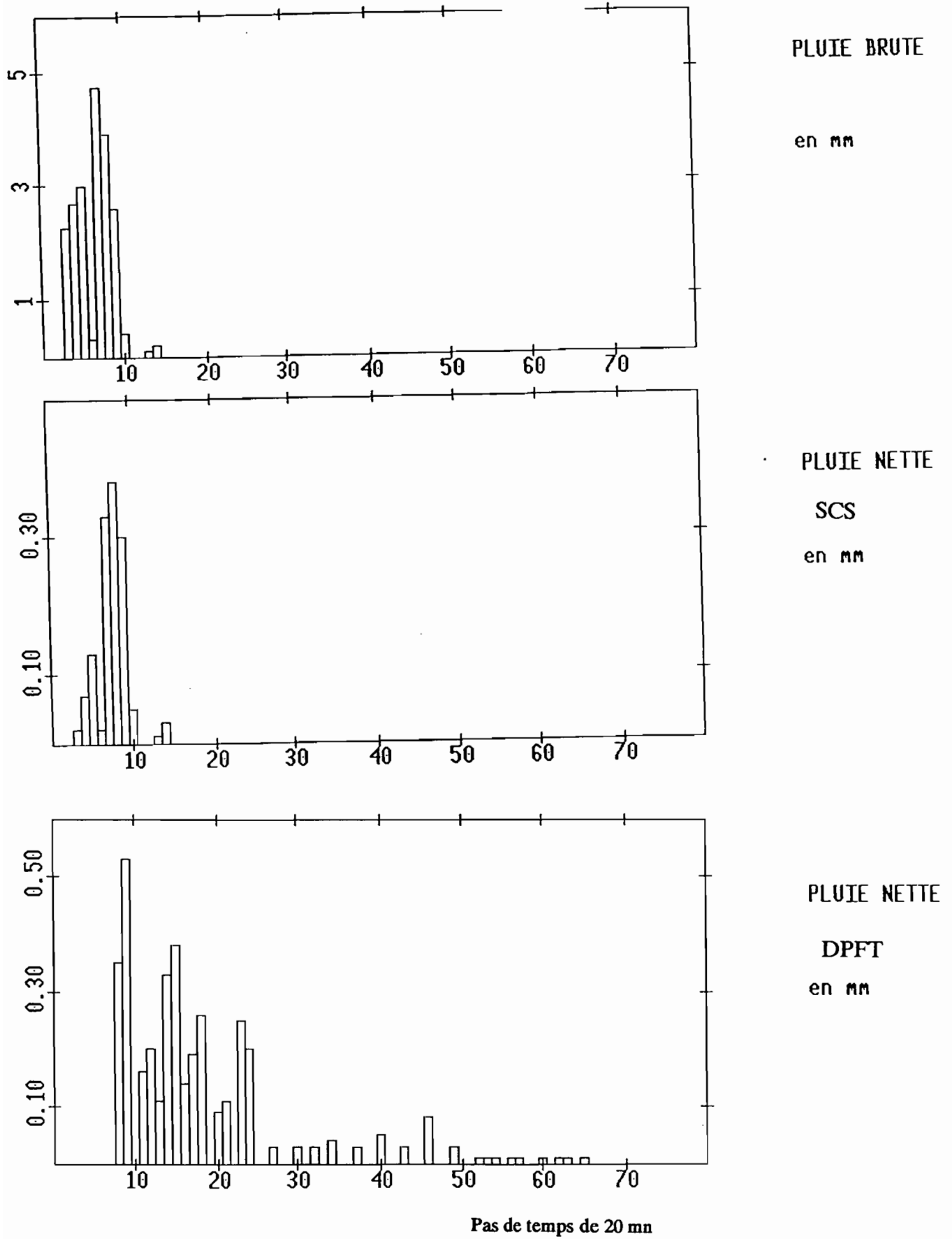


Fig-II-14-2- : Pluie brute et pluies nettes correspondantes par la méthode SCS et La méthode DPFT (suite).

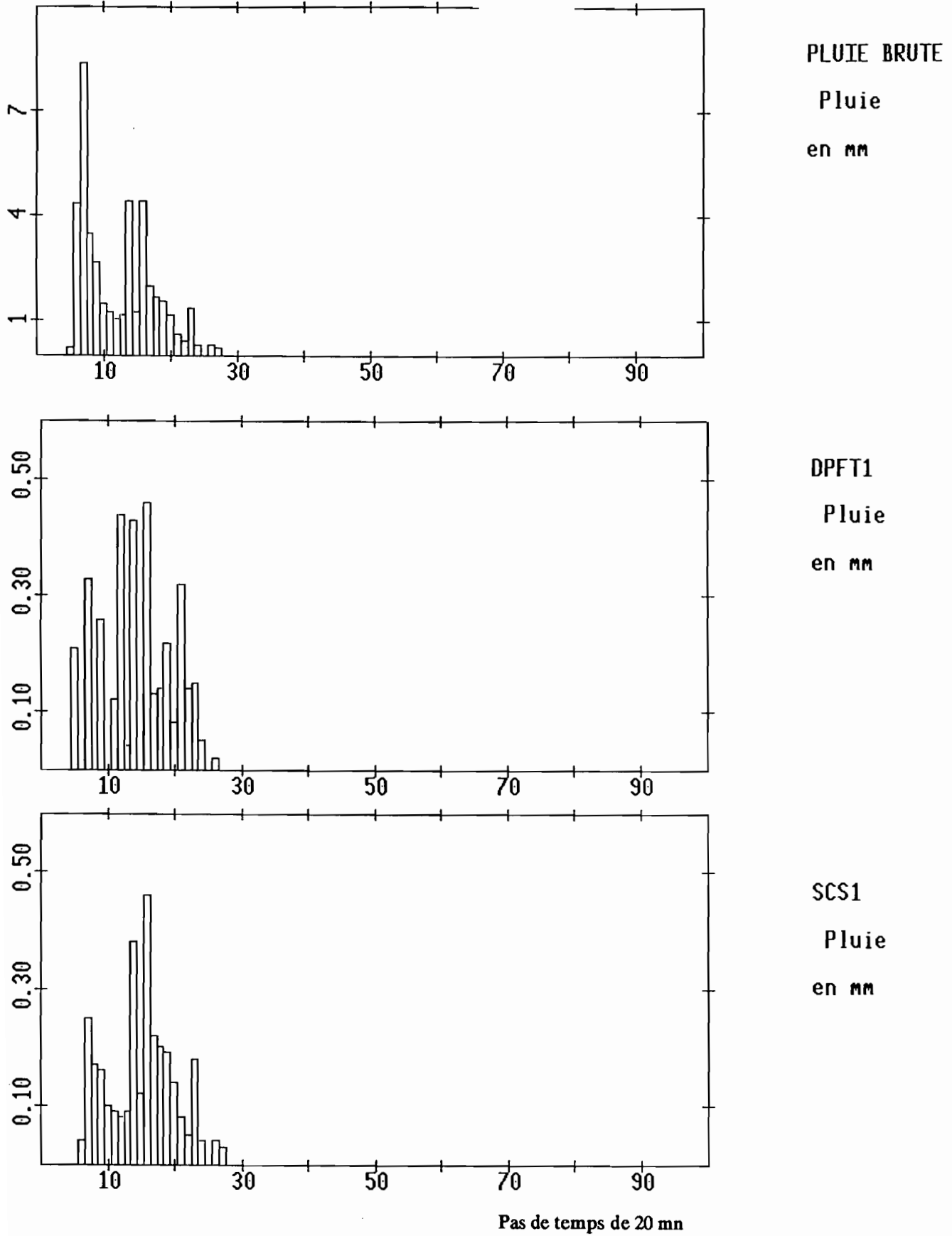


Fig-II-14-3- : Pluie brute et pluies nettes correspondantes par la méthode SCS et La méthode DPFT avec contrainte (pluies nette inférieure à pluie brute).



**3ème PARTIE**

**ESSAIS D'APPROCHE DISTRIBUEE**



### III - Approche distribuée

On appelle modèle distribué ou modèle à discrétisation spatiale un modèle qui a des entrées, des sorties ou des caractéristiques du système hydrologique distribuées dans l'espace. Le bassin est par exemple découpé en surfaces élémentaires ayant chacune leur fonction de production et de transfert. Le débit à l'exutoire est la résultante du comportement de toutes les surfaces élémentaires.

L'approche distribuée dans notre cas consiste à propager à l'exutoire du bassin emboîtant la composition des hydrogrammes des bassins amonts ainsi que la contribution du bassin résiduaire. On appelle bassin résiduaire de Barlo, le bassin total de Barlo amputé des bassins de Bidjir et Taya. Le résultat de ces propagations est dit modèle distribué.

Suivant le découpage naturel de nos bassins imbriqués les uns dans les autres (figure I - 8) nous avons les possibilités suivantes :

- utiliser le comportement de Tounkoul pour modéliser Mazera,
- utiliser le comportement de Bidjir et Taya pour modéliser Barlo,
- utiliser le comportement de Barlo et Mazera pour modéliser Tialozoudou.

Dans notre modèle distribué, les surfaces élémentaires sont constituées par les bassins amonts et les bassins résiduaires.

#### III - 1 - Application aux différents cas de figure.

La possibilité d'utiliser le comportement des bassins de Barlo et Mazera pour modéliser Tialozoudou en approche distribuée est dépendante des deux autres ; celles de propager Tounkoul à Mazera d'une part, Taya et Bidjir à Barlo d'autre part, nous choisissons de commencer notre étude par cette dernière possibilité (du fait du rapport de superficie : Tounkoul représentant moins de 20% de Mazera tandis que Bidjir et Taya représentent plus de 45% de Barlo).

Notre approche distribuée consistera alors à identifier une fonction de transfert propagée entre les stations de Bidjir et Taya et celle de Barlo. Pour cette identification on retiendra des événements avec peu ou pas de pluie sur le bassin résiduaire. Pour ce dernier, on procédera de la même manière que pour les trois bassins d'extrémité : Tounkoul, Bidjir et Taya pour retenir une fonction de transfert et une fonction de production. Le modèle distribué final sera donc une composition de deux bassins propagés (Bidjir et Taya) auxquels on ajoute un bassin non propagé (bassin résiduaire). Avant cette application, nous allons faire l'inventaire des crues communes à Bidjir, Taya et Barlo.

### III - 1 - 1 - Inventaire et analyse des événements communs à Barlo, Bidjir et Taya

Sur les relevés hydrométriques dont nous disposons, on dénombre 13 crues communes à Barlo, Bidjir et Taya, regroupées dans le tableau suivant (tableau III - 1) :

Événement	Débit de pointe en m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>		
	Barlo	Taya	Bidjir
11-08-1963	46,9	1,8	2,9
23-08-1963	4,4	1,8	4,1
29-08-1964	50	36,5	29
30-08-1964	75	69	54,4
01-09-1964	56	11,8	3,3
02-09-1964	39,5	7,7	3
09-09-1964	12,3	5,1	7,2
11-09-1964	90	31,1	8,6
15-08-1966	53,6	2,5	4,7
16-08-1966	84	4,5	24
18-08-1966	9,8	3,7	15,5
31-08-1966	2,9	5,4	15,5
13-09-1966	2,8	4,6	2,5

**Tableau III - 1 : Crues communes aux bassins de Barlo, Bidjir et Taya.**

Nous pouvons remarquer que des 13 crues qui figurent sur ce tableau, seules 3 font partie de celles qui sont retenues en approche globale pour les trois bassins. Ces crues communes ne seraient donc pas d'une grande importance pour l'ensemble de ces bassins par rapport au critère de ruissellement généralisé utilisé en approche globale. Ainsi, nous allons procéder à leur analyse.

## Analyse des crues communes

### Hydrogrammes

Pour faciliter notre analyse, nous avons représenté sur un même graphique chaque crue observée simultanément aux trois bassins (la figure III - 1 nous montre quelques exemples). Suivant ces représentations graphiques, nous pouvons relever les constatations générales suivantes :

- les crues de Taya sont en retard sur celles de Barlo et sont moins importantes en débit,
- les crues de Bidjir ont leur pointe au même moment que celles de Barlo et sont aussi moins importantes en débit.

Sur toutes ces représentations graphiques, on n'observe aucun schéma net de propagation des crues des bassins de Bidjir et Taya à l'exutoire du bassin de Barlo (une propagation nette consisterait à retrouver à Barlo, les crues de Bidjir et Taya atténuées donc moins fortes et avec un décalage dans le temps de la pointe). Il nous paraît dans ce cas impossible d'appliquer la méthodologie classique de propagation des crues de Bidjir et Taya à Barlo. Notre approche distribuée, basée sur la propagation classique se trouve ainsi compromise. Nous allons essayer de mettre au point une nouvelle méthode. Pour ce faire, nous commençons par analyser le comportement des bassins de Bidjir et Taya vis à vis de Barlo en ce qui concerne les volumes écoulés et l'évolution de l'écoulement au cours de la saison pluvieuse.

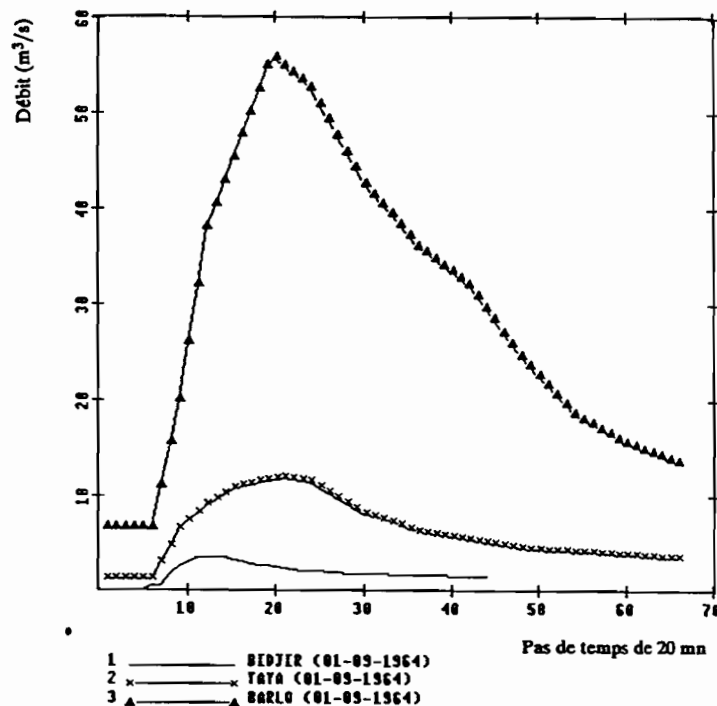


Figure III - 1 - 1 : Crues observées simultanément à Barlo, Bidjir et Taya.

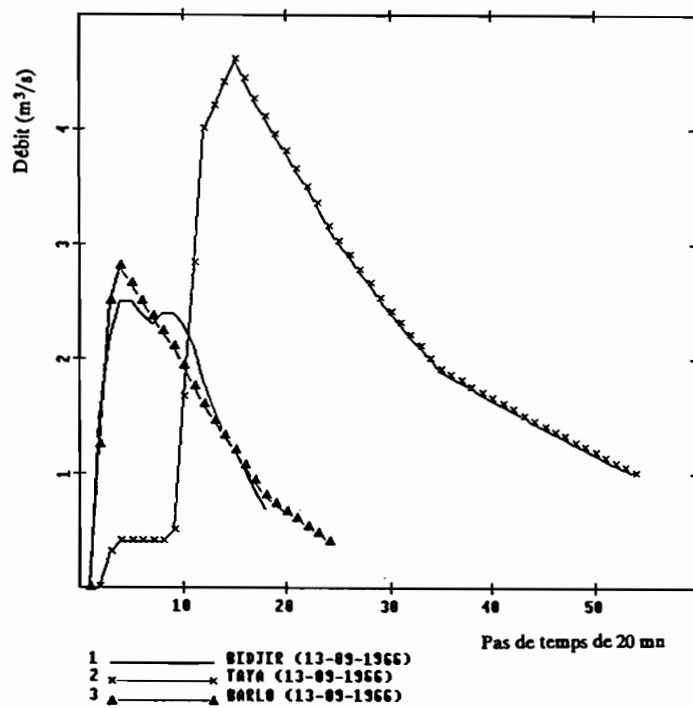
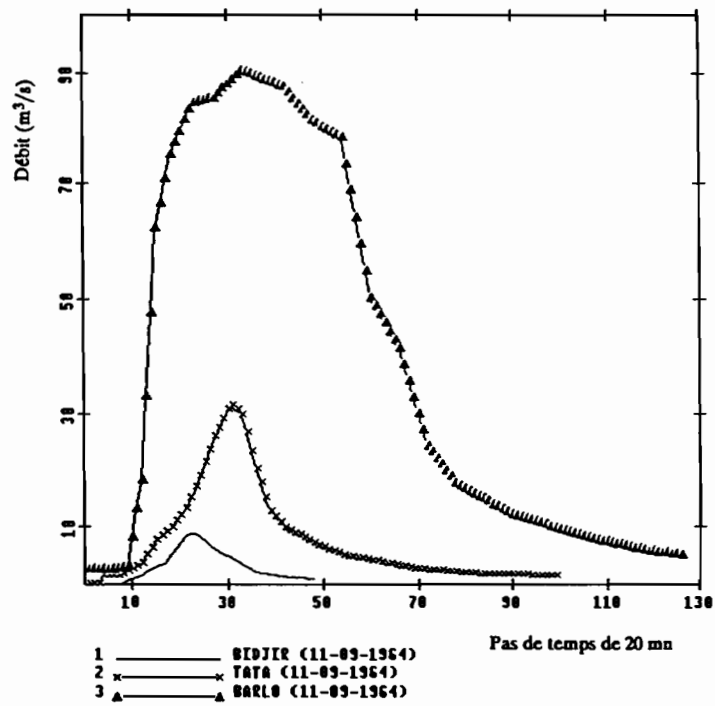


Fig-III-1-2- : Crues observées simultanément à Barlo, Bidjir et Taya.

### Volumes écoulés

Nous avons constitué un échantillon de volumes écoulés comprenant des valeurs relevant d'une crue au moins à l'un des bassins amonts (Bidjir et Taya). Nous avons ainsi un échantillon de 18 événements. Suivant la représentation graphique de la somme des volumes écoulés à Bidjir et Taya en fonction des volumes écoulés à Barlo pour les mêmes événements (figure III - 2), on ne note aucune perte de volume mais au contraire un fort grossissement. D'une valeur moyenne de 691000 m<sup>3</sup> somme des volumes à Bidjir et Taya, on arrive à Barlo avec une moyenne de 1856000 m<sup>3</sup>, soit un grossissement de 2,7. La participation du bassin résiduaire en terme de volume écoulé est donc très importante. Avec les données dont nous disposons nous ne pouvons apprécier les différentes contributions aux volumes écoulés. De ce fait, la somme des volumes écoulés des crues communes à Bidjir et Taya, ne nous apporte pas des renseignements précis sur les volumes écoulés des mêmes crues à Barlo suivant l'optique de la distribution que nous envisageons.

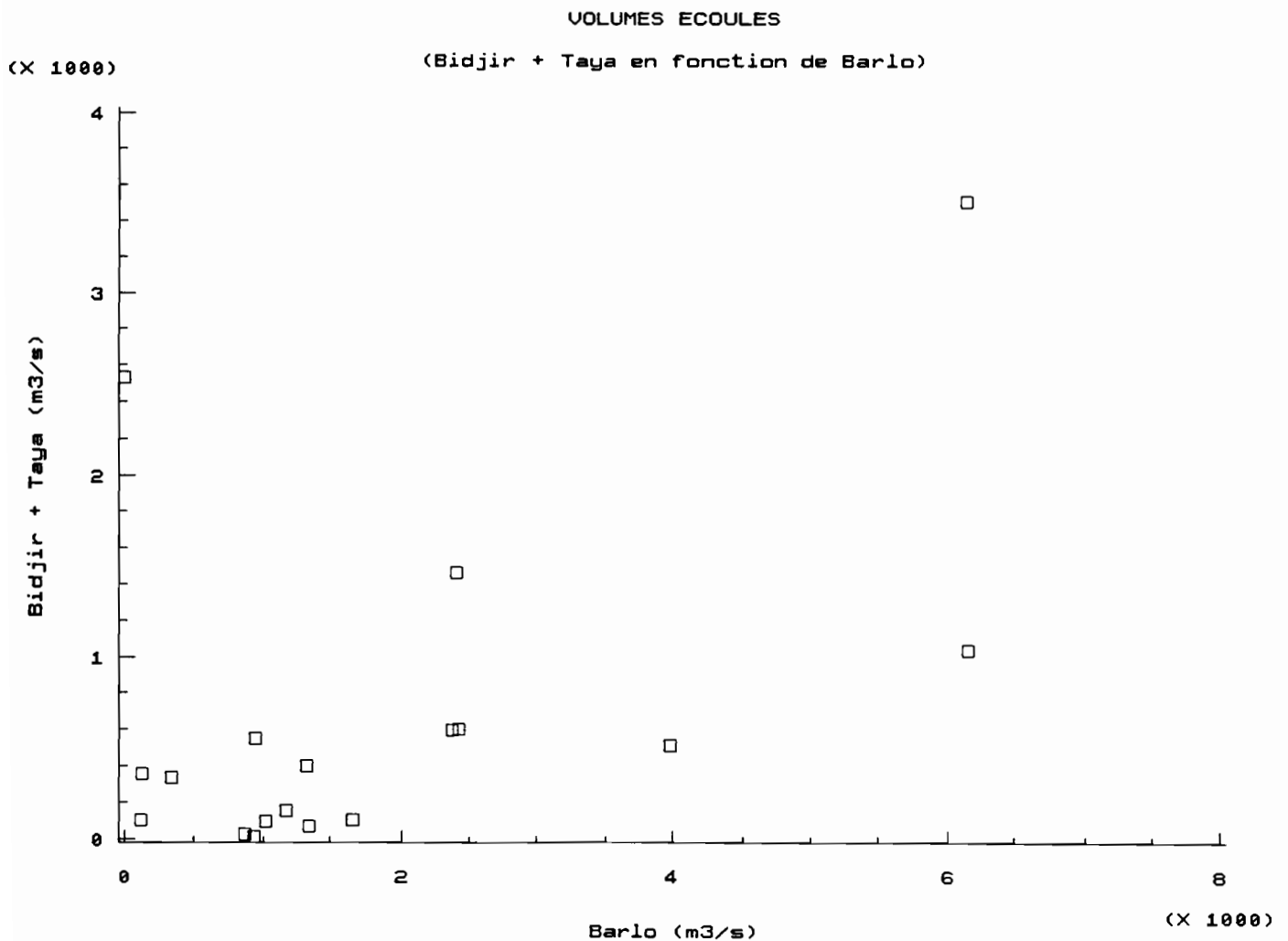


Figure III - 2 : Volumes écoulés à Barlo fonction de la somme des volumes écoulés à Bidjir et Taya.

### Evolution de l'écoulement

Nous avons mis en évidence (paragraphe II - 1) les liens étroits qui existent entre l'écoulement et les IPA et avons déterminé un seuil des IPA pour lequel l'écoulement est important pour chaque bassin. Nous rappelons que ce seuil est de 70 millimètres pour Barlo, 90 pour Bidjir et 110 pour Taya. Par l'intermédiaire des IPA, nous allons analyser l'évolution de l'écoulement au cours de la saison pluvieuse. Nous excluons de notre analyse générale l'année 1965 qui comporte des lacunes dans les relevés hydrométriques de Barlo.

La représentation graphique des IPA (avec  $k = 0,9$ ) en fonction du temps présente plus de fluctuations à Taya par rapport à Bidjir et Barlo au cours des années 1963 et 1966 (Figures III - 3 a et c). Ces fluctuations ne se remarquent pas en 1964 (Figures III - 3 b), année pluviométriquement excédentaire. Le seuil des IPA correspondant aux ruissellements importants a été franchi par tous les bassins en 1964, en 1966 par Bidjir et Barlo et n'a été atteint par aucun bassin en 1963. Toutes les deux fois, le seuil des IPA a été atteint le même jour et au même pas de temps à Bidjir et Barlo (malgré les valeurs différentes des seuils). En 1964, le seuil de Barlo a été franchi après 23 jours (sur 48) de pluie totalisant une hauteur moyenne de 272 millimètres et en 1966 après 20 jours de pluie totalisant 287 millimètres. A Bidjir, le seuil des IPA a été atteint après 21 jours (sur 48) de pluie totalisant 298 millimètres en 1964 et en 1966 après 23 jours de pluie totalisant 281 millimètres. Le nombre de jours de pluie avant que le seuil ne soit atteint est sensiblement le même pour les deux bassins, ainsi que les hauteurs moyennes. Ce qui nous permet d'énoncer les conditions suivantes concernant le fonctionnement des bassins de Bidjir et Barlo :

sur une période de 30 à 45 jours environ, l'écoulement devient important sur les deux bassins (Bidjir et Barlo) au bout d'une vingtaine de jours de pluie (avec au moins une période de cinq jours consécutifs) totalisant un minimum d'environ 270 millimètres.

Partant de cette constatation, nous avons exploré aux cours des années 1963 et 1965 des périodes répondant à ces critères. Pour Barlo, il n'a pas été possible de délimiter de tels intervalles. Pour Bidjir, il y a des possibilités en 1963 mais les IPA n'atteignent pas pour autant le seuil de 90 millimètres ; La valeur la plus proche de ce seuil est celle du premier août de 78 millimètres qui survient après onze jours pluvieux totalisant une hauteur moyenne de 136 millimètres, la valeur suivante de 77 millimètres, survient le 09 août après 16 jours pluvieux totalisant 197 millimètres. Le 31 août, les conditions : nombre de jours pluvieux et hauteur moyenne sont remplies mais la valeur de l'IPA, n'est que de 31 millimètres.

Ces dernières constatations nous permettent de compléter et préciser les conditions de fonctionnement par les considérations suivantes : il faudrait pour que l'écoulement soit important à Bidjir et Barlo que les conditions énoncées plus haut soient réunies pendant le mois d'août qui bénéficie des meilleures conditions hydrologiques de l'année (température moyenne la plus basse, moyenne pluviométrique et humidité relative les plus élevées).

Suivant nos données, nous situons la limite supérieure de la période optimum de fonctionnement autour du 20 août.

En faisant la même démarche pour Taya en 1964, la seule année où le seuil a été atteint, nous trouvons les conditions suivantes : 25 jours pluvieux totalisant une hauteur moyenne de 479 millimètres sur une période d'environ 40 jours dont la fin se situe autour du 20 août.

Les IPA croissent plus vite à Bidjir qu'à Taya et Barlo. Les valeurs maximales sont plus élevées à Bidjir ; à Taya et Barlo, elles sont du même ordre avec un léger avantage pour Barlo.

Ces valeurs maximales sont atteintes en 1963 le 32<sup>ième</sup> jour (comptés à partir du 1<sup>er</sup> juillet date du début des relevés pluviométriques et hydrométriques) à Bidjir, le 40<sup>ième</sup> à Taya et le 66<sup>ième</sup> à Barlo ; en 1964 le 58<sup>ième</sup> à Bidjir et le 61<sup>ième</sup> à Taya et Barlo ; en 1966, le maximum est atteint le 49<sup>ième</sup> jour pour les trois bassins.

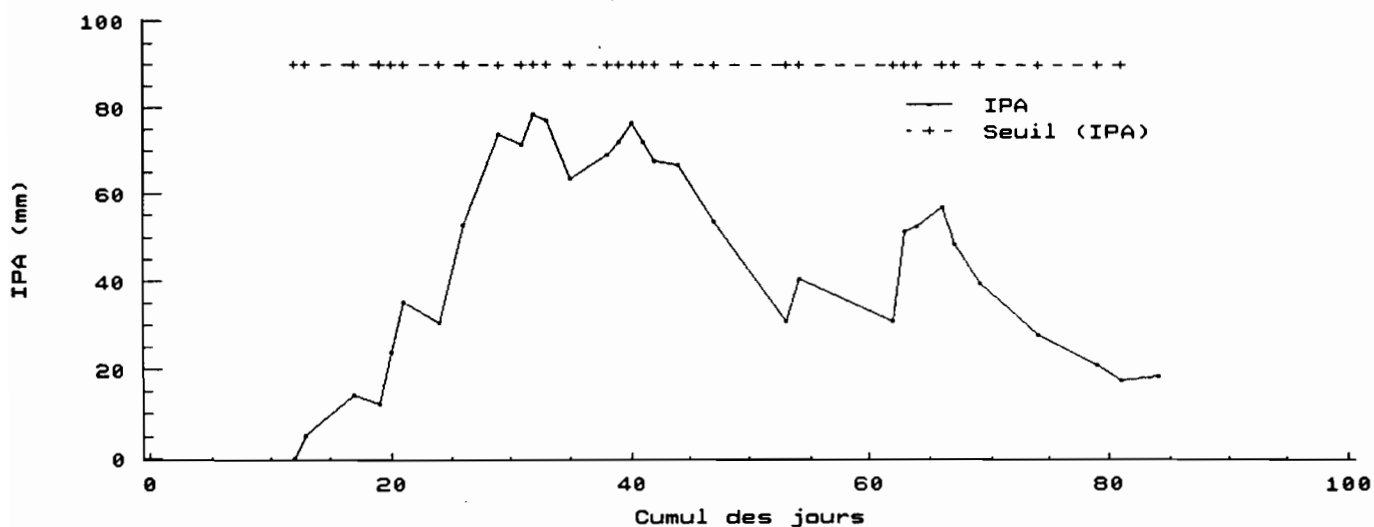
Pour relier ces constatations sur les IPA aux débits écoulés, nous avons considéré la période de l'année 1964 où le seuil des IPA a été franchi par les trois bassins (figure III - 3 b).

Le maximum des débits est atteint 9 jours après le franchissement du seuil des IPA à Bidjir ; la valeur maximale des IPA au 10<sup>er</sup> jour. A Taya le débit maximum est atteint au 6<sup>er</sup> jour du passage au dessus du seuil tandis que la valeur maximale des IPA est atteinte au 9<sup>er</sup> jour. A Barlo le débit maximum est atteint au 25<sup>er</sup> jour du passage du seuil tandis que la valeur maximale des IPA s'observe au 13<sup>er</sup> jour après le passage du seuil. Pour Bidjir et Taya, la valeur maximale des IPA est observée peu après le passage du débit maximum tandis qu'à Barlo le débit maximum est observé longtemps après la valeur maximale des IPA. Le débit maximum est d'abord observé à Bidjir, un jour après, il est observé à Taya enfin à Barlo, il faut attendre 16 jours après Bidjir pour voir passer le débit maximum. Si nous nous situons au début de la période des relevés des pluies qui correspond au 1<sup>er</sup> juillet, le débit maximum est observé au 57<sup>er</sup> jour à Bidjir, 58<sup>er</sup> à Taya et 73<sup>er</sup> à Barlo. A Taya et Bidjir les débits les plus élevés correspondent aux pluies journalières moyennes les plus élevées mais il n'en est pas ainsi à Barlo (la pluie moyenne journalière la plus élevée n'engendre pas le débit maximum).

