

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER II

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

T H E S E

présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT
spécialité : Mécanique, Génie mécanique, Génie civil.

**Modélisation globale de la relation pluie débit.
Application en zone de savanes soudanaises
(Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)**

par

Alain DEZETTER

Soutenue le 16 Septembre 1991 devant le Jury composé de :

MM.

BOCQUILLON Claude
MONIOD Frédéric
JACCON Gilbert
MICHEL Claude
SERVAT Eric

Président, rapporteur
Directeur de Thèse
Rapporteur

A mes parents,

A Sandrine,

AVANT-PROPOS

Au terme d'un premier contact avec la modélisation pluie débit, en 1986, un long chemin, semé d'embûches et d'expériences enrichissantes, de découragement et d'espoirs, s'est petit à petit déroulé jusqu'à la parution de ce document.

Je ne saurais trouver les mots nécessaires pour exprimer mes remerciements à celui qui a suivi quotidiennement le déroulement de ce chemin, Eric SERVAT. En assurant, entre autres, l'encadrement scientifique et matériel quotidien, de cette thèse, il a contribué, à plus d'un titre, à créer les conditions nécessaires et indispensables à la réalisation de nos travaux. Sa rigueur scientifique et son pragmatisme furent un apport non négligeable à l'avancement de ce mémoire.

Je souhaite exprimer mes remerciements au Professeur Claude BOCQUILLON, Responsable de la Formation Doctorale et rapporteur de cette thèse. Les conseils et le suivi attentif, malgré l'éloignement, qu'il nous a prodigués ont toujours été précieux.

Frédéric MONIOD, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, a assuré la fonction de Directeur de Thèse, malgré l'éloignement. Je l'en remercie vivement.

Je voudrais que Gilbert JACCON, Directeur de Recherches à l'ORSTOM et Directeur du Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier, trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements. Il a accepté la lourde tâche d'être le second rapporteur de cette thèse et m'a accueilli au sein du Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier afin de me permettre d'apporter la touche finale à ce mémoire.

Claude MICHEL, du CEMAGREF, est l'auteur du modèle GR3, largement exploité tout au long de nos travaux. Je le remercie vivement d'avoir accepté de juger ce travail.

Je souhaite également remercier Jean-Marc LAPETITE, Technicien à l'Antenne Hydrologique de l'ORSTOM en Côte d'Ivoire, pour sa contribution, notamment, au traitement des données d'évapotranspiration et à la réalisation des cartes.

Je remercie tout le personnel du Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier et d'Abidjan pour leurs contributions diverses mais néanmoins importantes.

Il convient de remercier ici les services Ivoiriens de gestion des réseaux pour la mise à disposition de leurs données, sans lesquelles ce travail n'aurait pas été possible. L'ANAM (Agence Nationale des Aéroports et de la Météorologie) pour les données pluviométriques, et la DRES (Direction des Ressources en Eau de Surface), en la personne de Mamadou SAKHO, son Directeur, pour la mise à disposition des données hydrométriques.

Enfin, je remercie Sandrine, ma femme, pour sa compréhension, le réconfort moral et affectif prodigué sans relâche, mais également pour la saisie informatique de la majeure partie de ce document.

RESUME

Trois modèles globaux de relation pluie débit (CREC, GR3 et MODGLO) sont utilisés en zone de savanes soudanaises dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, dans un but de prévision des apports décennaux et de gestion des ressources en eau. Après la sélection d'un critère numérique de calage et la mise au point d'un module d'évaluation comparative des hydrogrammes, les trois modèles sont calés pour 91 stations-années réparties en 20 bassins versants de 120 à 4700 km². L'analyse de ces calages conduit à la mise au point d'équations de prédétermination des paramètres incluant des paramètres d'occupation du sol (% de cultures). Ces équations, une fois testées et validées, permettent d'envisager l'utilisation de ces modèles pour des bassins versants non jaugés afin de fournir des hydrogrammes décennaux de précision acceptable pour des aménageurs et des gestionnaires de projets à vocation agricole.

ABSTRACT

Three lumped models of rainfall-runoff relationship (CREC, GR3 and MODGLO) are applied on a sudanese savannah area, in the North-West of Ivory Coast, for the purpose of water supplies forecasting with ten day time steps and water resources management. After selecting a calibration objective function and setting up a comparative evaluation module of hydrographs, the three models are calibrated with a set of 91 stations-years data distributed on 20 catchment basins whose size ranges from 120 to 4700 km². The analysis of these adjustments leads to predetermination equations of the parameters of the models, including soil uses characteristics (e.g. : percentage of cultivation). Once tested and validated, these equations applied to non-gauged catchment basins provide ten day time steps hydrographs accurate enough for developments studies requiring water resources information.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	11
2. PREMIERE PARTIE	15
2.1. Description du milieu physique.....	15
2.2. Critique et Analyse des données.....	38
2.3. Modèles Pluie Débit.....	86
2.4. Développements informatiques.....	100
3. DEUXIEME PARTIE.....	111
3.1. Etude et Sélection des critères numériques de calage.....	111
3.2. Calage des modèles.....	127
3.3. Validations croisées et Analyse des calages.....	147
3.4. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres.....	165
3.5. Conclusions.....	194
4. TROISIEME PARTIE.....	197
4.1. Validation des équations de prédétermination.....	198
4.2. Comparaison avec des modèles autorégressifs.....	230
4.3. Modifications.....	239
5. CONCLUSION	250
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	253
TABLE DES MATIERES	259
Liste des Tableaux	267
Liste des Figures.....	271

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

L'ensemble du travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre du programme ERREAU, Evaluation Régionale des Ressources en Eau, mis en place et développé en Côte d'Ivoire par l'unité de recherches "Etude et gestion des Ressources en Eau" de l'ORSTOM. Il a pour objectif essentiel la mise au point et l'application d'une méthodologie permettant d'évaluer les apports, en continu, à l'exutoire de bassins versants de dimensions variées, (100 à 6500 km²) de zones climatiques différentes, jaugés ou non.

Les objectifs visés par le programme ERREAU, d'une part, et les tailles de bassins versants retenus, d'autre part, cadrent avec la démarche qui est habituellement celle des aménageurs et des gestionnaires de projets. Dans un souci de retombées pratiques et rapides, nous nous sommes donc placés de leur point de vue. La conséquence immédiate en est l'utilisation des seules données des réseaux de mesure nationaux de Côte d'Ivoire. Ces données (pluviométrie, hydrométrie), recueillies au pas de temps journalier à des stations dont la densité d'implantation reste relativement faible, constituent la seule source de données accessible en permanence et ne nécessitant pas l'installation de nouveaux dispositifs de mesure coûteux.

Nos travaux en matière d'évaluation des ressources en eau étant réalisés dans une optique de gestion et d'aménagement, la méthodologie définie cherche à reproduire des hydrogrammes annuels ou pluriannuels aux pas de temps décennaux et mensuels, fréquemment utilisés en agronomie.

Cette méthodologie nécessite l'emploi de la modélisation globale de la relation pluie-débit. Les modèles conceptuels globaux retenus sont utilisés au pas de temps journalier pour les calculs ; le pas de temps d'interprétation des résultats étant la décennie ou le mois.

La Côte d'Ivoire comporte, du Nord au Sud, trois zones : la zone de savanes soudanaises, la zone de transition et la zone de forêts tropicales. Ce travail s'intéresse à la seule zone de savanes soudanaises sur laquelle nous avons mis au point et testé la méthodologie. L'extension aux autres zones est en cours et fait l'objet des travaux de Brou KOUAME, attaché de recherches au Ministère de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire.

La première partie de ce document présente le cadre général dans lequel ce travail a été réalisé. Après une description du milieu physique comprenant une caractérisation climatologique et hydrologique de la Côte d'Ivoire, l'inventaire, l'analyse et la critique des données sont présentés. Cette critique concerne essentiellement les données de pluies et de débits, mais on trouve également des données d'évapotranspiration et des cartes d'occupation des sols. L'environnement scientifique et informatique est ensuite présenté par une description des schémas conceptuels et du fonctionnement des modèles utilisés. Les logiciels conçus, qui viennent s'inscrire dans un ensemble informatique plus large, sont décrits en tant qu'outils élaborés lors de ces travaux de recherche.

Dans la deuxième partie, la méthodologie est détaillée et analysée. Choix et orientations retenus sont expliqués. Les calages des modèles sur les dix-sept bassins versants sélectionnés sont présentés et commentés, et les techniques classiques d'analyse de données (Corrélations, ACP, AFC, Régressions multiples) sont appliquées aux jeux de paramètres des modèles.

Les tests de validation sont regroupés dans la troisième partie. Les enseignements tirés permettent de proposer et de tester quelques améliorations possibles. Une évaluation comparative de la méthodologie permet enfin d'apprécier sa qualité au regard d'autres méthodes utilisées avec des objectifs similaires.

Retombées pratiques, améliorations, compléments et réorientations envisageables viennent conclure ces travaux de modélisation, réalisés dans un cadre strictement opérationnel, dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire.

PREMIERE PARTIE

2. PREMIERE PARTIE

Cette première partie est une présentation du contexte, au sens large du terme, dans lequel cette étude a été menée. On y trouvera, tout d'abord, une description du milieu physique de la Côte d'Ivoire dans son ensemble et, plus particulièrement, de la région Nord-Ouest, objet des travaux présentés ici.

Critique et analyse des données permettent ensuite de se rendre compte du volume et de la qualité des informations disponibles et traitées tant en pluviométrie qu'en hydrométrie.

La présentation des modèles globaux, conceptuels et déterministes, retenus dans le cadre du programme ERREAU permet d'appréhender les outils qui seront utilisés par la suite. Les différents mécanismes sont décrits et leur fonctionnement est analysé.

Les logiciels réalisés pour cette étude font l'objet d'une présentation détaillée. Ils constituent une première "chaîne de modélisation" qui s'inscrit dans un projet plus vaste de réalisation d'un logiciel intégré de modélisation pluie-débit.

2.1. Description du milieu physique

La République de Côte d'Ivoire est un pays d'Afrique de l'Ouest dont la limite méridionale est constituée par le Golfe de Guinée. Elle se situe approximativement dans un carré compris entre 4°30 et 10°30 de latitude Nord et 2°30 et 8°30 de longitude Ouest. Elle est entourée à l'Ouest par le Libéria et la Guinée, au Nord par le Mali et le Burkina Faso, à l'Est par le Ghana.

La Côte d'Ivoire représente "le triomphe de l'horizontalité" (Avenard, 1971) et il n'est pas pensable de la définir par des critères topographiques. Hormis à l'Ouest, le Cavally et le massif de Man, sa seule frontière naturelle est sa façade Atlantique au Sud. Les 322 000 km² qu'elle occupe sont partagés entre la forêt au Sud et la savane au Nord. Entre les deux une zone de transition est plus ou moins bien identifiée. La zone de savane occupe cependant la plus grande partie du pays avec 210 000 km².

2.1.1. Géomorphologie

La Côte d'Ivoire se situe sur la plate-forme ouest-africaine dont elle constitue une partie de la retombée méridionale. Son relief est celui d'une plaine dont l'altitude moyenne varie régulièrement de 400 m au Nord à 50 m au Sud, entrecoupée de collines orientées SSW-NNE. Le massif de Man à l'Ouest est la seule région montagneuse. Ce massif constitue un prolongement de la Dorsale Guinéenne et les altitudes y dépassent parfois 1000 m.

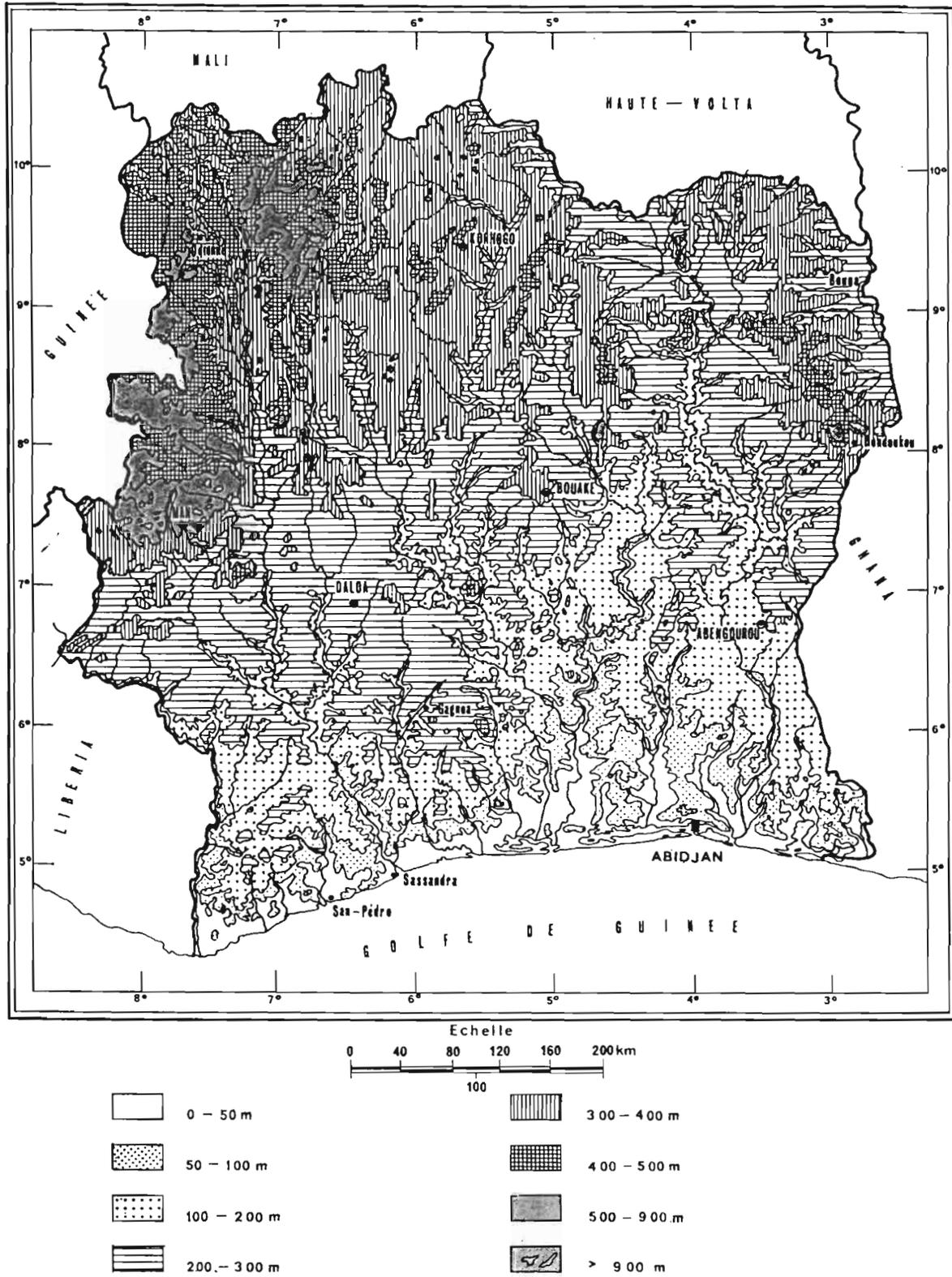


Figure 2.1.1 : Carte du relief de la Côte d'Ivoire (Avenard, 1971)

Avenard (1971), dans "le Milieu Naturel de la Côte d'Ivoire", distingue cinq zones dans la répartition des reliefs (Cf. Fig. 2.1.1) :

- la retombée orientale de la Dorsale Guinéenne.
- les plateaux du Nord.
- la zone de transition : glacis méridionaux et "Marche" Centrale.
- les bas pays intérieurs.
- la frange littorale.

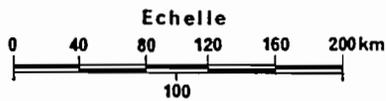
Le secteur Nord-Ouest, concerné par notre étude, recouvre essentiellement les deux premières zones : la retombée de la Dorsale Guinéenne et les plateaux du Nord. La carte présentée en figure 2.1.2 indique, plus précisément, que notre zone d'étude se situe dans les secteurs répertoriés comme I-2, I-31, I-32, et II-1 par Avenard (1971).

Le compartiment du Nord-Ouest (Odiène - Borotou, I-2) est limité par les frontières de la Guinée et du Mali, à l'Ouest et au Nord, par le Baoulé (affluent du Niger), à l'Est, et par la Tiamba et la FéréDougouba (bassin du Haut Sassandra), à l'Est et au Sud. Il s'agit d'un plateau d'altitude variant entre 450 et 400 m. Sur le substratum granitique ou gneissique on peut voir apparaître quelques rares reliefs sous forme de buttes et de collines (sud de la zone) ou de dômes de faible importance comme le Denguelé à l'Ouest d'Odiène (Alt : 813 m).

L'unité de Boundiali-Madinani (I-1) se situe à une altitude légèrement supérieure à 500 m. Les plateaux sont plus accidentés et à des altitudes plus diversifiées. Les reliefs individualisés prennent une plus grande importance dans le paysage comme le Tougoukoli à Tiémé (Alt : 828 m)

L'unité Mankono Séguéla (I-32) correspond à un ensemble homogène de plateaux s'abaissant légèrement du Nord vers le Sud et situé entre 400 et 300 m. On notera entre Mankono et Séguéla la présence d'une remarquable série de dômes cristallins qui constituent de typiques Inselbergs.

Dans les plateaux du Nord (II), le Nord proprement dit (II-1) est constitué de surfaces très aplanies, mollement ondulées, s'abaissant progressivement de 450 à 400 m près de Boundiali jusqu'à 300 m dans la vallée de la Comoé à l'Est.



- | | | | | | |
|--|----------------------------------|--|----------------------|--|-------------------|
| | Retombée Dorsale Guinéenne S. L. | | Zone de transition. | | Frange littorale. |
| | Plateaux du Nord. | | Plaines intérieures. | | |

FIG. 2. — Découpage en zones physiques.
(Voir I. La répartition des reliefs p. 15).

Figure 2.1.2 : Découpage en zones physiques.

Les glaciais, de par la disposition des formations géologiques (alternance de bandes schisteuses et granitiques d'axe NE-SW), présentent des ondulations découvrant des buttes cuirassées (séries schisteuses) qui sont les éléments majeurs des paysages à l'Est de Korhogo et au Nord de Kong. Sur les séries granitiques on trouve parfois quelques dômes cristallins de faible importance comme à Korhogo (Alt : 616 m).

De ce rapide aperçu géomorphologique ressort la relative monotonie des reliefs de la zone qui nous concerne, dénommée par la suite, zone Nord-Ouest, en ce qu'elle s'inscrit approximativement dans le quart Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire.

2.1.2. Le Climat

La Côte d'Ivoire présente deux zones climatiques principales en correspondance avec les deux types de paysages rencontrés : savane et forêt claire au Nord, forêt dense et humide au Sud.

Le climat du Sud de la Côte d'Ivoire est caractérisé par l'existence de deux saisons des pluies : la plus intense et la plus longue présente un maximum en juin, la plus courte est centrée sur Octobre. Elles sont séparées par la petite saison sèche d'Août et Septembre. La grande saison sèche qui dure en moyenne de trois à cinq mois, comprend toujours les mois de Décembre, Janvier, et Février.

Le climat rencontré au Nord de la Côte d'Ivoire ne présente qu'une seule saison des pluies dont le maximum d'intensité se situe en Août. L'unique saison sèche qui dure de six à huit mois est de plus en plus marquée lorsque l'on progresse du Sud vers le Nord de la zone de savane (de 8 à 11° de latitude Nord). Les deux zones climatiques présentes ainsi que le nombre et la durée des saisons des pluies sont déterminés par les mouvements du FIT (Front Inter-Tropical). En effet, tous les ouvrages traitant de la zone tropicale (Avenard & al, 1971) reconnaissent l'existence dans cette partie du globe d'une zone de convergence de deux masses d'air. La limite entre ces masses d'air, constitue le FIT : Front Inter Tropical.

La première de ces deux masses d'air, humide, d'origine océanique et de secteur SW est appelée "mousson". Elle provient en fait de l'alizé de l'hémisphère austral dévié sur sa droite par la force de Coriolis après franchissement de l'Equateur. La seconde est sèche, d'origine continentale et de secteur NE : c'est l'alizé de l'hémisphère boréal ou Harmattan.

Ces masses d'air, et par la suite le FIT lui même, se déplacent sous l'effet principal des gradients de pression. La dépression thermique saharienne entre l'anticyclone des Açores et la cellule anticyclonique libyenne joue le rôle de moteur principal du système.

Quand elle remonte en latitude, elle crée un appel de mousson qui repousse le FIT vers le Nord et inversement quand elle descend vers l'équateur (M. Eldin, le climat, le milieu naturel de Côte d'Ivoire, ORSTOM, Paris 1971).

La convergence de ces masses d'air n'étant pas accompagnée d'une augmentation de leurs vitesses, il se produit une ascendance de l'air qui entraîne la formation de nuages.

L'air austral humide et relativement froid va passer sous l'air boréal, on aura en coupe le schéma de la figure 2.1.3.

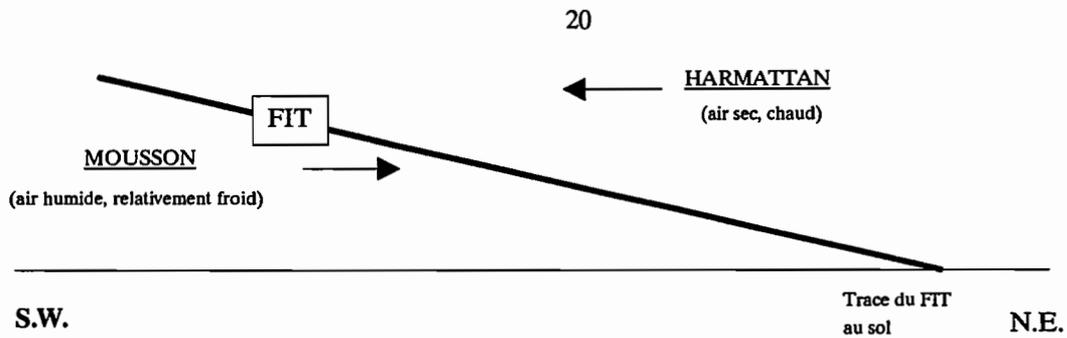


Figure 2.1.3 : Coupe schématique du FIT

Globalement on peut distinguer plusieurs types de temps différents :

- au Nord du FIT règne l'influence continentale de l'harmattan : nébulosité nulle, humidité faible, amplitude thermique journalière élevée, sécheresse quasi absolue rarement troublée par des incursions d'air polaire (connues sous le nom de "pluies des mangues")
- au Sud du FIT, la couche d'air austral est le siège de mouvement de convection (ascendances thermiques).

Cet air humide forme des nuages à grand développement vertical, qui pénètrent largement la couche d'air boréal, où ils sont entraînés par le flux d'Est. Selon l'épaisseur de la mousson concernée, ce phénomène détermine plusieurs types de temps, explicités sur la figure 2.1.4.

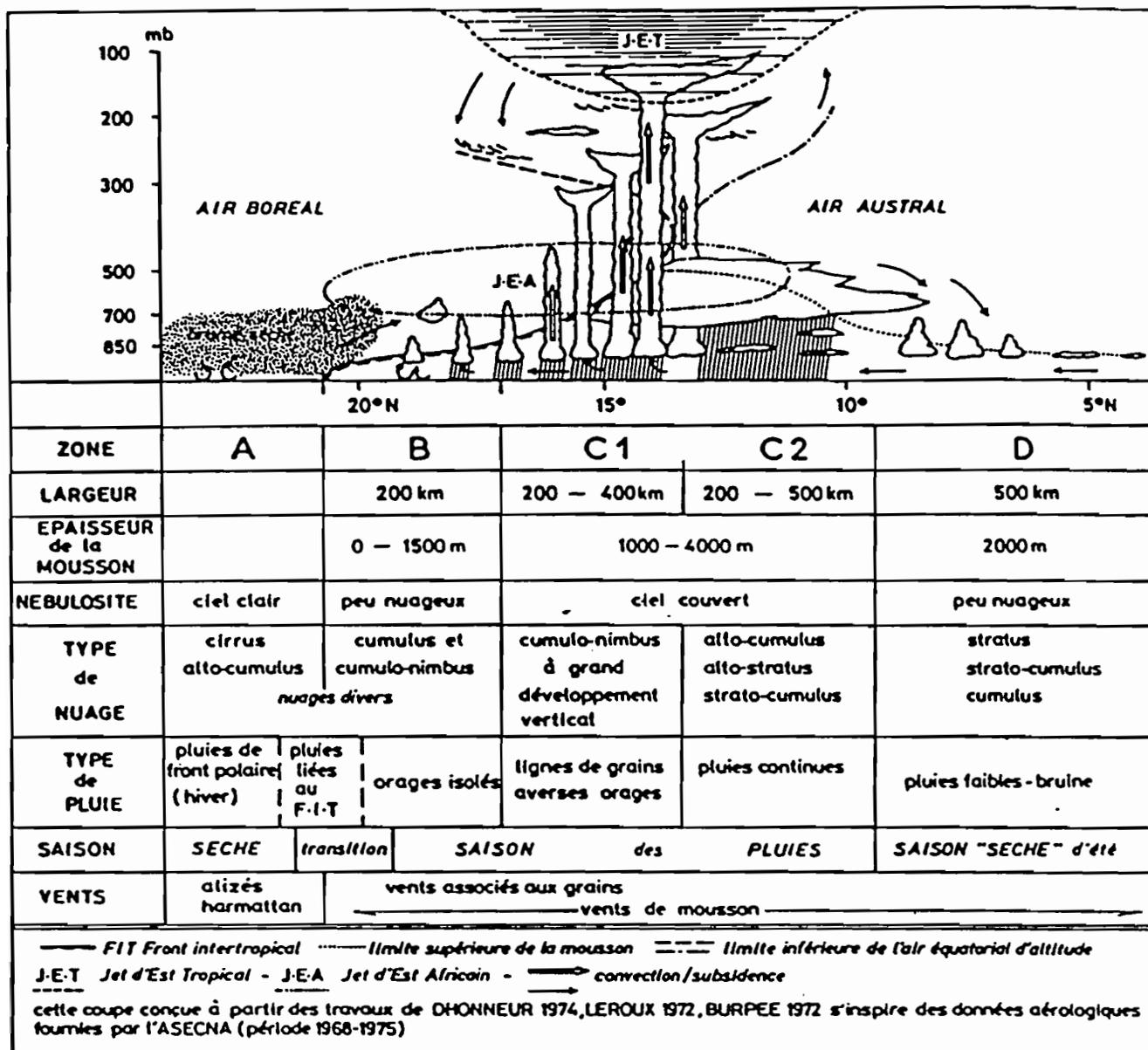


Figure 2.1.4 : Coupe schématisique de la troposphère Ouest-africaine le long du méridien 0.

- Le passage du FIT lui même n'est pas accompagné de pluie mais seulement de quelques formations nuageuses et d'une élévation du degré hygrométrique au sol. C'est le temps "lourd" qui précède la saison des pluies.

- Plus en arrière, quand l'épaisseur d'air humide atteint 700 ou 800 m, il se produit des séries de grains (orages isolés) suivant une ligne Est-Ouest (type de temps B)

- Lorsque l'épaisseur de la mousson atteint 2000 m, il se produit une série d'ondes d'Est en Ouest donnant lieu à des grains répartis suivant une ligne Nord-Sud (type de temps C-1).

Quand l'épaisseur de la mousson est maximale, il se produit des formations nuageuses non plus à son contact avec l'harmattan, mais à l'intérieur même de cette masse d'air humide. Ces formations nuageuses plus instables donnent lieu à des pluies à caractère continu (type de temps C-2).

Selon les mouvements du FIT et la latitude, les régions rencontrent successivement ces différents types de temps (Cf figure 2.1.5). La zone d'étude qui nous concerne est située en climat soudanais et sub-soudanais. Ces deux types de climat ont en commun :

- une saison sèche débutant en Octobre ou Novembre, pour s'achever en général en Avril ou Mai (type de temps A).
- une saison des pluies, le reste de l'année, où alternent les types B, C1 et C2. Cette succession, irrégulière, est le reflet des mouvements du FIT.

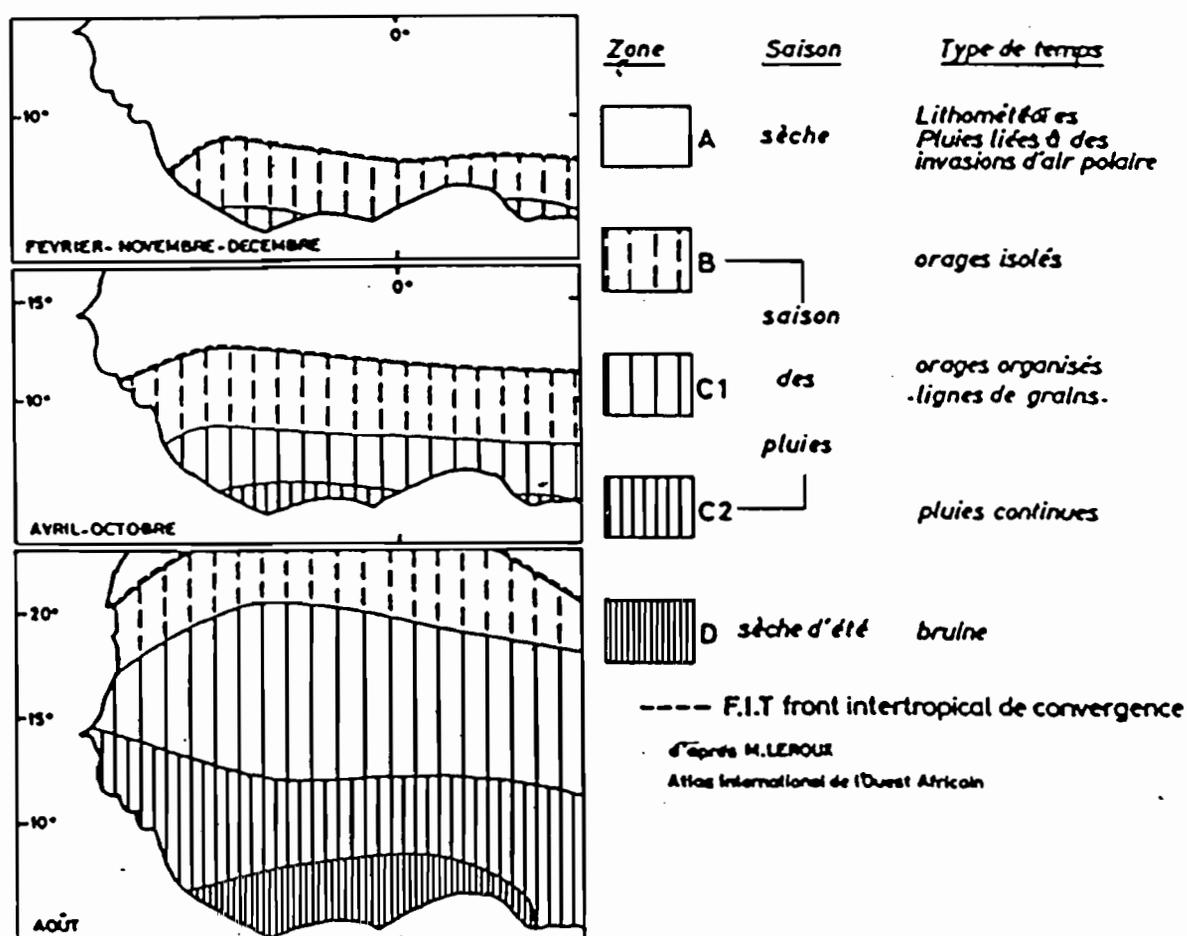


Figure 2.1.5 : Positions moyennes mensuelles des zones climatiques et succession moyenne des types de temps associés.

Le tableau 2.1.1 définit les principales caractéristiques des climats soudanais et sub-soudanais selon ELDIN (AVENARD et al, 1971).

Climats	Régime climatique	A	B	C	D	E	F	G
soudanais	2 saisons - Harmattan pendant 5 à 6 mois	1100 à 1700	≥ 85 0	≥ 8	2500 à 2900	27	15 à 37	22 à 23
sub-soudanais	2 saisons - Harmattan pendant 3 à 5 mois	1100 à 1700	600 à 850	7 à 8	2200 à 2700	26 à 27	16 à 36	22 à 23

A : Pluviométrie (mm)

B : Déficit hydrique cumulé (mm)

C : Durée de la grande saison sèche en mois

D : Durée annuelle d'insolation (heures)

E : Moyenne annuelle de température (°C)

F : Valeurs annuelles limites des températures Mini et Maxi mensuelles moyennes

G : Moyenne annuelle de tension de vapeur d'eau (mbar)

Tableau 2.1.1 : Caractéristiques climatiques de la zone d'application d'ERREAU (Avenard et al, 1971)

La région Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, concernée par notre étude, est entièrement située en zone de climat soudanais ou sub-soudanais. On y trouve donc une grande saison sèche et une seule saison des pluies.

2.1.2.1. Aperçu de la pluviométrie

Ce chapitre a pour but de donner un aperçu rapide du régime pluviométrique de la zone étudiée. Nous n'entrerons pas dans le détail ici, car cela fera l'objet d'un développement plus important dans la partie 2.2 "Critique et Analyse des données". En année moyenne, la pluviométrie de la Côte d'Ivoire décroît du Sud vers le Nord, de 2500 à 1050 mm par an. Les hauteurs les plus importantes sont observées sur le littoral où sur les reliefs de la région de Man. Pour ce qui est de notre zone d'étude, on notera que la hauteur annuelle moyenne des précipitations varie entre 1087 mm (Tafire) et 1560 mm (Odiène).

Le tableau 2.1.2 donne les caractéristiques statistiques des seize principaux postes pluviométriques situés dans la zone Nord-Ouest (la station de Touba se situant toutefois à la limite Sud du secteur qui nous concerne).

Station	Taille	Moyen.	Ec Typ	Minim.	Maxim.
Boundiali	52	1460.6	323.8	836.6	2309
Dabakala	61	1126.9	250.3	331.4	1742.2
Ferke (a)	9	1140.3	189.6	879.9	1393.9
Ferke (b)	53	1306.2	234.2	881.4	1972.5
Katiola	35	1100.1	293.8	628.3	1889.8
Korhogo (aero)	14	1207.4	187.3	835.6	1425.4
Korhogo	34	1339.7	271.7	811.1	2045.4
Kouto	22	1232.3	208.0	851.1	1616.2
Madinani	20	1420	209.9	1046.3	1764.4
Manignan	21	1485.7	315.6	1046.5	2097.7
Mankono	42	1213.8	255.1	627.1	1719
Niakaramandougou	34	1159.9	246.1	563.9	1622.2
Odienne	59	1560.5	265.7	991.7	2188.3
Ouangolodougou	31	1163.4	367.3	552.7	2394
Sinhala	17	1214.7	196.4	935.7	1591.1
Tafire	30	1087.6	259.8	664.6	1816.2
Tengrela	25	1253	247	782	1683
Touba	42	1340.5	209.6	920.4	1803.2

Tableau 2.1.2 : Caractéristiques statistiques des seize principaux postes pluviométriques

On peut noter dans ce tableau les valeurs extrêmes observées telles que :

Pour les minima :

- 331,4 mm à Dabakala en 1983

- 628,3 mm à Katiola en 1983

Pour les maxima :

- 2394 mm à Ouangolodougou en 1954

- 2188,2 mm à Odienne en 1954

La pluviométrie de cette zone est caractérisée par une forte variabilité des hauteurs précipitées tant annuelles que mensuelles.

Néanmoins, dans cette région, la majeure partie des précipitations survient de Juillet à Septembre ; les premières pluies d'Avril sont espacées et généralement de faible importance. Il faut noter, car cela a une incidence importante sur les régimes hydrologiques, que la période de Novembre à Mars est une période de sécheresse absolue dans la grande majorité des cas.

Les figures 2.1.6 et 2.1.7 présentent respectivement les hauteurs annuelles précipitées et mesurées aux stations d'Odienne et de Boundiali.

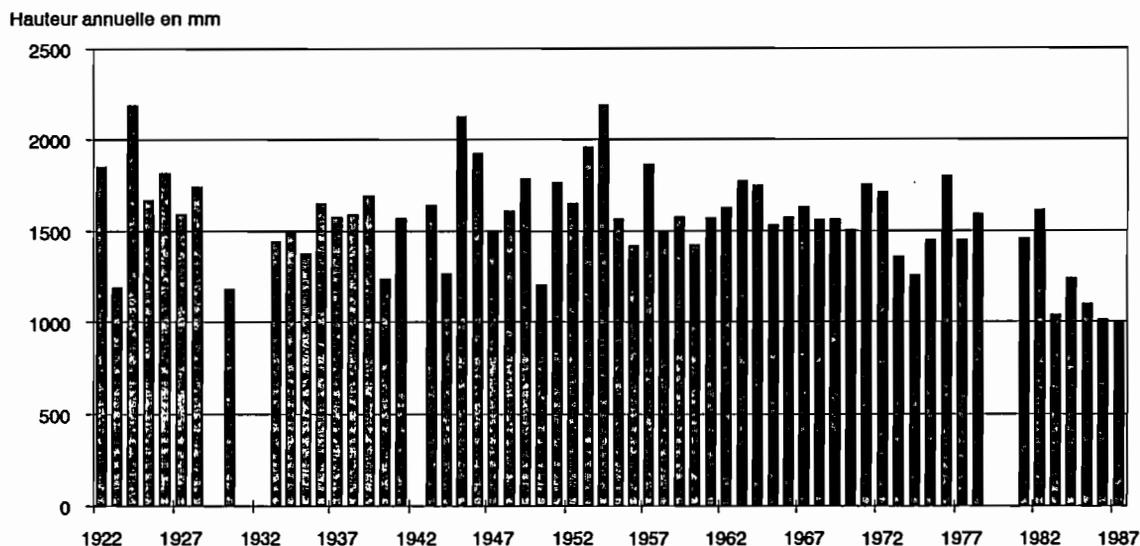


Figure 2.1.6 : Station d'Odienne, hauteurs annuelles précipitées.

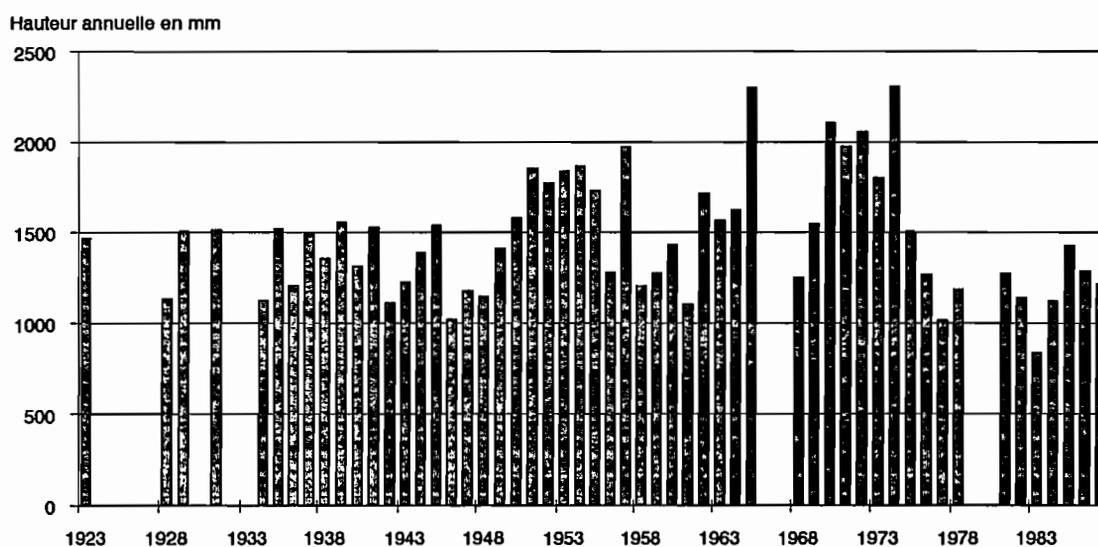


Figure 2.1.7 : Station de Boundiali, hauteurs annuelles précipitées.

On remarque sur ces graphiques la dispersion importante des hauteurs de pluies annuelles. On peut également noter, en particulier à Boundiali, la sécheresse marquée de l'année 1983, année très sèche dans toute la Côte d'Ivoire.

A partir des années 1970 on vérifie, sur toutes les stations de la zone, une tendance générale à la baisse de la pluviométrie. Nous reviendrons sur ce phénomène dans la partie 2.2, "Critique et Analyse des données".

A titre indicatif, nous avons regroupé dans le tableau 2.1.3 les valeurs de différents paramètres pluviométriques pour quelques stations principales de la zone étudiée ici :

- . Hauteur moyenne annuelle de l'origine de la station à 1967 (Avenard et al, 1971) (A)
- . Hauteur moyenne annuelle recalculée en incluant les données de 1967 à 1987 (B)
- . Hauteur annuelle de l'année 1983 (C)
- . Hauteur annuelle de l'année 1985 (D)

Station	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
Boundiali	1439	1461	837	1428
Dabakala	1183	1127	331	1183
Korhogo	1380 (a)	1340 (a) 1207 (b)	836 (b)	1425 (b)
Madinani	1356	1420	1203	1415
Odienne	1619	1560	1038	1099

Korhogo (a) a fonctionné de 1922 à 1980

Korhogo (b) fonctionne depuis 1971

Tableau 2.1.3 : Paramètres pluviométriques de 5 stations de la zone d'étude

Les figures 2.1.8 et 2.1.9 présentent les hyétogrammes mensuels pour deux stations de longue durée, Boundiali et Odienne. On a fait figurer l'année moyenne calculée sur environ soixante années complètes d'observation, l'année 1983 qui fut exceptionnellement sèche dans toute la Côte d'Ivoire, et une année quelconque ni particulièrement sèche ni particulièrement humide.

On observe nettement la distribution mensuelle typique du climat soudanais avec une seule saison des pluies centrée ici sur le mois d'Août.

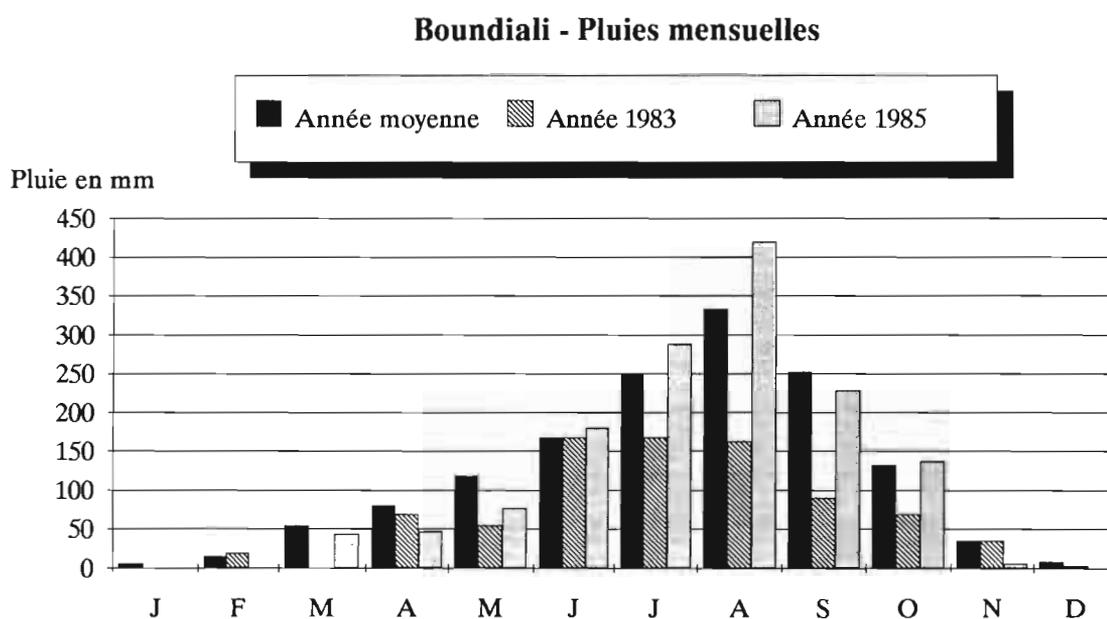


Figure 2.1.8 : Hyétogramme mensuel.

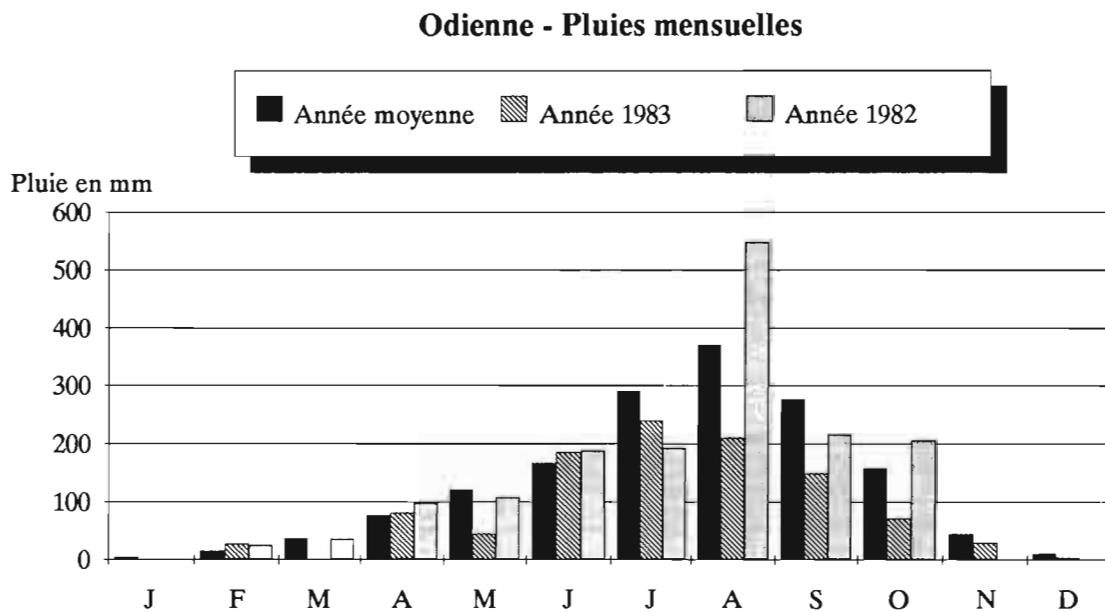


Figure 2.1.9 : Hyétoqramme mensuel.

On peut compléter cette brève description de la pluviométrie en donnant le nombre moyen de jours de pluies à Odienne : 123 jours par an (Girard et al in Avenard et al, 1971).

La région Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, cadre de notre étude, apparaît donc comme étant caractérisée par une saison sèche longue et marquée (fin Octobre mi Mai), et une saison des pluies unique, relativement abondante, mais plutôt irrégulière en ce qui concerne les lames précipitées.

2.1.2.2. Températures

Les températures observées dans la zone Nord-Ouest sont d'une manière générale assez peu variables.

L'amplitude journalière dans le Nord de la Côte d'Ivoire est toutefois plus importante que dans le Sud, surtout en saison sèche lorsque souffle l'Harmattan.

Cette masse d'air relativement sec permet, en effet, un rayonnement terrestre nocturne important, ce qui entraîne une baisse de la température.

A titre d'exemple, nous reprenons, dans le tableau 2.1.4, les valeurs fournies par M. Eldin (in Avenard et al, 1971), pour Ferkéssedougou.

	Janvier	Août
Température minimale moyenne T_m °C	15.3	21.4
Température maximale moyenne T_M °C	34.9	29.3
Température moyenne T °C	25.1	25.4
Amplitude moyenne °C	19.6	7.9

Tableau 2.1.4 : Températures moyennes relevées à Ferkessedougou (Eldin in Avenard et al, 1971)

On remarque nettement la stabilité de la température moyenne journalière ; la saison sèche influant surtout sur l'amplitude thermique.

Les courbes des figures 2.1.10 et 2.1.11 présentent les températures moyennes mensuelles interannuelles pour Korhogo et Odienna.

On note là aussi l'influence prépondérante de la saison sèche avec Harmattan sur l'amplitude thermique journalière.

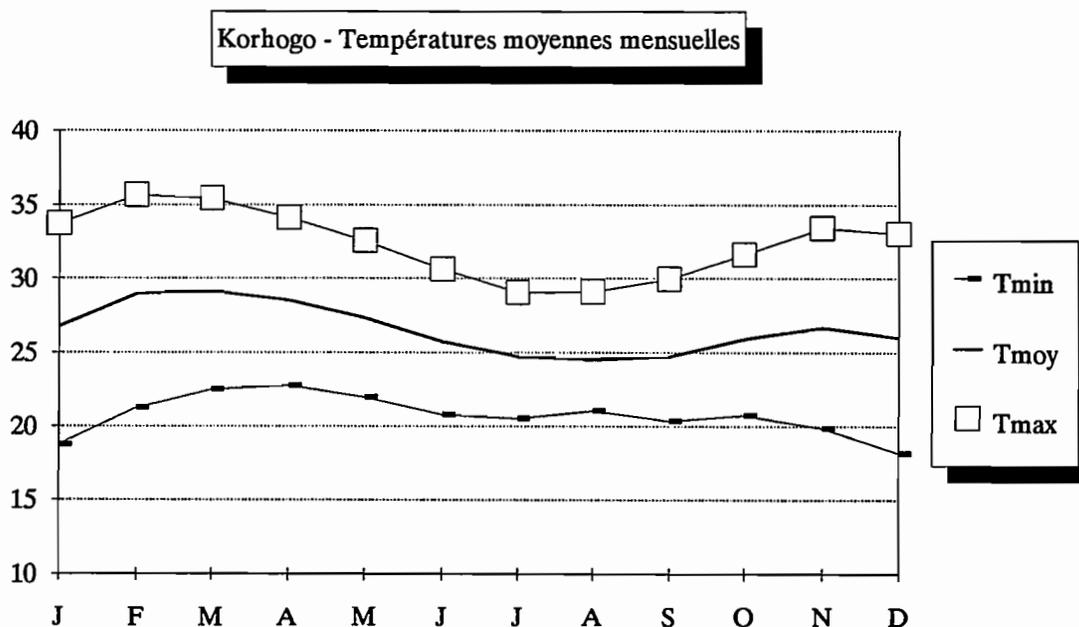


Figure 2.1.10.

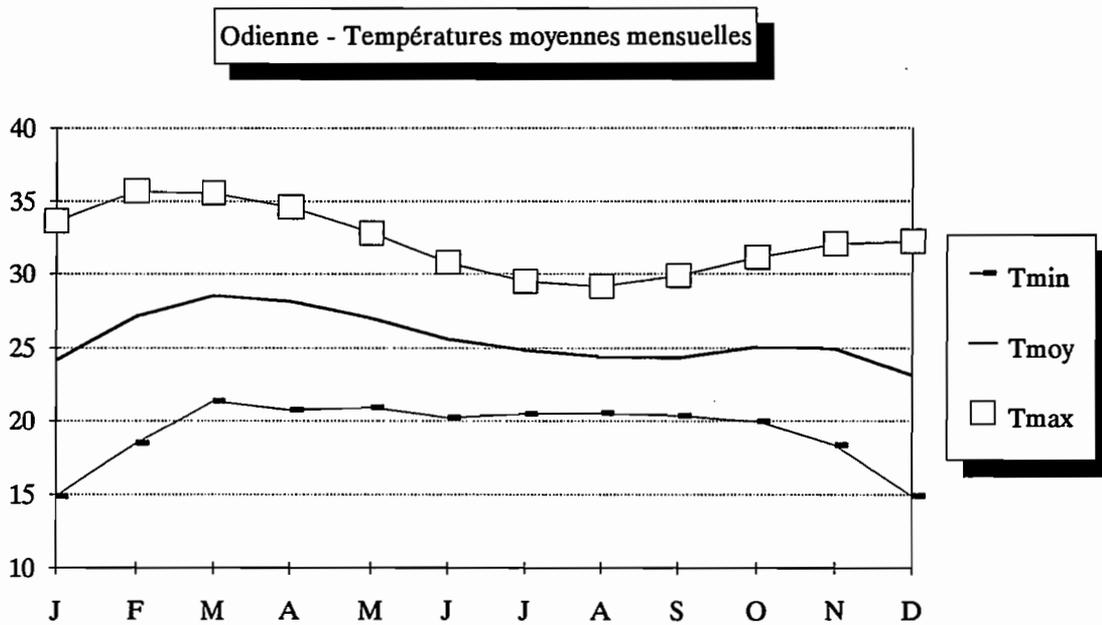


Figure 2.1.11.

2.1.2.3. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est un des termes prépondérants du bilan hydrique puisqu'il peut atteindre des valeurs de 1800 mm/an dans le Nord et que l'ETP moyenne sur toute la Côte d'Ivoire est de 1500 mm/an (ELDIN et al in Avenard et al, 1971).

On peut estimer grossièrement que l'évapotranspiration réelle représente 80 à 90% des volumes d'eau mis en jeu dans le bilan hydrique.

Nous avons calculé l'évapotranspiration potentielle sur notre zone d'étude à l'aide de la formule de Penman (Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964), en utilisant les relevés mensuels des stations synoptiques publiées par l'ASECNA et l'ANAM.

Les stations retenues et les calculs effectués seront présentés dans la partie 2.2 "critique et analyse des données". Nous avons reporté dans le tableau 2.1.5, à titre d'exemple, les valeurs moyennes mensuelles journalières de l'ETP Penman pour Odienne et Korhogo.

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Odienne (mm/j)	5.1	6	6.2	5.3	5.9	5.5	3.6	3.5	4.9	5.1	4.9	3.3
Korhogo (mm/j)	6.5	7.1	7.1	6.0	6.4	5.7	3.9	3.7	5.1	5.6	5.7	4.6

Tableau 2.1.5 : ETP journalières moyennes calculées à l'aide de la formule de Penman

2.1.3. Régimes hydrologiques

Le réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire (Cf figure 2.1.12) comprend :

- quatre bassins principaux qui sont, d'Ouest en Est, le Cavally, le Sassandra, le Bandama et la Comoé.

- des petits fleuves côtiers :

le Tabou, le San Pédro, le Niouniourou, le Boubo, l'Agneby, la Mé et la Bia.

- des affluents du Niger :

le Baoulé, la Bagoé et le Gbanhala.

Le réseau hydrographique est généralement orienté Nord-Sud. Les fleuves prennent leur source au Nord et coulent vers l'Atlantique au Sud. Les affluents du Niger, au contraire, coulent du Sud vers le Nord (Bagoé).

La région Nord-Ouest qui nous intéresse est située en régime tropical de transition (Girard, et al in Avenard et al, 1971).

Ce régime s'étend sur la partie septentrionale de la Côte d'Ivoire, au Nord de l'axe Touba-Ferkessedougou, c'est-à-dire sur une région de savane plus ou moins boisée selon la pluviométrie annuelle.

Pour les bassins versants que nous avons étudiés et qui ont des superficies relativement importantes (1000 à 5000 km²), du type de ceux rencontrés sur la Bagoé ou le haut Bandama, ce régime comporte généralement une crue unique observée en Août, Septembre et Octobre.

Elle est suivie d'un tarissement rapide en Novembre, Décembre, puis d'une longue période de basses eaux de Janvier à Mai, pendant laquelle on observe un étiage qui peut être parfois très sévère.

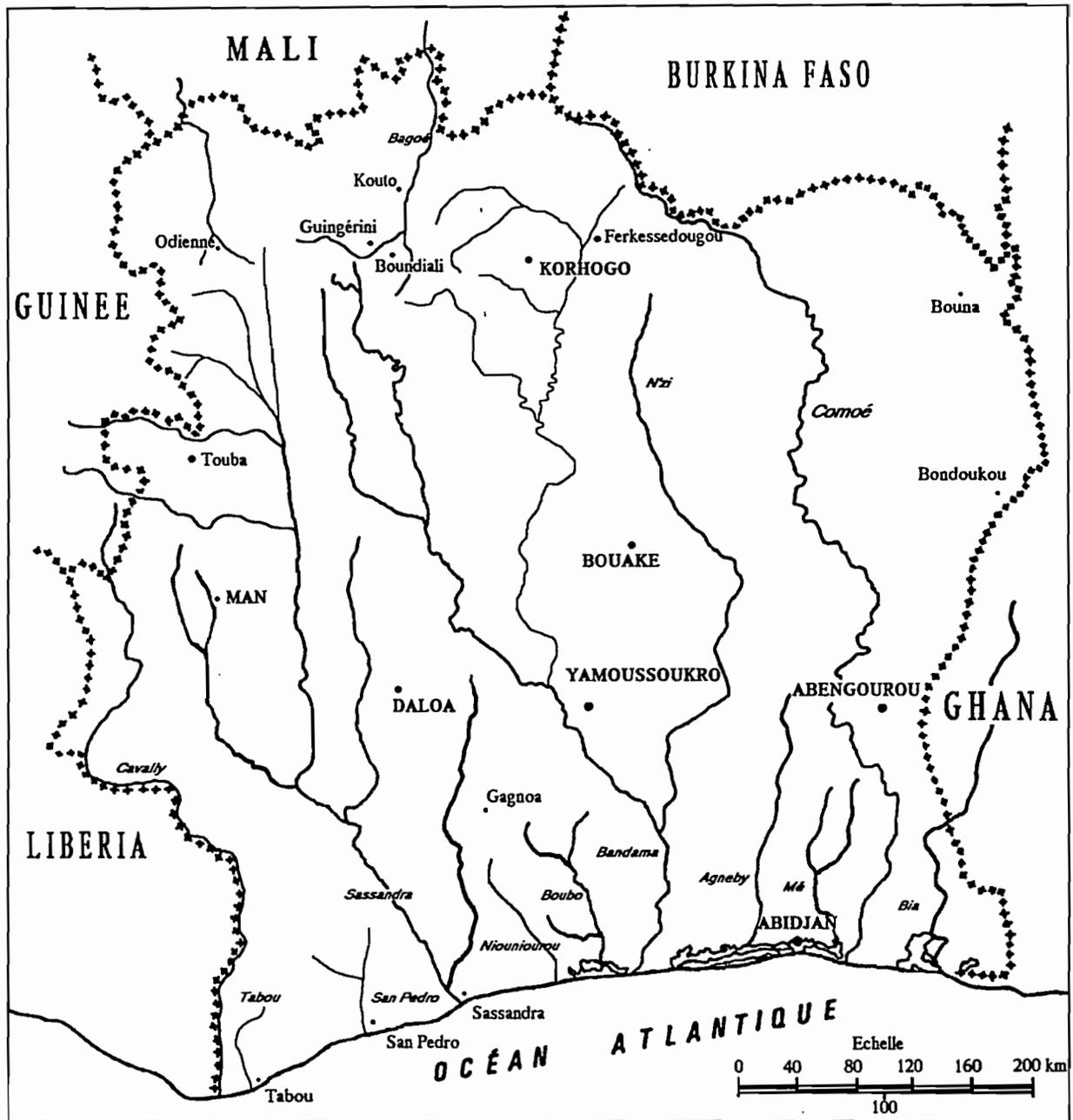


Figure 2.1.12 : Réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire.

Les premières pluies de l'année donnent lieu, si elles sont abondantes, à un accroissement rapide du débit que l'on observe parfois dès Juillet (Cf figure 2.1.13 : la Bagoé à Kouto - 4700 km²).

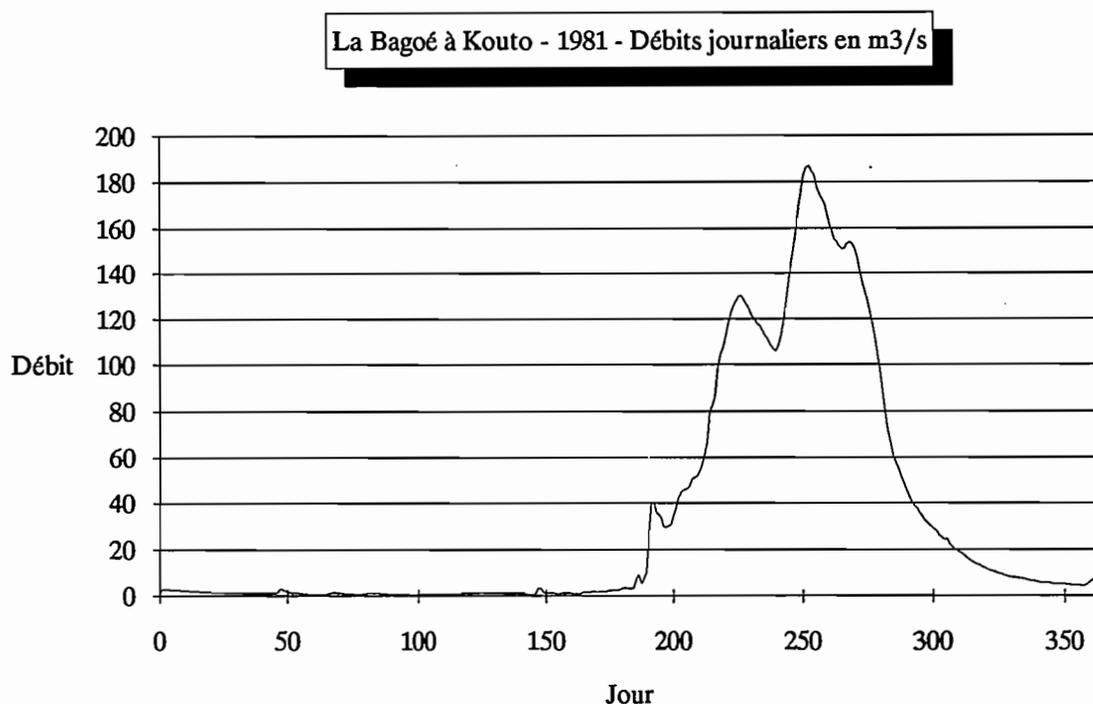


Figure 2.1.13 : La Bagoé à Kouto, 1981, débits journaliers.

La crue annuelle résulte toujours, soit d'une succession de pluies de valeurs normales, soit d'une précipitation exceptionnelle en deux ou trois jours consécutifs ; elle a une ampleur importante et inonde souvent de grandes étendues.

Les étiages sont très marqués. L'écoulement que l'on y observe résulte généralement de la contribution des nappes des plaines alluviales.

Sur les bassins versants de superficie plus réduite, on observe de brèves pointes de crues dès le mois d'Avril ou Mai, mais la période de l'écoulement continu et soutenu s'étend de Juillet à Septembre. Le tarissement complet a lieu à la fin de l'année. Rares sont les petits bassins dont le débit n'est pas nul à la fin du mois d'Avril.

Pour notre étude, vingt bassins versants de la zone Nord-Ouest ont été retenus. Nous reviendrons en détails sur les caractéristiques dans la partie 2.2 "Critique et Analyse des données", mais quelques chiffres permettent de se faire une idée générale des bassins sélectionnés.

Les superficies sont comprises entre 120 et 4700 km², les périodes observées s'étendent de 1968 à 1987 et représentent au total 91 stations années.

Les modules annuels sont compris entre 0,15 m³/s (Yoreloro à Katégue ; 338 km², année 1983) et 52,95 m³/s (Bagoé à Kouto ; 4700 km², année 1969). Les débits spécifiques annuels varient de 0,11 l/s/km² (Badenou à Rte de M'Bengue, 1800 km², année 1984) à 11,27 l/s/km² (Bagoé à Kouto ; 4700 km², année 1969).

On peut d'ores et déjà noter que sur la période étudiée, deux années présentent un caractère exceptionnellement sec : années 1983 et, à un degré moindre, 1984. Pour la Bagoé à Kouto (4700 km²), par

exemple, le module annuel passe de 52,95 m³/s en 1969 à 6,71 m³/s en 1983 et les débits spécifiques annuels correspondants de 11,25 l/s/km² à 1,43 l/s/km².

La plupart des bassins retenus présentent des étiages secs hormis les plus grands bassins (la Bagoé à Kouto, 4700 km², le Bou à Boron, 3710 km²).

2.1.4. Sols et végétation

La zone sur laquelle a porté notre étude est relativement homogène et essentiellement constituée de sols ferrallitiques (Perraud in Avenard et al, 1971).

Ceux-ci sont fortement désaturés dans la partie la plus occidentale de cette région Nord-Ouest (Manignan, Madinani, Odienné, Touba) en raison d'une pluviométrie plus importante. Le reste de la zone est constitué de sols ferrallitiques, moyennement à faiblement désaturés (pluviométrie plus faible).

La végétation de la Côte d'Ivoire est généralement regroupée en domaines et secteurs basés non seulement sur les formations prédominantes dans le paysage mais aussi sur leur dynamisme actuel (Guillaumet et Adjanohoun in Avenard et al, 1971).

Ces domaines et secteurs sont :

. le domaine guinéen subdivisé en :

secteur ombrophile

secteur mésophile

secteur littoral

secteur montagnard

. Le domaine soudanais subdivisé en :

secteur subsoudanais

secteur soudanais

Le domaine guinéen a un climax prépondérant de forêt dense humide. Les quatre secteurs qui le composent sont caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondant à des conditions écologiques différentes :

- climax dû à la latitude

. Secteur ombrophile : climax principal de forêt dense humide sempervirente.

. Secteur mésophile : climax principal de forêt dense humide semi décidue.

- climax dû à la proximité de la mer et à la nature des sols.

. Secteur littoral : pas de climax dominant mais un ensemble de climax édaphiques.

- climax dû à l'altitude :

. Secteur montagnard : climax principal de forêt dense humide montagnarde.

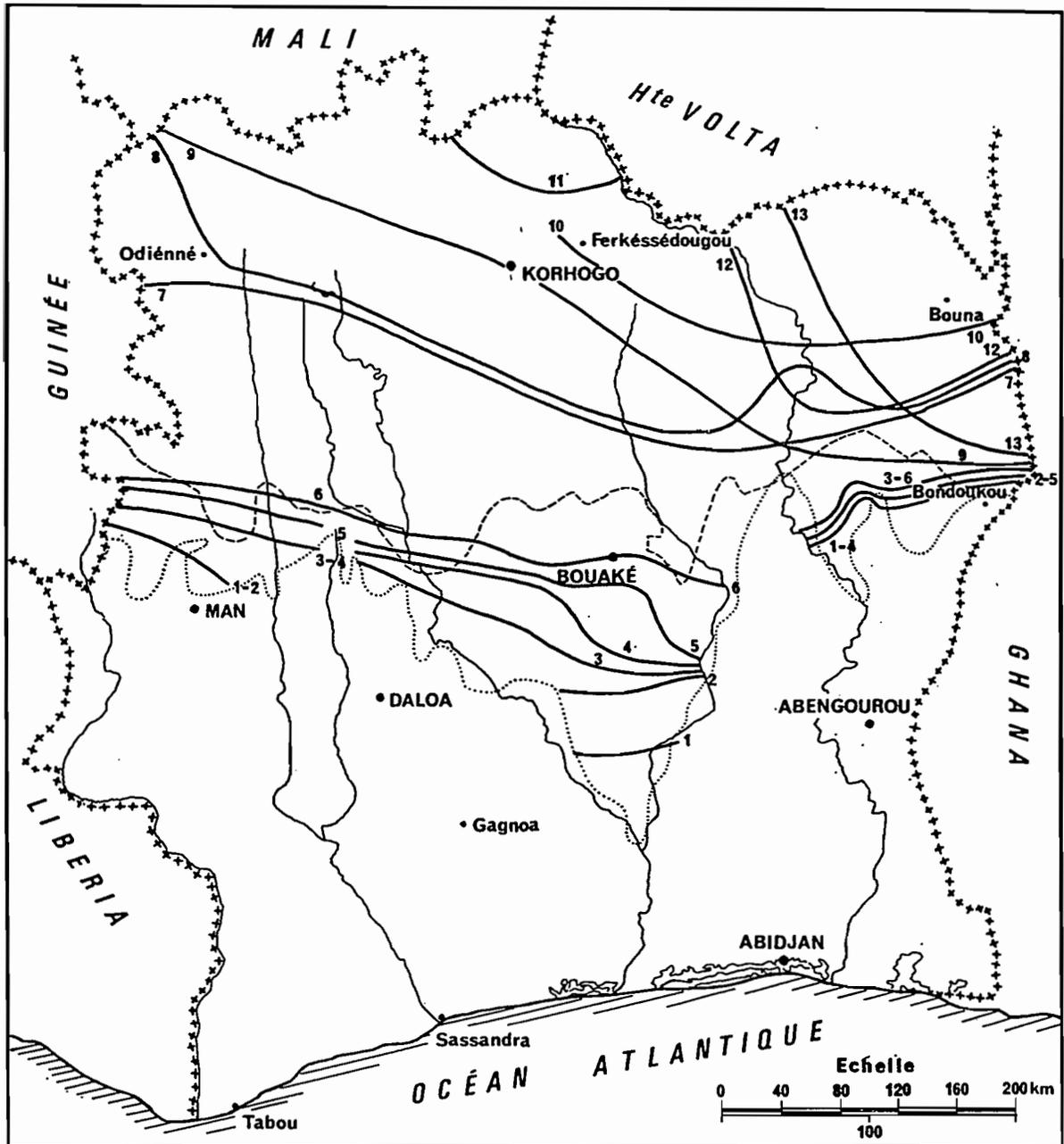
Le domaine soudanais en Côte d'Ivoire septentrionale se subdivise en deux secteurs :

. Le secteur subsoudanais, le plus important, qui s'étend de la limite nord de la zone guinéenne aux frontières du Mali et du Burkina Faso,

. Le secteur soudanais, qui n'entame que peu la zone subsoudanaise, à l'extrême nord du pays, suivant une ligne Férédougou (au Nord d'Odienne), Ferkessédougou, Nassion (au sud de la réserve de Bouna), Farako.

Toute cette zone de la Côte d'Ivoire septentrionale est le domaine des forêts claires et des savanes qui en dérivent. La zone concernée par notre étude est entièrement incluse dans le domaine soudanais.

La figure 2.1.14 indique la limite entre les domaines soudanais et guinéen ainsi que la limite méridionale de quelques espèces soudanaises. On y distingue nettement le Sud forestier, le Nord, zone de savanes et la zone de transition incluant le " V Baoulé " (région de Bouaké, Yamoussoukro).