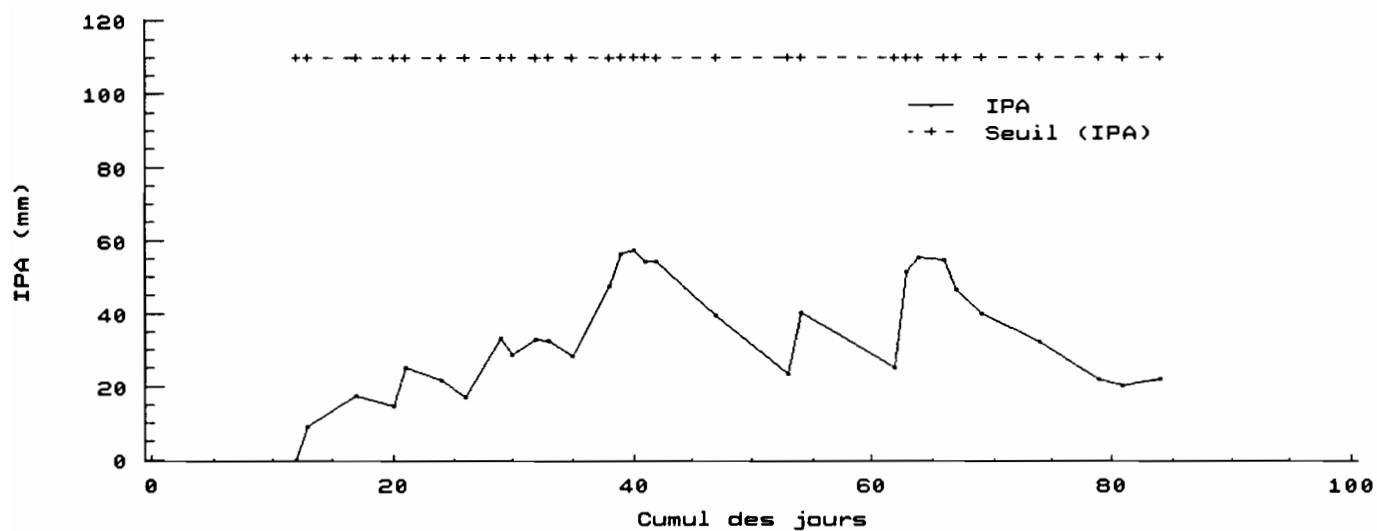
D'après cette analyse, le bassin de Barlo nécessite une certaine quantité de pluie avant que l'écoulement total du bassin ne s'établisse, quantité qui ne peut être atteinte qu'en fin de saison des pluies (suivant l'année 1964). Ainsi, le fonctionnement du bassin de Barlo est totalement différent de ceux de Taya et Bidjir. Ces derniers semblent atteindre leur période d'imbibition

assez tôt, d'où la relation entre débit et hauteur moyenne journalière de pluie qui paraît plus forte que la quantité antérieure de pluie reçue. Lorsque le bassin de Barlo atteint son point optimum de fonctionnement, la saison des pluies tire à sa fin et les pluies journalières ne sont plus assez élevées pour provoquer un écoulement important à Bidjir et Taya. Cela expliquerait pourquoi les crues de Taya et Bidjir ne sont pas apparentes à Barlo et confirme l'impossibilité d'appliquer la méthode de propagation classique que nous avons préconisée. C'est pourquoi nous allons procéder d'une autre manière pour aborder l'approche distribuée.

Bidjir : Evolution des IPA en 1963  
A partir du 01 juillet



Taya : Evolution des IPA en 1963  
A partir du 01 juillet



Barlo : Evolution des IPA en 1963  
A partir du 01 juillet

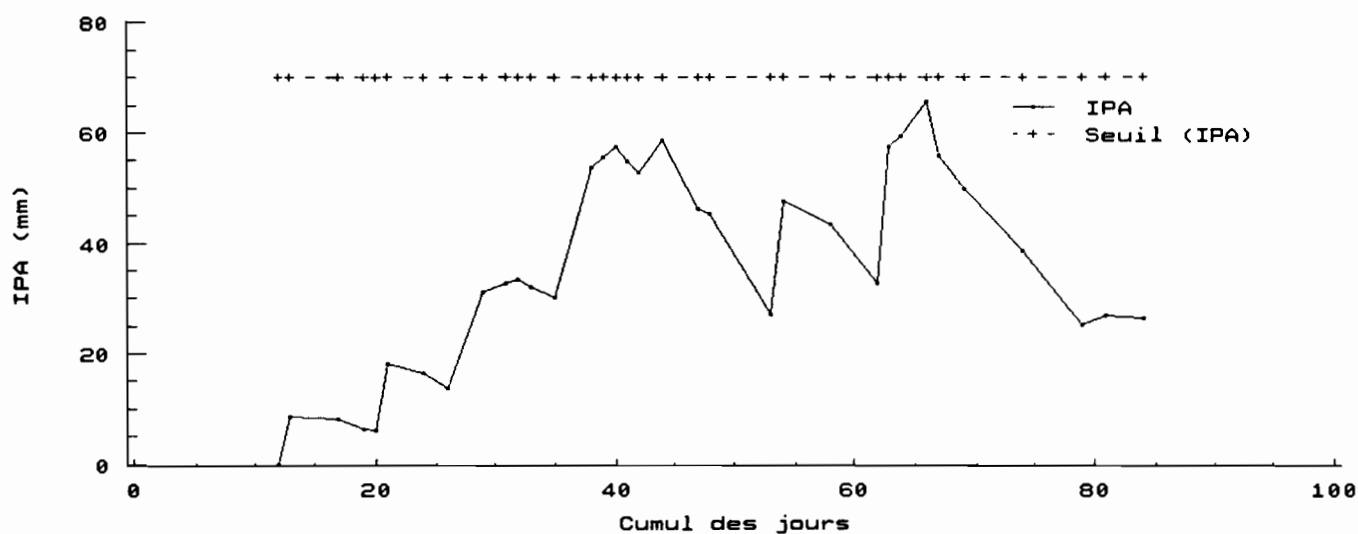
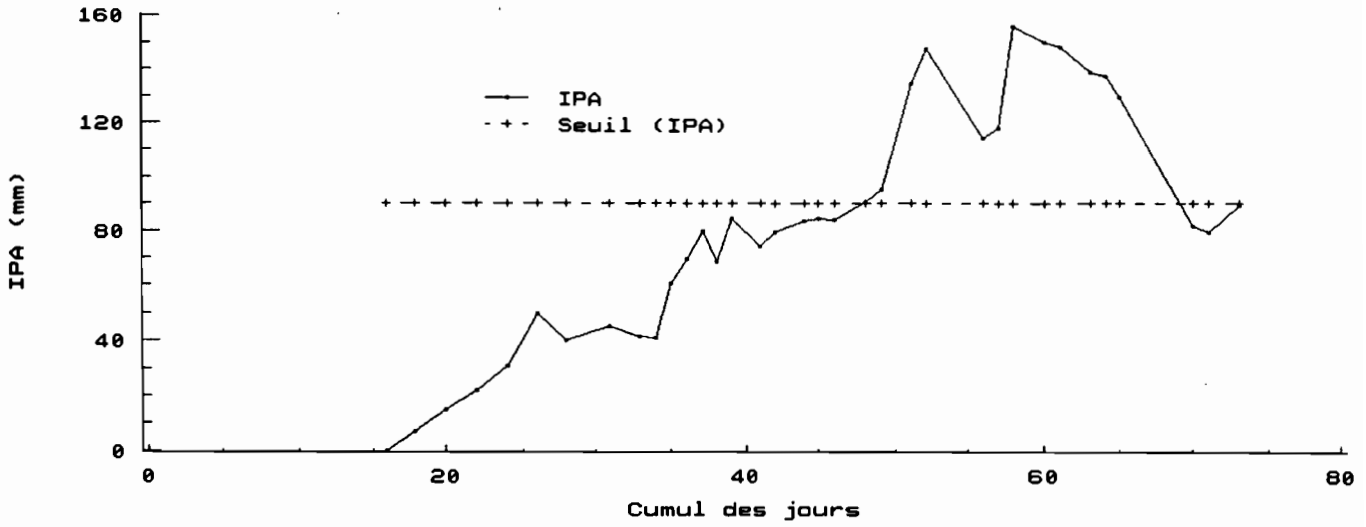
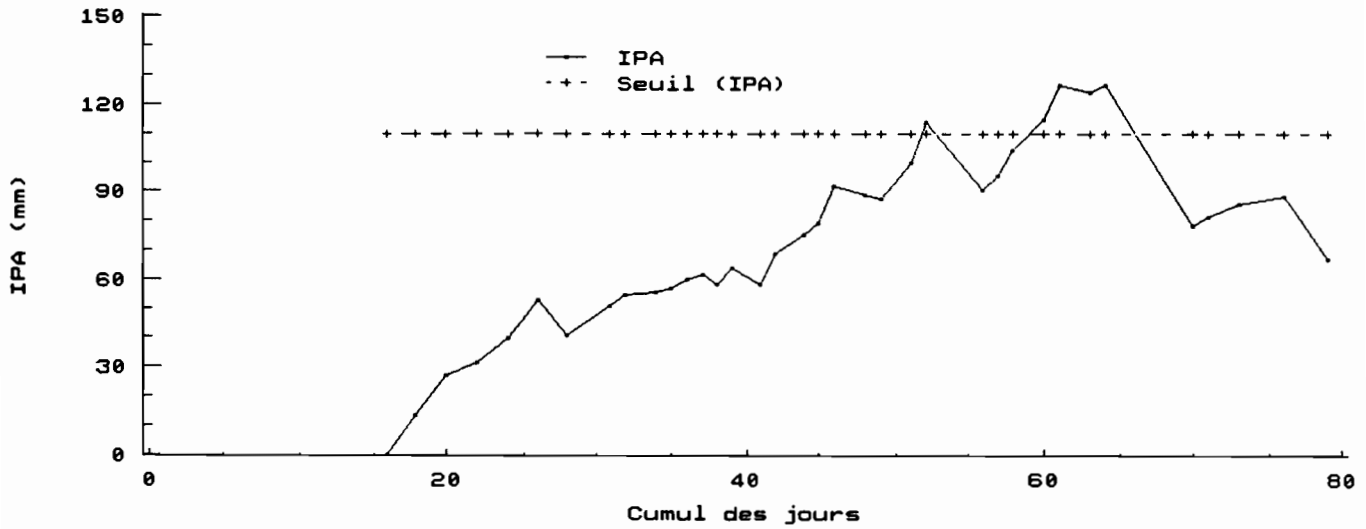


Figure III - 3 a : Evolution des IPA au cours de l'année 1963.

Bidjir : Evolution des IPA en 1964  
A partir du 01 juillet



Taya : Evolution des IPA en 1964  
A partir du 01 juillet



Barlo : Evolution des IPA en 1964  
A partir du 01 juillet

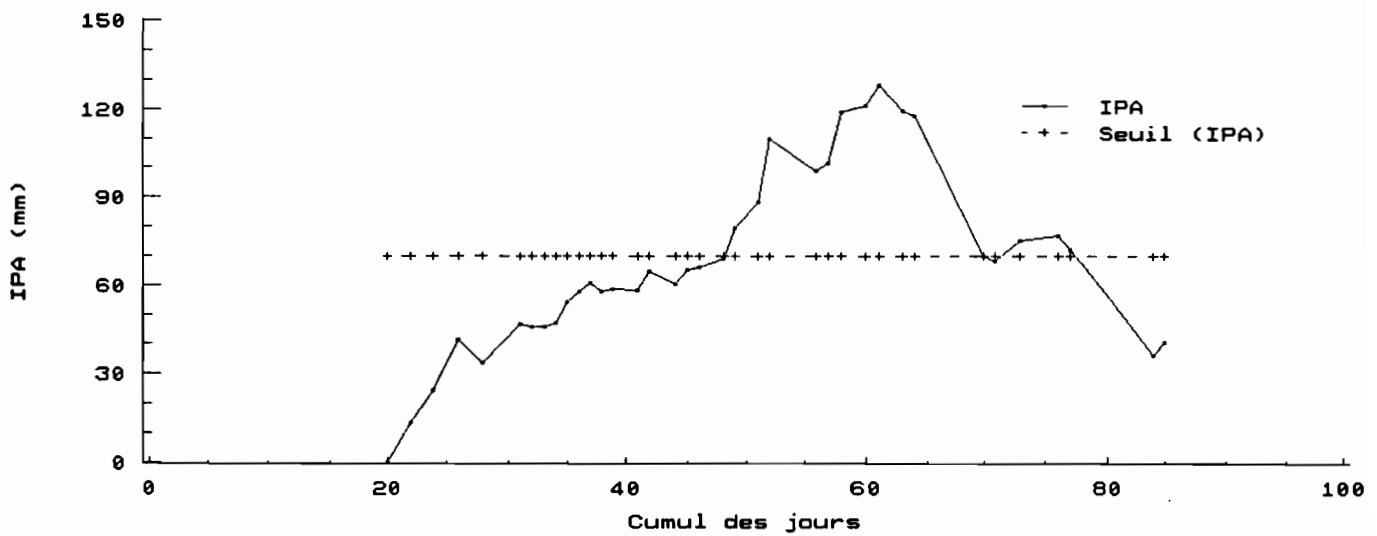
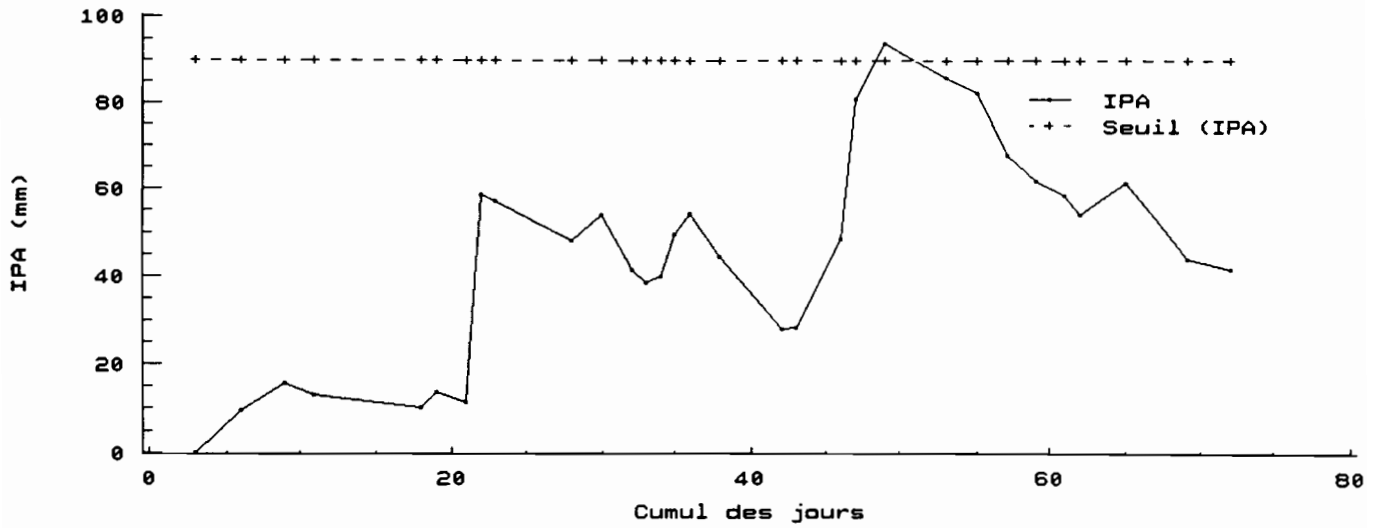
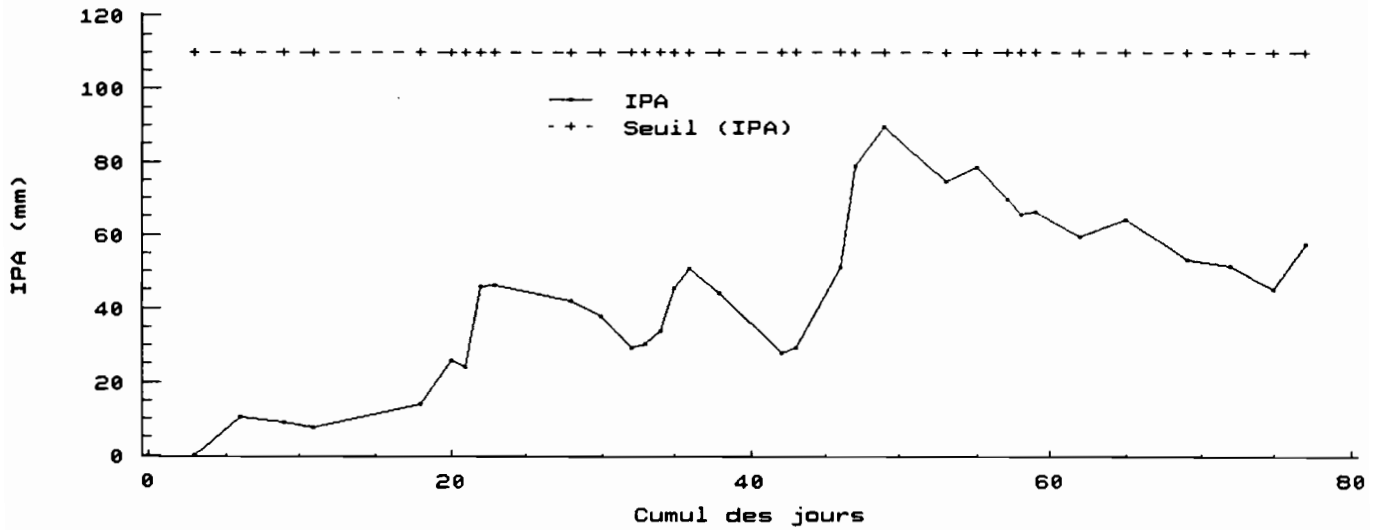


Figure III - 3 b : Evolution des IPA au cours de l'année 1964.

Bidjir : Evolution des IPA en 1966  
A partir du 01 juillet



Taya : Evolution des IPA en 1966  
A partir du 01 juillet



Barlo : Evolution des IPA en 1966  
A partir du 01 juillet

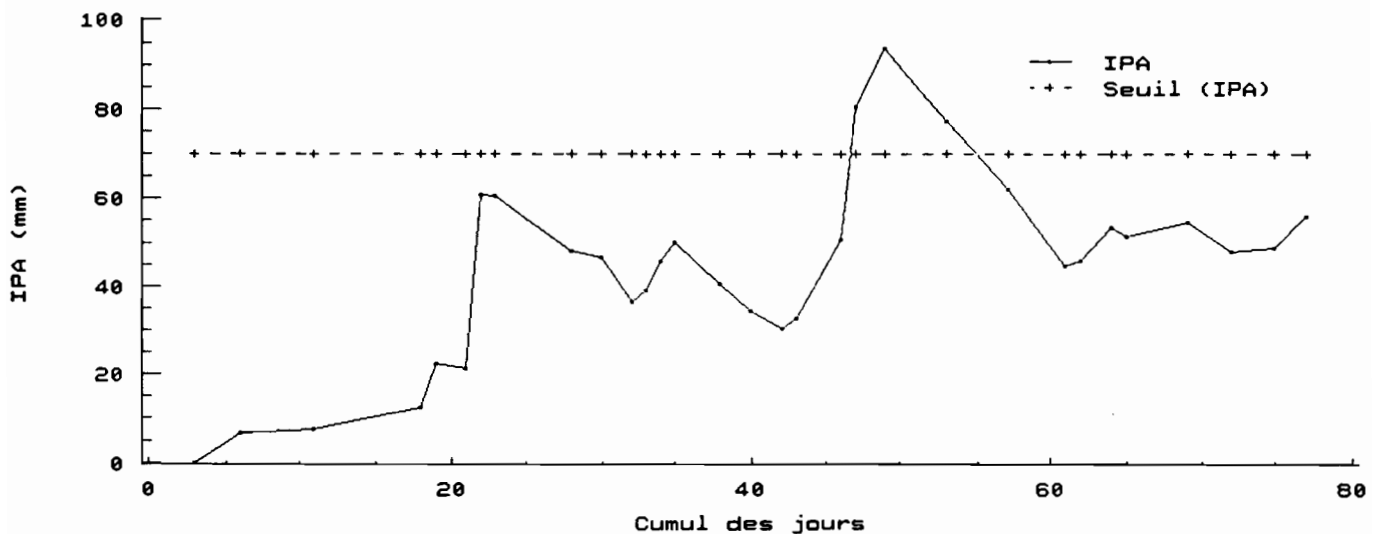


Figure III - 3 c : Evolution des IPA au cours de l'année 1966.

## Nouvelle méthodologie

Après avoir constaté l'impossibilité d'appliquer la méthode de propagation classique préconisée pour l'approche distribuée, nous envisageons la démarche suivante :

Modéliser le bassin résiduaire ou bassin intermédiaire de Barlo. Nous appelons bassin intermédiaire, le bassin total de Barlo duquel nous avons soustrait la partie amont constitué des bassins de Bidjir et Taya. Pour l'étude de ce bassin, nous retiendrons des crues qui sont observées à Barlo et qui n'ont aucune trace en débit à Bidjir et Taya. Ces crues du bassin intermédiaire seront soustraites de l'échantillon total de Barlo. Nous aurons alors deux possibilités :

La première consistera à faire la différence entre la fonction de transfert du bassin de Barlo effectif et la fonction de transfert du bassin intermédiaire. La différence représentera la contribution de la partie amont transférée à l'exutoire de Barlo. Le modèle distribué sera la résultante du modèle de la partie amont et du bassin intermédiaire.

La deuxième possibilité consistera à déduire des crues engendrées par l'ensemble du bassin de Barlo la contribution du bassin intermédiaire estimée à l'aide du modèle. La différence représentera la contribution de la partie amont propagée à Barlo. On identifiera ensuite sur cette différence une fonction de production et une fonction de transfert qui constitueront le modèle amont. La résultante de ce dernier modèle et du modèle intermédiaire constituera le modèle distribué.

### Etude du bassin intermédiaire

Nous rappelons que le nombre des crues retenues pour l'étude du bassin de Barlo est de 19. Sur cet ensemble de crues, nous en avons attribué 9 au bassin intermédiaire sur le critère suivant :

"toute crue observée à Barlo et qui n'a aucune trace en débit à Bidjir et Taya provient du bassin intermédiaire".

Les crues vérifiant ce critère sont regroupées dans le tableau III - 2.

N°	Crue	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
1	04-08-1963	19,8
2	22-08-1963	32,2
3	02-09-1963	12,7
4	22-09-1964	12,7
5	22-09-1964	12,7
6	23-09-1964	27,3
7	27-07-1965	17,6
8	13-08-1966	24,3
9	10-09-1966	26,2

**Tableau III - 2 : crues du bassin intermédiaire de Barlo.**

La première constatation que nous pouvons faire de cet échantillon est qu'il est constitué des crues faibles. Ce qui semble logique compte tenu de la taille du bassin intermédiaire devant le bassin total de Barlo.

La première étape de notre étude comme en approche globale sera l'identification d'une fonction de production.

## Production

Nous employons en production, la méthode de la Soil Conservation Service ou SCS (U.S.D.A. 1972) décrite au paragraphe II - 1 - 1.

Les valeurs du paramètre S calculé crue par crue sont regroupées dans le tableau III - 3.

N° d'ordre	Evénement	Coefficient S (mm)
1	04-08-1963	532
2	22-08-1963	259
3	02-09-1963	101
4	05-09-1963	17
5	22-09-1964	49
6	23-09-1964	27
7	27-07-1965	345
8	13-08-1966	422
9	10-09-1966	89

**Tableau III - 3 : Crues et coefficients S correspondants du bassin intermédiaire de Barlo.**

Nous avons ensuite ajusté une fonction exponentielle entre S et les IPA (Indices de précipitations antérieures) correspondants. Les IPA ont été calculé au paragraphe II - 1 - 2 dans le cadre de l'approche globale du bassin de Barlo. Comme dans cette approche, ce sont les valeurs des IPA pour  $K = 0,9$  qui donnent les meilleurs résultats. La figure III - 4 montre la représentation graphique de S en fonction des IPA. L'expression de la relation obtenue avec un coefficient de corrélation de 66 % est la suivante :

$$S = \text{Exp}(7,58 - 0,071\text{IPA})$$

Nous pouvons remarquer que la corrélation est meilleure en approche globale pour le grand bassin (80 %), ce qui semble contraire à la logique qui s'en est dégagée. Nous pouvons penser que les valeurs de S du grand bassin que nous avons utilisé pour déterminer la relation avec les IPA dans le cas du bassin intermédiaire, ne sont pas adaptées.

Bassin intermediaire : Relation S (SCS)  
et IPA ( $k = 0,9$ )

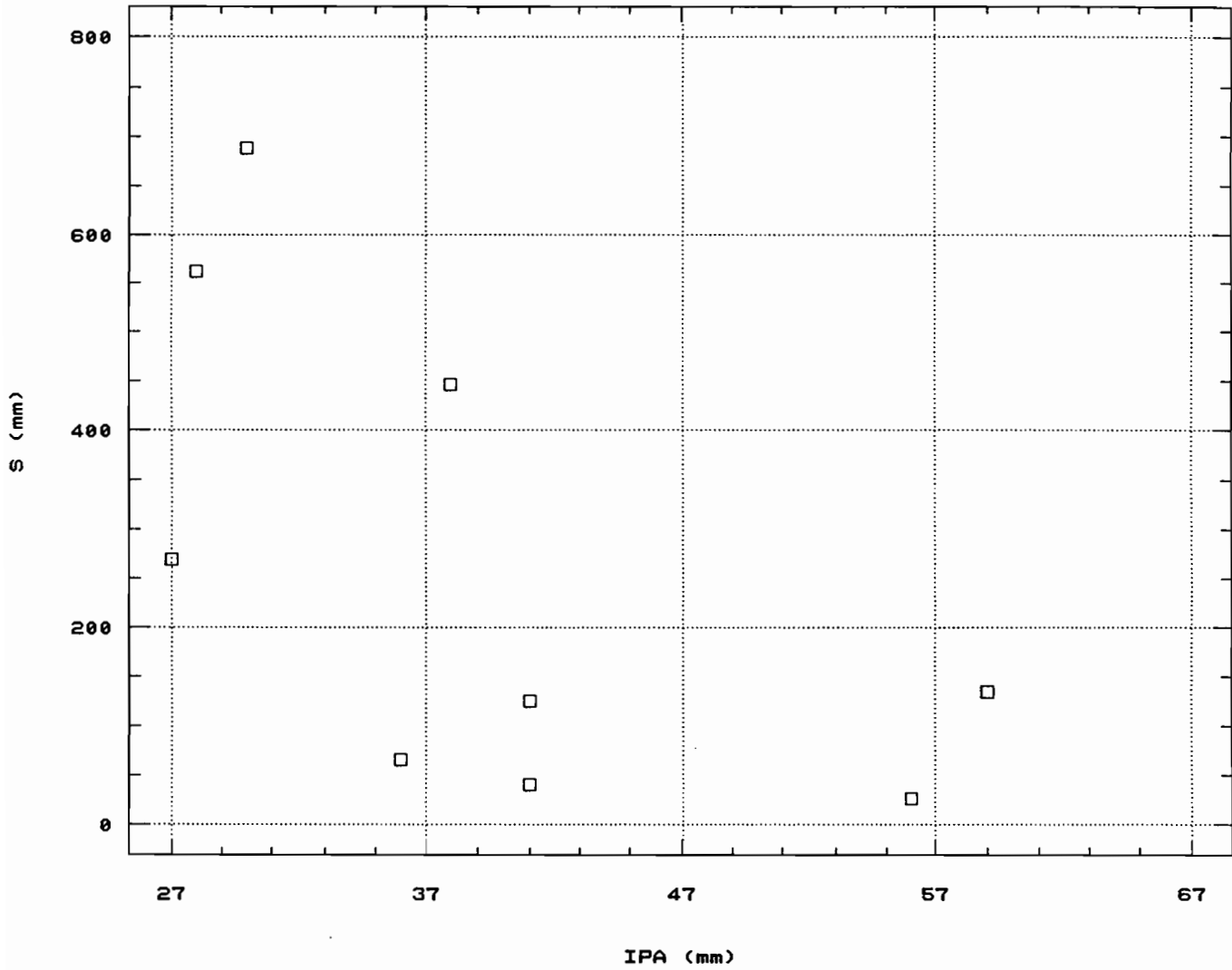


Figure III - 4 : Bassin intermédiaire de Barlo (relation entre S (SCS) et IPA ( $k = 0,9$ )).

### Transfert.

Comme en approche globale, c'est la DPFT (paragraphe II - 2) que nous employons pour déterminer le transfert du bassin intermédiaire. Les entrées sont constituées par les données du pluviographe aval (27 : figure I - 8) corrigées par la pluie moyenne du bassin.

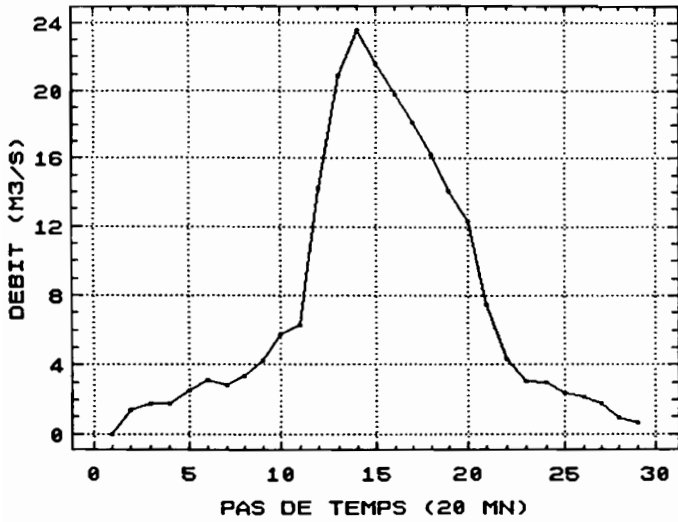
Pour nous rendre compte de la stabilité du transfert, nous avons utilisé pour notre calcul plusieurs jeux d'échantillons de crues comme indiqué dans le tableau III - 4.

N° Crue	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Inter1		+		+		+		+	
Inter2	+		+		+		+		+
Inter3		+				+		+	+
Inter4	+		+	+	+		+		
Inter5	+	+		+		+		+	
Inter6			+	+	+		+	+	
Inter7	+	+		+		+		+	+
Inter8	+	+				+	+	+	+
Inter9	+	+				+	+	+	+
Inter10			+	+	+		+	+	+

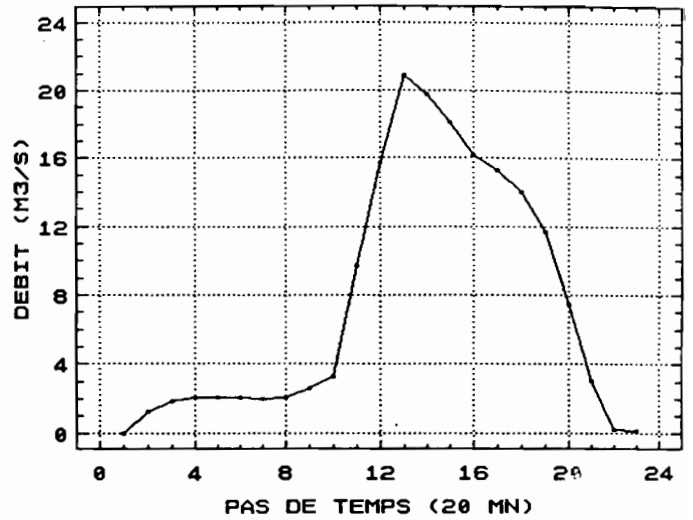
**Tableau III - 4 : Composition des échantillons du bassin intermédiaire de Barlo.**

(Sur ce tableau, le signe + marque les crues constituant un même échantillon noté Inter1, ...).  
 Nous avons constitué ces échantillons en divisant notre échantillon de départ en deux parties : Inter1 et Inter2. Ensuite en échangeant une crue de Inter1 par une de Inter2 on obtient Inter3. En faisant de même pour Inter2 on obtient Inter4 et ainsi de suite. Les figures III - 5 a et b présentent la FT de l'échantillon global du bassin intermédiaire et l'évolution des FT des échantillons "Inter impairs" (Inter suivi d'un nombre impair) figure III - 5 a d'une part et celle des échantillons "Inter pairs" figure III - 5 b d'autre part.