----- Limite des Domaines Guinéen et Soudanais
 Limite septentrionale de la forêt dense humide

CARTE 6. — Limites méridionales de quelques espèces soudanaises.

1. *Parinari polyandra* ; 2. *Lophira lanceolata* et *Hymenocardia acida* ; 3. *Uapaca togoensis* ; 4. *Daniellia oliveri* et *Parinari curatellifolia* ; 5. *Diospyros mespiliformis* et *Syzygium guineense* var. *macrocarpum* ; 6. *Anogeissus leiocarpus* et *Securidaca longepedunculata* ; 7. *Elyonurus pobeguinii* ; 8. *Monotes kerstingii* ; 9. *Terminalia avicennioides* ; 10. *Setaria sphacelata*, *Cymbopogon proximus* et *Aristida longiflora* ; 11. *Guiera senegalensis* ; 12. *Elyonurus euchaetus* ; 13. *Ctenium canescens*.

Figure 2.1.14.

2.1.5. Occupation humaine

Historiquement, la Côte d'Ivoire s'est développée depuis la côte atlantique vers le Nord. De nos jours, c'est un des pays d'Afrique qui a atteint le niveau de développement le plus élevé. La qualité des voies de communication à l'intérieur de la Côte d'Ivoire, en particulier un important réseau routier, a permis le développement du Nord dont la vocation reste agricole. Outre les cultures vivrières "exportées" jusqu'à Abidjan, on y cultive riz et coton.

Les secteurs dans lesquels l'influence de l'homme se fait le plus sentir sont les plus peuplés : Odienné, Boundiali, et Korhogo.

Le défrichement des terres et les "feux de brousses" y sont pratique courante. Ce procédé est toujours bien ancré dans les mentalités bien que les autorités nationales mènent, à son encontre, d'importantes campagnes d'information et d'éducation. Une telle pratique aboutit en effet à un appauvrissement de la flore originelle et à une forte diminution de la fertilité des sols.

Une autre particularité, rencontrée autour de certains villages, est le regroupement d'espèces utiles traditionnelles protégées et organisées en vergers ou en parcs. Il s'agit du karité (*Butyrospermum paradoxum*) dont on consomme les fruits et dont on utilise la graine pour extraire le "beurre de karité", principale matière grasse du Nord de la Côte d'Ivoire ; du néré (*Parkia bigobosa*) dont les fruits sont mangés et les graines, riches en élément azotés, sont employées comme condiments (soumara) ; du baobab (*Adansonia digitata*) qui fournit ses feuilles et ses fruits (pain de singe). Il faut ajouter à ces plantes les manguiers qui fructifient abondamment dans le Nord.

A côté des systèmes de culture traditionnels, des projets de développement ont été réalisés ou sont en voie de l'être. Ils consistent en l'exploitation de grands périmètres irrigués plantés principalement de soja ou de canne à sucre.

A titre d'exemple, les photos 2.1.1 et 2.1.2 montrent un complexe agricole intensif en cours d'installation dans la région d'Odienné. Sur la photo 2.1.1 on peut voir la forêt claire au fond et ce qu'il en reste après défrichage mécanique au premier plan. La photo 2.1.2 montre un champ de soja avec un reste de forêt claire/savane arborée au fond.

L'élevage est aussi une activité importante dans le Nord de la Côte d'Ivoire où il est fréquent de croiser des troupeaux de zébus ou de moutons.



Photo 2.1.1.



Photo 2.1.2.

2.2. Critique et Analyse des données

On trouvera dans cette deuxième partie le résultat de toutes les opérations d'inventaire, de mise en forme, de critique et de sélection de données réalisées pour les besoins du programme ERREAU et de cette thèse.

L'analyse des données pluviométriques utilisées et provenant du réseau national de Côte d'Ivoire constitue le premier point. L'analyse des séries de débits des stations hydrométriques des vingt bassins versants retenus est ensuite présentée. Les données d'évapotranspiration potentielle ainsi que les données d'occupation du sol viennent compléter l'ensemble.

2.2.1. Données pluviométriques

Compte tenu des objectifs et de la définition du programme de recherche ERREAU, les données pluviométriques utilisées (SERVAT et DEZETTER, 1988) sont des données accessibles aux aménageurs et aux gestionnaires de projet, à savoir les données du réseau national de Côte d'Ivoire, gérées par l'Agence Nationale des Aéroports et de la Météorologie (ANAM)

Une des contraintes imposées par ce type de données est l'utilisation du pas de temps journalier, pas de temps de mesure du réseau.

2.2.1.1. Les stations pluviométriques de la zone ERREAU

La figure 2.2.1 présente l'ensemble des postes pluviométriques de la zone. Ils sont au nombre de 56 dont deux présentent des particularités : Korhogo et Ferkessédougou.

- de 1970 à 1980 deux stations ont fonctionné simultanément à Ferkessédougou.
- depuis 1980 la station de Korhogo-Aéro a pris le relais de l'ancien poste de Korhogo, après un fonctionnement simultané de 1971 à 1980.

Ces postes sont assez bien répartis spatialement à l'exception des secteurs Nord-Est et du Sud-Ouest. La densité du réseau est d'environ un poste pour 1600 km², la distance moyenne entre deux postes étant de 166 km. La distance minimale observée entre deux postes est de 16 km (Korhogo-Napielodougou), alors que la distance maximale est de 413 km (Maninian, Dabakala).

Néanmoins, et malheureusement, la qualité et surtout la durée des observations réalisées sont extrêmement variables.

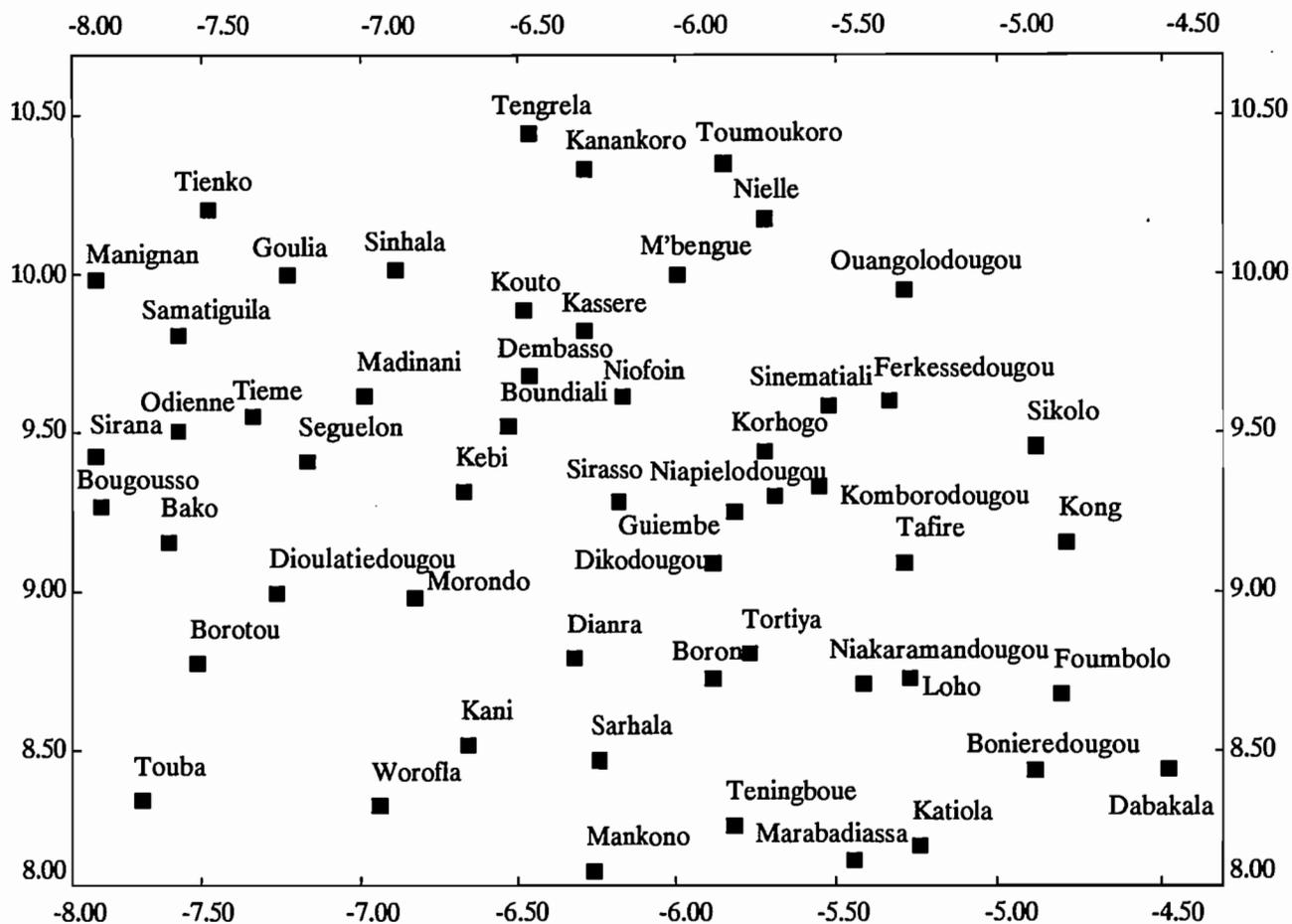


Figure 2.2.1 : Situation des postes pluviométriques

Les périodes d'observation sont par exemple de 4 ans à Boron (1977, 1978, 1979 et 1987, toutes années incomplètes) et de 67 ans à Odienné (de 1921 à 1987) avec un total de 59 années complètes.

Devant une telle disparité les postes ont été répartis en deux groupes : les stations dites de longue durée d'une part (parmi lesquelles on trouve les stations synoptiques du réseau de Côte d'Ivoire) et les stations ne présentant que de courtes séries d'observations d'autre part.

Les données de pluviométrie journalière dont nous disposions avaient été collectées par l'ORSTOM dans le cadre de la gestion du réseau ou de conventions d'études (Brunet Moret, 1976). Ces fichiers couvraient les stations depuis l'origine jusqu'en 1980 ou 1981 selon les cas. Ces données ont donc été directement extraites de la banque de données pluviométriques de Montpellier à l'aide du logiciel PLUVIOM (élaboré au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM). Ces fichiers ont pu être complétés jusqu'en 1987 à l'aide des relevés fournis par l'Agence Nationale des Aéroports et de la Météorologie (ANAM). Les feuilles mensuelles de relevés journaliers ont ensuite été saisies à l'aide de PLUVIOM pour compléter les fichiers existants.

Pour l'ensemble des stations de la zone on disposait ainsi de 1169 stations années dont 798 complètes (soit 68,3 %), correspondant à une moyenne de 14 années par station (56 stations).

En distinguant les deux groupes longue durée et courte durée on obtient les chiffres qui figurent dans le tableau 2.2.1 :

	Longue durée (18)	Courte durée (38)
Stations années	731	438
Stations années complètes	599	199
%	81.9	45.4
Nombre moyen d'années par station	33	5

Tableau 2.2.1 : Répartition des données pluviométriques

2.2.1.1.1. Les stations de longue durée.

Ces stations sont au nombre de 16 (les deux postes de Korhogo sont considérés à ce niveau comme une seule station, ainsi que les deux postes de Ferkessedougou). Elles ont été reportées sur la figure 2.2.2. On remarquera la répartition spatiale très hétérogène de ces postes pluviométriques de longue durée. Les trois secteurs Nord-Ouest, Nord-est et Sud-Ouest ne présentent en effet que peu de points d'observation.

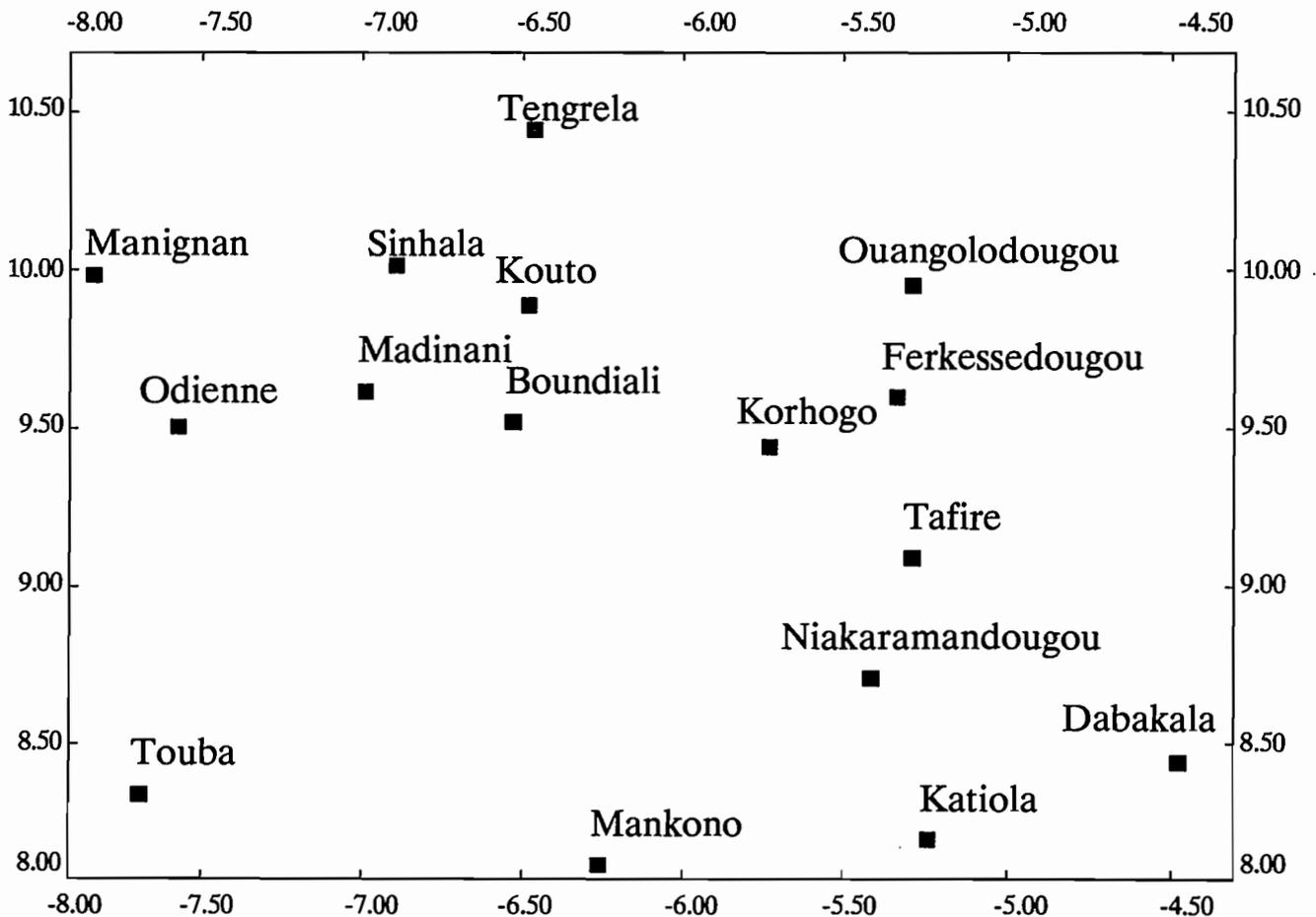


Figure 2.2.2 : Les 16 principaux postes pluviométriques

On notera, en particulier, l'isolement très marqué de la station de Touba. En effet, les trois stations les plus proches, Odienné, Boundiali et Mankono, en sont éloignées respectivement de 140, 180 et 170 km.

Les couples de stations les plus proches sont Sinhala-Kouto et Korhogo-Ferkessédougou situées à une cinquantaine de kilomètres l'une de l'autre.

Le tableau 2.2.2 indique pour chacune de ces stations de longue durée le nombre d'années observées et le numéro relatif à la banque de données gérée par l'ORSTOM. (Une année a été considérée comme incomplète dès lors qu'il manquait une donnée journalière).

Numéro de station	Nom de la station	Nombre d'années observées	Nombre d'années complètes
1090006400	Boundiali	66	52
1090007300	Dabakala	66	61
1090009900	Ferke (a)	11	9
1090010000	Ferke (b)	57	53
1090011800	Katiola	39	35
1090012000	Korhogo (aero)	17	14
1090012100	Korhogo	59	34
1090012700	Kouto	25	22
1090013900	Madinani	24	20
1090014500	Manignan	28	21
1090014800	Mankono	51	42
1090015700	Niakaramandougou	38	34
1090016000	Odienne	67	59
1090016300	Ouangolodougou	38	31
1090017900	Sinhala	24	17
1090018700	Tafire	38	30
1090019300	Tengrela	33	25
1090020500	Touba	50	42

Tableau 2.2.2 : Les 16 principales stations pluviométriques

2.2.1.1.2. Autres stations.

Les durées d'observation de ces 38 autres postes pluviométriques sont très variables. Le tableau 2.2.3 indique pour chacune de ces stations le nombre d'années observées et le nombre d'années complètes ainsi que le nom et le numéro relatif à la banque de données gérée par l'ORSTOM. (Une année est considérée comme incomplète dès lors qu'il manque une donnée journalière).

Numéro de station	Nom de la station	Nombre d'années observées	Nombre d'années complètes
1090003300	Bako	14	6
1090004800	Bonieredougou	12	2
1090005000	Borotou	15	1
1090005800	Bougoussou	21	13
1090008800	Dembasso	25	18
1090009000	Dikodougou	12	6
1090010200	Foumbolo	12	3
1090011100	Goulia	12	5
1090011300	Guiembe	12	3
1090011700	Kani	8	3
1090011900	Kassere	9	3
1090012200	Komborodougou	12	4
1090012500	Kebi	9	1
1090012600	Kong	12	4
1090013800	Loho	7	4
1090014900	Marabadiassa	11	4
1090015200	M'Bengue	12	6
1090015300	Morondo	8	4
1090015600	Niapielodougou	11	2
1090015800	Nielle	12	5
1090015900	Niofoin	12	9
1090017400	Samatiguila	10	5
1090017600	Seguelon	11	5
1090017700	Sinematiali	12	6
1090018000	Sikolo	11	7
1090018300	Sirana	11	5
1090019500	Teningboue	9	2
1090020100	Tieme	23	14
1090020300	Tienko	12	5
1090020600	Tortiya	11	7
1090021200	Toumoukoro	10	3
1090340000	Dianra	8	7
1090344000	Dioulatiedougou	12	7
1090751000	Sarhala	9	7
1090774000	Sirasso	12	7
1090941000	Worofla	11	4

Tableau 2.2.3 : Autres stations pluviométriques

2.2.1.2. Statistiques descriptives.

On trouvera en annexe 2.1, pour chacune des stations, un tableau des valeurs annuelles et un tableau des valeurs mensuelles observées. Ces tableaux sont des récapitulatifs des fichiers de valeurs journalières constitués pour être utilisés dans la phase de modélisation du programme ERREAU.

2.2.1.2.1. Stations pluviométriques de longue durée.

2.2.1.2.1.1. Totaux pluviométriques annuels

Les calculs ont été réalisés sur les années complètes. Les moyennes interannuelles des stations étudiées varient de 1088 mm (Tafire, 30 années complètes) à 1560 mm (Odienné, 59 années complètes), ce qui reflète l'influence croissante du relief d'Est en Ouest de la zone étudiée. Les coefficients de variation de ces séries de totaux annuels dépassent très rarement la valeur 0.3. C'est dire que leur dispersion est finalement assez faible.

L'ensemble des caractéristiques statistiques descriptives a été reporté dans le tableau 2.2.4. L'examen comparatif des valeurs de la moyenne, du mode et de la médiane, ainsi que les valeurs des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement standardisés ou non, montrent que dans la plupart des cas, les distributions sont proches de la normalité.

	Taille	Moyen.	Varian.	Ec Typ	Minim.	Maxim.	Asymét.	Asymét. Stand.	Aplati.	Aplati. Stand.
Boundiali	52	1460.6	104847	323.8	836.6	2309	0.717.	2.111	0.299	0.440
Dabakala	61	1126.9	62650	250.3	331.4	1742.2	-0.509	-1.622	1.515	2.416
Ferke (a)	9	1140.3	35964	189.6	879.9	1393.9	-0.067	-0.082	-1.694	-1.038
Ferke (b)	53	1306.2	54860	234.2	881.4	1972.5	0.592	1.759	0.378	0.562
Katiola	35	1100.1	86321	293.8	628.3	1889.8	1.045	2.524	0.722	0.872
Korhogo (aero)	14	1207.4	35099	187.3	835.6	1425.4	-0.890	-1.360	0.085	0.065
Korhogo	34	1339.7	73809	271.7	811.1	2045.4	0.065	0.155	0.105	0.125
Kouto	22	1232.3	43280	208.0	851.1	1616.2	0.125	0.238	-0.175	-0.168
Madinani	20	1420	44060	209.9	1046.3	1764.4	-0.061	-0.110	-1.099	-1.004
Manignan	21	1485.7	99628	315.6	1046.5	2097.7	0.584	1.092	-0.673	-0.630
Mankono	42	1213.8	65074	255.1	627.1	1719	0.193	0.512	-0.628	-0.831
Niakara.	34	1159.9	60564	246.1	563.9	1622.2	-0.159	-0.379	-0.178	-0.212
Odienne	59	1560.5	70591	265.7	991.7	2188.3	0.037	0.116	0.290	0.455
Ouangolo.	31	1163.4	134929	367.3	552.7	2394	1.599	3.635	3.982	4.525
Sinhala	17	1214.7	38583	196.4	935.7	1591.1	0.619	1.043	-0.621	-0.522
Tafire	30	1087.6	67486	259.8	664.6	1816.2	1.048	2.344	1.122	1.255
Tengrela	25	1253	61166	247	782	1683	-0.078	-0.160	-0.904	-0.923
Touba	42	1340.5	43912	209.6	920.4	1803.2	0.266	0.703	-0.021	-0.028

Tableau 2.2.4 : Caractéristiques statistiques des stations de longue durée

2.2.1.2.1.2. Totaux pluviométriques mensuels

Dans le cas des valeurs mensuelles nous avons calculé à chaque station et pour chaque mois : moyenne, variance et coefficient de variation.

Les valeurs de ce dernier sont généralement faibles, excepté pour les mois correspondant à la saison sèche où la variabilité est très importante, les pluies ayant un caractère très aléatoire à cette période de l'année dans cette région.

Le maximum pluviométrique est habituellement observé en Août ou dans quelques cas en Septembre. La répartition des valeurs mensuelles montre là aussi une influence du relief, les précipitations augmentant vers l'Ouest.

2.2.1.2.2. Autres stations

Pour les totaux annuels et mensuels, on a procédé aux mêmes calculs que pour les séries de longue durée : moyenne, variance et coefficient de variation. L'ensemble de ces résultats est reporté dans les tableaux situés en annexe.

La longueur des séries observées est trop variable pour que l'on puisse tirer des conclusions générales concernant ces données.

2.2.1.3. Tracés des isohyètes

2.2.1.3.1. Rappels sur la théorie des variables régionalisées

Notations :

Dans ce qui va suivre nous raisonnerons comme si la grandeur étudiée était la hauteur d'eau précipitée pendant un intervalle de temps.

La pluie tombée en un temps donné peut être considérée comme une fonction aléatoire Z dans un espace à deux dimensions. Un point de cet espace est noté $t(x,y)$ ou plus simplement t . La pluie est mesurée à l'aide d'un réseau de mesures ponctuelles (stations) : t_i , $i=1..n$, n étant le nombre de stations.

Différentes mesures au point i peuvent être indexées par la variable k , ce qui permet d'écrire $z_k(t_i)$ ou z_{ik} comme étant la valeur prise par la fonction z au $k^{\text{ième}}$ épisode ou "événement" et à la station i . L'ensemble des mesures z_{ik} où i varie de 1 à n constitue la $k^{\text{ième}}$ réalisation de la fonction aléatoire Z , que l'on notera Z_k et que l'on appelle également un "champ".

On notera $z_k(t_0)$ la valeur estimée (interpolée) pour le $k^{\text{ième}}$ épisode au point $t_0(x_0,y_0)$.

Matheron (1972) a proposé le terme "régionalisé" pour qualifier un phénomène se déployant dans l'espace (et/ou dans le temps) selon une structure donnée. La variable associée à ce phénomène est appelée "variable régionalisée" (VR).

Pour traiter ces variables régionalisées, sur un plan conceptuel et pratique, on peut utiliser la théorie des fonctions aléatoires (FA). On interprète alors la VR comme une "réalisation de fonction aléatoire", c'est-à-dire comme le résultat d'un tirage au sort dans un ensemble de fonctions (Pouget, 1987).

Pour pouvoir inférer la loi de la FA (ou du moins ses premiers moments) sur un phénomène unique, il convient d'introduire des hypothèses supplémentaires sur la FA, vu l'impossibilité des calculs des moments d'une FA à partir d'une seule réalisation.

L'hypothèse la plus couramment formulée est celle de la stationnarité. Cependant, le développement des calculs d'estimation optimale montre qu'il n'est pas nécessaire que la FA elle-même soit stationnaire si ses accroissements d'ordre 2 le sont.

Dans ces conditions on pourra se contenter de faire l'hypothèse que, pour tout vecteur h , l'accroissement $z(t+h)-z(t)$ a une espérance mathématique et une variance indépendantes du point t . C'est à dire :

$$E[z(t+h) - z(t)] = 0$$

$$\text{Var}[z(t+h) - z(t)] = 2 \gamma(h)$$

Cette hypothèse, moins contraignante que celle de la stationnarité d'ordre 2, constitue l'"hypothèse intrinsèque". La fonction $\gamma(h)$ est appelée le "demi variogramme" ("variogramme", par abus de langage).

2.2.1.3.1.1. Variogramme

Le variogramme d'une FA intrinsèque s'écrit (Pouget, 1987) :

$$\gamma(h) = 1/2 \text{Var}[z(t+h) - z(t)]$$

$$\text{ou encore } \gamma(h) = 1/2 E[(z(t+h) - z(t))^2]$$

$$\text{puisque } E[z(t+h) - z(t)] = 0$$

$2 \gamma(h)$ est donc l'accroissement quadratique moyen entre deux points distants de h .

Ce variogramme est donc comparable au corrélogramme, $\rho(h)$ (représentation de la corrélation en fonction de la distance séparant deux points).

$$\rho(h) = \text{Cov}(z(t), z(t+h)) / [\sqrt{\text{Var}(z(t))} * \sqrt{\text{Var}(z(t+h))}]$$

Lebel (1984) a montré que lorsqu'il existe une variance finie, variogramme et corrélogramme ne sont que deux formulations d'une même fonction de structure. On a alors :

$$\rho(h) = 1 - \gamma(h)/K(0)$$

$$\text{avec } K(0) = \text{Var}[z(t)] = E[(z(t) - m)^2]$$

Ainsi donc dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque on peut estimer le variogramme $\gamma(h)$ à partir des couples de points expérimentaux disponibles à l'issue d'une réalisation unique.

Ces couples sont regroupés dans des classes d'égale distance ou d'effectifs égaux. On peut alors déterminer un variogramme brut :

$$\gamma_b(h) = \frac{1}{2} N(h) * \sum_i [z(t_i+h) - z(t_i)]^2$$

avec $N(h)$: nombre de couples dans la classe d'interdistance moyenne h .

En théorie, le graphe doit passer par l'origine et croître ensuite. Cette croissance, plus ou moins rapide, caractérise ainsi d'une manière statistique la façon dont se détériore l'information apportée par une mesure ponctuelle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point connu.

2.2.1.3.1.2. Krigage

Le krigage se fixe pour but de déterminer un interpolateur linéaire sans biais et d'erreur quadratique moyenne minimale. C'est-à-dire une pondération (Pouget, 1987).

$$\text{Soit } \hat{z}_k(t_0) = \hat{z}(t_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

$$\text{avec } E[\hat{z}(t_0) - z(t_0)] = 0$$

$$E[\hat{z}(t_0) - z(t_0)]^2 \text{ minimum}$$

Sous l'hypothèse intrinsèque, on arrive à :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

La minimisation de $E[\hat{z}(t_0) - z(t_0)]^2$ en annulant les dérivées partielles par rapport aux λ_i et sous la contrainte $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ conduit au système de krigage simple (Lebel, 1984).

$$\begin{bmatrix} \Gamma & E \\ E^t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ E_0 \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} & 0 & \dots & \gamma_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{n1} & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Γ est conditionnellement définie négative.

$$E^t = (1, 1, \dots, 1)_n \quad E_0 = (1)$$

$$\lambda^t = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$$

$$\mu = (\mu_0) \text{ coefficient de Lagrange}$$

Le système s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma E \\ E^t 0 \end{bmatrix}^{-1}$$

et

$$Z_0 = [\lambda^t \mu^t] \begin{bmatrix} Z \\ 0 \end{bmatrix}$$

c'est la formulation estimateur.

En effectuant les calculs matriciels dans un ordre différent, on peut exprimer le système sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \Psi \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma E \\ E^t 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z \\ 0 \end{bmatrix}$$

et

$$Z_0 = [\Gamma_0^t E_0^t] \begin{bmatrix} \Psi \\ \alpha \end{bmatrix}$$

c'est la formulation interpolateur

Cas particulier des fonctions Spline : (Lebel, 1984 ; Pouget, 1987)

Lorsque le processus Z n'a pas une espérance constante, on cherche à exprimer cette espérance comme une fonction des coordonnées du plan,

$$E[z(t)] = f(t)$$

f étant une fonction déterministe, appelée "dérive", généralement linéaire ou quadratique.

Les fonctions Spline de type plaque mince, qui sont une extension dans le plan des fonctions Spline cubiques à une dimension, permettent de représenter un processus aléatoire dont les caractéristiques sont les suivantes :

- dérive linéaire : $f(t) = \alpha + \beta x + y$
- covariance généralisée : $K(h) = h^2 \text{Ln}(h)$

Cette covariance généralisée définit la structure spatiale du processus lorsque la présence d'une dérive non constante empêche l'inférence directe d'un variogramme (Delhomme, 1976).

La covariance généralisée Spline est celle de phénomènes variant très graduellement dans l'espace ; elle est généralement mal adaptée à la pluviométrie. L'interpolation à l'aide des fonctions Spline doit donc être essentiellement réservée au tracé d'isovaleurs (c'est à dire à une visualisation du phénomène) et non à l'estimation de valeurs moyennes et encore moins au calcul de variances d'estimation (Lebel, 1984).

2.2.1.3.2. Tracé des isohyètes

2.2.1.3.2.1. Isohyètes interannuelles - Totaux annuels

Ces tracés ont été réalisés (figure 2.2.3) par interpolation au moyen de fonctions Spline. Ils ne concernent que les stations de longue durée, ce qui permet des calculs représentatifs.

Du fait de la faible densité des points de mesure dans les secteurs Nord-Ouest, Nord-Est et Sud-Ouest, le tracé des isohyètes dans ces différentes zones doit être examiné avec circonspection. Les anomalies que l'on peut relever localement sont, sans aucun doute, dûes à cette absence de données.

Il faut préciser, à ce niveau, que les moyennes interannuelles ont été calculées sur des périodes de longueurs différentes. L'aspect des isohyètes n'en est pas affecté et on n'utilise pas ces interpolations pour le calcul de champs de pluie ; on peut donc se permettre d'utiliser l'ensemble des données disponibles pour chaque station à des fins de visualisation des phénomènes.

Certains traits généraux peuvent alors être notés.

On constate en effet un accroissement assez régulier de la pluviométrie interannuelle d'Est en Ouest, bien que le tracé des isohyètes soit perturbé aux alentours de Boundiali et de Sinhala.

Le maximum est observé autour d'Odienné, ce qui confirme l'importance de la dorsale guinéenne et de son influence sur le régime des précipitations.

2.2.1.3.2.2. Isohyètes mensuelles interannuelles

On trouvera, figures 2.2.4 à 2.2.10, les isohyètes correspondant aux mois d'Avril à Octobre, c'est à dire les mois les plus pluvieux.

La croissance de la pluviométrie est orientée Nord-Sud pour les mois à faible précipitation. C'est, à ce moment là, l'éloignement de l'océan qui est le facteur déterminant de la pluviométrie. Plus on avance dans la saison des pluies et plus cette croissance se déplace selon un axe Est-Ouest. Les situations météorologiques étant généralement uniformément plus favorables pour la pluviométrie, c'est le relief qui devient déterminant.

Les tracés des figures 2.2.4 à 2.2.10 présentent certaines irrégularités qui sont, en fait, des artefacts dûs à la méthode et à la faible densité de données. Les tendances générales apparaissent cependant clairement et permettent une bonne visualisation du phénomène.

Carte des isohyètes interannuelles

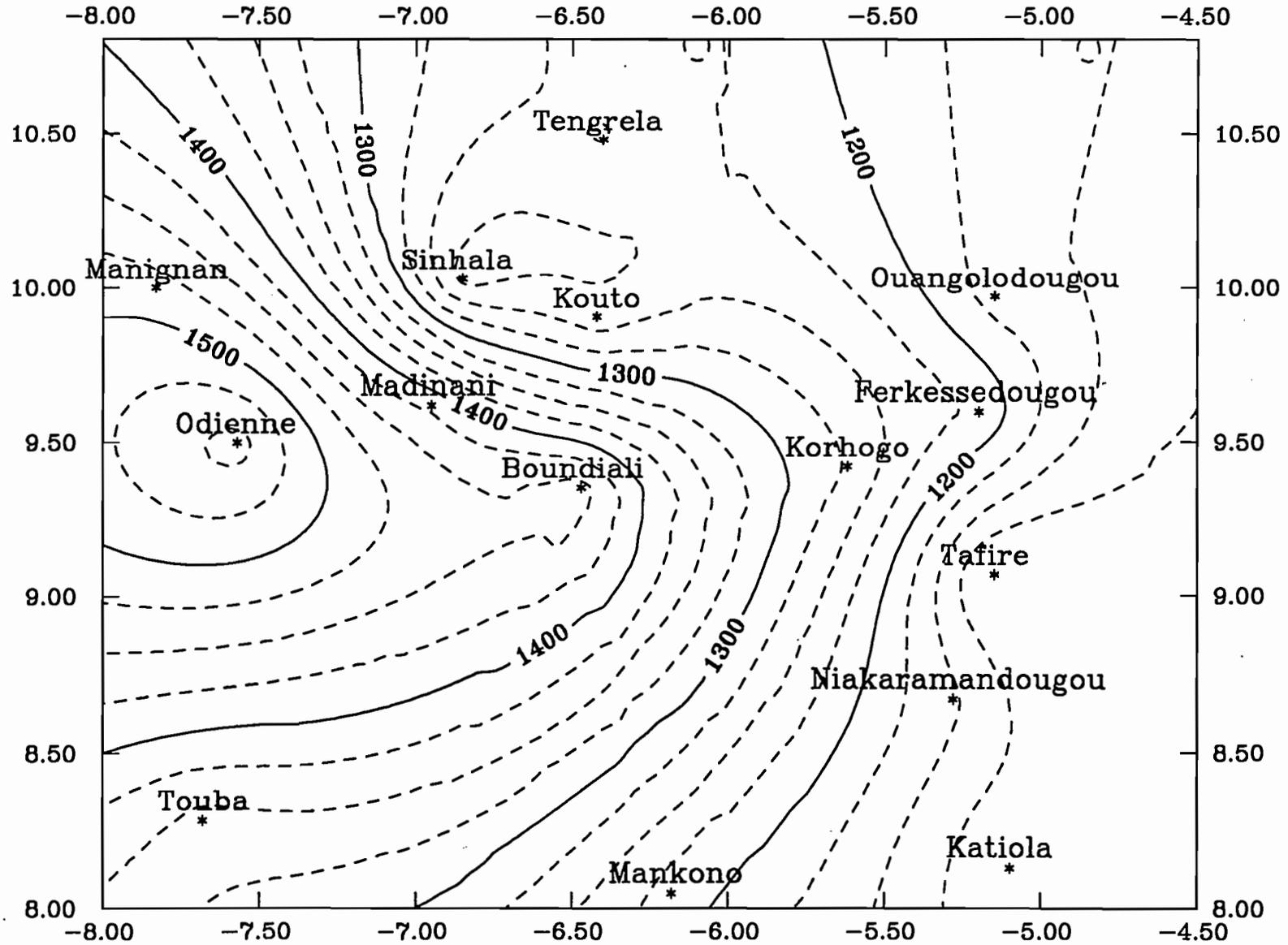


Figure 2.2.3 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES - MOIS D'AVRIL

Première partie

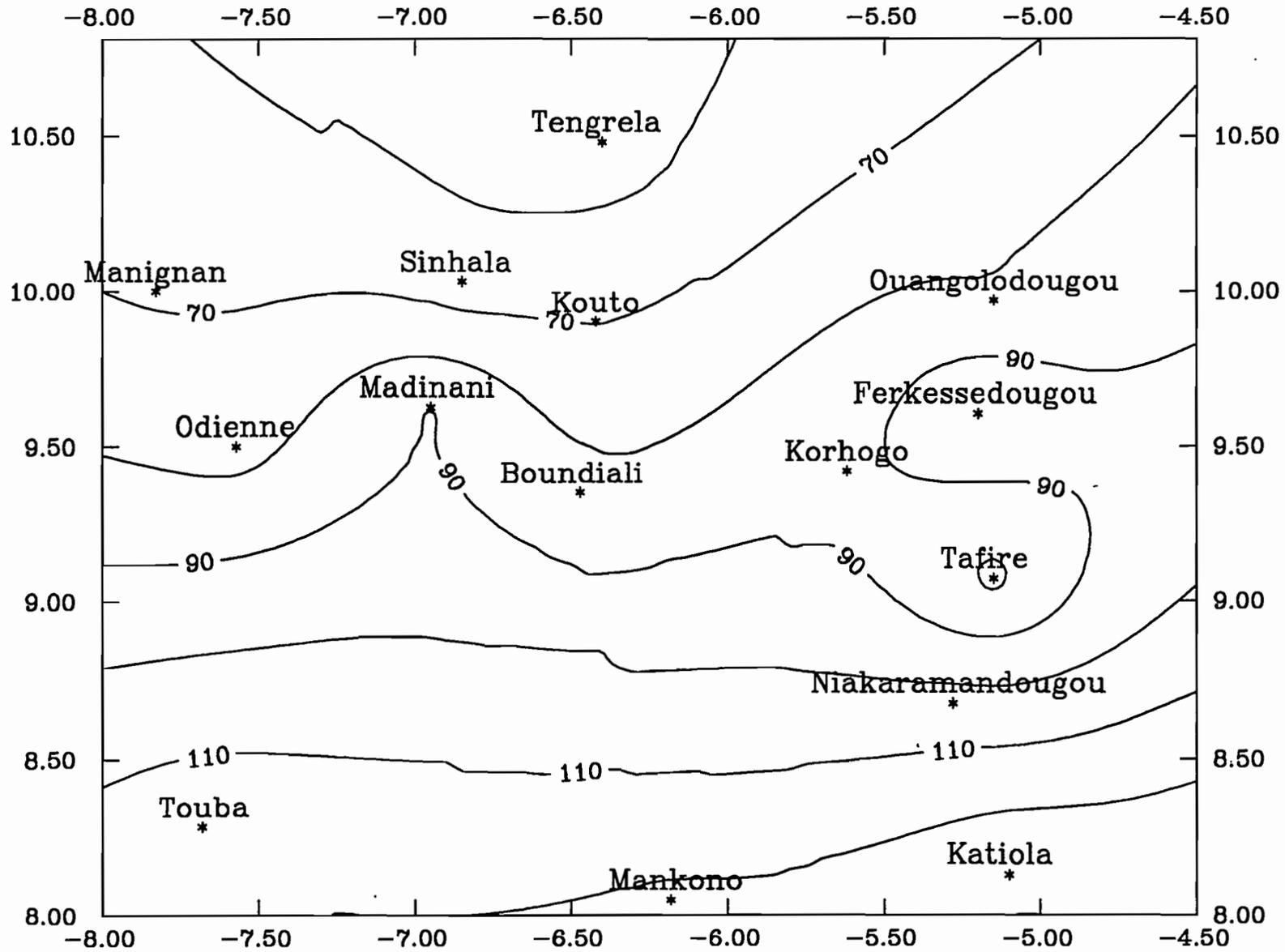


Figure 2.2.4 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES - MOIS DE MAI

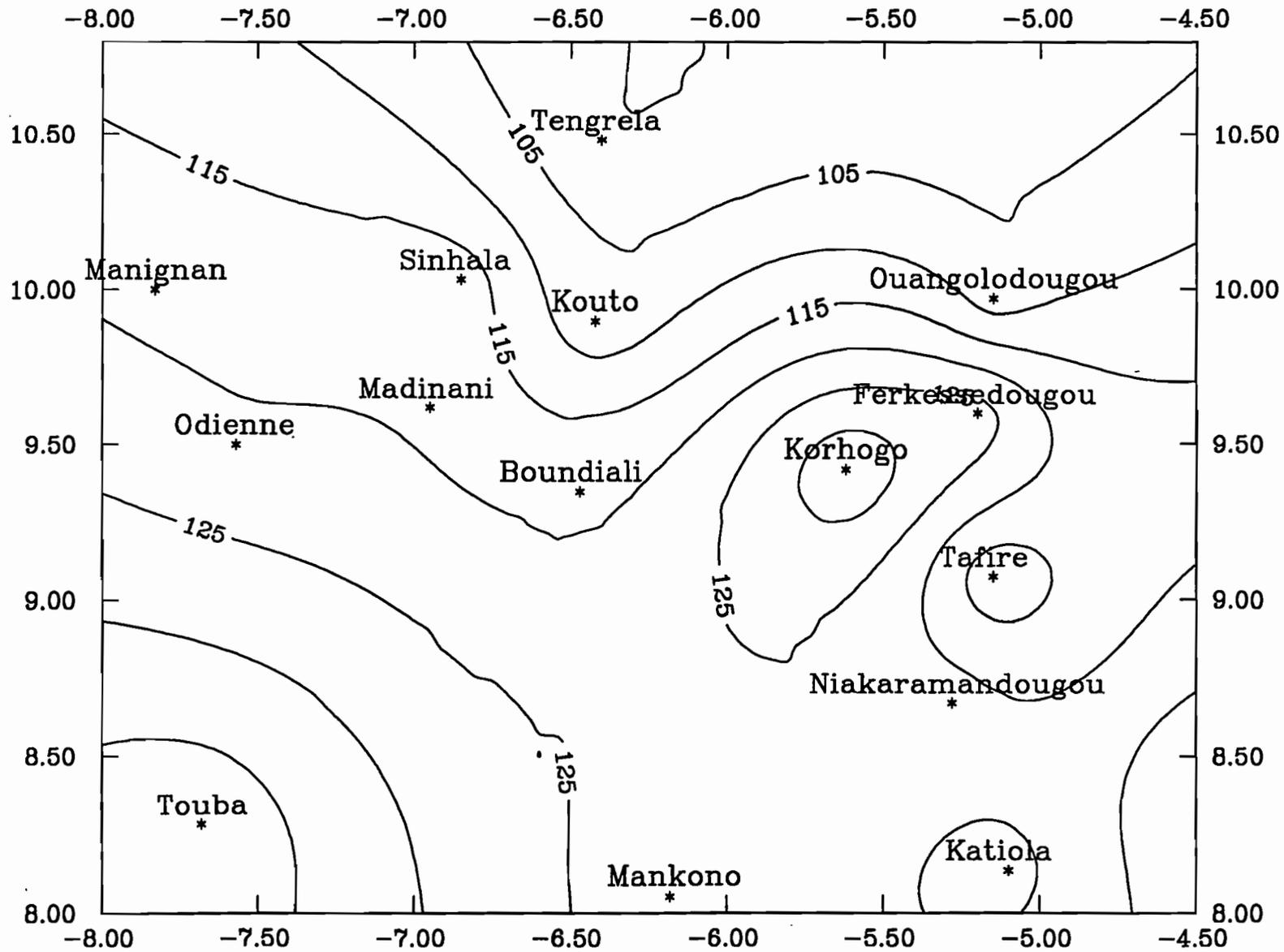


Figure 2.2.5 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES – MOIS DE JUIN

Première partie

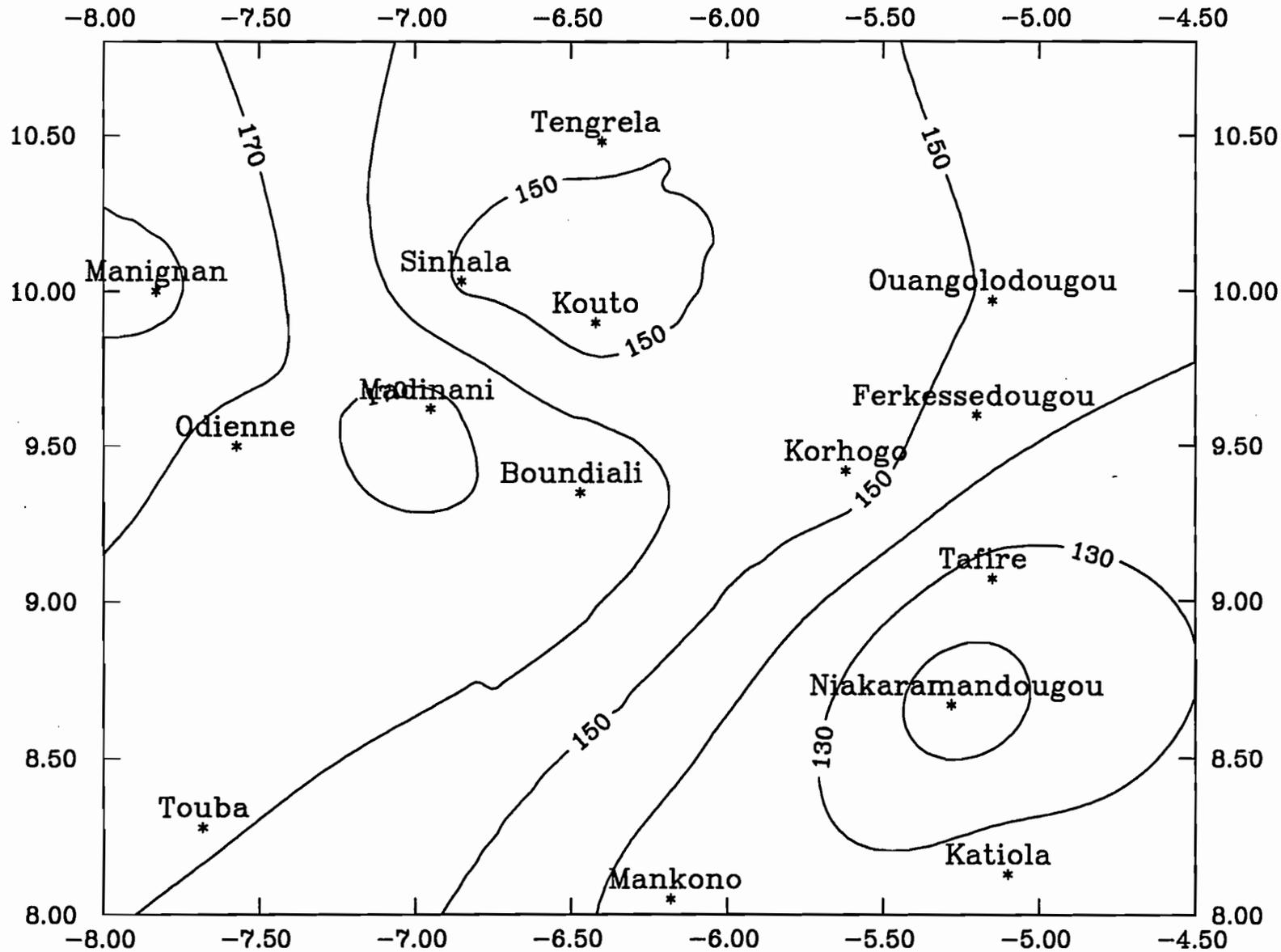
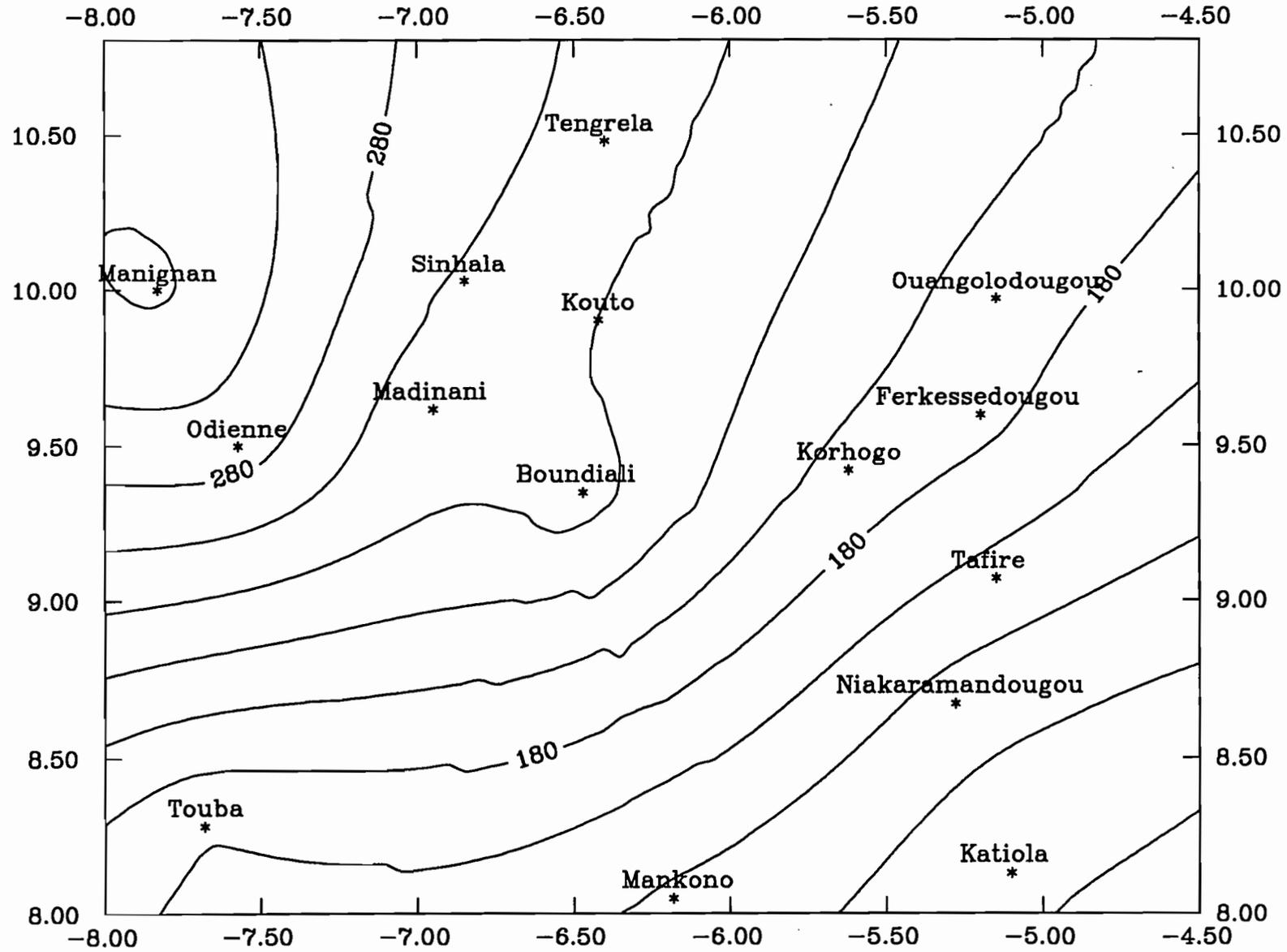


Figure 2.2.6 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES – MOIS DE JUILLET



Première partie

Figure 2.2.7 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES — MOIS D'AOUT

Première partie

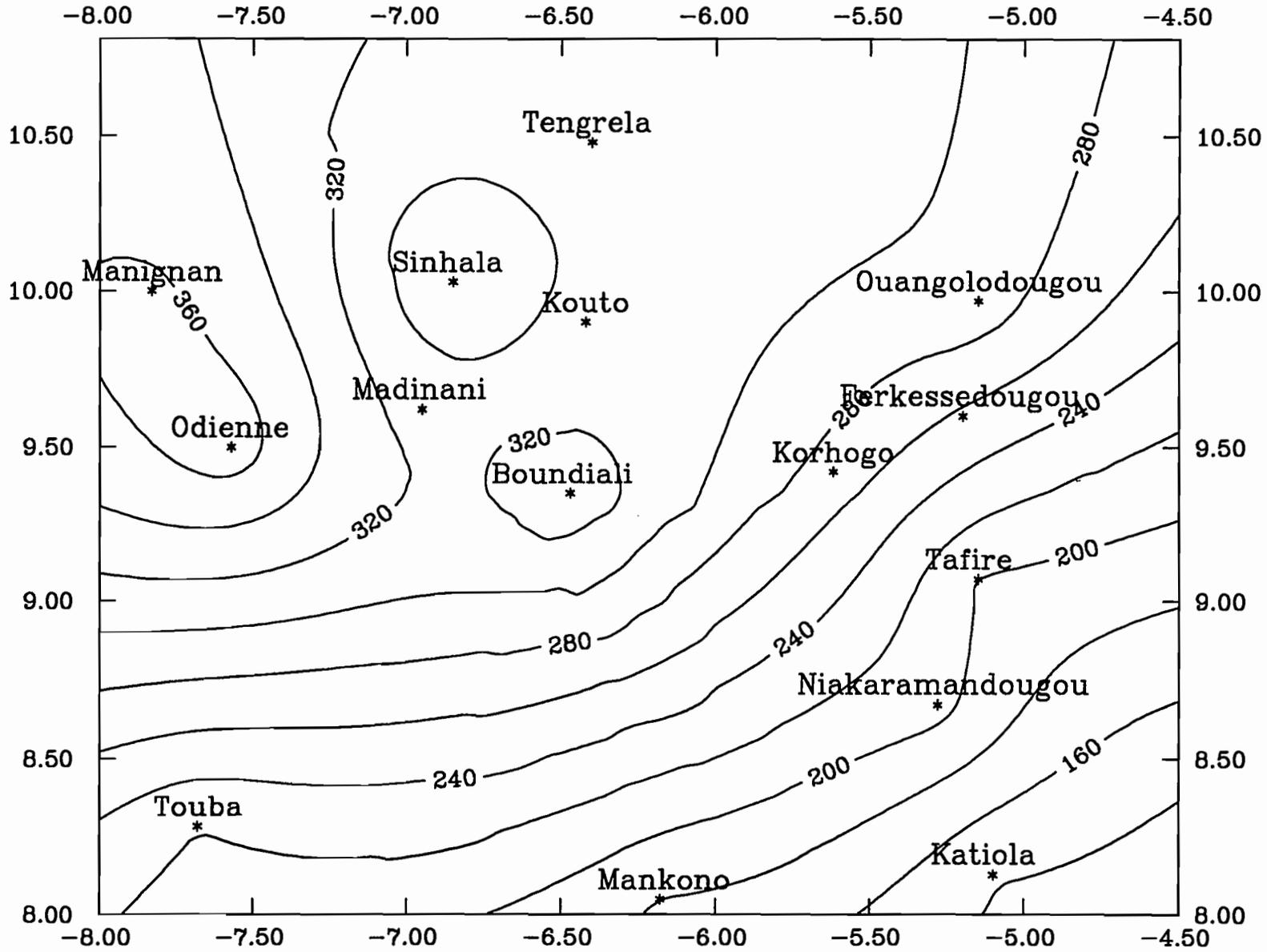


Figure 2.2.8 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES – MOIS DE SEPTEMBRE

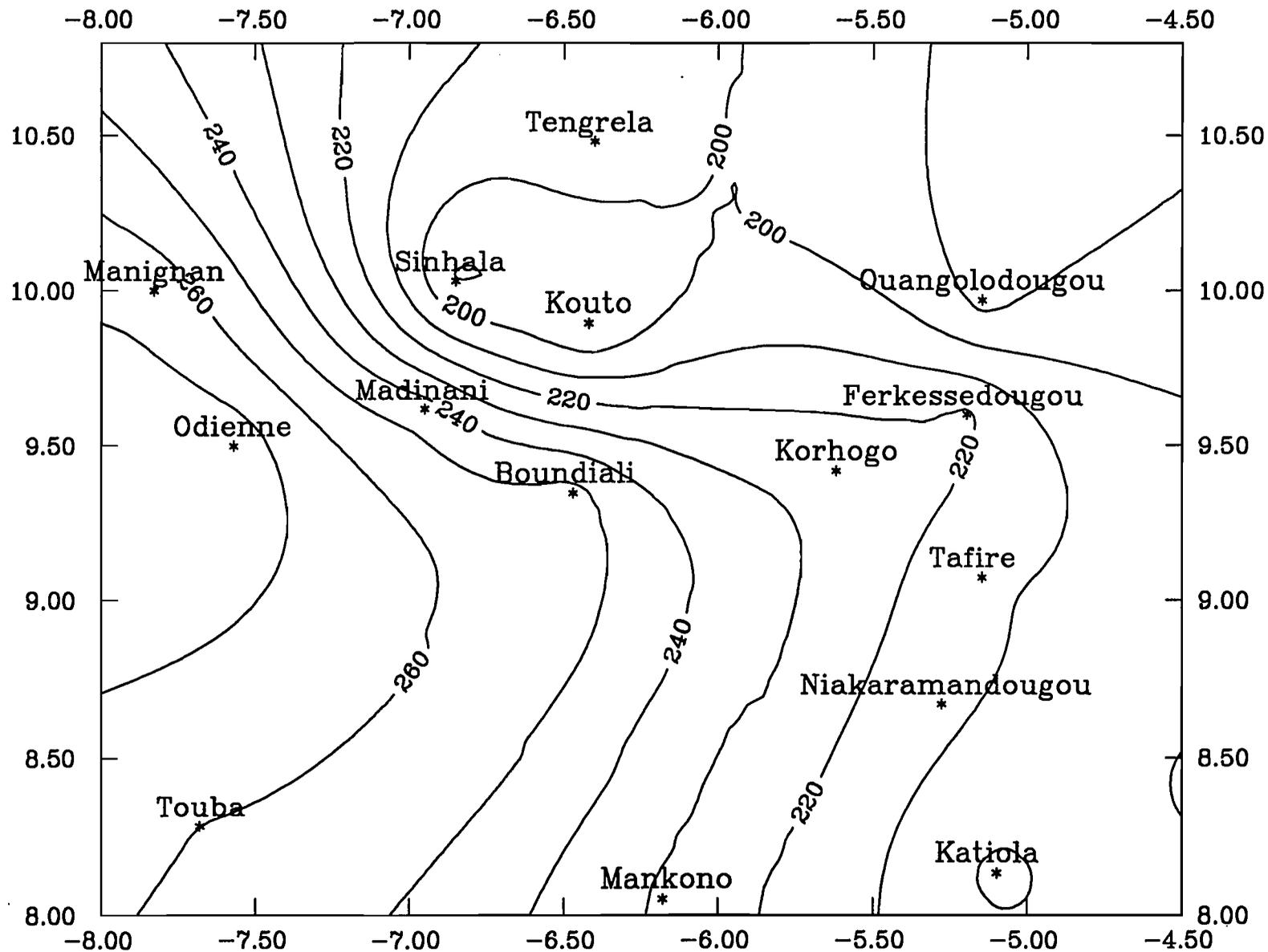


Figure 2.2.9 : Isohyètes interannuelles

ISOHYETES INTERANNUELLES - MOIS D'OCTOBRE

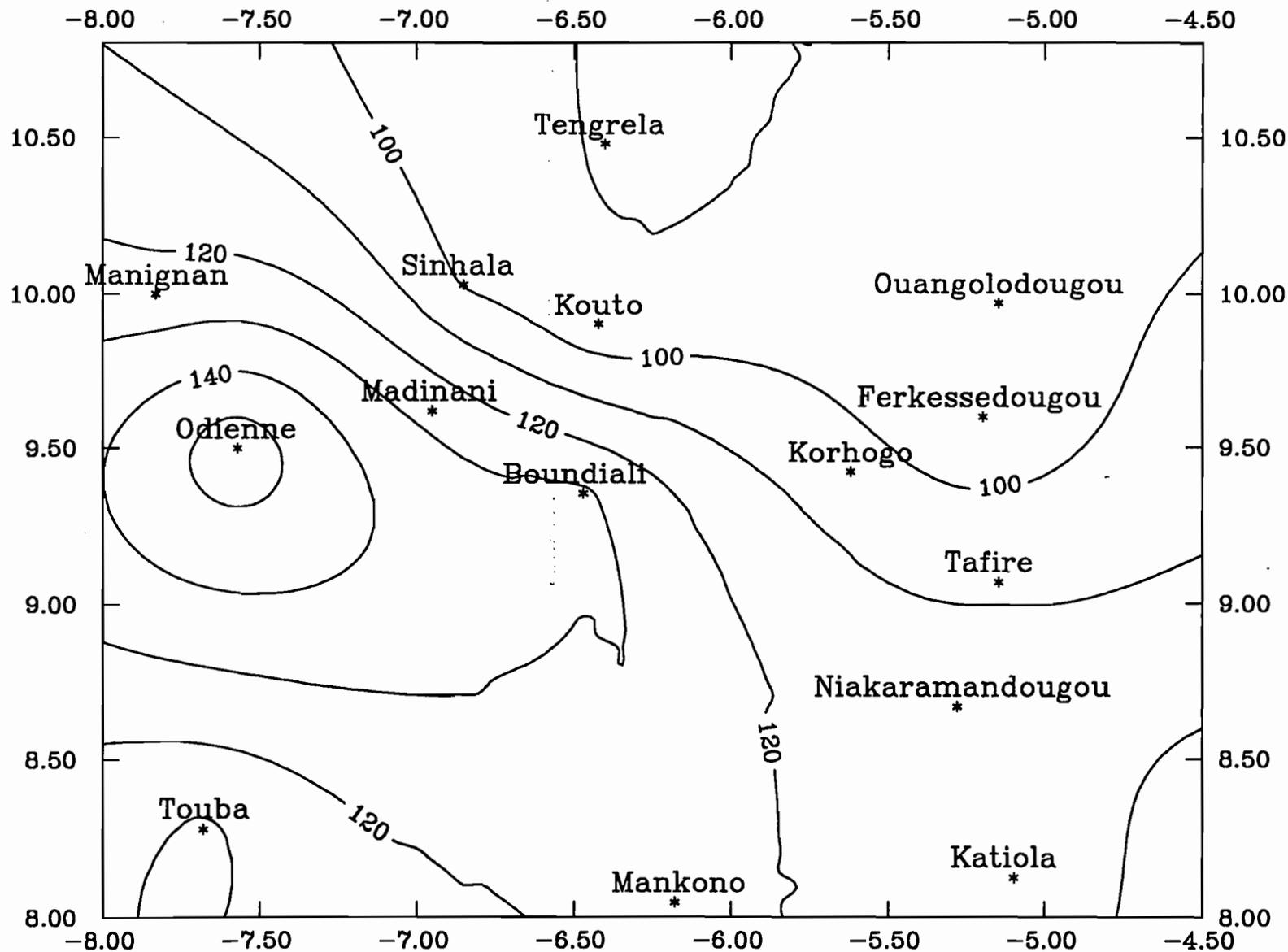


Figure 2.2.10 : Isohyètes interannuelles

2.2.1.4. Corrélations

On a reporté dans le tableau 2.2.5 l'ensemble des coefficients de corrélation calculés sur les séries de totaux pluviométriques mensuels. Nous n'avons pas corrélé toutes les stations deux à deux. La zone d'étude est en effet trop étendue pour que la distance entre postes ne joue pas.

	Tou.	Mank	Katio	Daba	Niaka	Tafire	Kor.	Ferke	Ouan	Boun	Madi	Kou	Sinha	Tengr	Odie	Mani
Touba	1															
Mankono		1	0,669													
Katiola		0,669	1	0,712	0,736											
Dabakala			0,712	1	0,72											
Niakara			0,736	0,72	1	0,814										
Tafire					0,814	1	0,748	0,78								
Korhogo						0,748	1	0,831	0,864	0,798						
Ferke						0,78	0,831	1	0,872							
Ouangolo							0,864	0,872	1							
Boundiali							0,798			1	0,809	0,804			0,807	
Madinani										0,809	1	0,837	0,841		0,873	
Kouto										0,804	0,837	1	0,879			
Sinhala											0,841	0,879	1	0,884		
Tengrela													0,884	1		
Odienne										0,807	0,873				1	0,866
Manignan															0,866	1

Tableau 2.2.5 : Corrélations mensuelles entre postes pluviométriques

Les coefficients de corrélation obtenus sont tout juste bons. Ils sont en tous cas moins bons que ce que pourrait laisser supposer certaines proximités géographiques. Le maximum est en effet de 0.884, soit un coefficient de détermination de 0.78 ce qui n'est pas particulièrement élevé.

C'est là le signe d'une pluviométrie à la distribution très localisée ne permettant que rarement des opérations d'interpolation. Dans cette région très plane le moindre relief à un effet "pluviogène" marqué renforçant les caractères très localisés des distributions pluviométriques.

2.2.1.5. Homogénéité des séries chronologiques

On testera ici l'homogénéité d'une série chronologique, à partir de la série elle-même. Pour ce faire on utilisera une méthode bayésienne de détection de changement de moyenne dans une série chronologique à un instant.

2.2.1.5.1. Méthode bayésienne de détection de changement de moyenne

Soit une série chronologique $x_i, i=1..n$.

Si de $i=1$ à τ on a $x_i = u + \varepsilon$, et si de $i=\tau+1$ à n on a $x_i = u + d + \varepsilon$

(avec ε résidu qui suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type unité)

alors entre τ et $\tau+1$ la moyenne a changé de la valeur d .

A priori, le changement de moyenne peut intervenir sur n'importe quel intervalle de temps. La probabilité que le changement de moyenne intervienne au temps τ est :

$$p(\tau) = 1/(n-1)$$

A posteriori, ayant observé x_1, x_2, \dots, x_n on peut calculer une nouvelle probabilité :

$p(\tau/x_1, x_2, \dots, x_n)$ qui est proportionnelle à :

$$\sqrt{\frac{n}{\tau(n-\tau)} * \frac{1}{[R(\tau)]^{n-2}}}$$

avec :

$$R(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} (X_i - \bar{X}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (X_i - \bar{X}_{n-\tau})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}$$

$$\bar{X}_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} X_i \quad \bar{X}_{n-\tau} = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=\tau+1}^n X_i \quad \bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Dès qu'un $p(\tau)$ est significativement différent des autres, on a une cassure, un pic dans la distribution des probabilités, qui indique un changement de moyenne et donc une hétérogénéité dans la série chronologique.

2.2.1.5.2. Examen des stations de longue durée

La méthode bayésienne de détection des changements de moyenne a été appliquée aux séries chronologiques observées aux stations de longue durée.

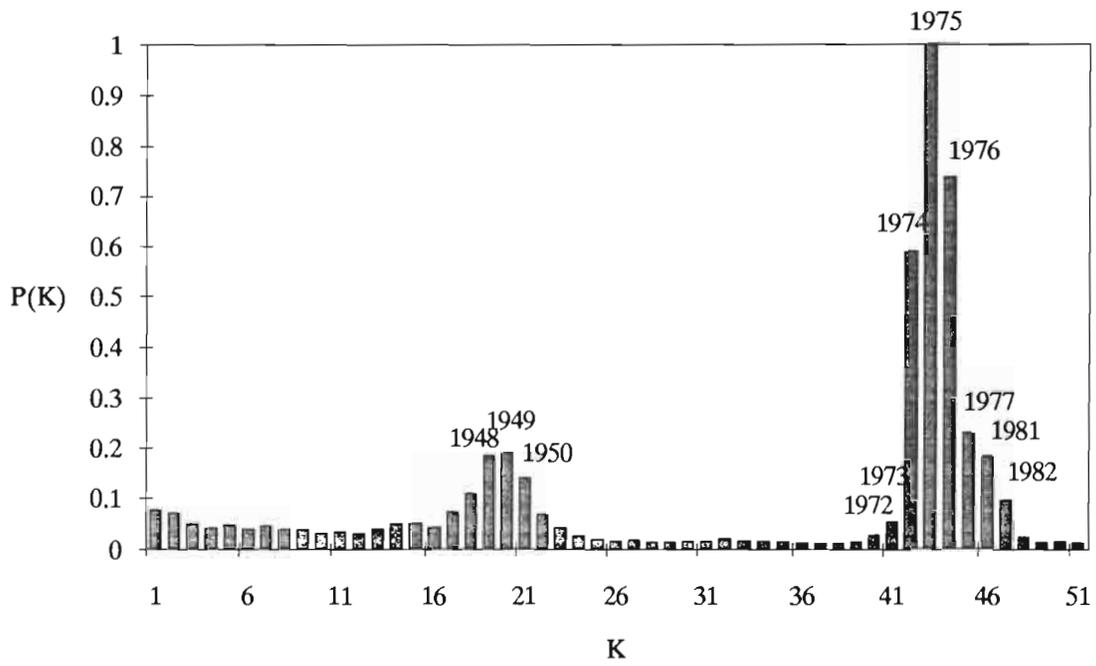
Les résultats présentés figures 2.2.11 à 2.2.18 ont été normés par rapport à la valeur maximale de $p(\tau)$. Le tableau 2.2.6 récapitule les observations intéressantes qui ressortent de l'examen des tracés.

Station	Date de changement de moyenne présumé
Boundiali	1975 avec tendances dès 1974
Dabakala	1971 avec tendances dès 1968
Ferkessedougou	Dès 1965 et accentuation en 1970/1971
Katiola	Période peu marquée démarrant dès 1968
Korhogo	1970
Madinani	Période peu marquée de 1967 à 1972
Manignan	1969 ou 1970
Mankono	Période peu marquée de 1968 à 1974
Niakaramandougou	1968
Odienné	1982
Ouangolodougou	1955
Sinhala	1969
Tafire	Période peu marquée de 1965 à 1970
Tengrela	Dès 1964 et accentuation en 1970
Touba	1959

Tableau 2.2.6 : Homogénéité des séries pluviométriques

Mis à part quelques cas très particuliers comme Touba, Ouangolodougou, ou encore Odienné, on détecte un changement de moyenne dans les séries chronologiques de totaux pluviométriques annuels à la fin des années soixante ou au début des années soixante dix. Ce test traduit donc une hétérogénéité des séries pluviométriques et confirme ce qui est ressenti sur le terrain, à savoir une importante baisse de la pluviométrie depuis le début des années 1970. Si la date précise détectée par la méthode peut fluctuer d'une station à l'autre, l'intervalle couvrant les années 1968 à 1972 apparaît indiscutablement comme la période durant laquelle est intervenue cette modification dans le régime pluviométrique. Certains cas particuliers, comme ceux que nous citons plus haut, en complet déphasage avec la grande majorité des stations observées, restent toutefois inexplicables. Parmi la multitude d'explications envisageables, on peut citer la mauvaise qualité des données pouvant être due à un changement d'appareillage, d'observateur,...