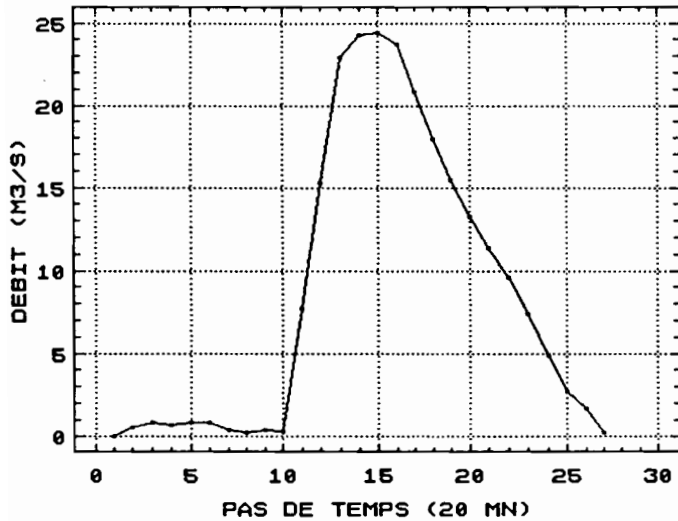
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER)



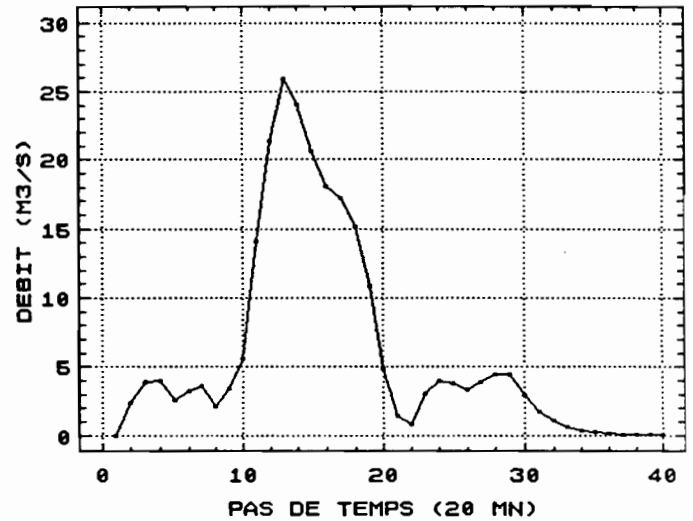
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER6)



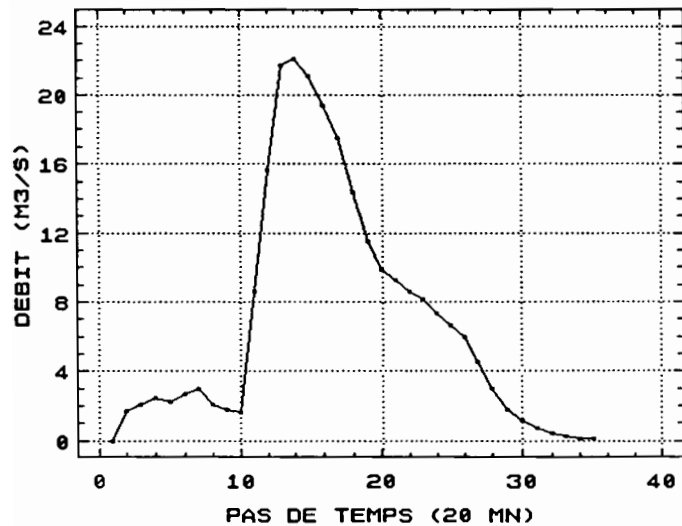
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER2)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER8)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER4)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER10)

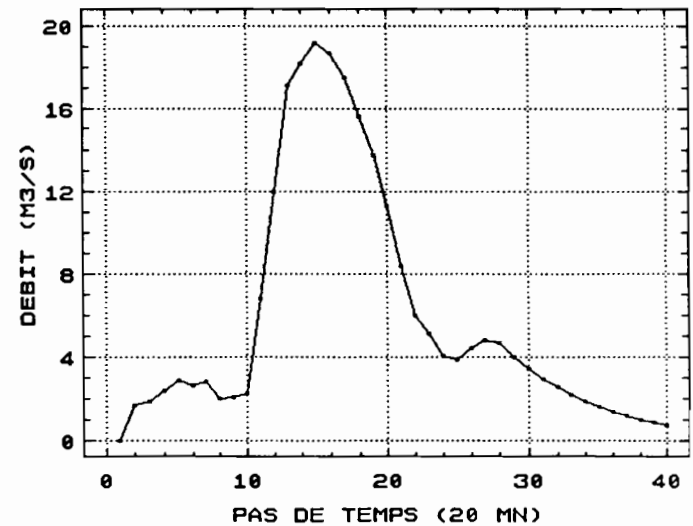
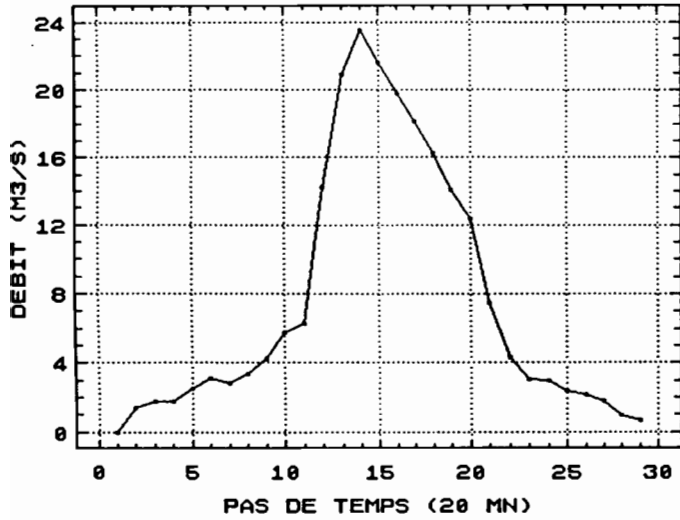
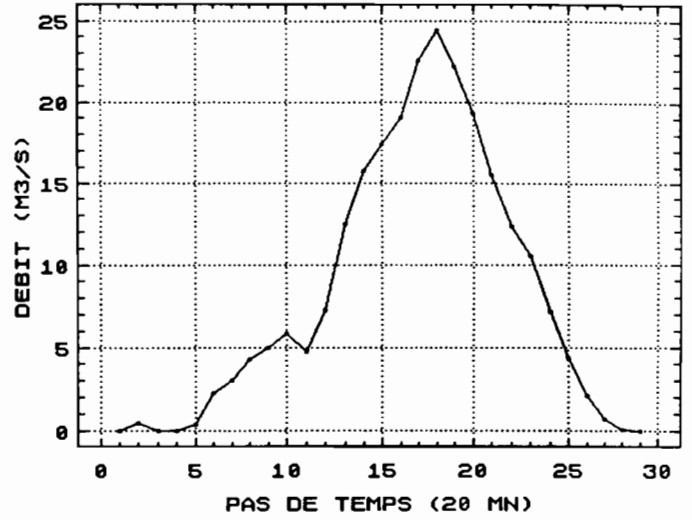


Figure III - 5 b : Fonctions de transfert du bassin intermédiaire et des "Inters pairs" de Barlo.

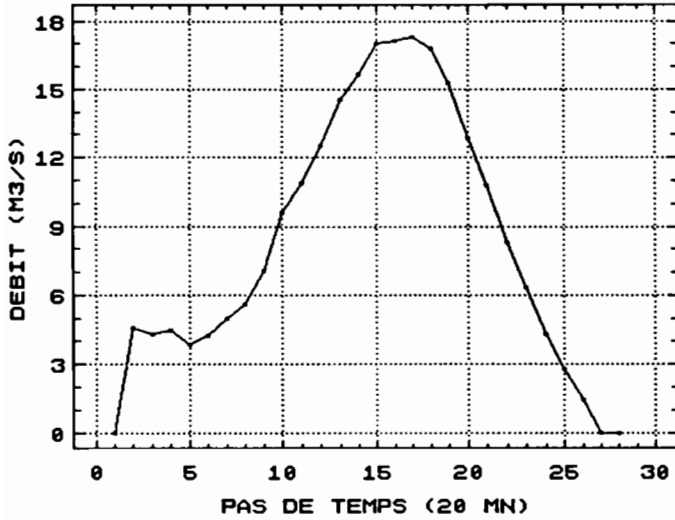
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER)



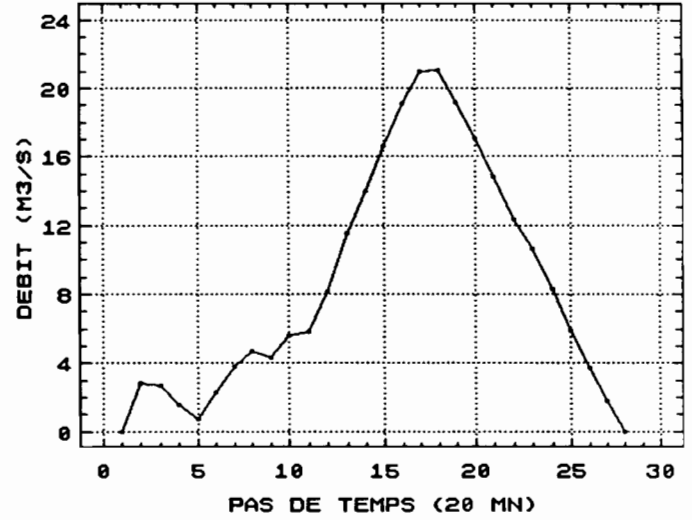
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER5)



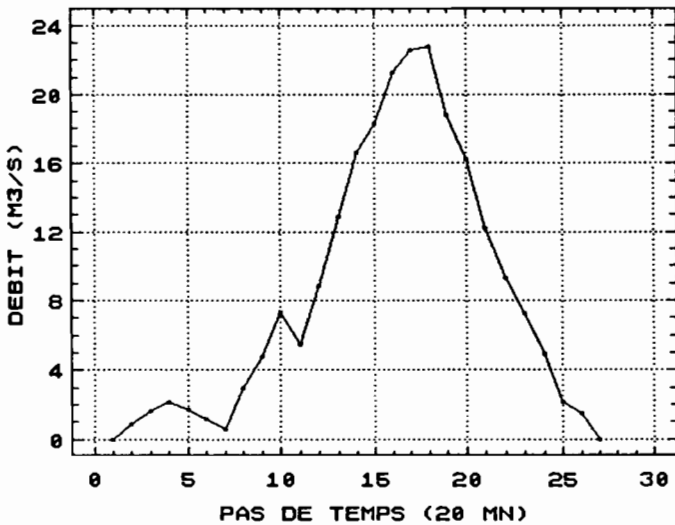
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER1)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER7)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER3)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN INTERMEDIAIRE (INTER9)

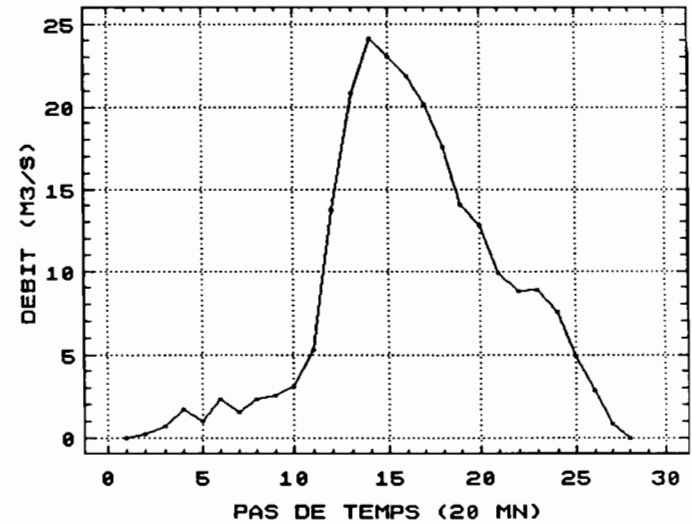


Figure III - 5 a : Fonction de transfert du bassin intermédiaire et des "Inters impairs" de Barlo.

Les résultats obtenus révèlent une stabilité du bassin pour des échantillons composés d'au moins 5 crues. Nous adoptons pour notre calcul la FT obtenue avec l'échantillon total du bassin intermédiaire (Figure III - 5) dont les valeurs des caractéristiques sont les suivantes : débit de pointe :  $23,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ; temps de montée : 280 minutes et temps de base : 560 minutes.

#### Analyse de la forme de la FT de l'échantillon intermédiaire

La FT de l'échantillon intermédiaire monte très lentement au début (Figure III - 5c) ; pendant les 220 premières minutes, on note une montée de  $6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Ensuite, une très forte accélération : en l'espace de 60 minutes la pointe est atteinte, soit une montée de  $17,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . La première partie serait le transfert de la partie sud peu importante et du débit de base. La dernière partie qui constitue l'essentiel du transfert ; serait le drainage de la partie nord-ouest ouest où se trouve le point le plus éloigné de l'exutoire (voir figure I - 8). Nous pouvons remarquer qu'à environ un kilomètre de l'exutoire les deux bras se rejoignent, nous pensons que ce serait cette proximité qui expliquerait les deux parties bien distinctes de la FT en montée ainsi qu'en décrue.

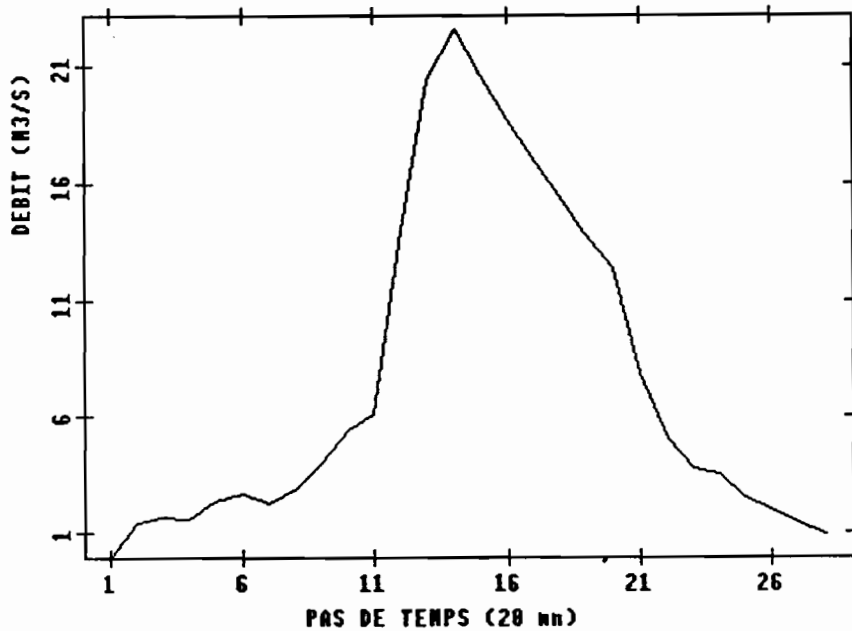


Figure III - 5 c : Fonction de transfert du bassin intermédiaire de Barlo.

### Etude du bassin de Barlo effectif

Nous rappelons que nous avons appelé bassin effectif de Barlo, le résultat de la déduction des crues du bassin intermédiaire de celles de l'échantillon total du bassin de Barlo. Le reste est donc constitué des crues qui proviennent de la participation de l'ensemble du bassin de Barlo (Bidjir, Taya et bassin intermédiaire) à l'écoulement. Le tableau III - 5 regroupe ces crues.

N°	Crue	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
1	11-08-1963	46,9
2	31-08-1963	11,4
3	29-08-1964	50
4	30-08-1964	75
5	01-09-1964	56
6	02-09-1964	39,5
7	09-09-1964	12,3
8	11-09-1964	90
9	23-07-1966	27,7
10	16-08-1966	84

**Tableau III - 5 : Crues du bassin effectif (ou reste) de Barlo.**

Nous pouvons remarquer d'après ce tableau que l'échantillon est constitué des plus fortes crues du bassin. Les deux plus faibles crues sont bien engendrées par l'ensemble du bassin mais par des faibles averses bien réparties (analyse spatiale suivant la fonction spline) ; de telles averses sont rares dans la zone d'étude.

Nous suivons pour notre étude, la même procédure qu'en approche globale ; nous déterminons d'abord la production et le transfert ensuite.

## Production

Comme pour tous nos bassins, c'est la méthode SCS que nous employons pour identifier la fonction de production (FP). Le coefficient S est calculé crue par crue ; ses valeurs ainsi que celles des IPA correspondants avec ( $K = 0,9$ ) sont consignées dans le tableau III - 6 :

N° d'ordre	Evénement	Coefficient (mm)	IPA (mm)
1	11-08-1963	165	53
2	31-08-1963	1350	33
3	29-08-1964	78	121
4	30-08-1964	26	128
5	01-09-1964	31	120
6	02-09-1964	42	118
7	09-09-1964	395	68
8	11-09-1964	86	75
9	23-07-1966	297	61
10	16-08-1966	146	81

**Tableau III - 6 : Crues du bassin effectif et coefficients S et IPA correspondants.**

L'ajustement d'une exponentielle entre S et les IPA, donne la relation suivante :

$$S = \text{Exp}(7,68 - 0,033\text{IPA})$$

Avec un coefficient de corrélation de 91 %. C'est le plus fort des coefficients obtenus avec tous les échantillons de Barlo même en approche globale. Nous reviendrons dessus dans le d'une discussion sur le fonctionnement du bassin de Barlo par la suite.

La figure III - 6 représente S en fonction des IPA dans le cas du bassin effectif de Barlo.

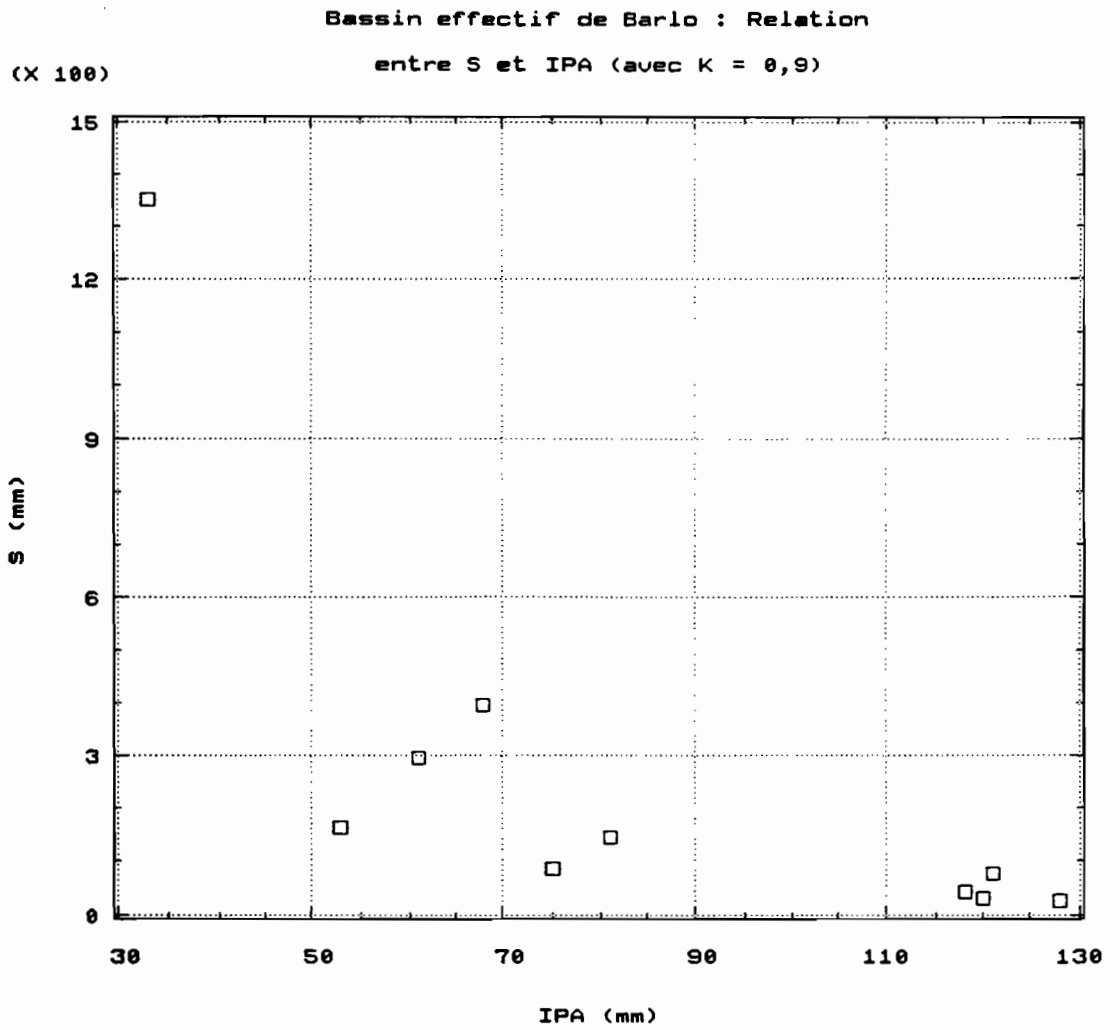


Figure III - 6 : Bassin effectif de Barlo (relation entre S et IPA).

## Transfert

C'est la méthode de la DPFT que nous avons employé pour déterminer le transfert du bassin effectif (reste) de Barlo. L'entrée est constituée de la moyenne des trois pluviographes du bassin (4, 23 et 27) corrigée par la pluie moyenne.

Comme pour le bassin intermédiaire, nous avons testé la stabilité du transfert sur plusieurs jeux d'échantillons constitués de cinq à dix crues. On note une certaine stabilité du transfert sur des échantillons contenant entre six et huit crues ; au dessus de huit crues, la fonction de transfert ne varie pas notablement.

Les valeurs des caractéristiques de la FT du bassin effectif de Barlo (figure III - 7) sont les suivantes : débit de pointe  $19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , temps de montée 200 minutes, temps de base 560 minutes.

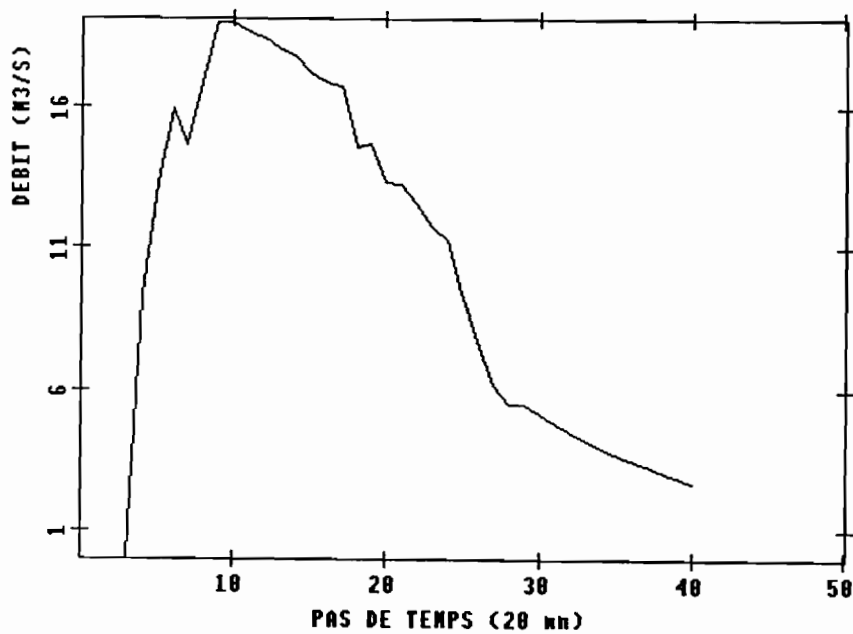


Figure III - 7 : Bassin effectif de Barlo (Fonction de transfert).

La FT monte très rapidement et présente un pic avant le sommet aplati de l'hydrogramme. La décrue est par contre assez lente et présente quelques accidents.

### **Application de la nouvelle méthodologie**

Nous rappelons que nous avons deux possibilités dans cette approche mais aucune d'elles ne donne les résultats escomptés.

La première possibilité qui consiste à faire la différence entre la fonction de transfert du bassin effectif et celle du bassin intermédiaire, nous donne une fonction de transfert en deux parties bien distinctes (figure III - 8). La reconstitution des crues avec cette fonction de transfert donne des résultats qui ne peuvent pas être exploités dans l'optique d'une simulation de crues.

La deuxième possibilité qui consiste à déduire des crues du bassin effectif de Barlo la contribution du bassin intermédiaire estimée par le modèle (modèle du bassin intermédiaire); identifier ensuite une fonction de production et une fonction de transfert sur la différence, donne des résultats aussi décevants que la première.

Ces deux applications nous permettent de penser qu'il faudrait partir des événements de crues réellement observés sur un bassin versant pour identifier une fonction de transfert qui rendrait compte d'un comportement correct de ce dernier. Nous pensons que les mécanismes de fonctionnement d'un bassin versant sont si complexes qu'une simple opération mathématique directement sur les fonctions de transfert identifiées sous certaines conditions bien définies pourrait donner des résultats aberrants.

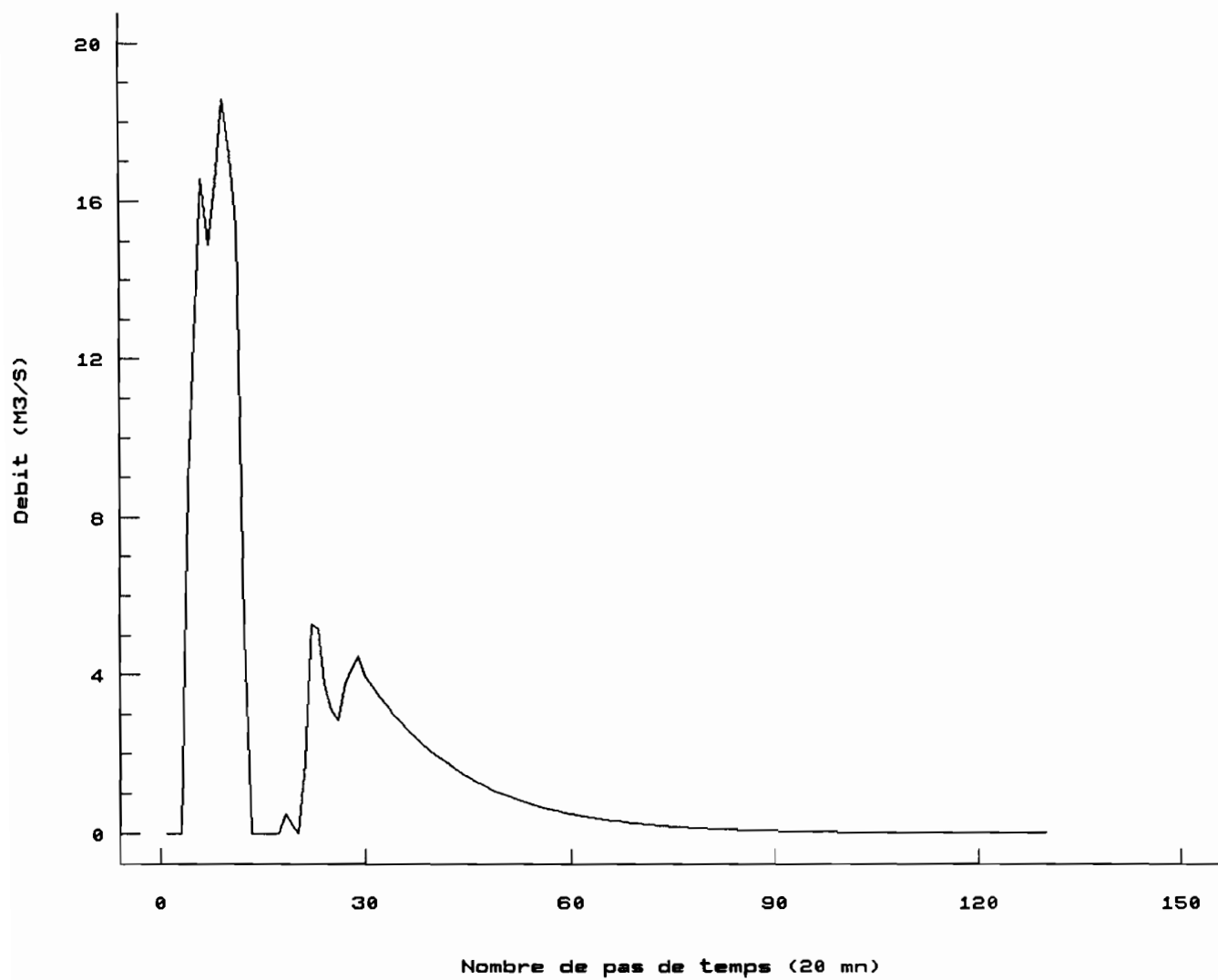
En conclusion, cette tentative d'approche distribuée même si elle n'est pas concluante dans l'optique envisagée, nous permet de mieux cerner le comportement du bassin de Barlo.

En production, le coefficient de corrélation entre le coefficient S et les IPA est de 66 % pour le bassin intermédiaire, 91 % pour le bassin effectif et 80 % pour Barlo en approche globale.

- La faible valeur du coefficient de corrélation dans le cas du bassin intermédiaire serait due aux IPA utilisés dans la relation, et qui ont été calculés pour l'ensemble du bassin de Barlo ainsi que les pluies moyennes utilisées pour le calcul du coefficient S.

- En brassant toutes les crues transitant par l'exutoire quelles que soient leur provenance et leur importance, on ne rend compte que du comportement moyen du bassin de Barlo (qui peut être différent du comportement réel) d'où la valeur de 80 % du coefficient de corrélation.

- Le modèle du bassin effectif est celui qui rend le mieux compte du comportement du bassin de Barlo. Les crues qui sont utilisées dans ce modèle sont les plus fortes du bassin. Ce comportement ne s'observe pas pour les petits bassins même avec les plus fortes crues. Les coefficients de corrélation sont du même ordre pour les différents échantillons. Ce qui nous fait dire qu'à partir d'une certaine taille de bassin versant, seules certaines catégories de crues représentent le fonctionnement réel du bassin, et, en considérant la moyenne de toutes les crues confondues on peut totalement masquer le comportement de ce dernier.



**Figure III - 8 : Fonction de transfert de la première possibilité de distribution.**



**Conclusion générale.**



Au terme de ce mémoire, nous rappelons que la démarche suivie dans cette approche peut être résumée comme suit : prise en compte de l'information spatiale (nombreuses stations de mesure de la pluie et des débits, cartographie des sols, relief) dans la relation "Averses - Crues" sur des bassins imbriqués en zone sahélienne. Nous avons voulu par cette démarche bien identifiée apporter quelques éléments de réflexion sur les réponses aux questions relatives aux phénomènes hydrologiques dans cette région.

Le contexte physique de nos bassins de superficie variant de 62 km<sup>2</sup> à 528 km<sup>2</sup> nous a permis de souligner des éléments qui peuvent expliquer le comportement des bassins sahéliens à ces différentes échelles de surface. L'aptitude à l'écoulement de nos bassins soumis aux mêmes facteurs climatiques dépend exclusivement des facteurs pédologiques (sols peu évolués ou dégradés avec prédominance de sols à texture sableuse, faibles teneurs en matière organique), pauvreté de la couverture du sol et des pentes modérées qui conduisent à une forte vulnérabilité à l'encroûtement des horizons superficiels.

Nous avons montré par l'analyse des épisodes pluvieux les plus importants qu'ils appartiennent par leur forme, leur structure et leur déplacement dans l'espace au système pluvieux général des lignes de grains au Sahel.

Nous avons employé pour notre étude, la méthode de production du Soil Conservation Service (SCS) pour l'identification de la fonction de production et pour la fonction de transfert, la méthode de la Différence Première de la Fonction de Transfert (DPFT). Nous avons été guidés dans notre choix par des études antérieures faites sur le Sahel qui présentent ces méthodes comme étant les mieux adaptées à cette région. Nous rappelons que la fonction de transfert utilisée est basée sur la technique de l'hydrogramme unitaire. Elle est robuste et facilement utilisable (nombre très limité de paramètres à identifier).

Pour le pas de temps de calcul de vingt minutes que nous avons utilisé, il y a une forte variabilité spatiale des intensités des pluies fortes. Cette variabilité des intensités ponctuelles des pluies a peu d'influence sur l'écoulement à l'exutoire des deux plus petits bassins. Pour les plus grands, cette influence commence à se faire sentir mais là aussi, l'antécédent pluvieux prédomine.

En approche globale, nous avons montré le bon comportement des modèles de production et de transfert appliqués séparément. Par contre dans le modèle complet, nous n'observons pas cette qualité. Nous avons montré l'importance de la fonction de production dans ce comportement du modèle complet.

L'approche distribuée n'a pas été concluante essentiellement à cause de la différence non apparente de fonctionnement entre les petits bassins et grands bassins. Si l'hypothèse de ruissellement rapide généralisé s'observe bien sur les petits bassins, elle n'apparaît sur les grands bassins que pour les crues de récurrence élevée (décennale et plus). Nous pensons d'après ces comportements à une interférence des différentes catégories d'écoulement sur un bassin versant. Parmi les différentes hypothèses de différenciation des chemins de l'eau, nous rappelons celles de Dunne (1978), qui distingue et schématise (Figure IV - 1) les types d'écoulement suivants :

- l'écoulement de surface (ruissellement, chemin n° 1),
- l'écoulement rapide de subsurface (chemin n° 3),
- l'écoulement sur surface saturée (chemin n° 4) et
- l'écoulement de base (chemin n° 2).

Dans notre étude, nous avons privilégié le chemin n° 1 sous l'hypothèse qu'à l'échelle du temps de calcul les autres types n'interviennent pas mais tout porte à croire qu'ils influencent bien les grands bassins. Des mesures piézométriques nous permettraient de nous rendre compte de ce phénomène.

A la suite de ce travail, nous proposons pour une amélioration possible des modèles de production et de transfert dans le sahel, la prise en compte des données quantifiées des caractéristiques physiques des bassins versants et particulièrement les sols et les états de surface.

Nous pouvons nous appuyer pour ce faire sur les nouveaux outils à la disposition des hydrologues. Nous avons la télédétection qui peut caractériser correctement les états de surface et les conditions initiales d'humidité des bassins versants. Nous avons aussi le radar qui donne une image spatiale de la pluie. Et enfin les Modèles Numériques de Terrain et les Systèmes d'Information Géographique qui permettent une analyse plus fine de la géomorphologie.