Station de Boundiali



Station de Dabakala

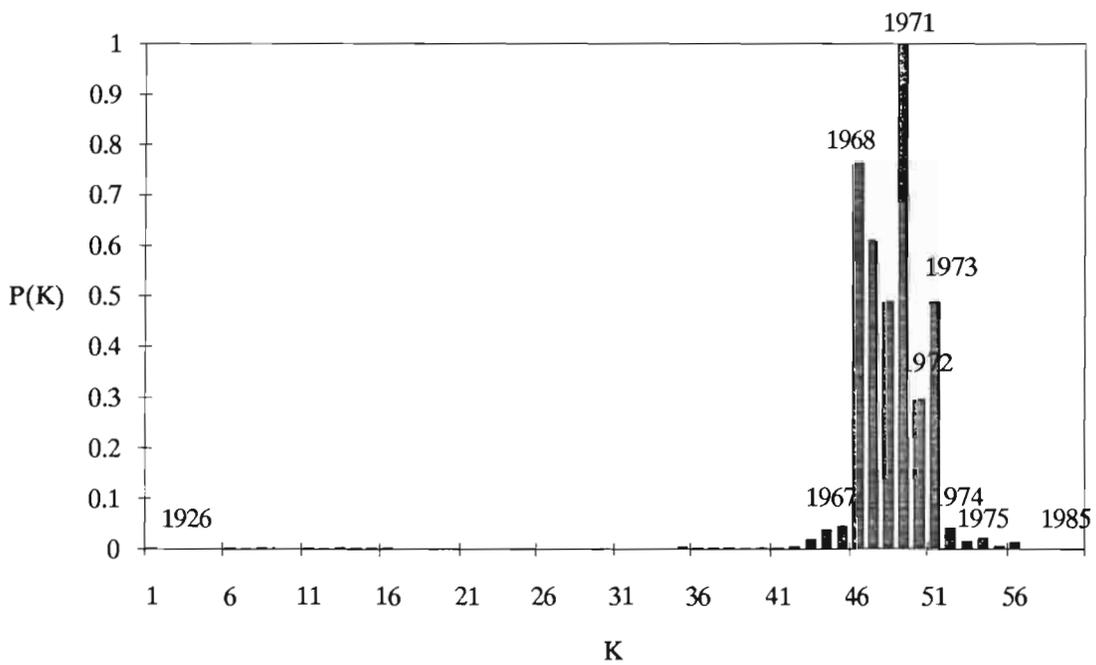
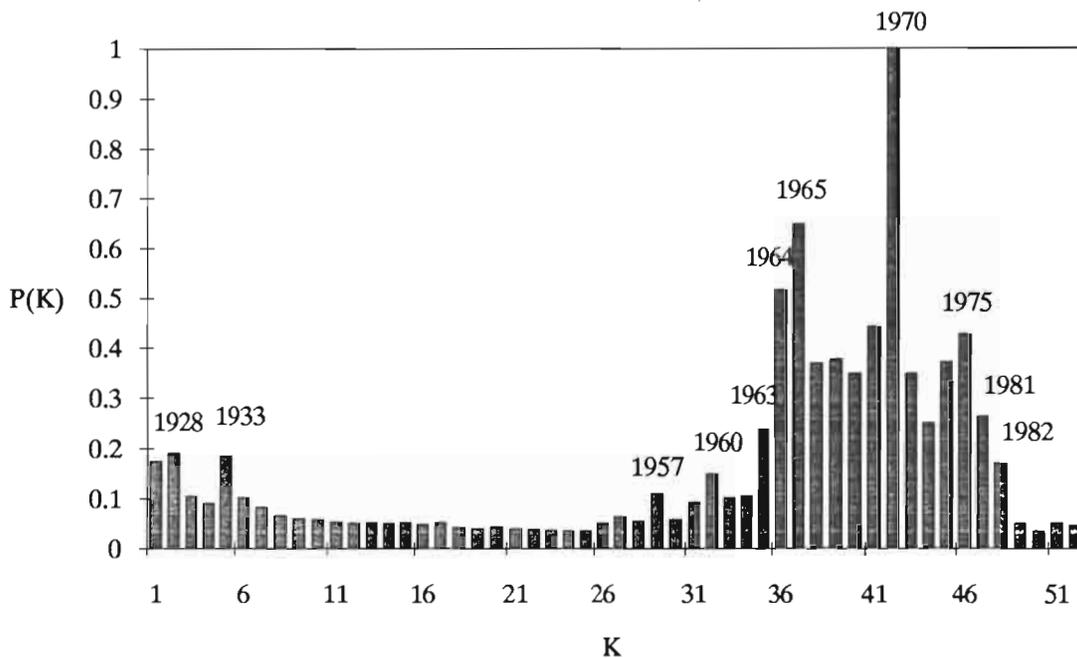


Figure 2.2.11 : probabilités de changement de moyenne

Station de Ferkessedougou



Station de Katiola

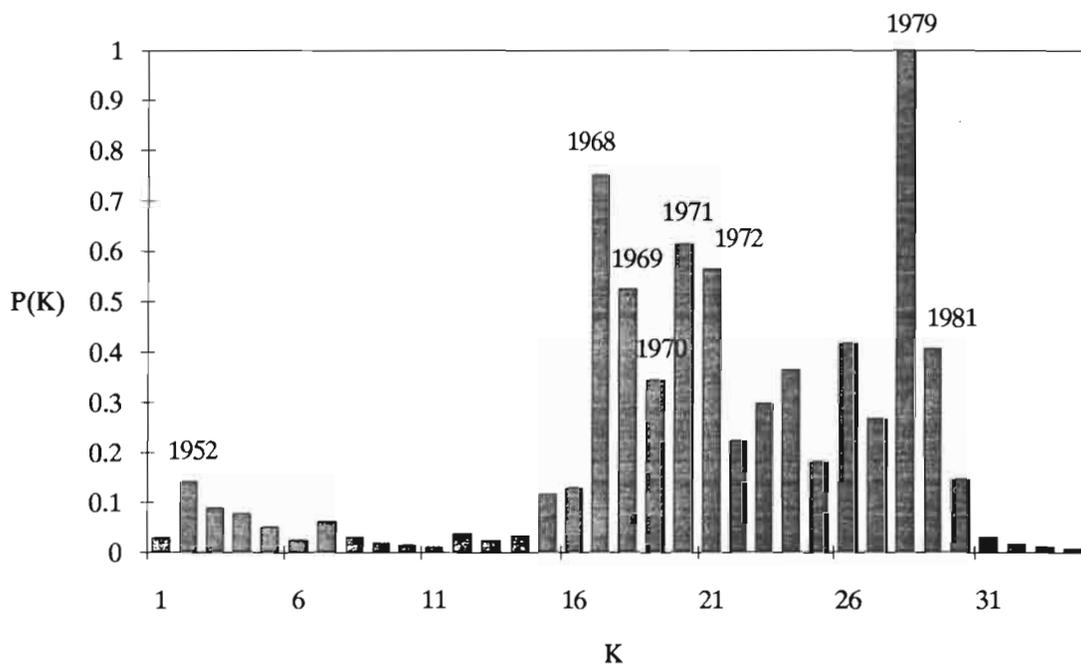
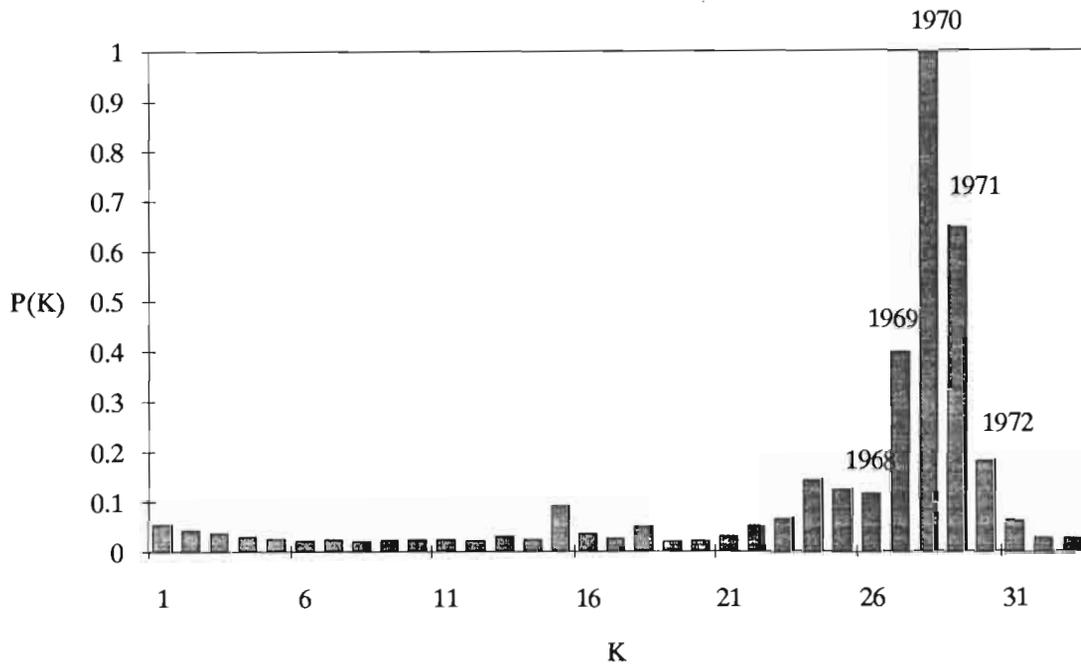


Figure 2.2.12 : probabilités de changement de moyenne

Station de Korhogo



Station de Kouto

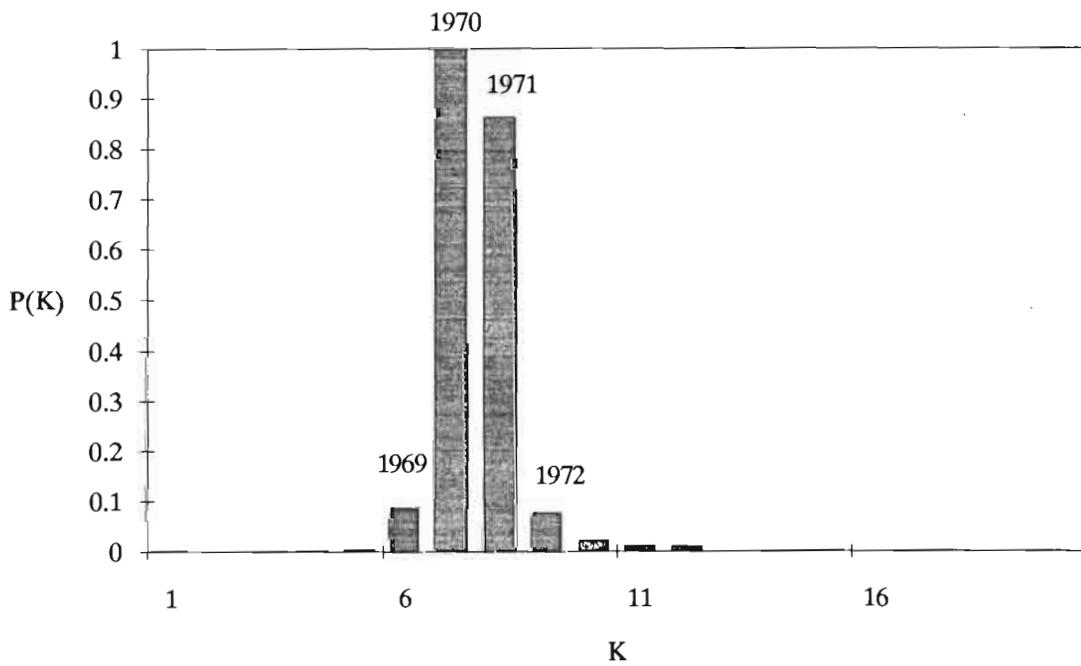
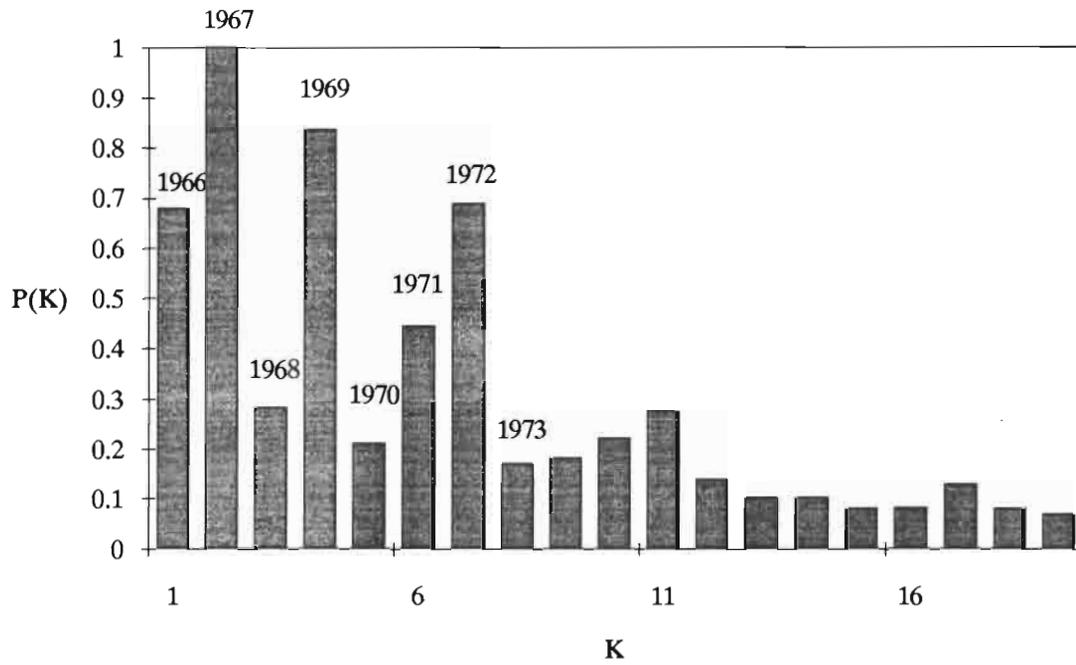


Figure 2.2.13 : probabilités de changement de moyenne

Station de Madinani



Station de Manignan

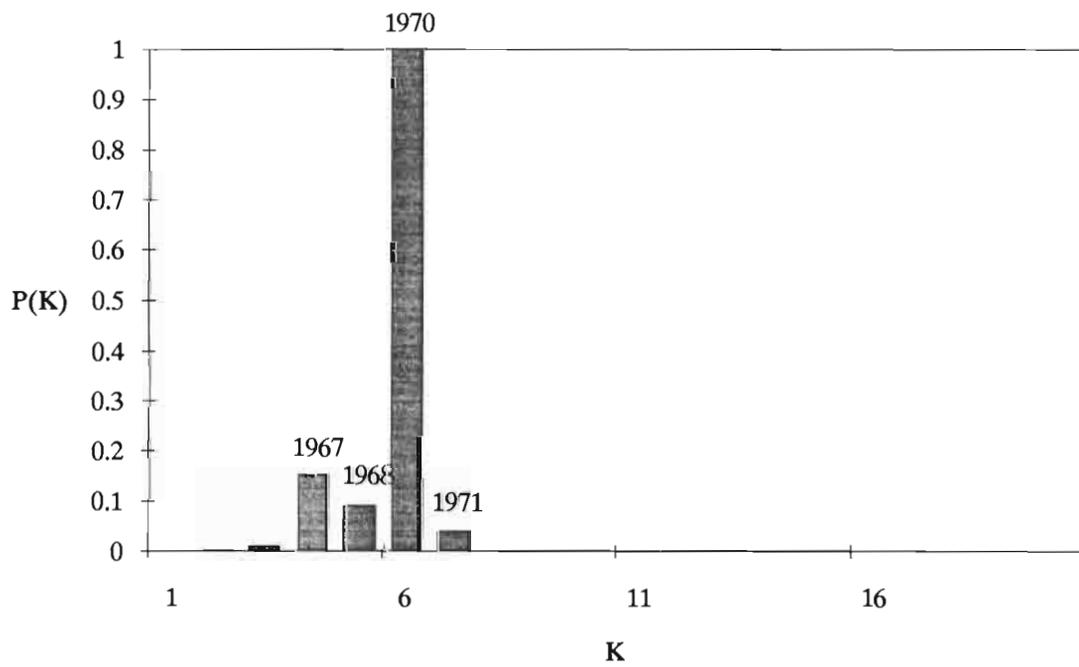
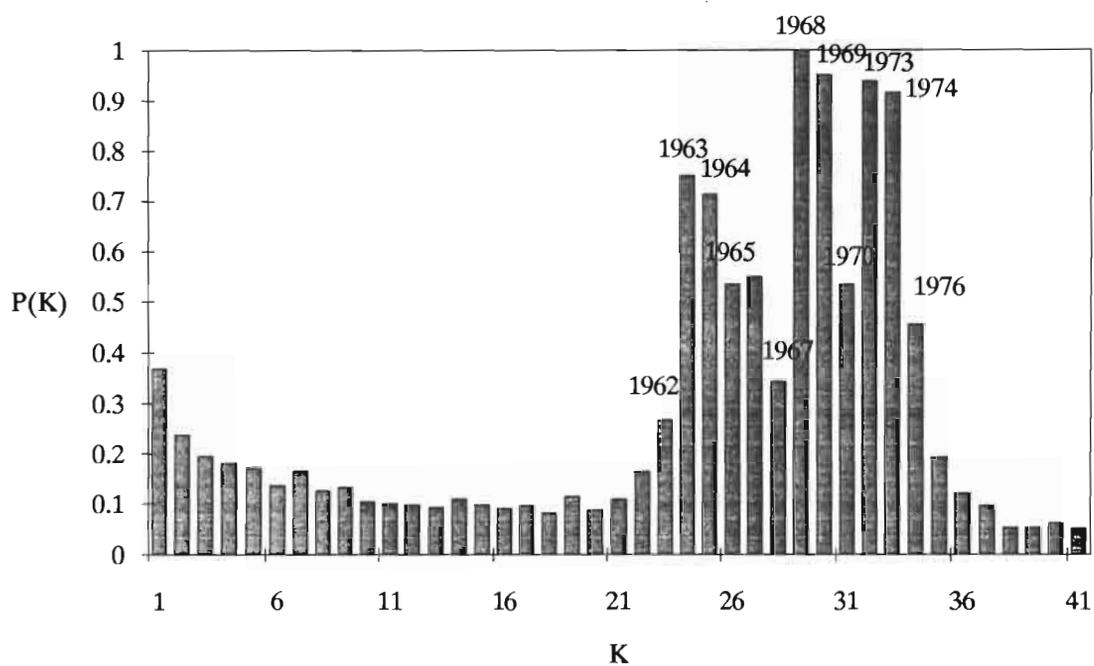


Figure 2.2.14 : probabilités de changement de moyenne

Station de Mankono



Station de Niakaramandougou

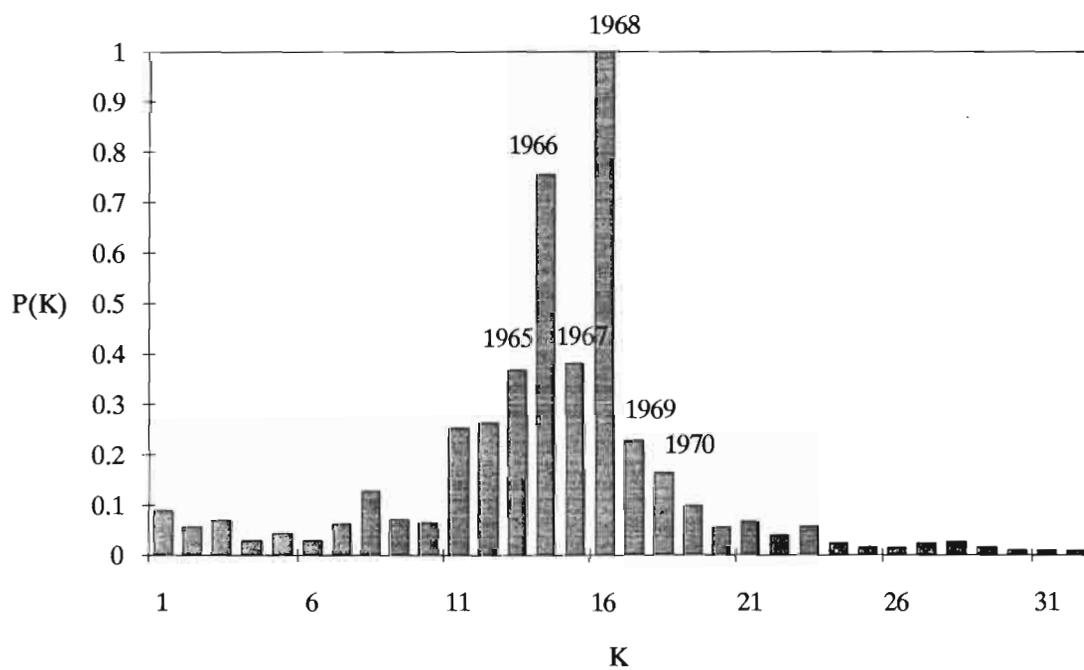
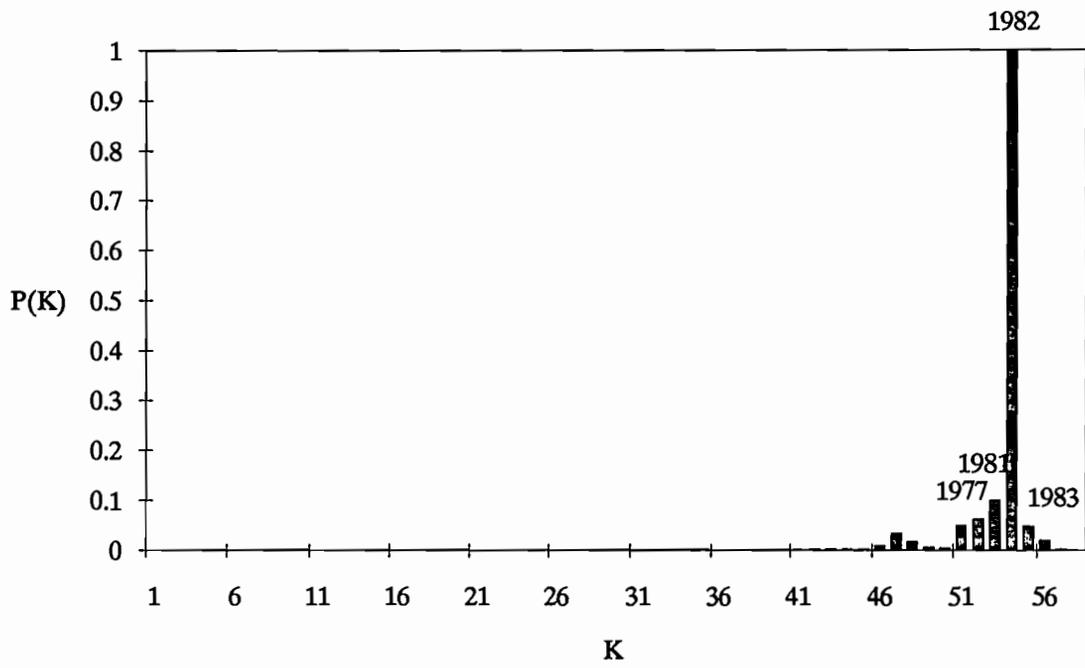


Figure 2.2.15 : probabilités de changement de moyenne

Station d'Odienne



Station de Ouangolodougou

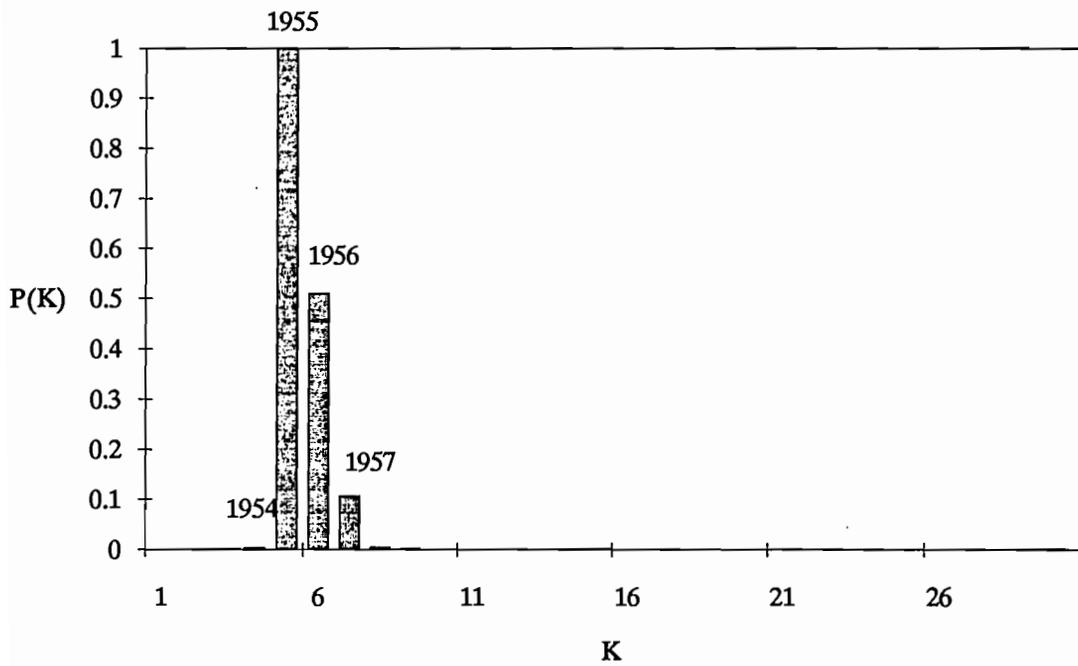
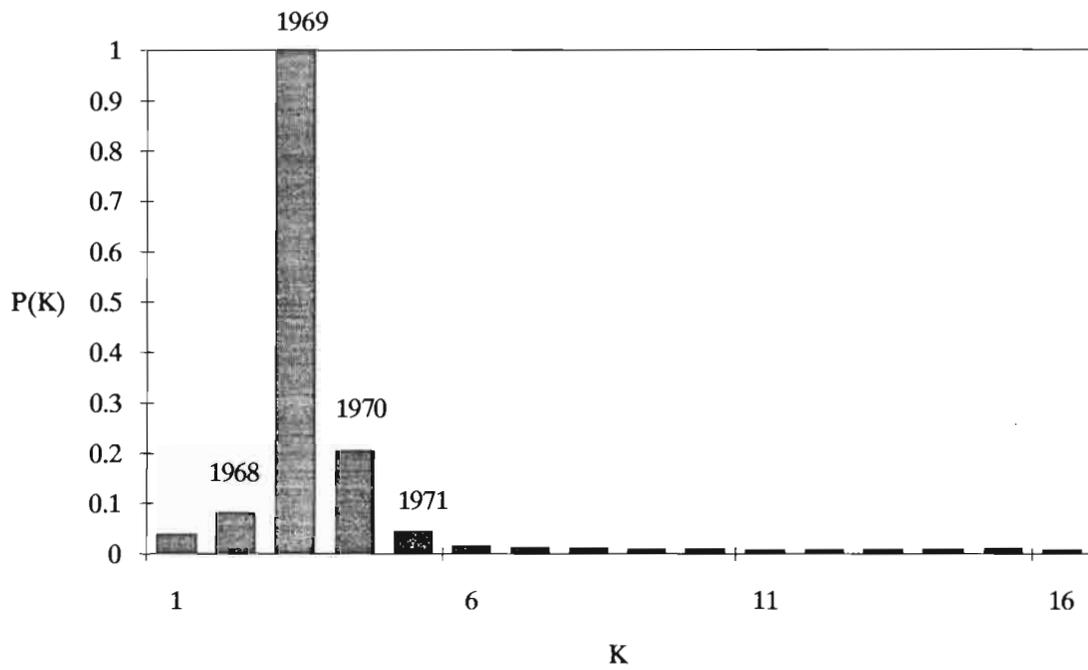


Figure 2.2.16 : probabilités de changement de moyenne

Station de Sinhala



Station de Tafire

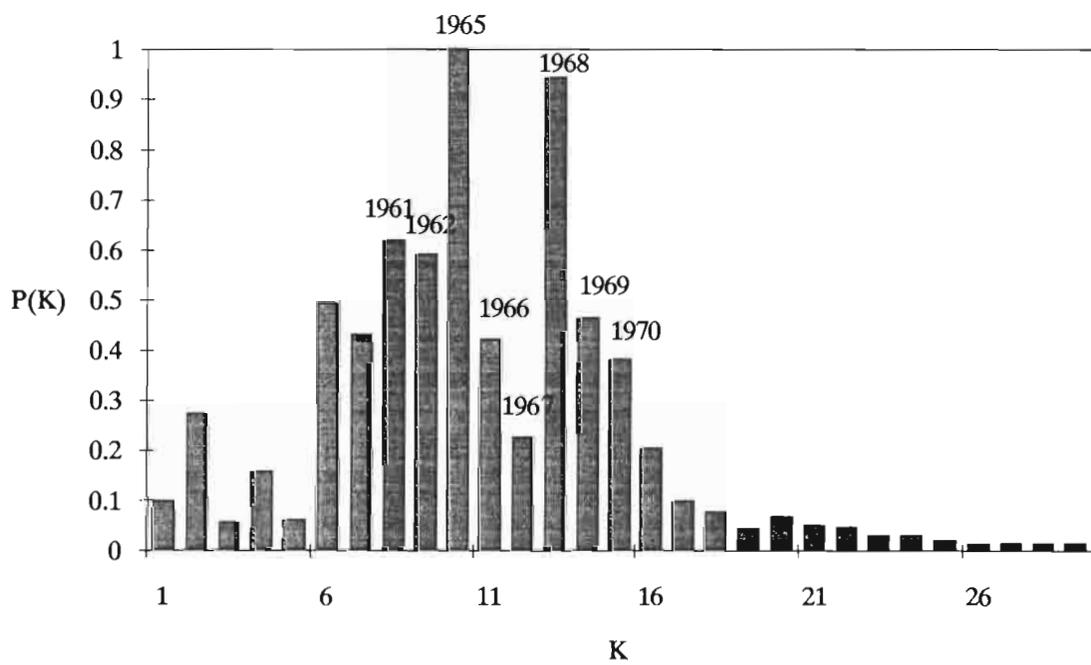
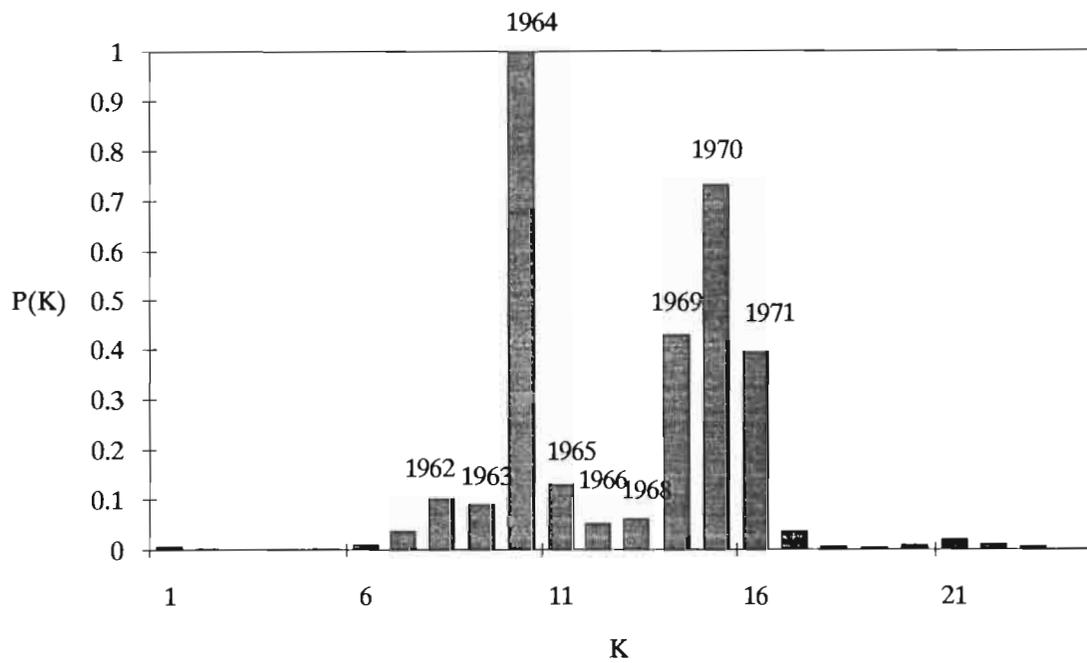


Figure 2.2.17 : probabilités de changement de moyenne

Station de Tengrela



Station de Touba

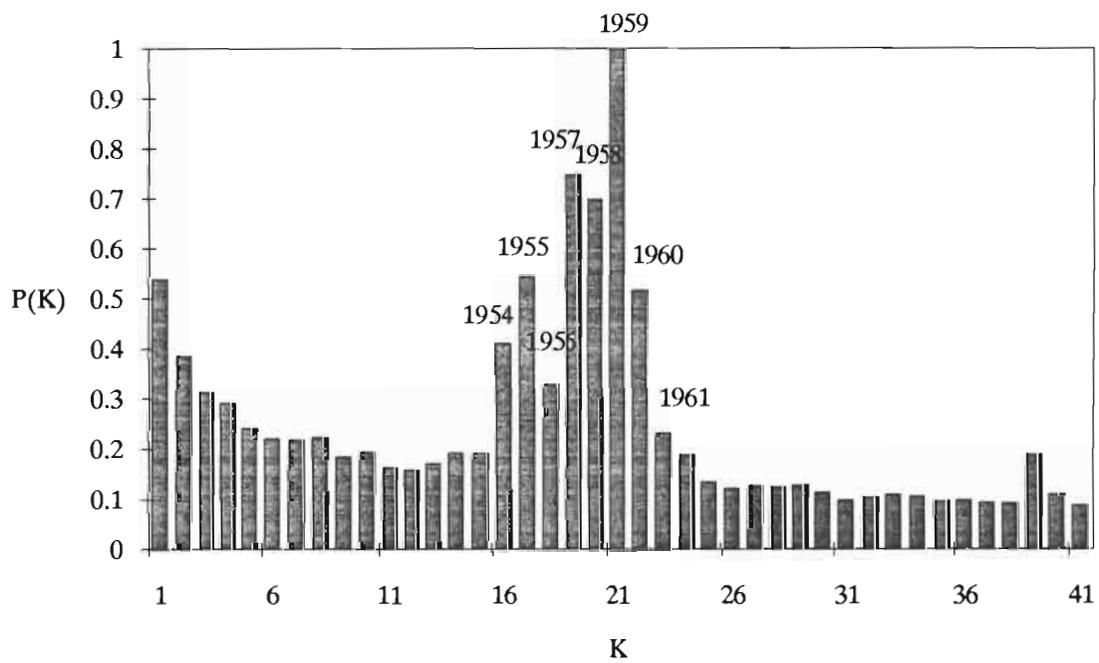


Figure 2.2.18 : probabilités de changement de moyenne

2.2.1.6. Conclusions.

L'ensemble de ces opérations d'analyse et de critique nous a permis de sélectionner les postes et les années utilisables dans le cadre du programme ERREAU en vue de la phase ultérieure de modélisation. On a ainsi pu constituer des fichiers opérationnels de pluviométrie journalière.

La qualité des données est généralement acceptable bien qu'il existe une différence entre les stations de longue durée et les autres postes d'observation. Les distributions mensuelles et annuelles présentent de faibles coefficients de variation, signe de dispersion peu marquée.

Dans ce secteur Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, généralement plat, les quelques reliefs qui apparaissent ont une forte influence sur les précipitations, qu'ils contribuent notablement à accroître. C'est le cas de la région d'Odienné où l'influence de la dorsale Guinéenne est la plus marquée.

Cette constatation est confirmée par les tracés des isohyètes annuelles et mensuelles interannuelles. Ces dernières passent d'un accroissement orienté Nord-Sud en saison sèche (c'est l'éloignement par rapport à l'océan qui prévaut alors) à une orientation Est-Ouest en saison des pluies.

2.2.2. Données hydrométriques.

Disposant initialement de 33 bassins versants représentant 373 stations années, nos travaux n'ont finalement porté que sur 20 bassins et 91 stations années. La sélection des données utilisées s'est faite en excluant les années de mesures hydrométriques incomplètes ainsi que les années et les bassins pour lesquels les informations pluviométriques se sont révélées insuffisantes.

Les bassins versants retenus, dont la superficie varie de 120 à 4700 km², se répartissent en trois grands ensembles : les hauts bassins du Niger, du Bandama et du Sassandra.

Les débits moyens journaliers de chaque station hydrométrique ont été, dans un premier temps, extraits de la banque de données de l'ORSTOM gérée à Montpellier. Ensuite et pour les données récentes (1980 à 1987) des relevés annuels de débits journaliers ont été fournis par la Direction des Ressources en Eau de Surface (DRES), service ivoirien de gestion du réseau hydrologique. Ces débits ont été saisis à l'aide du logiciel HYDROM et ont ainsi pu être intégrés à la banque de données.

2.2.2.1. Le haut bassin du Niger.

Parmi les vingt bassins retenus, sept font partie du haut bassin du Niger et représentent 35 stations années. Le tableau 2.2.7 indique pour chacun d'entre eux la superficie, les années retenues, les lames annuelles écoulées ainsi que les débits moyens et les débits spécifiques de chaque année.

Bassin	Année	Lame écoulée (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Bagoé à Kouto 4700 km ²	1968	267,1	39,69	8,45
	1969	355,3	52,95	11,27
	1970	259,9	38,73	8,24
	1971	176,8	26,35	5,61
	1973	141,3	21,06	4,48
	1974	126,7	18,88	4,02
	1975	183,8	27,39	5,83
	1976	111,9	16,63	3,54
	1981	221,1	32,96	7,01
	1982	166,5	24,81	5,28
	1983	45,0	6,71	1,43
	1984	67,1	9,98	2,12
	1985	223,4	33,30	7,08
Bagoé à Guingérini 1042 km ²	1981	299,5	9,90	9,50
	1982	233,9	7,73	7,42
	1983	52,1	1,72	1,65
Banifing à Ziemougoula 990 km ²	1978	251,8	7,90	7,98
	1979	276,2	8,67	8,76
	1980	182,5	5,71	5,77
	1984	192,9	6,04	6,10
	1985	252,2	7,92	8,00
Douni à Pt 398 120 km ²	1983	118,5	0,45	3,76
	1984	130,5	0,50	4,13
	1985	246,8	0,94	7,83
	1986	77,3	0,29	2,45
Doundian à Wahire 650 km ²	1980	141,9	2,92	4,49
	1981	252,7	5,21	8,01
	1982	183,6	3,78	5,82
	1983	70,9	1,46	2,25
	1984	55,0	1,13	1,74
Kobani à Nimbrini 342 km ²	1977	61,0	0,66	1,93
	1983	47,1	0,51	1,49
	1984	70,0	0,76	2,21
Mahandiabani à Wahire 835 km ²	1983	119,3	3,16	3,78
	1984	86,5	2,28	2,73

Tableau 2.2.7 : Le haut bassin du Niger

BASSIN VERSANT DU NIGER

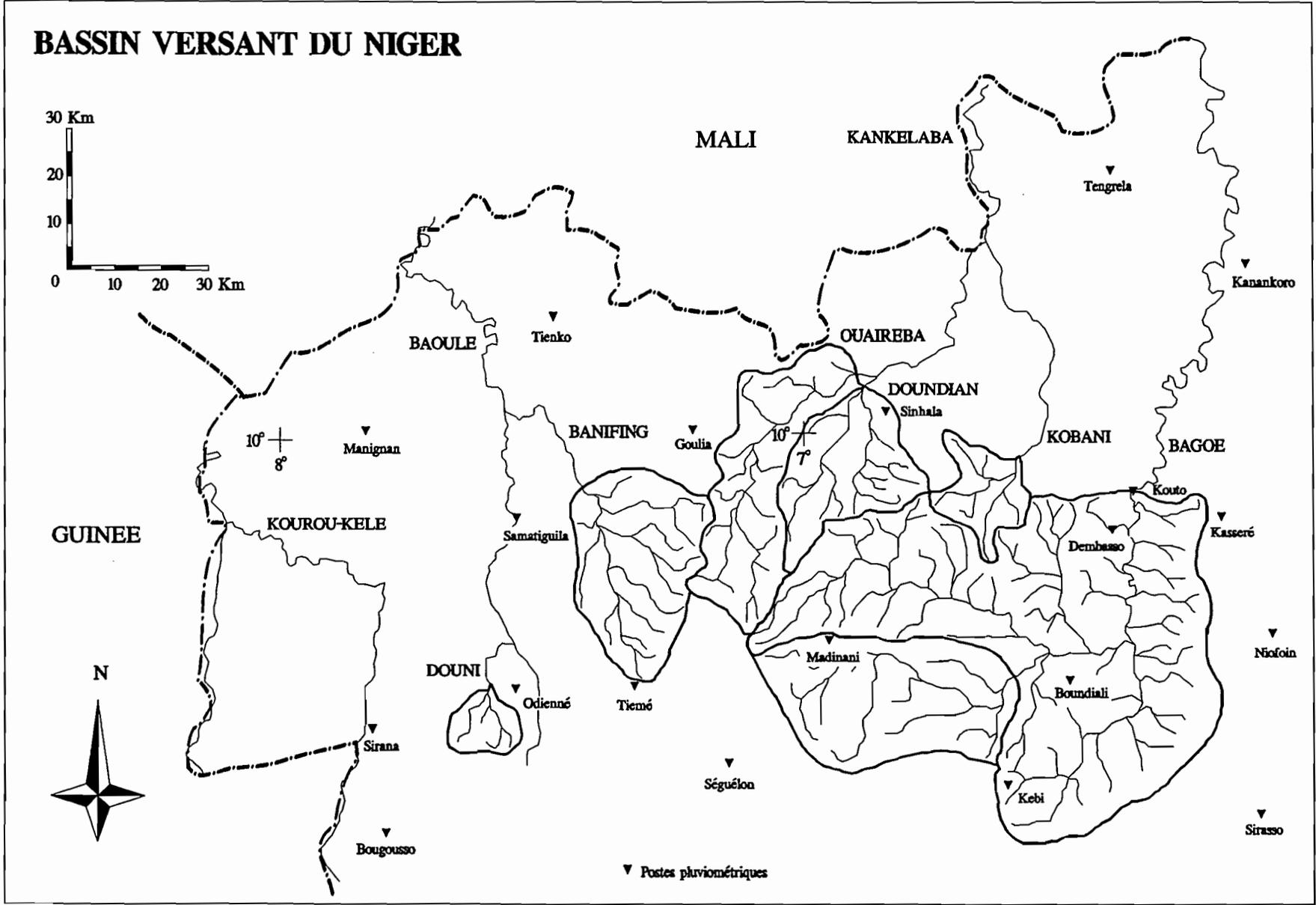


Figure 2.2.19 : Carte du haut bassin du Niger

La figure 2.2.19 indique leurs emplacements respectifs ainsi que la situation des postes pluviométriques de la zone. Lorsque cela était possible, une "pluie moyenne" a été calculée pour les bassins, à l'aide de la méthode de Thiessen.

Nous donnons ci-après pour chaque bassin, les postes pluviométriques utilisés avec leur coefficient de Thiessen dans le cas où plusieurs postes sont présents, ainsi que les lames précipitées et les coefficients d'écoulement qui en résultent.

. Bagoé à Kouto (4700 km²)

Postes pluviométriques : Madinani, 0.36 ; Boundiali, 0.48 ; Kouto, 0.16.

Année	1968	1969	1970	1971	1973	1974	1975	1976	1981	1982	1983	1984	1985
LE (mm)	267.1	355.3	259.9	176.8	141.3	126.7	183.8	111.9	221.1	166.5	45	67.1	223.4
LP (mm)	1291.1	1632	1655.3	1768.3	1424	1827.4	1463.1	1290.9	1340.2	1315.9	970.6	1146.6	1376.8
CE (%)	20.7	21.8	15.7	10.0	9.9	6.9	12.6	8.7	16.5	12.7	4.6	5.9	16.2

. Bagoé à Guingérini (1042 km²)

Postes pluviométriques : Madinani, 0.73 ; Boundiali, 0.27.

Année	1981	1982	1983
LE (mm)	299.5	233.9	52.1
LP (mm)	1412	1454	1103.7
CE (%)	21.2	16.1	4.7

. Banifing à Ziemougoula (990 km²)

Postes pluviométriques : Tieme, 0.41 ; Goulia, 0.42 ; Samatiguila, 0.17.

Année	1978	1979	1980	1984	1985
LE (mm)	251.8	276.2	182.5	192.9	252.2
LP (mm)	1457.5	1242.9	1403.7	1103.8	1341.4
CE (%)	17.3	22.2	13.0	17.5	18.8

. Douni à Pt 398 (120 km²)

Poste pluviométrique : Odienne.

Année	1983	1984	1985	1986
LE (mm)	118.5	130.5	246.8	77.3
LP (mm)	1038.2	1240.7	1099	1011.5
CE (%)	11.4	10.5	22.5	7.6

. Doundian à Wahire (650 km²)

Poste pluviométrique : Sinhala

Année	1980	1981	1982	1983	1984
LE (mm)	141.9	252.7	183.6	70.9	55
LP (mm)	1227.8	1537.1	1256.6	1091.6	1117.5
CE (%)	11.6	16.4	14.6	6.5	4.9

. Kobani à Nimbrini (342 km²)

Postes pluviométriques : Kouto, 0.41 ; Sinhala, 0.59.

Année	1977	1983	1984
LE (mm)	61	47.1	70
LP (mm)	1038.1	993.8	1038.6
CE (%)	5.9	4.7	6.7

. Mahandiabani à Wahire (835 km²)

Poste pluviométrique : Sinhala.

Année	1983	1984
LE (mm)	119.3	86.5
LP (mm)	1091.6	1117.5
CE (%)	10.9	7.7

2.2.2.2. Le haut bassin du Bandama.

Parmi les vingt bassins retenus, neuf font partie du haut bassin du Bandama et représentent 36 stations années.

Le tableau 2.2.8 indique pour chacun d'entre eux la superficie, les années retenues, les lames annuelles écoulées ainsi que les débits moyens et les débits spécifiques de chaque année.

	Année	Lame écoulée	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Bou à Boron 3710 km ²	1981	96.9	11.40	3.07
	1982	42.0	4.94	1.33
	1983	9.6	1.13	0.31
	1984	33.4	3.92	1.06
	1985	134.2	15.79	4.26
Bou à Sirasso 1030 km ²	1983	25.2	0.82	0.80
	1984	35.4	1.15	1.12
	1985	154.7	5.05	4.91
Badenou à Rte de M'Bengue 1800 km ²	1983	4.1	0.23	0.13
	1984	3.5	0.20	0.11
	1985	138.6	7.91	4.40
Bandama à Seguekiele 368 km ²	1981	106.1	1.24	3.36
	1982	64.6	0.75	2.05
	1983	16.0	0.19	0.51
	1984	20.5	0.24	0.65
	1985	176.0	2.05	5.58
Lafigue à Rte de Badikaha 443 km ²	1981	195.5	2.75	6.20
	1982	115.4	1.62	3.66
	1983	35.6	0.50	1.13
	1984	160.7	2.25	5.08
Lokpoho à Namboukaha 772 km ²	1983	11.0	0.27	0.35
	1984	9.4	0.23	0.30
	1985	129.9	3.18	4.12
	1987	157.2	3.85	4.99
Solomougou à Ziebatago 1510 km ²	1983	14.3	0.68	0.45
	1984	88.5	4.22	2.80
	1985	191.9	9.19	6.08
	1986	87.8	4.20	2.78
Yoreloro à Kategue 338 km ²	1982	44.4	0.48	1.41
	1983	14.4	0.15	0.46
	1984	23.0	0.25	0.73
	1986	66.6	0.71	2.11
Yani à Madji 1013 km ²	1980	116.3	3.73	3.68
	1981	164.9	5.30	5.23
	1983	21.8	0.70	0.69
	1986	74.6	2.40	2.37

Tableau 2.2.8 : Le haut bassin du Bandama

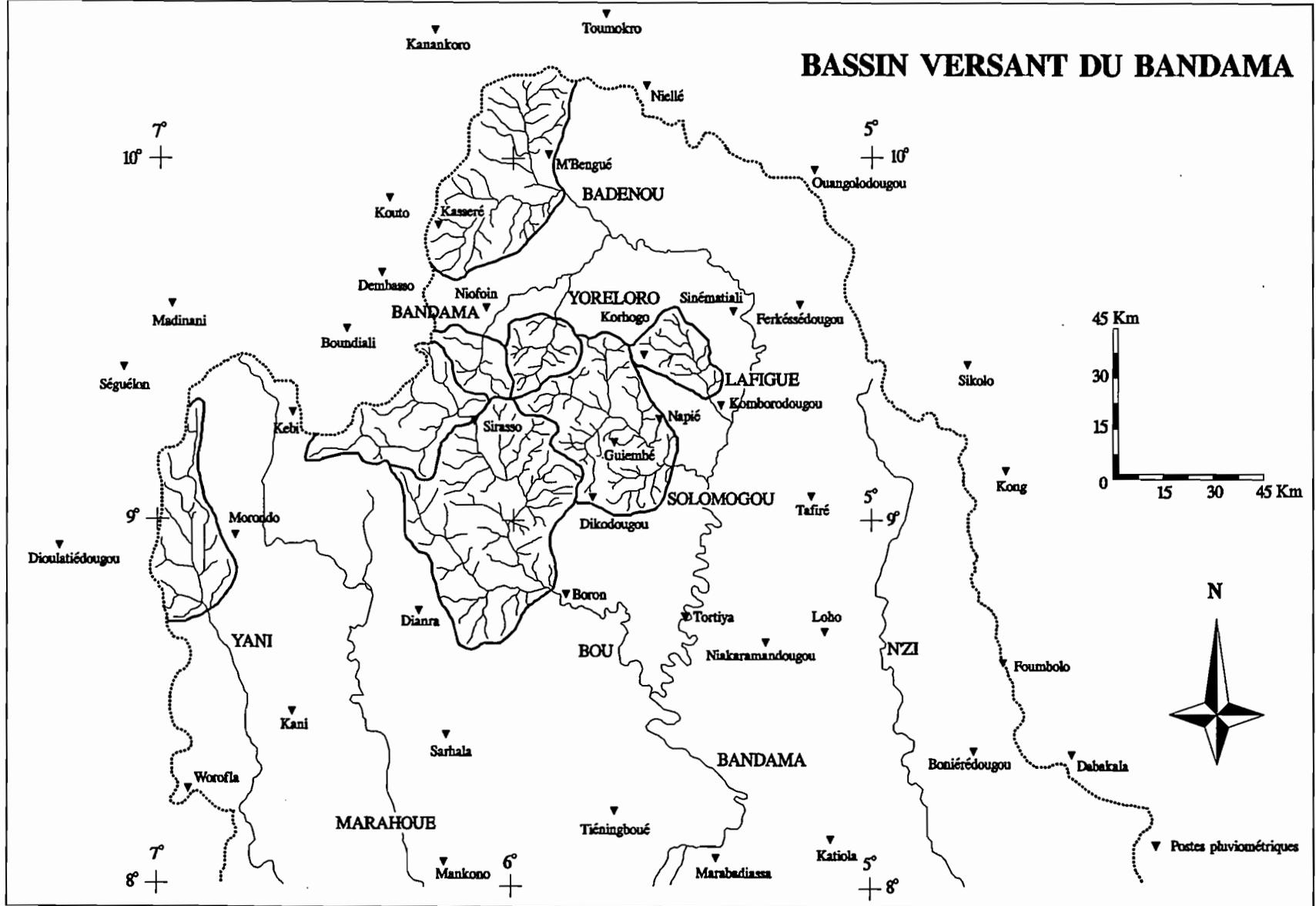


Figure 2.2.20 : Carte du haut bassin du Bandama

La figure 2.2.20 indique leurs emplacements respectifs ainsi que la situation des postes pluviométriques de la zone.

Nous donnons ci-après pour chaque bassin, les postes pluviométriques utilisés avec leur coefficient de Thiessen dans le cas où plusieurs postes sont présents, ainsi que les lames précipitées et les coefficients d'écoulement qui en résultent.

. Le Bou à Boron (3710 km²)

Postes pluviométriques : Sirasso, 0.54 ; Dianra, 0.26 ; Dikodougou, 0.2.

Année	1981	1982	1983	1984	1985
LE (mm)	96.9	42	9.6	33.4	134.2
LP (mm)	1073	1108.6	852.6	1055.6	1437.5
CE (%)	9.0	3.8	1.1	3.2	9.3

. Le Bou à Sirasso (1030 km²)

Poste pluviométrique : Sirasso

Année	1983	1984	1985
LE (mm)	25.2	35.4	154.7
LP (mm)	1014.6	1118.6	1506.3
CE (%)	2.5	3.2	10.3

. Le Badenou à Rte de M'Bengue (1800 km²)

Postes pluviométriques : M'Bengue, 0.72 ; Kouto, 0.28.

Année	1983	1984	1985
LE (mm)	4.1	3.5	138.6
LP (mm)	763.7	679.9	1288.4
CE (%)	0.5	0.5	10.8

. Le Bandama à Seguekiele (368 km²)

Postes pluviométriques : Sirasso, 0.4 ; Niofoin, 0.6.

Année	1981	1982	1983	1984	1985
LE (mm)	106.1	64.6	16	20.5	176
LP (mm)	1120.9	1099.8	895.7	1039.4	1540.6
CE (%)	9.46	5.88	1.78	1.97	11.4

. Le Lafigue à Rte de Badikaha (443 km²)

Poste pluviométrique : Korhogo

Année	1981	1982	1983	1984
LE (mm)	195.5	115.4	35.6	160.7
LP (mm)	1198.2	1170.7	835.6	1410.1
CE (%)	16.3	9.9	4.3	11.4

. Le Lokpoho à Namboukaha (772 km²)

Poste pluviométrique : Ouangolodougou

Année	1983	1984	1985	1987
LE (mm)	11	9.4	129.9	157.2
LP (mm)	552.7	740.5	1244.6	968
CE (%)	2.0	1.3	10.4	16.2

. Le Solomougou à Ziebatago (1510 km²)

Postes pluviométriques : Korhogo, 0.77 ; Sirasso, 0.23.

Année	1983	1984	1985	1986
LE (mm)	14.3	88.5	191.9	87.8
LP (mm)	876.8	1343.1	1444.1	1240.5
CE (%)	1.6	6.6	13.3	7.1

. Le Yoreloro à Kategue (338 km²)

Postes pluviométriques : Niofoin, 0.35 ; Sirasso, 0.48 ; Korhogo, 0.17.

Année	1982	1983	1984	1986
LE (mm)	44.4	14.4	23	66.6
LP (mm)	1126.9	914.9	1122	1163.1
CE (%)	3.9	1.6	2.1	5.7

. Le Yani à Madji (1013 km²)

Poste pluviométrique : Morondo.

Année	1980	1981	1983	1986
LE (mm)	116.3	164.9	21.8	74.6
LP (mm)	1253.8	1559.1	879.4	1190.3
CE (%)	9.3	10.6	2.5	6.3

2.2.2.3. Le haut bassin du Sassandra.

Parmi les vingt bassins retenus, quatre font partie du haut bassin du Sassandra et représentent vingt stations années. Le tableau 2.2.9 indique pour chacun d'entre eux la superficie, les années retenues, les lames annuelles écoulées ainsi que les débits moyens et les débits spécifiques de chaque année.

	Année	Lame écoulée (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Sien à Massadougou 1325 km ²	1981	193.4	8.13	6.13
	1982	122.0	5.13	3.87
	1983	39.9	1.68	1.27
	1984	77.5	3.25	2.45
	1985	169.2	7.11	5.36
	1986	64.0	2.69	2.03
Sien à Nafana-Sienso 615 km ²	1977	209.8	4.09	6.65
	1978	185.0	3.61	5.87
	1979	284.0	5.54	9.01
	1980	222.0	4.32	7.02
	1981	227.8	4.44	7.22
	1982	147.4	2.87	4.67
	1983	56.8	1.11	1.80
	1984	83.6	1.63	2.64
Tiamba à Dioulatiedougou 2790 km ²	1981	297.7	26.33	9.44
	1983	58.8	5.21	1.87
	1984	150.5	13.28	4.76
Tiamba à Lille 541 km ²	1982	279.3	4.79	8.86
	1983	135.1	2.32	4.28
	1984	175.9	3.01	5.56

Tableau 2.2.9 : Le haut bassin du Sassandra

La figure 2.2.21 indique leurs emplacements respectifs ainsi que la situation des postes pluviométriques de la zone.

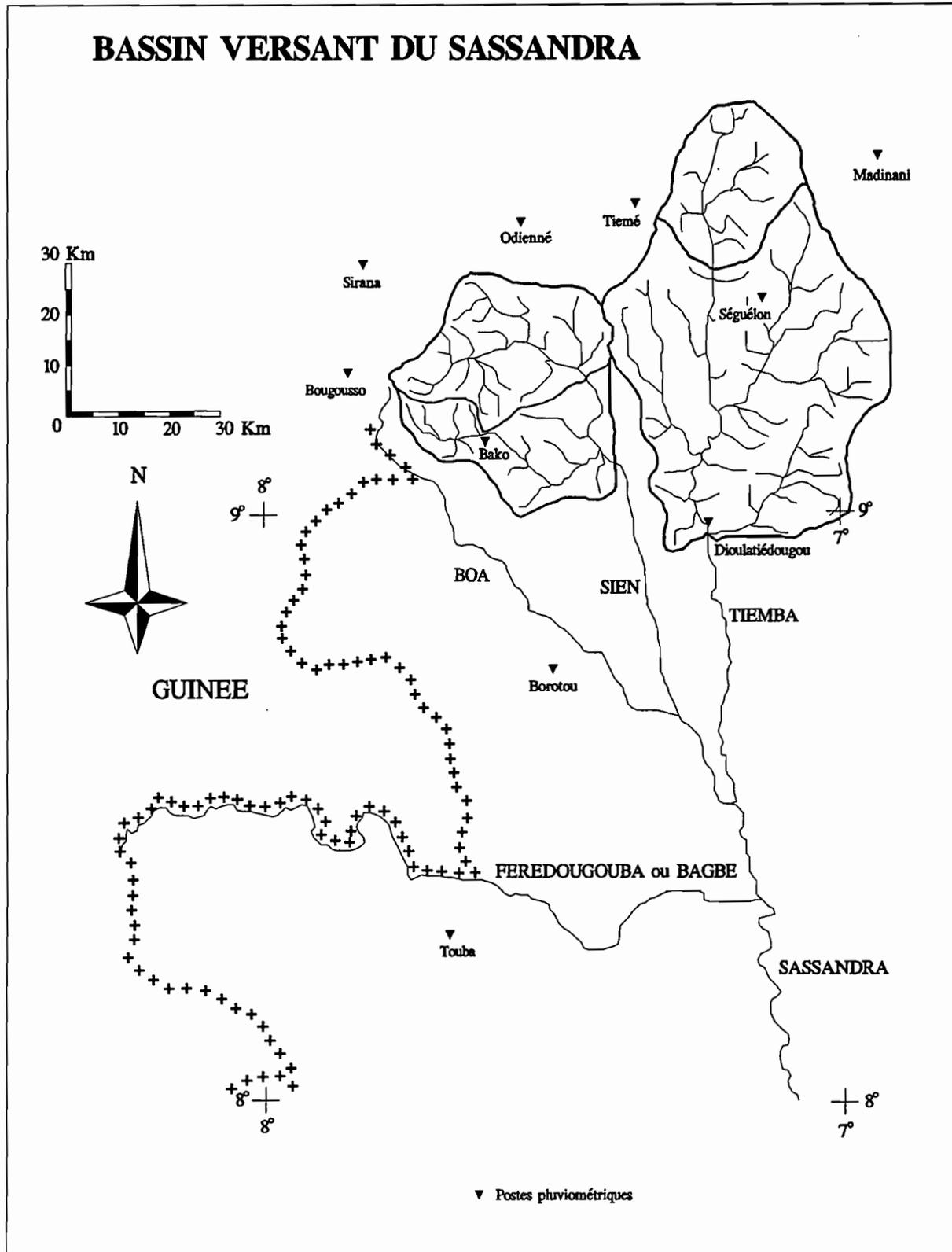


Figure 2.2.21 : Carte du haut bassin du Sassandra

Nous donnerons ci-après pour chaque bassin, les postes pluviométriques utilisés avec leurs coefficients de Thiessen dans le cas où plusieurs postes sont présents, ainsi que les lames précipitées et les coefficients d'écoulement qui en résultent.

. Le Sien à Massadougou (1325 km²)

Poste pluviométrique : Odienne.

Année	1981	1982	1983	1984	1985	1986
LE (mm)	193.4	122	39.9	77.5	169.2	64
LP (mm)	1457.1	1610.7	1038.2	1240.7	1099	1011.5
CE (%)	13.3	7.6	3.9	6.3	15.4	6.3

. Le Sien à Nafana-Sienso (615 km²)

Poste pluviométrique : Odienne.

Année	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
LE (mm)	209.8	185	284	222	227.8	147.4	56.8	83.6
LP (mm)	1450	1599.5	1667.1	1409.7	1457.1	1610.7	1038.2	1240.7
CE (%)	14.5	11.6	17.0	15.8	15.6	9.2	5.5	6.7

. La Tiemba à Dioulatiedougou (2790 km²)

Postes pluviométriques : Madinani, 0.29 ; Odienne, 0.14 ; Dioulatiedougou, 0.57.

Année	1981	1983	1984
LE (mm)	297.7	58.8	150.5
LP (mm)	1520.5	973.2	1298.9
CE (%)	19.6	6.1	11.6

. La Tiemba à Lille (541 km²)

Postes pluviométriques : Madinani, 0.85 ; Odienne, 0.15.

Année	1982	1983	1984
LE (mm)	279.3	135.1	175.9
LP (mm)	1616	1177.4	1271.6
CE (%)	17.3	11.5	13.8

2.2.3. Occupation du sol.

Les cartes d'occupation du sol, dressées à l'antenne hydrologique de l'ORSTOM à Abidjan (SERVAT, LAPETITE, 1990), ont été établies à partir de documents fournis par la Direction et Contrôle des Grands Travaux de Côte d'Ivoire (DCGTx).

Les documents de base, fournis par le service Télédétection de la DCGTx, concernaient le Nord et le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire et consistaient en une couverture cartographique au 1/100000^{ème}, pratiquement complète, des jachères et en quelques cartes d'occupation du sol dressées au 1/100000^{ème} également. Ces cartes ont été dressées par la DCGTx à partir de scènes SPOT ou LANDSAT.

Ces documents ont ensuite été repris à l'antenne hydrologique en Côte d'Ivoire par J.M. LAPETITE, découpés et assemblés afin de respecter le tracé des bassins versants du programme ERREAU.

Le tableau 2.2.10 présente les caractéristiques physiques et d'occupation du sol des bassins versants retenus dans le cadre d'ERREAU. On remarquera qu'une partie des deux bassins versants du Bou (le Bou à Boron et le Bou à Sirasso) n'ont pu être cartographiés. Les documents de base n'étaient pas, et ne sont toujours pas, disponibles au service Télédétection de la DCGTx.

	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Gravelius	Savane (%)	Forêt (%)	Cultures (%)	Habitat (%)	Non carto.
Badenou à Rte de M'Bengue	1800	192	1.27	66.9	6.4	25.8	0.9	
Bagoé à Guingérini	1042	174	1.51	70.3	24.3	5.2	0.2	
Bagoé à Kouto	4700	360	1.47	59.8	23.8	15.9	0.5	
Bandama à Séguékiele	368	78	1.14	68.1	0.8	30.5	0.6	
Banifing à Ziemougoula	990	126	1.12	70.2	17.2	12.4	0.2	
Bou à Boron	3710	320	1.48	33.6	21.0	26.3	0.2	18.9
Bou à Sirasso	1030	178	1.54	47.7	6.4	34.4	0.6	10.9
Doundian à Wahire	650	110	1.21	75.0	13.0	11.7	0.3	
Douni à Pt 398	120	48	1.23	55.7	0.0	44.0	0.3	
Kobani à Nimbrini	342	87	1.32	70.9	6.2	22.7	0.2	
Lafigue à Rte de Badikaha	443	92	1.22	30.0	1.1	64.5	4.4	
Mahandiabani à Wahire	835	162	1.57	80.5	15.4	4.0	0.1	
Sien à Massadougou	1325	174	1.34	55.9	8.7	35.0	0.4	
Sien à Nafana-Sienso	615	114	1.29	58.0	0.9	40.9	0.2	
Solomougou à Ziebatago	1510	178	1.27	52.8	3.9	42.5	0.8	
Tiamba à Dioulatiedougou	2790	256	1.36	91.3	3.7	4.4	0.6	
Tiamba à Lille	541	100	1.20	95.8	3.6	0.3	0.3	
Yani à Madji	1013	192	1.69	83.6	9.4	6.8	0.2	
Yoreloro à Kategue	338	80	1.22	59.4	9.1	31.0	0.5	

Tableau 2.2.10 : Occupation du sol des bassins versants du programme ERREAU

Le tableau 2.2.11 présente quelques caractéristiques statistiques des différents paramètres étudiés.

	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Gravelius	Savane (%)	Forêt (%)	Cultures (%)	Habitat (%)
Moyenne	1268.89	159	1.34	64.5	9.2	24.1	0.6
Variance	1455690	6826.78	0.026	297.82	61.2	296.95	0.89
Ecart-type	1206.52	82.62	0.16	17.25	7.8	17.23	0.95
Minimum	120	48	1.12	30	0	0.3	0.1
Maximum	4700	360	1.69	95.8	24.3	64.5	4.4
Asymétrie	1.77	1.07	0.68	-0.19	0.77	0.51	3.96
Aplatissement	2.65	0.92	-0.45	0.04	-0.54	0.91	16.54

Tableau 2.2.11 : Caractéristiques statistiques des paramètres d'occupation du sol.

La superficie des bassins versants varie de 120 à 4700 km². Ils sont donc de taille moyenne et la majorité d'entre eux se situe entre 250 et 1250 km². Ces superficies les rendent susceptibles de recevoir des aménagements hydrauliques ; c'est la raison pour laquelle ils ont été retenus dans le cadre du programme ERREAU.

L'indice de compacité moyen est assez faible (1.34). Les bassins ont en effet rarement une forme allongée, mis à part le Yani à Madji.

La région étudiée ici est située en zone de savane soudanaise dont la végétation est essentiellement constituée de savanes, de savanes arborées et parfois de forêts claires. Ceci explique les forts pourcentages de savane (plus de 50 % dans 16 cas sur 19) qui caractérisent l'occupation des sols de ces bassins versants.

Les forêts claires ne couvrent qu'une faible partie des terrains (moins de 10 % dans la grande majorité des cas).

Le pourcentage de sols cultivés (24.1 % en moyenne) est très variable selon les bassins, mais il est toujours inférieur à 45 %, sauf dans un cas, celui du Lafigue à Rte de Badikaha. L'importance des terrains cultivés sur ce bassin (64.5 %) s'explique par la présence de l'agglomération de Korhogo, grande ville du Nord qui suscite une importante activité dans cette région dont la vocation est demeurée essentiellement agro-pastorale. Il existe, bien entendu, un antagonisme important entre occupation des sols sous forme de cultures et sous forme de savanes. On notera que le coefficient de détermination de la relation % de savanes - % de cultures est voisin de 70 %.

Nous présentons en figures 2.2.22 et 2.2.23, à titre d'exemple, les cartes d'occupation du sol du Lafigue à Rte de Badikaha et de la Bagoé à Kouto.

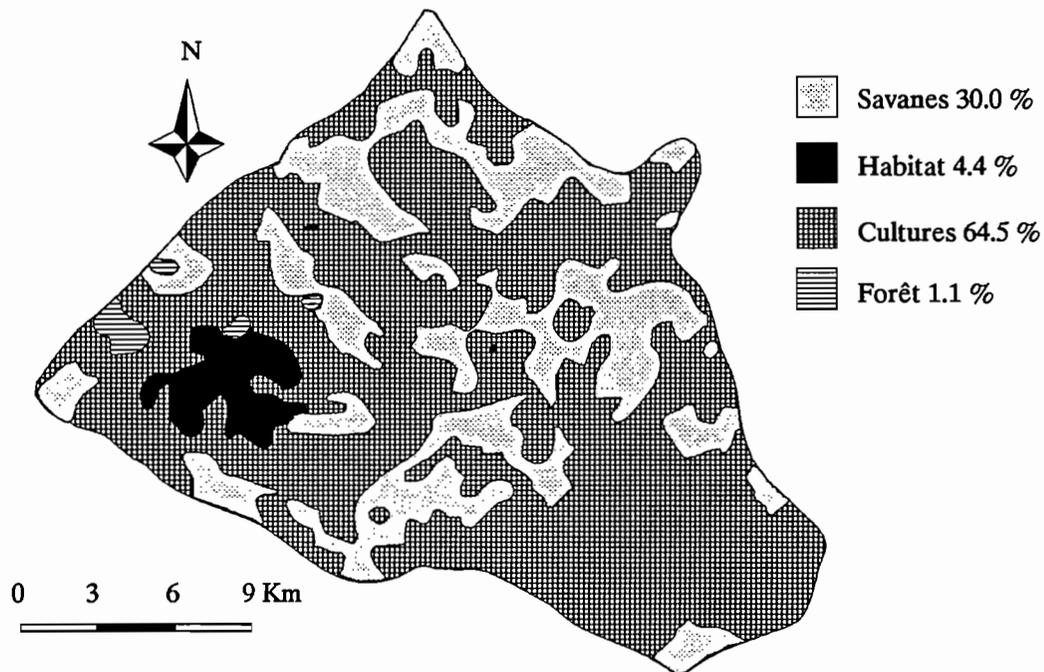


Figure 2.2.22 : Le Lafigue à Rte de Badikaha - Occupation du sol

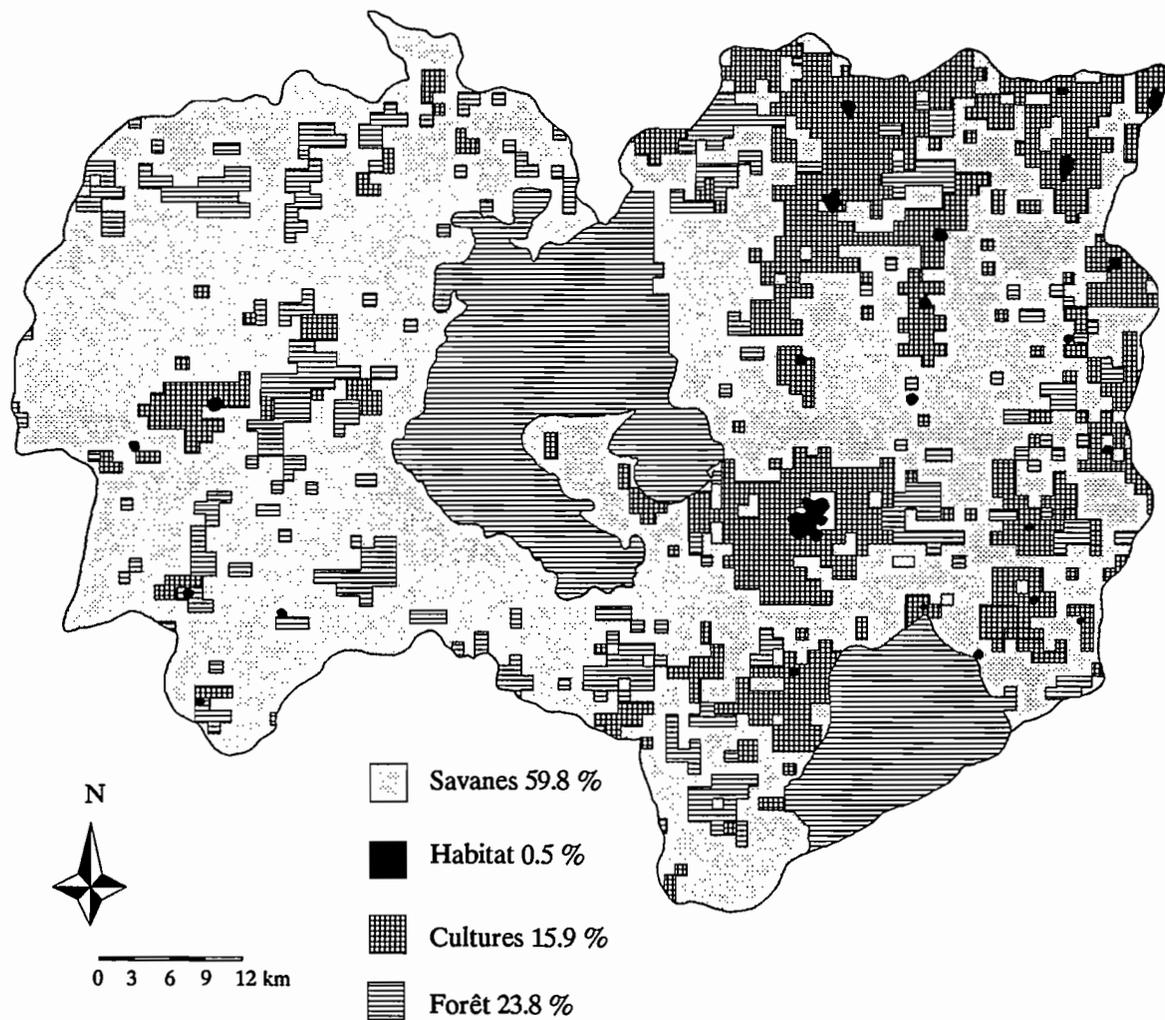


Figure 2.2.23 : La Bagoé à Kouto - Occupation du sol

2.2.4. Evapotranspiration potentielle.

Les modèles globaux retenus et utilisés dans le cadre du programme ERREAU nécessitent des données d'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'ETP est une variable climatologique importante en zone soudanaise. Au vu des conditions climatiques et des faibles coefficients d'écoulement observés, on perçoit, en effet, qu'en terme de bilan, l'évapotranspiration potentielle représente des volumes considérables.

Pour l'ensemble de la zone soudanaise étudiée nous disposons de trois stations climatologiques : Ferkessédougou, Odiène et Korhogo.

Compte tenu de la faible variabilité spatiale de cette variable et de sa prise en compte simplifiée dans les modèles, on peut estimer l'information fournie par ces trois stations comme suffisante au regard des objectifs visés.

Pour ces trois stations on a calculé, à l'aide de la formule de Penman (Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964), les ETP mensuelles à partir de :

- la température moyenne quotidienne.
- la tension de vapeur moyenne quotidienne.
- l'insolation totale mensuelle.
- le vent moyen quotidien.

Les constantes mensuelles utilisées dans la formule ont été fournies par B. Monteny in Chevallier et al, et sont les suivantes :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Albédo moyen	0.1	0.1	0.1	0.15	0.2	0.2	0.25	0.25	0.3	0.3	0.3	0.25
Radiation solaire à l'entrée de l'atmosphère (J/cm ² /Jour)	759	821	873	894	885	873	879	880	872	830	767	735
Durée astronomique moyenne quotidienne du jour (h)	11.6	11.8	12.1	12.4	12.6	12.7	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5

Tableau 2.2.12 : Valeurs des constantes utilisées pour le calcul de l'ETP Penman (B. Monteny in Chevallier et al)

Les données nécessaires au calcul par la formule de Penman ont été recueillies à partir des résumés mensuels de l'ASECNA pour la période 1964 à 09/1979 puis à partir des bulletins climatologiques de l'ANAM pour la période 10/1979 à 1987.

Pour les trois stations disponibles de la zone, les périodes observées sont les suivantes :

- Ferkessédougou : 01/1964 à 06/1971.
- Korhogo : 07/1971 à 12/1987.
avec lacunes en 06/1972 et 01/1986.

- Odienné : 01/1964 à 12/1987.
avec lacunes de 02/1980, 05/1984 et 01/1986.

Pour l'utilisation dans les modèles pluies-débits les lacunes ont été comblées dans les fichiers d'ETP par la moyenne interannuelle du mois manquant.

La formule utilisée est la suivante :

$$ETP = \frac{(A \cdot Ht) + Ea}{A + 1} \quad \text{avec } A = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad Ht : \text{rayonnement exprimé en mm d'eau.}$$

Ea : pouvoir évaporant de l'air.

$A = \frac{\Delta}{\Gamma}$ est une constante pour une température donnée. Γ vaut 0,66 et Δ est la pente de la courbe liant la température à la tension de vapeur saturante. A partir des tables et pour des températures comprises entre 20 et 35 °C on a pu approximer cette courbe par régression exponentielle.

On a alors :

$$\Delta = \frac{\text{Exp}(B + (C \cdot T)) - \text{Exp}(B + C \cdot (T - 0,1))}{0,1}$$

avec :

$$B = 1,98994$$

$$C = 0,0585079.$$

T = température en degré Celsius.

Ht : rayonnement net exprimé en mm d'eau.

$$Ht = Rc - Rb.$$

Rayonnement net = Rayonnement reçu - Rayonnement diffusé.

Rc : rayonnement reçu.

$$Rc = 1/59 Iga (1 - \text{Albédo})(0,29 \cos(\text{latitude}) + (0,42 n/N)).$$

Iga : radiation solaire à l'entrée de l'atmosphère ; dépend de la latitude et de la saison (voir constantes, tableau 2.2.12).

Albédo : pouvoir réfléchissant de la surface du sol, dépend de la couverture végétale (voir constantes, tableau 2.2.12).

n : nombre d'heures d'ensoleillement quotidien.

N : durée astronomique du jour en heures (voir constantes, tableau 2.2.12).

Rb : rayonnement diffusé.

$$Rb = \sigma T^4 (0,56 - 0,08 \sqrt{Ed}) (0,1 + 0,9 \frac{n}{N})$$

σ : constante de Stefan = $2,01 \cdot 10^{-9}$ mm/Jour/°K

T : température en ° Kelvin.

Ed : température de vapeur en Mb.

n : nombre d'ensoleillement quotidien.

N : Durée astronomique de jour en heures (voir constantes, tableau 2.2.12).

Ea : pouvoir évaporant de l'air.

$$Ea = 0,26(Ew - Ed)(1 + 0,54U).$$

Ew : tension de vapeur saturante mb.

Ed : tension de vapeur.

$$Ew = (T^3/1386) - (T^2/286) + 0,71 T + 48.$$

T : température en ° Celsius.

Le tableau 2.2.13 donne, pour les trois stations utilisées, les valeurs obtenues avec la formule de Penman, en mm/jour.

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ferkessedougou	5.34	5.88	6.37	5.35	6.11	5.45	3.71	3.53	4.95	5.43	5.12	3.44
Korhogo	6.48	7.12	7.06	6.02	6.41	5.73	3.86	3.74	5.12	5.62	5.69	4.55
Odienne	5.10	6.00	6.20	5.26	5.98	5.47	3.57	3.45	4.91	5.09	4.89	3.25

Tableau 2.2.13 : Evapotranspirations potentielles en mm/jour.

2.3. Modèles Pluie Débit.

Le développement de l'informatique et le gain de puissance des machines met à la disposition des hydrologues des moyens de calculs de plus en plus performants et rapides et de moins en moins coûteux.

Ce phénomène a permis un développement important de la modélisation hydrologique au cours des vingt dernières années. Cette modélisation a des objectifs variés qui vont de la prévision et de l'annonce des crues (calculs en temps réels) à la gestion des ressources en eau en passant par la simulation de systèmes d'eau existants ou projetés.

Le terme de modèle est généralement utilisé pour désigner la représentation simplifiée d'un système hydrologique complexe. Ces modèles peuvent être physiques, analogiques ou mathématiques. Les modèles que nous avons utilisés appartiennent à la dernière catégorie : les modèles mathématiques. Ceux-ci décrivent le comportement du système à l'aide d'un certain nombre d'équations mathématiques.

On utilise le terme "stochastique" lorsque des variables aléatoires présentant une distribution de probabilité, sont prises en compte dans les équations utilisées. Si ce n'est pas le cas, le modèle est alors "déterministe".

Une autre classification consiste à distinguer les modèles à discrétisation spatiale d'une part et les modèles globaux d'autre part.

Dans le cas des modèles à discrétisation spatiale, le bassin versant est découpé en surfaces élémentaires ayant chacune leurs fonctions de production et de transfert et leur comportement. Le débit à l'exutoire est alors la résultante du comportement de toutes ces surfaces élémentaires. A l'inverse, les modèles globaux considèrent le bassin versant comme une seule entité ayant sa fonction de transfert et réagissant globalement.

Les trois modèles utilisés et présentés dans cette partie sont des modèles globaux déterministes. Ces modèles fonctionnent au pas de temps journalier. Ils sont constitués de réservoirs plus ou moins nombreux ayant chacun leur loi de remplissage et leur loi de vidange.

Nous décrivons tout d'abord le modèle CREC (Combes, 1981) dans sa version à 10 paramètres puis le modèle GR3 du CEMAGREF (Edijatno, Michel, 1989) et enfin le modèle global "ORSTOM 74" ou MODGLO (Girard, 1974).

2.3.1. Le modèle CREC.

CREC est un modèle de conception relativement ancienne puisqu'il a été mis au point au laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc au début des années 1970.

C'est un modèle conceptuel global déterministe (obéissant à un schéma de type réservoir), qui a été appliqué de nombreuses fois dans des conditions de bassins versants très variés (mais en zone climatique tempérée), et qui a montré une grande capacité d'adaptation (Guilbot, 1986).

La version de CREC utilisée et décrite est la version à 10 paramètres (X_1, X_2, \dots, X_{10}). Il existe des versions à 5, 7 et 11 paramètres permettant son application dans des conditions hydrologiques particulières.

La figure 2.3.1 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

Classiquement, entre le sol recevant la pluie (entrée du schéma) et l'exutoire du bassin, on définit une fonction de production et une fonction de transfert. La fonction de production tient compte de l'humidité du sol par l'intermédiaire du réservoir S qui permet une répartition du volume précipité entre l'évapotranspiration, la fonction de transfert et un écoulement de surface. La fonction de transfert comprend un écoulement rapide et un écoulement lent de type décroissance exponentielle.

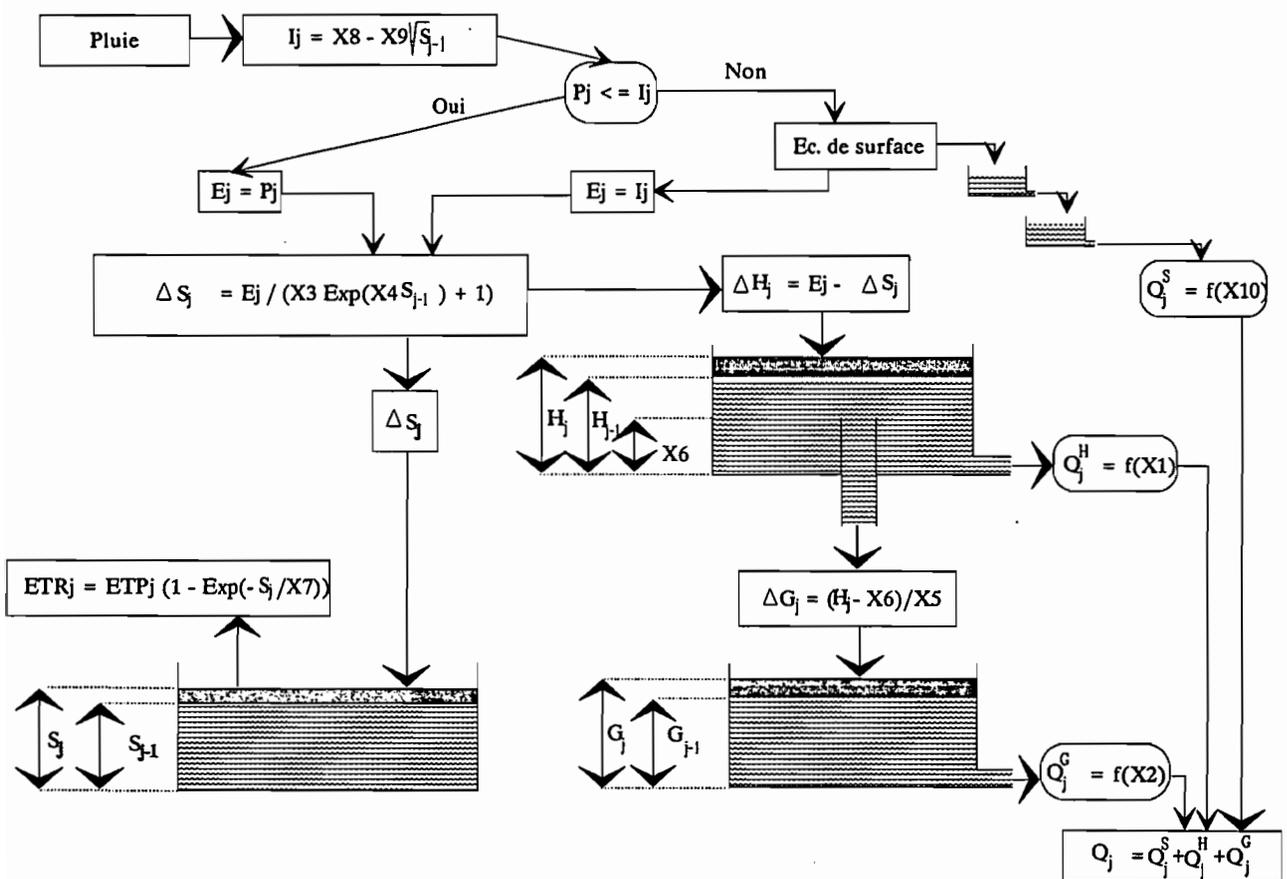


Figure 2.3.1 : Schéma conceptuel du modèle CREC

2.3.1.1. Fonction de production.

Cette fonction de production comprend 5 paramètres (cf figure 2.3.1) : X_8 et X_9 , X_3 et X_4 , et X_7 .

Son fonctionnement est basé sur le remplissage et la vidange du réservoir en "cul de sac" (Combe, 1985) S.

Ce réservoir S permet la répartition de la pluie nette entre le réservoir S, assimilé à un réservoir "sol", et la fonction de transfert. Cette répartition dépend des paramètres X3 et X4 qui sont les deux principaux paramètres de production. Elle dépend également du niveau du réservoir S au pas de temps précédent. Elle a pour expression :

$$\Delta S_j = \frac{E_j}{X3 \text{ Exp}(X4 S_{j-1}) + 1}$$

avec E_j : pluie nette.

ΔS_j : volume d'eau entrant dans le réservoir S au jour j.

S_{j-1} : hauteur d'eau dans le réservoir S au jour j-1.

La détermination de E_j se fait grâce à deux paramètres X8 et X9 qui identifient, en quelque sorte, un seuil au delà duquel une partie de la pluie est transférée à l'exutoire sous forme d'écoulement de surface très rapide.

La fraction de la pluie qui passe en écoulement de surface est la fraction supérieure à I_j avec :

$$I_j = X8 - X9 \sqrt{S_{j-1}}$$

Le niveau du réservoir S permet également de satisfaire plus ou moins l'ETP. Le calcul de l'ETR, lié au paramètre X7, a en effet pour expression :

$$\text{ETR}_j = \text{ETP}_j \left(1 - \text{EXP}\left(\frac{-S_j}{X7}\right)\right).$$

2.3.1.2. Fonction de transfert.

La fonction de transfert du modèle CREC comprend deux réservoirs (Cf figure 2.3.1), le réservoir H et le réservoir G. Le fonctionnement du réservoir H est contrôlé par trois paramètres X1, X5, et X6 ; le fonctionnement du réservoir G par le paramètre X2.

- Réservoir H.

Ce réservoir "superficiel" (par opposition au réservoir G dit réservoir profond) a deux sorties.

La première est contrôlée par le paramètre X1 sous la forme : $Q_j^H = (X_1 H_j)^2$

La deuxième sortie présente un seuil, X6, en deçà duquel rien ne coule par cet orifice. Cette sortie alimente le réservoir G et ne sert pas directement à la constitution du débit à l'exutoire.

L'équation utilisée est :

$$\Delta G_j = \frac{H_j - X_6}{X_5}$$

- Réservoir G.

Ce réservoir est alimenté par la deuxième sortie du réservoir H et est appelé réservoir profond. Il fournit l'écoulement de base sous la forme :

$$Q_j^G = X_2 Q_{j-1}^G + (1 - X_2) \Delta G_j$$

En conclusion, le modèle pluie-débit au pas de temps journalier comporte donc 5 paramètres de production et 5 paramètres de transfert. Sa principale originalité, qui se révélera aussi à l'usage comme une de ses principales difficultés, réside dans le fonctionnement du réservoir H qui offre deux sorties.

2.3.2. Le modèle GR3.

Le modèle GR3 appartient à la classe générale des modèles à réservoirs et dérive notamment du modèle CREC. Il a été mis au point au CEMAGREF d'Antony par C. MICHEL et EDIJATNO (1989).

C'est le plus simple des trois modèles retenus dans le cadre du programme ERREAU. Il a déjà été utilisé en zone tempérée (Loumagne, 1988 ; Edijatno, Michel, 1989) mais ne l'avait jamais été en zone tropicale.

L'architecture du modèle repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire :

- Le réservoir sol ayant comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évapotranspiration potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie entre lui-même et le sous modèle de routage.

- Un hydrogramme unitaire décrivant la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir qui est :

- Le réservoir eau-gravitaire. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est de type quadratique.

Le schéma conceptuel du modèle GR3 est présenté sur la figure 2.3.2.

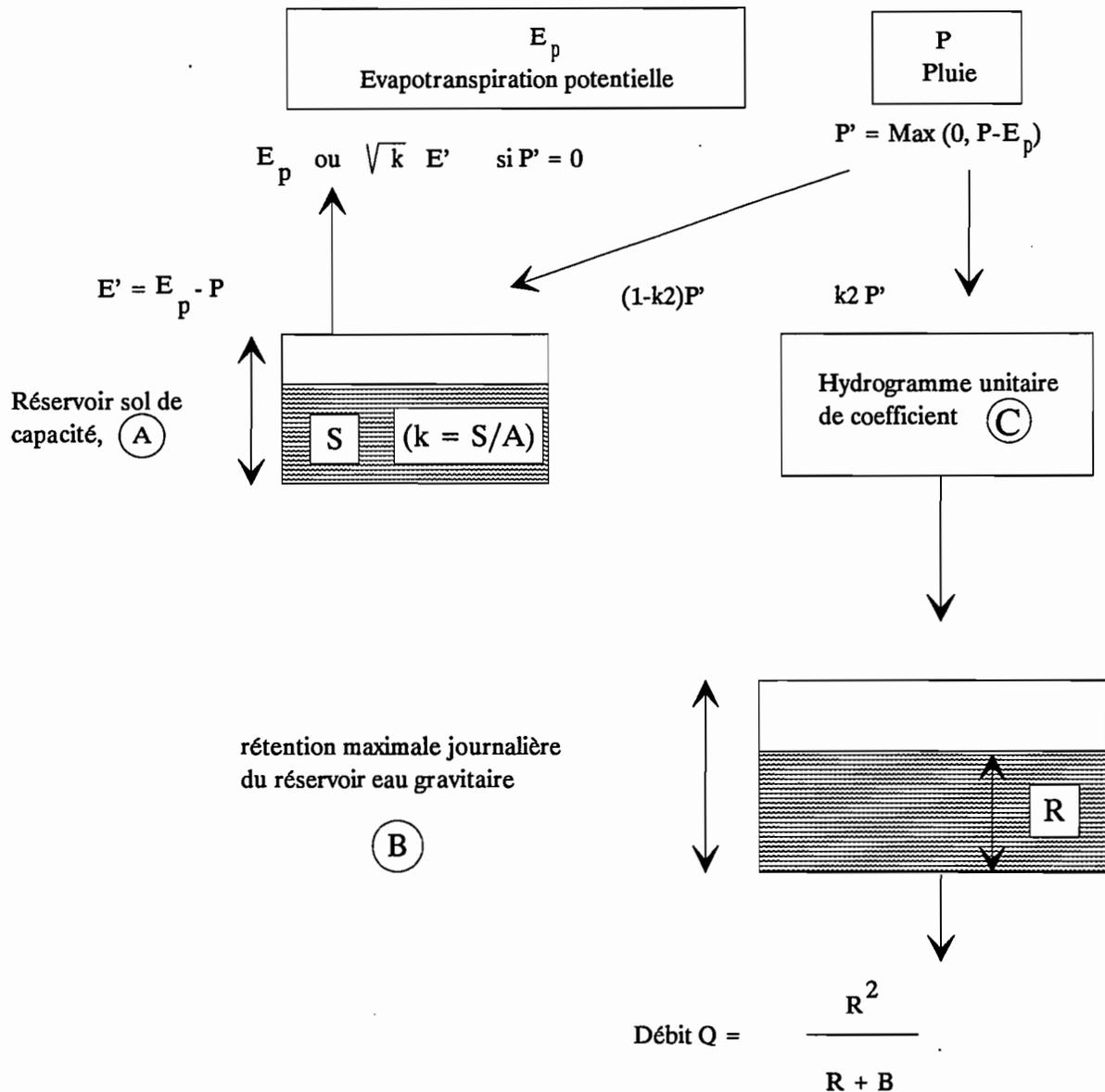


Figure 2.3.2 :Schéma conceptuel du modèle GR3

2.3.2.1. Le réservoir sol.

Il est caractérisé par sa capacité maximale A qui est le premier des trois paramètres du modèle GR3. Son niveau S est soumis soit à la pluie $P' = P - E_p$ soit à l'ETP $E' = E_p - P$ selon que ces termes sont positifs ou négatifs. Le niveau S du réservoir sol permet de définir la fraction de pluie qui accédera au réservoir eau gravitaire. Cette fraction est définie par $\left[\frac{S}{A}\right]^2$. Le complément à 1 de cette fraction entre dans le réservoir sol.

Le niveau S du réservoir sol permet également de définir l'évapotranspiration réelle (ETR) qui pourra être fournie. L'ETR est une fraction de l'évapotranspiration potentielle ayant des caractéristiques symétriques à la fraction de pluie qui entre dans le réservoir eau gravitaire.

La figure 2.3.3 indique le rendement de la pluie et le rendement de l'évapotranspiration en fonction du remplissage du réservoir S. Le rendement des pluies n'approche de 1 que tardivement lorsque le niveau de S tend vers A et le rendement de l'évapotranspiration réelle n'approche de 0 que lorsque S est proche de 0.

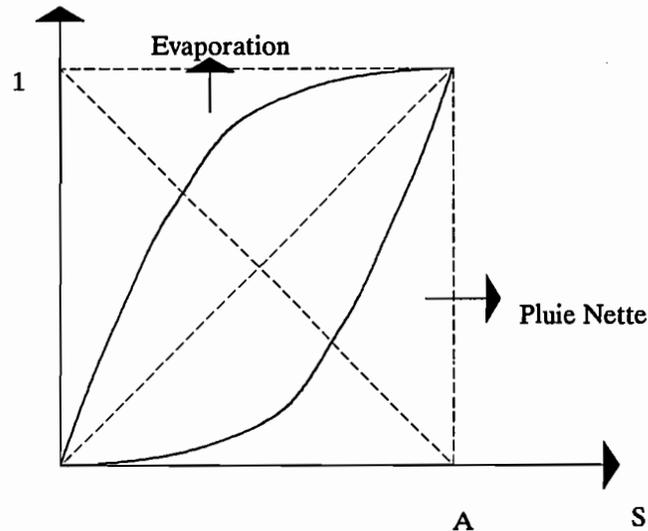


Figure 2.3.3 : rendement de la pluie et de l'évapotranspiration en fonction du remplissage de S

2.3.2.2. Le réservoir eau gravitaire.

C'est le réservoir classique de type quadratique dont l'unique sortie est le débit journalier de la rivière. Il est caractérisé par sa "rétention maximale à un jour" B, deuxième paramètre du modèle GR3 (cf figure 2.3.2) (Edijatno et Michel, 1989).

Ce réservoir reçoit à chaque pas de temps le débit délivré par l'hydrogramme unitaire. Le niveau R du réservoir règle le débit Q qu'il relâche, selon l'expression :

$$Q = \frac{R^2}{R+B}$$

Cette relation résulte de l'intégration sur le pas de temps Δt de la relation quadratique :

$$-\frac{dR}{dt} = k R^2$$

Une vidange quadratique de ce type permet de reproduire correctement les décrues que l'on peut observer sur les hydrogrammes réels. Cependant ce schéma ne permet pas de reproduire des montées de crues. Cette lacune est comblée par l'ajout, en amont de ce réservoir d'un hydrogramme unitaire qui répartit la pluie nette sur plusieurs jours.

2.3.2.3. L'hydrogramme unitaire de paramètre C

Cet hydrogramme unitaire, qui s'intercale entre la pluie nette, déterminée par le réservoir sol, et le réservoir eau gravitaire permet d'étaler cette même pluie nette afin de reproduire correctement les montées de crue. Son coefficient C est le troisième et dernier paramètre du modèle GR3.

La répartition contrôlée par le paramètre C, se fait de la manière suivante.

Un paramètre de décalage maximum est fixé dans le modèle, il est égal à 7 jours.

On a ainsi 7 coefficients de partage journaliers Cp[1..7]

Chaque coefficient vaut

$$C_p(i) = C \cdot i^2 \text{ et } \sum_{i=1}^7 C_p(i) = 1$$

par exemple si C vaut 0.05

$$C_p(1) = 0.05$$

$$C_p(2) = 0.2$$

$$C_p(3) = 0.45$$

$$C_p(4) = 0.3 = 1 - \sum_{i=1}^3 C_p(i) \text{ car } C(4)^2 > 1 - \sum_{i=1}^3 C_p(i)$$

$$C_p(5) = C_p(6) = C_p(7) = 0$$

L'entrée du jour j dans le réservoir eau gravitaire est donc égale à

$$P_N = \sum_{i=1}^7 C_p(i) \text{ Pluie}(j+1-i)$$

Cet ensemble de coefficients de répartition, contrôlé par le paramètre C, correspond à la discrétisation d'une fonction de répartition dans le temps d'allure parabolique.

2.3.3. Le modèle MODGLO.

Ce modèle, mis au point à l'ORSTOM par G. GIRARD, est un modèle global au pas de temps journalier. La version présentée et utilisée ici a été mise au point en 1974. Les concepts ayant servi à l'élaboration de ce modèle sont proches de ceux utilisés dans le modèle à discrétisation spatiale et dans le modèle à pas de temps horaire. "La fonction de production de ce modèle global dite "Grégoire" n'est pas très différente de celle dont elle est issue et qui a été décrite sous le nom de "Ghorfa horaire" par G. Girard (1975)" (Camus, 1976).

C'est aussi, comme CREC et GR3, un modèle basé sur un schéma à réservoirs, la figure 2.3.4 présente le schéma conceptuel de ce modèle. Classiquement, on peut distinguer dans ce modèle une partie production et une partie transfert.

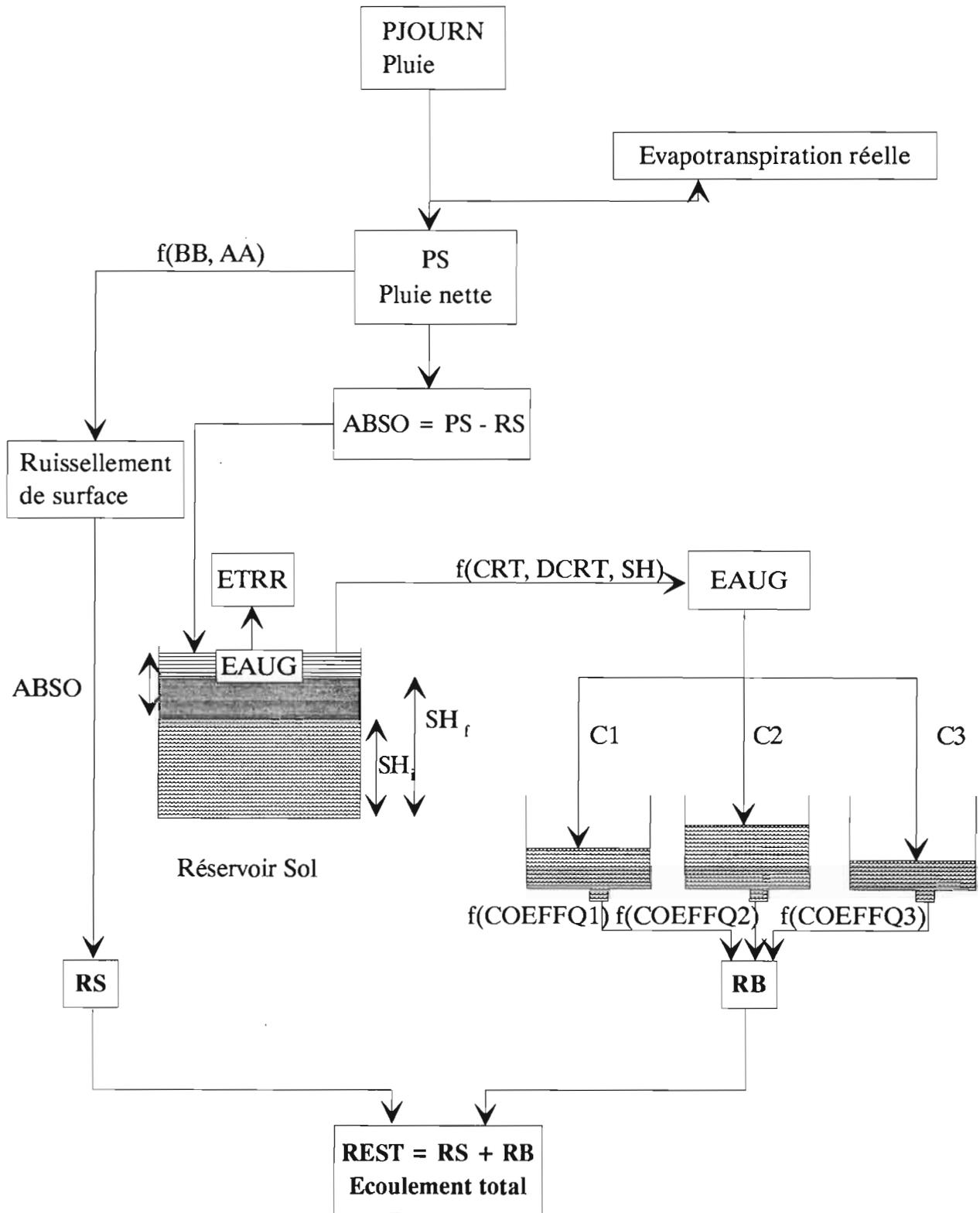


Figure 2.3.4 : Schéma conceptuel du modèle MODGLO.

2.3.3.1. Fonction de production

Cette fonction de production permet la répartition de l'eau précipitée entre les différents termes du bilan hydrique. Elle permet essentiellement de déterminer l'ETR, le ruissellement superficiel RS, et la partie de l'eau qui transite par la fonction de transfert appelée "eau gravifique" ou EAUG.

On détermine en premier lieu la pluie au sol PS en comparant la précipitation journalière à l'ETP journalière. On détermine également à ce niveau l'évapotranspiration réelle ETR et éventuellement une ETP résiduelle (ETRP) qui pourra être reprise ultérieurement sur le réservoir sol. Trois cas peuvent se présenter :

a) Pluie < ETP

$$\begin{aligned} \text{on a : } \quad & \text{PS} = 0 \\ & \text{ETR} = \text{Pluie} \\ & \text{ETRP} = \text{ETP} - \text{Pluie} \end{aligned}$$

b) Pluie = ETP

$$\begin{aligned} \text{on a : } \quad & \text{PS} = 0 \\ & \text{ETR} = \text{Pluie} \\ & \text{ETRP} = 0 \end{aligned}$$

c) Pluie > ETP

$$\begin{aligned} \text{on a : } \quad & \text{PS} = \text{Pluie} - \text{ETP} \\ & \text{ETR} = \text{ETP} \\ & \text{ETRP} = 0 \end{aligned}$$

Détermination du ruissellement superficiel RS et du volume d'eau entrant dans le sol ABSO.

A ce niveau la pluie au sol est comparée à la capacité d'infiltration du sol XIO. Celle-ci est jugée maximale lorsque le sol est complètement sec. Elle décroît ensuite jusqu'à ce que le degré de saturation du sol atteigne la valeur de la capacité de rétention.

Si on pose :

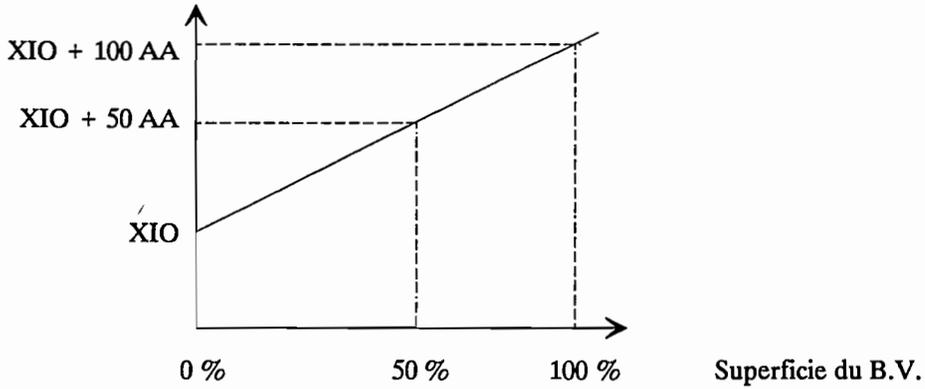
SH = hauteur d'eau dans le réservoir sol

et CRT = capacité de rétention en eau du sol

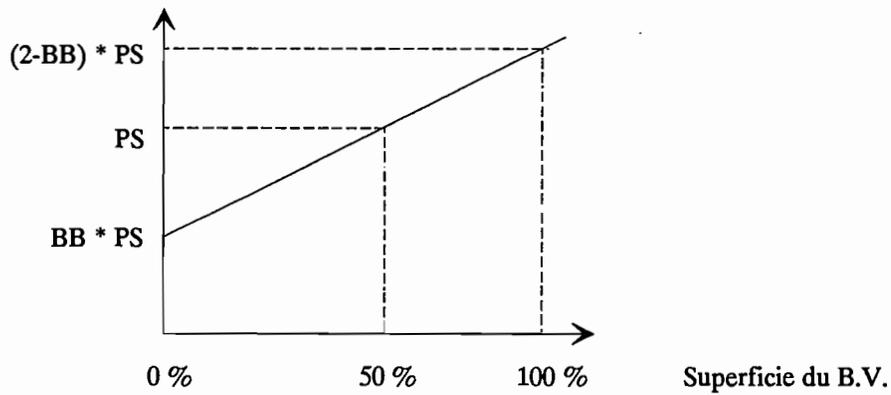
$$\text{on a : } \text{XIO} = \text{XIN} (\text{AXIN} + 2 \exp(-\text{SH}/\text{CRT}))$$

XIN et AXIN sont des paramètres du modèle.

D'après Girard, la valeur de XIO ainsi calculée représente l'infiltration localement minimale sur le bassin. Pour tenir compte de l'hétérogénéité des sols, il introduit alors un terme, AA, qui permet de tracer la fonction de répartition de l'infiltration en fonction de la superficie du bassin versant :



De même, Girard associe à la pluie au sol PS, connue en moyenne sur le bassin, un facteur d'hétérogénéité BB, inférieur à 1 et déterminé en fonction de la surface du BV, de son relief, de son exposition, etc... On peut alors, pareillement, tracer la fonction de répartition de la pluie locale :

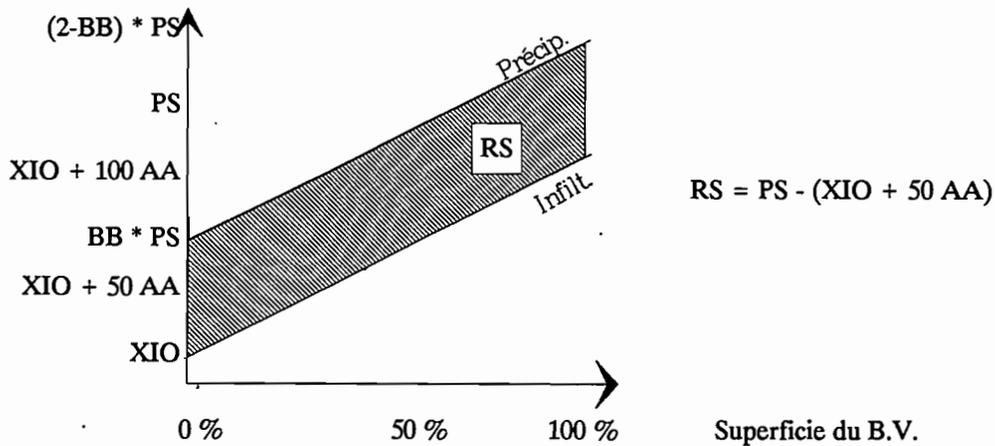


On considérera alors trois cas pour déterminer la valeur du ruissellement superficiel RS, obtenu en comparant les deux droites précédentes.

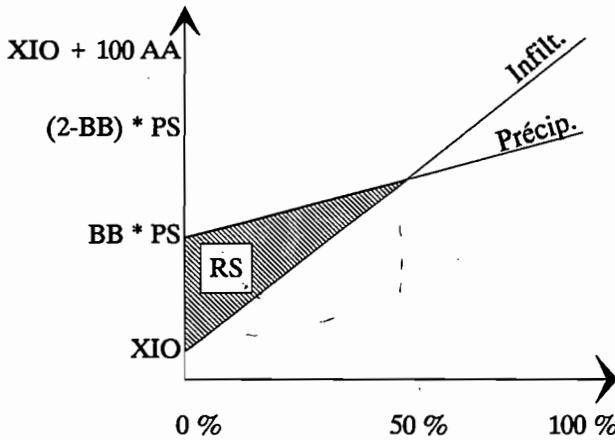
a) $BB * PS < XIO$

Girard fait alors l'hypothèse qu'il n'y a pas de ruissellement et $RS = 0$

b) $BB * PS > XIO$ et $(2-BB) * PS > XIO + 100 AA$



c) $BB \cdot PS > XIO$ et $(2-BB) \cdot PS < XIO + 100 AA$



$$RS = \frac{(BB \cdot PS - XIO)^2}{2 \cdot (100 AA - 2 PS (1-BB))}$$

Dans chacun des cas de calcul de RS, on réalise l'hypothèse simplificatrice qui consiste à faire coïncider l'endroit du bassin le moins arrosé avec le moins perméable. RS est la quantité d'eau livrée directement à l'exutoire, celle entrant dans le sol s'écrit $ABSO = PS - RS$.

Calcul de l'eau gravifique EAUG.

Le volume d'eau ABSO entre dans le réservoir sol. Une partie de cette eau fournit l'eau gravifique EAUG qui sera livrée à l'écoulement par le biais de la fonction de transfert. Ce terme EAUG dépend du niveau dans le réservoir sol SH et de la capacité de rétention des sols CRT.

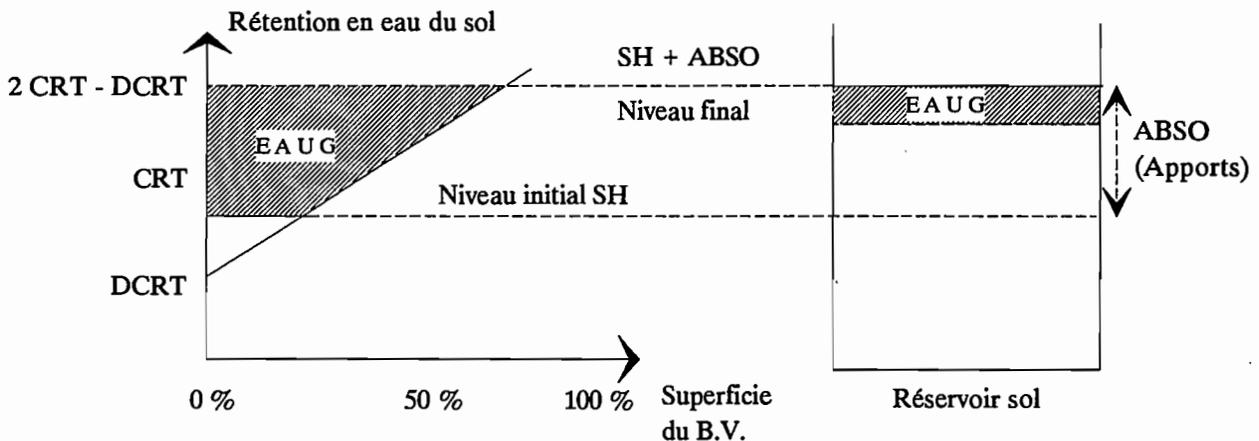
On définit la capacité de rétention en eau des sols à l'aide de deux paramètres:

CRT qui est la valeur moyenne sur le BV,

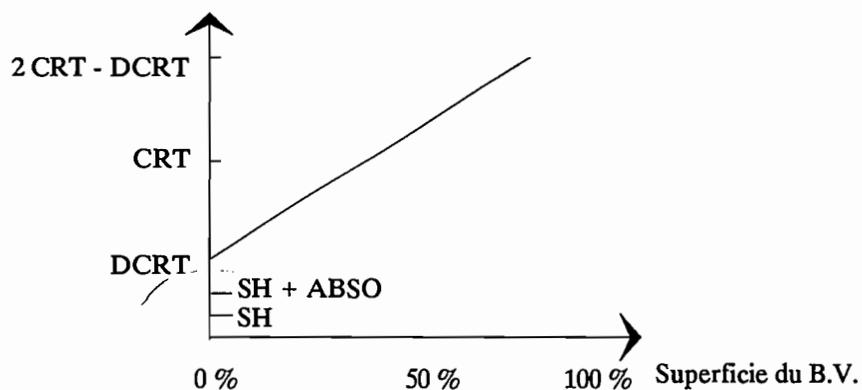
et DCRT qui permet d'introduire une hétérogénéité de la rétention en eau des sols.

On pose $DD = \frac{DCRT}{CRT}$

A l'aide du schéma suivant, permettant la comparaison entre le niveau dans le réservoir et la capacité de rétention en eau des sols, on peut alors déterminer la valeur prise par EAUG.



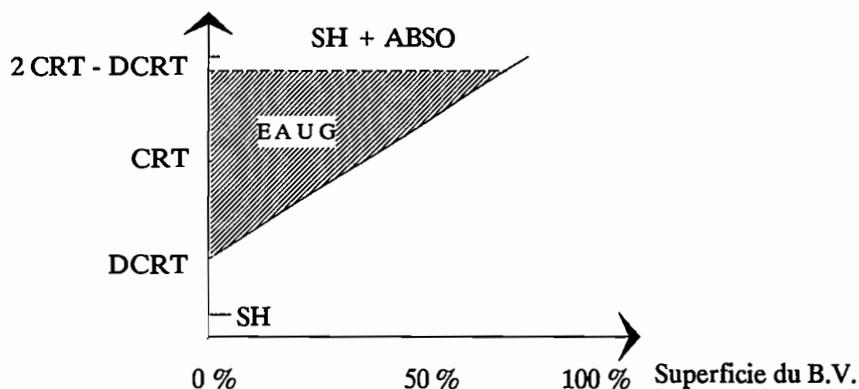
Selon les valeurs prises, respectivement, par ABSO, SH, DCRT, plusieurs cas peuvent se présenter pour le calcul de EAUG. Ces différentes possibilités sont décrites dans les schémas qui suivent.



1er cas

$$\text{Si } SH + ABSO \leq DCRT$$

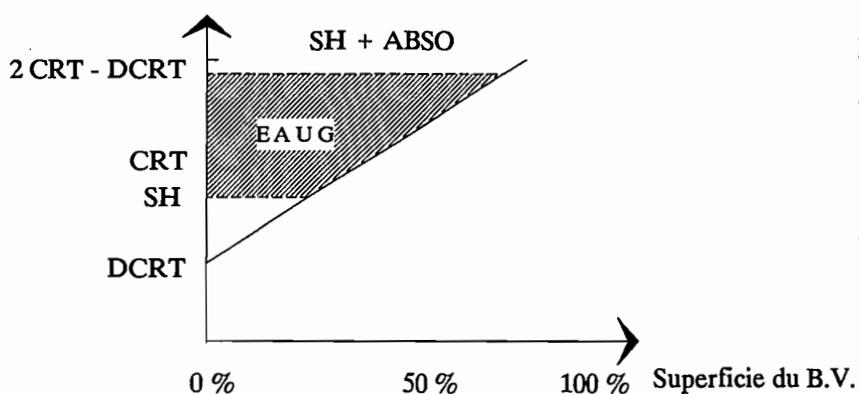
$$EAUG = 0$$



2ème cas

$$\text{Si } SH + ABSO < 2CRT - DCRT \text{ et } SH < DCRT$$

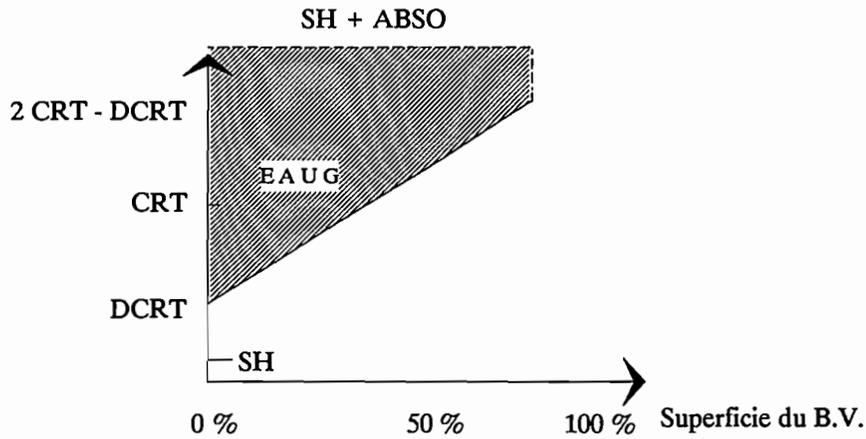
$$EAUG = \frac{(SH + ABSO - DCRT)^2}{4CRT(1 - DD)}$$



3ème cas

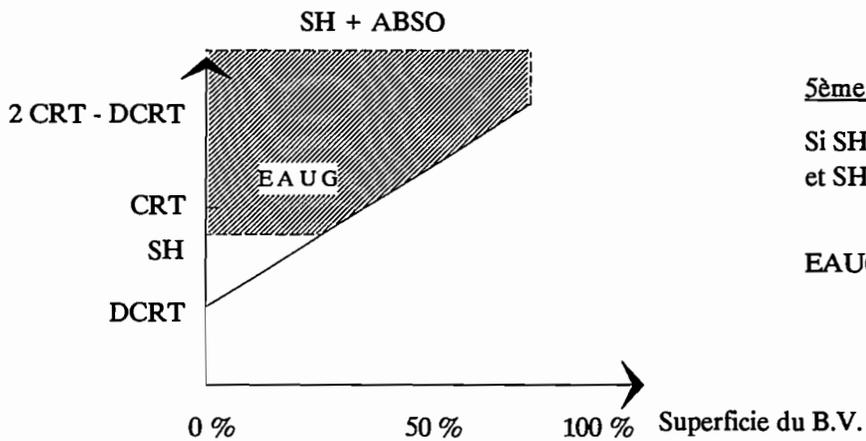
$$\text{Si } SH + ABSO < 2CRT - DCRT \text{ et } SH > DCRT$$

$$EAUG = ABSO \frac{(SH + ABSO/2 - DCRT)}{2CRT(1 - DD)}$$

4ème cas

Si $SH + ABSO > 2CRT - DCRT$
 et $SH \leq DCRT$

$$EAUG = SH + ABSO - CRT$$

5ème cas

Si $SH + ABSO > 2CRT - DCRT$
 et $SH > DCRT$

$$EAUG = ABSO - \frac{(CRT(2-DD) - SH)^2}{4CRT(1-DD)}$$

Calcul de la nouvelle hauteur d'eau dans le réservoir sol et de l'évaporation dans le réservoir sol.

EAUG ayant été déterminé, il est alors possible de calculer la nouvelle valeur de la hauteur dans le réservoir sol :

$$SH = SH_{\text{initial}} + ABSO - EAUG$$

Si la contrainte évapotranspiration n'a pas été pleinement satisfaisante précédemment, on évaluera la reprise éventuelle par évaporation sur le réservoir sol ETRR.

$$ETRR = \text{MINI}(ETRP, SH)$$

Après reprise par évaporation, la hauteur d'eau SH devient:

$$SH = SH - ETRR$$

L'évapotranspiration potentielle résiduelle éventuelle est : $ETRP = ES - ETR - ETRR$

2.3.3.2. Fonction de transfert

Le volume d'eau gravifique EAUG entre dans la fonction de transfert et subit un étalement pour former le volume RB contribuant, avec le ruissellement superficiel RS, à former le débit journalier.

Initialement, cette fonction de transfert comportait quatre réservoirs répartis en 3 branches, avec un réservoir comportant deux sorties. Cette fonction a été remplacée par une fonction plus simple (Dezetter, 1987) comportant trois réservoirs. Le transfert est donc réglé par 5 coefficients. Deux coefficients de répartition dans les trois branches C1 et C2 et trois coefficients de vidange (1 par réservoir) COEFFQ1, COEFFQ2 et COEFFQ3. La loi de vidange des réservoirs est de la forme :

$$Q1 = \text{COEFFQ1} * \text{SH1}$$

où SH1 est le niveau du réservoir.

La répartition dans les trois réservoirs se fait de la manière suivante :

le premier reçoit $C1 * \text{EAUG}$
 le deuxième : $C2 (1 - C1) * \text{EAUG}$
 et le dernier : $(1 - C1) (1 - C2) * \text{EAUG}$

Cette écriture permet de respecter le bilan car la somme des trois coefficients de répartition vaut 1.

$$C1 + C2 (1 - C1) + (1 - C1) (1 - C2) = 1$$

2.4. Développements informatiques.

Cette partie a pour but de présenter l'ensemble des réalisations dans le domaine de l'informatique qui se sont avérées nécessaires tout au long de cette étude.

Tous les développements informatiques ont été réalisés en Turbo Pascal 5.0 (Borland), environnement informatique choisi pour ses performances et sa souplesse d'utilisation sur micro-ordinateur.

Ces réalisations en matière d'informatique ont consisté en la réalisation d'une "chaîne de modélisation" complète allant de l'extraction et de la critique des données à l'exploitation des résultats de la modélisation, en passant par des étapes classiques de calage automatique, simulation, et validation des modèles retenus.

Cette chaîne de modélisation sert actuellement de base à un projet informatique plus ambitieux ; la réalisation du logiciel EMILE (Ensemble Modélisateur Intégré pour le calcul chronologique des Lames d'Eau). Ce logiciel, véritable "système modélisateur" intégré et convivial, est en cours d'analyse et sa réalisation sera effective en 1992.

Dans cet ensemble de logiciels on peut distinguer plusieurs groupes qui correspondent au déroulement chronologique du travail et à la méthodologie employée au cours de nos travaux.

Un premier groupe est constitué par les programmes de mise en forme de fichiers à partir des données extraites des banques HYDROM et PLUVIOM. Un second groupe de logiciels concerne les modèles pluie débit proprement dit. Il comprend les programmes de simulation et de calage automatique et manuel des modèles.

2.4.1. Mise en forme des fichiers.

Nous décrivons ici les programmes qui permettent de constituer, à partir des fichiers extraits des banques de données HYDROM et PLUVIOM, des fichiers opérationnels pluie débit utilisables par les programmes de modélisation décrits plus loin.

La mise en forme des fichiers pluie débit se fait en deux étapes.

*** première étape : extraction et découpage en fichiers stations.**

Avec HYDROM ou PLUVIOM on utilise tout d'abord la procédure "extraction des données" qui fournit un fichier contenant toutes les stations et toutes les années choisies pour l'extraction. On obtient donc un fichier de taille importante dans un format spécifique dit fichier en clair. C'est, en réalité, un fichier ASCII contenant un mois de données par ligne.

Les deux programmes, LECDJOU pour les débits et FORMPLU pour les pluies, ont été réalisés en FORTRAN et permettent de découper le fichier extrait en autant de fichiers que de stations présentes (identifiées par un numéro à dix chiffres).

Avant de passer à la deuxième étape, l'utilisateur doit alors éditer ces fichiers afin de les critiquer. Il s'agit essentiellement de repérer les lacunes, de combler celles qui peuvent l'être, et de repérer la concomitance des pluies et des débits pour un bassin donné. Si plusieurs postes pluviométriques sont présents sur un bassin, on calcule à ce moment, les coefficients de pondération relatifs à chacun d'eux et nécessaires à la deuxième étape. Dans le cas présent c'est la méthode de Thiessen qui a été retenue.

*** deuxième étape : constitution du fichier pluie débit.**

Le programme réalisé en Turbo-Pascal 5.0 permet de réunir un fichier débits et un ou plusieurs fichiers pluies sur une ou plusieurs années. Il faut fournir les noms des fichiers, la période souhaitée (année de début et année de fin) et les coefficients de Thiessen de chaque poste pluviométrique.

On obtient alors un fichier ASCII en colonnes contenant pour chaque année, une ligne d'entête (numéro de station, année, nombre de jours de l'année) et une ligne pour chaque jour avec le débit en l/s et la pluie (composée ou non) en $1/10^6$ de mm.

Ces différents programmes ont ainsi permis de constituer, dans le cadre du programme ERREAU, un ensemble de fichiers opérationnels pluie-débit. C'est ainsi, par exemple, que l'on a obtenu les 91 fichiers correspondant aux 91 stations années utilisées.

En ce qui concerne l'évapotranspiration potentielle, un logiciel a été développé par J.M Lapetite. Il permet de calculer l'ETP PENMAN à partir des données suivantes :

- . Température moyenne mensuelle journalière.
- . Tension de vapeur moyenne mensuelle journalière.
- . Insolation totale mensuelle.
- . Vent moyen mensuel journalier.

On obtient un fichier contenant 12 valeurs par an, qui sont des ETP moyennes journalières en mm/j.

2.4.2. Les programmes de modélisation.

Une architecture informatique modulaire a été développée pour la programmation des modèles pluie débit au pas de temps journalier (Servat et Dezetter, 1988 a). Cette architecture est valable quel que soit le modèle. A l'heure actuelle, et pour les besoins d'ERREAU, les trois modèles globaux précités (CREC, GR3 et MODGLO) ont été restructurés selon cette architecture. L'adaptation à cette architecture de n'importe quel modèle global, fonctionnant au pas de temps journalier, ne pose aucun problème.

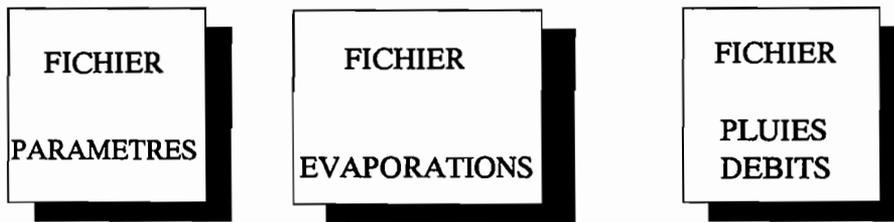
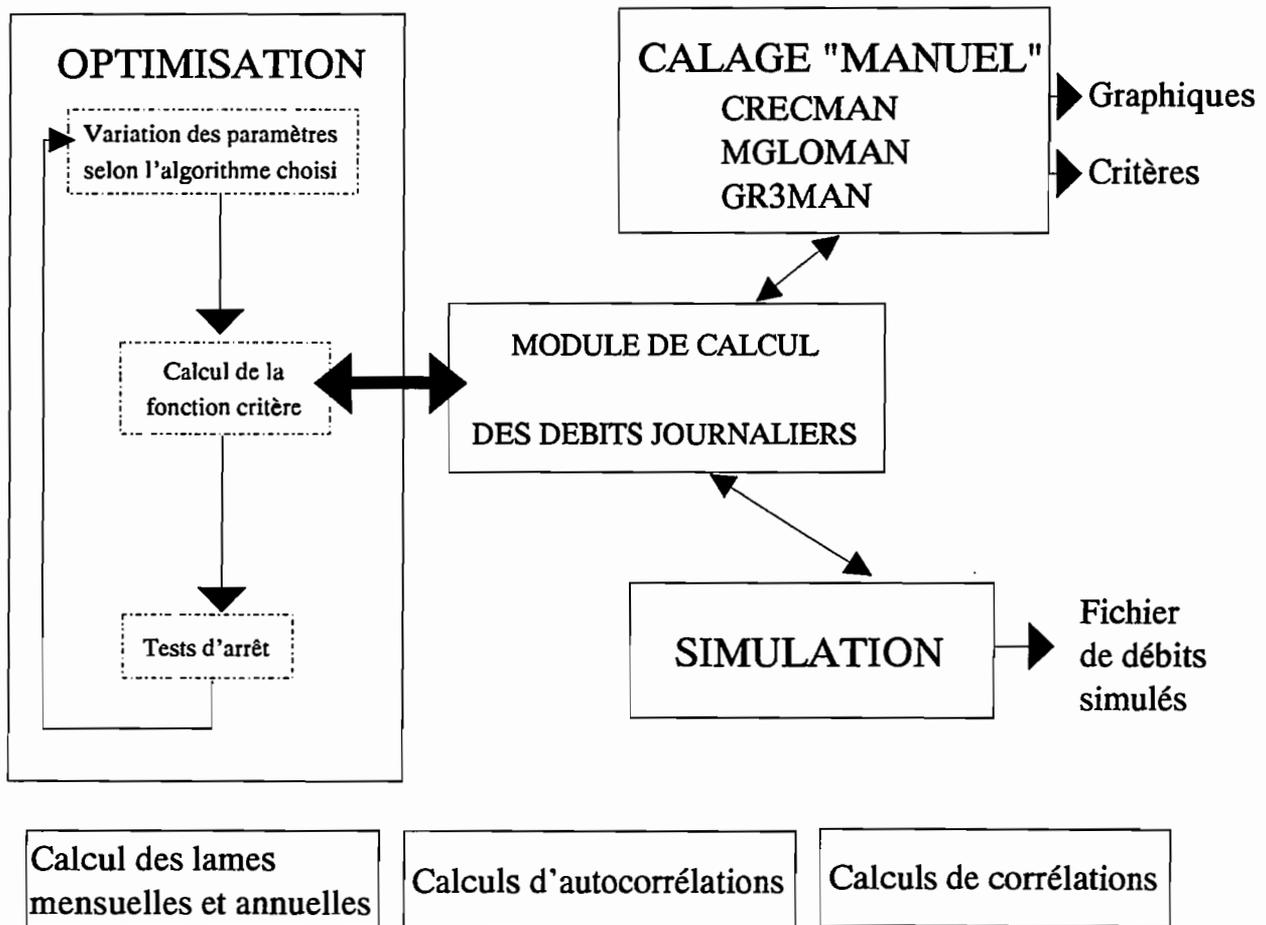
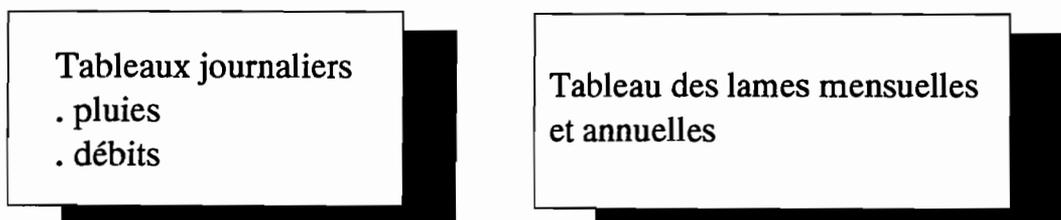
ENTREES**CALCULS****SORTIES**

Figure 2.4.1 : Organisation modulaire des programmes.

L'organisation informatique est présentée en figure 2.4.1. On y distingue trois types de modules ; les modules "Entrées", les modules "Calculs" et les modules "Sorties".

Dans cet ensemble, hormis le module de lecture des paramètres, seul le module de calcul des débits journaliers est spécifique du modèle utilisé. L'ensemble des autres modules constitue donc une "bibliothèque" commune de logiciels, d'algorithmes et de méthodes utilisés par tous les modèles.

Dans la démarche type de modélisation, on distingue plusieurs phases : la phase de calage, la phase de validation et la phase de simulation ou de génération de données.

La phase de calage permet de déterminer le jeu de paramètres du modèle le plus adapté au cas étudié. La phase de validation permet de vérifier la pertinence et la qualité du calage. On applique alors le jeu de paramètres optimum déterminé dans la phase précédente à des données n'ayant pas servi au cours du calage. La phase de simulation ou de génération permet d'exécuter simplement le modèle afin de calculer des débits correspondants à des pluies et à un jeu de paramètres donné.

2.4.2.1. Calage.

Cette phase vise à déterminer le jeu de paramètres du modèle qui permettra de reproduire le plus fidèlement possible l'hydrogramme observé.

Suivant les objectifs de la modélisation, le terme "le plus fidèlement possible" peut avoir plusieurs significations. On peut en effet s'intéresser aux crues, aux étiages, aux volumes écoulés, etc... Si on s'intéresse aux crues, un calage reproduisant au mieux la lame annuelle écoulée et sous-estimant les pointes de crues ne sera pas intéressant et inversement si on s'intéresse aux apports en eau.

On introduit donc à ce niveau l'usage d'un critère de calage qui peut être graphique ou numérique.

Deux types de calages sont possibles : le calage manuel où l'utilisateur change un à un les paramètres et observe les effets produits ; et le calage automatique où les paramètres sont modifiés selon une technique d'optimisation Rosenbrock ou Nelder et Mead, par exemple, (Servat et Dezetter, 1988 a) qui doit permettre de converger vers une solution optimale, et qui fait référence à un critère numérique de calage.

. Le calage manuel.

Pour chaque modèle un programme permet d'effectuer le calage manuel. Les figures 2.4.2 à 2.4.4 présentent quelques écrans du programme relatif au modèle CREC. L'utilisateur change les valeurs des paramètres, exécute le modèle (C : Calcule) et les valeurs des critères classiques sont alors affichées. La touche "G : Graphiques" permet d'afficher différents graphiques de variables internes et de résultats "Débit observé - Débit calculé".

Ces programmes sont essentiels pour l'utilisateur novice. Ils lui permettent de se rendre compte de la sensibilité et du rôle des différents paramètres ainsi que d'appréhender visuellement le fonctionnement interne du modèle.

Par essais successifs, l'utilisateur peut ainsi trouver le meilleur jeu de paramètres, quand il juge la reproduction de l'hydrogramme observé satisfaisante, il peut alors enregistrer les paramètres pour une simulation ultérieure. L'arrêt du calage est donc laissé à l'appréciation de l'utilisateur qui peut, pour cela,

faire référence à différents éléments tels que dynamique de l'hydrogramme reconstitué, crues, étiages, ou encore valeurs de critères selon ses motivations.

Modèle CREC			
Fichier en cours : LA18282N.PC2		Superficie du Bassin : 443 km ²	
X1	0.0593	Nombre de valeurs 365	
X2	0.6431	Fortin	5.02413
X3	0.0540	Nash	0.34783
X4	0.0116	SExpER	4.63277616486260E+0037
X5	95.2115	Scs	2215554.22211
X6	40.0000	Bilan	-0.06040
X7	25.0749	Critrec	2.46690
X8	206.2631	Autocorrelation Observée	0.71433
X9	2.0145	Autocorrelation Calculée	0.92487
X10	0.6012		
CET	1.0000		
Année début : 1982		Année fin : 1982	
ESC : Fin F9 : Sauv. F1 : Nouveau Fichier G : Graphiques C : Calcule			

Figure 2.4.2 : Modèle CREC, calage manuel, écran principal.

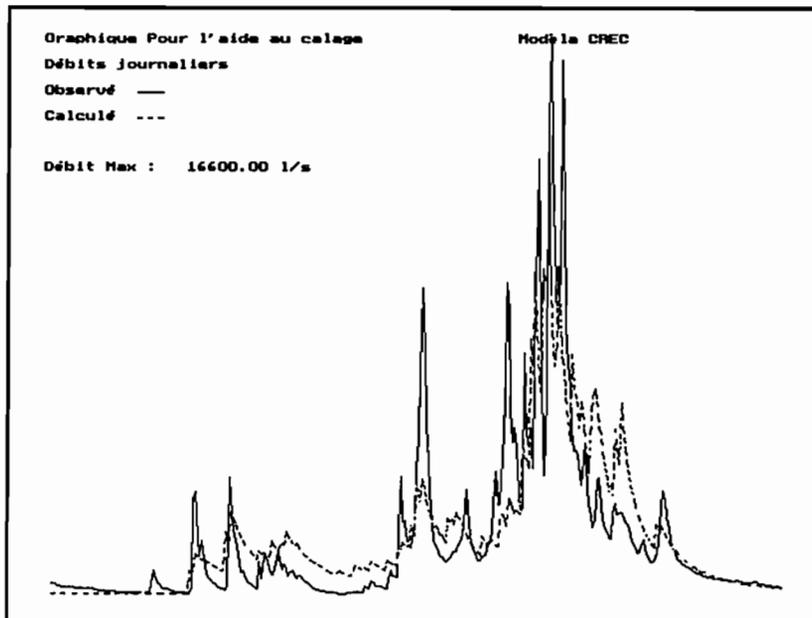


Figure 2.4.3 : Modèle CREC, calage manuel, écran graphique d'aide au calage.

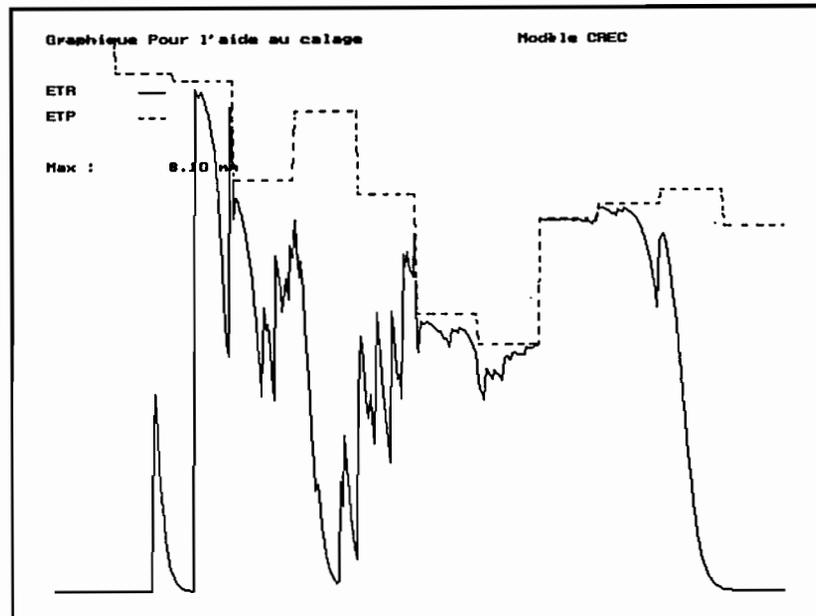


Figure 2.4.4 : Modèle CREC, calage manuel, écran graphique d'aide au calage.