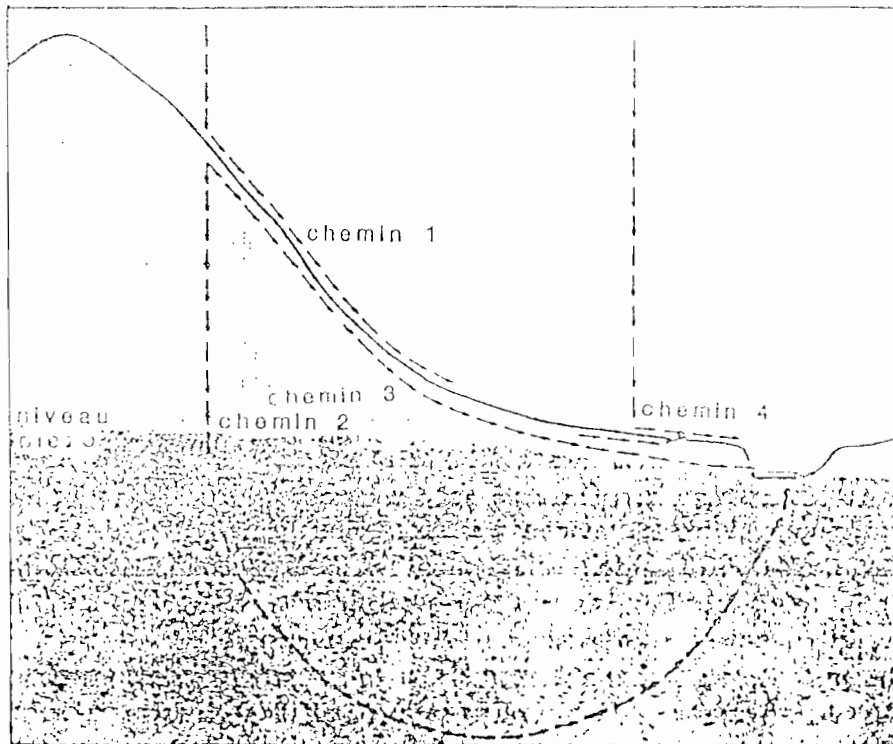


Figure IV - 1 : Les chemins de l'eau sur le versant d'après Dunne (1978).



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



### **Bibliographie.**

ALBERGEL J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m<sup>2</sup> au km<sup>2</sup>, étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 341 p.

ALBERGEL J., CHEVALIER P. et LORTIC B. (1987). - D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina). Hydrol. Continent., vol. 2, n° 2, pp 77-86.

ALBERGEL J., RIBSTEIN P. et VALENTIN C. (1985). L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp 25-48.

Atlas Pratique du Tchad (1972). Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines (I.N.T.S.H.), 77 p.

BILLON B., GUISCAFRE J., HERBAUD J., OBERLIN G. (1974) Le bassin du fleuve Chari. Monographies hydrologiques , ORSTOM, Paris, 450 p.

BOCQUILLON C. (1987). Face au désarroi ... d'un hydrologue. Inédit, note manuscrite. L.H.M., Uni. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 18 p.

BOCQUILLON C. (1978). Propagation des écoulements transitoires intermittents dans les systèmes à surface libre. L.H.M., Uni. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 85 p.

BOURGES J. (1972). Résultats de la campagne 1967 sur les bassins de Sofoya (Tchad). 19 p + Annexes.

BRUNET-MORET Y. (1965). Influence du corps de l'averse sur le ruissellement d'un petit bassin (bassin du petit Boundjouk). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. 3, 32 p.

CABOT J. et BOUQUET C. (1974). Géographie, le Tchad. Hatier, collection A. Journaux, 96 p.

CABOT J. et BOUQUET C. (1978). Le Tchad. Que sais-je? n° 1531, Presses universitaires de France, 127 p.

- CASENAVE A. et VALENTIN C. (1988). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM - Communauté Economique Européenne, 232 p.
- CHAOUCHE A. (1988). Structure de la saison des pluies en Afrique Soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 263 p.
- CHAUVELIER F. (1975). Lignes de grains et précipitations au Sénégal. Travaux et documents de géographie tropicale, CEGET, CNRS, n° 19, pp 143-177.
- CHEVALIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., et BERNARD A. (1985). Pluies et crues au sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso). Travaux et documents de l'ORSTOM n° 190, Paris, 251 p.
- CHEVALIER P. (1982). Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 4, pp 253-297.
- DESBORDES M., RAOUS P. (1979). Fondements de l'élaboration d'une pluie de projet urbaine : méthodes d'analyses et application à la station de Montpellier-Bel Air. L.H.M. Journées Pluviométrie de la Société Hydrotechnique de France. Paris.
- DUBREUIL P. (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Masson, Paris, 117 p.
- DUBREUIL P., MORELL M. et SECHET P. (1975). Comportement et interactions des paramètres physiques des petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIII, n° 1, pp 13-36.
- DUBREUIL P., CHAPERON P., GUISCAFRE J. et HERBAUD G. (1971) Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969. Paris, 916 p.
- DUNNE T. (1978). Field studies of hillslope flow processes. In J. Kirkby (editor) Hillslope hydrology. John Wiley & Sons : pp 227-293.
- GIRARD G. (1975a). Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin de Ghorfa (Mauritanie). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XII, n° 3, pp 167-188.
- GIRARD G. (1969). Etude du ruissellement sur un bassin de 1200 Km<sup>2</sup> et recherche d'un modèle hydro-pluviométrique. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. VI, n° 2, pp 43-76.

GIRARD G. et Le GUILLOU J.L. (1968). Etude des crues du bassin du Bam-Bam à Tialozoudou (République du Tchad). ORSTOM, Rapport définitif (1963-1966), 2 tomes, 200 p. + Annexes.

GIRARD G. (1975b). Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XII, n° 3, pp 167-188.

GIRARD G., LEDOUX E. et VILLENEUVE J.P. (1981). Le modèle couplé, simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XVIII, n° 4, pp 195-280.

GUILLOT P. et DUBAND D. (1980). Fonction de transfert pluie-débit sur les bassins versants de l'ordre de 1000 km<sup>2</sup>. L a Houille Blanche, 4/5, pp 279-290.

HASNAOUI M.D. (1985). Analyse des facteurs de ruissellement pour la prédétermination de la crue décennale au Sahel. Diplôme d'Etudes Approfondies, Uni. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 105 p.

HOEPFFNER M., LEBEL T. and SAUVAGEAUT H. (1989). A pilot experimental for rainfall estimation over West Africa, WHO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation measurement. Proceeding pp 251-259, St. Moritz.

HUFF F.A. (1967). Time Distribution of Rainfall In Heavy Storms. Wat. Resour. Res. 3, 4, pp 1007-1019.

IBIZA D. (1987). Transfert de surface : étude systématique du temps caractéristique h(temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicale de 2 à 2000 km<sup>2</sup>. Hydrol. continent., 2,2, pp 101-115.

KIRKBY M. (1978). Editor of Hillslope hydrology. John Wiley & Sons, 389 p.

LAFFORGUE A. (1977). Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application d'une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV, n° 4, pp 167-188.

LEROUX M. (1975). Climatologie dynamique de l'Afrique. Travaux et documents de géographie tropicale, CEGET, CNRS, n° 19, pp 87-112.

LEROUX M. (1980). Le climat de l'Afrique tropicale, Thèse d'état, Université Dijon, 3 tomes, 1427 p.

LUBES H. (1985). Identification des fonctions ;de production et de transfert dans un modèle hydrologique global. Application au bassin de l'Orbieu à Lagrasse. Diplôme d'Etudes Approfondies, Uni. Sc. et Tach. du Languedoc, Montpellier, 114 p.

MASSON J.M. (1968). Analyse de quelques crues de l'Allier et de ses affluents. Recherche de la fonction de transfert linéaire. Théorie de l'hydrogramme unitaire. E.D.F., Direction d'Etudes et Recherches, Groupe Hydrologie, note 10-1968, Montpellier, 54 p. + annexes.

MASSON J.M. (1986). Hydrologie de bassin - Le sol et l'eau. Document pédagogique de 2<sup>o</sup> année, I.S.I.M., Uni. Sc. et Tach. du Languedoc, Montpellier, 50 p.

MIETTON M. (1988). Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina-Faso. L'érosion en zone de savane. Université de Grenoble I. 511 p + Annexes, 226 p.

MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT (1992). L'Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Synthèse des connaissances. Socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien. Col. Maîtrise de l'Eau. 2<sup>o</sup> éd. Université d'Avignon; CEFIGRE. AGRIDOC INTERNATIONAL. 147 p.

MONIOD F. (1983). Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. Cah. ORSTOM., sér. Hydrol., vol. XX, n) 3-4, pp 191-203.

MOREL-SEYTOUX H.J. (1981) Application of Infiltration Theory for the Determination of Excess Rainfall Hyetograph. Water Ressources Bulletin. Vol. 17, n° 6, PP 1012-1022..

NASH J.E. et SUTCLIFFE J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, 1, A discussion of principles, J. Hydrol., 10, pp 282-290.

ORSTOM (1958). Etudes d'écoulement en régime sahélien. Massif de l'Ouaddaï. Bassin expérimental ouadi Kaoun. 77 p.

POUYAUD B. (1985). L'évaporation, composante majeure du cycle hydrologique. Climat et Développement, Colloques et Séminaires ORSTOM, Paris, pp 130-139.

POUYAUD B. (1986). Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du lac de Bam et de la mare d'Oursi (Burkina Faso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. Etudes et Thèses ORSTOM, Paris, 254 p.

POUYAUD B. et COLOMBANI J. (1987). Le lac Tchad est-il condamné à disparaître? Rapport ORSTOM, Conférence CBLT, Ndjaména, 19 p., 11 fig.

POUYAUD B. et COLOMBANI J. (1989). Les variations extrêmes du lac Tchad : L'assèchement est-il possible? Annales de géographie, n° 545, pp 1-23.

RIBSTEIN P. (1990). Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 317 p.

RIBSTEIN P., RODIER J.A., (1989). Fortes crues des petits cours du Sahel : forme de l'hydrogramme. ORSTOM, Hydrol. continent., vol. 4, n° 1, pp 33-47.

RIOU Ch. et DUBOIS G.J. (1967). premières mesures d'évapotranspiration potentielle en République du Tchad, Cah. ORSTOM, sér. Hydrol, vol 4, n° 2, pp 47-69.

ROCHE M. (1963). Hydrologie de surface. Gauthier-Villars éditeur, Paris, 383 p.

ROCHE M.A. (1968). Ecoulement de surface, alimentation des nappes et transport solide des ouadis Fera, Kadjemeur et Sofoya (République du Tchad). ORSTOM. 140 p.

RODIER J. (1988). Caractéristiques de l'écoulement de l'Ouadi Kaoun. " Note, 16 p.

RODIER J.A. (1975). Evaluation de l'écoulement annuel dans le sahel tropical africain. Travaux et documents de l'ORSTOM n° 46, Paris, 121 p.

RODIER J.A. (1984-1985). Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n° 2, pp 3-26 + annexes.

RODIER J.A. (1989). Ecoulement de surface dans les bassins perméables du Sahel. Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. Hydrol. Continent., vol. 4, n° 2, pp 123-138.

RODIER J.A. (1975). L'hydrologie des régions sahéliennes et la sécheresse 1968-1973. Etudes scientifiques, 55 p.

RODIER J.A. et RIBSTEIN P. (1988). Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants couvrants de 1 à 10 km<sup>2</sup>. ORSTOM, Montpellier, 133 p.

SCHNEIDER J.L. (1989). Géologie et hydrogéologie de la République du Tchad ". Thèse de doctorat, Université d'Avignon.

SERVAT E. et DEZETER A. (1988). Simple et Rosen. Deux méthodes d'optimisation non linéaire. Notice OVNIh n° 1, Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, 36 p.

SEGUIS L. (1986). Recherche pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée - lame écoulée). Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 326 p.

SIRCOULON J. (1989). Effets des sécheresses sur l'hydrologie de surface. La Houille Blanche, 7/8, pp 505-516.

TCHOMBI G.O. (1979). Préparation d'un modèle mathématique de la nappe phréatique du Chari-Baguirmi (Tchad) en vue d'une gestion optimale. Bull. du Centre d'Hydrogéologie, Uni. Neuchâtel, n° 3, pp 95-114.

THAUVIN V., LEBEL T. (1989). EPSAT : Study of rainfall over the SAHEL at small time steps using a dense network of recording raingauges. WHO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation measurement. Proceeding pp 260-267, St. Moritz.

THEBE B. et PONTANIER R. (1989). Etude du ruissellement au Nord Cameroun. Transfert de la parcelle au bassin versant. Hydrol. continent., 4, 2, pp 57-69.

THIRRIOT C., BERNEDE J.P. et HABAIEB H. (1988). Comparaison pratique de méthode de prévision de crue. Exemple de l'Aveyron. La Houille Blanche n° 5/6, pp 385-393.

U.S.D.A. (U.S. Dept. of Agric.). Soil Conservation Service. (1972). Estimation of direct runoff from storm rainfall. in : National Engineering Handbook. Section 4 - Hydrology. Washington, 10.1-10.24.

VALENTIN C. (1981). Organisation pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique . (Agadez , République du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur

l'économie en eau. Thèse de Doctorat 3<sup>e</sup> cycle. Uni. Paris VII, 229 p. + Planches photographiques.

VEN TE CHOW (1964). Handbook of applied hydrology, a compendium of water resources technology. Mac Graw Hill éd., New York, 1530 p.

VUILLAUME G. (1974). L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précisions des calculs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XI, n° 3, pp 205-240.

VUILLAUME G. (1981). Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XVIII, n° 1, pp 23-72.



## **TABLE DES MATIERES**



Table des matières
--------------------

<b>Introduction.....</b>	<b>11</b>
Introduction .....	13
 <b>Première partie :</b>	
<b>LE MILIEU.....</b>	<b>17</b>
I - 1 Géographie Physique .....	20
I - 1 - 1 - Le Tchad .....	20
I - 1 - 1 - 1 - Climat .....	27
I - 1 - 1 - 2 - Géologie .....	30
I - 1 - 1 - 3 - Sols .....	37
I - 1 - 1 - 4 - Végétations.....	39
I - 1 - 2 - Le Bam-Bam .....	41
I - 1 - 2 - 1 - Situation géographique .....	41
I - 1 - 2 - 2 - Relief et hydrographie.....	41
I - 1 - 2 - 3 - Sols .....	42
I - 1 - 2 - 4 - Climat .....	47
I - 1 - 2 - 5 - Végétation .....	50
I - 2 - Pluviométrie.....	51
I - 2 - 1 - Equipement.....	51
I - 2 - 2 - Etude des précipitations.....	54
I - 2 - 2 - 1 - Situation par rapport à la longue série .....	54
I - 2 - 2 - 2 - Répartition spatiale .....	57
I - 2 - 2 - 3 - Déplacement des averses sur le bassin .....	62
I - 2 - 2 - 4 - Forme temporelle des averses .....	67
Conclusion.....	69
I - 3 - Hydrologie.....	71
I - 3 - 1 - Equipement hydrométrique .....	71
I - 3 - 2 - Détermination et définition des paramètres usuels.....	71
I - 3 - 3 - Données par bassin .....	75
- Le bassin de Tounkoul.....	76
- Le bassin de Bidjir .....	77
- Le bassin de Taya.....	78
- Le bassin de Mazera.....	79
- Le bassin de Barlo .....	80
- Le bassin de Tialozoudou.....	82

I - 3 - 3 - Crues retenues.....	83
Conclusion .....	86

**Deuxième partie :**

<b>APPROCHE GLOBALE " PLUIES - DEBITS ".....</b>	<b>87</b>
--	-----------

II - APPROCHE GLOBALE " PLUIES-DEBITS ".....	89
II - 1 - La production.....	91
II - 1 - 1 - Définition et justification de la méthode choisie.....	92
Expression analytique du SCS.....	93
II - 1 - 2 - Application aux différents bassins .....	95
Le bassin de Tounkoul .....	96
Le bassin de Bidjir.....	98
Le bassin de Taya .....	100
Le bassin de Mazera .....	102
Le bassin de Barlo.....	104
Conclusion .....	106
II - 2 - Le transfert.....	109
II - 2 - 1 - Définition et justification de la méthode de transfert choisie.....	109
II - 2 - 2 - Application aux différents bassins.....	115
Le bassin de TOUNKOUL .....	117
Le bassin de BIDJIR.....	124
Le bassin de TAYA.....	130
Le bassin de MAZERA .....	138
Le bassin de BARLO.....	142
II - 2 - 3 - Comparaison des fonctions de transfert.....	146
II - 2 - 4 - Reconstitution des crues.....	152
II - 3 - Validation .....	167
II - 3 - 1 - Validation de la fonction de production.....	168
II - 3 - 2 - Validation du modèle complet.....	169

**Troisième partie :**

<b>ESSAIS D'APPROCHE DISTRIBUEE .....</b>	<b>179</b>
Approche distribuée .....	181
III - 1 - Application aux différents cas de figure. ....	181
III - 1 - 1 - Inventaire et analyse des événements communs à Barlo, Bidjir et Taya .....	182
Analyse des crues communes.....	183
Nouvelle méthodologie .....	192
Etude du bassin intermédiaire .....	193
Production .....	194
Transfert .....	196
Etude du bassin de Barlo effectif.....	200
Production .....	201
Transfert .....	203
Application de la nouvelle méthodologie .....	204
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>207</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>213</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>223</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>229</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>235</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>239</b>



## Liste des figures



<b>Figure I - 1 : Le Tchad dans le monde (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).</b> .....	17
<b>Figure I - 2 : Le Tchad en Afrique (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).</b> .....	18
<b>Figure I - 3 : Le Tchad physique (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).</b> .....	19
<b>Figure I - 4 : Position des masses d'air (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).</b> .....	22
<b>Figure I - 5 : Géologie du Tchad (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).</b> .....	25
<b>Figure I - 6 : Tchad ; Hydrogéologie (D'après l'Atlas pratique du Tchad, Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972).</b> .....	26
<b>Figure I - 7 : Le bassin versant du Bam-Bam à Tialozoudou.</b> .....	34
<b>Figure I - 8 : Carte pédologique du bassin versant du Bam-Bam.</b> .....	35
<b>Figure I - 9 : Fréquence des directions des vents</b> .....	38
<b>Figure I - 10 : Equipement pluviométrique et hydrologique.</b> .....	41
<b>Figure I - 11 : Moyennes pluviométriques annuelles et interannuelle à Mongo.</b> .....	44
<b>Figure I - 12 : Répartition spatiale des pluies suivant la fonction spline (mm<sup>-1</sup>).</b> .....	48
<b>Figure I - 13 : Répartition spatiale de la moyenne interannuelle des pluies (mm).</b> .....	49
<b>Figure I - 14 : Sens de déplacement des averses.</b> .....	52
<b>Figure I - 15 : Hyétoigrammes cumulés.</b> .....	54
<b>Figure I - 16 : Principaux paramètres d'une crue.</b> .....	60
<b>Figure II - 1 : Tounkoul : Relation entre S (SCS) et IPA.</b> .....	83
<b>Figure II - 2 : Bidjir : Relation entre S (SCS) et IPA.</b> .....	85
<b>Figure II - 3 : Taya : Relation entre S (SCS) et IPA.</b> .....	87
<b>Figure II - 4 : Mazera : Relation entre S (SCS) et IPA.</b> .....	89
<b>Figure II - 5 : Barlo : Relation entre S (SCS) et IPA.</b> .....	91
<b>Figure II - 6 - 1 : Lissage à partir de 800 minutes (Tounkoul).</b> .....	103
<b>Figure II - 6 - 2 : Lissage à partir de 400 minutes (Tounkoul).</b> .....	104
<b>Figure II - 6 - 3 : Lissage à partir de 320 minutes (Tounkoul).</b> .....	105
<b>Figure II - 6 - 4 : Lissage à partir de 280 minutes (Tounkoul).</b> .....	105

<b>Figure II - 6 - 5 : Fonctions de transfert des différents échantillons sur le bassin de Tounkoul.....</b>	<b>107</b>
<b>Figure II - 7 - 1 : Lissage à partir de 800 minutes (Bidjir).....</b>	<b>110</b>
<b>Figure II - 7 - 2 : Lissage à partir de 320 minutes (Bidjir).....</b>	<b>110</b>
<b>Figure II - 7 - 3 : Lissage à partir de 280 minutes (Bidjir).....</b>	<b>111</b>
<b>Figure II - 7 - 4 : Lissage à partir de 240 minutes (Bidjir).....</b>	<b>111</b>
<b>Figure II - 7 - 5 : Fonctions de transfert des différents échantillons (Bidjir).....</b>	<b>113</b>
<b>Figure II - 8 - 1 : Fonction de transfert de l'échantillon global sans lissage (Taya).....</b>	<b>116</b>
<b>Figure II - 8 - 2 : Fonction de transfert de l'échantillon global (moins 3 crues faibles et composées) sans lissage (Taya). .....</b>	<b>117</b>
<b>Figure II - 8 - 3 : Fonction de transfert de l'échantillon global (moins crues faibles et composées) sans lissage (Taya). .....</b>	<b>117</b>
<b>Figure II - 8 - 4 : Fonctions de transfert de l'échantillon des crues à faibles débits (Taya).....</b>	<b>119</b>
<b>Figure II - 8 - 5 : Fonctions de transfert de l'échantillon des crues à débits moyens (Taya).....</b>	<b>120</b>
<b>Figure II - 8 - 6 : Fonctions de transfert de l'échantillon des crues à forts débits (Taya). ..</b>	<b>120</b>
<b>Figure II - 8 - 7 : Fonctions de transfert de l'échantillon global de calage (Taya).....</b>	<b>121</b>
<b>Figure II - 9 : Fonctions de transfert des différents échantillons (Mazera). .....</b>	<b>125</b>
<b>Figure II - 10 : Fonctions de transfert des différents échantillons (Barlo).....</b>	<b>129</b>
<b>Figure II - 11 : Fonctions de transfert des échantillons globaux des différents bassins. ..</b>	<b>135</b>
<b>Figure II - 12 - 1 : Crues observées et simulées.....</b>	<b>137</b>
<b>Figure II - 12 - 2 : Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>138</b>
<b>Figure II - 12 - 3 : Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>139</b>
<b>Figure II - 12 - 4 : Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>140</b>
<b>Figure II - 12 - 5 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>141</b>
<b>Figure II - 12 - 6 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>142</b>
<b>Figure II - 12 - 7 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>143</b>
<b>Figure II - 12 - 8 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>144</b>
<b>Figure II - 12 - 9 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>145</b>
<b>Figure II - 12 - 10 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>146</b>
<b>Figure II - 12 - 11 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>147</b>

<b>Figure II - 12 - 12 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>148</b>
<b>Figure II - 12 - 13 Crues observées et simulées (suite).....</b>	<b>149</b>
<b>Figure II - 12 - 14 Crues observées et simulées (fin).....</b>	<b>150</b>
<b>Figure II - 13 - 1 : Crues observée et reconstituée par le modèle complet.....</b>	<b>154</b>
<b>Figure II - 13 - 2 : Crues observée et reconstituée par le modèle complet (suite). ....</b>	<b>155</b>
<b>Figure II - 13 - 3 : Crues observée et reconstituée par le modèle complet (fin).....</b>	<b>156</b>
<b>Figure II - 14 - 1 : Pluie brute et pluies nettes correspondantes par la méthode SCS et La méthode DPFT. ....</b>	<b>159</b>
<b>Figure II - 14 - 2 : Pluie brute et pluies nettes correspondantes par la méthode SCS et La méthode DPFT (suite). ....</b>	<b>160</b>
<b>Figure II - 15 : Pluie brute et pluies nettes correspondantes par la méthode SCS et La méthode DPFT avec contrainte (pluies nette inférieure à pluie brute).....</b>	<b>161</b>
<b>Figure III - 1 - 1 : Crues observées simultanément à Barlo, Bidjir et Taya. ....</b>	<b>167</b>
<b>Figure III - 1 - 2 : Crues observées simultanément à Barlo, Bidjir et Taya (suite).....</b>	<b>169</b>
<b>Figure III - 2 : Volumes écoulés à Barlo fonction de la somme des volumes écoulés à Bidjir et Taya.....</b>	<b>170</b>
<b>Figure III - 3 a : Evolution des IPA au cours de l'année 1963.....</b>	<b>175</b>
<b>Figure III - 3 b : Evolution des IPA au cours de l'année 1964. ....</b>	<b>177</b>
<b>Figure III - 3 c : Evolution des IPA au cours de l'année 1966.....</b>	<b>179</b>
<b>Figure III - 4 : Bassin intermédiaire de Barlo (relation entre S (SCS) et IPA (<math>k = 0,9</math>)).</b>	<b>179</b>
<b>Figure III - 5 a : Fonction de transfert du bassin intermédiaire et des "Inters impairs" de Barlo.....</b>	<b>182</b>
<b>Figure III - 5 b : Fonctions de transfert du bassin intermédiaire et des "Inters pairs" de Barlo.....</b>	<b>184</b>
<b>Figure III - 5 c : Fonction de transfert du bassin intermédiaire de Barlo.....</b>	<b>185</b>
<b>Figure III - 6 : Bassin effectif de Barlo (relation entre S et IPA).....</b>	<b>189</b>
<b>Figure III - 7 : Bassin effectif de Barlo (Fonction de transfert).....</b>	<b>190</b>
<b>Figure III - 8 : Fonction de transfert de la première possibilité de distribution. ....</b>	<b>192</b>
<b>Figure IV - 1 : Les chemins de l'eau sur le versant d'après Dunne.....</b>	<b>211</b>



## **Liste des tableaux**



<b>Tableau I - 1 : Types et pourcentage des sols des différents bassins versants. ....</b>	<b>33</b>
<b>Tableau I - 2 : Températures moyennes et absolues relevées à la station de Mongo. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tableau I - 3 : Humidité relative relevée à la station de Mongo.....</b>	<b>37</b>
<b>Tableau I - 4 : Moyennes pluviométriques décennales à Mongo.....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau I - 5 : Moyennes pluviométriques décennales à Dadouar.....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau I - 6 : Les plus importants événements pluviométriques. ....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau I - 6 (suite) : Les plus importants événements pluviométriques. ....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau I - 7 : Ordre d'arrivée des averses.....</b>	<b>50</b>
<b>Tableau I - 8 : caractéristiques physiques des bassins versants. ....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau I - 9 : Tounkoul : volumes et lames d'eau annuels.....</b>	<b>62</b>
<b>Tableau I - 10 : Bidjir : volumes et lames d'eau annuels. ....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau I - 11 : Taya : volumes et lames d'eau annuels. ....</b>	<b>65</b>
<b>Tableau I - 12 : Mazera : volumes et lames d'eau annuels. ....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau I - 13 : Barlo : volumes et lames d'eau annuels.....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau I - 14 : Tialozoudou : volumes et lames d'eau annuels.....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau I - 15 : crues retenues pour l'étude de chaque bassin. ....</b>	<b>69</b>
<b>Tableau I - 15 (suite) : crues retenues pour l'étude de chaque bassin.....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau I - 15 (fin) : crues retenues pour l'étude de chaque bassin.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau II - 1 : Tounkoul : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9).....</b>	<b>82</b>
<b>Tableau II - 2 : Bidjir : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9).....</b>	<b>84</b>
<b>Tableau II - 3 : Taya : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9).....</b>	<b>86</b>
<b>Tableau II - 4 : Mazera : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9).....</b>	<b>88</b>
<b>Tableau II - 5 : Barlo : Coefficient S de la SCS et IPA (avec K = 0,1 ; 0,61 et 0,9). ....</b>	<b>90</b>
<b>Tableau II - 6 - 1 : Crues à forts débits (Tounkoul).....</b>	<b>101</b>
<b>Tableau II - 6 - 2 : Crues à débits moyens (Tounkoul).....</b>	<b>102</b>
<b>Tableau II - 6 - 3 : Crues à débits faibles (Tounkoul).....</b>	<b>102</b>
<b>Tableau II - 6 - 4 : Tounkoul : Caractéristiques des fonctions de transfert.....</b>	<b>106</b>
<b>Tableau II - 6 - 5 : Tounkoul : Débit moyen des différents échantillons et débit de pointe des fonctions de transfert.....</b>	<b>106</b>

<b>Tableau II - 7 - 1 : Crues à forts débits (Bidjir).</b> .....	108
<b>Tableau II - 7 - 2 : Crues à débits moyens (Bidjir).</b> .....	109
<b>Tableau II - 7 - 3 : Crues à débits faibles (Bidjir).</b> .....	109
<b>Tableau II - 7 - 4 : Caractéristiques des fonctions de transfert (Bidjir).</b> .....	112
<b>Tableau II - 7 - 5 : Débit moyen des différents échantillons et débit de pointe des fonctions de transfert (Bidjir)</b> .....	112
<b>Tableau II - 8 - 1 : Taya : Crues à forts débits.</b> .....	114
<b>Tableau II - 8 - 2 : Taya : Crues à débits moyens.</b> .....	115
<b>Tableau II - 8 - 3 : Taya : Crues à débits faibles.</b> .....	115
<b>Tableau II - 9 - 1 : Mazera : Crues à forts débits.</b> .....	122
<b>Tableau II - 9 - 2 : Mazera : Crues à débits moyens.</b> .....	123
<b>Tableau II - 9 - 3 : Mazera : Crues à débits faibles.</b> .....	123
<b>Tableau II - 9 - 4 : Mazera : Caractéristiques des fonctions de transfert.</b> .....	124
<b>Tableau II - 10 - 1 : Barlo : Crues de l'échantillon intermédiaire.</b> .....	126
<b>Tableau II - 10 - 2 : Barlo : Crues de l'échantillon sud.</b> .....	127
<b>Tableau II - 10 - 3 : Barlo : Crues de l'échantillon nord.</b> .....	127
<b>Tableau II - 10 - 4 : Barlo : Caractéristiques des fonctions de transfert.</b> .....	128
<b>Tableau II - 11 : Caractéristiques des fonctions de transfert des différents bassins.</b> .....	130
<b>Tableau II - 12 : Relief : Indice global de pente et dénivelée spécifique.</b> .....	131
<b>Tableau II - 13 : Pourcentage des deux types de sol les plus répandus : sableux et argilo-sableux.</b> .....	132
<b>Tableau II - 14 : crues de validation et critère Clr d'adéquation du modèle de production.</b> .....	152
<b>Tableau II - 15 : coefficients de corrélation avec et sans contrainte sur la pluie nette de la DPFT.</b> .....	157
<b>Tableau III - 1 : Crues communes aux bassins de Barlo, Bidjir et Taya.</b> .....	166
<b>Tableau III - 2 : crues du bassin intermédiaire de Barlo.</b> .....	177
<b>Tableau III - 3 : Crues et coefficients S correspondants du bassin intermédiaire de Barlo.</b> .....	178
<b>Tableau III - 4 : Composition des échantillons du bassin intermédiaire de Barlo.</b> .....	180
<b>Tableau III - 5 : Crues du bassin effectif (ou reste) de Barlo.</b> .....	184
<b>Tableau III - 6 : Crues du bassin effectif et coefficients S et IPA correspondants.</b> .....	185

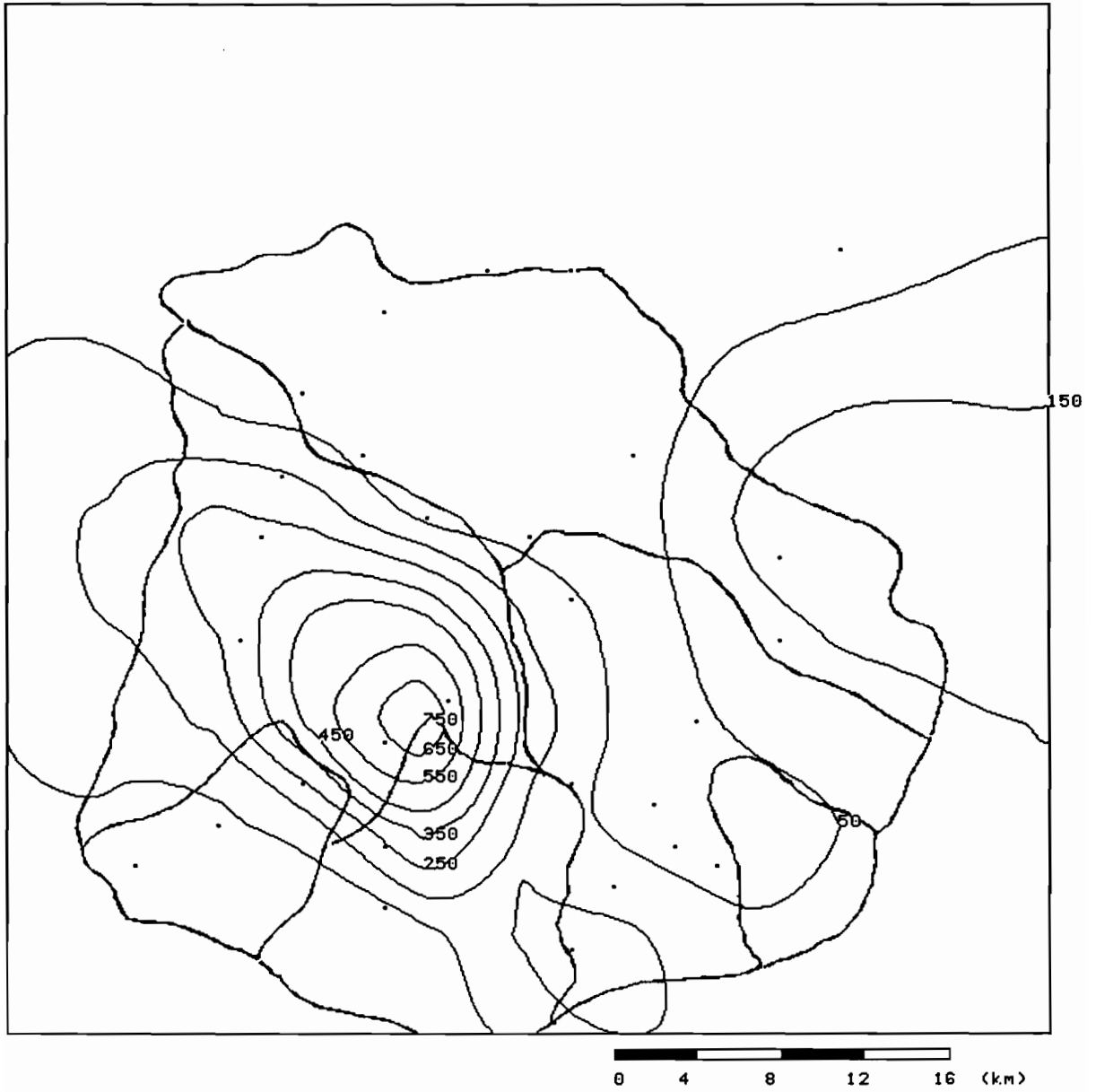
**ANNEXES**



**ANNEXE 1 :**  
**Isohyètes d'après la fonction spline**  
**(en mm<sup>-1</sup>)**

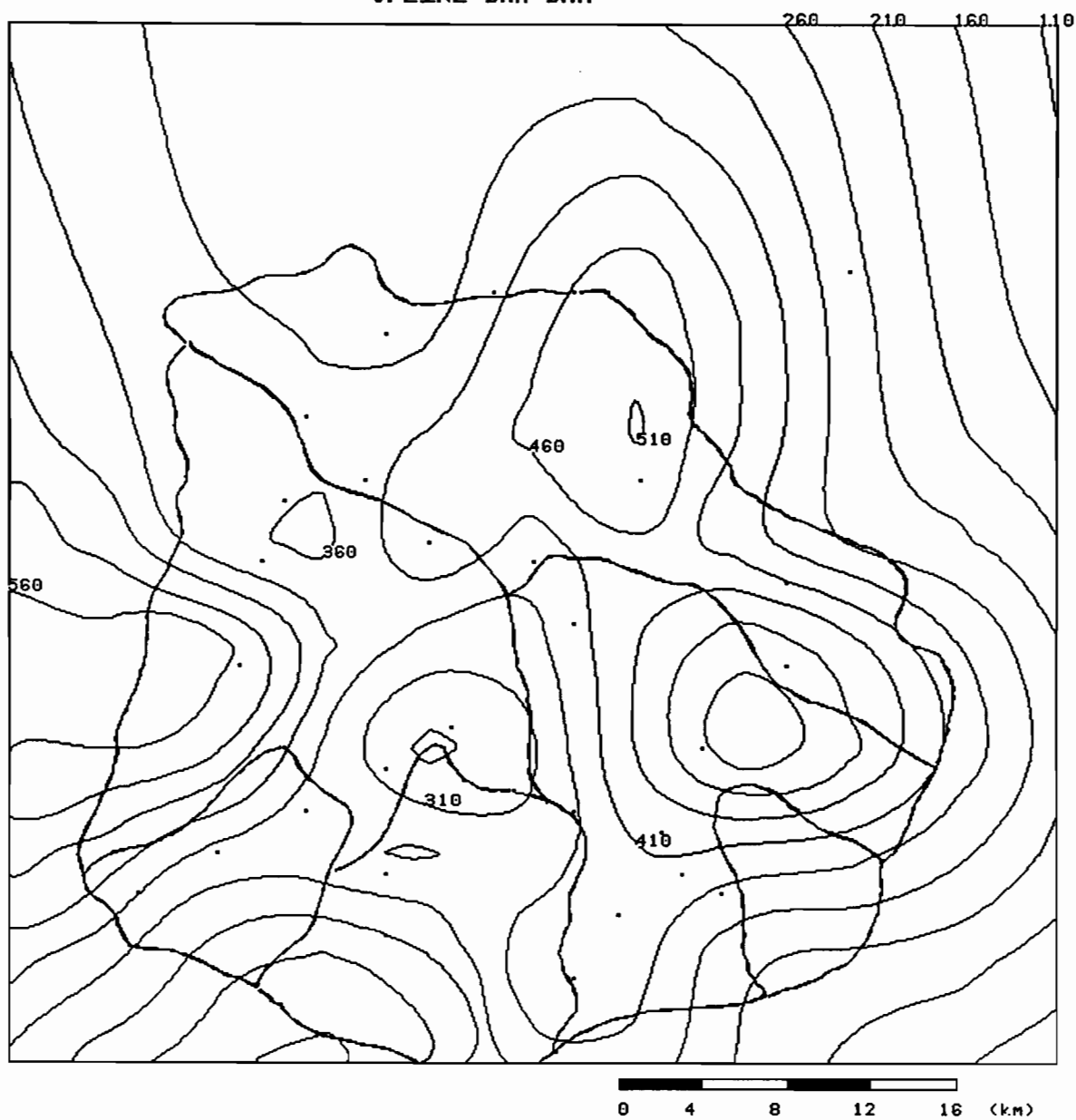


SPLINE BAM-BAM



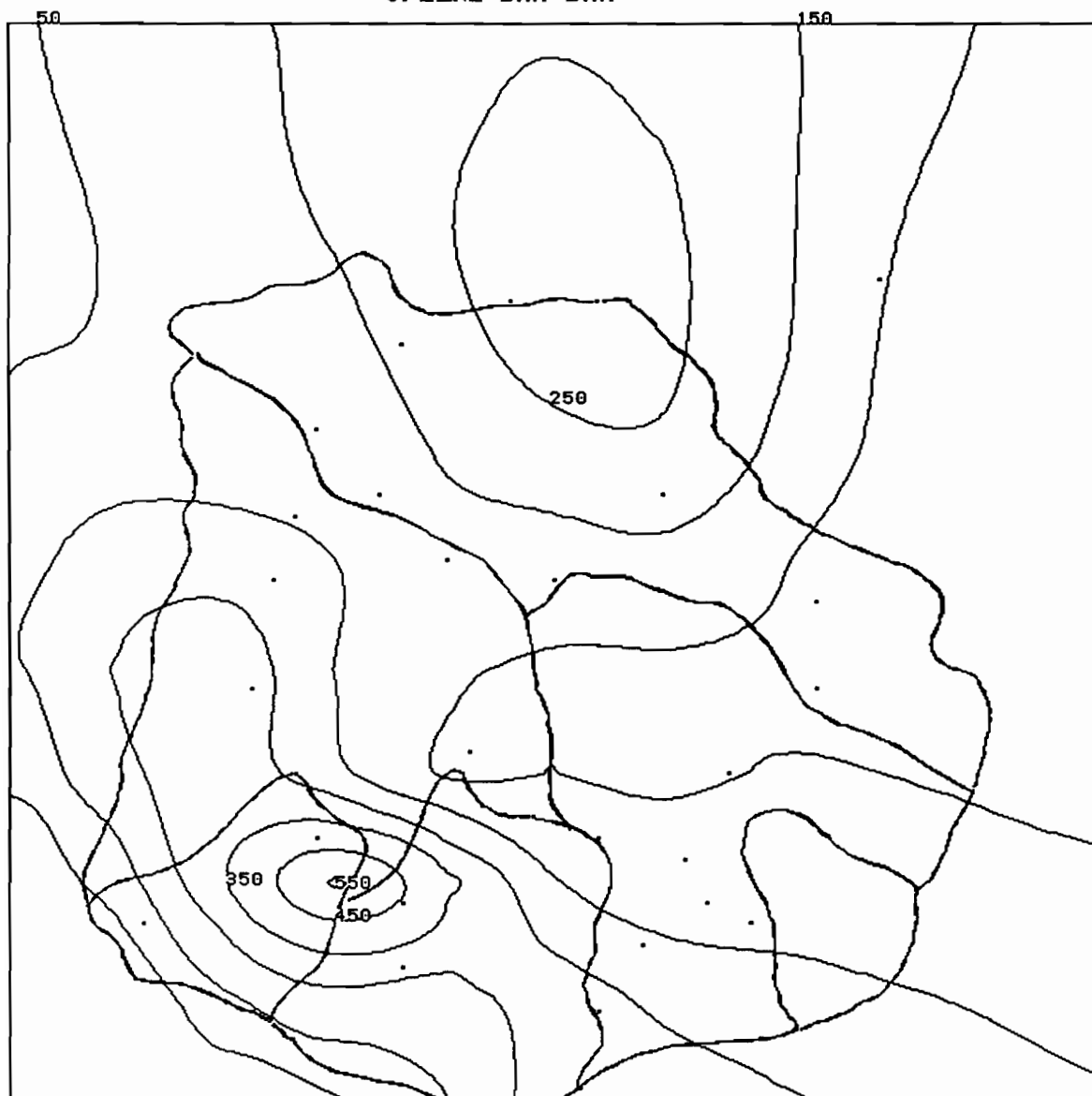
10. 9.66

## SPLINE BAM-BAM



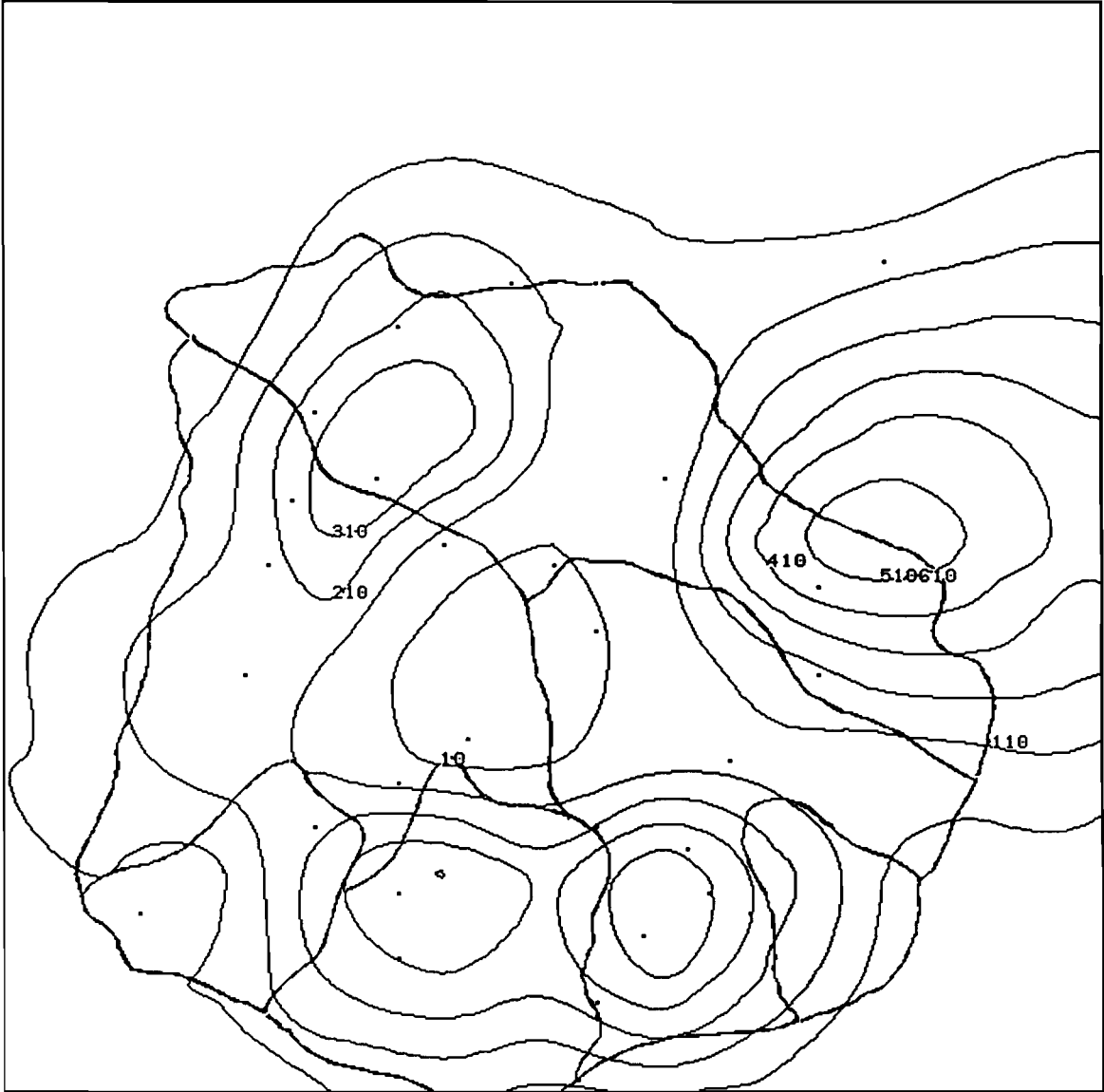
15. 8.66

SPLINE BAM-BAM

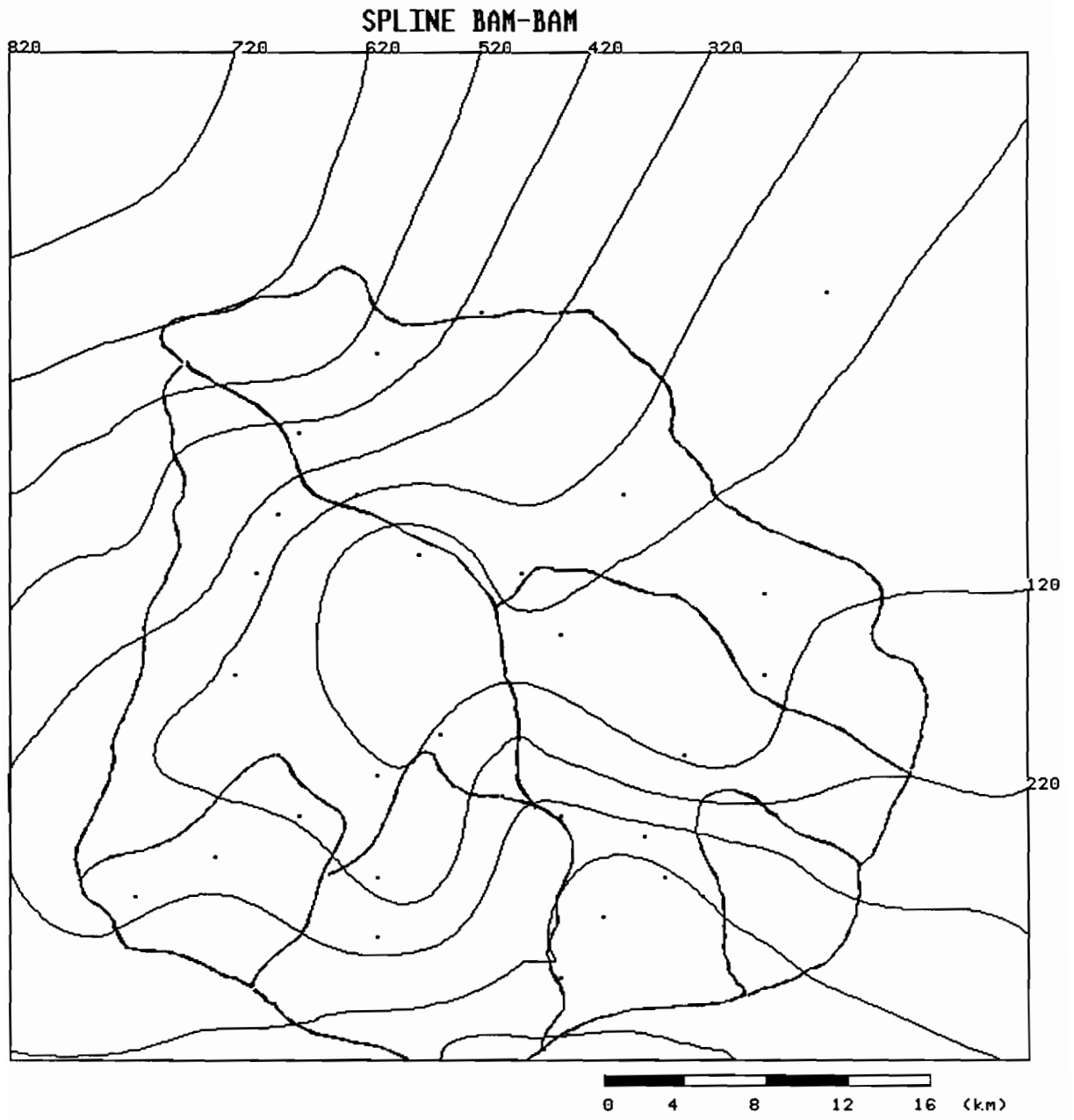


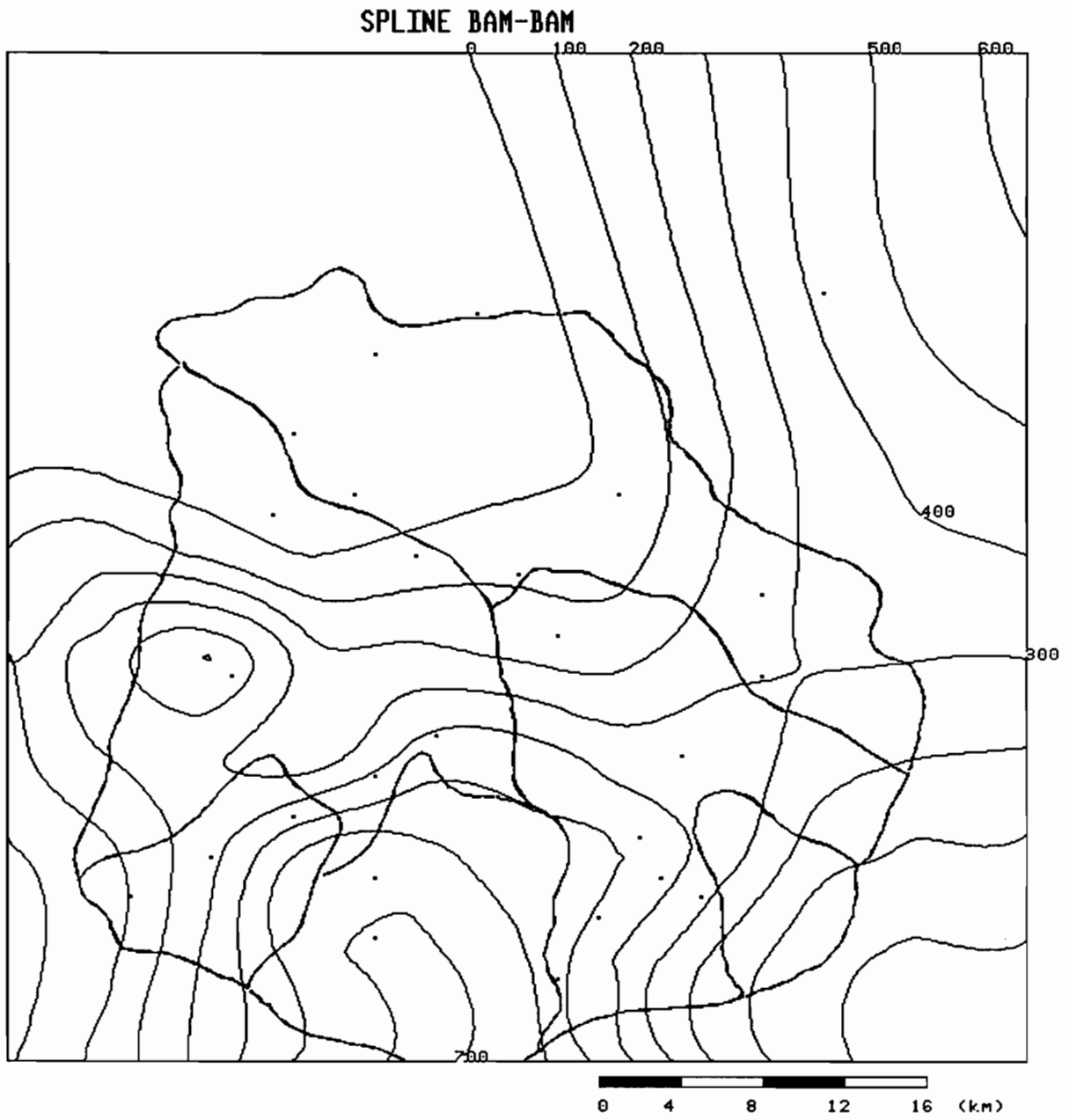
23. 7.66

SPLINE BAM-BAM



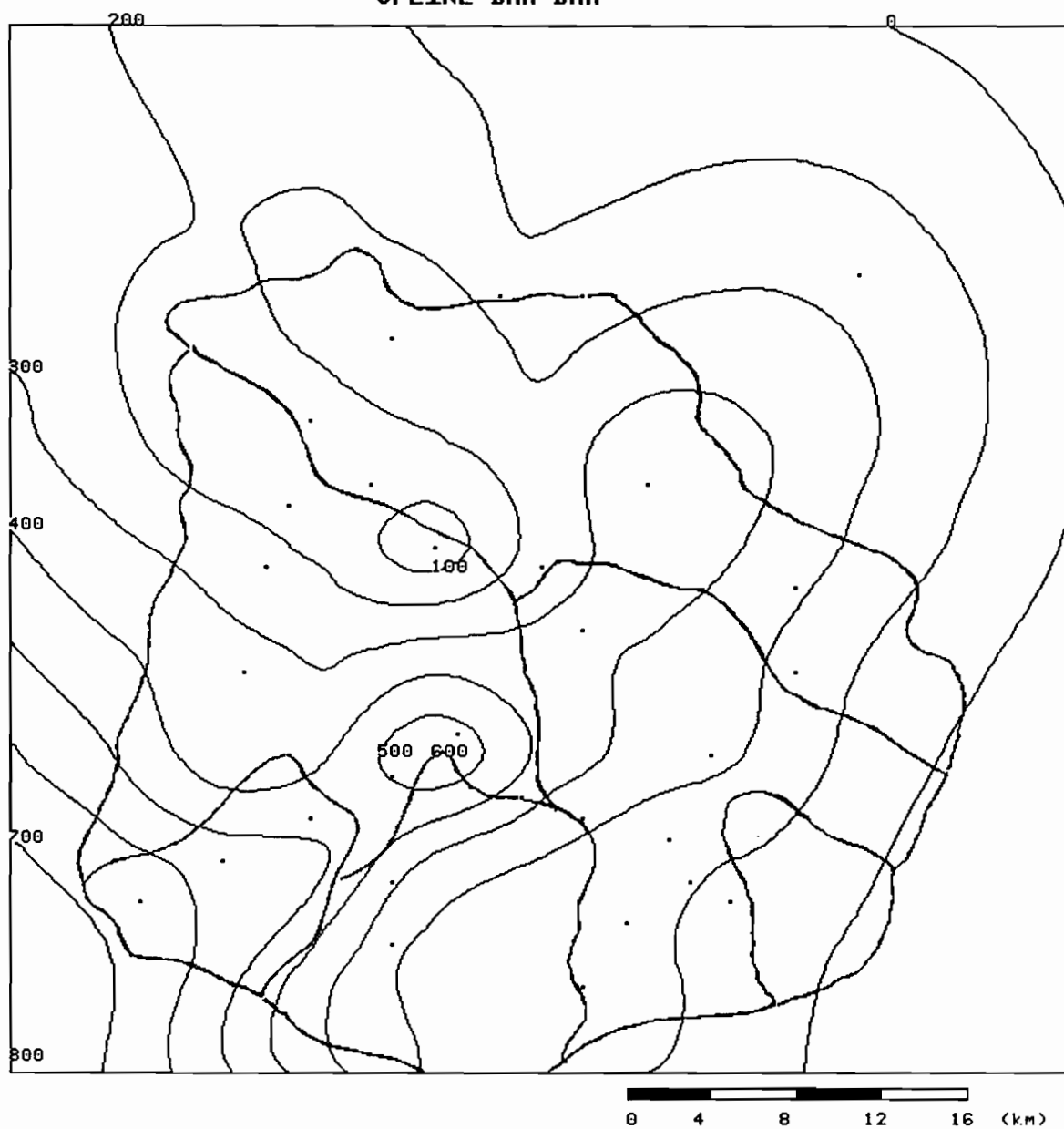
27. 7.65



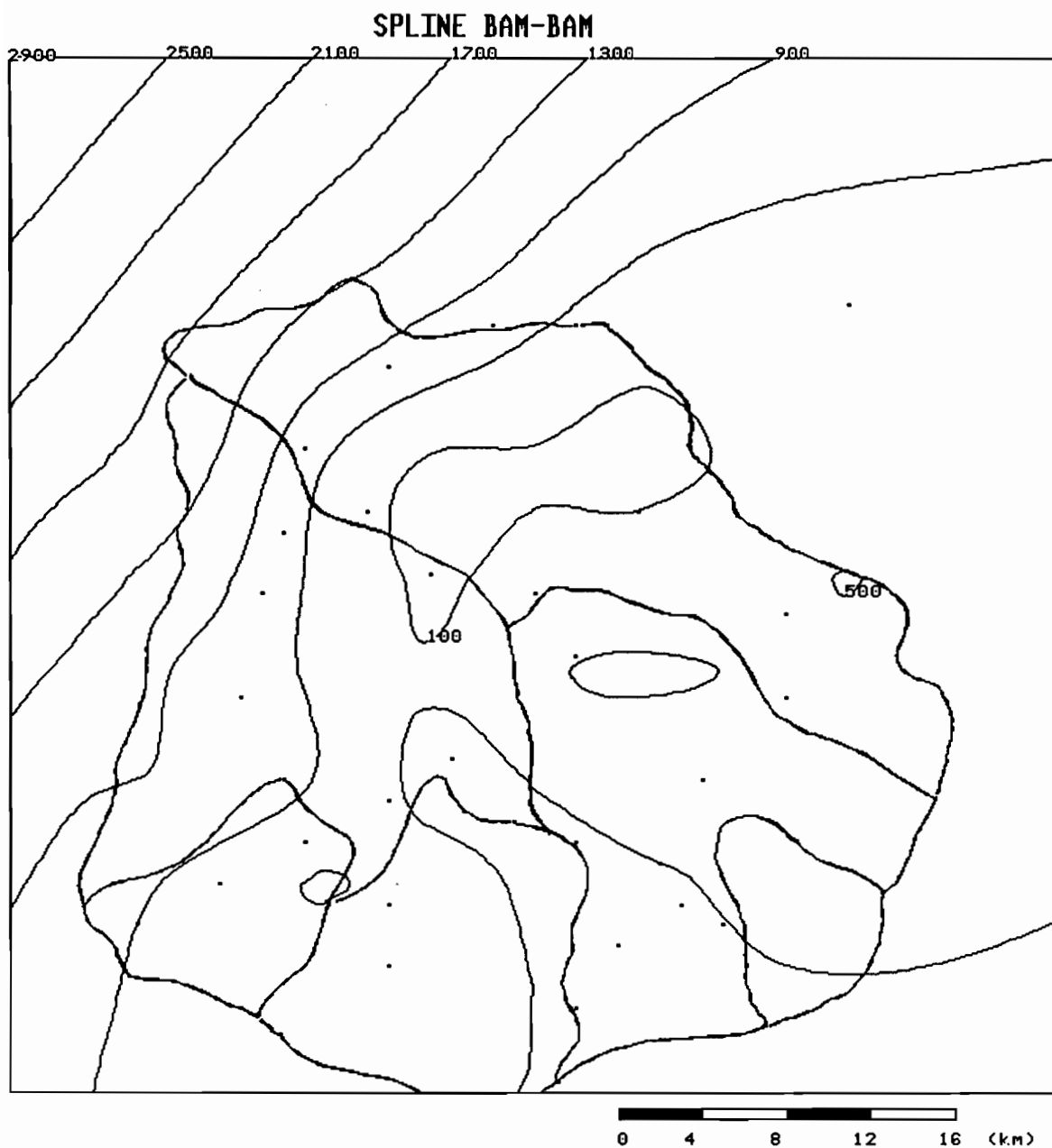


27. 8.64

SPLINE BAM-BAM

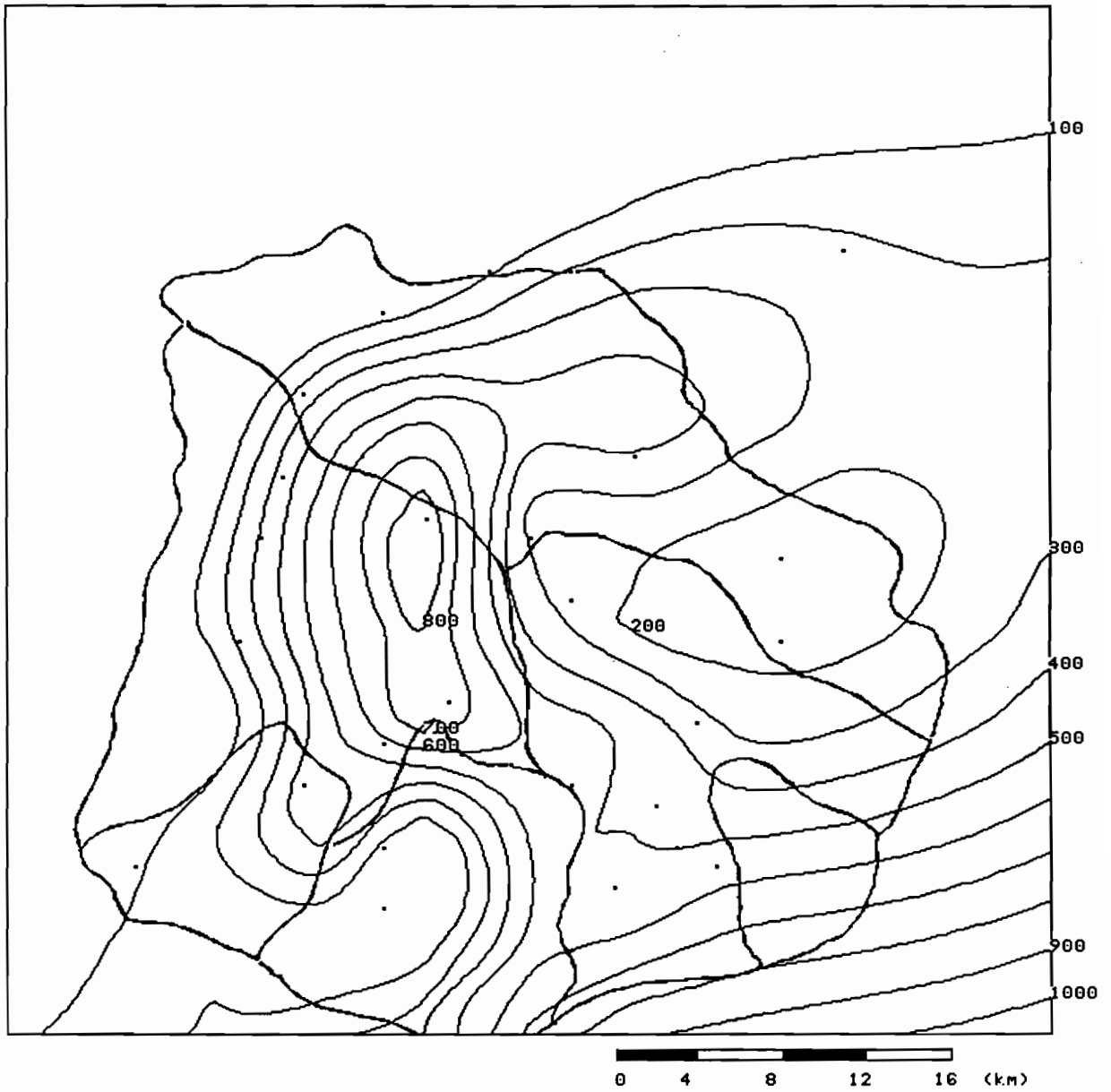


26. 8.64



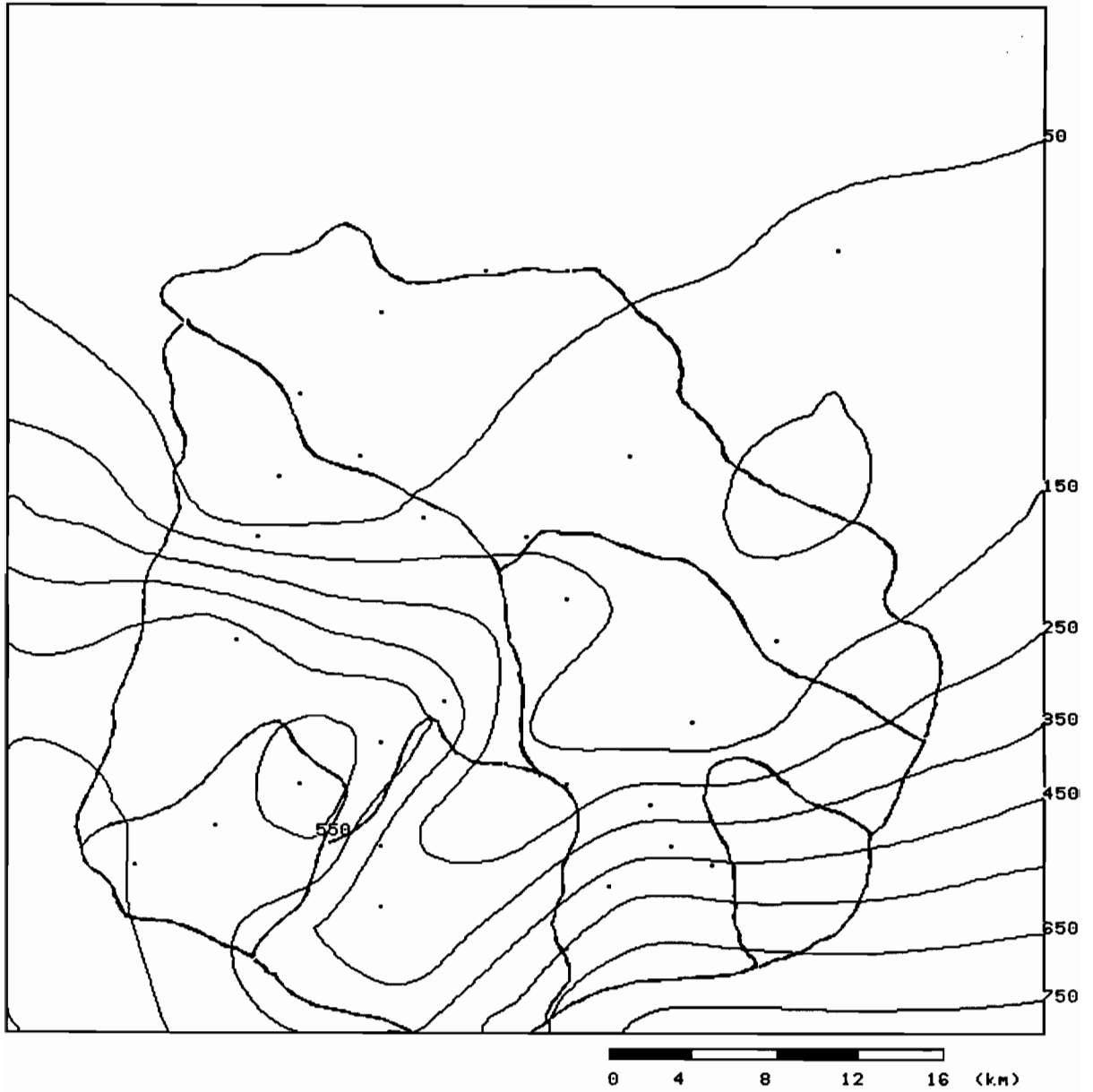
21. 8.64

SPLINE BAM-BAM