. **Le calage automatique.**

Pour le calage automatique on utilise une fonction critère et une ou plusieurs méthodes d'optimisation non linéaire. Pour les trois modèles, des logiciels ont été réalisés qui permettent de choisir parmi cinq fonctions critères et deux méthodes d'optimisation. Les cinq fonctions critères sont :

- . Le critère de Nash.
- . Le critère "CREC".
- . Le critère de FORTIN.
- . Le critère "CREC" + Bilan.
- . Le critère SEXpER (Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs).

Nous ne détaillerons pas ces critères ici car ils font l'objet d'un développement plus complet dans la partie "Choix d'un critère numérique de calage". (deuxième partie, 3.1).

Les méthodes d'optimisation non linéaire retenues sont au nombre de deux : Rosenbrok (1960) et Nelder et Mead (1964) reprises, sur le plan informatique, par Servat et Dezetter (1988, b).

Les programmes développés peuvent être utilisés indifféremment de deux manières :

. en interactif.

L'utilisateur choisit à l'écran les paramètres à optimiser et le nombre d'itérations.

. en aveugle.

Les choix des paramètres à optimiser et du nombre d'itérations sont faits avant le lancement du programme et conservés dans un fichier. Ce fonctionnement permet d'exécuter de nombreux calages successifs sans avoir à intervenir. On peut ainsi effectuer les calculs les plus longs la nuit.

Pour les deux types de fonctionnement, quand on demande n itérations, le programme effectue n itérations avec la méthode de Rosenbrok puis enchaîne sur la réalisation de n itérations avec la méthode de Nelder et Mead.

2.4.2.2. Validation - Simulation - Génération.

La phase de validation, essentielle dans tout processus de modélisation, permet de tester la pertinence et la qualité des calages effectués. Dans ce but, on applique le jeu de paramètres calés à une série de valeurs qui n'a pas servi au calage. On compare ensuite l'hydrogramme calculé et l'hydrogramme observé avec le souci de vérifier que le calage utilisé conduit à de bons résultats. Pour les phases de simulation et de génération, on applique également un jeu de paramètres calés à une série pluviométrique.

Lors de ces différentes phases, on utilise MODELESG, un logiciel intégrant les trois modèles globaux retenus dans le cadre de cette étude. La figure 2.4.5 présente une copie d'écran du menu principal de ce programme.

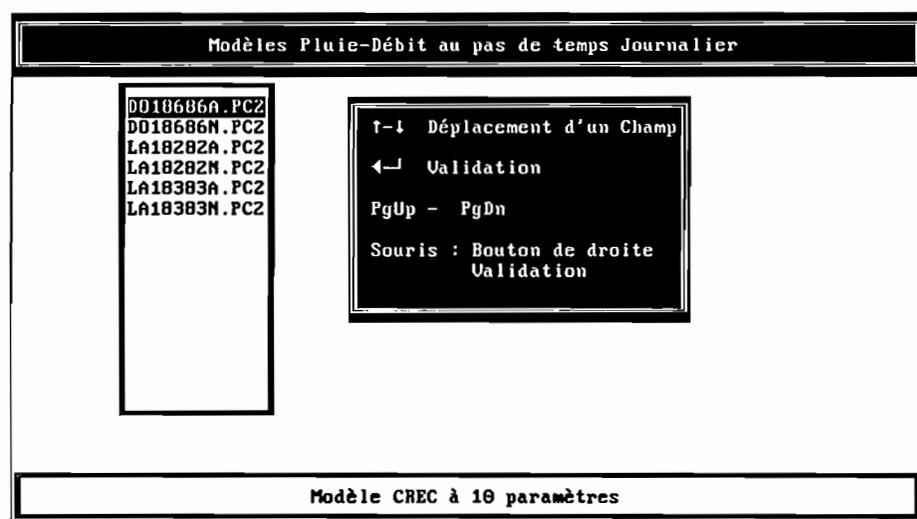


Figure 2.4.5 : Ecran principal de MODELESG.

Lorsqu'on choisit un modèle, la liste des fichiers de paramètres correspondants s'affiche. Il suffit alors de choisir un fichier dans cette liste. Il est aussitôt visualisé et il est possible de le modifier, le modèle est ensuite exécuté et l'on obtient des fichiers de résultats journaliers, décennaires et mensuels ainsi que des graphiques observés - calculés dans le cas de la validation (présence de débits observés).

Les fichiers de résultats font l'objet d'un examen plus approfondi grâce aux programmes d'exploitation des résultats.

2.4.3. Exploitation des résultats.

Que ce soit lors de la phase de calage ou lors de la phase de validation, il est nécessaire de pouvoir comparer l'hydrogramme observé et l'hydrogramme calculé par le modèle. De plus, cette comparaison peut être qualitative mais doit également être quantitative si l'on veut, par la suite, comparer les performances des différents modèles.

- Deux types de programmes ont été développés :
- . des programmes graphiques.
 - . des programmes de calcul de critères au sens large.

Les programmes graphiques permettent, essentiellement, d'afficher à l'écran ou de tracer sur table traçante des courbes réalisées à partir des fichiers de sortie des modèles. Ces fichiers sont de plusieurs types : journaliers, décadaires et mensuels.

Les programmes développés permettent :

- d'afficher les courbes observées-calculées, plus le hyétogramme d'un fichier journalier, décadaire ou mensuel.

(la figure 2.4.6 présente le cas d'un fichier journalier)

- d'afficher simultanément quatre graphiques du même type que le précédent, afin d'obtenir simultanément les différents pas de temps ou les résultats de plusieurs modèles.

- d'afficher en séquence tous les fichiers de résultats présents sur le disque.

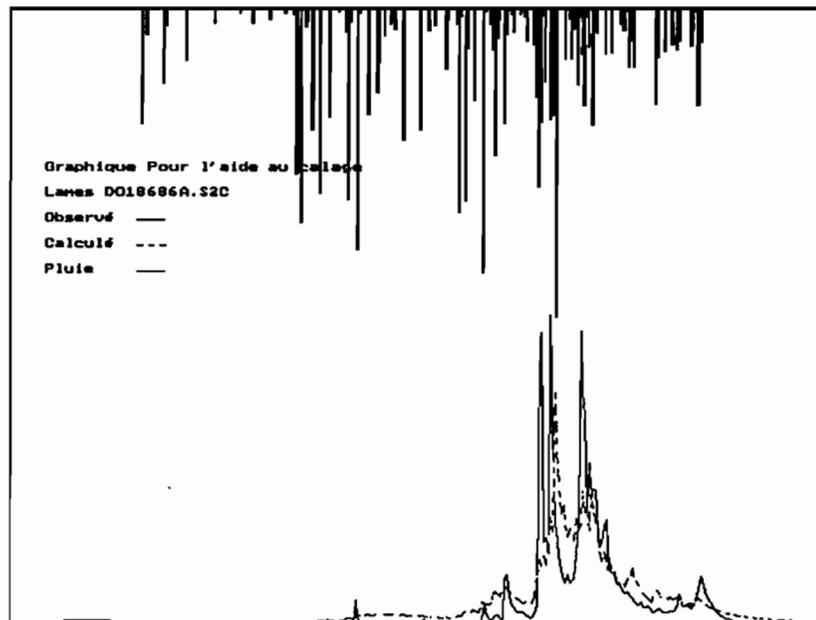


Figure 2.4.6 : Exploitation graphique d'un fichier de résultats journaliers.

Les programmes de calculs d'éléments de référence numériques permettent d'obtenir une appréciation quantitative chiffrée de la qualité des résultats. Les éléments retenus sont les suivants (Servat et Dezetter, 1989, 1991).

- corrélation entre valeurs observées et valeurs calculées.
- autocorrélation d'ordre 1 et 2 sur les valeurs observées et sur les valeurs calculées.
- bilan volumique sur la période.

$$\sum_i |(Observé - Calculé)|$$

$$\left| \sum_i (Observé_i - Calculé_i) \right|$$

- Indice de Reconstitution du Volume des Crues (IRVC) (voir description dans la deuxième partie, chapitre 3.1.2).

- critères numériques de calages utilisés en optimisation.

- . Nash.
- . CREC.
- . Fortin.
- . CREC + Bilan.
- . SExpER.

Tous ces logiciels, développés en Turbo Pascal 5.0, permettent donc de quantifier et d'apprécier l'adéquation de l'hydrogramme calculé à l'hydrogramme observé.

A cet ensemble de programmes qui constituent la chaîne de modélisation indispensable à la réalisation du travail présenté ici, viennent s'ajouter différents utilitaires :

- conversion de fichiers, permettant de communiquer aisément avec les logiciels classiques du marché du type EXCEL (tableur graphique).
- traitement automatique des opérations de modélisation : un programme permet de lancer la simulation avec tous les modèles sur la totalité des fichiers de données présents dans une liste. Un autre programme permet, lui, d'exécuter le calage automatique de la même façon.

DEUXIEME PARTIE

3. DEUXIEME PARTIE

INTRODUCTION

Dans cette deuxième partie, différents points sont abordés. Nous détaillerons en premier lieu la méthode employée afin de sélectionner un critère numérique de calage pour permettre le calage automatique des modèles. On entend par calage automatique l'utilisation d'une méthode d'optimisation permettant de trouver le jeu de paramètres optimal pour un modèle donné ; une fois le critère de calage sélectionné, un deuxième point présente les calages effectués à l'aide de ce critère. Nous aborderons ensuite une analyse plus fine de ces calages en terme de fonction de production et fonction de transfert. Les essais de validation croisée sont présentés à ce niveau. Le quatrième et dernier point de cette deuxième partie aborde l'application des techniques classiques d'analyse de données (ACP, AFC, corrélation multiple) à l'ensemble des jeux de paramètres annuels des modèles.

3.1. Etude et Sélection des critères numériques de calage.

Ce premier point a pour but de choisir un critère numérique de calage des modèles pluie débit. Ce critère numérique de calage est indispensable dès lors que l'on envisage le calage automatique des modèles pluie débit.

Le calage automatique consiste en effet à déterminer un jeu de paramètres du modèle dit "optimal" et cela sans la présence d'un opérateur effectuant des choix. Ce calage automatique est possible grâce à l'utilisation d'une méthode d'optimisation qui comporte un algorithme de recherche du minimum ou du maximum d'une fonction quelconque non linéaire. En l'occurrence, cette fonction est appelée fonction critère ou critère numérique de calage. Cette fonction doit tendre vers une valeur donnée (minimum, maximum ou constante donnée) lorsque les valeurs calculées tendent vers les valeurs observées.

3.1.1. Les critères utilisés.

La fonction critère, ou critère numérique de calage, est "l'objet" numérique de référence lors du calage automatique d'un modèle. Le choix d'un critère n'est pas sans influence sur la nature et la qualité du calage obtenu au terme du processus.

Considérer différents critères, c'est en effet considérer différentes formulations mathématiques, faisant cependant toujours intervenir l'écart entre les valeurs observées et les valeurs calculées, écart auquel on applique différentes transformations ou pondérations.

Pour un modèle donné à n paramètres, on conçoit facilement que la représentation de chaque fonction critère dans l'hyperespace à n dimensions (car n paramètres) conduise à autant d'hyper-surfaces

différentes. L'optimisation des paramètres se traduit par un déplacement sur l'hypersurface, déplacement qui conduit, idéalement, au minimum de la fonction critère. En pratique, ces hypersurfaces ont généralement des aspects très irréguliers et le processus d'optimisation conduit, avec une convergence variable, à des minima qui sont la plupart du temps différents d'un cas sur l'autre. Pour une application donnée, chaque fonction critère a donc un cheminement spécifique conduisant à des solutions différentes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons testé plusieurs formulations mathématiques de fonctions critères afin de juger de leurs performances et d'en sélectionner une que nous utiliserons pour la suite des opérations. Les objectifs que nous nous étions fixés sont les suivants :

- . reconstitution la plus précise possible des valeurs de crues en saison des pluies. Le programme ERREAU a en effet comme objectif la détermination des apports à l'exutoire du bassin versant.
- . reconstitution de la dynamique des hydrogrammes.
- . absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés.

Nous avons accordé moins d'importance à la reconstitution précise des étiages, qui sont souvent très faibles, issus de longues périodes sans ou à très faibles précipitations, et généralement assez simple à reproduire pour des modèles à réservoirs.

Il existe, dans la littérature, un très grand nombre de fonctions critères. Notre but ici n'était pas d'en faire l'étude exhaustive, ce qui paraît irréalisable, mais d'en tester un certain nombre et de sélectionner la mieux adaptée à nos objectifs. Nous avons donc utilisé cinq fonctions critères différentes dont trois ont déjà été couramment utilisées en hydrologie. Les deux autres ayant été bâties en tenant compte des éléments qui semblaient importants.

Les cinq fonctions critères testées sont les suivantes :

- . critère CREC.
- . critère CREC*B*_i.
- . critère de Fortin.
- . critère de Nash.
- . critère S*Exp*ER (Somme des Exponentielles des Ecart^s Relatifs).

3.1.1.1. Le critère CREC.

Ce critère est ainsi dénommé car c'est celui qui était utilisé à l'origine dans le modèle CREC. Son expression est la suivante :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left| 1 - \frac{Q_c}{Q_o} \right| + \left| 1 - \frac{Q_o}{Q_{mo}} \right| \right]$$

où

N : nombre d'observations

Q_c : débit calculé

Q_o : débit observé.

Q_{mo} : débit moyen observé

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o .

3.1.1.2. Le critère CRECBI.

Ce critère n'est autre que le critère CREC auquel nous avons ajouté un terme de bilan. La formulation devient donc :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left| 1 - \left(\frac{Q_c}{Q_o} \right) \right| \left| 1 - \left(\frac{Q_o}{Q_{mo}} \right) \right| \right] + \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \frac{(Q_o - Q_c)}{Q_{mo}} \right|$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o .

Dans un premier temps, nous avons utilisé ce terme de bilan comme coefficient de pondération multiplicateur. Son influence était alors prépondérante et nuisait à la qualité de la dynamique des hydrogrammes reconstitués. Il a donc finalement été pris en compte sous la forme d'un élément additif dont l'ordre de grandeur est comparable au premier terme du critère.

3.1.1.3. Le critère de Fortin.

Appelé ainsi parce que proposé par Fortin et al (1971). Son expression est la suivante :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Q_c - Q_o)}{Q_o} \left(1 + \frac{|Q_o - Q_{mo}|}{Q_{mo}} \right) \right|$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o .

3.1.1.4. Le critère de Nash.

Proposé par NASH (1969) et repris par NASH et SUTCLIFFE (1970), ce critère a pour formulation :

$$1 - \left[\frac{\sum (Q_c - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_{mo})^2} \right]$$

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o .

Il est facile de faire, en ce qui le concerne, une analogie avec une régression. Le terme $\sum (Q_o - Q_{mo})^2$ correspond à un terme de variance de la série observée. Le terme $\sum (Q_c - Q_o)^2$ peut être assimilé à un terme de variance résiduelle. La formulation du critère traduit donc une certaine "efficacité" (ou "rendement") du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression.

D'un point de vue pratique, nous avons utilisé une forme modifiée du critère de Nash :

$$\frac{\sum (Q_c - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_{mo})^2}$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o . Elle ne donne pas la proportion de variance expliquée par le modèle, mais le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale.

3.1.1.5. Le critère SExpER.

SExpER : Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs.

Ce critère a une formulation inhabituelle puisqu'il fait intervenir un terme qui le rend très sensible aux modifications sur Q_c :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\text{Exp}\left(\frac{|Q_c - Q_o|}{Q_o}\right) \left(\frac{Q_o}{Q_{mo}}\right) \right]$$

Le terme pondérateur Q_o/Q_{mo} est destiné à donner un poids plus important aux fortes valeurs (le débit moyen observé étant généralement très faible, le rapport Q_o/Q_{mo} atteint des valeurs importantes en période de crue et faibles durant les étiages).

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o , mais par souci d'homogénéité, c'est l'écart à 1 que nous avons cherché à minimiser.

Ces cinq critères numériques ont été utilisés en calage avec chacun des trois modèles présentés. L'examen des solutions optimales auxquelles nous sommes ainsi arrivés peut être envisagé sous plusieurs aspects. Nous avons, en ce qui nous concerne, privilégié l'utilisation systématique d'un module d'évaluation de la qualité des hydrogrammes ainsi reconstitués. Nous disposons alors de données permettant d'apprécier, globalement ou en fonction du modèle utilisé, les performances de tel ou tel critère.

3.1.2. Le module d'évaluation comparative.

Ce module d'évaluation comparative (SERVAT et DEZETTER, 1991 a et b) est basé sur la comparaison de deux hydrogrammes, l'un observé et l'autre calculé (issu généralement d'un modèle). Le pas de temps choisi pour ces hydrogrammes à comparer est la décade alors que le pas de temps utilisé pour les calculs et le calage des modèles est le pas de temps journalier (LEVIANDIER et MA, 1987).

Les différents éléments retenus pour faire partie de ce module sont au nombre de cinq. Ce sont des critères numériques permettant d'apprécier la proximité de deux hydrogrammes. Ils sont calculés à partir des lames décadaires. Ces éléments sont les suivants :

. Coefficient de corrélation lames observées-lames calculées.

Ce coefficient permet de prendre en compte principalement, les décalages dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés et, à un degré moindre, les écarts quantitatifs entre les deux séries.

. Ecart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés.

Les écarts sur les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1 étant peu significatifs, nous avons choisi d'utiliser les écarts entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 comme témoins de la dynamique des hydrogrammes, en particulier en décrue. Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 2 sur les lames décadaires est en effet un bon indicateur de l'allure de l'hydrogramme. Une forte différence entre ces coefficients, calculés sur les lames observées et calculées, indique donc une grande différence de forme des hydrogrammes.

. Deux coefficients d'appréciation du Bilan volumique.

$$\text{Bilan1} = \left| \sum_{i=1}^n (L_o - L_c) \right|$$

$$\text{Bilan2} = \sum_{i=1}^n |(L_o - L_c)|$$

où

L_o : Lame écoulee observée (mm).

L_c : Lame écoulee calculée (mm).

n : nombre de lames observées.

Bilan 1 et 2 tendent vers 0 lorsque L_c tend vers L_o .

Le seul Bilan1 ne peut suffire car des compensations numériques peuvent intervenir qui donneront une faible valeur à ce coefficient sans que, pour autant, l'hydrogramme calculé soit de bonne qualité.

Le seul Bilan2 ne peut suffire non plus dans la mesure où l'on peut accepter, malgré tout, de légères oscillations de part et d'autre de la courbe observée. Celles-ci confèreraient donc une valeur élevée à Bilan2 alors que l'allure générale de l'hydrogramme observé et le volume de la crue seraient bien restitués.

Ces deux critères sont donc complémentaires.

. L'indice de Reconstitution du Volume des Crues (IRVC).

Les objectifs fixés au départ concernent principalement la détermination des apports. Dans notre approche, nous avons donc privilégié les crues par rapport aux étiages.

Pour la région concernée ici, nous avons défini comme lame de crue, la lame écoulee entre les décades 19 et 30 incluses (c'est à dire du 1er Juillet au 31 Octobre).

Le tableau 3.1.1 donne pour les 91 stations-années retenues les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum de la lame écoulee annuelle, de la lame écoulee entre les décades 19 et 30 et du pourcentage correspondant écoulee entre ces décades.

	Lame écoulee annuelle	Lame écoulee de la décade 19 à 30	% écoulee entre le 1/7 et le 31/10
Moyenne	128.7	116.6	90.6
Ecart type	85.5	77.5	8.3
Mini	3.6	3.6	49.3
Maxi	355.2	303.8	100

Tableau 3.1.1 Définition de la lame de crue.

Le tableau 3.1.1 montre que le volume qui s'écoule entre les décades 19 et 30 incluses représente en moyenne 91 % du volume annuel.

A partir de cette définition de la lame de crue, on définit un Indice de Reconstitution du Volume des Crues, IRVC.

Cet indice est défini sur l'ensemble de la période considérée. Pour chaque année, on évalue l'écart en % entre la crue calculée et la crue observée. Pour chacune des années de la période considérée, la valeur absolue de cet écart est pondérée par un coefficient traduisant l'importance, en terme de volume, de la crue annuelle par rapport au volume de crue écoulee sur toute la période.

L'IRVC est la somme de ces écart pondérés.

Pour une série de n années, on aura :

$$IRVC = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\text{Crue année } i}{\sum_{i=1}^n \text{Crue année } i} \cdot 100 \left| \frac{\text{Crue année } i \text{ Calc}}{\text{Crue année } i \text{ Obs}} - 1 \right| \right]$$

C'est-à-dire

$$IRVC = \sum_{i=1}^n (\text{Coefficient de pondération } i \mid \text{Ecart Observé-Calculé année } i \text{ en } \% \mid)$$

IRVC tend vers 0 lorsque le volume des crues calculées tend vers le volume des crues observées.

A titre indicatif, une erreur systématique de 10 % sur les lames calculées d'une série donnée correspond à un IRVC de 10.

On dispose donc d'un module d'évaluation de l'adéquation des hydrogrammes décadaires composé de cinq critères numériques qui sont :

- . Coefficient de corrélation.
- . Différence d'autocorrélation d'ordre 2.
- . Bilan1.
- . Bilan2.
- . Indice de Reconstitution du Volume des Crues (IRVC).

Ce module sera utilisé de manière systématique car il utilise des critères numériques représentatifs de caractéristiques hydrologiques.

3.1.3. Méthodologie et résultats

3.1.3.1. Méthodologie.

La méthode employée (SERVAT et DEZETTER, 1991 a et b) pour choisir un critère numérique de calage est proche de celle employée par Diskin et Simon (1977). Elle diffère cependant par l'introduction des critères numériques du module d'évaluation comparative comme indicateurs de la qualité du calage au lieu de la simple utilisation des critères de calage eux mêmes.

Cinq séries ont été retenues pour cette étude, il s'agit de :

- . la Bagoé à Kouto 1973-1976
- . la Bagoé à Kouto 1981-1985
- . la Bagoé à Guingérini 1981-1983
- . le Bou à Boron 1981-1985
- . le Lafigue à Rte de Badikaha 1981-1984

La démarche a donc été la suivante :

- a) Calage des trois modèles à l'aide des cinq critères de calage pour les cinq séries retenues (soit 75 calages au total).
- b) Calcul pour chacun des 75 hydrogrammes calés des valeurs des critères numériques du module d'évaluation comparative.
- c) Pour une série et un modèle donné :
 - . pour chaque terme du module d'évaluation (IRVC, Bilan, ...), on établit un classement des performances des critères auxquels on attribue un rang (rang 1 pour le meilleur, rang 5 pour le plus mauvais).
 - . pour chaque critère, on somme les différents rangs obtenus, et l'on obtient ainsi une "note" comprise entre 5 et 25 (5 dans le meilleur des cas, 25 dans le pire).

Avec cette démarche, on obtient ainsi, pour chaque critère, une série de 15 notes relatives aux cinq séries et trois modèles utilisés. La comparaison de ces notes pour chaque critère et surtout la comparaison du classement du critère dans chaque cas (une série et un modèle donné) permettra de départager les critères.

3.1.3.2. Résultats.

S'agissant des résultats obtenus, on peut distinguer tout d'abord les résultats "bruts" issus des calages. Il s'agira essentiellement d'examiner les résultats des modèles sur chaque série et avec chaque critère. Dans un deuxième temps, l'examen des valeurs issues du module d'évaluation comparative permettra de classer les critères et de faire un choix.

3.1.3.2.1. Calages

Les calages effectués concernent les cinq séries de débits journaliers énoncées au paragraphe précédent.

Les trois modèles retenus (CREC, GR3, MODGLO) ont donc été calés sur ces cinq périodes et à l'aide des cinq critères retenus. Nous avons procédé à des calages automatiques utilisant en séquence la méthode de Rosenbrock (ROSENBROCK, 1960) puis la méthode de Nelder et Mead (NELDER ET MEAD, 1964). Nous reviendrons plus en détails sur ces méthodes dans le chapitre 3.2.1.1 qui présente l'ensemble des calages annuels effectués avec le critère numérique choisi à l'issue de cette étude.

Le tableau 3.1.2 présente les valeurs des critères obtenus par calage automatique des modèles pour l'ensemble des séries utilisées.

Critère	Modèle	Bagoé Ko 73-76	Bagoé Ko 81-85	Bagoé Gu 81-83	Bou 81-85	Lafigue 81-84
Crec	CREC	0.968	0.667	0.769	1.163	0.796
	MODGLO	0.894	0.717	0.765	0.863	0.807
	GR3	6.914	1.305	5.249	1.098	0.761
CrecBi	CREC	1.173	0.736	0.806	1.359	0.881
	MODGLO	0.943	0.621	0.782	1.121	0.903
	GR3	8.305	1.793	5.682	1.602	0.873
Fortin	CREC	1.877	1.362	1.385	2.279	1.512
	MODGLO	1.404	1.047	1.114	1.456	1.460
	GR3	8.424	1.914	5.803	1.789	1.452
Nash	CREC	0.334	0.137	0.184	0.197	0.353
	MODGLO	0.369	0.133	0.185	0.205	0.490
	GR3	0.632	0.131	0.178	0.199	0.389
SExpER	CREC	1.388	1.581	1.255	1.733	1.228
	MODGLO	0.955	0.507	0.512	1.040	1.355
	GR3	P d C	P d C	P d C	P d C	1.015

P d C : Pas de Convergence

Tableau 3.1.2 : Valeurs des critères de calage.

L'observation du tableau 3.1.2 amène plusieurs remarques :

- . tous les critères utilisés tendent vers 0 lorsque le débit calculé tend vers le débit observé. Or, en règle générale, les valeurs obtenues en fin de calage en sont relativement éloignées, signe d'une concordance moyenne entre les séries observées et calculées.

- . une interprétation simple des valeurs des critères est difficile. Seul le critère de Nash peut être directement relié à une grandeur statistique : le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale observée. Celle-ci varie, selon les cas, entre 13 % et 63 %. Les autres critères n'ont pas de signification directe simple. On peut par contre, pour un même critère, comparer les valeurs entre elles et définir que tel calage est meilleur, au sens du critère utilisé, que tel autre.

- . l'association du modèle GR3 et du critère SExpER semble ne pas fonctionner correctement puisque dans quatre cas sur cinq la valeur du critère reste très élevée (noté PdC : pas de convergence).

Le seul examen des valeurs prises par les fonctions critères à l'issue des calages ne peut suffire à juger de la qualité des hydrogrammes calculés. Mis à part le critère de Nash, il est difficile d'apprécier qualitativement les résultats. Les critères sont, en effet, une aide au calage dans la mesure où ils constituent un objectif à atteindre. Leurs formulations ne sont cependant pas sans influence sur l'allure et les valeurs des séries calculées. Telle fonction critère aura un poids important sur les étiages, telle autre sur les pointes de crues. Leur convergence sera plus ou moins rapide et précise, leur pertinence pouvant être variable selon l'algorithme (et donc les équations) auquel ils sont associés (exemple : association GR3 + SExpER). En conséquence, si la valeur du critère permet d'éliminer ou de rejeter certaines solutions, il faut déterminer d'autres éléments d'appréciation, permettant de juger de la qualité des hydrogrammes calculés, d'un point de vue hydrologique. Le premier élément qui vient à l'esprit est l'examen des tracés des séries chronologiques observées et calculées. Les autres éléments d'appréciation ont été regroupés dans le module d'évaluation comparative présenté au chapitre 3.1.2.

Grâce à l'examen systématique de tous les calages à l'aide du programme permettant d'appréhender graphiquement le fonctionnement interne du modèle, on s'aperçoit que la partie écoulement superficiel (Cf. Figure 2.3.1) n'est jamais utilisée. Les paramètres X8, X9 et X10 deviennent ainsi inutiles.

Nous avons tracé les graphiques des séries observées et calculées pour l'ensemble des calages effectués avec chaque critère. Nous ne présenterons pas ici l'ensemble des graphiques ce qui serait fastidieux et ce qui, dans certains cas, n'apporterait rien.

A titre d'exemple, on trouvera les figures 3.1.1, 3.1.2 et 3.1.3 concernant les tracés décennaux chronologiques des séries observées et calculées pour 3 cas qui sont les suivants :

- . figure 3.1.1 : la Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle MODGLO, critère CREC*Bi*.
- . figure 3.1.2 : la Bagoé à Guingérini 1981-1983, modèle CREC, critère de Nash.
- . figure 3.1.3 : Le Bou à Boron 1981-1985, modèle GR3, critère CREC.

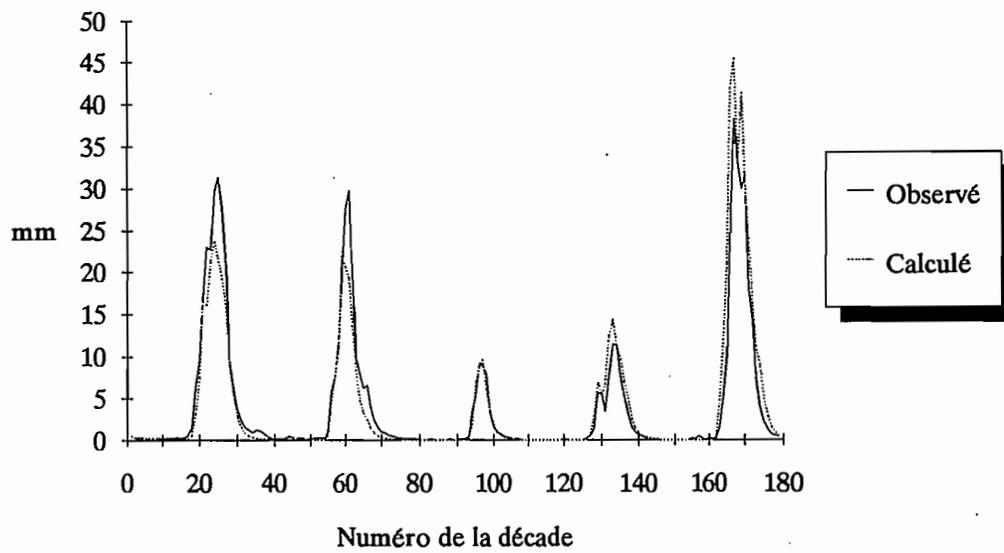


Figure 3.1.1 : la Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle MODGLO, critère CRECBI

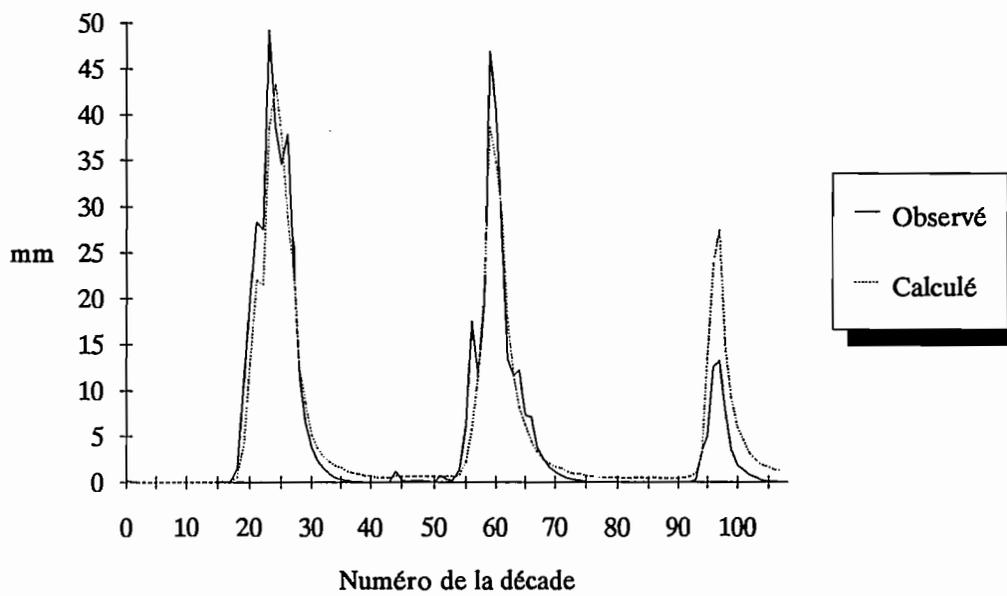


Figure 3.1.2 : la Bagoé à Guingérini 1981-1983, modèle CREC, critère de Nash

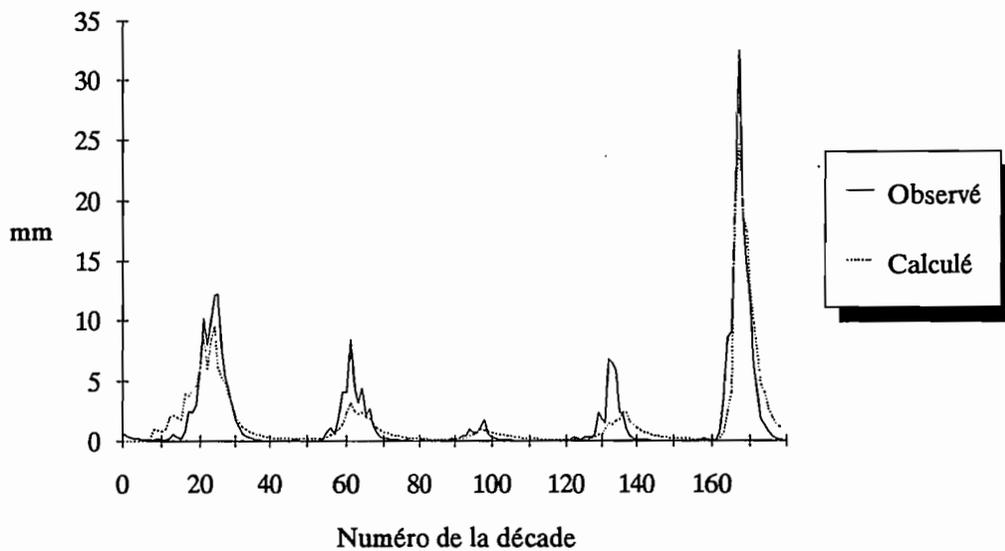


Figure 3.1.3 : Le Bou à Boron 1981-1985, modèle GR3, critère CREC

Au vu de ces tracés, on aperçoit mieux la très forte particularité de l'année 1983 et, à un degré moindre, de l'année 1984. On mesure aisément le biais important introduit dans le calage à ce niveau.

Quel que soit le modèle utilisé, l'examen de tous les tracés des séries observées et calculées dégage certains enseignements relatifs aux comportements des fonctions critères :

. Le critère CREC se révèle un peu "réducteur" dans la mesure où l'hydrogramme calculé a un volume qui est souvent inférieur à l'observé. Il respecte, par contre assez bien la dynamique des hydrogrammes.

. La prise en compte du terme de bilan sous forme purement additive dans CREC*Bi* lui accorde certainement une influence excessive. Cela se traduit en terme de bilan (et donc de volume de crue) qui se répercute sur une seule année (1983 en général, voir figure 3.1.2).

. Le critère de Fortin a un comportement similaire au critère CREC; en ce sens qu'il est généralement assez "réducteur".

. Le critère de Nash se révèle très performant en matière de dynamique d'hydrogrammes et de pointes de crues. Son comportement est, par contre, plus mauvais lorsque l'on s'intéresse aux étiages.

. Le critère SExpER a un comportement assez comparable à ceux des critères Crec et Fortin.

En conclusion, le simple examen des résultats de calages et en particulier l'observation des tracés décennaires permet de dégager certaines tendances relatives à chaque critère. L'utilisation du module d'évaluation comparative associée à la méthodologie, basée sur celle de Diskin et Simon (1977), présentée au chapitre 3.1.3.1, va permettre maintenant de quantifier ces tendances pour départager les critères.

3.1.3.2.2. Evaluation comparative et classement des critères.

On procède conformément à la méthodologie présentée au chapitre 3.1.3.1. Pour une période et un modèle donné, on obtient donc cinq séries de lames calculées, chacune issue du calage effectué à l'aide d'un

des cinq critères étudiés. On utilise alors le module d'évaluation comparative qui inclut cinq critères numériques d'évaluation.

On trouvera ici, à titre d'exemple, trois doubles tableaux présentant les valeurs des termes du module d'évaluation ainsi que les rangs de chaque critère relatifs à chaque terme du module d'évaluation. Ces trois doubles tableaux concernent :

- . Tableau 3.1.3 : La Bagoé à Kouto 1981-1985. Modèle CREC.
- . Tableau 3.1.4 : La Bagoé à Guingérini 1981-1983. Modèle MODGLO.
- . Tableau 3.1.5 : Le Bou à Boron 1981-1985. Modèle GR3.

	Critères de calage				
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	0.939	0.946	0.942	0.945	0.674
DAC2	0.03229	0.02598	0.02141	0.00630	0.19372
Bilan1	44.7	84.2	1.1	86.1	635.4
Bilan2	232.7	267	248.3	309.7	635.4
IRVC	22.1	25.7	27.8	15.7	87.2

	Critères de calage (rangs).				
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	4	1	3	2	5
DAC2	4	3	2	1	5
Bilan1	2	3	1	4	5
Bilan2	1	3	2	4	5
IRVC	2	3	4	1	5
Somme	13	13	12	12	25

Tableau 3.1.3 : La Bagoé à Kouto 1981-1985. Modèle CREC.

	Critères de calage				
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	0.944	0.945	0.946	0.948	0.943
DAC2	0.03439	0.03438	0.02614	0.01832	0.02647
Bilan1	86.3	76.5	0.1	18.5	131.8
Bilan2	178.1	174.5	179.3	174.5	193.4
IRVC	26.7	25.8	17.8	20.2	30.6

	Critères de calage (rangs).				
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	4	3	2	1	5
DAC2	5	4	2	1	3
Bilan1	4	3	1	2	5
Bilan2	3	1	4	1	5
IRVC	4	3	1	2	5
Somme	20	14	10	7	23

Tableau 3.1.4 : La Bagoé à Guingérini 1981-1983. Modèle MODGLO.

	Critères de calage				
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	0.913	0.918	0.719	0.925	0.694
DAC2	0.11141	0.11016	0.18331	0.041176	0.20355
Bilan1	155.7	146.4	23.1	15.8	105.2
Bilan2	173.9	166	237.7	180.6	233.6
IRVC	41.8	39.7	36.2	20.7	32.3

	Critères de calage (rangs).				
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	3	2	4	1	5
DAC2	3	2	4	1	5
Bilan1	5	4	2	1	3
Bilan2	2	1	5	3	4
IRVC	5	4	3	1	2
Somme	18	13	18	7	19

Tableau 3.1.5 : Le Bou à Boron 1981-1985. Modèle GR3.

On obtient ainsi, pour les cinq périodes étudiées et les trois modèles retenus, 15 doubles tableaux du type des tableaux 3.1.3, 3.1.4 et 3.1.5. A ces 15 tableaux correspondent 15 notes attribuées à chaque critère de calage. Le tableau 3.1.6 présente les fréquences absolues des classements des critères.

Critère	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Rang					
1	-	1	2	12	1
2	1	5	4	2	4
3	6	4	6	1	-
4	5	2	3	-	2
5	3	3	-	-	8

Les ex-aequo n'ont pas été départagés, ce qui explique que le total, par ligne, ne soit pas toujours égal à 15.

Tableau 3.1.6

Le critère de Nash semble s'imposer nettement au vu du tableau 3.1.6. Il est, en effet, classé 12 fois 1er sur 15 et il est au pire classé 3ème. Derrière lui, les critères CREC*Bi* et Fortin, respectivement 12 et 10 fois dans les trois premiers semblent avoir les meilleurs comportements.

Une étude plus détaillée peut être menée en examinant le comportement des critères relativement à chaque élément du module d'évaluation.

. Le coefficient de corrélation.

Critère	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Rang					
1	1	2	-	12	-
2	-	4	5	2	4
3	9	3	1	-	2
4	4	4	4	-	3
5	1	2	5	1	6
Valeur min	0.400	0.391	0.570	0.760	0.470
Valeur maxi	0.944	0.946	0.946	0.955	0.943

Tableau 3.1.7 : Fréquences absolues des classements des critères pour le coefficient de corrélation.

Le critère Nash semble très supérieur aux autres en matière de corrélation entre lames observées et calculées. Il apparaît 12 fois sur 15 en première position et il présente l'intervalle de valeurs le plus réduit (0.760-0.955). Les autres critères ont des performances qui sont tout à fait comparables entre elles, mais qui sont nettement inférieures au critère de Nash.

. Ecart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés.

Critère	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Rang					
1	1	-	4	6	4
2	2	5	3	2	3
3	6	3	2	-	4
4	3	5	3	4	-
5	3	2	3	3	4
Valeur mini	0.016	0.007	0.021	0.003	0.001
Valeur maxi	0.134	0.699	0.183	0.123	0.203

Tableau 3.1.8 : Fréquences absolues des classements des critères pour les écarts sur les coefficients d'autocorrélation.

Les critères CREC et Fortin semblent assez peu performants en matière d'autocorrélation. Il est, par contre, assez difficile de séparer les trois autres. On notera simplement que le critère de Nash présente l'intervalle de variation le plus réduit. Les performances de ces trois critères sont assez bonnes en ce qui concerne la prise en compte de la dynamique des hydrogrammes.

. Bilan1 et Bilan2.

$$\text{Bilan1} = \left| \sum_{i=1}^n (\text{Lo-Lc}) \right|$$

Critère	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SEXP <small>ER</small>
Rang					
1	-	-	11	4	-
2	1	-	1	10	3
3	3	8	3	-	1
4	7	6	-	1	1
5	4	1	-	-	10
Valeur mini	20.2	18.8	0.1	6.1	70.1
Valeur maxi	792.7	729.0	723.7	138.7	692.2

Tableau 3.1.9 : Fréquences absolues des classements des critères pour Bilan1

CREC*Bi* et Nash apparaissent très nettement comme les deux critères respectant le mieux le volume écoulé, en admettant, au besoin, des compensations d'un pas de temps sur l'autre. Une fois encore, c'est Nash, qui s'il n'atteint pas, ponctuellement, le niveau de précision de CREC*Bi*, présente le plus petit intervalle de variation.

$$\text{Bilan2} = \sum_{i=1}^n |(L_o - L_c)|$$

Critère	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Rang					
1	1	4	1	11	-
2	3	4	3	-	3
3	6	2	2	1	4
4	3	4	2	3	3
5	2	1	7	-	5
Valeur mini	173.9	166.0	179.3	174.5	193.4
Valeur maxi	826.3	779.0	774.5	412.5	435.8

Tableau 3.1.10 : Fréquences absolues des classements des critères pour Bilan2.

Une fois encore, le critère de Nash s'impose nettement. C'est celui grâce auquel le tracé calculé suit le mieux le tracé observé. C'est, en effet, avec ce critère que, 11 fois sur 15, la somme des écarts absolus entre valeurs observées et calculées est la plus faible. L'association avec Bilan1 indique également qu'il y a moins de compensations numériques que pour les autres critères. La qualité du calage obtenu avec le critère de Nash est donc meilleure que celle des autres critères numériques utilisés.

. IRVC

Critère	CREC	Fortin	Crec <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Rang					
1	-	-	2	13	-
2	4	5	2	1	4
3	4	4	4	1	1
4	3	5	3	-	4
5	4	1	4	-	6
Valeur mini	19.6	24.7	12.6	14.6	25.7
Valeur maxi	154.7	144.1	142.9	48.6	119.2

Tableau 3.1.11 : Fréquences absolues des classements des critères pour l'IRVC.

Au regard de l'Indice de Reconstitution du Volume de Crue, le critère de Nash fait état d'une certaine supériorité. Il n'atteint jamais de valeurs très élevées et devance très nettement les autres critères. Le calage à l'aide de cette fonction semble donc permettre une meilleure prise en compte de la lame de crue.

3.1.4. Conclusions.

Au terme de cette étude détaillée de cinq critères numériques de calage, le critère de Nash apparaît comme étant le plus performant au regard des objectifs fixés au départ.

En effet, la prise en compte de ces objectifs au niveau du module d'évaluation comparative, a conduit à retenir cinq critères numériques d'évaluation qui ont servi à classer les critères de calages étudiés.

Cette étude, menée sur cinq périodes distinctes et à l'aide de trois modèles globaux, permet de donner l'avantage au critère de Nash. En effet, l'utilisation d'une méthodologie calquée sur celle de Diskin et Simon, mais utilisant comme éléments de classements des critères d'appréciation de la qualité de l'hydrogramme calculé plutôt que les critères de calages eux-mêmes, autorise le choix du critère de Nash en tant que meilleur critère de calage.

En conséquence, dans la suite de ce document, l'ensemble des calages automatiques effectués utiliseront le critère de Nash comme critère de calage.

3.2. Calage des modèles.

Le critère numérique de calage ayant été sélectionné (critère de Nash), nous avons procédé au calage des trois modèles retenus (CREC, GR3, et MODGLO) sur l'ensemble des stations années disponibles.

Nous détaillerons donc, dans un premier point, la méthodologie de calage employée. Elle est commune aux trois modèles et utilise les méthodes d'optimisation non linéaire de Rosenbrock et Nelder et Mead associées. Les trois points suivants présentent les calages effectués pour chaque modèle retenu : CREC, GR3 et MODGLO.

3.2.1. Méthodologie de calage.

Afin de détailler cette méthodologie de calage, nous présenterons, tout d'abord, les méthodes d'optimisation non linéaire utilisées puis leur application pour le calage des trois modèles retenus.

3.2.1.1. Les méthodes d'optimisation.

Les puissants moyens de calculs offerts par le développement de l'informatique sont à la base de l'intérêt suscité par les méthodes de programmation mathématique. Parmi celles-ci, les techniques d'optimisation, développées dans le cadre de la programmation non linéaire, occupent une place importante.

Le plus souvent, pour un problème donné, il n'existe pas de solution simple ou triviale, pas d'équation explicite permettant de résoudre rapidement ce problème. Dans ces conditions, procéder à une optimisation revient à choisir la meilleure (ou la moins mauvaise) des solutions potentielles. Pour parvenir à ce choix, on utilise des techniques d'optimisation associées, le plus souvent, à un critère numérique (dans notre cas, le critère de Nash a été retenu). Ces techniques d'optimisation permettent, par un processus du type "essai-erreur", de se diriger vers la solution considérée comme optimale (au sens du critère utilisé). On peut noter, à ce niveau, l'importance du choix du critère.

Nous présenterons ici deux méthodes d'optimisation non linéaire très couramment utilisées et dont l'emploi sur micro-ordinateur ne présente aucune difficulté. Il s'agit des algorithmes développés par Rosenbrock (1960) et Nelder et Mead (1964).

Ces deux méthodes, ne nécessitent pas le calcul des dérivées de la fonction à optimiser. Dans ce cas, on parle de méthode de recherche directe, conduisant à la solution par les seules évaluations successives de la fonction critère.

En général, les méthodes basées sur le calcul des dérivées convergent plus rapidement vers la solution que les méthodes de recherche directe lorsqu'il s'agit de résoudre un problème d'optimisation non linéaire. On se heurte cependant à deux difficultés principales lorsque l'on est amené à les utiliser :

- . Dès que le nombre de variables considérées est un tant soit peu important, il devient extrêmement difficile d'écrire les dérivées du premier ou du deuxième ordre sous une forme analytique. Le recours éventuel à des schémas aux différences finies introduit généralement une erreur numérique qui ne plaide pas en faveur de telles substitutions, notamment au voisinage de l'extremum.

- . Les techniques d'optimisation basées sur l'évaluation des dérivées premières et éventuellement secondes nécessitent de la part de l'utilisateur, un travail préparatoire beaucoup plus important que dans le cas des méthodes de recherche directe.

Du fait de ces difficultés, de nombreux algorithmes d'optimisation par recherche directe ont été élaborés qui, bien que plus lents dans le cas de problèmes simples, peuvent se révéler très satisfaisants, en pratique, pour l'utilisateur.

Nous ne présenterons pas ici le détail des opérations effectuées pour chaque algorithme qui a déjà fait l'objet de nombreuses publications (Rosenbrock (1960), Nelder et Mead (1964), Guilbot (1971), Himmelblau (1972), Servat et Dezetter (1988)). Nous rappellerons simplement le principe de chacune des deux méthodes d'optimisation.

Pour une fonction à n variables, dont on cherche le minimum, on se place dans un espace à n dimensions. Dans notre cas, les n variables sont les paramètres du modèle pluie-débit et la fonction à minimiser est la fonction critère (critère de Nash ici). Notons que cette fonction critère est bien non linéaire et que le calcul de la dérivée première de cette fonction par rapport à un des paramètres du modèle (considéré comme variable de la fonction) n'est pas simple et n'autorise pas l'utilisation d'une méthode d'optimisation basée sur le calcul des dérivées. En effet, chaque valeur de débit calculé dépend d'un certain nombre d'équations de production et de transfert propres au modèle et la fonction critère est la combinaison non linéaire de $i=1$ à n (nombre de valeurs de débit observé) de ces débits calculés.

Si par exemple, nous prenons le cas d'une fonction critère pour un modèle à deux paramètres. On se place dans un espace à deux dimensions, un plan donc. Dans ce plan, on peut tracer les courbes d'isovaleurs de la fonction critère. On obtient ainsi une surface "topographique" représentant le critère utilisé. Le but des méthodes d'optimisation est de se déplacer sur cette surface topographique pour atteindre le plus rapidement possible le point le plus bas (celui où la valeur de la fonction critère est la moins forte).

En essayant d'imaginer cette surface, on peut facilement admettre que dans certains cas on aboutira dans des cuvettes (des minima locaux) desquelles il faut sortir pour atteindre le vrai minimum. On peut ainsi concevoir qu'il existe, en pratique, de nombreux pièges rendant tortueux le cheminement de l'algorithme de recherche.

Cet exemple concerne un modèle à deux paramètres ce qui est peu fréquent. En essayant de transposer cet exemple dans un espace à cinq, dix voire quinze dimensions, on se rend bien compte de la

complexité du problème. Les méthodes d'optimisation employées doivent donc être capables de déjouer tous les pièges rencontrés afin d'atteindre le plus rapidement possible l'optimum.

Nous allons tout d'abord examiner les principes de la méthode proposée par Nelder et Mead (1964). Cette méthode s'est révélée particulièrement efficace et simple à programmer.

La méthode proposée est basée sur un algorithme antérieur, la méthode du simplexe de Spendley, Hext, et Himsworth (1962). Un simplexe est un polyèdre régulier dans l'espace à n dimensions E^n . Par exemple, dans un espace à deux dimensions, un simplexe régulier est un triangle équilatéral; dans un espace à trois dimensions un simplexe est un tétraèdre régulier ; etc...

Dans le cas de la recherche du minimum d'une fonction critère $f(x)$, on peut sélectionner des jeux de valeurs de x en des points de E^n situés aux sommets du simplexe. A partir de la géométrie analytique, on peut montrer que les coordonnées des sommets d'un simplexe régulier composent une matrice D , dans laquelle les colonnes représentent les composantes des sommets (numérotés de 1 à $n+1$), et les lignes les coordonnées (de $i=1$ à n).

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_1 & d_2 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_1 \end{bmatrix} \quad \text{matrice } n * (n+1)$$

avec :

$$d_1 = \frac{t}{n\sqrt{2}} [\sqrt{n+1} + n - 1]$$

$$d_2 = \frac{t}{n\sqrt{2}} [\sqrt{n+1} - 1]$$

t : distance entre deux sommets

Par exemple, dans le cas où $n=2$ et $t=1$, le triangle a les coordonnées suivantes :

	sommet		
	1	2	3
x_1	0	0.965	0.259
x_2	0	0.259	0.965

La fonction critère peut être évaluée en chacun des sommets du simplexe. On peut alors faire une projection du point présentant la valeur la plus élevée passant par le barycentre des autres sommets. Ce point est alors supprimé, et un nouveau simplexe, obtenu par "réflexion", peut être constitué à partir des anciens points restants et du nouveau point projeté. L'utilisation de cette procédure, à savoir l'élimination systématique du sommet présentant la valeur la plus élevée de la fonction critère, et de quelques règles permettant de réduire la taille du simplexe et de l'empêcher de se boucler sur lui même au voisinage de l'extremum, permettent une recherche directe à pas fixe mais à direction variable.

La figure 3.2.1 présente les simplex successifs formés dans un espace à 2 dimensions dans le cas d'une fonction critère simple.

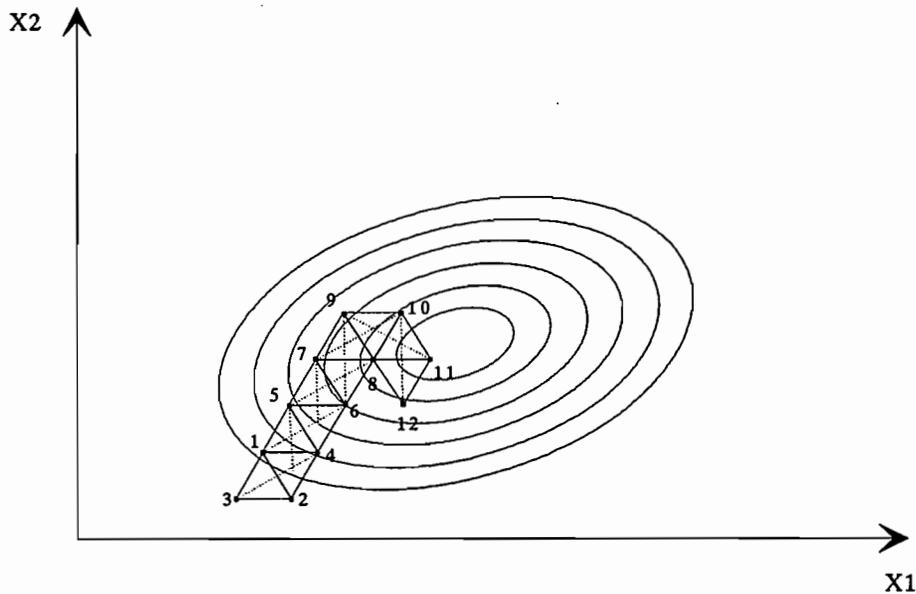


Figure 3.2.1 : Séquence de simplex réguliers obtenus en minimisant $f(x)$.

Certaines difficultés pratiques, liées au fait qu'il n'y ait pas d'accélération possible de la recherche, et aux problèmes rencontrés par la méthode pour certaines formes de vallées ou de crêtes présentées par l'hypersurface correspondant à la fonction critère, ont conduit à concevoir différentes améliorations.

Dans le cas de la méthode de Nelder et Mead le simplex peut avoir sa forme modifiée (en vertu de quoi il faudrait, d'ailleurs, ne plus parler de simplex). Si le principe général de la méthode est identique à celui que nous venons de voir, l'idée nouvelle est l'adaptation du simplex au problème local par accroissement ou contraction selon que l'on se rapproche ou non du minimum.

L'objectif est toujours de minimiser une fonction de n variables indépendantes en utilisant les $(n+1)$ sommets d'un polyèdre d'un espace à n dimensions (E^n). Chaque sommet peut être défini par un vecteur x correspondant à un jeu de paramètres. Celui qui présente la plus forte valeur de $f(x)$ est projeté selon une direction passant par le barycentre des sommets restants. L'amélioration (la diminution) de la fonction critère est obtenue en remplaçant ainsi successivement le point présentant la valeur la plus élevée de $f(x)$ jusqu'à ce que le minimum soit atteint.

Il existe trois possibilités de modifier la forme du simplex ; l'extension, la contraction et la réduction.

L'**extension** se produit lorsque le nouveau sommet obtenu par réflexion par rapport au barycentre donne une valeur de critère inférieure à celles de tous les autres sommets. Dans ce cas, on recalcule un nouveau sommet en augmentant le pas de projection dans la direction qui a permis d'atteindre ce nouveau minimum.

La **contraction** se produit lorsque la valeur du critère obtenue pour le nouveau sommet n'est pas la valeur minimale. On calcule un nouveau sommet en diminuant le pas de projection dans la direction concernée.

La réduction, qui consiste en la diminution de la taille du simplex, se produit lorsque la valeur du critère obtenue après contraction est supérieure à toutes les valeurs des critères calculées pour chacun des sommets.

Les modifications que l'on peut ainsi apporter à la taille et à la forme du polyèdre lui permettent de s'adapter à des hypersurfaces complexes aux formes variées.

Examinons maintenant les principes régissant l'algorithme proposé par Rosenbrock (1960). Partant d'un point donné, cette méthode de recherche directe procède par recherches unidimensionnelles successives le long d'un jeu de n directions orthonormées dans l'espace E^n des paramètres à optimiser. Au départ du processus d'optimisation, les n directions orthonormées sont habituellement choisies parallèles aux axes des paramètres X_1, X_2, \dots, X_n .

Partant d'un point donné, la recherche débute en introduisant une modification d'un pas Δx_1 dans la première direction correspondant à l'axe du premier paramètre. Si la valeur de la fonction critère à ce nouveau point est égale ou inférieure à la valeur au point précédent (qui diffère du nouveau par sa seule coordonnée sur le premier axe), on a affaire à un succès et ce nouveau point remplace le précédent. Le pas Δx_1 est alors multiplié par un facteur α positif et on passe à la direction n°2. Si la valeur du critère n'est pas inférieure ou égale à celle au point précédent, on a affaire à un échec, le premier point n'est pas remplacé et le pas de recherche Δx_1 est multiplié par un facteur β négatif. On passe ensuite à la direction n°2 avec son pas Δx_2 . De manière générale, Rosenbrock recommande l'utilisation de $\alpha = 3$ et $\beta = -0.5$. Cela signifie que lorsque l'on se déplace dans la bonne direction sur un axe, le pas de recherche est multiplié par 3 dans la même direction ($\alpha > 0$) et lorsque l'on se déplace dans la mauvaise direction (échec) le pas de recherche est divisé par deux dans la direction opposée ($\beta < 0$).

Après que chacune des n directions ait été modifiée et que chaque pas Δx_i ait été multiplié par α ou β , la première direction est à nouveau modifiée. On continue ce processus jusqu'à ce que l'on ait enregistré un succès suivi d'un échec dans chacune des n directions. Une fois cette condition satisfaite, la première étape est terminée et on peut alors changer de système d'axes.

Le point "d'arrivée", celui où la valeur du critère est la plus faible depuis le début du processus, sert à définir le premier axe du nouveau système d'axe. En effet, on choisit, comme premier axe, un axe parallèle à la direction représentée par les deux points : point de "départ", point "d'arrivée". Les autres axes sont orthonormés entre eux et par rapport à ce premier axe. Le point d'arrivée de la première étape est alors le point de départ de la nouvelle étape. On répète le processus décrit pour la première étape jusqu'à ce qu'on enregistre à nouveau un succès suivi d'un échec sur chaque axe.

L'arrêt de la méthode peut être envisagé au-delà d'un nombre donné d'étapes de recherche (d'itérations) ou lorsque les variations de la fonction critère restent inférieures à une valeur donnée.

C'est une version modifiée de cette méthode que nous avons utilisée. La modification est la suivante (Servat et Dezetter, 1988) : lorsque le nombre d'échecs successifs enregistrés est trop important (fixé arbitrairement ici à $5 \times (\text{nombre de paramètres})$) on se replace alors au début de l'algorithme. Cela a pour conséquence de reprendre un système d'axes qui corresponde à celui des paramètres mais cela permet aussi de retrouver les pas de recherche Δx initiaux. Une succession d'échecs entraîne en effet une forte réduction du pas de recherche qui gêne les possibilités de progression de la méthode.

On dispose ainsi de deux méthodes d'optimisation non linéaire procédant par recherche directe. Ces deux méthodes sont bien adaptées au cas particulier de l'optimisation des paramètres des modèles pluie

débit, elles ont d'ailleurs été couramment utilisées dans ce domaine. Nous pouvons maintenant aborder l'application pratique de ces méthodes dans le cadre de notre étude.

3.2.1.2. Application pratique

Dans le cas étudié ici, nous disposons de 20 bassins versants regroupant 91 stations-années. Après de nombreux essais de calages pour des périodes de deux à cinq années consécutives, les résultats obtenus étant de qualité médiocre, nous avons procédé à des calages annuels, soit 91 calages au total. Ce faisant, cela revient à considérer les années successives comme indépendantes les unes des autres. C'est souvent le cas dans la zone Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire car les bassins étudiés présentent très souvent des étiages secs et prolongés.

Une des particularités de l'optimisation des paramètres des modèles pluie-débit tient à leur domaine de définition. En effet, certains paramètres ne peuvent être négatifs, d'autres doivent absolument être compris entre 0 et 1, etc .. Sous peine d'aboutir à des aberrations (non respect du bilan par exemple, le modèle pourrait générer de l'écoulement si un coefficient de vidange d'un réservoir était supérieur à 1), on doit absolument respecter ces contraintes. On parle alors d'optimisation sous contraintes, ce qui revient, dans notre cas, à interdire l'accès à certaines zones de l'espace à n dimensions des paramètres.

La prise en compte de ces contraintes se fait par la définition, au départ du processus, d'un intervalle de variation pour chaque paramètre. Lorsque la méthode d'optimisation, au cours de son cheminement sur l'hypersurface, donne à l'un des paramètres une valeur "hors limite" (en dehors de l'intervalle de variation) on considère que l'on a affaire à un échec (la valeur du critère en ce point est arbitrairement fixée à une valeur très forte). Cela revient en fait à modifier l'hypersurface de la fonction critère, à la déformer de manière à créer des "murs" numériques infranchissables.

Au cours de nombreuses manipulations nécessaires à la mise au point des modules d'optimisation en Turbo-Pascal, ainsi qu'à leur application aux modèles retenus, on a pu s'apercevoir que la méthode de Rosenbrock était très efficace au début de la recherche, lorsqu'on part d'un point éloigné du point optimal, mais que par contre, au voisinage de l'optimum sa progression était de plus en plus lente. La méthode de Nelder et Mead, quant à elle, a un comportement inverse. Sa progression est plus lente loin de l'optimum que lorsqu'on s'en approche. Pour tenir compte de ces particularités, la méthodologie de calage suivante a été employée :

- a) utilisation de la méthode Rosenbrock
- b) utilisation de la méthode de Nelder et Mead
- c) répétition de la séquence a+b

Cette succession des deux méthodes permet une progression rapide. La méthode de Rosenbrock s'approche rapidement de l'optimum puis la méthode de Nelder et Mead utilise comme point de départ le point d'arrivée de la méthode précédente et affine le résultat. On recommence ensuite la succession de ces deux méthodes pour essayer d'éviter les minima locaux. En effet, la réutilisation de la méthode de Rosenbrock, emploie des pas de recherche Δx assez grands qui peuvent permettre de sortir d'une éventuelle "cuvette".

En pratique l'arrêt de l'optimisation se fait soit lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint soit lorsque les variations de la fonction critère deviennent insignifiantes. Pour l'utilisation de sa méthode, Rosenbrock recommande un nombre de 50 itérations par paramètre à optimiser. Nous avons repris ce

nombre d'itérations pour notre méthodologie de calage. Par exemple, pour l'optimisation d'un modèle à 5 paramètres on aura successivement : 250 itérations au plus par la méthode de Rosenbrock, 250 itérations au plus par la méthode de Nelder et Mead, et à nouveau la succession Rosenbrock, Nelder et Mead avec 250 itérations au plus chacune. Il va de soi que si le critère ne varie plus, la méthode d'optimisation s'arrête d'elle-même.

En résumé, la méthodologie de calage employée ici comprend plusieurs étapes :

- . choix des intervalles de variation des paramètres et du point de départ.
- . calage par optimisations successives à l'aide des méthodes de Rosenbrock et Nelder et Mead.

3.2.2. Calages du modèle CREC

Le modèle global CREC utilisé ici et présenté dans la 1ère partie est la version à 10 paramètres. Les conditions de l'optimisation sont présentées dans le tableau 3.2.1.

Paramètre	Borne inférieure	Borne supérieure	Valeur de départ
X1	0	1	0,2
X2	0,5	1	0,9
X3	0	1	0,01
X4	0	1	0,01
X5	1	200	10
X6	0	200	40
X7	1	200	20
X8	0	500	250
X9	0	10	7
X10	0,5	1	0,8

Tableau 3.2.1 : Conditions de l'optimisation du modèle CREC

Le modèle comporte 10 paramètres à optimiser, le nombre d'itérations maximum est donc de 500 pour chaque méthode utilisée selon la séquence précisée antérieurement.

On a procédé au calage automatique du modèle CREC sur l'ensemble des 91 stations-années disponibles. On ne peut pas donner ici l'ensemble des caractéristiques de chaque calage mais on a regroupé dans le tableau 3.2.2 les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum des principales caractéristiques des calages.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan 1	Bilan 2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne	0.9428	0.0943	0.1122	5.79	33.68	3.58	0.2042	0.8867
Ecart type	0.0589	0.1065	0.1070	7.06	25.01	3.78	0.1629	0.1026
Mini	0.5735	0.0012	0.0006	0.00	1.20	0.00	0.0195	0.3451
Maxi	0.9955	0.5236	0.5509	52.00	131.60	19.44	0.9361	0.9907

DAC1 : différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2 : différence d'autocorrélation d'ordre 2

Tableau 3.2.2 : Caractéristiques des calages du modèle CREC

Dans le tableau 3.2.2, les six premières caractéristiques (jusqu'à l'IRVC) sont calculées à partir des lames décadaires écoulées observées et calculées. Les deux dernières (Nash et Corrélation journalière) sont calculées à partir des débits journaliers observés et calculés. Le critère de Nash est le critère de calage qui doit idéalement tendre vers 0.

L'observation des valeurs du tableau 3.2.2. permet de se rendre compte de la qualité des calages obtenus à l'aide du modèle CREC. D'une manière générale, ces calages sont de bonne qualité. L'IRVC moyen vaut 3,58 et la valeur maximale ne dépasse pas 20. De même, le coefficient de corrélation des lames décadaires vaut en moyenne 0,94 tandis que la corrélation moyenne des débits journaliers est de 0,89. Ces valeurs montrent la bonne qualité des calages effectués. Sur l'ensemble des 91 stations-années calées, on observe très peu "d'échecs de calage". En effet, le modèle CREC semble s'adapter dans toutes les circonstances et arriver à reproduire plus ou moins fidèlement les hydrogrammes observés. Par exemple, la valeur maximale du critère de Nash (0,94) est observée pour le Solomougou à Ziebatago en 1983. Or pour cet individu la lame annuelle écoulee est de 14,3 mm et l'IRVC est de 4,23, soit une erreur de 4,23 % sur la reproduction de la lame de crue, elle aussi très faible, ce qui relativise cet échec. Quand on détaille l'observation de ces mauvais calages (critère de Nash élevé), on s'aperçoit que seulement 10 valeurs sur 91 sont supérieures à 0,4 soit 10,9 % des cas. La grande majorité de ces cas correspond à des années 1983 ou 1984 qui furent exceptionnellement sèches dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. A l'observation détaillée de l'ensemble des résultats de calage, on peut noter également que pour 31 cas sur 91, soit 34 % des cas, la valeur du critère de Nash est inférieure à 0,1, ce qui dénote un très bon calage.

Nous avons tracé, de manière systématique, les lames décadaires observées et calées à l'aide du modèle. Il n'est pas possible de les présenter toutes ici, mais on peut donner quelques exemples.

Les trois tracés présentés, figures 3.2.2, 3.2.3 et 3.2.4, concernent la valeur maximale du critère de Nash (le Solomougou à Ziebatago, 1983), une valeur moyenne (le Sien à Massadougou, 1981) et la valeur minimale (la Bagoé à Kouto, 1981).

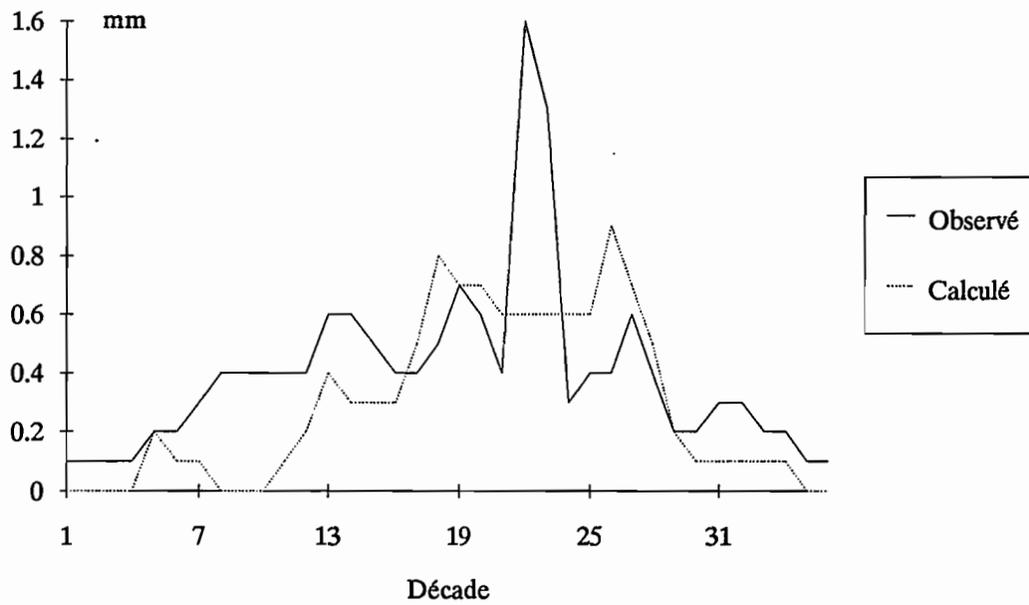


Figure 3.2.2 : Le Solomougou à Ziebatago, 1983

La figure 3.2.2 concerne le Solomougou à Ziebatago en 1983. Les caractéristiques de ce calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.5735	0.3397	0.5509	3.90	7.70	4.23	0.9361	0.3451

On est ici en présence du plus mauvais calage automatique réalisé avec le modèle CREC. L'observation du tracé et des valeurs caractéristiques permet de relativiser l'importance, en terme de qualité du modèle, de ce calage. En effet, on s'aperçoit que la lame décadaire maximale observée est de 1,6 mm et le modèle prévoit 1 mm. Les erreurs concernent des lames de hauteur insignifiante à rapprocher du caractère exceptionnellement sec de cette année 1983.