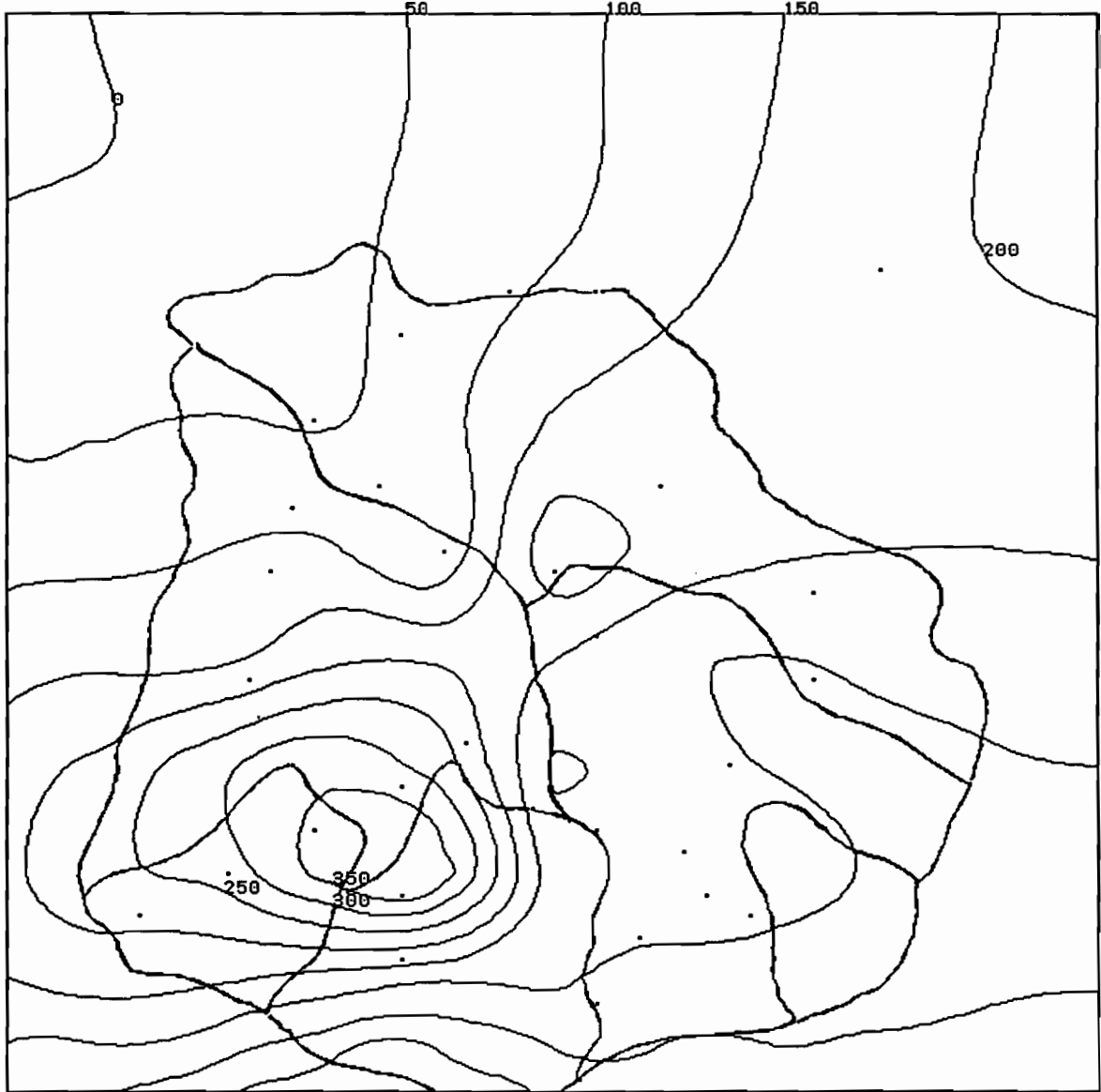
20. 8.64

SPLINE BAM-BAM



18. 8.64

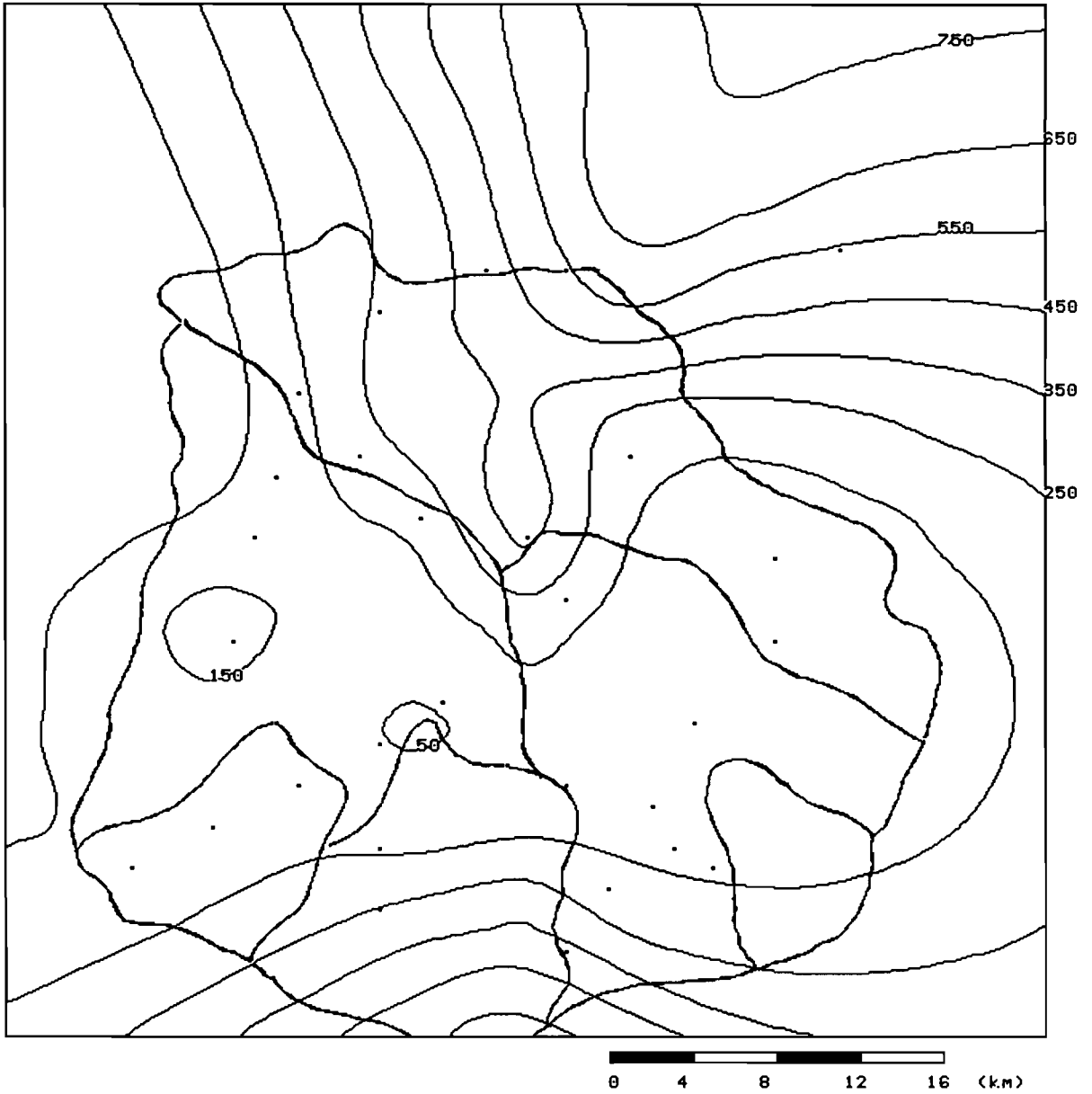
SPLINE BAM-BAM



15. 8.64

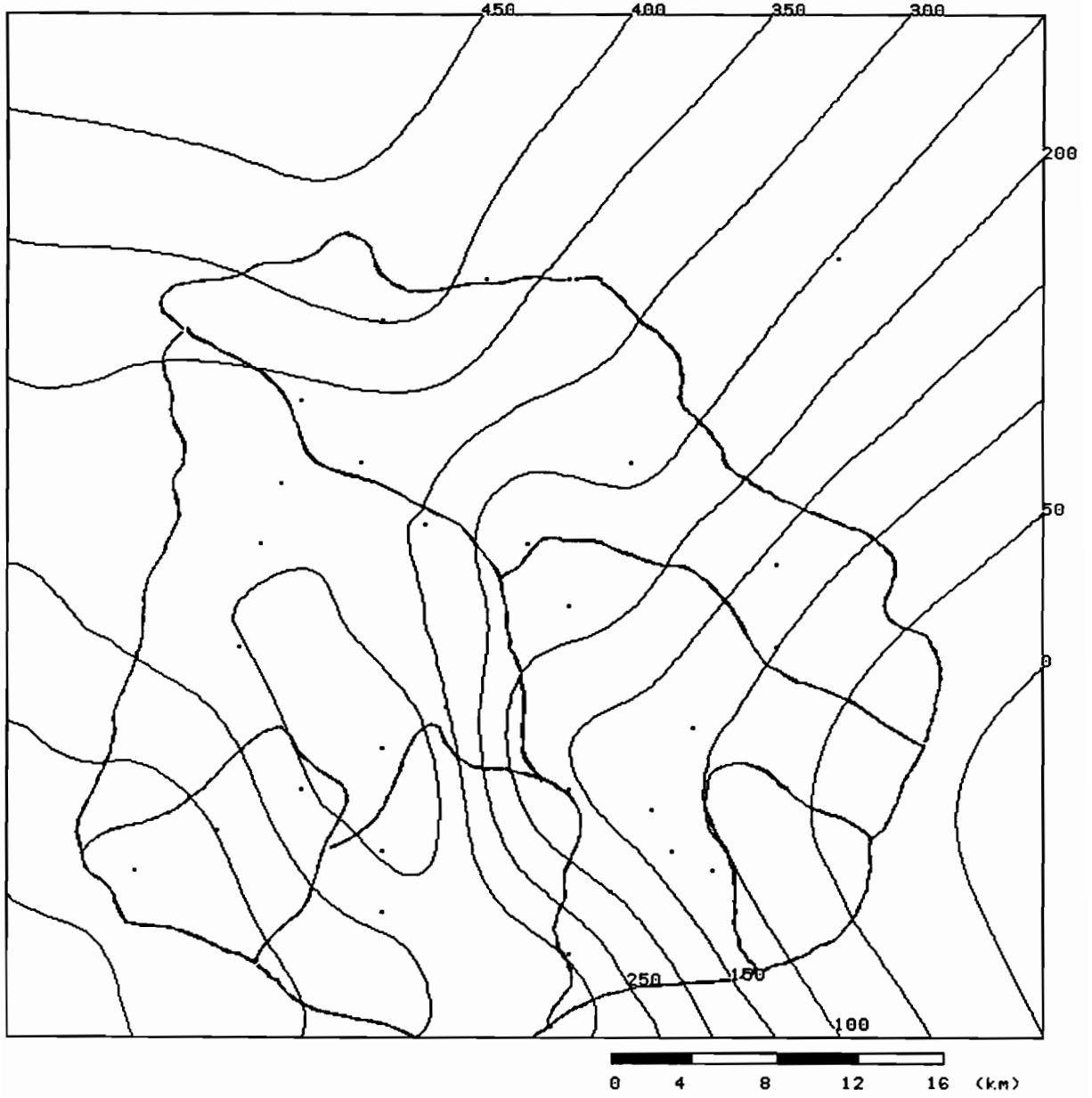
0 4 8 12 16 (km)

SPLINE BAM-BAM



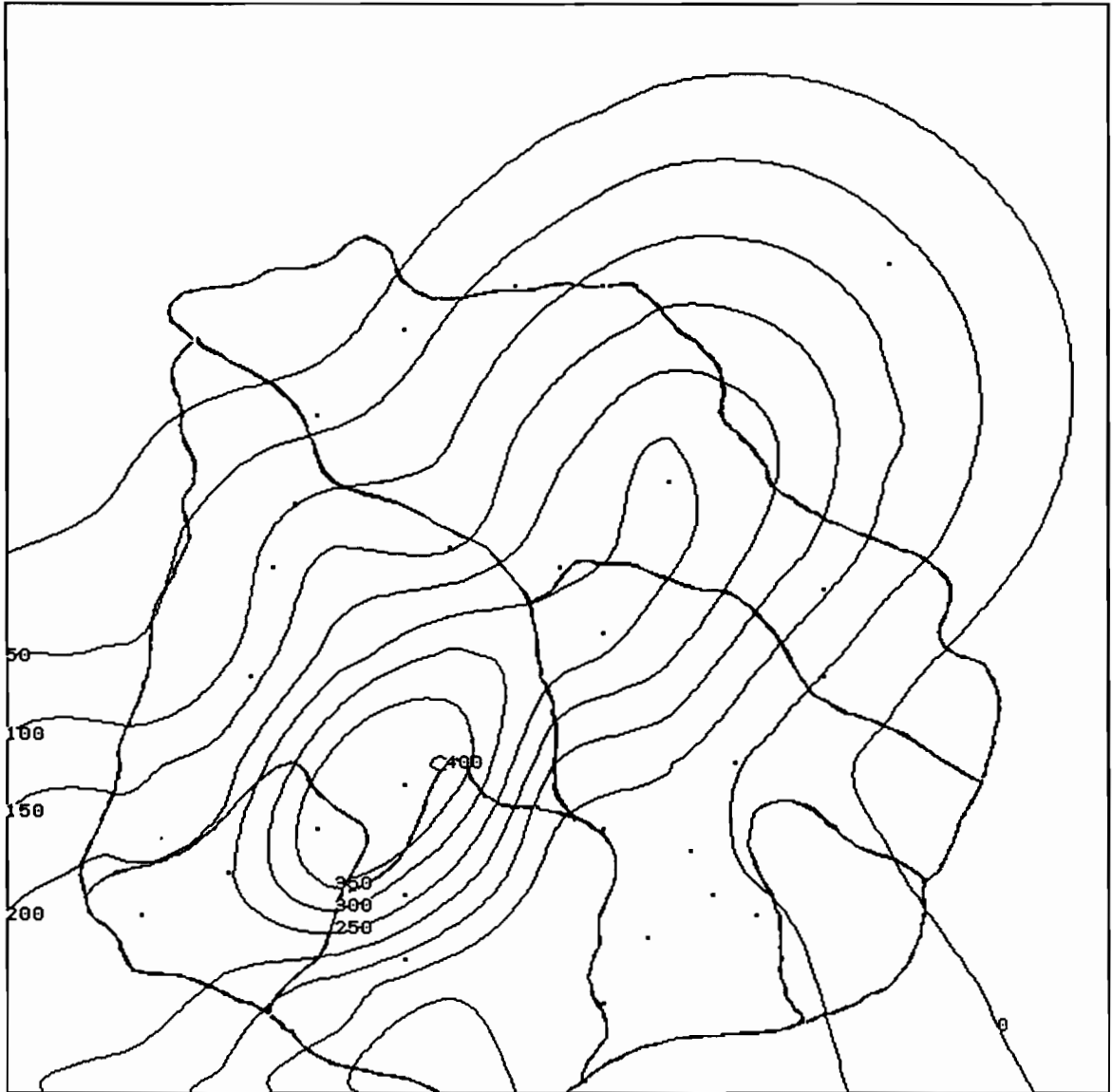
8. 8.64

SPLINE BAM-BAM



31. 8.63

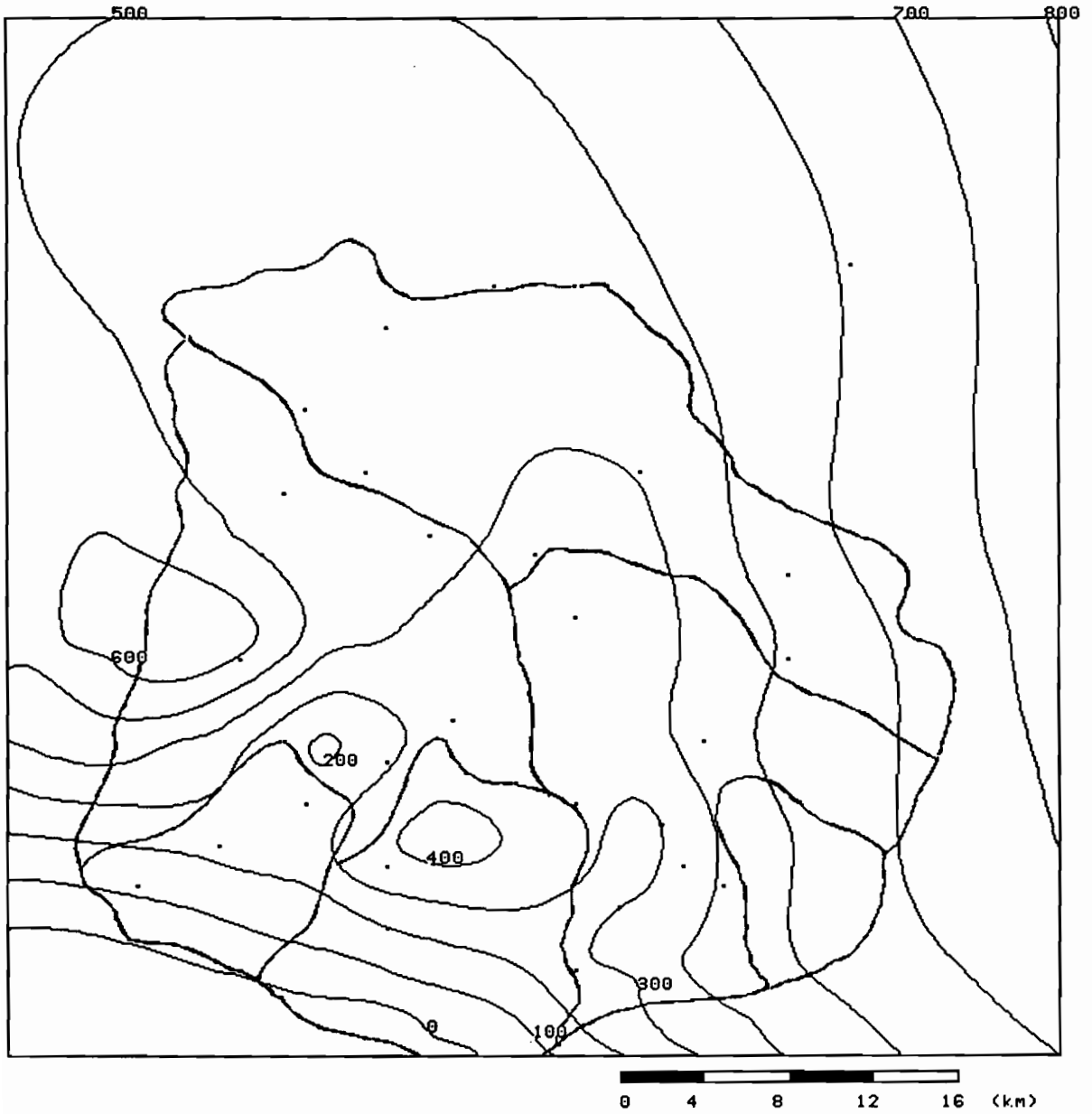
SPLINE BAM-BAM



23. 8.63

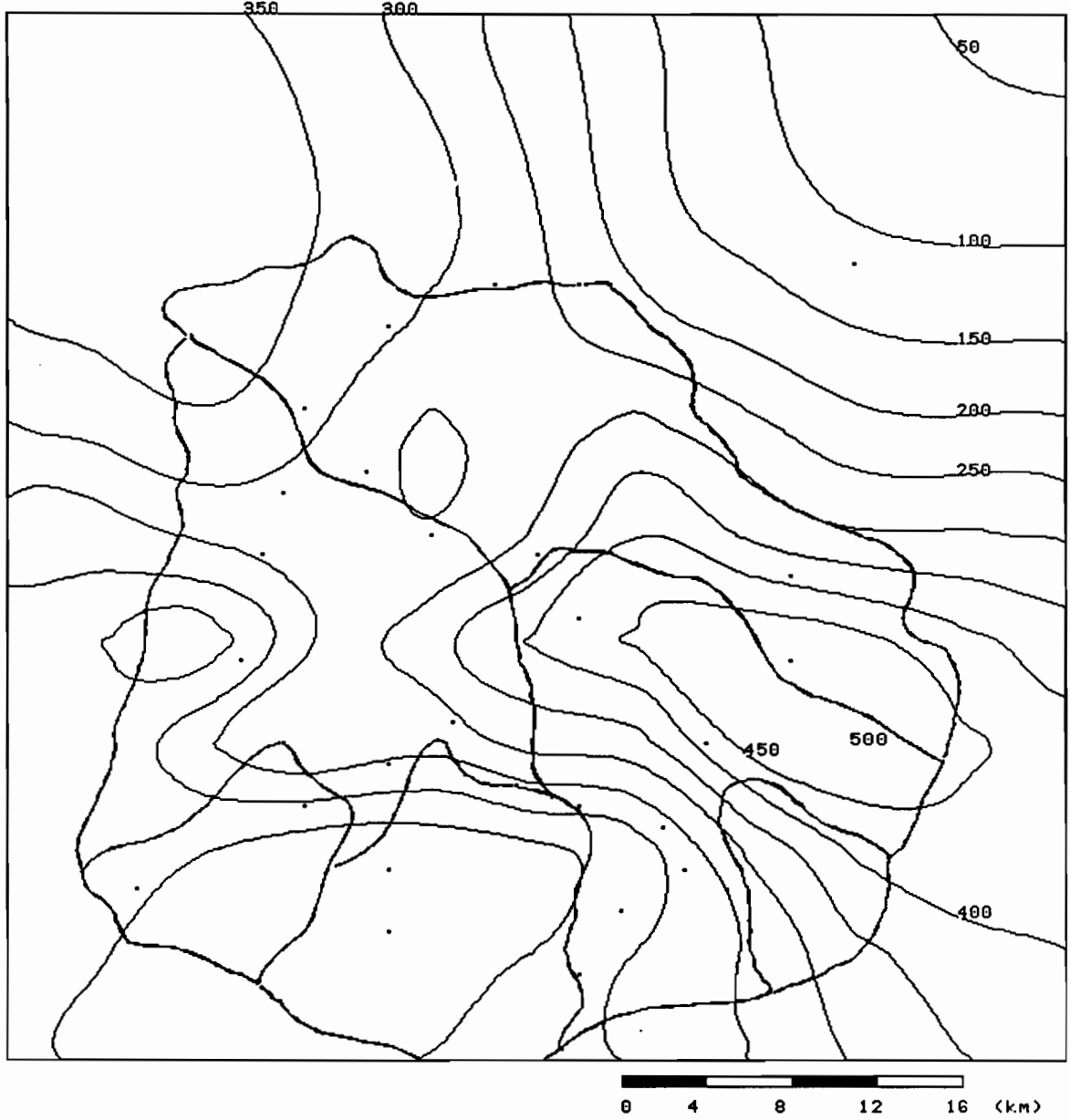
0 4 8 12 16 (km)

SPLINE BAM-BAM



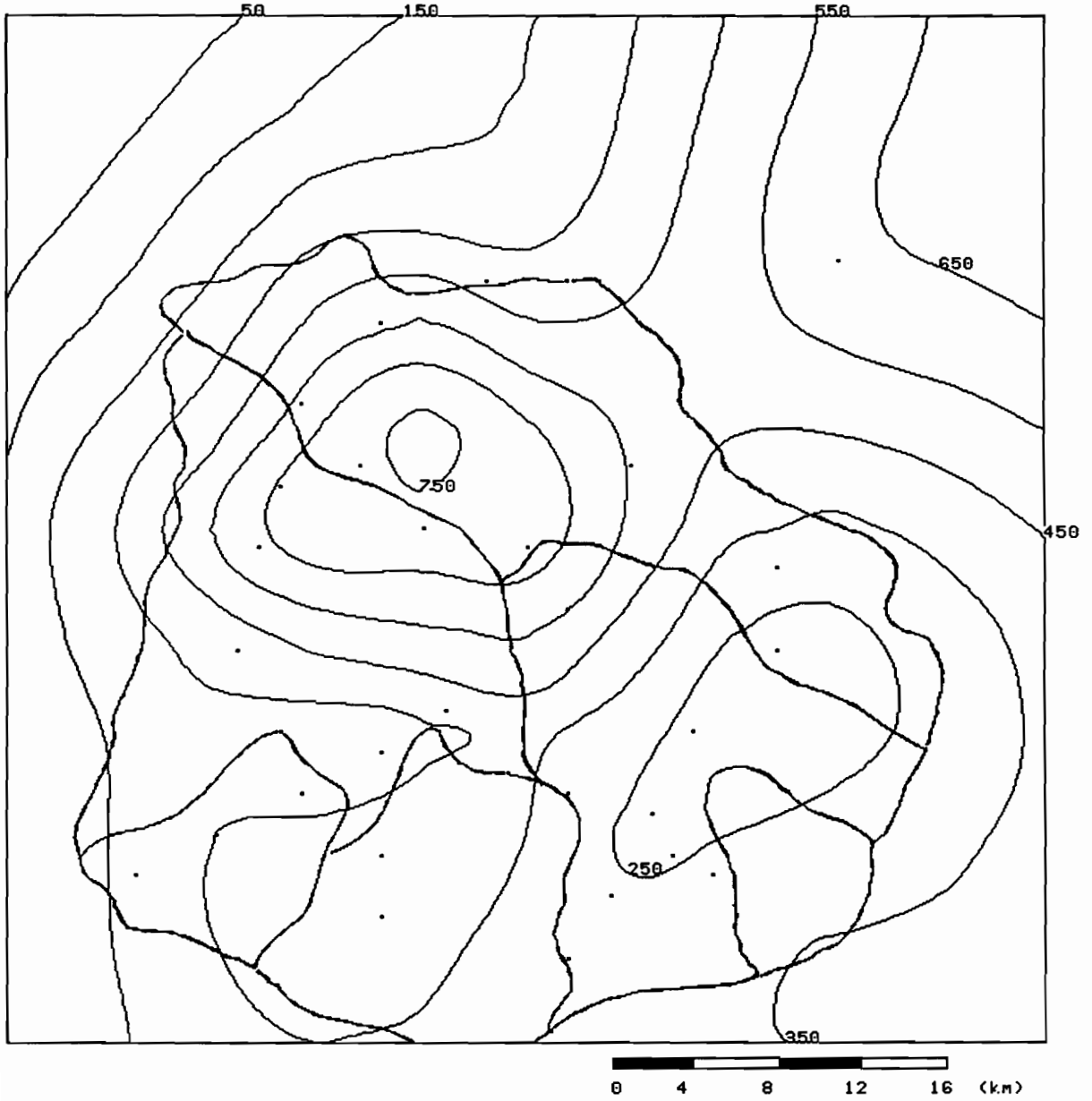
22. 8.63

SPLINE BAM-BAM



11. 8.63

SPLINE BAM-BAM



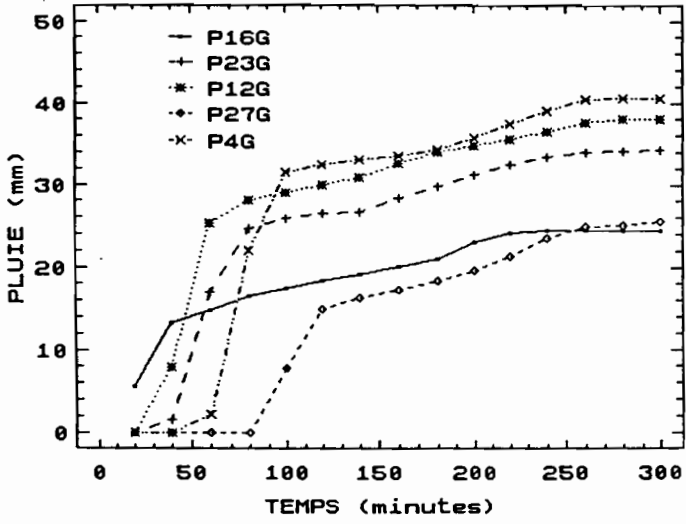
4. 8.63



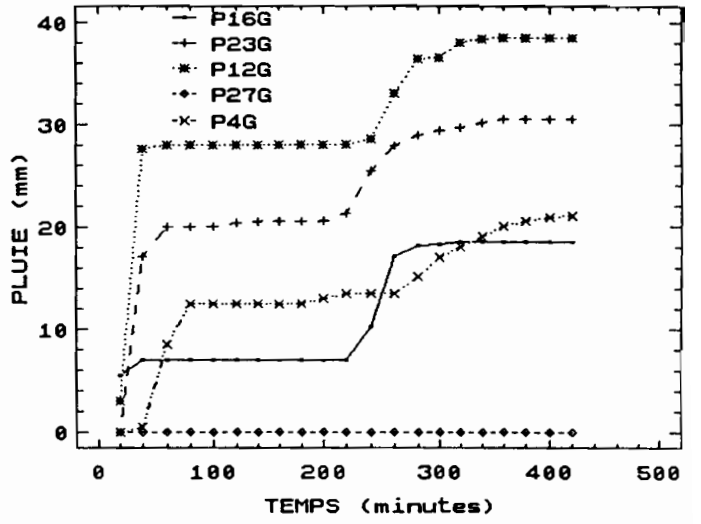
**ANNEXE 2 :**  
**Hyétogrammmes cumulés.**



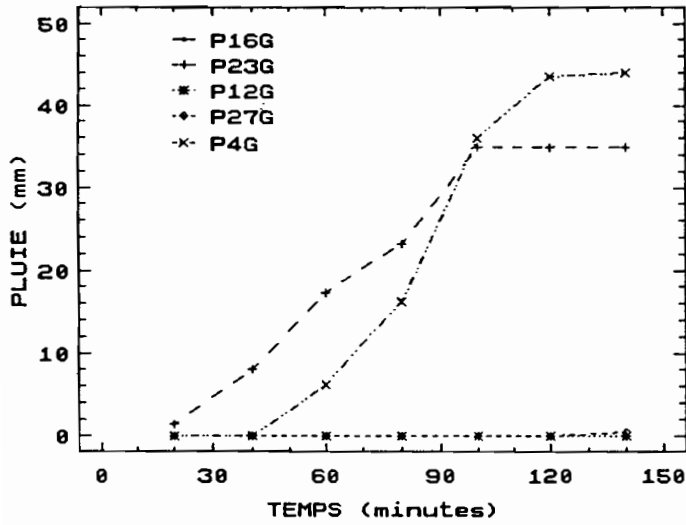
16 - 08 - 1966 (12 H 40)



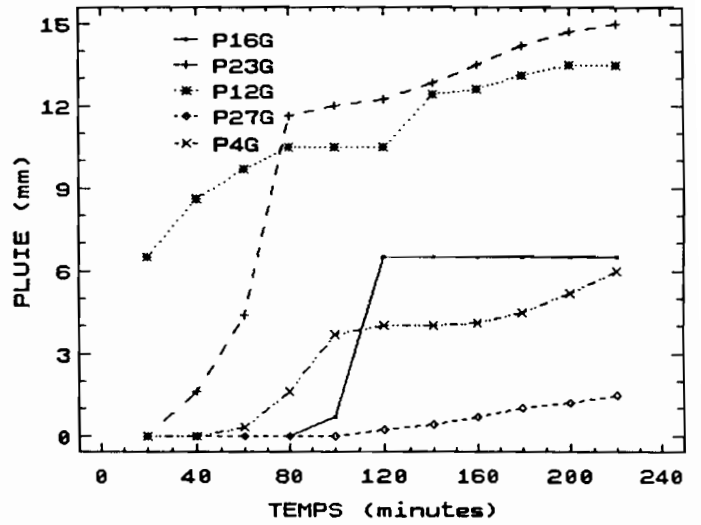
21 - 08 - 1966 (23 H 40)



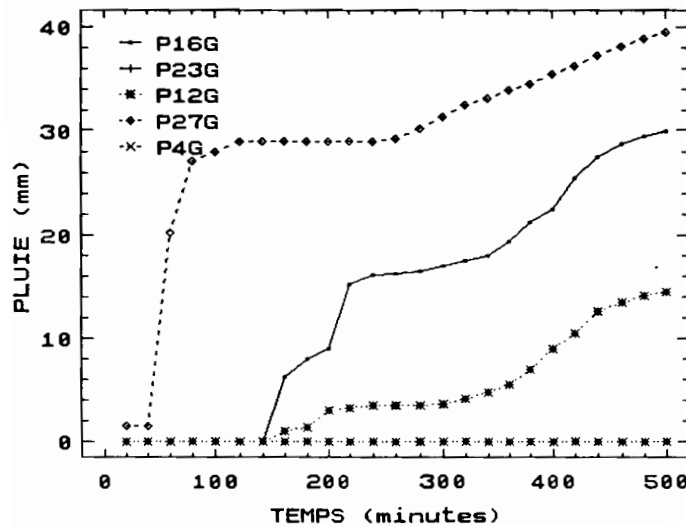
31 - 08 - 1966 (17 H 20)



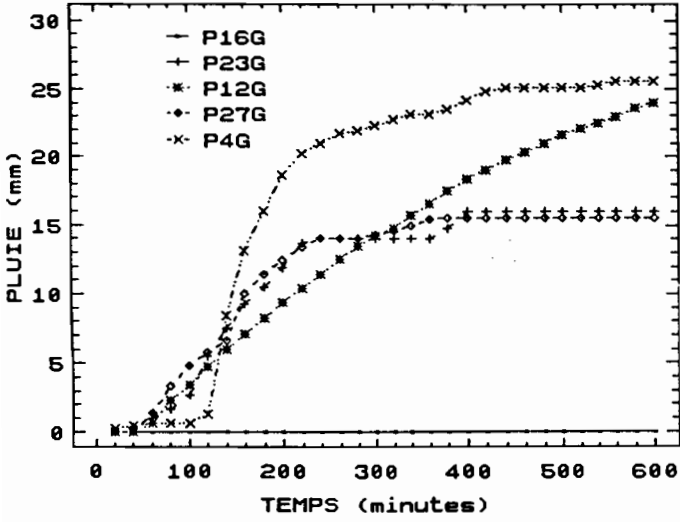
03 - 09 - 1966 (13 H 40)



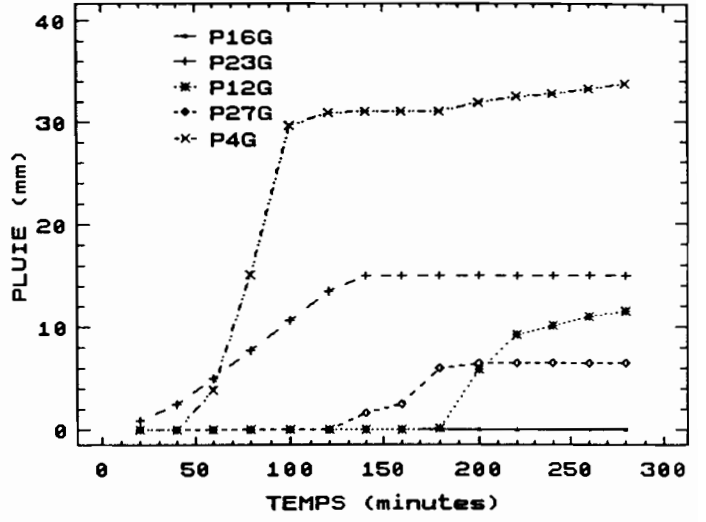
13 - 09 - 1966 (15 H 20)



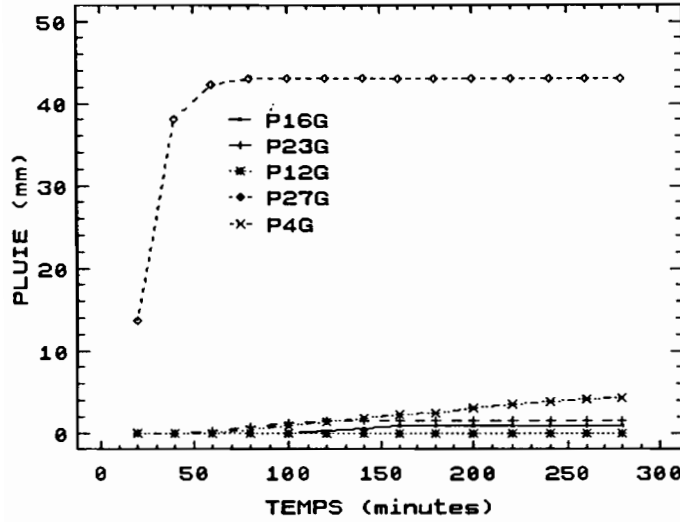
21 - 07 - 1966 (22 H 30)



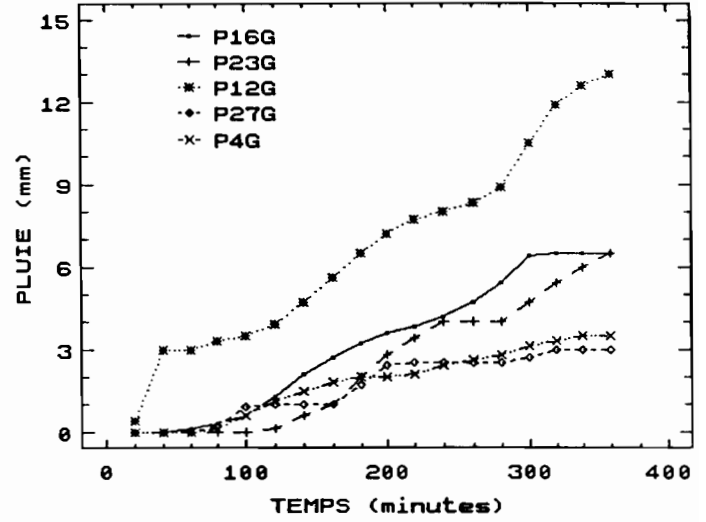
23 - 07 - 1966 (15 H 40)



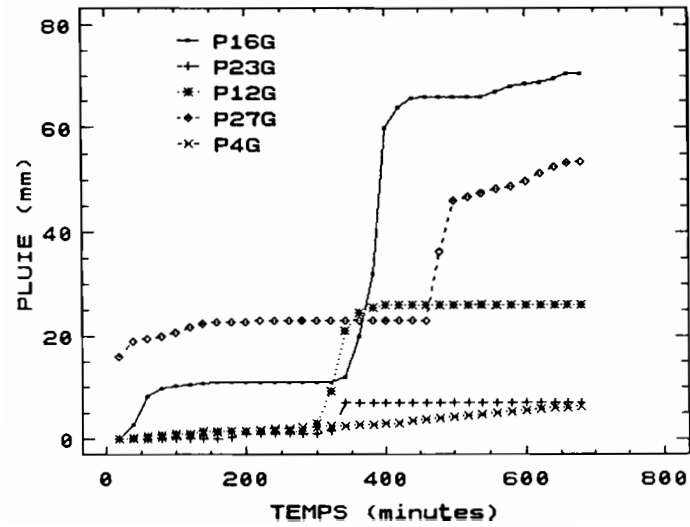
02 - 08 - 1966 (16 H 00)



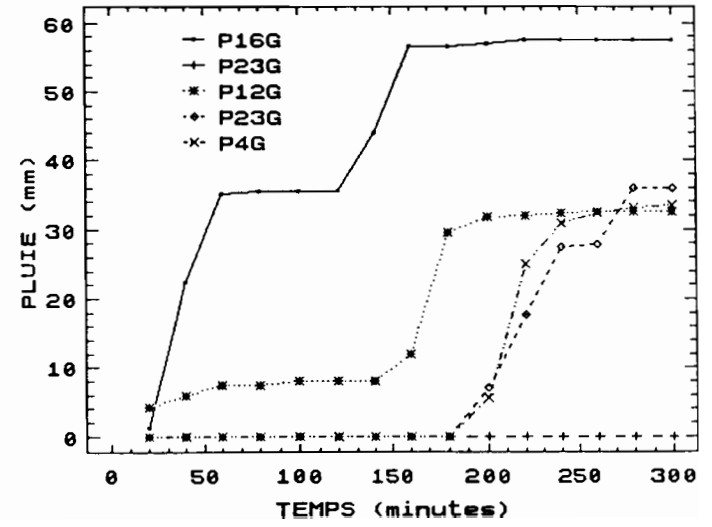
03 - 08 - 1966 (21 H 40)



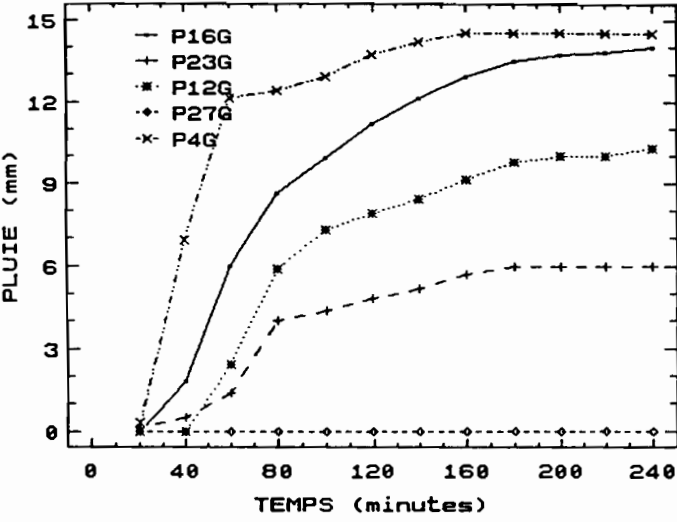
12 - 08 - 1966 (19 H 20)



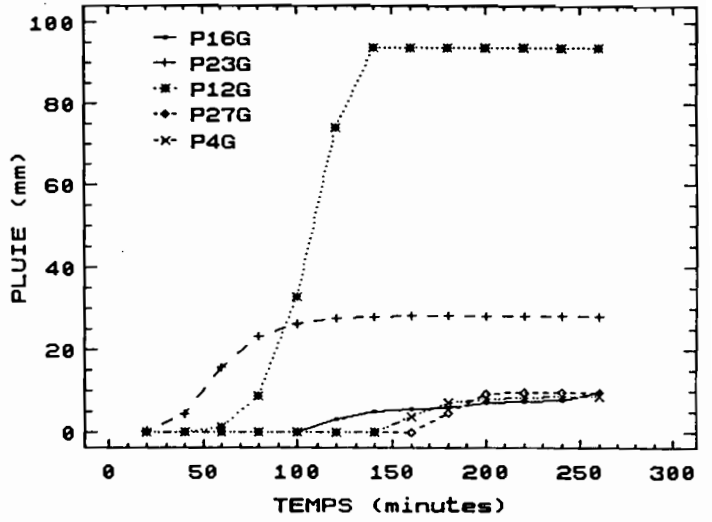
15 - 08 - 1966 (12 H 40)



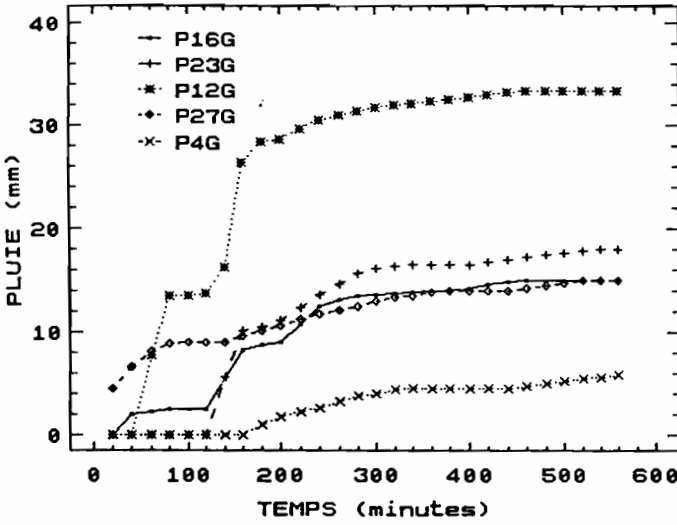
11 - 08 1965 (22 H 00)



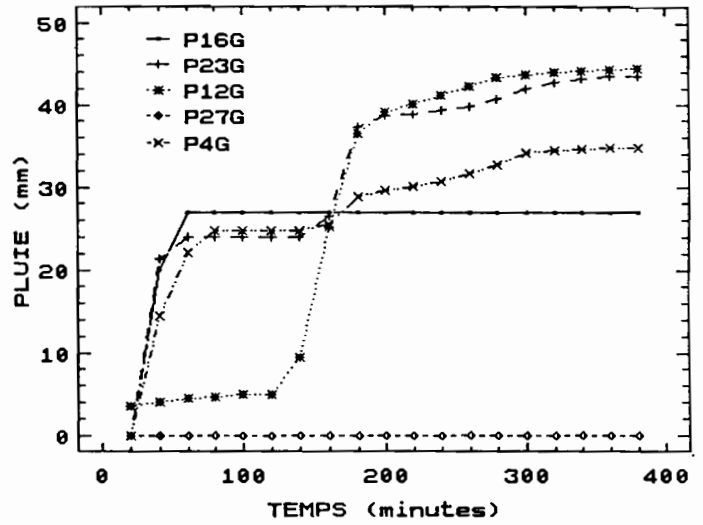
29 - 08 - 1965 (13 H 40)



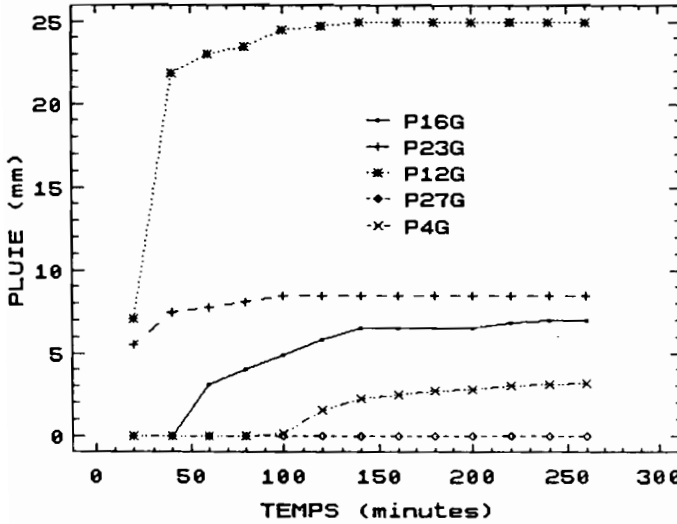
30 - 08 - 1965 (20 H 00)



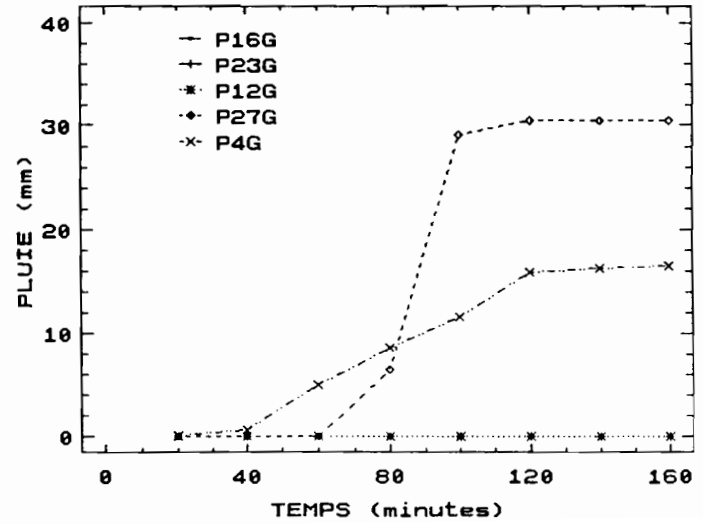
01 - 09 - 1965 (15 H 40)



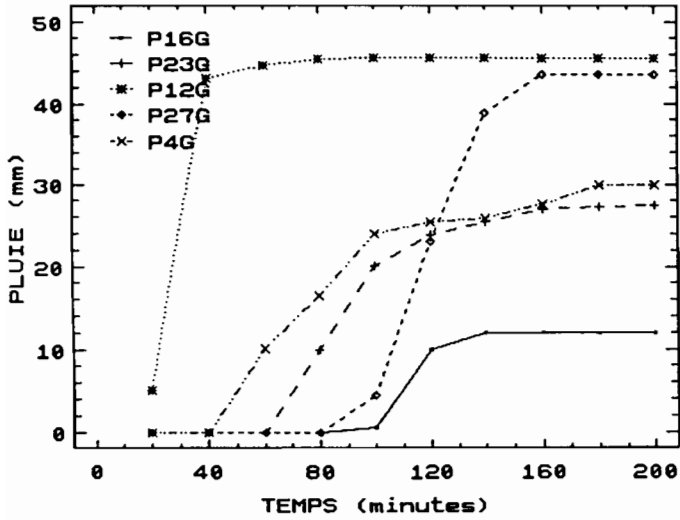
03 - 09 - 1965 (03 H 40)



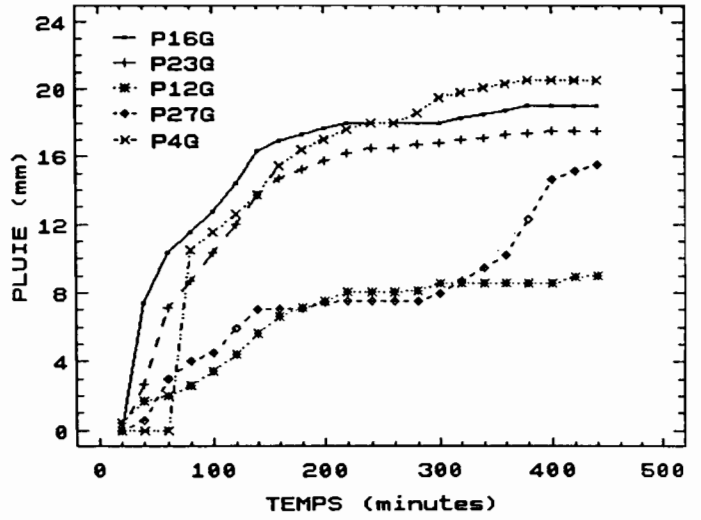
21 - 07 - 1966 (13 H 40)



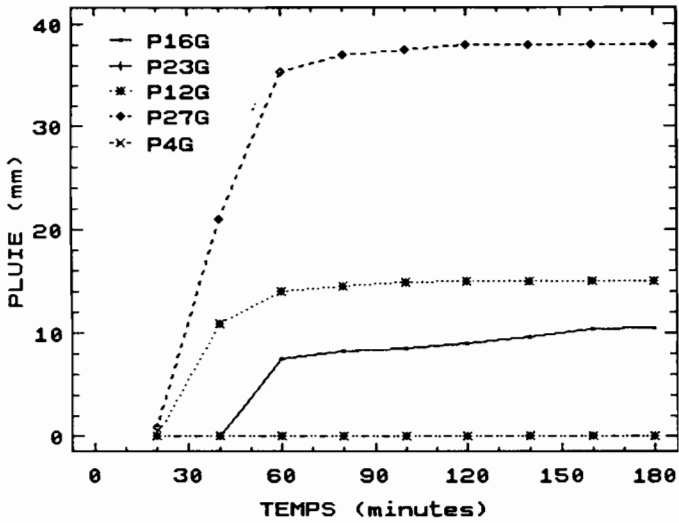
30 - 08 - 1964 (11 H 00)



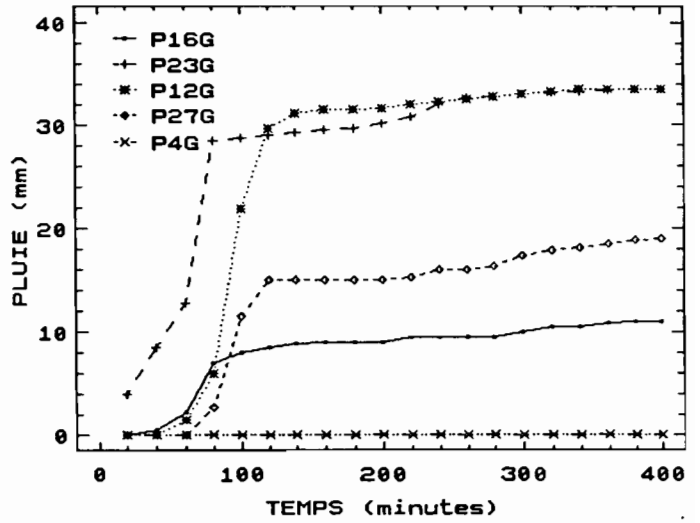
09 - 09 - 1964 (23 H 00)



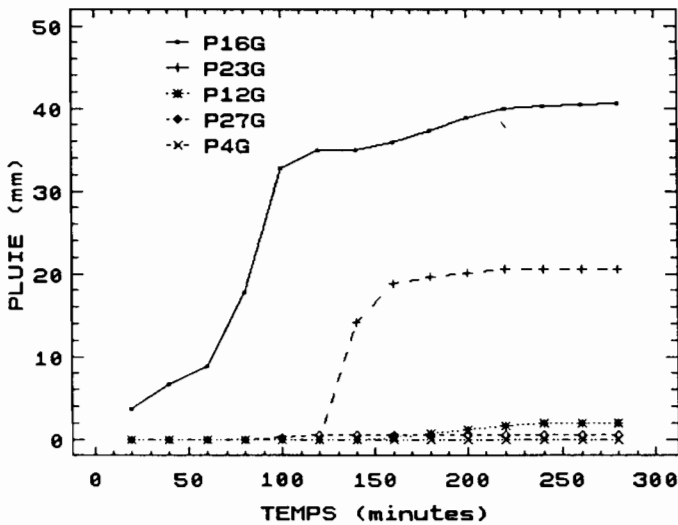
23 - 07 - 1965 (20 H 00)



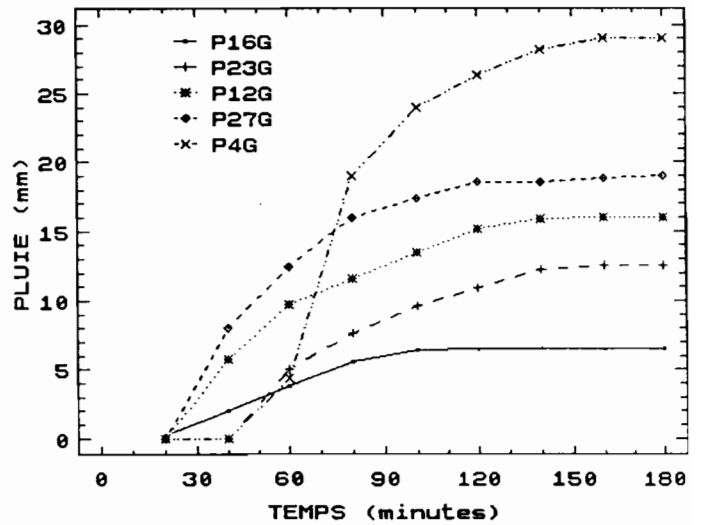
27 - 07 - 1965 (13 H 40)



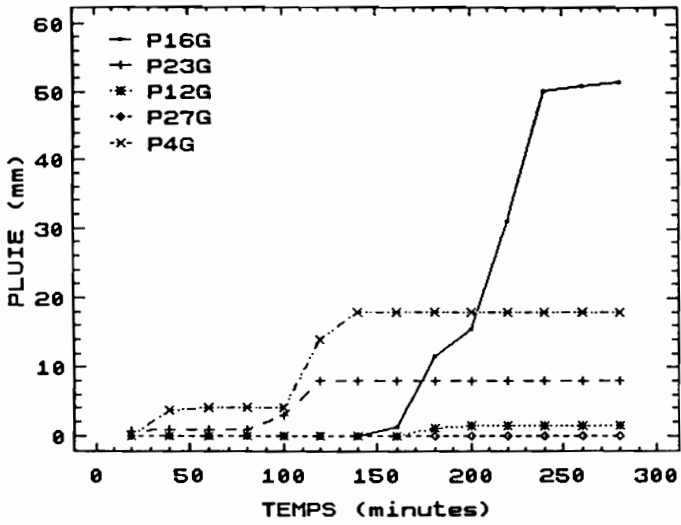
02 - 08 - 1965 (13 H 40)



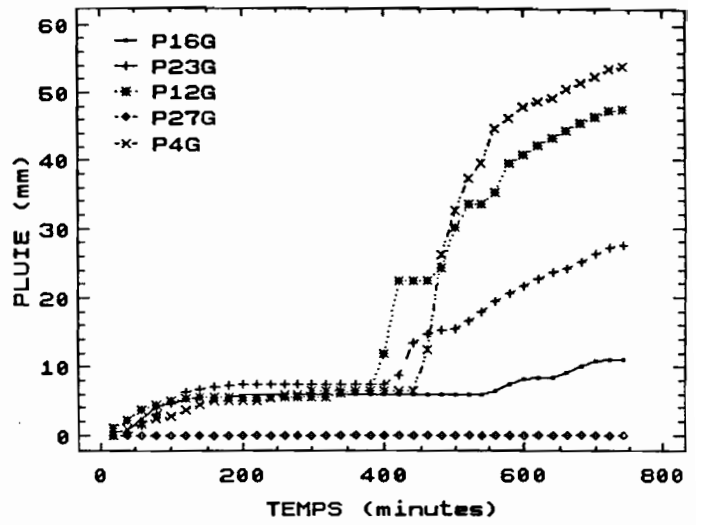
10 - 08 - 1965 (09 H 40)



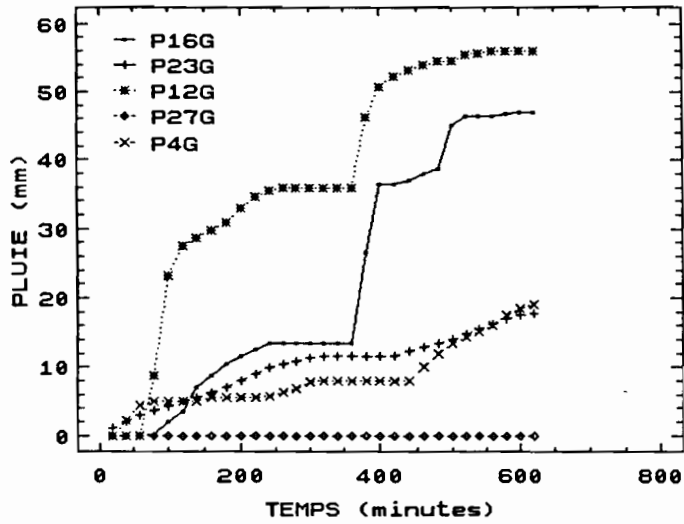
17 - 08 - 1964 (11 H 00)



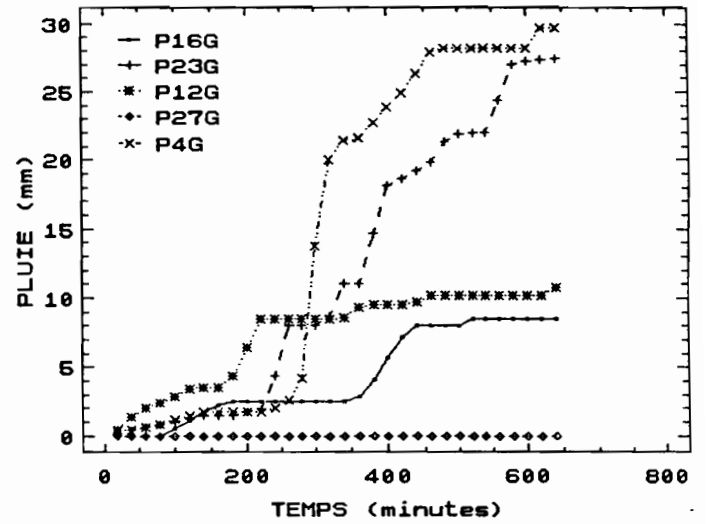
18 - 08 - 1964 (05 H 00)



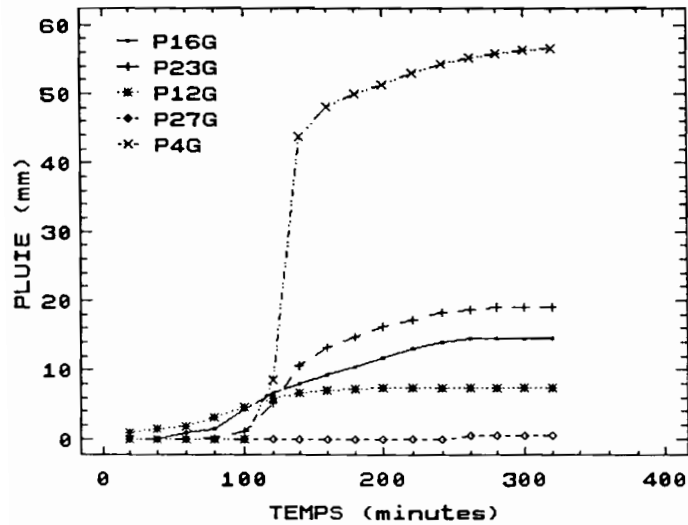
20 - 08 - 1964 (05 H 00)