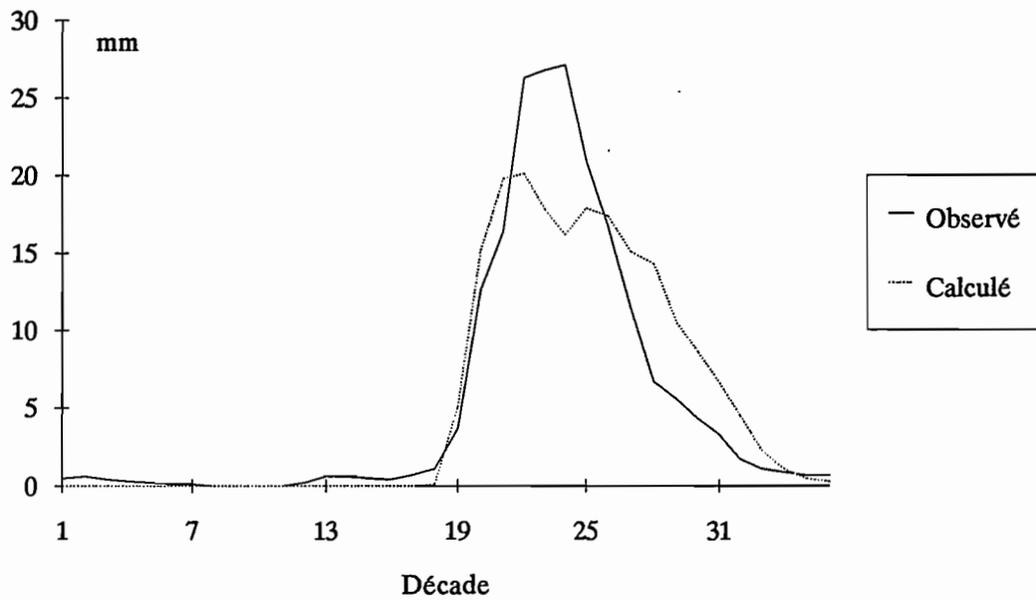


Figure 3.2.3 : Le Sien à Massadougou, 1981

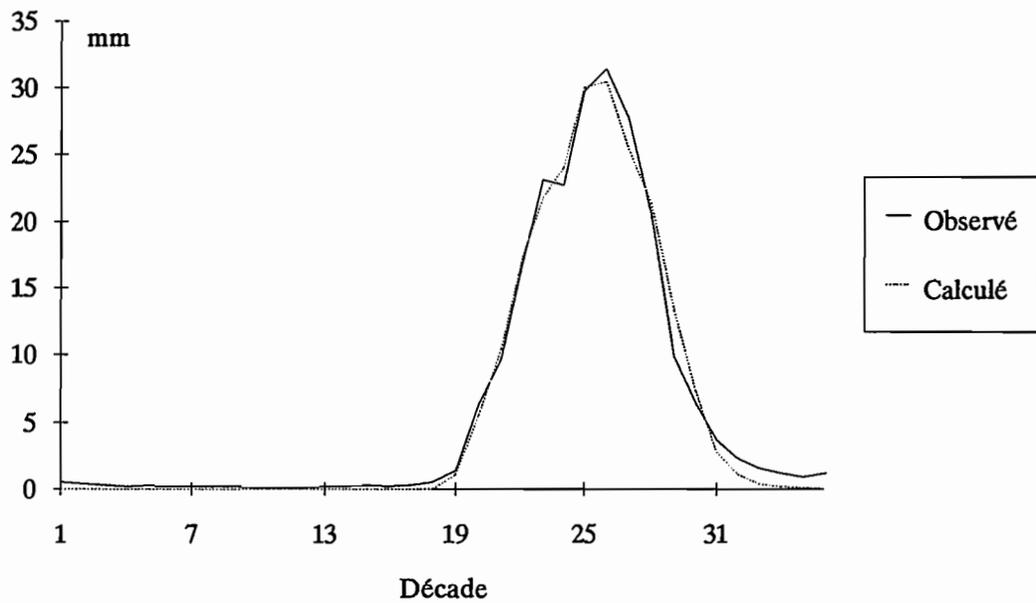


Figure 3.2.4 : La Bagoé à Kouto, 1981

La figure 3.2.3 concerne le Sien à Massadougou en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.9168	0.0100	0.0246	0.10	71.90	0.34	0.2049	0.8926

Le calage automatique du modèle CREC réalisé pour cette station-année est un calage qui se situe dans la moyenne des calages réalisés. En observant le tracé et les caractéristiques numériques, on s'aperçoit que l'IRVC est très bon, mais la valeur de Bilan2 est forte. En effet, en terme de Bilan, le volume écoulé entre les décades 19 et 30 est bien reproduit, par contre la répartition entre les décades est déficiente (visible sur le tracé et repéré numériquement par Bilan2).

La figure 3.2.4 concerne la Bagoé à Kouto en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.9955	0.0099	0.0191	8.60	24.40	1.07	0.0195	0.9907

On a ici affaire au meilleur calage automatique de la série, au sens du critère de Nash. L'observation des critères numériques et du tracé décadaire confirme cette bonne qualité de calage.

D'une manière générale, l'examen systématique de tous les tracés des débits observés et calés ne permet pas de dégager une tendance caractéristique du modèle. En effet, les courbes calées sont parfois au dessus, parfois au dessous des courbes observées sans qu'un comportement particulier puisse se dégager.

Le modèle CREC utilisé ici permet donc, grâce au calage automatique à l'aide du critère Nash, de reproduire, dans la grande majorité des cas, les hydrogrammes observés.

Une analyse plus détaillée des calages est présentée aux chapitres 3.3 et 3.4.

3.2.3. Calages du modèle GR3.

Le modèle GR utilisé est une version à 3 paramètres présentée dans la première partie du document. Deux autres valeurs ont été optimisées, le niveau initial du réservoir S_0 et le débit de la veille Q_0 . On a pris en compte ces valeurs dans les paramètres à optimiser car elles ne peuvent pas être connues pour l'ensemble des 91 stations-années. Ces valeurs n'ont cependant qu'une importance toute relative dans notre cas, car elle n'influent, au maximum, que sur les 10 premières valeurs de débit. Les conditions de l'optimisation sont présentées dans le tableau 3.2.3.

Paramètre	Borne inférieure	Borne supérieure	Valeur de départ
A	0	3000	750
B	0	3000	750
C	0	1.2	0.6
S_0	0	1	0.5
Q_0	0	1000	1

Tableau 3.2.3 : Conditions de l'optimisation du modèle GR3.

Compte tenu du nombre de paramètres à optimiser et selon les recommandations d'utilisation des méthodes d'optimisation, chaque méthode peut effectuer au plus 250 itérations.

Le calage par optimisation à l'aide du critère de Nash a été réalisé pour les 91 stations-années disponibles. Le tableau 3.2.4. regroupe la valeur moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum de valeurs caractéristiques des calages effectués.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan 1	Bilan 2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne	0.9194	0.0931	0.1347	9.84	40.64	5.57	0.2281	0.8729
Ecart type	0.0887	0.1052	0.1283	8.47	25.82	6.51	0.1717	0.1139
Mini	0.3463	0.0003	0.0009	0.10	1.70	0.00	0.0263	0.2297
Maxi	0.9941	0.5596	0.5868	39.90	110.70	41.52	1.0018	0.9878

DAC1 : différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2 : différence d'autocorrélation d'ordre 2

Tableau 3.2.4 : Caractéristiques des calages du modèle GR3.

L'examen des valeurs caractéristiques, calculées sur les lames décadaires et sur les débits journaliers observés et calculés, contenues dans le tableau 3.2.4. montre une bonne qualité d'ensemble des calages effectués à l'aide du modèle GR3.

Avec un IRVC moyen de 5.57, le modèle GR3, en dépit du nombre restreint de paramètres, arrive à s'adapter et à se caler correctement. Le critère de Nash moyen, pour l'ensemble des calages est de 0.228, signe d'un calage de bonne qualité. En examinant de plus près les valeurs du critère de calage pour l'ensemble des individus on note 12 valeurs du critère supérieures à 0.4, soit 13 % des valeurs mais on note également 25 valeurs inférieures à 0.1 soit 27,5 % des valeurs. Les fortes valeurs du critère de Nash, dénotant des mauvais calages, sont pour la grande majorité dues à des années exceptionnelles telles que 1983 et 1984. Ces mauvais calages ont lieu pour des années qui représentent donc de faibles volumes écoulés et qui ont généralement un coefficient d'écoulement très faible. Quel que soit l'individu (station-année) considéré, le calage automatique du modèle GR3 donne un résultat, de qualité variable, bonne en moyenne, mais on ne rencontre jamais d'échec de calage.

Le tracé des graphiques permettant la comparaison des hydrogrammes observés et des hydrogrammes calculés a été réalisé de manière systématique. L'examen de l'ensemble de ces graphiques ne permet pas de dégager un comportement spécifique du modèle GR3. On remarque nettement la bonne qualité des hydrogrammes calés. On peut également noter que la lame décadaire maximale calculée est rarement supérieure à la lame décadaire observée. Si une tendance devait être dégagée, elle serait plutôt dans le sens de la sous-estimation des pointes de crues mais ce comportement n'est pas systématique.

Les figures 3.2.5 ; 3.2.6 et 3.2.7 présentent trois exemples du tracé décadaire des calages du modèle GR3.

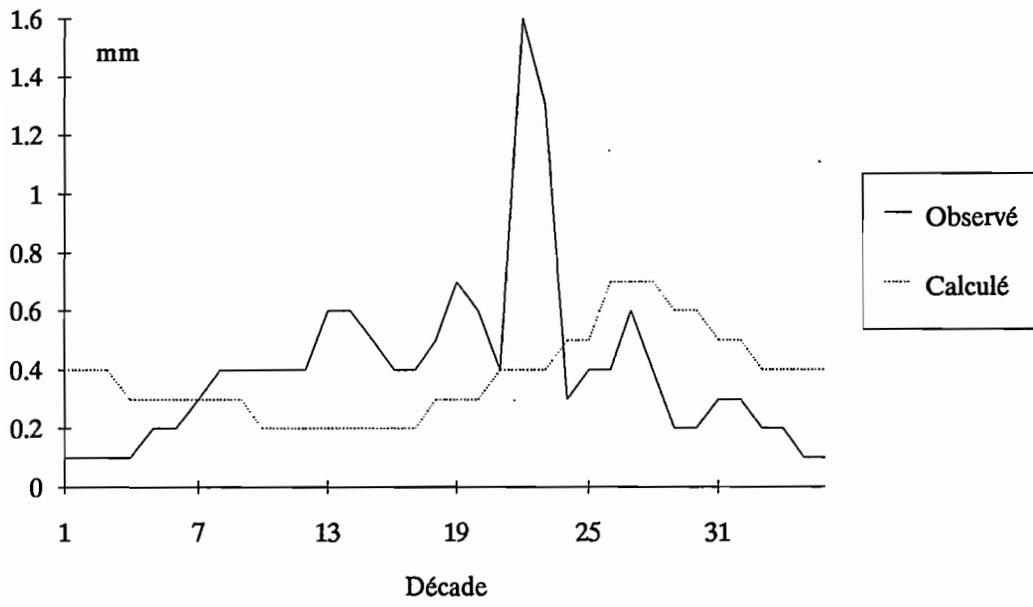


Figure 3.2.5 : Le Solomougou à Ziebatago, 1983

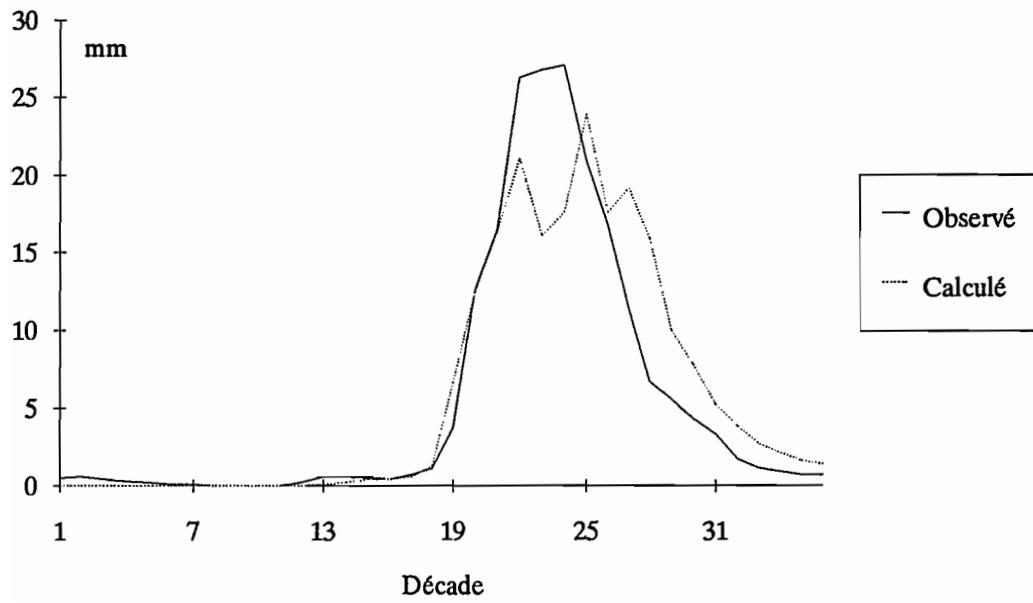


Figure 3.2.6 :Le Sien à Massadougou, 1981

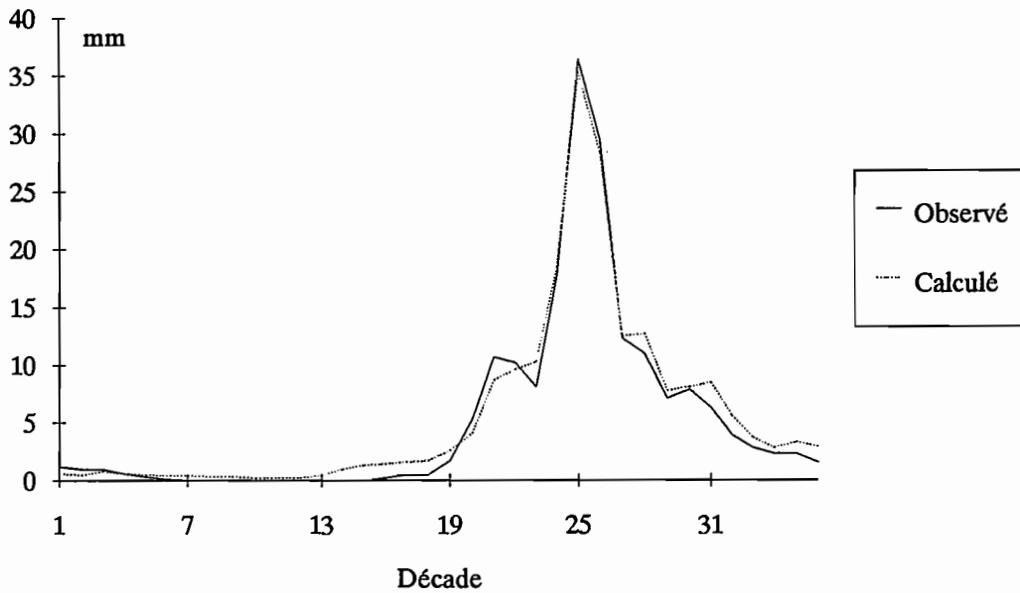


Figure 3.2.7 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980

La figure 3.2.5 concerne le Solomougou à Ziébatago en 1983, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.3463	0.3445	0.5868	1.90	8.50	11.27	1.0018	0.2297

Avec un critère de Nash de 1, ce calage est le plus mauvais de la série. L'examen des valeurs caractéristiques numériques ainsi que du tracé est sans appel. Il faut cependant noter que la lame maximale écoulée est de 1.6 mm, la lame annuelle vaut 14.3 mm pour une pluie annuelle de 876.8 mm soit un coefficient d'écoulement de 1.6 %. Ces valeurs exceptionnelles expliquent sans aucun doute la difficulté de calage du modèle.

La figure 3.2.6. concerne le Sien à Massadougou en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.9120	0.0032	0.0469	6.50	71.10	0.67	0.2456	0.8695

Avec un critère de calage de 0,25, ce calage se situe dans la moyenne de la série de calages effectués. L'observation des valeurs caractéristiques du calage montre un bonne qualité de l'hydrogramme calculé, seule la valeur de Bilan 2, assez forte, dénote un décalage entre les deux hydrogrammes.

L'IRVC de 0.67 indique que le volume écoulé entre les décades 19 et 30 est reproduit à 0.67 % près. En observant le tracé décadaire, on saisit facilement la raison de la valeur élevée de Bilan2. La pointe de crue est sous-estimée (16 environ au lieu de 27) alors que la décrue est sur-estimée. En terme de bilan

volumique sur l'ensemble de la saison des pluies, il y a compensation, mais le terme Bilan2, qui somme les écarts absolus décade par décade, repère correctement ce phénomène.

La figure 3.2.7. concerne le Banifing à Ziemougoula en 1980, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.9941	0.0130	0.0445	12.70	27.90	0.70	0.0263	0.9879

Avec un critère de Nash de 0.0263, ce calage est le meilleur de la série. L'ensemble des critères numériques viennent confirmer cette bonne qualité. L'IRVC vaut 0.70, il est du même ordre que pour la figure 3.2.5. mais la valeur de Bilan2 observée ici est beaucoup plus faible. L'observation du tracé décadaire montre une très bonne concordance des hydrogrammes observés et calculés. On note une légère surestimation des étiages dont la cause la plus probable est l'utilisation du critère de Nash (Cf. Chapitre 2.1.)

Globalement, le modèle GR3 utilisé en calage automatique à l'aide du critère de Nash, permet de reproduire correctement la grande majorité des hydrogrammes observés. Une analyse plus détaillée de ces calages est présentée aux chapitres 3.3. et 3.4.

3.2.4. Calages du modèle MODGLO.

Le modèle MODGLO utilisé ici comporte 14 paramètres optimisables, il est présenté au chapitre I.C.3.. Les conditions de l'optimisation sont regroupées dans le tableau 3.2.5.

Paramètre	Borne inférieure	Borne supérieure	Valeur de départ
AA	0	1	0.5
BB	0	1	0.5
XIN	0.1	50	25
SH	0	200	1
CRT	10	1000	500
DCRT	10	500	250
C1	0	0	0,5
C2	0	0	0,5
COEFQ1	0	1	0,5
COEFQ2	0	1	0,5
COEFQ3	0	1	0,5
SH1	0	1000	1
SH2	0	1000	1
SH3	0	1000	1

Tableau 3.2.5 : Conditions d'optimisation du modèle MODGLO.

Le calage par optimisation se fait selon la même méthodologie que pour les autres modèles. Chaque méthode de recherche, pouvant réaliser au plus 700 itérations (50*14).

Le calage automatique a été réalisé pour les 91 stations-années disponibles. On a regroupé dans le tableau 3.2.6. la valeur moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum des caractéristiques des calages. Ces valeurs n'ont pas été calculées sur l'ensemble des 91 stations-années traitées mais sur 80 stations-années. En effet, pour 11 stations-années, le calage par optimisation ne donne aucun résultat. Nous reviendrons plus en détails sur ces individus.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan 1	Bilan 2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne	0.9268	0.0688	0.1104	5.47	40.98	6.74	0.2351	0.8705
Ecart type	0.0693	0.0692	0.1060	7.46	23.97	9.90	0.1669	0.10
Mini	0.6701	0.0001	0.0004	0	8.90	0.07	0.0240	0.6087
Maxi	0.9938	0.3376	0.4447	42.3	107.5	47.40	0.6339	0.9880

DAC1 : différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2 : différence d'autocorrélation d'ordre 2

Tableau 3.2.6 : Caractéristiques des calages du modèle MODGLO.

Avec un IRVC moyen de 6.7 et un critère de Nash moyen de 0.2351, les calages effectués à l'aide du modèle MODGLO donnent des résultats de bonne qualité (à l'exception des 11 échecs de calages écartés à ce niveau). L'examen de l'ensemble des caractéristiques numériques des calages vient confirmer cette bonne qualité des calages.

L'examen plus détaillé des valeurs du critère de Nash montre que 15 valeurs sur 80 sont supérieures à 0.4 soit 18,7 % des valeurs et 19 sont inférieures à 0.1 soit 23,7 % des valeurs.

Le tracé des lames décadales observées et calculées a été réalisé de manière systématique pour les 80 calages effectifs. L'examen complet de ces tracés permet de rendre compte visuellement de la qualité des hydrogrammes calés. Il n'est pas possible de dégager une tendance générale quant au comportement du modèle MODGLO. Les courbes observées et calculées ont des allures similaires, les valeurs calculées sont tantôt inférieures, tantôt supérieures aux valeurs observées avec éventuellement une légère tendance à la sous estimation des pointes de crues.

Les figures 3.2.8. , 3.2.9. et 3.2.10. présentent trois exemples de tracé des lames décadales.

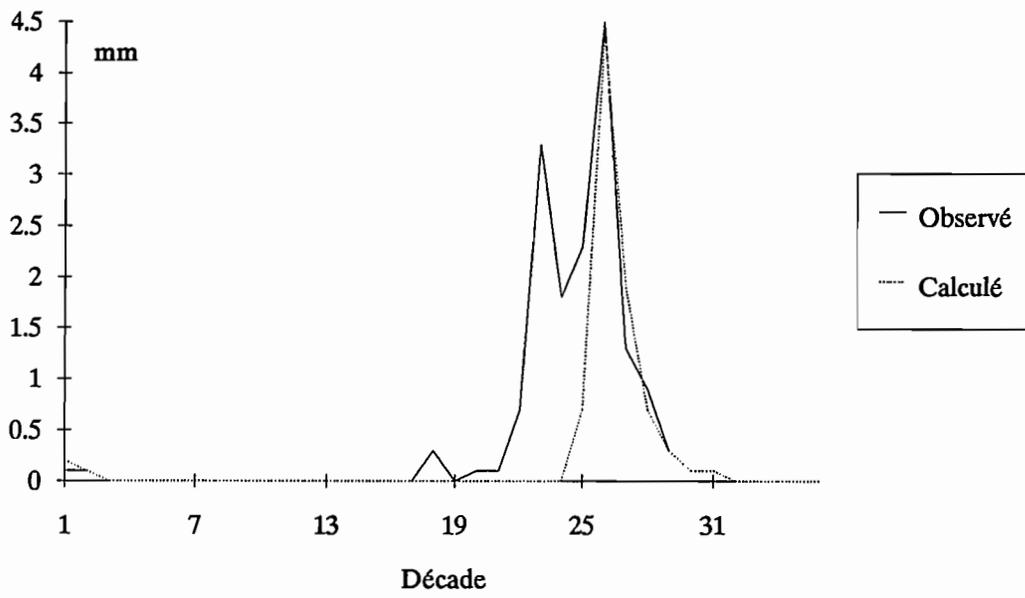


Figure 3.2.8 : Le Bandama à Seguekiele, 1983

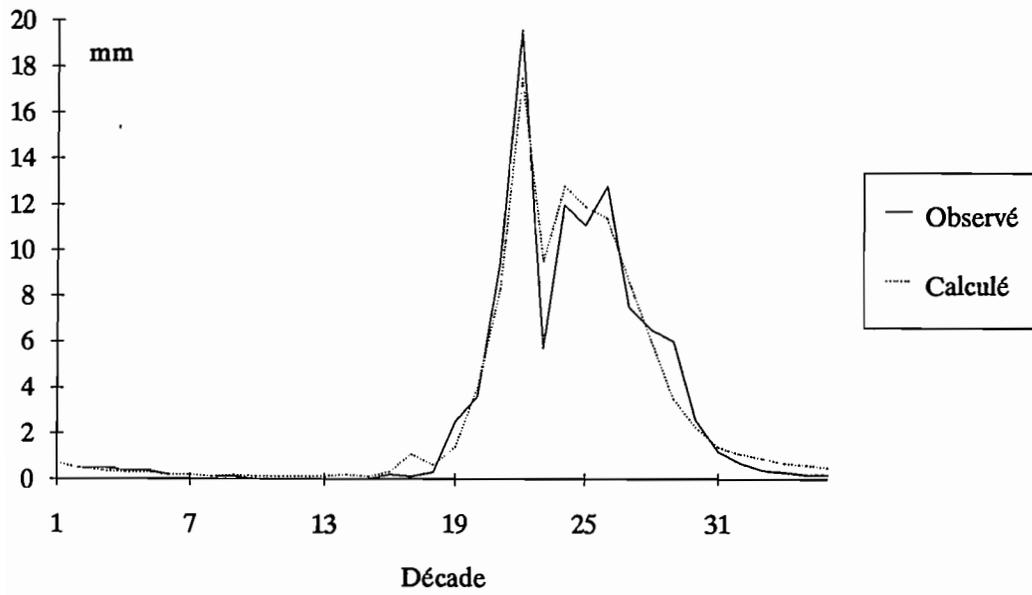


Figure 3.2.9 : Le Bandama à Seguekiele, 1981

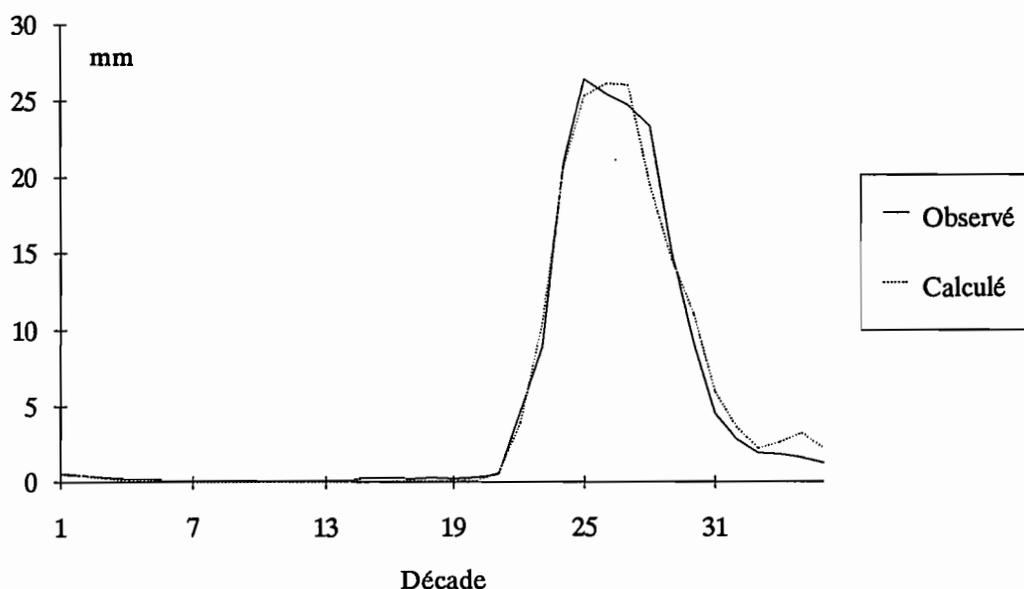


Figure 3.2.10 : La Bagoé à Kouto, 1971

La figure 3.2.8. concerne le Bandama à Seguekiele en 1983 : les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.7421	0.1431	0.3559	7.5	8.90	47.40	0.6339	0.6319

Ce calage est le plus mauvais de la série des 80 calages effectivement réalisés. On note qu'ici encore, ce phénomène se produit pour une année 1983. Le coefficient d'écoulement de cette année est de 1,8 %. L'hydrogramme calé ne reproduit pas du tout la montée de crue en début de saison des pluies, ce qui explique la forte valeur d'IRVC.

La figure 3.2.9. concerne le Bandama à Seguekiele en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.9779	0.1245	0.0852	1.90	20.70	2.21	0.2416	0.8710

Ce calage se situe dans la moyenne des calages réalisés. La valeur de l'IRVC est bonne et la valeur de Bilan2, un peu élevée, est explicable par le fait que les tracés observés et calculés se coupent plusieurs fois (l'erreur est assez forte pour les décades 22 et 29). L'examen du tracé montre bien les allures similaires des deux hydrogrammes.

La figure 3.2.10. concerne la Bagoé à Kouto en 1971, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
0.9938	0.0077	0.0158	2.90	20.10	0.75	0.240	0.9880

Ce calage est le meilleur (au sens du critère de Nash) de la série des 80 calages effectifs. Tous les critères numériques indiquent la bonne qualité de l'hydrogramme calé. La valeur de Bilan2 un peu élevée s'explique par la crue secondaire de l'hydrogramme calé, inexistante pour l'hydrogramme observé.

Si on exclue les 11 échecs de calage rencontrés, les calages réalisés à l'aide du modèle MODGLO permettent de reproduire correctement les hydrogrammes observés.

Cas particulier : 11 échecs de calage.

On a rassemblé sous l'appellation échec de calage, les stations-années pour lesquelles le calage automatique du modèle MODGLO n'a pas permis d'améliorer la fonction critère. Par un concours de circonstances, les méthodes d'optimisation sont restées bloquées dans un "piège numérique". Les valeurs de la fonction critère à l'issue du calage sont restées élevées (supérieures à 1) et les paramètres ont pris des valeurs qui ne sont que le reflet des artefacts numériques dus au blocage de la méthode d'optimisation. Ces cas particuliers sont au nombre de 11, soit 12 % des cas. Ces 11 cas particuliers sont les suivants :

- . Le Bou à Boron, 1983
- . Le Bou à Sirasso, 1983
- . Le Bandama à Rte de M'Bengue, 1983
- . Le Bandama à Rte de M'Bengue, 1984
- . Le Bandama à Seguekiele, 1984
- . Le Lokpoho à Namboukaha, 1983
- . Le Lokpoho à Namboukaha, 1984
- . Le Solomougou à Ziebatago, 1983
- . Le Yoreloro à Kategue, 1983
- . Le Yoreloro à Kategue, 1984
- . Le Yani à Madji, 1983

Ils concernent donc exclusivement des années exceptionnellement sèches dont le coefficient d'écoulement est toujours inférieur à 2,5 %. Il faut noter ici que dans les 80 stations-années calées sans échec on rencontre 25 années sèches (83 et 84) soit 31 %.

Afin de déterminer si les échecs de calage proviennent de l'incapacité du modèle à reproduire ces années sèches ou d'artefacts numériques, nous avons procédé au calage manuel de ces 11 cas particuliers. Le calage manuel a permis d'améliorer nettement les résultats et le jeu de paramètres ainsi défini a servi de **point de départ à une nouvelle optimisation**. Cette optimisation a permis à nouveau une légère amélioration des calages. Le tableau 3.2.7. donne les valeurs caractéristiques de ces calages définitifs.

Station-année	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Bou à Boron, 1983	0.8688	0.0461	0.1161	0.10	3.70	12.00	0.3449	0.8140
Bou à Sirasso, 1983	0.8589	0.4370	0.4027	4.90	12.50	5.81	0.5064	0.7150
Bandama à Rte de M'Bengue, 1983	0.9368	0.2526	0.1012	0.30	1.70	5.00	0.2334	0.8760
Bandama à Rte de M'Bengue, 1984	0.9766	0.1276	0.0248	0.10	1.10	5.56	0.1302	0.9311
Bandama à Seguekiele, 1984	0.9495	0.1546	0.1351	1.30	6.50	5.94	0.4893	0.7151
Lokpoho à Namboukaha, 1983	0.9301	0.4101	0.0522	0.80	4.20	4.76	0.4538	0.7393
Lokpoho à Namboukaha, 1984	0.7742	0.1775	0.2491	0.10	6.10	2.60	0.6060	0.6223
Solomougou à Ziebatago, 1983	0.3999	0.2715	0.4835	2.20	7.80	0.00	0.9501	0.2756
Yoreloro à Kategue, 1983	0.8728	0.2454	0.3366	0.80	8.40	0.00	0.5866	0.6299
Yoreloro à Kategue, 1984	0.8237	0.5071	0.2635	1.00	15.00	2.68	0.5872	0.6426
Yani à Madji, 1983	0.9518	0.0035	0.0621	1.80	6.00	6.28	0.1738	0.9097

DAC1 : différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2 : différence d'autocorrélation d'ordre 2

Tableau 3.2.7 : Caractéristiques des calages repris.

A l'aide d'un calage manuel, suivi d'une optimisation, on arrive donc à obtenir des hydrogrammes calés de qualité moyenne, pouvant parfaitement s'insérer dans la série des 80 calages effectués de manière entièrement automatique.

La figure 3.2.11. présente, à titre d'exemple, le tracé décadaire obtenu pour le Yani à Madji en 1983.

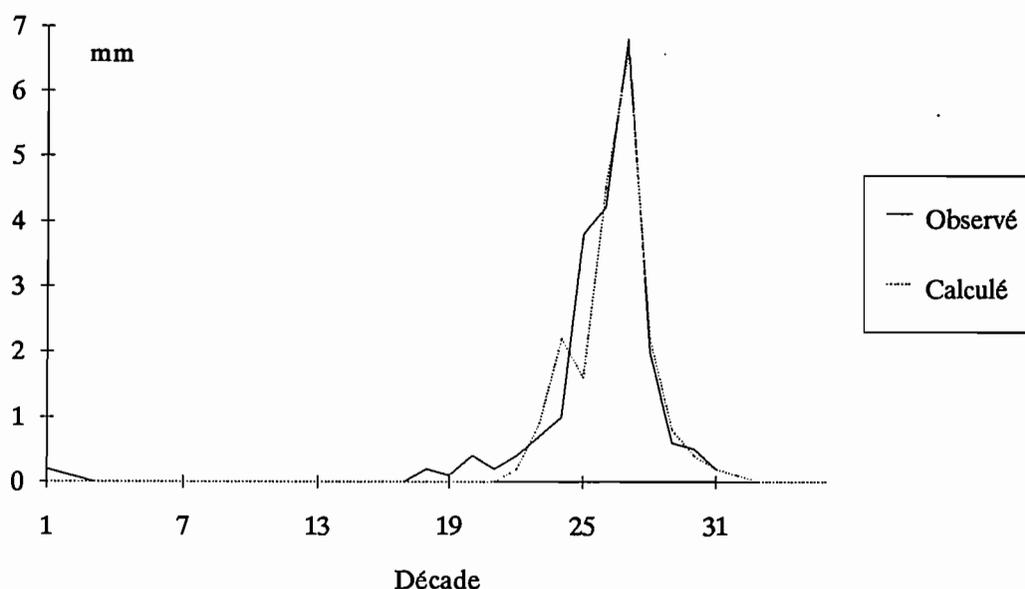


Figure 3.2.11 : Le Yani à Madji, 1983

3.2.5. Conclusions

Le comportement en phase de calage des trois modèles globaux retenus dans le cadre de nos travaux, est plutôt satisfaisant. Les hydrogrammes calés obtenus avec chacun des modèles sont de bonne qualité, la dynamique est généralement bien respectée. La faculté d'adaptation de ces modèles doit être soulignée. Les stations-années retenues présentent en effet de fortes variabilités, notamment en ce qui concerne le coefficient d'écoulement compris entre 0.5 % et 20 %.

Le nombre de paramètres du modèle ne semble pas intervenir sur la qualité du calage, puisque le critère de Nash moyen obtenu à l'issue des calages est de l'ordre de 0.2 quel que soit le modèle.

Il faut à ce niveau introduire une restriction en ce qui concerne le modèle MODGLO puisqu'il est le seul à présenter quelques cas d'échecs de calage. Ces échecs sont vraisemblablement dus à une surparamétrisation du modèle entraînant des artefacts numériques au niveau de la fonction critère qui gênent la progression des méthodes d'optimisation.

3.3. Validations croisées et Analyse des calages.

Ce chapitre va permettre dans un premier temps d'examiner pour chaque modèle les résultats des validations croisées. Dans un deuxième temps, on essaiera de caractériser les calages présentés au chapitre 3.2 en terme de production et de transfert. Chaque modèle utilisé identifie en effet, de manière plus ou moins tranchée, une partie fonction de production et une partie transfert.

3.3.1. Validations croisées.

3.3.1.1. Définitions et méthodologie.

Par définition, on appelle validation, le fait d'appliquer un jeu de paramètres calé à une série de données n'ayant pas servi au calage de ces paramètres. Cette validation a pour but de confirmer ou d'infirmer, la pertinence et la validité des paramètres issus du calage. On emploie ici le terme de validation croisée pour indiquer le caractère systématique des validations effectuées pour un bassin donné. L'exemple suivant va permettre de mieux expliquer le terme et la méthode de dépouillement des résultats employés.

Prenons par exemple, le bassin du Bou à Boron. La période disponible utilisée pour le calage s'étend de 1981 à 1985, soit cinq années de donnée. Pour ce bassin, on a effectué, pour un modèle donné, 5 calages annuels. On obtient donc 5 jeux de paramètres différents que l'on peut tester (valider) sur chacune des années disponibles. On a ainsi 5 jeux de paramètres à appliquer pour 5 années soit $5 \times 5 = 25$ exécutions du modèle concerné. On obtient ainsi pour chaque série de débits observés, 5 séries de débits calculés correspondant chacune à un jeu de paramètres. Parmi ces cinq séries, une correspond au calage. Pour

permettre la comparaison d'une série observée et d'une série calculée (issue de l'exécution d'un modèle donné utilisant un jeu de paramètres donné), on applique le module d'évaluation comparative. Au niveau de l'exploitation des validations croisées, nous n'avons retenu que trois valeurs caractéristiques, la corrélation décadaire, l'IRVC et le critère de Nash. Pour chacune de ces valeurs et pour un bassin et un modèle donné, on bâtit un tableau du même type que le tableau 3.3.1 qui reprend l'exemple du Bou à Boron pour le modèle CREC et le critère de Nash.

Calage	1981	1982	1983	1984	1985
Année de données					
1981	0.04	-1585	-774	-669	-899
1982	-1797	0.09	-333	-481	-472
1983	-4484	-330	0.22	-250	-3715
1984	-661	-131	-12	0.18	-177
1985	-7091	-3747	-10875	-8734	0.06

Tableau 3.3.1 :Bou à Boron, CREC, Critère de Nash.

Dans ce tableau, on trouve sur la diagonale les valeurs du critère de Nash pour les calages effectués. Le calage du Modèle CREC pour le bassin Bou à Boron en 1981 a donné lieu à une valeur du critère de Nash de 0.04. Dans les autres cases, on trouve le gain obtenu (ou la perte) en % lorsqu'on applique le jeu de paramètres calé sur une autre année à l'année citée en début de ligne. Par exemple, l'application du "calage 1982" à l'année de données 1981 donne une valeur de - 1585. L'application du jeu de paramètres de l'année 1982 à l'année 1981 conduit donc à une perte de 1585 % sur le critère de Nash. Ce pourcentage est calculé par référence au critère de Nash obtenu lors du calage pour l'année de donnée concernée. Pour notre exemple, on peut retrouver la valeur du critère de Nash obtenue par le calcul suivant :

$$100 * \frac{\text{Réf 81} - \text{Valeur}}{\text{Réf 81}} = -1585$$

soit

$$\text{Valeur} = \left(\frac{1585}{100} \text{Réf 81} + \text{Réf 81} \right)$$

$$\text{Valeur} = 1685 (0.04) = 0.674$$

Une valeur négative du tableau indique une perte, une valeur positive indique un gain.

Autre exemple pour le tableau 3.3.1 :

L'application du calage 1982 à l'année de données 1983 donne une valeur de -330. L'application de ce jeu de paramètres conduit donc à une perte de 330 %. L'hydrogramme calculé obtenu est de moins bonne qualité que l'hydrogramme calé. La valeur du critère de Nash obtenue dans ce cas est de $4.30 * 0.22 = 0.946$.

Le tableau 3.3.2 présente le même type de tableau pour le Bou à Boron, mais concerne le terme IRVC pour le modèle CREC.

Calage	1981	1982	1983	1984	1985
Données					
1981	0.82	-7300	-5354	-5039	-4924
1982	-3563	3.64	-1100	-1085	-993
1983	-5729	-1000	5.33	-75	-4253
1984	-1773	-300	23	6.94	-523
1985	-4087	-2663	-4287	-3997	4.66

Tableau 3.3.2 : Bou à Boron, CREC, IRVC.

L'observation du tableau 3.3.2 indique que le calage 1983 appliqué à l'année 1984 conduit à un gain de 23 %. La valeur d'IRVC correspondante est de $\frac{6.94}{1.23} = 5.64$. L'ensemble des autres validations conduit à une perte de qualité plus ou moins importante.

Nous avons effectués les validations croisées de manière systématique pour l'ensemble des 91 stations-années disponibles représentant 20 bassins versants. Le tableau 3.3.3 indique pour chacun des 20 bassins, le nombre d'années disponibles, l'abréviation du bassin utilisé pour les tableaux à suivre, et le nombre de validations correspondantes (incluant les calages).

Bassin	Nombre d'années	Abréviation	nombre de validation
Le Bou à Boron	5	B12	25
La Bagoé à Guingérini	3	BG2	9
Le Bou à Sirasso	3	B11	9
La Bagoé à Kouto	13	BK3	169
Le Badenou à Rte de M'Bengue	3	BM2	9
Le Bandama à Séguékiele	5	BS2	25
Le Banifing à Ziemougoula	5	BZ3	25
Le Douni à Pt 398	4	DO1	16
Le Doundian à Wahire	5	DW1	25
Le Kobani à Nimbrini	3	KN2	9
Le Lafigue à Rte de Badikaha	4	LA1	16
Le Lokpoho à Namboukaha	4	LN1	16
Le Mahandiabani à Wahire	2	MW1	4
Le Sien à Massadougou	6	SM1	36
Le Sien à Nafana Siensou	8	SN1	64
Le Solomougou à Ziebatago	4	SZ2	16
La Tiemba à Dioulatiedougou	3	TD3	9
La Tiemba à Lille	3	TL2	9
Le yoreloro à Kategue	4	YK3	16
Le Yani à Madji	4	YM1	16
Total	91		523

Tableau 3.3.3 : Liste des validations croisées des bassins.

3.3.1.2. Résultats.

En procédant aux validations croisées de manière systématique et en ne conservant que trois valeurs numériques caractéristiques (Corrélation décadaire, IRVC, Critère de Nash), on obtient, par modèle 60 tableaux de même type que le tableau 3.3.1. Il n'est pas possible de présenter ici l'ensemble des tableaux obtenus pour les trois modèles utilisés, l'intérêt en serait d'ailleurs très limité.

Un premier examen de l'ensemble des tableaux montre que dans la grande majorité des cas, on n'obtient pas de gain lors de l'application d'un jeu de paramètres calé pour une année à une autre année. Les pertes enregistrées peuvent parfois être importantes.

Pour chaque modèle, nous avons relevé les gains observés, l'importance de ce gain, et le bassin et les années concernées. Le tableau 3.3.4 concerne le modèle CREC, le tableau 3.3.5 le modèle GR3 et le tableau 3.3.6 le modèle MODGLO.

Bassin	Année de calage	Année de données	Critère	Gain %
B12	1983	1984	IRVC	23
BG2	1981	1982	Corrélation	0.09
BK3	1976	1969	Corrélation	0.78
BK3	1981	1975	Corrélation	0.03
BK3	1981	1982	Corrélation	0.11
BK3	1981	1983	Corrélation	0.17
BK3	1981	1985	Corrélation	0.34
BK3	1982	1975	Corrélation	0.03
BK3	1982	1985	Corrélation	0.21
BK3	1983	1982	Corrélation	0.01
BK3	1983	1984	Corrélation	0.05
BK3	1983	1985	Corrélation	0.43
BK3	1984	1982	Corrélation	0.27
BK3	1984	1985	Corrélation	0.3
BK3	1985	1974	Corrélation	0.29
BK3	1985	1982	Corrélation	0.3
BK3	1975	1984	IRVC	41
BS2	1984	1985	Corrélation	0.64
BS2	1983	1984	IRVC	79
DO1	1983	1985	IRVC	89
DW1	1984	1982	IRVC	8
LN1	1983	1985	IRVC	68
MW1	1983	1984	IRVC	7
SN1	1980	1978	Corrélation	0.2
SN1	1980	1983	Corrélation	0.23
SN1	1982	1979	Corrélation	0.92
SN1	1982	1981	Corrélation	0.21
SN1	1983	1979	Corrélation	5
SN1	1983	1981	Corrélation	0.96

SN1	1984	1979	IRVC	28
YK3	1983	1982	IRVC	87
YM1	1986	1980	Corrélation	0.31

Tableau 3.3.4 : Modèle CREC, Gains relevés lors des validations croisées.

Bassin	Année de calage	Année de données	Critère	Gain%
B12	1982	1985	Corrélation	0.37
B12	1984	1985	Corrélation	1.13
BG2	1981	1982	Corrélation	0.08
BG2	1981	1982	IRVC	36
BK3	1968	1973	Corrélation	4.75
BK3	1968	1975	Corrélation	0.46
BK3	1970	1976	Corrélation	0.46
BK3	1981	1982	Corrélation	0.11
BK3	1981	1985	Corrélation	0.42
BK3	1982	1973	Corrélation	0.66
BK3	1982	1985	Corrélation	0.29
BK3	1969	1983	IRVC	18
BK3	1973	1984	IRVC	62
BK3	1975	1973	IRVC	26
BK3	1975	1976	IRVC	80
BK3	1983	1984	IRVC	85
BK3	1984	1983	IRVC	78
BK3	1985	1969	IRVC	9
BK3	1985	1983	IRVC	44
BK3	1976	1969	Nash	0.89
BK3	1985	1969	Nash	6.83
BS2	1981	1984	Corrélation	1.14
BS2	1982	1985	Corrélation	0.07
BS2	1984	1981	Corrélation	0.26
BS2	1983	1984	IRVC	69
DO1	1985	1983	Corrélation	1.66
DW1	1982	1980	IRVC	93
DW1	1984	1983	IRVC	62
LA1	1981	1982	IRVC	13
LN1	1983	1985	Corrélation	3.8
LN1	1984	1985	Corrélation	3.23
LN1	1983	1985	IRVC	32
MW1	1984	1983	IRVC	6.41
SM1	1981	1986	IRVC	7.3
SN1	1977	1978	Corrélation	0.18
SN1	1979	1978	Corrélation	0.22
SN1	1981	1982	Corrélation	1.13
SN1	1983	1977	Corrélation	1.11

SN1	1983	1980	Corrélation	0.98
SN1	1977	1983	IRVC	82
SN1	1979	1981	IRVC	97
SN1	1980	1979	IRVC	81
SN1	1981	1979	IRVC	3.41
SN1	1981	1980	IRVC	51
SZ2	1983	1986	Corrélation	0.92
SZ2	1984	1983	Corrélation	45
SZ2	1984	1985	Corrélation	0.23
SZ2	1984	1986	Corrélation	3.05
SZ2	1985	1983	Corrélation	44
SZ2	1985	1984	Corrélation	0.12
SZ2	1985	1986	Corrélation	2.68
SZ2	1986	1983	Corrélation	44
SZ2	1984	1986	IRVC	42
TD3	1983	1984	Corrélation	0.24
TD3	1984	1983	Corrélation	0.46
TL2	1984	1983	Corrélation	0.19
TL2	1982	1983	IRVC	9.06
YK3	1982	1983	Corrélation	1.97
YK3	1984	1983	Corrélation	2.77
YK3	1984	1986	Corrélation	0.68
YK3	1986	1983	Corrélation	1.66
YK3	1986	1984	Corrélation	0.81
YK3	1983	1984	IRVC	71
YK3	1984	1986	IRVC	50
YM1	1980	1986	Corrélation	0.04
YM1	1980	1986	IRVC	63

Tableau 3.3.5 : Modèle GR3, Gains relevés lors des validations croisées.

Bassin	Année de calage	Année de données	Critère	Gain %
B12	1984	1985	Corrélation	0.65
BG2	1982	1981	IRVC	12
BK3	1971	1981	Corrélation	0.19
BK3	1975	1981	Corrélation	0.12
BK3	1981	1984	Corrélation	0.26
BK3	1982	1973	Corrélation	0.72
BK3	1983	1981	Corrélation	0.31
BK3	1984	1982	Corrélation	0.12
BK3	1984	1976	IRVC	57
BK3	1985	1960	IRVC	59
BS2	1981	1982	Corrélation	13.5
BS2	1981	1983	Corrélation	27
BS2	1984	1982	Corrélation	0.08

BS2	1984	1983	Corrélation	11.11
BS2	1985	1982	Corrélation	17.64
BS2	1985	1983	Corrélation	19.5
BS3	1979	1978	Nash	0.07
DW1	1982	1981	Corrélation	0.45
DW1	1982	1980	IRVC	49
LA1	1982	1984	Corrélation	4.84
LA1	1984	1982	Corrélation	0.09
LA1	1984	1983	Corrélation	6
LA1	1981	1982	IRVC	10
LA1	1982	1983	IRVC	33
LN1	1983	1985	Corrélation	0.94
LN1	1985	1987	Corrélation	0.72
MW1	1983	1984	Corrélation	1.16
SM1	1983	1981	Corrélation	0.54
SM1	1985	1981	Corrélation	0.27
SM1	1985	1983	Corrélation	1.23
SN1	1977	1982	Corrélation	1.48
SN1	1977	1983	Corrélation	25
SN1	1978	1982	Corrélation	0.5
SN1	1978	1983	Corrélation	24.15
SN1	1979	1982	Corrélation	1.72
SN1	1980	1982	Corrélation	1.56
SN1	1980	1983	Corrélation	26
SN1	1981	1983	Corrélation	21
SN1	1982	1983	Corrélation	22
SN1	1983	1979	Corrélation	0.44
SN1	1983	1981	Corrélation	3.66
SN1	1984	1982	Corrélation	0.21
SN1	1977	1983	IRVC	83
SN1	1978	1983	IRVC	46
SN1	1980	1983	IRVC	24
SN1	1981	1983	IRVC	99
SN1	1982	1984	IRVC	6.07
SN1	1983	1980	IRVC	26
SN1	1977	1983	Nash	37
SN1	1978	1983	Nash	25
SN1	1980	1983	Nash	24
SN1	1981	1983	Nash	34
SZ2	1983	1986	Corrélation	15
SZ2	1984	1983	Corrélation	22
SZ2	1984	1986	Corrélation	26
SZ2	1985	1983	Corrélation	18
SZ2	1985	1984	Corrélation	1.84
SZ2	1985	1986	Corrélation	27
SZ2	1983	1986	IRVC	33

SZ2	1984	1986	IRVC	88
SZ2	1985	1986	IRVC	10
SZ2	1983	1986	Nash	27
SZ2	1984	1986	Nash	42
YK3	1982	1983	Corrélation	1.1
YM1	1980	1986	Corrélation	0.18

Tableau 3.3.6 : Modèle MODGLO, Gains relevés lors des validations croisées.

L'examen des trois tableaux 3.3.4, 3.3.5 et 3.3.6 permet tout d'abord de faire quelques constatations :

. le nombre de gains enregistrés est effectivement très faible, voire exceptionnel. En effet, pour le modèle CREC, on observe 32 gains soit 2.5 % des cas, pour le modèle GR3 66 gains (5.1 %) et 65 pour le modèle MODGLO soit 5 % des cas.

. les gains observés sont souvent très faibles (< 10 %) et ne sont jamais observés pour les trois critères simultanément.

En observant ces tableaux de façon plus détaillée, on s'aperçoit que les gains les plus forts ont lieu les années pour lesquelles le calage était de mauvaise qualité (années 1983 ou 1984 en général). De plus, un gain observé sur un critère est rarement confirmé par un gain sur les autres critères. Par exemple, pour le modèle MODGLO (tableau 3.3.6), le calage 1985 de la Bagoé à Kouto donne un gain pour l'année 1969 de 59 % sur l'IRVC. Si l'on regarde les valeurs pour les autres critères, on a une perte de 0.57 % pour la corrélation et une perte de 28 % pour le critère de Nash.

D'autre part, si les gains enregistrés restent en général très faibles (<10 %, gain maximal observé : 99 %) les pertes, elles peuvent être très importantes. On observe fréquemment des valeurs de l'ordre de -30000 à -40000.

En conclusion, l'observation d'une amélioration de l'hydrogramme lors de la validation peut être considérée comme un fait marginal, exceptionnel, pouvant résulter aussi bien du simple hasard que de la pertinence des paramètres utilisés. On peut donc affirmer que les paramètres calés pour une station année sont spécifiques et caractéristiques de cette station année ce qui laisse à penser que le calage des modèles conceptuels utilisés est loin de n'être fonction que des seules caractéristiques physiques intrinsèques des bassins versants. Partant de cette constatation, on essaiera, dans le chapitre 3.4, de relier les paramètres aux caractéristiques climatologiques et physiographiques des stations-années et des bassins utilisés afin d'en dégager des règles générales relatives aux paramètres.

3.3.2. Analyse des calages.

Les trois modèles utilisés permettent de distinguer, de manière plus ou moins nette, une partie production et une partie transfert. Nous avons essayé ici de caractériser les calages effectués sous ces deux aspects, production et transfert.

3.3.2.1. Production.

La fonction de production des trois modèles utilisés a pour rôle essentiel, la répartition de la pluie entre le "réservoir sol" (ou assimilé) permettant de fournir l'ETR et la fonction de transfert qui fournit le débit à l'exutoire.

Un des moyens d'examiner un calage sous l'angle de la production serait d'analyser la valeur des paramètres de production. Compte tenu de la diversité de conception des modèles utilisés et surtout de la différence du nombre de paramètres, cette solution ne permettrait pas la comparaison entre les modèles. Il est en effet illusoire, voire dangereux, de vouloir comparer les valeurs de CRT (MODGLO), A (GR3) et X3, X4 (CREC). Les dimensions de chacun de ces paramètres et leurs ordres de grandeurs, liés à la formulation mathématique du modèle, ne permettent pas de comparaison sensée.

Nous avons cherché à caractériser le fonctionnement de cette fonction de production plutôt que ses paramètres. Pour cela, nous avons défini un certain nombre de variables destinées à caractériser la série chronologique de sortie de la fonction de production. Pour le modèle MODGLO, la fonction de production fournit un terme EAUG à chaque pas de temps. Ce terme est la sortie de la fonction de production et la seule entrée de la fonction de transfert. On peut, pour les modèles CREC et GR3 définir un terme analogue. Pour le modèle CREC, il s'agit de l'entrée du réservoir H et pour le modèle GR3 il s'agit du terme $k^2 P'$ (Cf figure 2.3.2) en amont de l'hydrogramme unitaire.

Nous avons essayé de caractériser la série chronologique "EAUG" à l'aide de six valeurs qui sont les suivantes :

EAUG_{an} : lame annuelle EAUG en mm = somme des termes EAUG sur toute l'année.

Egr(x) : Eaug relative (x), x = 6, 7, 8, 9 ou 10, avec, par exemple :

$$Egr_6 = \frac{\text{somme EAUG du début de l'année au 15/6}}{\text{EAUG}_{an}}$$

même définition au 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.

Cette série de lame relatives issues de la production permet de caractériser la répartition dans l'année de cette série EAUG.

En complément de ces variables nous avons calculé les mêmes types de variables pour la pluie et pour les lames écoulées. Ces variables sont les suivantes :

. Pluie annuelle

. Pluies relatives (Pr) au	15 juin (6)
	15 juillet (7)
	15 Août (8)
	15 Septembre (9)
	15 Octobre (10)

. lame annuelle

. Lames relatives (Lr) au
 15 Juin (6)
 15 juillet (7)
 15 Août (8)
 15 Septembre (9)
 15 Octobre (10)

Nous avons calculé ces variables descriptives pour l'ensemble des 91 stations-années et pour les trois modèles utilisés. Le tableau 3.3.7 rassemble les valeurs moyennes, écart type, minima et maxima des variables Egr, Pr et Lr.

	Moyenne	Ecart type	Mini	Maxi
Pr6	0.2621	0.0605	0.0979	0.4107
Pr7	0.4249	0.0715	0.228	0.5971
Pr8	0.6332	0.0567	0.4915	0.7828
Pr9	0.8539	0.0466	0.7281	0.956
Pr10	0.9472	0.0253	0.8739	0.9942
Pluie annuelle	1225.7	252.5	552.7	1827.4
Lr6	0.0340	0.0577	0.0000	0.3790
Lr7	0.0585	0.0829	0.0000	0.4910
Lr8	0.2195	0.1369	0.0000	0.7370
Lr9	0.6114	0.1303	0.1849	0.9012
Lr10	0.8978	0.0762	0.4026	0.9996
Lame annuelle	128.7	85.5	3.5	355.3
Egr6 CREC	0.0841	0.0604	0.0009	0.3225
Egr7 CREC	0.1621	0.1066	0.0054	0.5464
Egr8 CREC	0.3232	0.1368	0.0478	0.6877
Egr9 CREC	0.7191	0.1270	0.2751	0.9157
Egr10 CREC	0.9347	0.0495	0.6321	0.9948
Eaugan CREC	136.9	103.9	8.7	599.4
Egr6 GR3	0.0201	0.0232	0.0000	0.1166
Egr7 GR3	0.0728	0.0552	0.0061	0.2866
Egr8 GR3	0.2624	0.0986	0.0816	0.5635
Egr9 GR3	0.7220	0.1276	0.3983	0.9642
Egr10 GR3	0.9184	0.0575	0.7247	1.0000
Eaugan GR3	96.9	82.6	2.7	325.1
Egr6 MODGLO	0.0165	0.0408	0.0000	0.2086
Egr7 MODGLO	0.0538	0.1175	0.0000	0.7671
Egr8 MODGLO	0.1767	0.1578	0.0000	0.7671
Egr9 MODGLO	0.7097	0.2182	0.0000	1
Egr10 MODGLO	0.9566	0.0649	0.5156	1
Eaugan MODGLO	110.2	84.2	1.2	322

Tableau 3.3.7

Les valeurs concernant la pluie (Pr et Pluie annuelle) et les lames écoulées (Lr et Lame annuelle) sont caractéristiques de la station-année étudiée, les autres valeurs permettent de caractériser le fonctionnement de la production de chaque modèle.

L'examen du tableau 3.3.7 peut permettre, dans un premier temps de comparer les volumes annuels. On voit ainsi, que la lame moyenne écoulée est de 128.7 mm et que les lames annuelles produites pour les modèles sont de 136.9 mm (CREC), 96.9 mm (GR3) et 110.2 mm (MODGLO).

Ces trois valeurs moyennes sont assez proches de la lame annuelle écoulée. Cette proximité semble assez logique puisque nous avons vu que les calages étaient en général de bonne qualité. Si on examine les écarts types, les minima et les maxima, on s'aperçoit que le modèle CREC se distingue des deux autres modèles par un écart type plus élevé et un maxima également élevé de 599.4 mm. Ce maximum est observé pour le Bandama à Séguékiele en 1985, la lame annuelle écoulée observée est de 176 mm.

On peut noter, à l'examen des valeurs des lames relatives Lr6, 7, 8, 9, 10, une forte variabilité en début de saison des pluies (6, 7, 8) puisque le minimum reste à 0 et le maximum augmente de 0.38 à 0.74 (l'écart type augmentant simultanément). Cette forte variabilité observée est bien reproduite pour la fonction de production de chacun des modèles.

Quel que soit le modèle, les tendances observées au niveau des valeurs Egr6, 7, 8 sont les mêmes que pour les lames relatives. On note cependant une plus forte variabilité au niveau du modèle MODGLO. Cette plus forte variabilité n'est pas explicable simplement. On peut éventuellement évoquer la plus forte proportion de calages de "mauvaise" qualité.

Pour les trois modèles et pour les 91 stations-années, nous avons tracé les graphiques chronologiques de comparaison Pr, Lr et Egr. A titre d'exemple, les figures 3.3.1, 3.3.2 et 3.3.3 présentent trois de ces tracés. Il s'agit du Bou à Boron en 1981 pour les trois modèles.

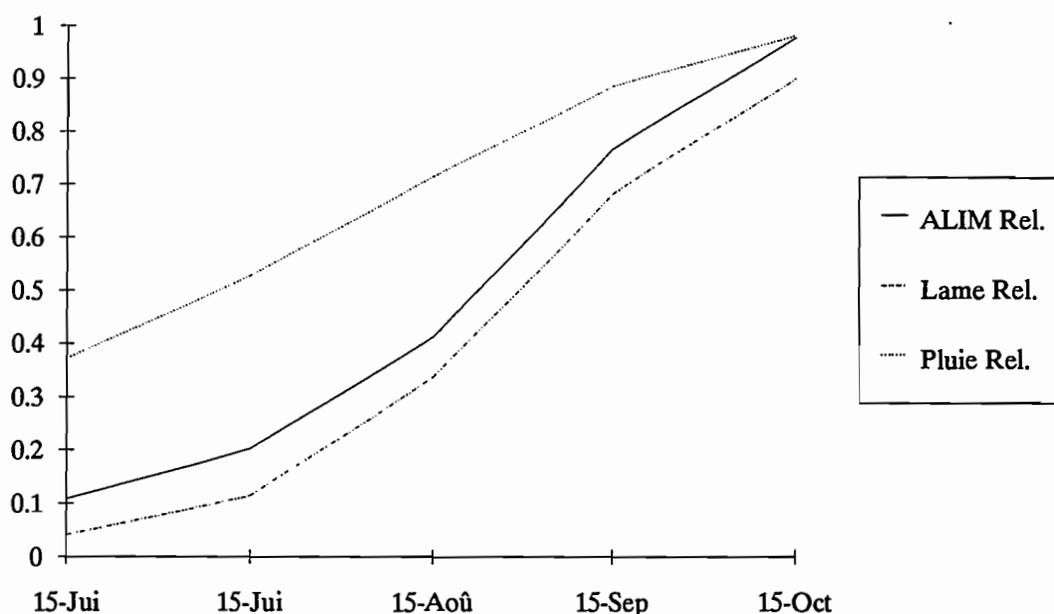


Figure 3.3.1 : Le Bou à Boron, 1981, Modèle CREC
(ALIM Rel. correspond à la variable EAUG Rel. (Egr))

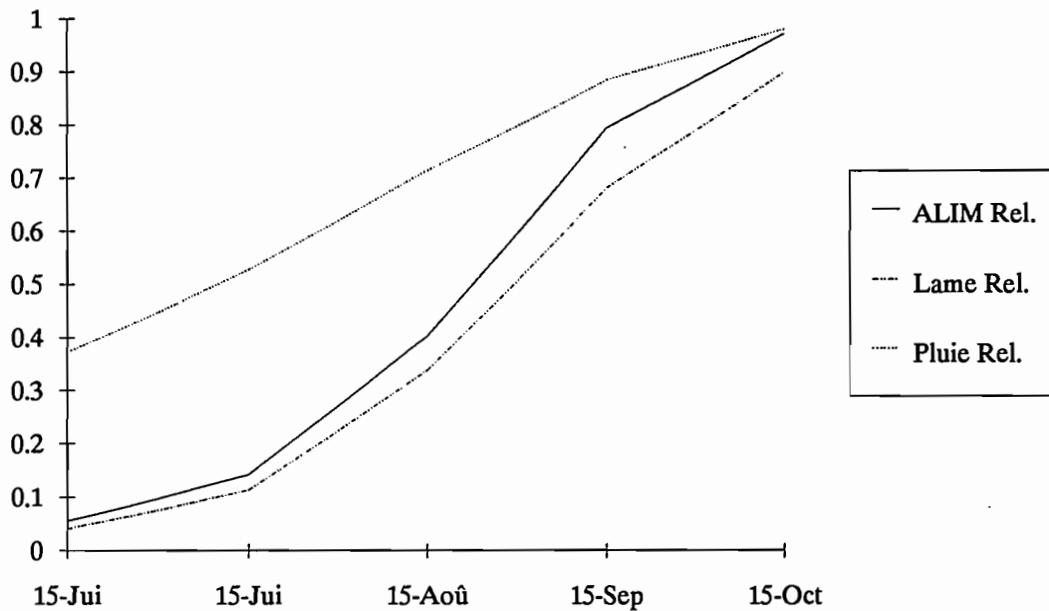


Figure 3.3.2 : Le Bou à Boron, 1981, Modèle GR3 (ALIM Rel. correspond à la variable EAUG Rel. (Egr))

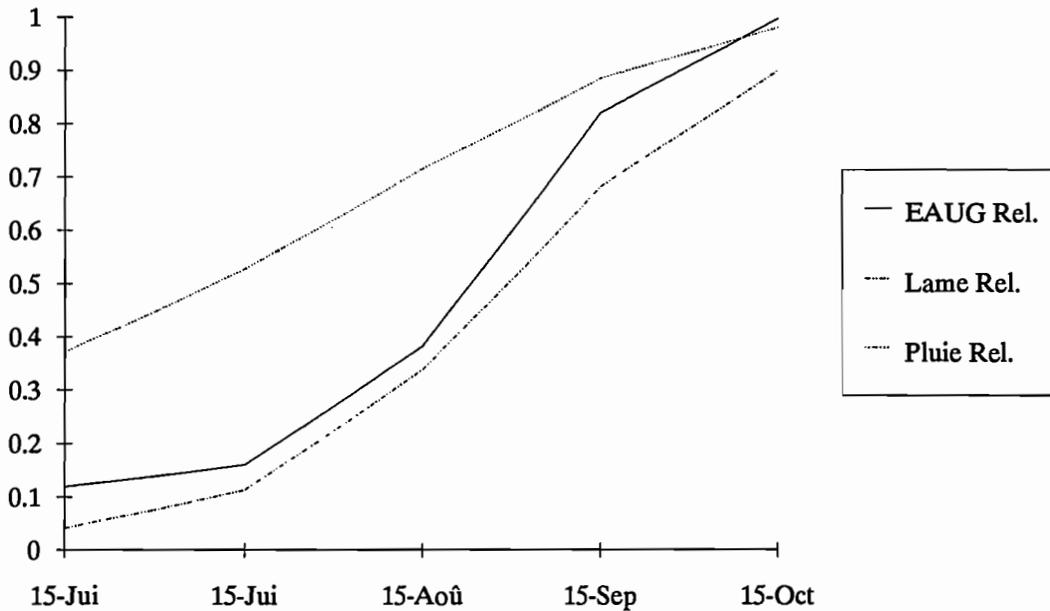


Figure 3.3.3 : Le Bou à Boron, 1981, Modèle MODGLO

Ces graphiques permettent de se rendre compte du fonctionnement de la production de chacun des modèles. On note ici que l'allure de la courbe Egr pour le modèle CREC est celle qui est la plus proche de l'allure de la lame relative écoulee observée. Les critères numériques utilisés au chapitre 3.2 sont concordants et indiquent que le calage effectué avec le modèle CREC est le meilleur des trois. L'examen attentif et systématique de ces graphiques ($91 \times 3 = 273$) indique que l'allure de la courbe de production concorde le plus souvent celle des lames relatives.

La fréquence de discordance des courbes est cependant plus forte pour le modèle MODGLO. Les courbes discordantes correspondent effectivement à des calages de moins bonne qualité. Nous avons également essayé de détecter les relations pouvant exister entre les différentes variables en traçant les images de points correspondants ($E_{aug} = f(\text{Pluie annuelle})$, $E_{gr} = f(\text{Pr})$, ...). Parmi tous ces tracés (tous modèles confondus) seul le tracé $E_{aug} = f(\text{Pluie annuelle})$ pour le modèle CREC semblait avoir une allure particulière. Nous avons en effet pu caler une relation du type : $E_{aug} = a (\text{Pluie annuelle} - b)^c$.

Les valeurs de a, b et c sont les suivantes :

$$a = 7.8046 \cdot 10^{-4} \qquad b = 651.95 \qquad c = 1.88$$

On peut assimiler le paramètre b à un seuil de pluie annuelle en deçà duquel on n'observe pas d'écoulement.

Il n'existe pas de relation de ce type pour les autres modèles et les nuages de points mettant en relation les autres variables entre elles n'ont pas d'allure particulière.

En conclusion, l'examen, sous l'angle de la production, des calages effectués à l'aide des trois modèles retenus, indique un comportement similaire des trois fonctions de production. On note cependant une plus forte variabilité en ce qui concerne le modèle MODGLO. Cette plus forte variabilité est sans doute due à la qualité des calages effectués à l'aide du modèle MODGLO, légèrement inférieure à celle des autres modèles (Cf chapitre 3.2).

3.3.2.2. Transfert.

La fonction de transfert des modèles a pour but d'acheminer le volume EAUG (ou analogue) issu de la production jusqu'à l'exutoire. Ce volume est transmis avec un étalement et un décalage dans le temps qui permet de reproduire correctement la forme des hydrogrammes (montées de crue, étiages,...).

Les trois modèles utilisés ont des fonctions de transfert basées sur un schéma à réservoir avec cependant des différences importantes au niveau des formulations mathématiques. Le nombre de paramètres de la fonction de transfert est également variable puisqu'il est compris entre 2 et 5.

La caractérisation de la fonction de transfert de chacun des calages et pour chaque modèle ne peut donc se faire par un simple examen des valeurs des paramètres. En effet, une valeur de COEFQ1 de 0.02 pour MODGLO ne signifie rien en soi et ne peut pas non plus être mise en relation avec une valeur de X1 de 0.01 pour CREC.

Nous avons donc cherché à caractériser le fonctionnement global de cette fonction de transfert plutôt que les valeurs des paramètres. Pour caractériser ce fonctionnement, nous avons examiné "l'hydrogramme" de sortie de cette fonction de transfert pour une entrée donnée ponctuelle.

Pour cet hydrogramme de sortie nous avons défini trois variables temporelles : T10, T50 et T90. Le T10 est le temps (en jours) nécessaire à la restitution de 10 % du volume d'entrée, le T50 pour la restitution de 50 % du volume d'entrée et le T90 pour 90 % du volume.

Il faut noter à ce niveau que seule la fonction de transfert de MODGLO donne des valeurs de T10, T50 et T90 qui ne dépendent pas de l'entrée. En effet, cette fonction de transfert comprend trois réservoirs à vidange linéaire. Pour les modèles CREC et GR3 les valeurs de T10, T50 et T90 dépendent du volume

initial entré de façon ponctuelle. Les fonctions de transfert utilisent en effet des réservoirs à vidange quadratique (Cf chapitre 2.3).

Deux manières de procéder ont été employées pour le calcul des T10, T50 et T 90. Une concerne le modèle MODGLO, l'autre les modèles CREC et GR3. Cependant, dans tous les cas, on démarre le processus avec des réservoirs vides.

Pour le modèle MODGLO, les valeurs du T10, T50 et T90 ont été calculées en faisant fonctionner la partie du modèle pour une entrée ponctuelle EAUG de 100 mm au jour $j=1$ et 0 les jours suivants. Lorsque la lame écoulée est égale à 10, 50 puis 90 mm, on repère les temps (en jours) qui correspondent au T10, T50 et T90. Ce calcul a été réalisé pour l'ensemble de 91 stations-années utilisées.

Pour les modèles CREC et GR3, les valeurs de T10, T50 et T90 dépendent de l'entrée EAUG de la fonction de transfert. Les calculs de T10, T50 et T90 ont donc été menés pour plusieurs entrées qui sont : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100 mm. On obtient ainsi 10 valeurs de T10, 10 valeurs de T50 et 10 valeurs de T90. Les calculs ont été menés pour l'ensemble des 91 stations-années disponibles. Pour tous les calculs de temps caractéristiques nous avons arbitrairement limité les calculs à 1000 jours. Lorsqu'une des valeurs dépasse 1000 jours (le T90 en particulier) on considère qu'elle n'est pas calculable. Compte tenu du nombre de valeurs calculées, on ne peut présenter ici l'ensemble de ces valeurs. Le tableau 3.3.8 présente les valeurs concernant le modèle MODGLO. Les tableaux 3.3.9 et 3.3.10 concernent les modèles CREC et GR3.

	T10	T50	T90
Moyenne	1.70	13.46	132.16
Ecart type	0.78	13.56	228.26
Mini	0.41	2.50	8.22
Maxi	4.34	126.91	979.59
Nombre de valeurs	91	91	87

Tableau 3.3.8 : Modèle MODGLO, Caractérisation de la fonction de transfert.

Entrée (mm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T10										
Moyenne	54.85	36.29	26.82	11.35	5.27	4.44	3.41	5.53	2.38	2.22
Ecart type	115.56	123.45	99.26	50.95	16.74	13.84	10.32	25.67	2.27	1.75
Mini	0.18	0.09	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Maxi	694.34	888.78	592.49	444.34	138.78	115.64	99.10	237.88	16.24	11.51
Nbval	59	82	87	89	90	90	90	91	91	91
T50										
Moyenne	198.89	135.45	58.54	40.13	30.85	26.02	26.27	26.61	18.46	15.44
Ecart type	262.89	218.96	132.41	123.20	98.77	88.23	106.82	97.86	67.30	50.97
Mini	0.88	0.45	0.30	0.22	0.18	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09
Maxi	906.34	832.98	895.12	923.86	738.95	615.68	892.16	763.79	599.34	464.22
Nbval	41	55	72	78	80	82	85	87	87	87
T90										
Moyenne	129.55	96.96	119.56	158.82	223.18	218.57	176.83	178.17	158.15	139.98
Ecart type	212.87	211.31	254.15	280.29	325.79	303.05	258.94	262.24	234.73	212.96
Mini	6.72	0.80	0.54	0.40	0.32	0.27	0.23	0.20	0.18	0.16
Maxi	875.65	986.03	994.11	871.61	936.19	975.93	926.82	962.67	879.11	851.28
Nbval	18	21	25	29	35	40	42	45	48	52

Tableau 3.3.9 : Modèle CREC, Caractérisation de la fonction de transfert.

Entrée (mm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T10										
Moyenne	11.23	6.87	5.40	4.66	4.21	3.91	3.69	3.52	3.39	3.28
Ecart type	9.32	5.13	3.82	3.21	2.86	2.65	2.50	2.40	2.32	2.26
Mini	1.03	0.60	0.45	0.38	0.33	0.30	0.28	0.27	0.25	0.24
Maxi	38.88	22.27	16.74	13.97	12.31	11.21	10.42	9.82	9.37	8.99
Nbval	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
T50										
Moyenne	80.74	41.66	28.65	22.14	18.24	15.64	13.78	12.39	11.31	10.45
Ecart type	78.76	39.61	26.57	20.05	16.15	13.56	11.71	10.33	9.25	8.40
Mini	3.37	2.56	1.93	1.73	1.59	1.49	1.41	1.35	1.30	1.25
Maxi	304.59	155.13	105.31	80.40	65.45	55.49	48.37	43.03	38.88	35.57
Nbval	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
T90										
Moyenne	321.90	300.70	237.12	178.49	143.31	119.87	103.12	90.56	80.79	72.98
Ecart type	269.02	279.57	235.40	176.65	141.40	117.90	101.11	88.52	78.73	70.89
Mini	15.91	8.86	6.56	5.41	4.73	4.26	3.93	3.75	3.59	3.43
Maxi	924.24	954.59	902.44	678.25	543.73	454.06	390.00	341.96	304.59	274.70
Nbval	65	86	91	91	91	91	91	91	91	91

Tableau 3.3.10 : Modèle GR3, Caractérisation de la fonction de transfert.

L'examen attentif des trois tableaux (3.3.8, 3.3.9 et 3.3.10) permet de faire quelques constatations sur le fonctionnement des différentes fonctions de transfert.

Tout d'abord, l'ensemble des temps moyens n'excède jamais 350 j, ce qui ne vient pas contredire l'hypothèse de départ d'indépendances des années entre elles. Pour le modèle MODGLO, quatre valeurs de T90 n'ont pu être calculées (> 1000 j). Ces quatre valeurs correspondent toutes à des années 1983 et 1984, donnant des calages de mauvaise qualité et ayant un fonctionnement très particulier. Pour les modèles CREC et GR3, on s'aperçoit que les valeurs de T10, T50 et T90 tendent vers une asymptote lorsque l'entrée augmente. Les figures 3.3.4 et 3.3.5 présentent des exemples des tracés des temps de transfert par bassin pour CREC et GR3. Ces tracés ont été systématiques et l'allure générale est assez semblable à ces figures. Elles concernent le bassin du Doundian à Wahire.

On note, sur ces tracés et à l'examen des tableaux, le comportement particulier du transfert du modèle CREC. En effet, pour les valeurs de T10 avec de faibles entrées (10 à 30), il est fréquent de dépasser la valeur de 1000 j. On remarque aussi la grande fréquence de valeurs supérieures à 1000 j pour le T90. Ce phénomène est sans conteste dû à une discontinuité engendrée par la particularité du réservoir H du modèle CREC (Cf chapitre I.C).

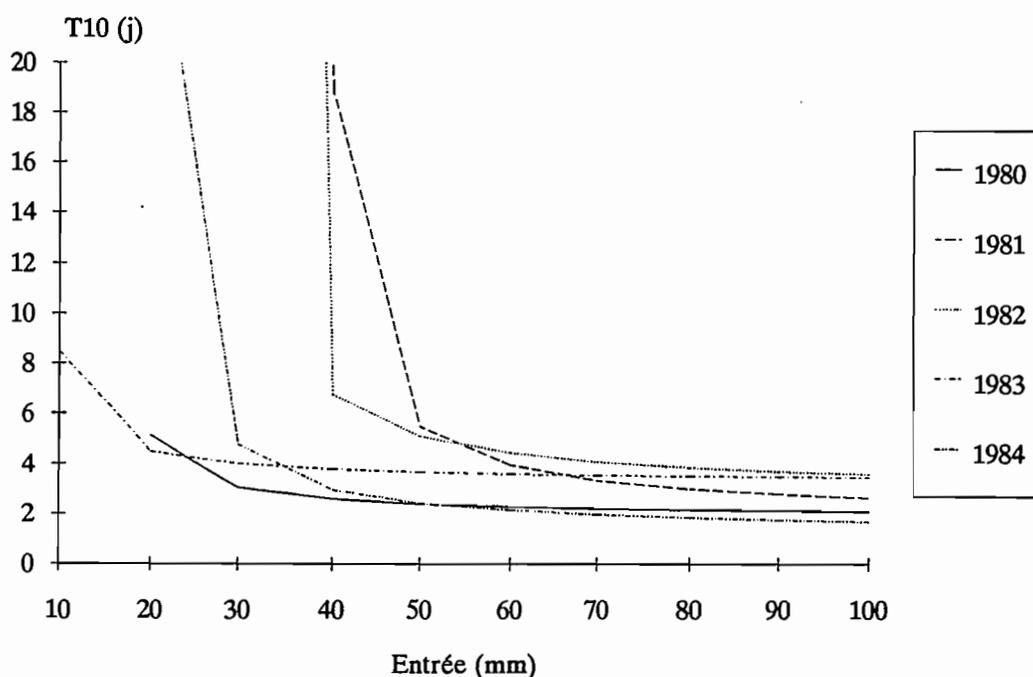


Figure 3.3.4 : Le Doundian à Wahire, modèle CREC

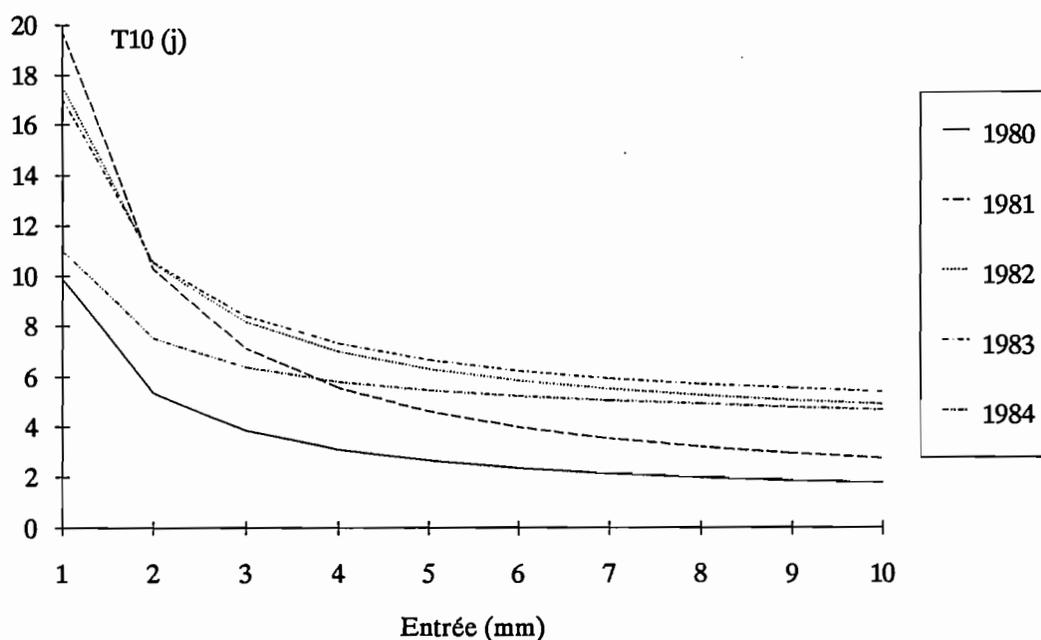


Figure 3.3.5 : Le Doundian à Wahire, modèle GR3

En effet, le paramètre X_6 du réservoir H représente un seuil en deçà duquel aucune sortie vers le réservoir G n'a lieu. On peut assimiler le fonctionnement de cette fonction de transfert au fonctionnement de deux fonctions différentes selon qu'on se trouve de part et d'autre du seuil X_6 . Au-delà du seuil X_6 , on a une fonction de transfert à 2 réservoirs et en deçà une fonction de transfert à un seul réservoir.

Cette discontinuité est très nette sur le graphique du Doundian à Wahire, alors que pour le modèle GR3, aucune discontinuité n'est observée.

Quand on se trouve sur l'asymptote, et en particulier pour les entrées de 100 mm, les temps moyens T_{10} , T_{50} et T_{90} sont assez proches pour tous les modèles. De l'ordre de 2 jours pour T_{10} , de 10 à 15 jours pour T_{50} et de 130 jours pour T_{90} (sauf GR3 : 73 jours). Les écarts-types sont par contre plus élevés pour MODGLO et CREC.

En conclusion, l'examen des calages sous l'angle du transfert permet de séparer dans un premier temps MODGLO d'une part et CREC et GR3 d'autre part. On met également en évidence une discontinuité dans le fonctionnement du modèle CREC due à la particularité du réservoir H. Malgré tout, les temps caractéristiques moyens sont équivalents d'un modèle à l'autre ce qui semble logique puisque la qualité des calages était sensiblement la même avec les trois modèles.

3.3.2.3. Conclusions.

L'analyse détaillée des calages sous l'angle de la production et du transfert a permis de caractériser et de comparer les fonctions de production et de transfert des trois modèles utilisés.

Ces caractérisations ont pu se faire grâce à l'emploi de nouvelles variables définies à partir de la variable intermédiaire EAUG qui représente le volume issu de la production et qui sert également d'entrée aux fonctions de transfert.

Du point de vue de la production, les trois modèles ont des comportements similaires avec cependant une plus forte variabilité pour le modèle MODGLO. En ce qui concerne le transfert, les variables caractéristiques définies (T10, T50 et T90) sont assez proches les unes des autres pour les trois modèles. Elles permettent cependant de séparer MODGLO de CREC et GR3 et mettent également en évidence une discontinuité de la fonction de transfert de CREC.

Dans le but d'utiliser les modèles pour des bassins versants non jaugés, nous allons maintenant examiner les relations éventuelles entre ces variables, les paramètres des modèles et les caractéristiques physiographiques et hydrologiques des bassins étudiés. C'est l'objet du chapitre 3.4.

3.4. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres.

Le but essentiel de l'analyse présentée dans ce chapitre est d'essayer de déterminer des relations entre les paramètres calés des modèles et des variables hydrologiques, physiographiques ou agronomiques, caractéristiques des bassins et des stations-années étudiées.

Cette analyse est présentée en quatre parties. La première permet de définir les échantillons qui seront utilisés par la suite. On y définit un échantillon dit de calage de 39 individus (chaque individu correspond à une station année) sur lequel on déterminera les relations existantes et un échantillon dit de validation sur lequel on vérifiera la validité des relations mises en évidence par l'échantillon de calage. La deuxième partie présente l'ensemble des variables utilisées et examine les corrélations existant entre ces variables. La troisième partie concerne l'analyse en composantes principales et l'analyse factorielle des correspondances. La quatrième et dernière partie détaille la mise au point d'équations de régression multiple permettant la prédétermination des paramètres des modèles.

3.4.1. Définitions des échantillons.

Afin de travailler sur une population plus ou moins homogène et en disposant du maximum d'informations, nous avons été amenés à réaliser une sélection parmi les 91 individus disponibles. Une fois cette sélection réalisée, une répartition aléatoire entre deux échantillons (calage et validation) a été entreprise.

Partant des 91 individus (station-année) décrits dans la première partie, nous sommes arrivés, en deux étapes successives, à sélectionner 59 individus.

. Première étape :

Nous avons écartés les individus pour lesquels nous ne disposions pas du maximum d'informations ou pour lesquels il subsistait des doutes quant à la qualité des données. En particulier, la disponibilité des variables d'occupation du sol a été un facteur décisif. La non disponibilité de ces valeurs nous a conduit à éliminer quatre bassins représentant 16 stations-années. Ces quatre bassins sont le Lokpoho à Namboukaha (4 individus), le Bou à Boron (5 individus), le Bou à Sirasso (3 individus) et le Solomougou à Ziebatago (4 individus).

Des doutes subsistaient quant à la validité des données pluviométriques utilisées pour la Bagoé à Kouto sur la période 1968 à 1976. Il semble que la station pluviométrique de Boundiali en particulier soit douteuse sur cette période (Brunet-Moret, 1974). Nous avons donc éliminé de l'échantillon ces 8 individus concernant la Bagoé à Kouto de 1968 à 1976. De plus, ces 8 individus représentent des années relativement anciennes comparativement au reste des individus, années qui appartiennent à une période à moyenne pluviométrique vraisemblablement différente (cf chapitre 2.2).

Cette première étape entraîne ainsi l'élimination de 24 individus, ramenant la population disponible à 67 individus.

. Deuxième étape :

Dans le but d'éliminer les individus ayant un "comportement inexplicable", nous avons procédé à une deuxième étape dans la sélection. Cette deuxième étape s'est déroulée arbitrairement de la façon suivante :

Partant du principe que la finalité essentielle des modèles était de prévoir la lame écoulée à partir de la lame précipitée, nous avons calculé une régression linéaire $Lame\ Annuelle = f(Pluie\ annuelle)$. Cette régression bâtie, nous avons arbitrairement décidé d'éliminer les individus dont l'écart entre la valeur prédite et la valeur observée était supérieure à 1.5 fois l'écart type de l'échantillon observé.

La régression linéaire bâtie à partir des 67 individus issus de la sélection précédente est la suivante :

$$Lame\ Annuelle = - 223.724 + 0.292335\ Pluie\ Annuelle$$

Coefficient de corrélation : 0.7816

Coefficient de détermination : 61.1 %

Ecart type : 52.6

Nous avons donc décidé d'écarter les individus dont l'erreur d'estimation de la lame annuelle était supérieure à 78.9 mm.

Par cette procédure, 8 individus ont été écartés, leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.4.1.

Individu	Pluie Annuelle	Lame observée	Lame prédite	Ecart
Bagoé à Guingérini 1981	1412.0	299.5	189.1	110.4
Banifing à Ziemougoula 1979	1242.9	276.2	139.6	136.6
Banifing à Ziemougoula 1985	1103.8	192.9	99.0	93.9
Banifing à Ziemougoula 1985	1341.4	252.2	168.4	83.8
Douni à Pt 398 1985	1099.0	246.8	97.6	149.2
Sien à Massadougou 1982	1610.7	122.0	247.1	-125.1
Sien à Nafana Sienso 1982	1610.7	147.4	247.1	-99.7
Yoreloro à Kategue 1984	1122.0	23.0	104.3	-81.3

Tableau 3.4.1 : Caractéristiques des individus éliminés à la deuxième étape.

La figure 3.4.1 présente la régression calculée sur les 67 individus et indique ceux qui ont été écartés.

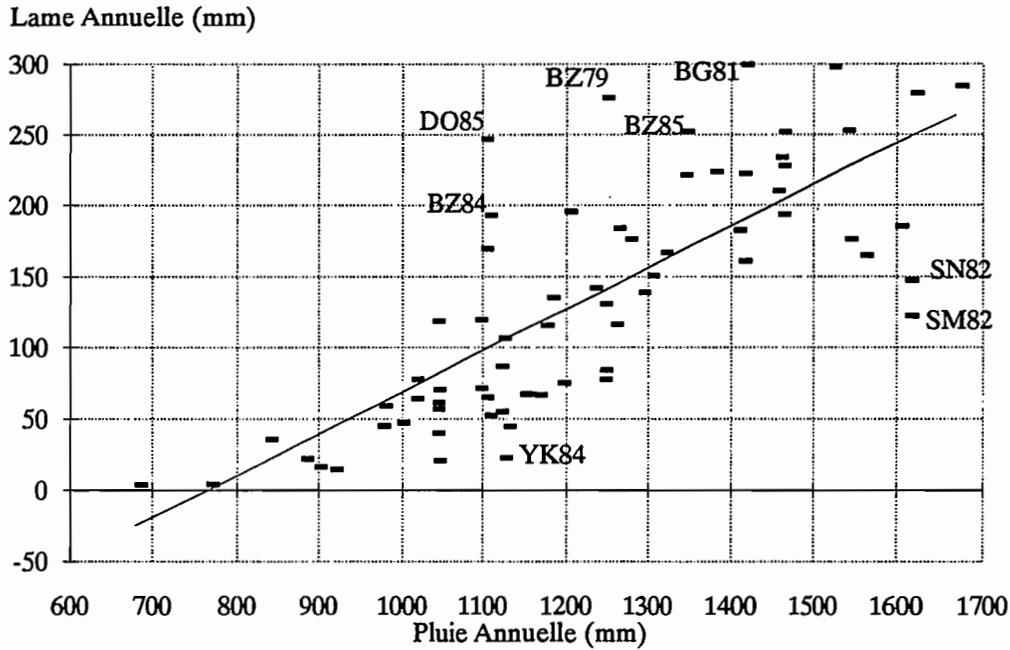


Figure 3.4.1 Régression Lame Annuelle - Pluie Annuelle

Cette procédure a donc permis d'éliminer 8 individus ce qui porte le nombre d'individus disponibles à 59. Si on calcule une régression linéaire pour ces 59 individus, on obtient un coefficient de détermination de 79.3 %.

A l'issue de cette sélection, visant à obtenir une population plus ou moins homogène, nous avons procédé à la répartition de ces 59 individus dans deux échantillons. Un échantillon de calage, pour le calage des équations de prédétermination des paramètres (chapitre 3.4.4) et un échantillon de validation, pour la validation de ces équations. Nous avons choisi de faire un échantillon de calage de 39 individus et un échantillon de validation de 20 individus, soit à peu près une répartition de 2/3, 1/3. Nous avons donc procédé au tirage aléatoire de 39 valeurs parmi 59 ce qui nous donne la répartition présentée dans les tableaux 3.4.2 et 3.4.3.

Bassins	Années disponibles
La Bagoé à Guingérini	1982, 1983
La Bagoé à Kouto	1982, 1983
Le Badenou à Rte de M'Bengue	1984, 1985
Le Bandama à Seguekiele	1983, 1985
Le Banifing à Ziemougoula	1978, 1980
Le Douni à Pt 398	1984, 1986
Le Doundian à Wahire	1980 à 1984
Le Kobani à Nimbrini	1977, 1983, 1984
Le Lafigue à Rte de Badikaha	1982 à 1984
Le Mahandiabani à Wahire	1983
Le Sien à Massadougou	1983 à 1985
Le Sien à Nafana-Sienso	1978, 1981, 1984
La Tiemba à Dioulatiedougou	1983, 1984
Le Tiemba à Lille	1982, 1983
Le Yoreloro à Kategue	1982, 1983, 1986
Le Yani à Madji	1980, 1983

Tableau 3.4.2 : Echantillon de calage.

Bassins	Années disponibles
La Bagoé à Kouto	1981, 1984, 1985
Le Badenou à Rte de M'Bengue	1983
Le Bandama à Seguekiele	1981, 1982, 1984
Le Douni à Pt 398	1983
Le Lafigue à Rte de Badikaha	1981
Le Mahandiabani à Wahire	1984
Le Sien à Massadougou	1981, 1986
Le Sien à Nafana-Sienso	1977, 1979, 1980, 1983
La Tiemba à Dioulatiedougou	1981
La Tiemba à Lille	1984
Le Yani à Madji	1981, 1986

Tableau 3.4.3 : Echantillon de validation.

Au terme de ce processus de sélection et de répartition, nous avons donc abouti à la constitution de deux échantillons. L'un, dit échantillon de calage, est constitué de 39 individus, l'autre, dit échantillon de validation est constitué de 20 individus.

3.4.2. Variables utilisées. Etude des corrélations.

En ce qui concerne l'étude des corrélations, ainsi que l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP), nous avons considéré l'ensemble des 59 individus disponibles. La séparation en échantillon de calage et échantillon de validation n'est utilisée que pour le chapitre 3.4.4 qui concerne la mise au point des équations de prédétermination des paramètres.

3.4.2.1. Variables utilisées.

Nous décrivons ici l'ensemble des variables prises en compte tant au niveau de l'analyse des corrélations qu'au niveau de l'ACP et de l'AFC. Certaines de ces variables, calculables uniquement lorsque le modèle est calé, ne seront pas utilisées dans le chapitre 3.4.4.

Les variables utilisées peuvent être réparties en deux catégories, les variables caractéristiques d'une station-année, indépendamment de la prise en compte d'un modèle, et les variables caractéristiques du calage d'un modèle pour l'individu considéré (station-année).

. Les variables caractéristiques d'une station ou d'une station année

. La liste de ces variables est la suivante :

. Pluie annuelle

. Pluie cumulée (Pc) au 15 Juin, 15 Juillet, 15 Août, 15 Septembre et 15 Octobre.

. Pluie relative (Pr) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10

. Lame annuelle.

. Lame cumulée (Lc) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.

. Lame relative (Lr) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.

. Superficie.

. Compacité : coefficient de Gravelius = $\frac{\text{Périmètre du bassin}}{\text{Périmètre d'un cercle de même surface}} = \frac{0.28 P}{\sqrt{S}}$

. Occupation du sol : pourcentage de savanes, de forêts, de cultures et d'habitat.

. Coefficient d'écoulement = $\frac{\text{Lame annuelle}}{\text{Pluie annuelle}}$

Les définitions pour les Pluies cumulées, Lames cumulées, Pluies relatives et Lame relatives sont les suivantes :

Pluies cumulées :

Pc6 = Pluie cumulée du 1er janvier au 15 Juin.

Lame cumulée : idem.

Pluies relatives :

$$Pr6 = \frac{Pc6}{\text{Pluie annuelle}}$$

Lame relatives :

$$Lr6 = \frac{Lc6}{\text{Lame annuelle}}$$

. Les variables caractéristiques du calage d'un modèle.

. paramètres du modèle considéré.

. Eaug annuelle : sortie annuelle de la fonction de production.

. Eaug cumulée (Egc) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.

. Eaug relative (Egr) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.

. T10, T50.

. Indices de restitution (Ir) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10, avec, par exemple :

$$Ir6 = \frac{Egc6}{Pc6}$$

3.4.2.2. Etude des corrélations.

Pour l'étude des corrélations, nous avons procédé au calcul des matrices de corrélations pour les trois modèles et pour l'ensemble des variables utilisables. Ces matrices sont trop importantes (49*49, 50*50 et 52*52) pour être reproduites intégralement ici, elles sont reportées en Annexe 3.4.1.

En dehors des corrélations évidentes dues à la définition des variables utilisées (Pc10 très corrélée avec Pluie annuelle par exemple) nous avons regroupé ici les corrélations "significatives" (>0.5) pour chaque modèle étudié.

. Modèle CREC.

- X1 : corrélation avec
X5 = 0.5988

- X3 : corrélation avec
X4 = -0.5735
X7 = 0.5942

- X4 : corrélation avec
X3 = -0.5735
X7 = -0.5751

-X5 : corrélation avec
X1 = 0.5988
X6 = 0.7882

- X6 : corrélation avec
X5 = 0.7882

- X7 : corrélation avec
X3 = 0.5942
X4 = -0.5751

- Superficie : corrélation avec
% de Forêt = 0.6558

. Modèle GR3.

- T10 : corrélation avec
Eaug an = 0.5940
Pc7 = 0.5708
Pc8 = 0.5193
X2 = 0.8867
X3 = -0.5096
Forêt = 0.6302
Culture = -0.5001

- T50 : corrélation avec
 - Pluie annuelle = 0.5163
 - Lame annuelle = 0.6149
 - Coefficient d'écoulement = 0.6006
 - Eaugan = 0.6996
 - Pc7 = 0.6519
 - Pc8 = 0.6419
 - Pc9 = 0.5718
 - Pc10 = 0.5178
 - X2 = 0.9974

- X2 : corrélation avec
 - Pluie annuelle = 0.5359
 - Lame annuelle = 0.6337
 - Coefficient d'écoulement = 0.6182
 - Eaugan = 0.7067
 - Pc7 = 0.6558
 - Pc8 = 0.6530
 - Pc9 = 0.5859
 - Pc10 = 0.5374

. Modèle MODGLO

- T10 : corrélation avec
 - Superficie = 0.5165
 - T50 = 0.5500
 - Forêt = 0.6255

- AA : corrélation avec
 - XIN = 0.5262

Comme on peut le constater les corrélations sont rares et souvent faibles (Maximum : 0.89). Il faut à ce niveau, prendre en compte le fait que ces corrélations ne permettent que de détecter les relations linéaires entre les variables. Or, comme nous l'avons déjà vu au chapitre 3.2, les modèles sont de conception non linéaire. Il paraît donc plutôt logique que les relations linéaires entre toutes ces variables utilisées soient plutôt faibles. On peut cependant noter qu'une relation linéaire faible (r de l'ordre de 0.5; 0.6) peut être le signe d'une relation non linéaire plus forte.

Nous pouvons également remarquer que parmi les trois modèles étudiés, seul le modèle MODGLO ne présente aucune relation linéaire entre l'un quelconque de ces paramètres et les autres variables descriptives.

En conclusion, l'étude des matrices des corrélations permet de mettre en évidence l'inexistence de relations linéaires fortes entre les paramètres des modèles et les autres variables utilisées. Cette étude permet également d'isoler MODGLO des deux autres modèles utilisés. En effet, ce modèle ne conduit à aucune relation entre les paramètres et les autres variables, ce qui n'est pas le cas pour CREC et GR3.

3.4.3. Analyse en Composantes Principales. Analyse Factorielle des Correspondances.

On trouvera ici les résultats de l'application de ces deux méthodes de bases de l'Analyse des données à l'ensemble des variables citées au chapitre 3.4.2. Dans un premier temps, un rappel des principes de base de ces méthodes est fait, on examine ensuite les résultats de l'application de ces méthodes pour chaque modèle.

3.4.3.1. Rappels sur l'ACP et l'AFC.

Ces deux méthodes d'analyse des données, utilisées de manière complémentaire, sont très intéressantes voire indispensables lorsqu'il s'agit d'étudier un grand nombre de caractères mesurés pour un certain nombre d'individus.

En effet, lorsqu'on étudie des individus en essayant de les décrire par des "caractères" mesurés (ou non), plus le nombre de caractères est élevé et plus il est difficile de synthétiser l'information. Si l'étude porte uniquement sur deux ou trois caractères, il est facile de placer dans un plan ou dans l'espace les individus selon les deux ou trois caractères mesurés et de repérer leur proximités ou leur éloignement. Dès que le nombre des caractères devient plus important cette façon de procéder devient inutilisable. L'Analyse des données vise à regrouper les individus selon leur proximité dans l'espace à n dimensions des n caractères disponibles, mesurables.

Pour l'Analyse en Composantes Principales (ACP), on cherche donc un plan de projection des individus sur lequel les distances seront en moyenne le mieux conservées : comme l'opération de projection raccourcit toujours les distances, on se fixera pour critère de rendre maximale la moyenne des carrés des distances entre les projections.

On définit ainsi de nouveaux axes perpendiculaires entre eux ; chaque individu projeté dans ce nouveau système d'axes, possède de nouvelles coordonnées qui sont des combinaisons linéaires des caractères initiaux. Ces axes, appelés composantes principales, définissent de nouveaux caractères, sous forme de combinaisons linéaires des caractères initiaux. Le nombre final d'axes retenus dépend du pourcentage de variance expliquée par chaque axe.

L'Analyse en Composantes Principales est donc une méthode de réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des individus et des caractères. Cette réduction ne sera possible que si les caractères initiaux ne sont pas indépendants et ont des coefficients de corrélation non nuls.

L'ACP est une méthode factorielle car la réduction du nombre des caractères ne se fait pas par une simple sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux au moyens des "facteurs". C'est une méthode linéaire car il s'agit de combinaisons linéaires.

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) quant à elle, permet d'étudier des caractères qualitatifs plutôt que des caractères numériques comme dans l'ACP. En effet, les caractères étudiés sont répartis en classe et on bâtit ainsi un tableau de contingence qui sert de base à l'analyse. On peut alors

étudier les relations entre des caractères numériques (répartis en classe) et des caractères qualitatifs ou encore, entre des caractères qualitatifs entre eux. L'intérêt de l'AFC, réside dans le fait que lorsque l'on transforme un caractère numérique en caractère qualitatif et que l'on considère toutes les combinaisons linéaires des indicatrices (toutes les quantifications possibles (répartition en classes)), on envisage toute une gamme de fonctions autres que linéaires liant un caractère numérique à un autre.

L'ACP repose essentiellement sur l'étude des corrélations; or le coefficient de corrélation ne mesure que la forme plus ou moins linéaire de la dépendance entre deux caractères. Un coefficient de corrélation voisin de 0 ne signifie pas forcément qu'il y a indépendance; il peut exister une relation non linéaire, parabolique par exemple. De plus, la recherche des composantes principales est limitée par principe aux combinaisons linéaires des caractères initiaux.

L'AFC, en travaillant à partir des tableaux de contingence, s'oppose à l'ACP et permet d'envisager des relations non linéaires entre les caractères étudiés. En cela, elle est aussi complémentaire de l'ACP.

Ces deux méthodes associées permettent donc d'étudier les éventuelles relations linéaires ou non linéaires entre les différents caractères des individus considérés. Elles permettent de présenter ces relations de manière synthétique et graphique.

3.4.3.2. Application.

3.4.3.2.1. L'ACP.

L'Analyse en Composantes Principales a été menée sur l'échantillon des 59 stations années issu de la sélection présentée au chapitre 3.4.2. On a distingué d'une part les variables principales, indépendantes des modèles et les variables secondaires (ou supplémentaires) liées à l'utilisation d'un modèle.

Les variables principales sont au nombre de 17 et sont les suivantes :

Superficie

Pluie Annuelle

Pc6, Pc7, Pc8, Pc9, Pc10

Pr6, Pr7, Pr8, Pr9, Pr10

% de Savanes, de Forêts, de Cultures, d'Habitat

Compacité.

Le calcul des composantes principales à partir de ces 59 individus et de ces 17 caractères conduit aux résultats présentés dans le tableau 3.4.4.

Composante n°	Pourcentage de Variance	Pourcentage cumulé
1	34.33	34.33
2	17.97	52.30
3	17.41	69.72
4	8.90	78.62
5	7.82	86.44

Tableau 3.4.4 : Résultats de l'ACP.

Les trois premières composantes permettent donc d'expliquer et de regrouper 70 % environ de la variance totale observée. Quand on considère les cinq premières composantes on obtient 86 % de variance expliquée.

Le tableau 3.4.5 donne les corrélations de chacune des variables avec les trois premières composantes.

Variable	Axe 1	Axe 2	Axe3
Superficie	0.1917	0.4301	0.2639
Pluie Annuelle	0.7995	-0.5482	0.2235
Savanes	0.2439	0.3656	0.6395
Forêt	0.2466	0.5384	0.4077
Cultures	-0.3196	-0.5492	-0.6916
Habitat	-0.0310	-0.1097	-0.8066
Compacité	0.2120	0.4884	0.3404
Pc6	0.8645	0.0129	-0.1377
Pr6	0.4674	0.4382	-0.3881
Pc7	0.9560	-0.0550	-0.0754
Pr7	0.5086	0.5602	-0.4387
Pc8	0.9332	-0.2766	0.0445
Pr8	0.5138	0.5077	-0.4075
Pc9	0.8840	-0.3975	0.1060
Pr9	0.2296	0.5494	-0.4435
Pc10	0.8308	-0.5126	0.1484
Pr10	0.3080	0.1671	-0.5050

Tableau 3.4.5 : Corrélations des variables principales avec les trois premiers axes.

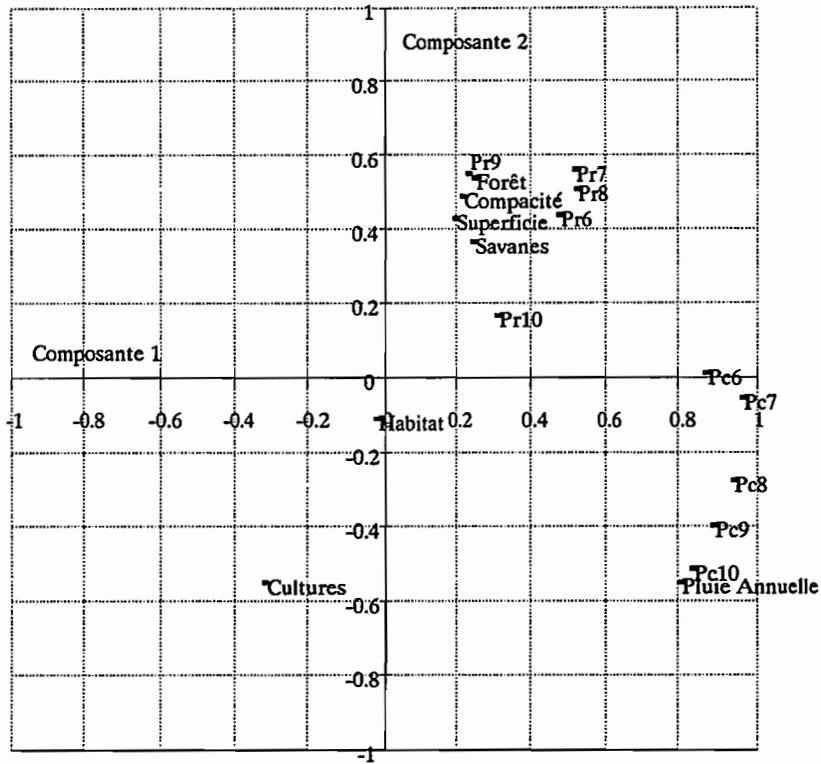


Figure 3.4.2 : Corrélations variables principales - Composantes 1 et 2.

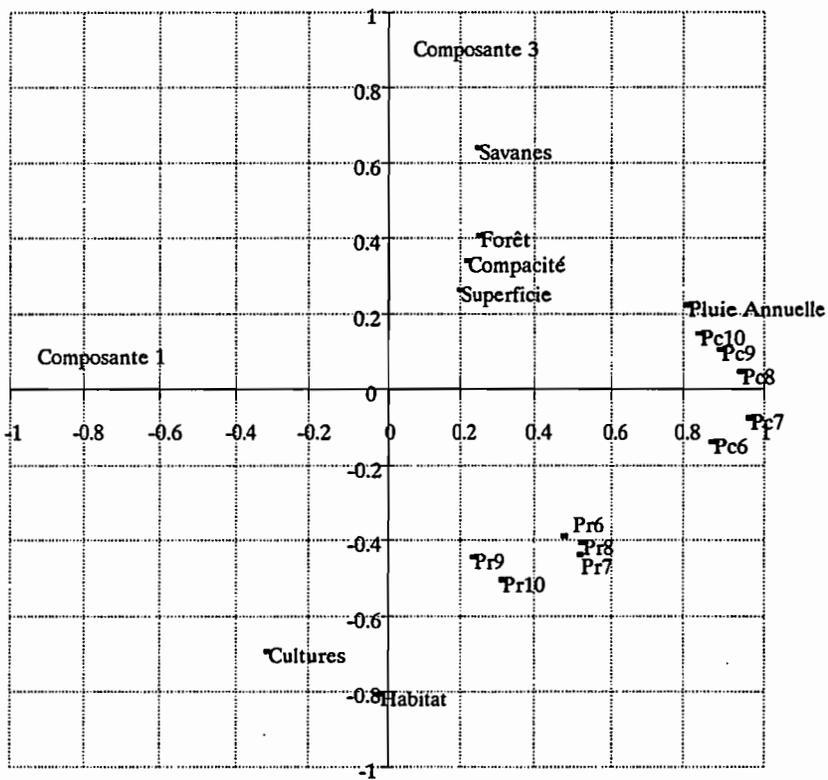


Figure 3.4.3 : Corrélations variables principales - Composantes 1 et 3.

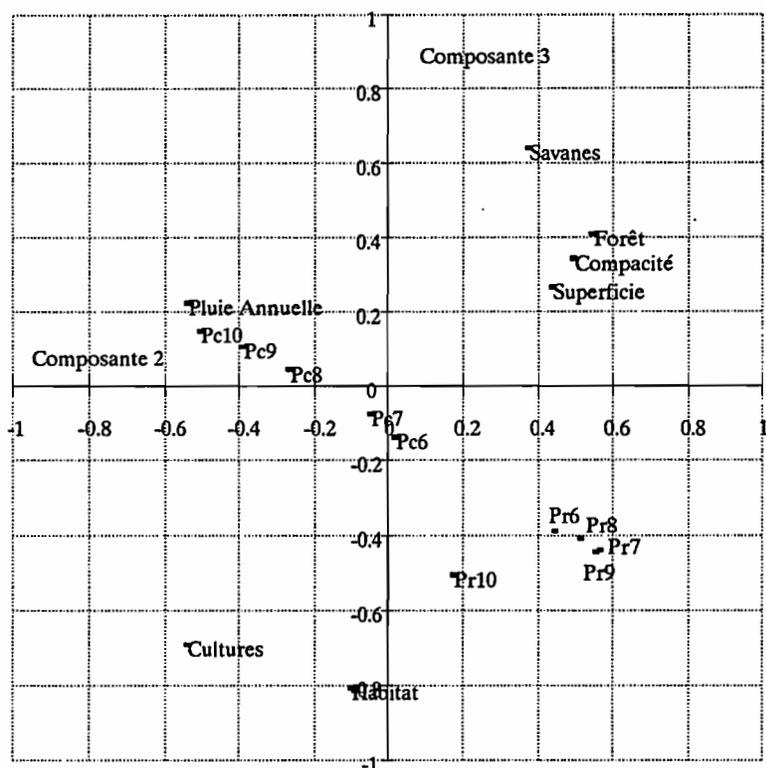


Figure 3.4.4 : Corrélations variables principales - Composantes 2 et 3.

Les figures 3.4.2, 3.4.3 et 3.4.4 indiquent de manière graphique ces corrélations dans les plans composante 1 - composante 2, composante 1 - composante 3, composante 2 - composante 3. Ces graphiques permettent de se rendre compte de ce que la composante 1 concerne et synthétise plutôt les variables concernant la pluviométrie alors que la composante 3 concerne les paramètres d'occupation du sol. Les figures 3.4.5, 3.4.6 et 3.4.7 présentent la projection des individus dans ces mêmes plans 1-2, 1-3 et 2-3.

On isole correctement sur ces représentations les années sèches et les années pluvieuses d'une part (figure 3.4.5) et les bassins fortement cultivés d'autre part (figure 3.4.6 et 3.4.7).

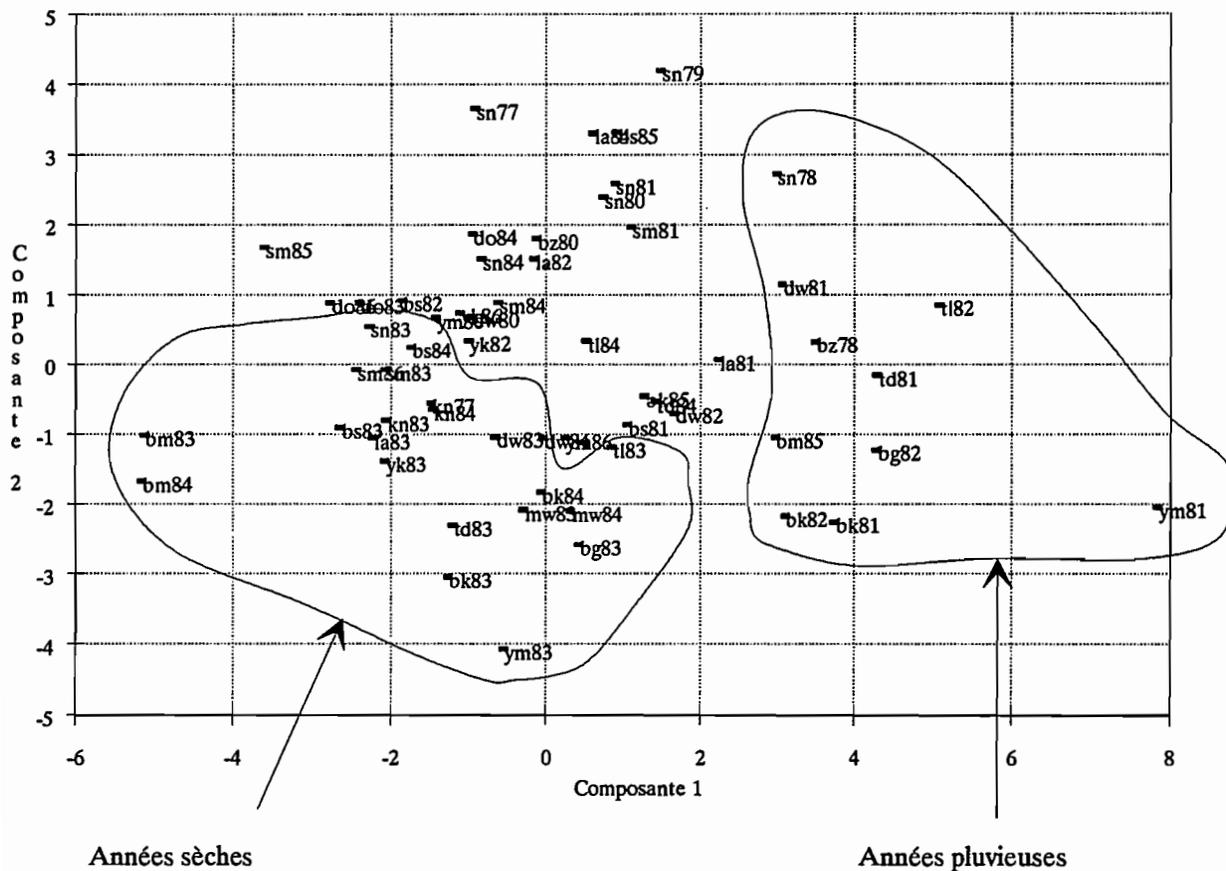


Figure 3.4.5 : Projection des individus dans le plan 1-2.

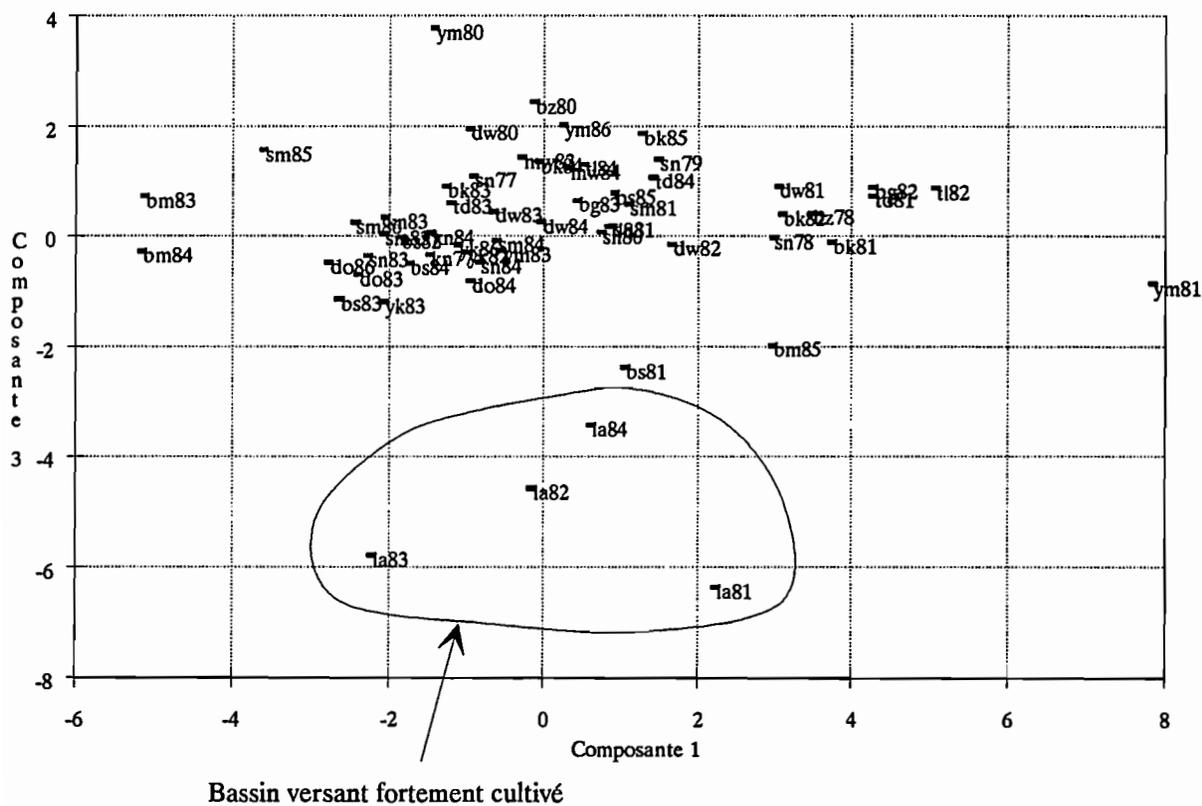


Figure 3.4.6 : Projection des individus dans le plan 1-3.

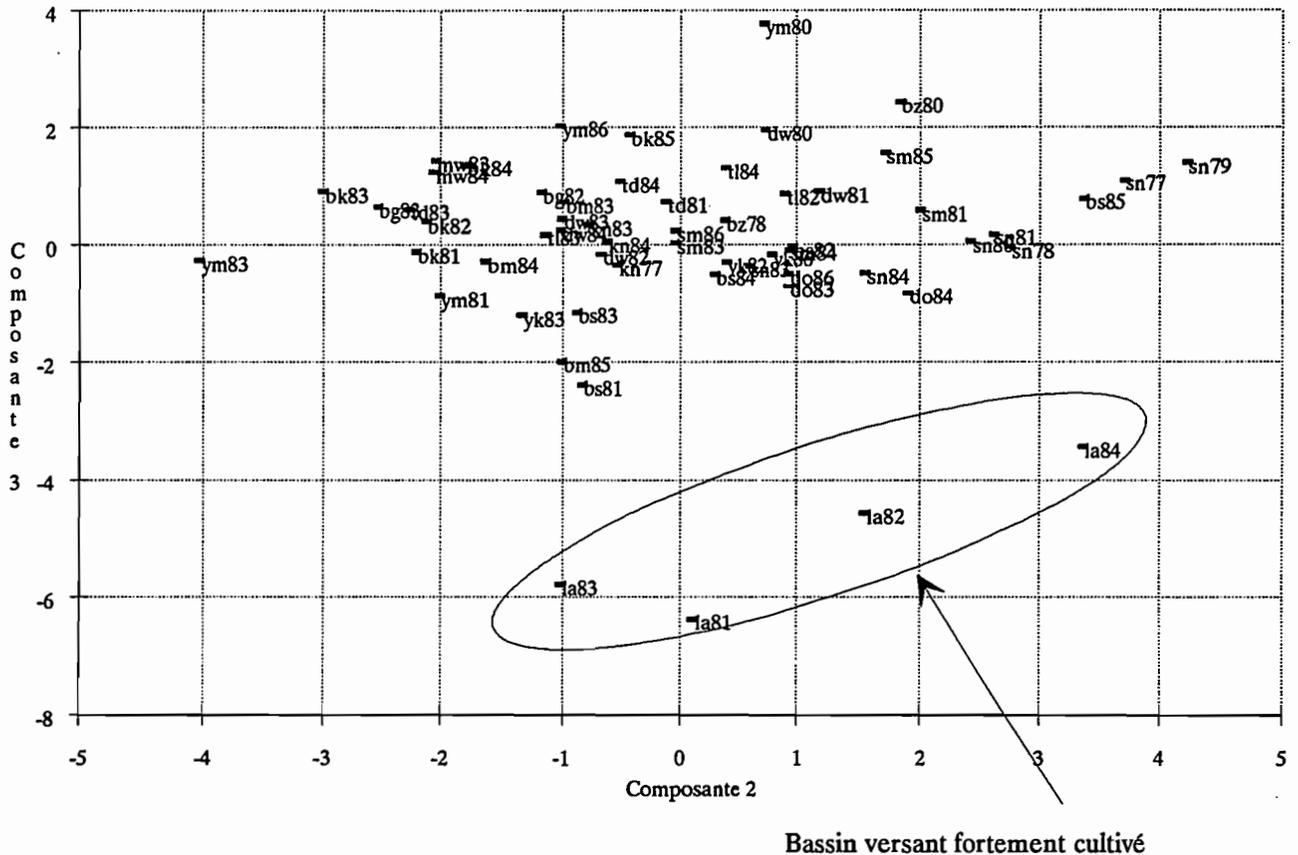


Figure 3.4.7 : Projection des individus dans le plan 2-3.

A partir de cette analyse de base, on superpose les variables propres aux modèles. On peut ainsi calculer les corrélations des paramètres avec les nouveaux axes définis par l'ACP.

On présente ici, pour chaque modèle, les corrélations de chaque paramètre avec chacun des trois premiers axes ainsi que la représentation graphique correspondante.

. Modèle CREC.

Le tableau 3.4.6 donne les valeurs des corrélations avec les trois premiers axes.

Variable supplémentaire	Axe 1	Axe 2	Axe 3
X1	-0.4332	-0.0646	-0.2877
X2	0.1198	-0.3362	0.1296
X3	0.1638	0.4485	-0.1865
X4	-0.2802	-0.4242	0.0263
X5	-0.2368	-0.0850	-0.4424
X6	-0.0306	0.1210	-0.3474
X7	0.2725	0.2846	0.0421

Tableau 3.4.6 : Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes.

Les figures 3.4.8, 3.4.9 et 3.4.10 donnent les représentations graphiques de ces corrélations.

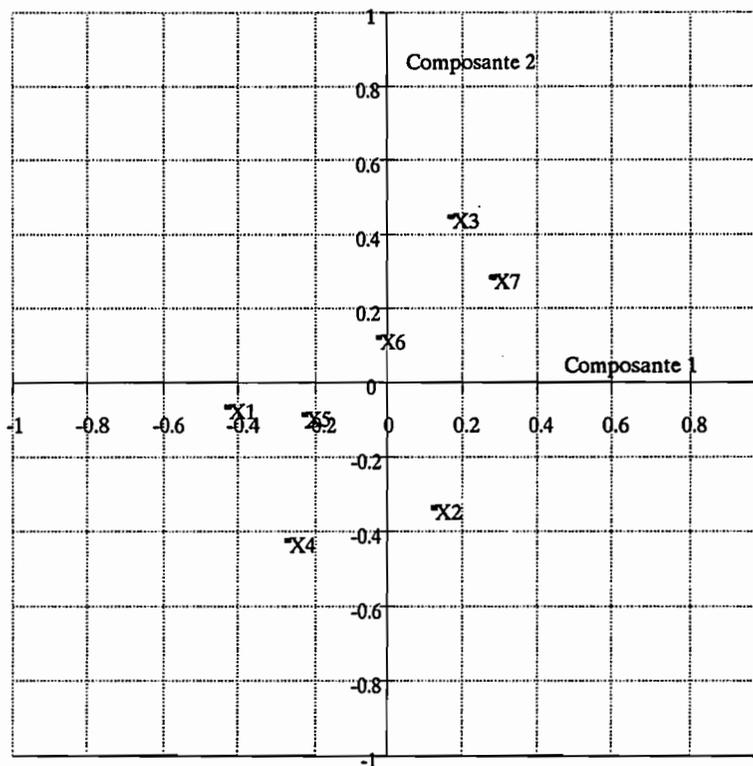


Figure 3.4.8 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 2.

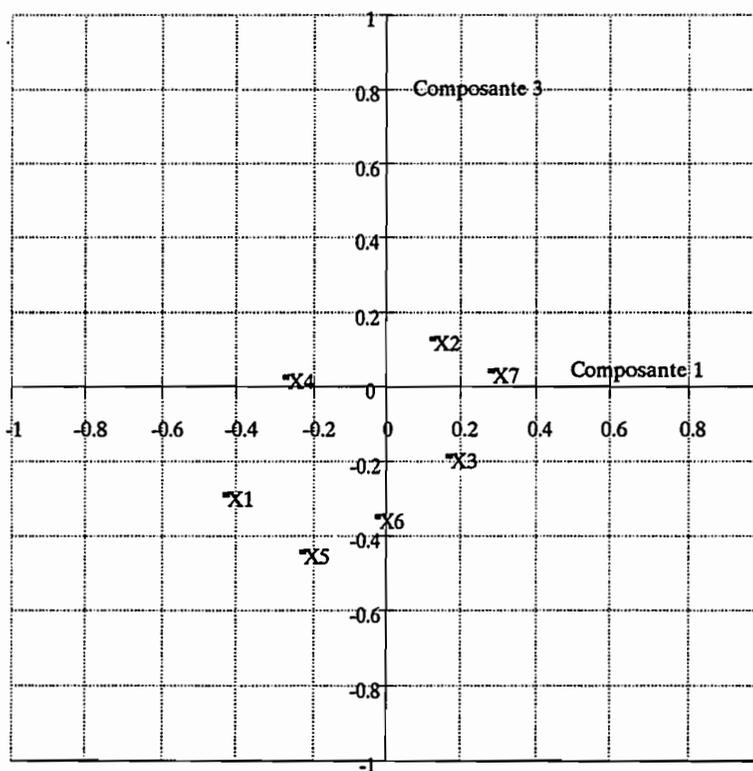


Figure 3.4.9 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 3.

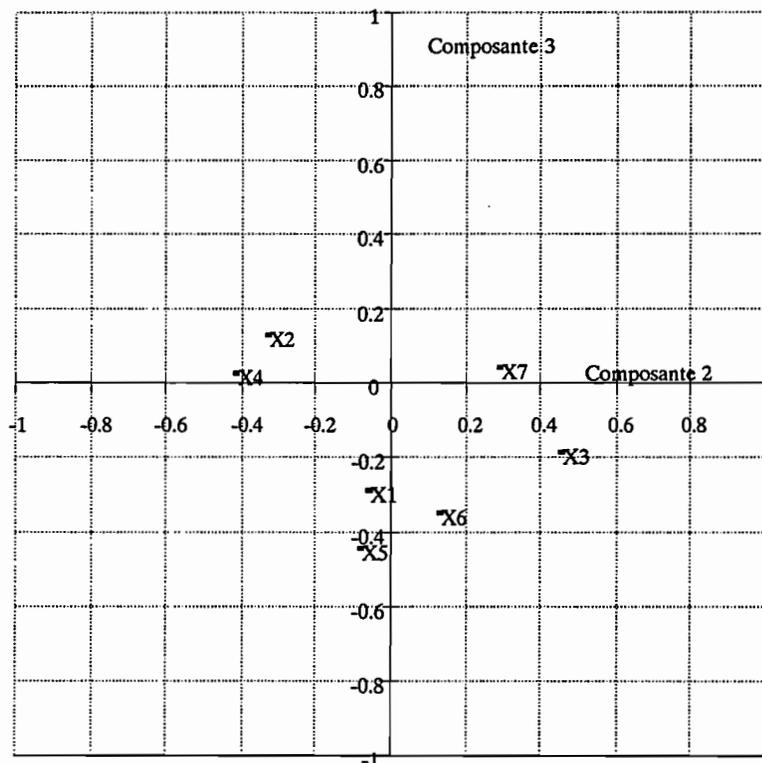


Figure 3.4.10 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 2 et 3.

L'examen de ces figures et du tableau 3.4.6 permet de remarquer la répartition des paramètres dans le nouveau système d'axe. Les paramètres de la fonction de production (X3, X4 et X7) sont plutôt corrélés avec l'axe 2 tandis que les paramètres de transfert sont plutôt corrélés avec les axes 1 et 3. Ces relations ne sont toutefois que des tendances puisque la corrélation la plus forte est de 0.4485 pour X3 avec l'axe 2.

. Modèle GR3.

Les valeurs des corrélations avec les trois premiers axes sont présentés dans le tableau 3.4.7.

Variable supplémentaire	Axe 1	Axe 2	Axe 3
X1	-0.0671	-0.4989	-0.1752
X2	0.6577	0.1020	0.2843
X3	-0.2364	-0.1852	0.1548

Tableau 3.4.7 : Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes.

Les figures 3.4.11, 3.4.12 et 3.4.13 donnent les représentations graphiques de ces corrélations dans les plans 1-2, 1-3 et 2-3.

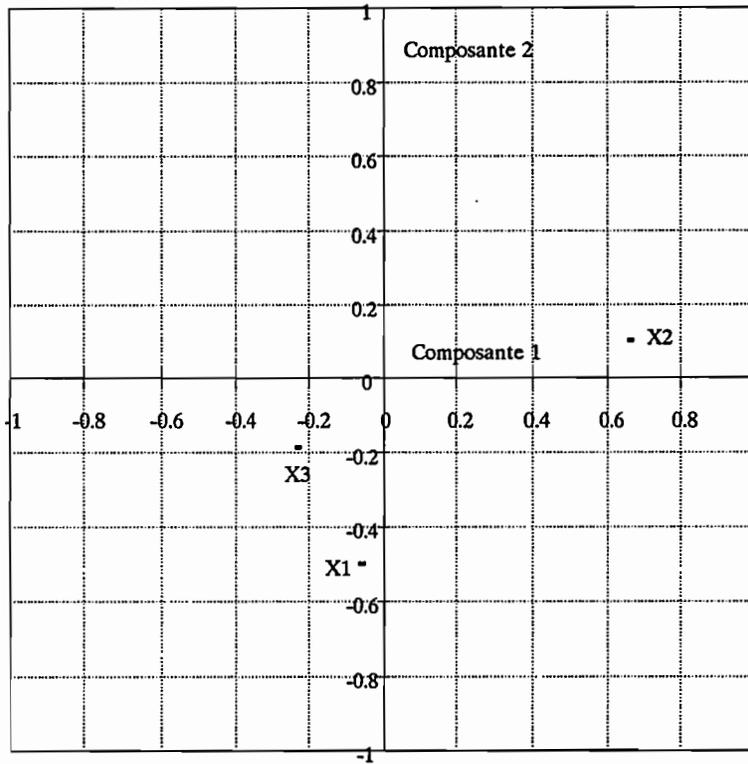


Figure 3.4.11 : Corrélations variables supplémentaires - Composantes 1 et 2.

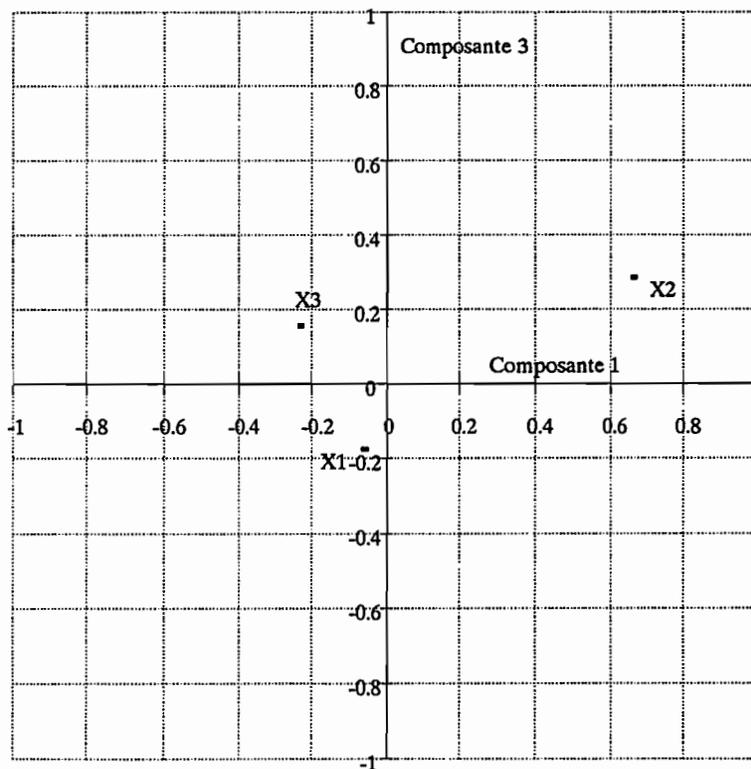


Figure 3.4.12 : Corrélations variables supplémentaires - Composantes 1 et 3.

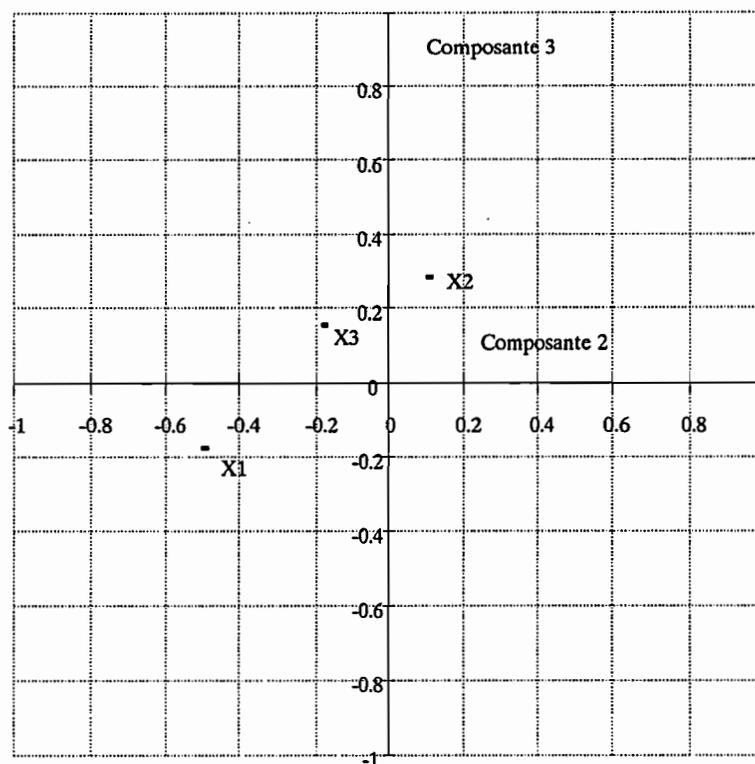


Figure 3.4.13 : Corrélations variables supplémentaires - Composantes 2 et 3.

On note la bonne corrélation entre le paramètre X2 et la composante 1. Le paramètre X1 est celui qui a la meilleure corrélation avec l'axe 2. La corrélation la plus élevée obtenue ici est de 0.66 et concerne X2 et la composante 1. Cette valeur est plus élevée que dans le cas du modèle CREC.

. Modèle MODGLO.

Le tableau 3.4.8 donne les valeurs des corrélations des paramètres avec les trois composantes principales.

Variable supplémentaire	Axe 1	Axe 2	Axe 3
AA	0.1552	0.1417	0.1559
BB	0.2875	-0.0155	0.1415
XIN	0.1204	-0.1753	0.1534
CRT	-0.0414	-0.4228	0.1167
DCRT	0.0689	0.0650	0.0890
C1	-0.1020	0.0857	0.1883
C2	-0.1467	0.0112	0.1486
CQ1	0.2262	-0.3661	-0.2329
CQ2	0.1708	-0.0875	-0.0767
CQ3	0.0665	0.0688	0.1413

Tableau 3.4.8 : Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes.

Les figures 3.4.14, 3.4.15 et 3.4.16 donnent les représentations graphiques dans les plans 1-2, 1-3 et 2-3, de ces corrélations.

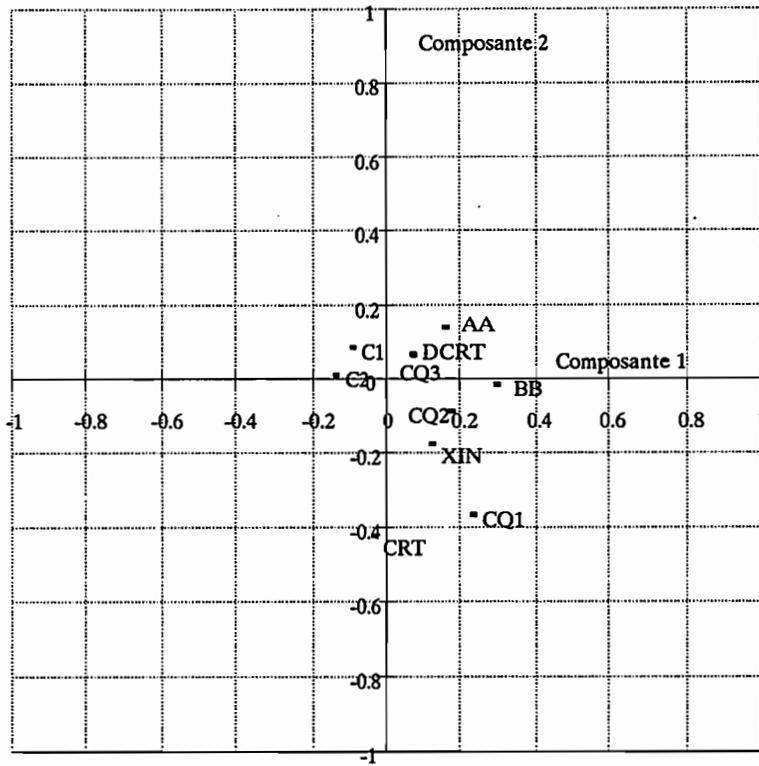


Figure 3.4.14 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 2.

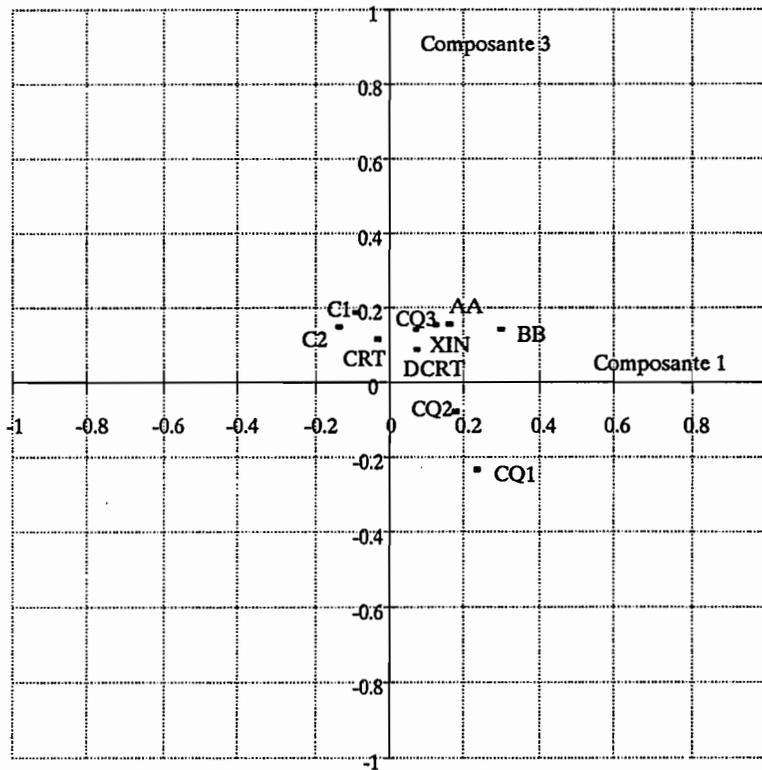


Figure 3.4.15 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 3.