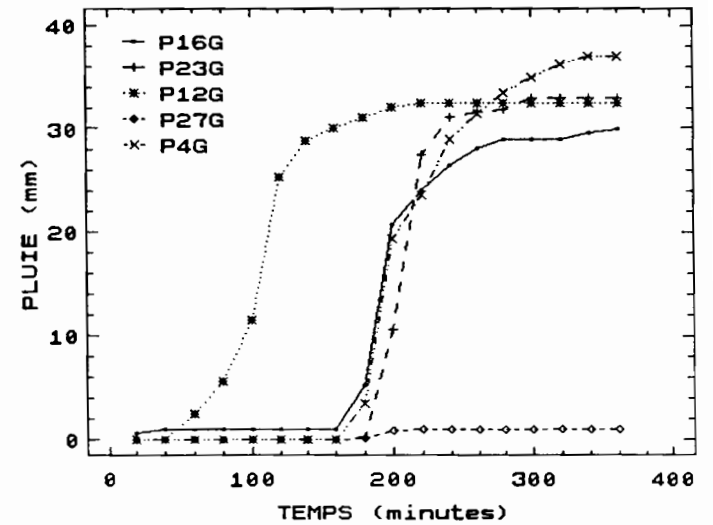
21 - 08 - 1964 (00 H 20)



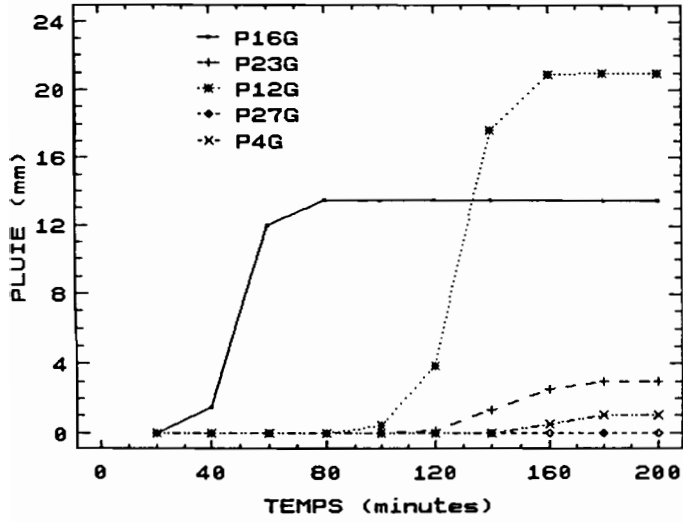
26 - 08 - 1964 (05 H 20)



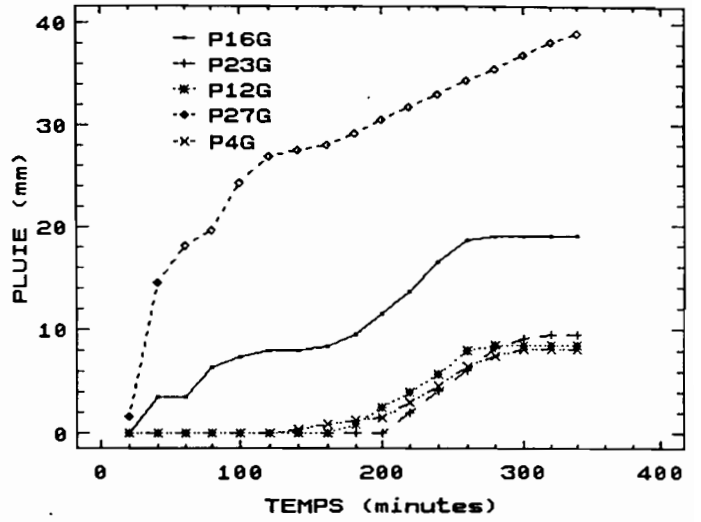
27 - 08 - 1964 (06 H 00)



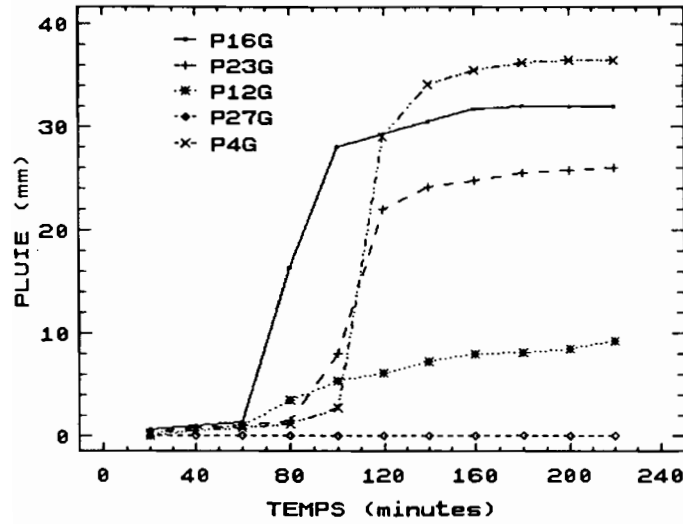
18 - 07 - 1964 ( 08 H 00 )



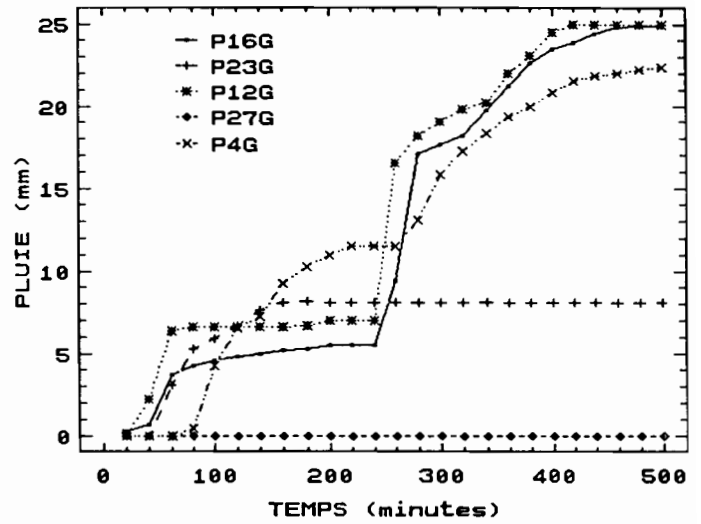
19 - 07 - 1964 (20 H 20)



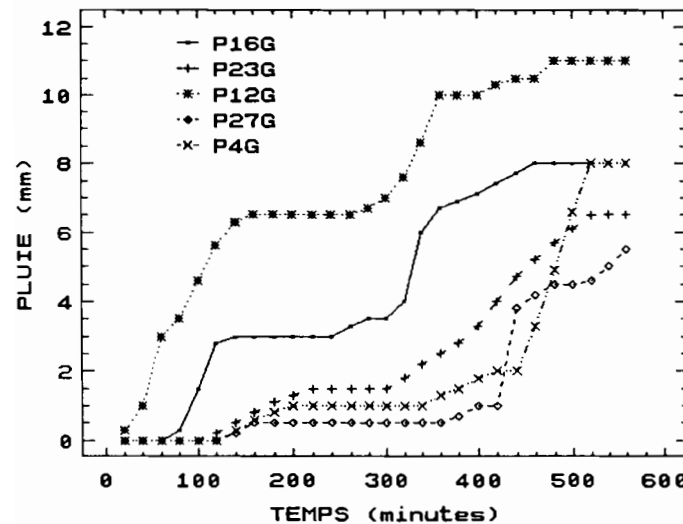
24 - 07 - 1964 (05 H 40)



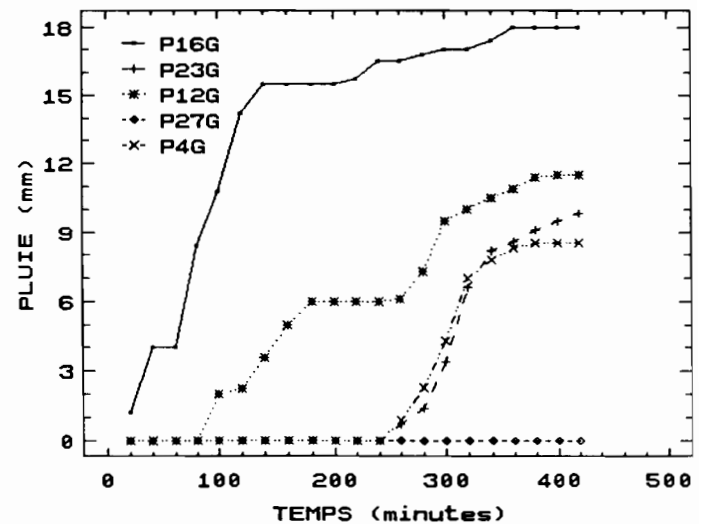
28 - 07 - 1964 (04 H 00)



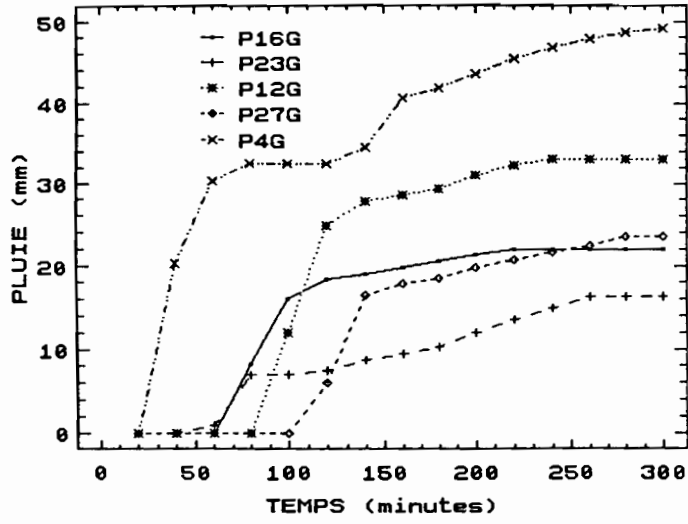
08 - 08 - 1964 (00 H 20)



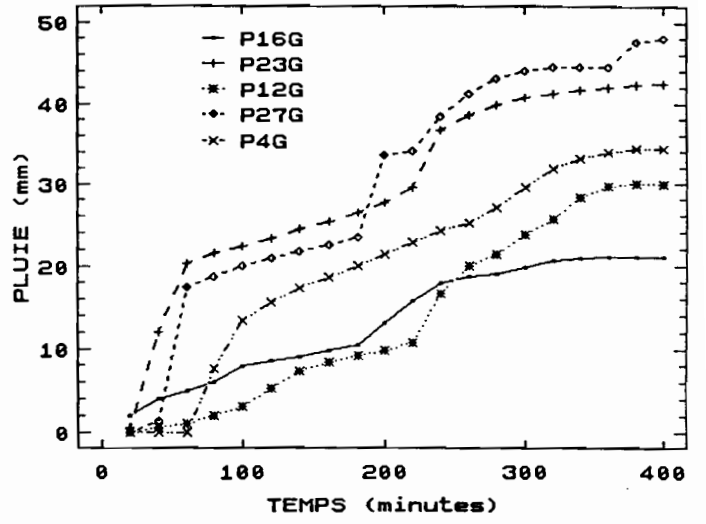
11 - 08 - 1964 (12 H 00)



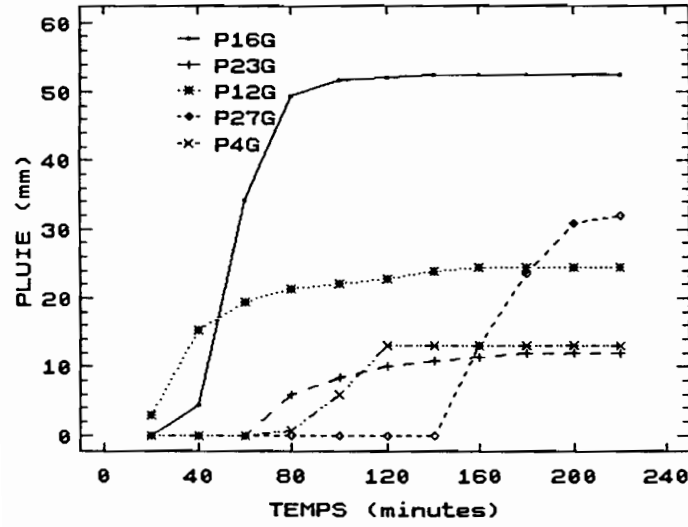
26 - 07 - 1963 (19 H 00)



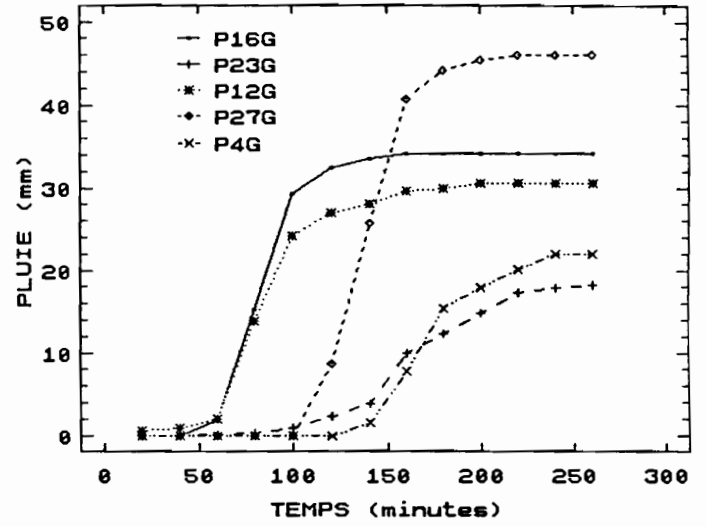
04 - 08 - 1963 (05 H 40)



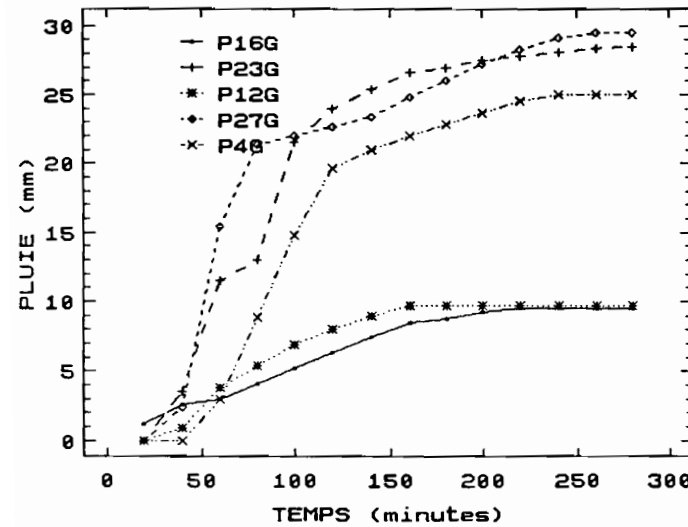
11 - 08 - 1963 (16 H 00)



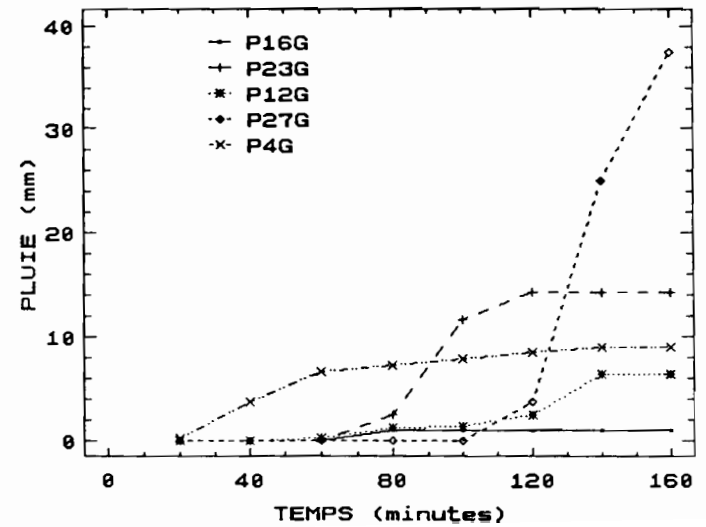
22 - 08 - 63 (03 H 20)



31 - 08 - 1963 (01 H 00)



18 - 07 - 1964 (04 H 00)

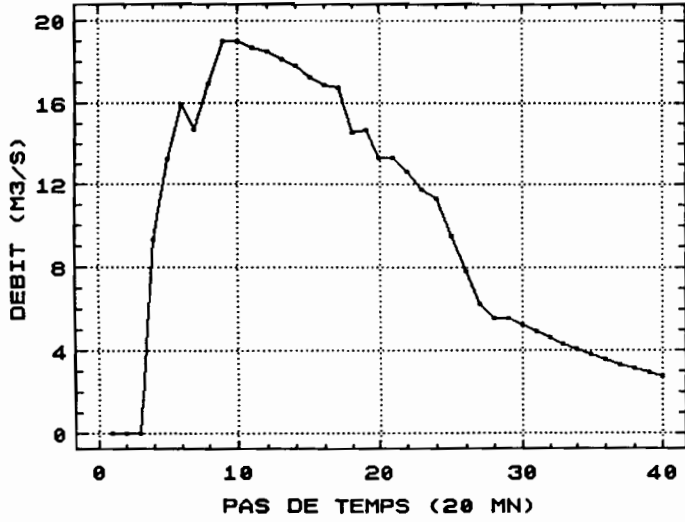




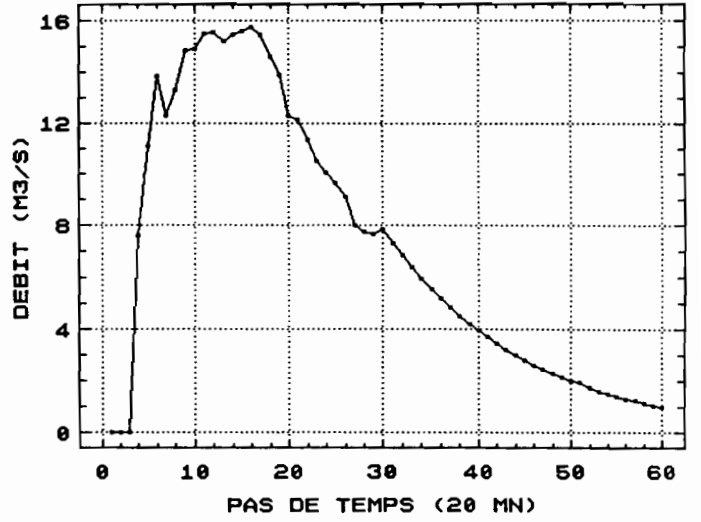
**ANNEXE 3 :**  
**Fonctions de transfert du bassin**  
**effectif de Barlo (tests de stabilité).**



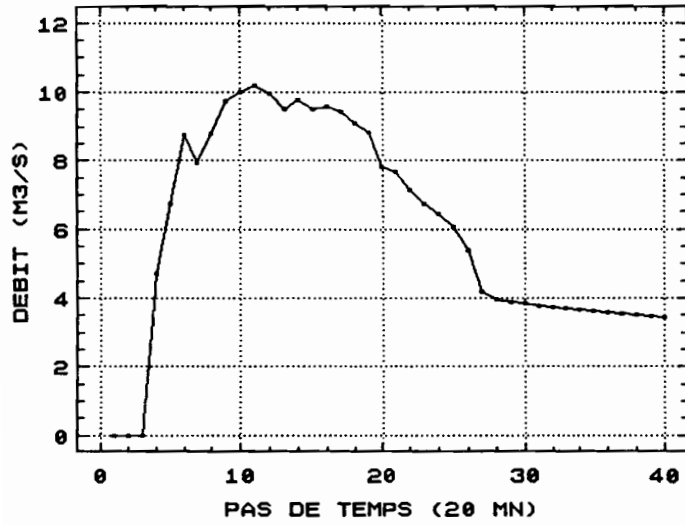
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE)



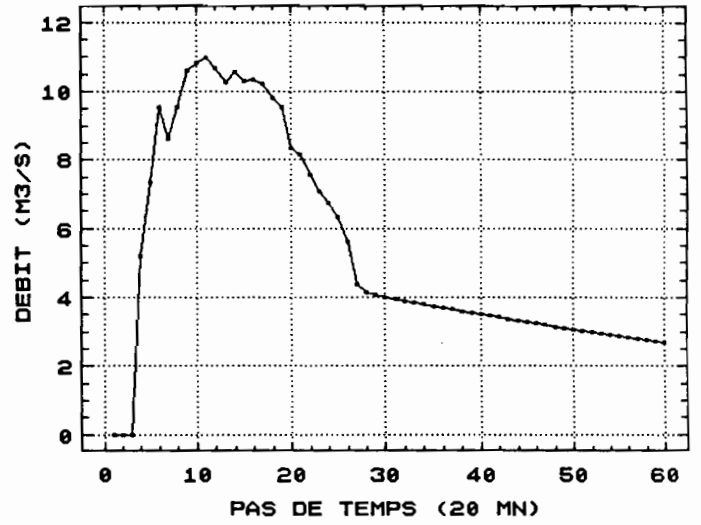
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE5)



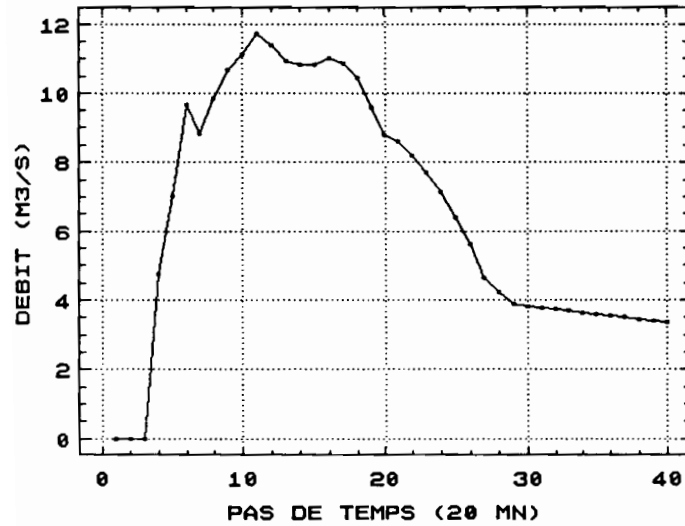
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BARLO EFFECTIF (RESTE1)



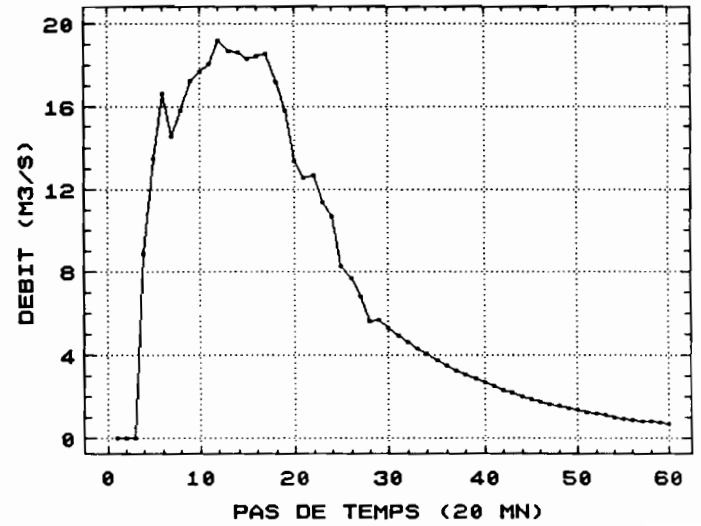
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE7)



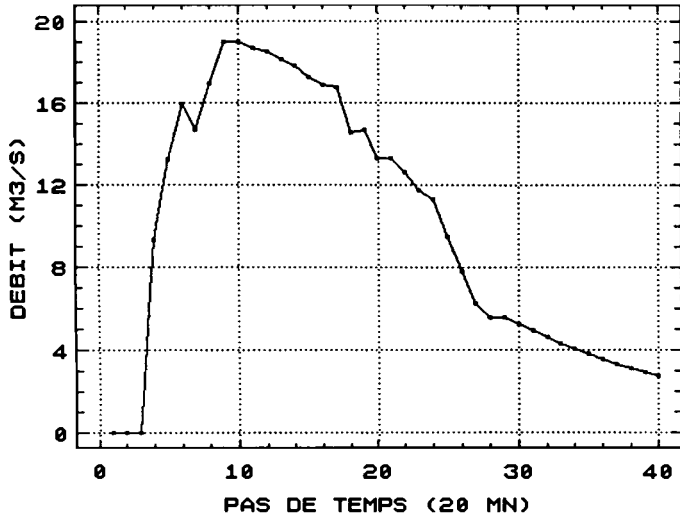
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE3)



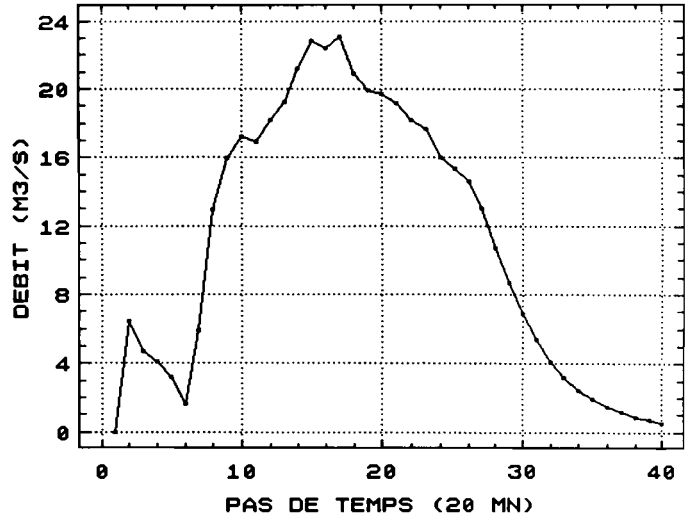
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE9)



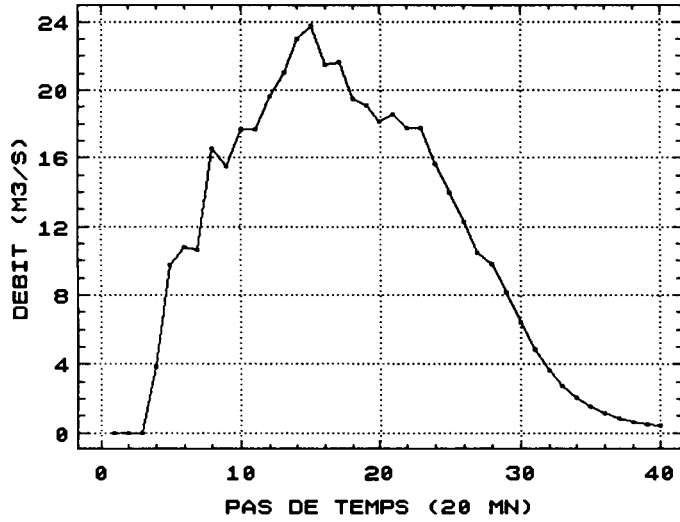
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE)



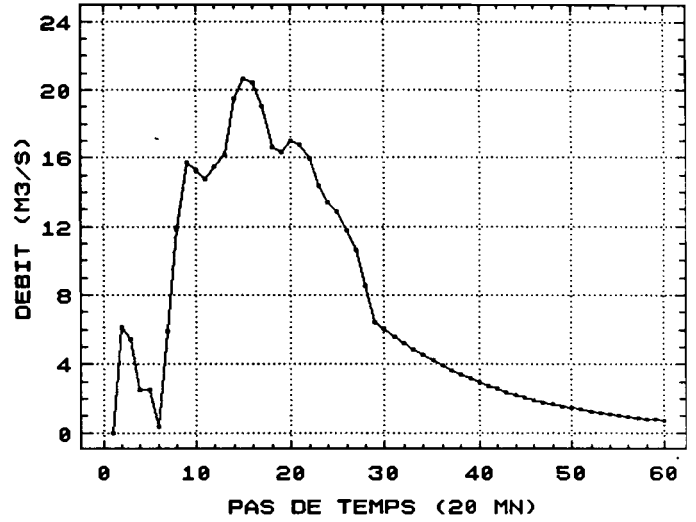
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE6)



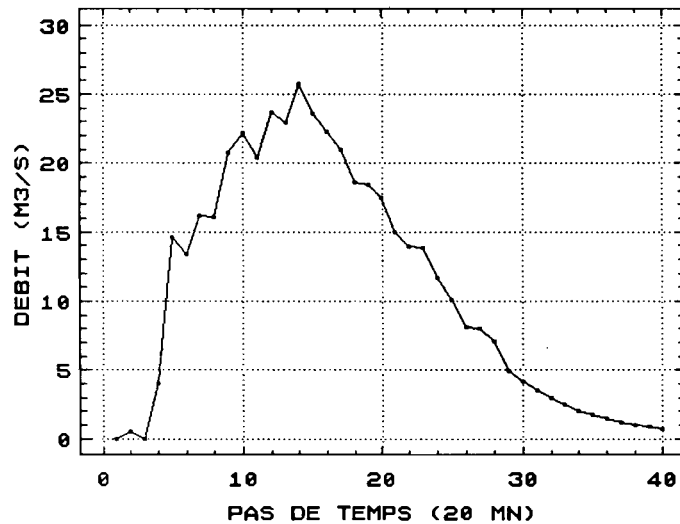
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE2)



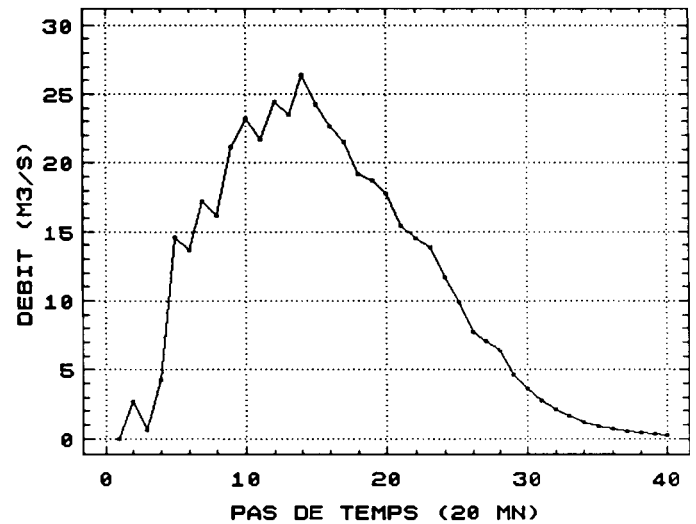
BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE8)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE4)



BARLO : FONCTION DE TRANSFERT  
BASSIN EFFECTIF (RESTE10)



## **Abstract**

The Bam-Bam catchment area is about 1196 km<sup>2</sup>, it is located in the sahelian region and is comprised by five jointed watersheds of different surfaces.

The dynamic study of rainfalls reflects the characteristics of precipitation (homogeneity of form, spatial distribution) in the sahelian region in general.

A hydrological model based on the unit hydrograph technique is used with aim of analysing and predetermining the floods for each sub-watershed.

The results obtained by a lumped model approach show the predominance of surface runoff in comparison with the other types of runoff (base runoff, delayed runoff).

An attempt using a distributed model shows that, for the watersheds greater than 100 km<sup>2</sup>, direct runoff is not predominant.

In order to improve modelisation in the sahelian region, we suggest the application of a process which takes into account other factors (geomorphological, pedological).

## **Keywords**

Sahel

Catchment

Unit Hydrograph

Flood

Rainfall-Runoff modelling

Flood prediction

## Résumé

D'une superficie de 1196 km<sup>2</sup>, le bassin versant du Bam-Bam est situé en région sahélienne et constitué de cinq bassins emboîtés de différentes tailles.

L'étude de la dynamique des pluies sur le bassin, reflète les caractéristiques pluviométriques (homogénéité des formes, répartition spatiale) du Sahel en général.

Un modèle hydrologique fondé sur la technique de l'hydrogramme unitaire est appliqué à chacun des bassins, avec comme objectif l'analyse et la prédétermination des crues.

Les résultats satisfaisants obtenus en approche globale, confirment dans une certaine mesure, la prépondérance du ruissellement rapide par rapport aux autres types d'écoulements (écoulement retardé, écoulement de base).

La tentative d'approche distribuée révèle l'importance d'un autre type d'écoulement que le ruissellement rapide pour les bassins de superficie supérieure à 100 km<sup>2</sup>.

Nous suggérons une démarche tenant compte d'autres facteurs (géomorphologiques, pédologiques) en vue d'une amélioration probable de la modélisation hydrologique dans le Sahel.

## Mots clés

Sahel

Bassin versant

Hydrogramme unitaire

Crue

Modèle pluie-débit

Prédétermination de crue