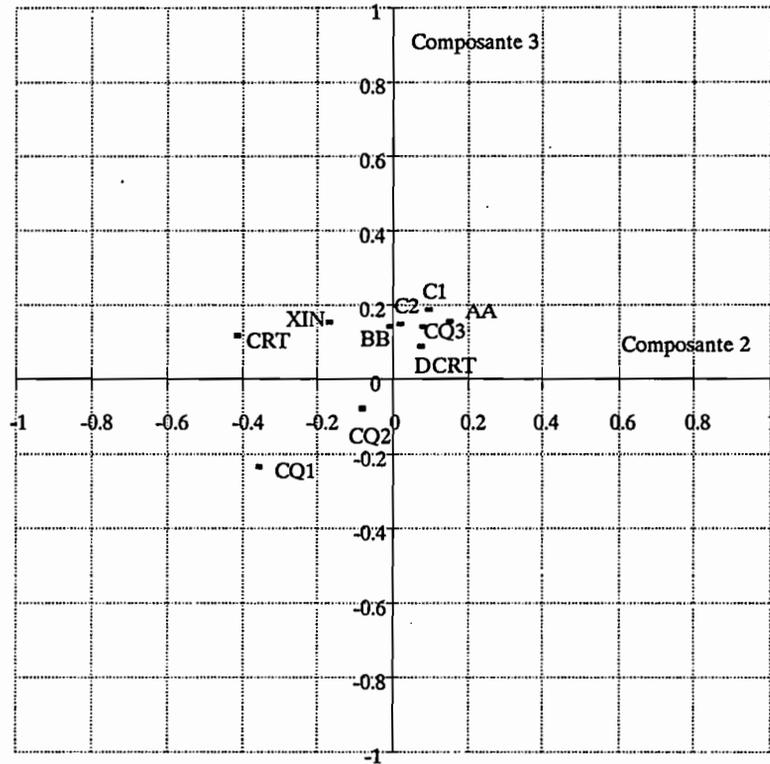


Figure 3.4.16 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 2 et 3.

On constate l'aspect groupé des variables autour du point origine (0,0). Ce nuage de points autour de l'origine est le signe de corrélations faibles et de l'absence de relation entre les paramètres de MODGLO et les principaux axes. Seuls CRT et CQ1 sont un peu plus éloignés que les autres paramètres. En effet, CRT a une corrélation de -0.42 avec l'axe 2 et CQ1 a une corrélation de -0.36 avec l'axe 2 également. En dehors de ces deux paramètres, il ne se dégage aucune tendance, aucune liaison entre les composantes principales définies et les autres paramètres.

L'Analyse en Composante Principale (ACP) menée ici a permis tout d'abord de définir de nouveaux axes à partir des variables de base du système. Parmi ces nouveaux axes, l'axe 1 tend à regrouper et à synthétiser l'information pluviométrique tandis que l'axe 3 concerne les paramètres d'occupation du sol.

A partir de l'analyse des variables de base du système, l'ajout des variables supplémentaires que sont les paramètres des modèles, a permis d'examiner les éventuelles relations entre les nouveaux axes et ces paramètres. Pour les modèles CREC et GR3, les relations semblent plus fortes que celles concernant le modèle MODGLO, sans, toutefois, atteindre des valeurs élevées en terme de corrélation.

3.4.3.2.2. L'AFC.

Afin de pouvoir réaliser l'analyse factorielle des correspondances, il est nécessaire de travailler à partir d'un tableau de contingence. Pour cela, nous avons défini différentes classes (3 à 4 en général) par variable à utiliser. Les bornes de ces classes ont été choisies de manière à avoir à peu près une équirépartition dans les classes.

Le tableau 3.4.9 donne les bornes et les effectifs des classes pour les variables principales du système.

Variable	Bornes et effectifs des classes					
Pluie annuelle	bornes	1000	1150	1300		
	effectifs	9	18	14	18	
Pc6	bornes	250	350			
	effectifs	13	26	20		
Pc7	bornes	450	550			
	effectifs	20	17	22		
Pc8	bornes	650	750	850		
	effectifs	13	14	14	18	
Pc9	bornes	950	1150			
	effectifs	22	20	17		
Pc10	bornes	1050	1250			
	effectifs	23	17	19		
Pr6	bornes	0.25	0.30			
	effectifs	23	20	16		
Pr7	bornes	0.4	0.45			
	effectifs	16	21	22		
Pr8	bornes	0.63	0.68			
	effectifs	21	19	19		
Pr9	bornes	0.84	0.89			
	effectifs	22	17	20		
Pr10	bornes	0.935	0.960			
	effectifs	18	23	18		
Lame Annuelle	bornes	60	125	190		
	effectifs	15	17	14	13	
Superficie	bornes	450	800	1150		
	effectifs	18	15	10	16	
Compacité	bornes	1.22	1.32			
	effectifs	18	20	21		
Savanes	bornes	56	65	74		
	effectifs	12	15	15	17	
Forêt	bornes	3	6.5	10		
	effectifs	19	12	12	16	
Cultures	bornes	8	22	36		
	effectifs	14	12	19	14	
Habitat	bornes	0.25	0.45			
	effectifs	20	16	23		

Tableau 3.4.9 : Bornes et effectifs des classes.

Ces bornes, une fois définies, on peut bâtir le tableau de contingence nécessaire à l'AFC.

Pour l'AFC, comme pour l'ACP, on utilise des variables principales, qui servent à la détermination des axes explicatifs et des variables supplémentaires qu'on vient placer dans ce nouveau système afin de déterminer les relations éventuelles avec les variables principales.

Parmi les variables principales utilisées, on distingue celle dont les classes constituent les colonnes du tableau de contingence et les autres.

Nous avons ici réalisé trois analyses correspondant à l'utilisation de variables principales différentes, permettant de constituer trois "fonds explicatifs" sur lesquels on portera les paramètres des modèles;

Ces trois analyses utilisent les variables suivantes :

. 1ère analyse

Pluie annuelle

Pc6

Pc7

Pc8

Pc9

Pc10

. 2ème analyse

Superficie

Compacité

. 3ème analyse

Savanes

Forêt

Cultures

Habitat

Le tableau 3.4.10 donne un exemple de tableau de contingence pour la 3ème analyse.

	Savanes1	Savanes2	Savanes3	Savanes4
Forêt1	7	7	5	0
Forêt2	0	0	6	6
Forêt3	5	3	0	4
Forêt4	0	5	4	7
Cultures1	0	0	2	12
Cultures2	0	5	2	5
Cultures3	5	3	11	0
Cultures4	7	7	0	0
Habitat1	0	7	7	6
Habitat2	8	0	0	8
Habitat3	4	8	8	3

Tableau 3.4.10 : Tableau de contingence des variables principales - 3^e analyse.

Les figures 3.4.17 et 3.4.18 présentent les tracés correspondant à la 1ère et à la 3ème analyse.

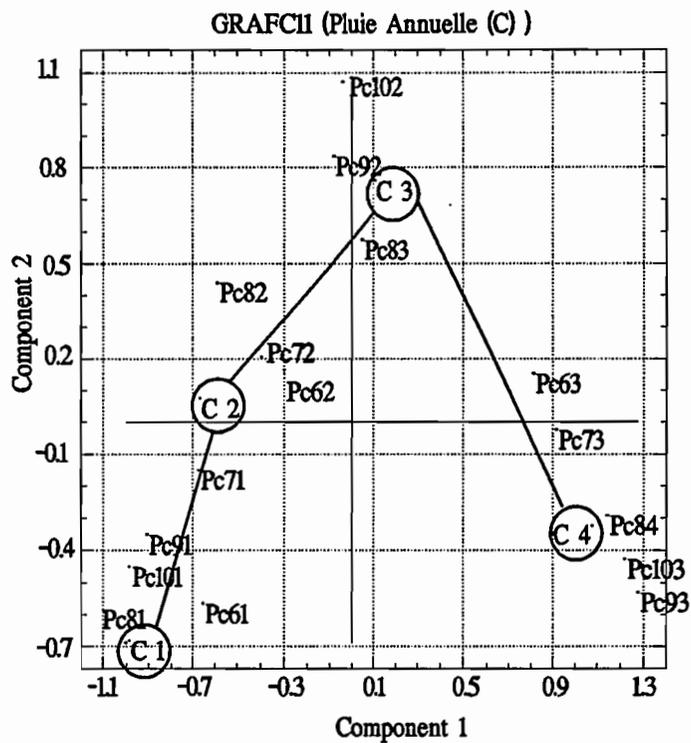


Figure 3.4.17

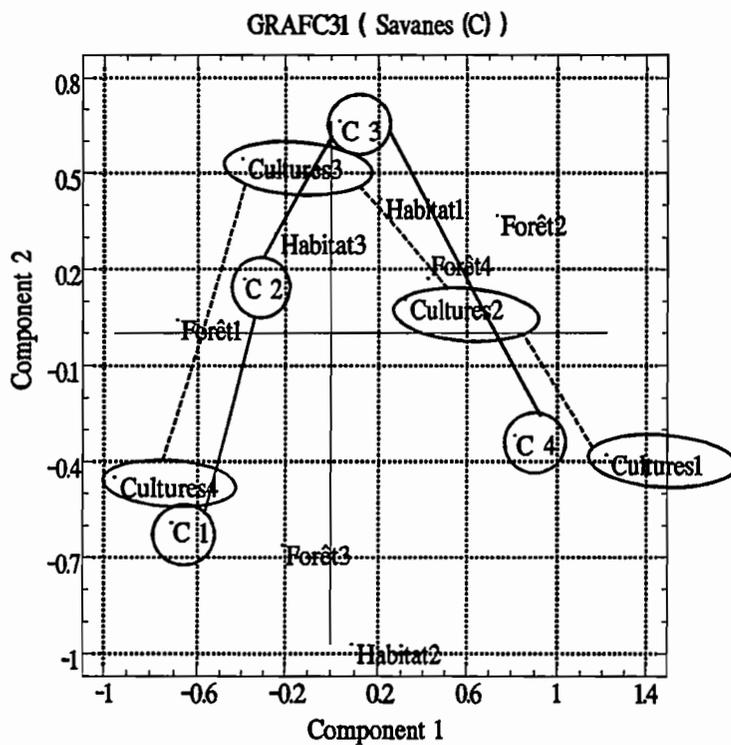


Figure 3.4.18

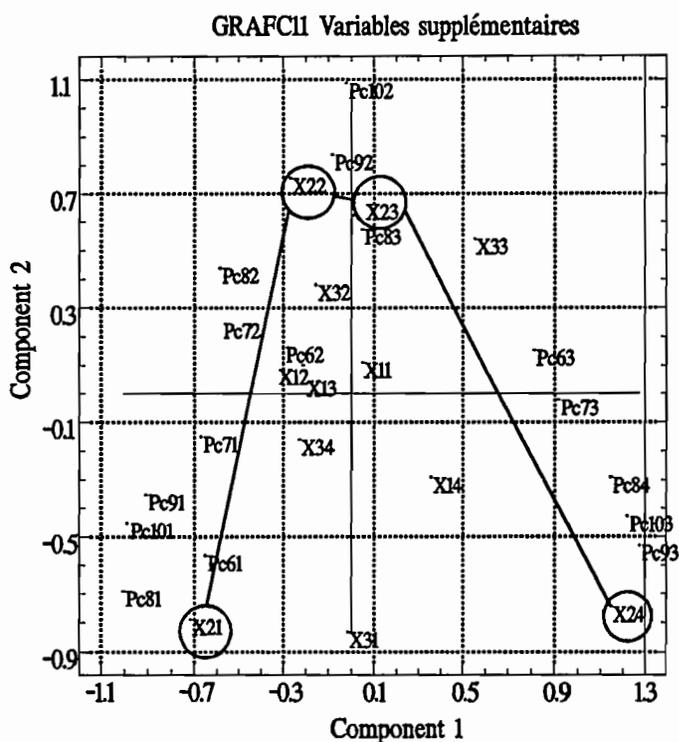


Figure 3.4.19

Pour l'interprétation de l'AFC, on cherche à repérer les variables qui ont des cheminements identiques. Sur la figure 3.4.18, on peut repérer correctement le cheminement similaire de C1, C2, C3, C4 (correspondant aux quatre classes de la variable Savanes) et celui de Culture 1, Culture 2, Culture 3, Culture 4. On remarque également que ces cheminements similaires sont en sens inverse. On repère bien, de cette façon, l'opposition % de Savanes, % de Cultures. Les deux autres variables de cette analyse n'ont pas de cheminement particulier qui puisse les lier à une autre variable.

Pour la première analyse (figure 3.4.17), on note que toutes les variables utilisées, qui ont trait à la pluie, ont le même cheminement, ce qui semble assez logique.

Une fois ces analyses à partir des variables principales réalisées, on a pu ajouter les variables supplémentaires caractéristiques des modèles. La figure 3.4.19 donne l'exemple pour le modèle GR3, utilisant le fond explicatif de l'analyse 1 (Pluies). On peut, sur cette figure, noter le cheminement X21, X22, X23 et X24, qui est similaire à celui des autres variables. Ce cheminement permet donc de lier le paramètre X2 aux caractéristiques des pluies.

En dehors de l'exemple présenté en figure 3.4.19, aucune analyse ne permet de repérer des liaisons entre les paramètres des modèles et les variables principales envisagées.

3.4.3.3. Conclusions

L'utilisation simultanée de l'ACP et de l'AFC permet de souligner quelques rares relations ou oppositions entre les caractères étudiés.

L'ACP permet d'opposer, par le premier axe de l'analyse, les années pluvieuses aux années sèches et par le troisième axe les bassins fortement cultivés aux bassins faiblement cultivés. L'insertion dans l'analyse des paramètres des modèles ne permet que de remarquer la bonne corrélation du paramètre X2 de GR3 avec l'axe 1.

Avec l'AFC, on souligne l'opposition entre le pourcentage de savanes et le pourcentage de cultures sur les bassins versants et on remarque la relation du paramètre X2 de GR3 avec les variables concernant la pluviométrie.

3.4.4. Equations de prédétermination des paramètres des modèles.

En utilisant la répartition aléatoire en échantillon de calage et échantillon de validation, présentée au chapitre 3.4.1, nous avons cherché à mettre au point des équations de régression multiple permettant de calculer les valeurs des paramètres des modèles pour des bassins versants non jaugés (SERVAT et DEZETTER, 1991). Ce chapitre traite de la mise au point de ces équations sur l'échantillon de calage. L'utilisation de ces équations et la détermination de leur validité fait l'objet de la troisième partie.

Nous présenterons ici la mise au point des équations par modèle. Nous commencerons par le modèle CREC, puis le modèle GR3 et enfin le modèle MODGLO.

3.4.4.1. Modèle CREC.

Pour ce modèle, et compte tenu de l'analyse des calages faite au chapitre 3.2, il est nécessaire de calculer sept équations de régression correspondant à chacun des 7 paramètres X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7 réellement utilisés. Les trois paramètres X8, X9 et X10 sont en effet inopérant dans l'ensemble des calages effectués.

Après plusieurs essais réalisés pour les paramètres X1 à X7, il est apparu nécessaire de travailler sur des variables transformées Ln (X1) à Ln (X7) afin d'éviter, lors de l'utilisation des équations, l'obtention de valeurs négatives, inutilisables. Nous avons donc utilisé les variables transformées par le logarithme népérien. Afin de conserver une certaine homogénéité nous avons également transformé les variables explicatives Pluie Annuelle et Pluies cumulées.

La mise au point des équations s'est faite à l'aide du logiciel Statgraphics en utilisant une méthode automatique de sélection des variables, la méthode du Stepwise ascendant. Cette méthode permet de sélectionner une à une les variables qui apportent le plus d'information pour la régression considérée. Elle utilise un test statistique d'entrée et de sortie de la variable dans le "modèle" régressif en cours de calcul. Lorsqu'une variable entre dans le modèle on recalcule l'apport potentiel des autres variables afin de décider de leur éventuelle utilisation.

Toutes les équations présentées dans ce chapitre ont été mises au point par cette méthode.

Au départ du processus, on peut choisir d'autoriser la présence d'une constante dans le modèle régressif final. L'usage de la constante a été systématique en vérifiant toutefois qu'elle était significative (valeur du t de Student $> |1|$). Lorsque cette constante se révélait non significative, l'équation était recalculée sans constante.

Les résultats pour le modèle CREC sont les suivants:

. paramètre X1

Résultats pour Ln (X1).

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	29.170906	11.055552	2.6386
Ln (Pc8)	-5.319984	1.66801	-3.1894

$$R^2 = 0.1944$$

. paramètre X2

Résultats pour Ln (X2)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-0.558704	0.147494	-3.7880
Pr7	0.786557	0.335593	2.3438

$$R^2 = 0.1057$$

. paramètre X3

Résultats pour Ln (X3)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-21977214	5.883506	-3.7354
Ln (Pluie annuelle)	2.553142	0.8342	3.0606
Forêt	-0.049475	0.022298	-2.2188

$$R^2 = 0.2326$$

. paramètre X4

Résultats pour Ln (X4)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	7.765158	2.518633	3.0831
Ln (Pluie annuelle)	-2.556269	0.480193	-5.32344
Ln (Pc6)	1.028837	0.340051	3.0255
Cultures	-0.010677	0.00393	-2.7171

$$R^2 = 0.4793$$

. paramètre X5

Résultats pour Ln (X5)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	9.75271	3.904512	2.4978
Cultures	0.018165	0.006801	2.6710
Ln (Pc8)	-1.838488	0.584154	-3.1473
Pr7	8.912818	1.97594	4.5107

$$R^2 = 0.4483$$

. paramètre X6

Résultats pour X6

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Cultures	0.917767	0.151123	6.0730

$$R^2 = 0.4925$$

. paramètre X7

Résultats pour Ln (X7)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Ln (Pc7)	0.597932	0.033802	17.6895

$$R^2 = 0.8917$$

Au vu de ces équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC, on s'aperçoit que les variables caractéristiques du démarrage de la saison des pluies (Pc6, 7 et 8) entrent souvent dans les équations. De même, les paramètres d'occupation du sol tels que le % de Cultures sont également pris en compte.

Ces variables pluviométriques Pc et Pr peuvent être considérées comme des indicateurs indirects du démarrage de la végétation qui joue un rôle important dans le bilan en eau du bassin versant dans ces régions.

Les valeurs des coefficients de détermination R^2 obtenues varient de 0.89 à 0.11 mais ces valeurs doivent être considérées comme des indicateurs de la qualité de la régression et pas comme une "mesure" comme dans le cas d'une simple régression linéaire. En effet, ces valeurs concernent les variables transformées par les logarithmes et n'ont pas de signification statistique pour les valeurs originales des variables non transformées.

3.4.4.2. Modèle GR3.

Pour ce modèle, trois équations de régression sont mises au point. Elles correspondent à chacun des trois paramètres A, B et C du modèle.

Les résultats sont les suivants :

. paramètre A

Résultats pour Ln (A)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	7.646236	0.380758	20.0816
Pr6	-4.083965	1.280119	-3.1903
Cultures	0.009406	0.003767	2.4970

$$R^2 = 0.3234$$

. paramètre B

Résultats pour Ln (B)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-15.309117	5.489357	-2.7889
Ln(Pc8)	3.302271	0.822618	4.0143
Cultures	-0.031639	0.009552	-3.3123

$$R^2 = 0.4369$$

. paramètre C

Résultats pour Ln (C)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Compacité	2.937567	0.892158	3.2927
Pr7	-12.766351	2.604112	-4.9024
Forêt	-0.113657	0.02708	-4.1970

$$R^2 = 0.8696$$

Pour ce modèle, on constate à nouveau la présence des variables de pluies caractéristiques du début de la saison ainsi que l'utilisation des variables d'occupation du sol.

Les coefficients de détermination R^2 sont en moyenne plus élevés que pour le modèle CREC mais ils sont malgré tout à envisager avec beaucoup de prudence pour les raisons déjà exposées.

3.4.4.3. Modèle MODGLO.

Les paramètres du modèle MODGLO pour lesquels on cherche une équation de prédétermination sont : XIN, AA, BB, CRT, DCRT, C1, C2, CQ1, CQ2 et CQ3.

Lors de la recherche de ces équations de régression, seul le paramètre CRT a permis de calculer une équation dont le coefficient R^2 ne soit pas trop faible. Cette équation est la suivante:

. paramètre CRT

Résultats pour Ln (CRT)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-2.024288	2.491574	-0.8125
LN(Pc9)	1.280819	0.358615	3.5716
Pr6	-4.30339	1.291035	-3.3333

$$R^2 = 0.3543$$

Pour les autres paramètres le coefficient R^2 était proche de 0, de l'ordre de 10^{-2} . Dans certains cas aucune variable n'était sélectionnée par la procédure automatique du Stepwise.

Il n'a donc pas été possible de mettre au point des équations de régression concernant les paramètres du modèle MODGLO.

3.4.4.4. Conclusions.

L'utilisation de la méthode de régression multiple dite Stepwise ascendant a permis de mettre au point des équations de régression multiple de prédétermination des paramètres des modèles. Seuls les modèles CREC et GR3 ont permis le calcul d'équations plausibles, le modèle MODGLO ne l'a pas permis.

Ces équations ont été mises au point sur un échantillon dit de calage de 39 individus. Elles permettent de prédire la valeur des paramètres des modèles CREC et GR3 pour des bassins versants non jaugés à partir de variables telles que la Pluie cumulée au 15 Juin, au 15 Juillet ou des variables d'occupation du sol (% de cultures notamment).

La validité et la pertinence de ces équations doit maintenant être testée pour des individus extérieurs à cet échantillon de calage. C'est l'objet de la troisième partie.

3.5. Conclusions

Au cours de cette deuxième partie, plusieurs points importants sont abordés. Dans un premier temps, une étude comparative de cinq critères numériques de calage, menée sur cinq périodes et à l'aide des trois modèles retenus, a permis de sélectionner le critère de Nash comme étant le mieux adapté, au regard des objectifs de la modélisation entreprise. Cette étude de sélection d'un critère numérique de calage a abouti à la mise au point d'un module d'évaluation comparative des hydrogrammes prenant en compte les objectifs de gestion des ressources en eau du programme ERREAU. La méthodologie de sélection du critère s'inspire de celle présentée par Diskin et Simon (1977) et prends en compte les termes de ce module d'évaluation comparative.

Dans un deuxième temps, les calages des modèles pluie débit sur l'ensemble des données sont présentés. Les calages annuels sont de bonne qualité quel que soit le modèle utilisé. Il faut cependant noter quelques difficultés de calage automatique pour le modèle MODGLO. La faculté d'adaptation de ces modèles est à souligner. En effet, malgré la forte variabilité des données et des bassins (coefficients d'écoulement variant de 0.5 % à 20 %), les modèles reproduisent correctement les hydrogrammes observés. Le nombre des paramètres du modèle ne semble pas intervenir sur la qualité du calage puisqu'on obtient un critère de Nash moyen de 0.2 quel que soit le modèle.

Dans un troisième temps, les essais de validations croisées effectués montrent que les paramètres des modèles pluie débit utilisés ne dépendent pas uniquement des caractéristiques physiques des bassins versants puisque moins de 5 % des validations croisées conduisent à une amélioration de l'hydrogramme calculé. Les calages annuels présentés auparavant sont examinés sous l'angle de la fonction de production et de la fonction de transfert. On remarque les comportements similaires des modèles grâce à l'utilisation de variables intermédiaires de caractérisation de la production et du transfert. Le modèle MODGLO se distingue des deux autres modèles par des temps de transferts indépendants du volume d'eau qui transite par les réservoirs de transfert. Le modèle CREC laisse apparaître une discontinuité dans sa fonction de transfert due au fonctionnement particulier du réservoir H (Cf. figure 2.3.1).

En dernier lieu, après sélection des stations années et après leur répartition en deux échantillons (calage et validation), l'application des techniques classiques d'analyse des données aboutit à la mise au point d'équations de régression multiple de prédétermination des paramètres des modèles CREC et GR3. Ces équations prennent en compte des variables d'occupation du sol (pourcentage de cultures notamment) et des indices pluviométriques caractérisant la répartition des pluies au cours de la saison (Pluie cumulée au 15 juillet, par exemple). Le modèle MODGLO, quant à lui, ne permet pas la mise au point de telles équations de régression.

TROISIEME PARTIE

4. TROISIEME PARTIE

INTRODUCTION

Cette partie concerne l'ensemble des tests et essais effectués afin de préciser la validité et la qualité des équations de régression multiple définies dans la deuxième partie.

On essaie de cerner dans quelle mesure ces équations de prédétermination des paramètres des modèles CREC et GR3 peuvent être utilisées pour la reconstitution d'hydrogrammes à des stations non jaugées.

Un premier point concerne la validation des équations de prédétermination au sens strict. Pour cela on commence par appliquer ces équations sur l'échantillon de calage. On peut ainsi comparer l'hydrogramme décadaire observé, l'hydrogramme calculé par calage du modèle (hydrogramme calé) et l'hydrogramme calculé par prédétermination des paramètres et application du modèle (hydrogramme prédéterminé). Ces comparaisons s'appuient sur des graphiques ainsi que sur les critères de comparaison présentés dans la deuxième partie (IRVC, corrélations, ...). Dans un deuxième temps on applique ces équations de prédétermination sur l'échantillon de validation qui n'a pas servi au calcul de ces équations. Sur cet échantillon, on peut également comparer l'hydrogramme observé, l'hydrogramme calé (les modèles CREC et GR3 ont été calés sur l'ensemble des stations années, Cf. deuxième partie), et l'hydrogramme prédéterminé. On utilise, de la même façon, graphiques et critères numériques (IRVC, corrélations, critères numériques de calage, ...).

Un deuxième point de cette troisième partie concerne la comparaison de cette méthode de calcul d'hydrogrammes décadaires prédéterminés avec une méthode statistique classique de type régression multiple. On pourra ainsi se rendre compte du niveau de qualité des résultats de la méthode en comparant l'hydrogramme observé, l'hydrogramme prédéterminé et l'hydrogramme calculé par cette méthode statistique. On utilisera également à ce niveau les graphiques et les critères numériques définis auparavant, ce qui permettra une évaluation comparative aisée des performances inter-méthodes et inter-modèles.

Le troisième et dernier point concerne les améliorations des modèles CREC et GR3 qui ont été envisagées et testées. Ces nouvelles versions sont utilisées avec la même méthodologie que les modèles originaux et leurs performances sont comparées à ceux-ci.

4.1. Validation des équations de prédétermination

4.1.1. Modèle CREC

Nous nous intéresserons dans un premier temps à l'échantillon ayant servi à calculer les équations de prédétermination, ou échantillon de calage, puis nous examinerons les résultats de l'application à l'échantillon de validation. Le calcul systématique des critères numériques et graphiques d'appréciation permettra de comparer la qualité des hydrogrammes reconstitués de chaque échantillon.

4.1.1.1. Echantillon de calage

L'échantillon ayant servi au calcul des équations de régression multiple pour la prédétermination des paramètres est composé de 39 individus. Ces 39 individus correspondent à 39 stations années choisies au hasard parmi 59, les 20 restantes composant l'échantillon de validation (voir deuxième partie). Le tableau 4.1.1 donne la liste de ces 39 stations-années constituant l'échantillon de calage. Le tableau 4.1.2 rappelle les équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC.

Bassin	Années disponibles
La Bagoé à Guingérini	1982, 1983
La Bagoé à Kouto	1982, 1983
Le Badenou à Rte de M'Bengue	1984, 1985
Le Bandama à Seguekiele	1983, 1985
Le Banifing à Ziemougoula	1978, 1980
Le Douni à Pt 398	1984, 1986
Le Doundian à Wahire	1980 à 1984
Le Kobani à Nimbrini	1977, 1983, 1984
Le Lafigue à Rte de Badikaha	1982 à 1984
Le Mahandiabani à Wahire	1983
Le Sien à Massadougou	1983 à 1985
Le Sien à Nafana-Sienso	1978, 1981, 1984
La Tiemba à Dioulatiedougou	1983, 1984
Le Tiemba à Lille	1982, 1983
Le Yoreloro à Kategue	1982, 1983, 1986
Le Yani à Madji	1980, 1983

Tableau 4.1.1 : Echantillon de calage.

$\begin{aligned} \text{Ln X1} &= 29.171 - 5.320 \text{ Ln Pc8} \\ \text{Ln X2} &= -0.559 + 0.787 \text{ Pr7} \\ \text{Ln X3} &= -21.977 - 0.049 \text{ Forêt} + 2.553 \text{ Ln PA} \\ \text{Ln X4} &= 7.765 - 2.556 \text{ Ln PA} - 0.011 \text{ Cultures} + 1.029 \text{ Ln Pc6} \\ \text{Ln X5} &= 9.753 + 0.018 \text{ Cultures} + 8.913 \text{ Pr7} - 1.838 \text{ Ln Pc8} \\ \text{X6} &= 0.918 \text{ Cultures} \\ \text{Ln X7} &= 0.598 \text{ Ln Pc7} \end{aligned}$

Tableau 4.1.2 : Equations de prédétermination des paramètres du modèle CREC.

On dispose donc pour chaque individu (=station année) de deux jeux de paramètres pour le modèle CREC et d'une série de lames décadaires observées.

A partir des jeux de paramètres, l'un calé, l'autre prédéterminé par les équations du tableau 4.1.2, on exécute le modèle CREC et on obtient deux séries de valeurs, la série de valeurs calées obtenue par application du jeu de paramètres issu du calage de CREC sur les valeurs observées, et la série des valeurs dites prédéterminées issues de l'application du jeu de paramètres prédéterminés du modèle CREC.

C'est de l'observation et de la comparaison de ces trois séries (observée, calée, prédéterminée) qu'on tirera les conclusions concernant la qualité et la validité de cette méthode.

Toutes les comparaisons et tous les calculs d'indices et critères se font sur les lames décadaires, pas de temps souvent utilisé en agronomie. On emploie à ce niveau le même module d'évaluation que celui utilisé lors de l'examen des calages.

4.1.1.1.1. Critères d'appréciation numériques.

Les critères suivants ont été calculés sur les lames décadaires :

- . Corrélation.
- . Différence d'autocorrélation d'ordre 1 (DAC1).
- . Différence d'autocorrélation d'ordre 2 (DAC2).
- . Bilan 1.
- . Bilan 2.
- . IRVC.

Le calcul de chacun de ces critères met en jeu deux séries que l'on veut comparer (en général la série observée et la série à apprécier).

Dans notre cas, nous avons calculé les critères de manière à effectuer trois comparaisons.

- La comparaison de la série calée par rapport à la série observée qui permet d'apprécier l'adéquation du modèle calé (modèle CREC en l'occurrence).

- La comparaison de la série prédéterminée et de la série observée qui permet d'apprécier la qualité des équations de prédétermination en reconstitution d'hydrogramme.

- La comparaison de la série prédéterminée et de la série calée qui permet d'apprécier la qualité de la composition des équations de prédétermination.

Ces équations de prédétermination sont, en effet, censées représenter le modèle calé sans aucun a priori portant sur la qualité initiale de ce calage. Elles devraient donc permettre de reproduire parfaitement l'hydrogramme calé.

Dans les tableaux qui suivront, les valeurs relatives à la comparaison série calée - série observée seront notées C/O ; celles relatives à la comparaison série prédéterminée - série observée, P/O et, enfin, celles relatives à la comparaison série prédéterminée - série calée, P/C.

Le tableau 4.1.3 donne pour chacun des critères et, pour chacune des trois comparaisons, la valeur moyenne, l'écart type, le mode, le minimum et le maximum.

On trouvera, en annexe 4.1.1 les tableaux complets des critères calculés pour chaque individu de l'échantillon de calage.

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O	0.95	0.086	0.103	4.82	30.54	3.72
Moyenne P/O	0.84	0.122	0.177	41.06	57.54	37.08
Moyenne P/C	0.89	0.054	0.108	42.73	50.08	37.92
Ecart type C/O	0.04	0.086	0.098	5.00	22.80	4.22
Ecart type P/O	0.21	0.112	0.152	36.63	37.67	25.47
Ecart type P/C	0.19	0.049	0.103	38.03	37.02	25.82
Mode C/O	0.96	0.049	0.062	0.70	8.00	1.91
Mode P/O	0.92	0.085	0.137	28.20	95.10	26.31
Mode P/C	0.97	0.036	0.055	9.80	73.10	29.95
Mini C/O	0.86	0.014	0.003	0.00	250	0
Mini P/O	0.15	0.002	0.000	0.10	4.00	3.11
Mini P/C	0.25	0.001	0.001	0.90	3.10	4.65
Maxi C/O	0.99	0.582	0.364	21.70	94.50	19.44
Maxi P/O	0.99	0.512	0.587	150.60	150.60	98.91
Maxi P/C	0.99	0.189	0.393	157.50	157.50	98.89

Tableau 4.1.3 : Modèle CREC, Echantillon de calage.
Critères numériques calculés sur les lames décadaires.

On a également calculé sur les valeurs journalières, deux critères numériques. Le critère de Nash qui a servi au calage du modèle et le coefficient de corrélation des débits journaliers. Le tableau 4.1.4 donne, pour les deux critères numériques, les valeurs moyennes, l'écart type, le mode, le minimum et le maximum.

	Nash	Corrélation des débits journaliers
Moyenne C/O	0.1958	0.8924
Moyenne P/O	0.4581	0.7861
Moyenne P/C	0.3555	0.8778
Ecart type C/O	0.1380	0.0812
Ecart type P/O	0.3040	0.2134
Ecart type P/C	0.3743	0.1936
Mode C/O	0.1765	0.9049
Mode P/O	0.3773	0.8687
Mode P/C	0.2405	0.9497
Mini C/O	0.0348	0.7004
Mini P/O	0.1047	0.1176
Mini P/C	0.0245	0.2165
Maxi C/O	0.5078	0.9831
Maxi P/O	1.3913	0.9827
Maxi P/C	1.6603	0.9972

Tableau 4.1.4.

On trouvera en annexe 4.1.2 les tableaux complets des valeurs calculées pour chaque individu de l'échantillon de calage.

De l'observation des tableaux, 4.1.3 et 4.1.4, on peut tirer les enseignements suivants :

- La qualité de l'hydrogramme prédéterminé est tout à fait convenable au regard des objectifs d'évaluation des apports et de gestion des ressources en eau assignés au départ. On obtient, en effet, un IRVC moyen de 37, ce qui signifie que l'erreur moyenne de reconstitution du volume des crues est de 37%. Si l'on tient compte de la précision des mesures sur la pluie et les débits, on peut affirmer que cette erreur reste tout à fait acceptable.

- L'écart type de l'IRVC était de 4.2 sur l'hydrogramme calé ; il passe à 25.5 pour l'hydrogramme prédéterminé. Nous avons donc une plus forte dispersion des valeurs autour de la moyenne, certainement due à l'imprécision relative des équations de prédétermination des paramètres élaborées à l'aide d'une méthode statistique.

- La corrélation moyenne entre lames décadaires observées et prédéterminées est de 0.84. C'est un résultat de bonne qualité, bien que l'écart type de cette valeur soit sensiblement plus élevé dans le cas P/O (0.21) que dans le cas C/O (0.04)

- Dans les valeurs extrêmes, on note une nette diminution des performances quand on passe de l'hydrogramme calé à l'hydrogramme prédéterminé. On a ainsi, par exemple, un IRVC maximum de 99 contre 19 pour l'hydrogramme calé. Il faut noter que ces valeurs extrêmes se rencontrent, la plupart du temps, pour des années à comportement exceptionnel telles que les années 1983 et 1984 qui furent très sèches en Côte d'Ivoire. On peut également noter (Cf. tableaux en annexe 4.1.1 et 4.1.2), pour l'IRVC, que 75% environ des valeurs sont en dessous de 50.

- Les résultats comparant la série prédéterminée à la série calée (P/C) sont sensiblement de la même qualité que ceux comparant la série prédéterminée à la série observée (P/O). L'erreur commise par la méthode consistant à prédéterminer les paramètres de CREC provient donc de la qualité insuffisante des équations de régression multiple permettant de calculer ces mêmes paramètres, puisqu'on fait sensiblement la même erreur lorsqu'on cherche à reproduire l'hydrogramme calé (qui a servi au calcul des équations de régression) que lorsqu'on cherche à reproduire l'hydrogramme observé.

- En ce qui concerne les valeurs journalières, on passe d'une corrélation des débits journaliers de 0.89 pour l'hydrogramme calé, à une valeur de 0.79 pour l'hydrogramme prédéterminé, avec, là encore, une dispersion qui augmente. En effet, l'écart type passe de 0.08 à 0.21.

Le critère de Nash, utilisé lors du calage du modèle, passe d'une valeur moyenne de 0.20 à une valeur moyenne de 0.46 avec un écart type passant de 0.14 à 0.30. Ces résultats traduisent une certaine dégradation de la qualité des hydrogrammes lorsqu'on passe du calé au prédéterminé. Celle-ci reste cependant tolérable comme en attestent les différents critères numériques utilisés.

Pour cet échantillon de calage, si l'on examine de plus près les valeurs d'IRVC pour la comparaison lames prédéterminées- lames observées, nous pouvons relever les faits suivants :

. Onze valeurs sont supérieures à 50 et onze valeurs sont inférieures à 20. L'erreur sur le volume de crue est donc supérieur à 50 dans environ 28% des cas et inférieure à 20 dans également 28% des cas (11/39).

. Dans les onze valeurs supérieures à 50, on trouve quatre individus des années 1983 et 1984, très sèches. Parmi les sept restant, cinq correspondent à un calage particulier de CREC car les valeurs calées des paramètres X5 et/ou X7 sont exceptionnellement fortes. Pour la Douni à Pt 398 en 1986, par exemple, X5 calé vaut 104 et X5 prédéterminé vaut 9, ce qui conduit à des résultats erronés.

En conclusion, la quasi totalité des valeurs d'IRVC supérieures à 50 sont explicables par des conditions climatiques exceptionnelles (années 1983 et 1984) ou par un comportement particulier du modèle en phase de calage qu'il n'est pas possible de reproduire à l'aide des équations de prédétermination établies statistiquement.

4.1.1.1.2. Critères graphiques.

Ce critère, plutôt subjectif puisque qualitatif, reste un critère de choix pour l'hydrologue. Il permet de se rendre compte de la façon dont évolue l'hydrogramme au cours de l'année, de voir si le modèle reproduit correctement les pointes de crues, les montées de crues, les décrues,

Le tracé systématique des graphiques des hydrogrammes sous forme de chronologie de lames décennales observées, calées et prédéterminées a permis de se faire une idée (subjective) de la qualité des hydrogrammes ainsi obtenus.

Les figures 4.1.1, 4.1.2 et 4.1.3 présentent des exemples de tracés décennales pour le Yani à Madji, 1980 (4.1.1), le Sien à Nafana-Sienso, 1978 (4.1.2) et le Lafigue à Rte de Badikaha, 1982 (4.1.3).

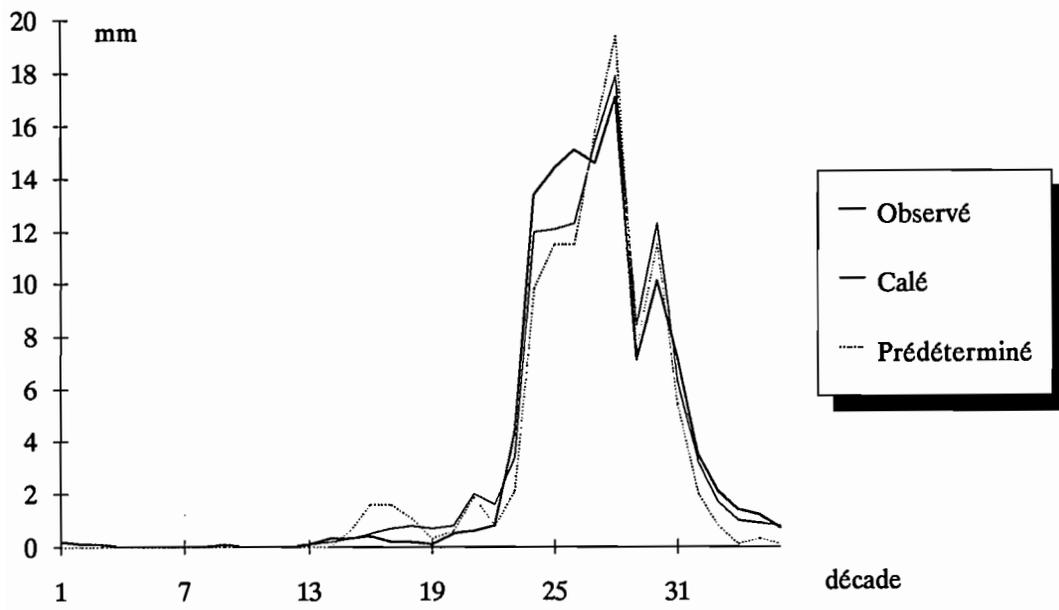


Figure 4.1.1 : Le Yani à Madji, 1980

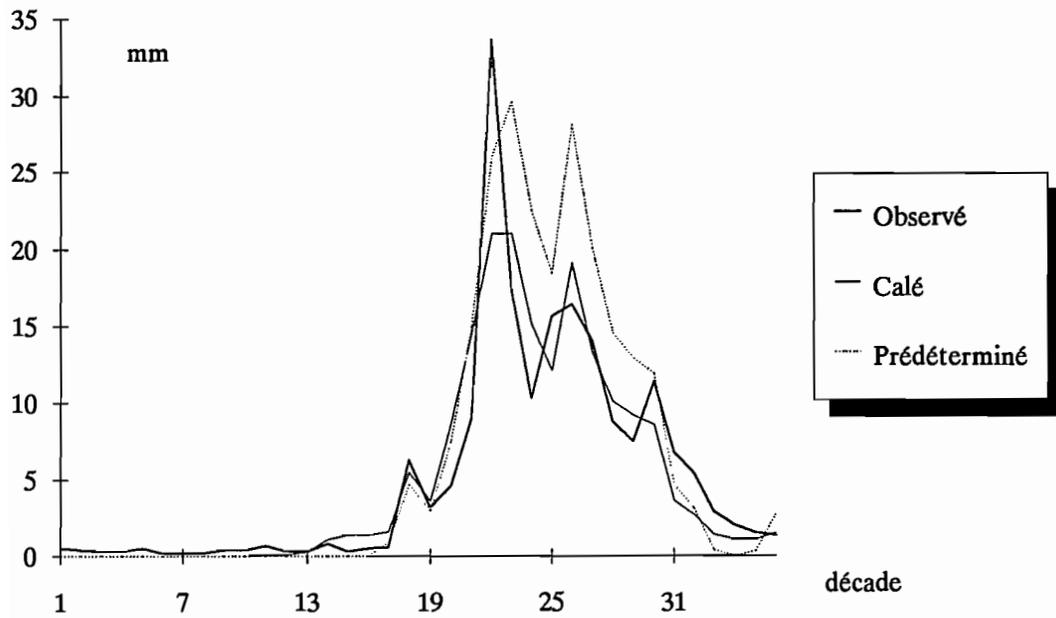


Figure 4.1.2 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1978

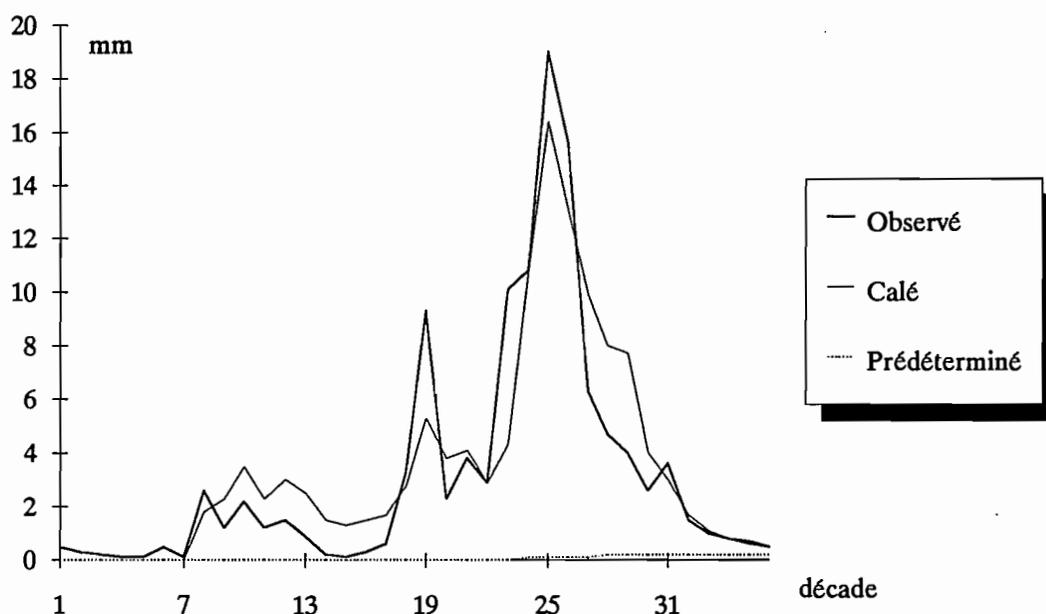


Figure 4.1.3 : Le Lafigue à Rte de Badikaha, 1982

Pour le Yani à Madji, on a un très bon calage (IRVC : 0.82 ; Corrélation : 0.99) et un bon hydrogramme prédéterminé (IRVC : 5.50 ; Corrélation : 0.97).

Pour le Sien à Nafana-Sienso, on a un assez bon calage (IRVC : 2.97 ; Corrélation : 0.91) et un hydrogramme prédéterminé moyen (IRVC : 38.17 ; Corrélation : 0.90).

En ce qui concerne le Lafigue à Rte de Badikaha, on obtient également un bon calage (IRVC : 1.20 ; Corrélation : 0.91) mais un très mauvais hydrogramme prédéterminé (IRVC : 98.91 ; Corrélation : 0.15).

Cette mauvaise performance sur le bassin du Lafigue correspond à l'un des onze individus dont l'IRVC prédéterminé est supérieur à 50. Dans ce cas précis, la mauvaise prédétermination porte essentiellement sur le paramètre X5 qui vaut 87 lors du calage et qui vaut 28 lorsqu'on prédétermine sa valeur.

Cette forte valeur de X5 obtenue lors du calage a pour effet de n'attribuer aucun rôle au réservoir profond G dans la constitution de l'hydrogramme. En passant à une valeur de 28 on fait fonctionner ce réservoir qui stocke alors une importante quantité d'eau, ce qui explique la forme de l'hydrogramme prédéterminé.

Avec ces trois graphiques, nous avons ainsi un aperçu des résultats dans un cas favorable, dans un cas moyen et dans un cas défavorable.

D'une manière générale, si l'on exclut les quelques cas particuliers du type du Lafigue en 1982, les hydrogrammes prédéterminés suivent correctement les hydrogrammes observés. Les tracés sont parfois sous l'hydrogramme observé, parfois au-dessus, sans qu'il soit possible de dégager un comportement général mais restent toujours proches de l'observé dans des proportions acceptables, au regard des objectifs d'évaluation des apports et de gestion des ressources en eau.

4.1.1.1.3. Conclusions.

La méthode qui consiste à prédéterminer les paramètres du modèle CREC à l'aide d'équations de régressions multiples conduit à l'obtention d'hydrogrammes tout à fait plausibles et acceptables pour des aménageurs ou des gestionnaires de projets.

Cette méthode ne nécessite pas de mesure de débits et peut donc être appliquée à des bassins versants non jaugés.

On a vu, dans ce chapitre, que les résultats étaient satisfaisants. Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'ils concernent l'échantillon de calage des équations de régression elle-mêmes. Les équations de prédétermination, calculées pour ces 39 individus, auraient donc du permettre de reproduire "parfaitement" les hydrogrammes calés.

Il faut maintenant examiner le comportement de cette méthode sur des individus autres qui constituent l'échantillon de validation.

4.1.1.2. Echantillon de validation.

L'échantillon de validation est constitué de 20 individus dont la liste figure dans le tableau 4.1.5. Pour analyser le comportement de la méthode sur ces individus, on a procédé au calcul des mêmes critères d'appréciation que ceux examinés pour l'échantillon de calage.

Bassins	Années disponibles
La Bagoé à Kouto	1981, 1984, 1985
Le Badenou à Rte de M'Bengue	1983
Le Bandama à Seguekiele	1981, 1982, 1984
Le Douni à Pt 398	1983
Le Lafigue à Rte de Badikaha	1981
Le Mahandiabani à Wahire	1984
Le Sien à Massadougou	1981, 1986
Le Sien à Nafana-Sienso	1977, 1979, 1980, 1983
La Tiemba à Dioulatiedougou	1981
La Tiemba à Lille	1984
Le Yani à Madji	1981, 1986

Tableau 4.1.5 : Echantillon de validation.

On distinguera pour chacun de ces vingt individus :

- l'hydrogramme observé,
- l'hydrogramme calé, obtenu par le calage de CREC,
- l'hydrogramme prédéterminé, résultat de l'utilisation du modèle CREC avec le jeu de paramètres prédéterminés à l'aide des équations obtenues précédemment.

La comparaison de ces trois hydrogrammes entre eux permet de déterminer la qualité de la méthode de prédétermination des paramètres.

4.1.1.2.1. Critères numériques.

Les critères numériques suivants ont été calculés pour chaque individu :

- . Corrélation des lames décadaires.
- . Différence d'autocorrélation d'ordre 1 (DAC1).
- . Différence d'autocorrélation d'ordre 2 (DAC2).
- . Bilan 1
- . Bilan 2.
- . IRVC.
- . Coefficient de corrélation des débits journaliers.
- . Critère de Nash sur les débits journaliers.

Comme pour l'échantillon de calage, on compare les trois séries entre elles : série observée, série calée, série prédéterminée. On reprend la même notation :

- Comparaison calée - observée C/O.
- Comparaison prédéterminée - observée P/O.
- Comparaison prédéterminée - calée P/C.

Le tableau 4.1.6 donne pour chacune des trois comparaisons, les valeurs moyennes, l'écart type, le mode, le minimum et le maximum obtenus pour les individus de l'échantillon de validation.

On trouvera en annexe 4.1.3 les tableaux complets des critères calculés pour chaque individu.

	Corrélation	DAC 1	DAC 2	Bilan 1	Bilan 2	IRVC
Moyenne C/O	0.94	0.094	0.106	5.41	40.86	3.40
Moyenne P/O	0.70	0.120	0.131	59.98	80.78	40.85
Moyenne P/C	0.77	0.054	0.098	58.01	71.47	41.99
Ecart type C/O	0.04	0.099	0.084	6.03	30.08	2.84
Ecart type P/O	0.30	0.125	0.154	53.37	48.68	29.06
Ecart type P/C	0.29	0.059	0.123	53.21	48.26	27.75
Mode C/O	0.93	0.044	0.069	1.20	26.60	2.24
Mode P/O	0.74	0.035	0.057	40.70	102.00	32.63
Mode P/C	0.85	0.021	0.046	0.90	47.40	30.74
Mini C/O	0.87	0.0001	0.005	0.30	1.30	0.33
Mini P/O	0.01	0.0004	0.008	0.90	4.70	4.73
Mini P/C	0.09	0.003	0.002	0.60	4.50	5.30
Maxi C/O	0.99	0.348	0.281	26.10	120.70	8.93
Maxi P/O	0.98	0.433	0.615	179.50	181.70	91.28
Maxi P/C	0.99	0.225	0.509	176.60	176.60	91.66

Tableau 4.1.6.

Le tableau 4.1.7 donne les valeurs, calculées à partir des débits journaliers, du critère de Nash et du coefficient de corrélation (moyenne, écart type, mode, minimum, maximum).

	Nash	Corrélation des débits journaliers
Moyenne C/O	0.1973	0.8948
Moyenne P/O	0.6267	0.6695
Moyenne P/C	0.5176	0.7654
Ecart type C/O	0.1162	0.0660
Ecart type P/O	0.3496	0.2942
Ecart type P/C	0.4029	0.2864
Mode C/O	0.1635	0.8926
Mode P/O	0.5281	0.7030
Mode P/C	0.3102	0.8493
Mini C/O	0.0195	0.7424
Mini P/O	0.1220	0.0078
Mini P/C	0.0314	0.0766
Maxi C/O	0.4492	0.9906
Maxi P/O	1.3153	0.9737
Maxi P/C	1.3279	0.9919

Tableau 4.1.7

On trouvera en annexe 4.1.4 les tableaux complets pour chaque individu de l'échantillon de validation.

L'observation des tableaux 4.1.6 et 4.1.7 permet de fournir des éléments de réponse quand à la fiabilité et à la qualité de cette méthode.

Il faut rappeler qu'il s'agit d'un échantillon de validation qui, par définition, n'entre pas en jeu dans le calcul des équations statistiques de prédétermination des paramètres.

On peut examiner ces résultats de deux manières différentes :

. Dans l'absolu en comparant l'hydrogramme prédéterminé et l'hydrogramme observé,

. En comparant les résultats obtenus avec l'échantillon de calage, ce qui permet de relativiser ces résultats et d'estimer la perte de qualité lors du passage à la validation. Il faut, dans ce cas, examiner conjointement les tableaux 4.1.3 et 4.1.6 et les tableaux 4.1.4 et 4.1.7.

On peut avancer les constatations suivantes :

- L'IRVC moyen est de 41, on fait donc une erreur moyenne de 41% sur la reconstitution du volume de crue. Compte tenu des incertitudes de mesure de la pluie (et de sa variabilité spatio-temporelle) et des débits, cette erreur moyenne de 41% ne paraît pas excessive au regard des objectifs de départ. On peut mettre en relation cette valeur de 41% avec la valeur obtenue pour l'échantillon de calage qui est de 37%. La baisse de performance des équations de prédétermination des paramètres peut alors être qualifiée de minime.

En observant ces mêmes valeurs d'IRVC pour les hydrogrammes calés (C/O) de l'échantillon de calage et de validation, on s'aperçoit que les valeurs sont légèrement meilleures (moyenne 3.4 contre 3.7, écart type 2.8 contre 4.2) pour l'échantillon de validation. Ceci pourrait expliquer une partie de la baisse de performance lors du passage à la validation, bien que cet écart soit trop faible pour être réellement significatif.

L'écart type de l'IRVC des hydrogrammes prédéterminés (notés P/O) est également en légère augmentation (il passe de 27 à 29) lorsque l'on passe de l'échantillon de calage à l'échantillon de validation. Ce fait peut être le reflet de la présence, dans l'échantillon de validation, de certains cas extrêmes tels que le Douni en 1983. On a, en effet, pour cet individu, les valeurs extrêmes suivantes :

- . Corrélation des lames décadaires 0.01
- . IRVC 91.3

De tels cas extrêmes ont une influence évidente sur la moyenne et l'écart type des indices d'appréciation de la qualité de l'hydrogramme. Or il correspondent, la plupart du temps, à des années exceptionnelles, très sèches, comme l'année 1983.

- La corrélation des lames décadaires est de 0.70, la valeur obtenue pour l'échantillon de calage était de 0.84. L'écart type passe de 0.21 à 0.30. Cette diminution, accompagnée de l'augmentation de l'écart type peut également être en partie expliquée par la présence de certains cas extrêmes. En effet, pour l'échantillon de validation, la valeur minimale de la corrélation décadaire est de 0.01 et la maximale de 0.98 alors que, pour l'échantillon de calage, on obtenait mini : 0.15 et maxi : 0.99.

L'examen de ces critères numériques d'adéquation indique donc une baisse de performance des équations de prédétermination lors du passage de l'échantillon de calage à l'échantillon de validation. Cette dégradation de la qualité de l'hydrogramme prédéterminé, bien que sensible, reste tout à fait acceptable dans l'optique qui était la nôtre.

En effet, cette méthode permet de fournir une chronologie de lames décadaires à l'exutoire d'un bassin versant non jaugé en commettant une erreur moyenne de 41% sur le volume annuel des crues.

4.1.1.2.2. Critères graphiques.

Pour tous les individus de l'échantillon de validation nous avons tracé les lames décadaires observées, calées et prédéterminées. A l'examen de ces graphiques, on constate la présence des cas extrêmes tels que le Douni en 1983 déjà détecté précédemment. Hormis ces cas extrêmes, les hydrogrammes prédéterminés, sans être très précis, ont des allures correctes qui permettent d'envisager, par exemple, leur utilisation lors de l'étude de projets à vocation agricole (irrigation, dimensionnement de petites retenues).

Les figures 4.1.4, 4.1.5 et 4.1.6 présentent des exemples de tracés d'hydrogrammes sous forme de chronologies de lames décadaires.

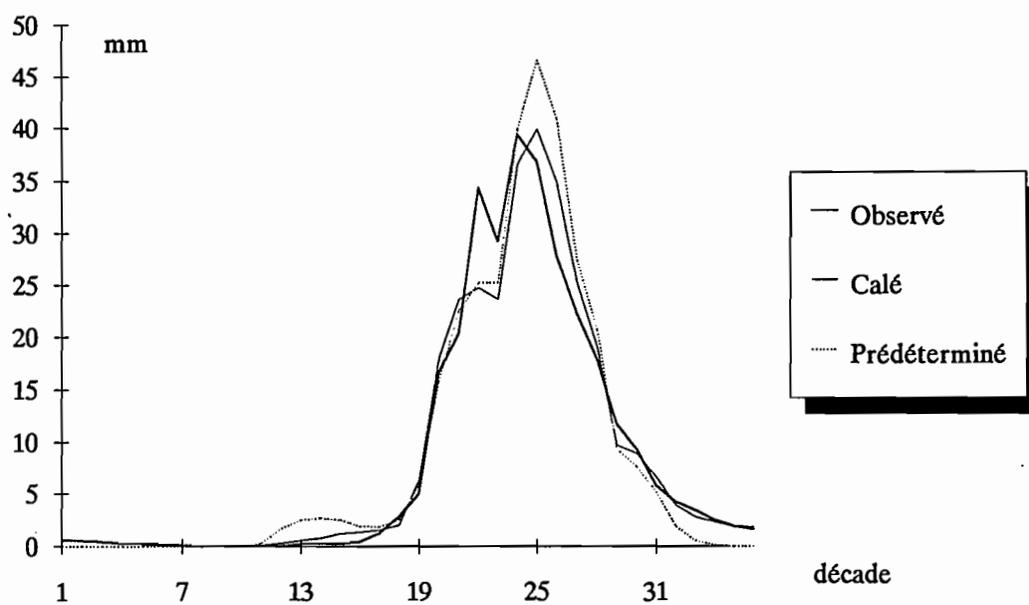


Figure 4.1.4 : La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981

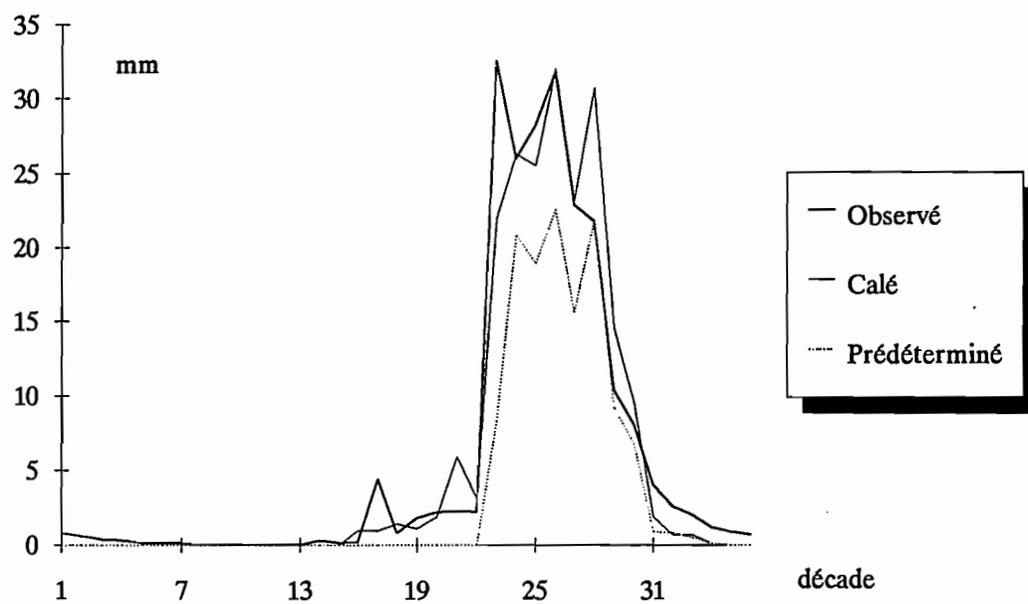


Figure 4.1.5 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1977

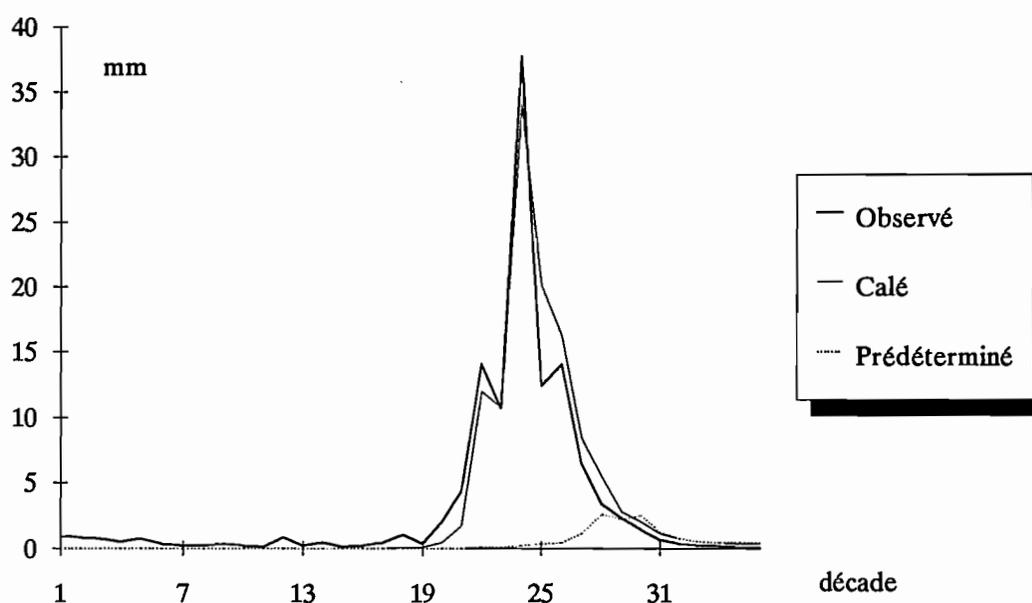


Figure 4.1.6 : La Douni à Pt 398, 1983

La figure 4.1.4 présente le tracé pour la Tiemba à Dioulatiedougou en 1981. Pour cette validation, les critères numériques sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.97	0.33	0.96	0.079
P/O	0.96	6.7	0.95	0.122

Dans ce cas, le calage est de bonne qualité (le modèle est donc capable de simuler le fonctionnement de cette année) et l'hydrogramme prédéterminé est également de bonne qualité.

La figure 4.1.5 présente le tracé pour le bassin du Sien à Nafana-Sienso en 1977. Les critères numériques sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.96	0.95	0.92	0.164
P/O	0.92	34.75	0.87	0.326

Dans ce cas, le calage est de bonne qualité mais on obtient un hydrogramme prédéterminé moyen, qui ignore, en particulier, la première crue observée et le début de la phase de montée.

La figure 4.1.6 présente le tracé pour le Douni à Pt 398 en 1983. Les critères sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.96	3.85	0.89	0.211
P/O	0.01	91.28	0.008	1.134

Dans ce cas, le calage est moyen et l'hydrogramme prédéterminé est de mauvaise qualité. Quand on examine ce cas de plus près on s'aperçoit que les valeurs des paramètres calculés pour les équations de prédétermination sont très éloignés de celles calées.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Jeu calé	0.0687	0.5019	0.0014	0.0347	3.22	20.48	21.78
Jeu prédéterminé	0.0050	0.8038	0.0143	0.0084	12.15	40.38	38.54

Le jeu de paramètres prédéterminé induit un fonctionnement de modèle complètement différent de celui qu'il a avec le jeu calé. On s'aperçoit également que le coefficient d'écoulement de ce bassin pour l'année 1983 est de 11.4%. Ce coefficient d'écoulement est plutôt élevé par rapport à l'ensemble des bassins et il est très élevé pour l'année 1983 qui fut très sèche dans toute la Côte d'Ivoire.

Ce cas extrême illustre bien le fait que les équations de prédétermination des paramètres sont des équations statistiques auxquelles sont associées des marges d'erreurs et des incertitudes inévitables.

4.1.1.2.3. Conclusions.

En conclusion, l'examen des critères numériques et des critères graphiques de l'échantillon de validation montre que les équations statistiques de prédétermination des paramètres du modèle CREC permettent d'aboutir à des hydrogrammes décennaires de qualité acceptable. Ces hydrogrammes décennaires, calculables pour des bassins versants non jaugés, sont utilisables lors de la phase d'étude de projets à vocation agricole par exemple. Ils permettent de se faire une idée approximative des apports décennaires à l'exutoire des bassins versants en vue du dimensionnement d'ouvrages à vocation agricole tels que des petites retenues collinaires.

4.1.2. Modèle GR3

Comme pour le modèle CREC, nous considérerons tout d'abord l'échantillon ayant servi à élaborer les équations de prédétermination des paramètres ou échantillon de calage puis nous nous intéresserons aux résultats de l'application des équations à l'échantillon de validation. Pour l'ensemble des individus de ces deux échantillons, on procèdera au calcul systématique des critères graphiques et numériques qui permettront d'apprécier la qualité des hydrogrammes reconstitués.

4.1.2.1. Echantillon de calage.

L'échantillon ayant servi au calcul des équations de régression multiple pour la prédétermination des paramètres est composé de 39 individus. Ces 39 individus correspondent à 39 stations-années choisies au hasard parmi 59, les 20 restantes composent l'échantillon de validation (voir deuxième partie). Le tableau 4.1.1 (paragraphe 4.1.1.1) donne la liste de ces 39 stations années qui constituent l'échantillon de calage. Le tableau 4.1.8 rappelle les équations de prédétermination des paramètres du modèle GR3.

$\begin{aligned} \text{Ln A} &= 7.752 + 0.0095 \text{ Cultures} - 4.450 \text{ Pr6} \\ \text{Ln B} &= -16.308 + 0.031 \text{ Cultures} + 3.453 \text{ Ln Pc8} \\ \text{Ln C} &= 2.957 \text{ Compacité} - 0.114 \text{ Forêt} - 12.721 \text{ Pr7} \end{aligned}$

Tableau 4.1.8 : Equations de prédétermination des paramètres du modèle GR3.

On dispose donc pour chaque individu (station année) de deux jeux de paramètres relatifs au modèle GR3. On procède de la même façon que pour le modèle CREC et on a donc à comparer trois séries de lames décadaires ; la série observée, la série calée et la série prédéterminée.

C'est de l'observation et de la comparaison de ces trois séries que l'on tirera les conclusions concernant la qualité et la validité des équations de prédétermination des paramètres du modèle GR3.

On utilisera, ici, le même module d'évaluation que précédemment. Ainsi, on examinera, tout d'abord, les critères numériques puis les critères graphiques.

4.1.2.1.1. Critères numériques.

Les mêmes critères numériques que précédemment ont été calculés sur les chronologies annuelles des lames décadaires.

Les trois séries sont comparées entre elles et on utilise la même notation que dans le paragraphe 4.1.1 :

- . C/O comparaison série calée-série observée.
- . P/O comparaison série prédéterminée-série observée.
- . P/C comparaison série prédéterminée-série calée.

Le tableau 4.1.9 donne pour chacun des critères et pour chacune des trois comparaisons les valeurs moyennes, l'écart type, le mode, le minimum et le maximum.

	Corrélation	DAC 1	DAC 2	Bilan 1	Bilan 2	IRVC
Moyenne C/O	0.94	0.084	0.129	9.99	39.10	4.78
Moyenne P/O	0.91	0.096	0.135	24.82	51.45	27.61
Moyenne P/C	0.98	0.038	0.040	23.02	35.36	25.85
Ecart type C/O	0.04	0.076	0.112	8.71	25.46	4.93
Ecart type P/O	0.06	0.079	0.116	21.65	32.87	36.70
Ecart type P/C	0.02	0.042	0.039	22.11	26.17	30.75
Mode C/O	0.94	0.051	0.072	1.50	28.10	3.01
Mode P/O	0.92	0.061	0.092	6.90	36.40	19.95
Mode P/C	0.99	0.024	0.030	12.40	24.40	14.78
Mini C/O	0.85	0.002	0.008	0.10	1.70	0.13
Mini P/O	0.75	0.003	0.002	0	1.80	0.23
Mini P/C	0.90	0	0	0.50	0.50	0.81
Maxi C/O	0.99	0.252	0.385	39.90	101.30	21.28
Maxi P/O	0.99	0.294	0.390	82.20	138.30	232.37
Maxi P/C	0.99	0.185	0.204	74.70	102.20	190.30

Tableau 4.1.9 : Modèle GR3. Echantillon de calage.
Critères numériques calculés sur les lames décadaires.

On trouvera en annexe 4.1.5 les tableaux complets des critères pour chaque individu de l'échantillon de calage.

Nous avons également calculé, sur les valeurs journalières, deux critères numériques. Le critère de Nash, qui a servi au calage du modèle, et le coefficient de corrélation des débits journaliers.

Le tableau 4.1.10 donne, pour ces deux critères, les valeurs moyennes, l'écart type, le mode, le minimum et le maximum.

	Nash	Corrélation des débits journaliers
Moyenne C/O	0.2058	0.89
Moyenne P/O	0.4028	0.86
Moyenne P/C	0.2909	0.97
Ecart type C/O	0.1339	0.14
Ecart type P/O	0.4775	0.10
Ecart type P/C	0.7087	0.04
Mode C/O	0.1514	0.8856
Mode P/O	0.3038	0.8774
Mode P/C	0.1386	0.9809
Mini C/O	0.0263	0.47
Mini P/O	0.0823	0.64
Mini P/C	0.0098	0.87
Maxi C/O	0.5161	0.98
Maxi P/O	3.1620	0.98
Maxi P/C	4.5353	0.99

Tableau 4.1.10. Modèle GR3. Echantillon de calage.
Critères numériques calculés sur les débits journaliers.

On trouvera en annexe 4.1.6 les tableaux complets des critères calculés pour chaque individu de l'échantillon de calage.

De l'observation des tableaux 4.1.9 et 4.1.10, nous pouvons tirer les enseignements suivants :

. La qualité des hydrogrammes prédéterminés est acceptable au regard des objectifs initiaux de la modélisation. On obtient en effet un IRVC moyen de 28, soit une erreur moyenne de 28% sur le volume des crues pour l'hydrogramme prédéterminé. Si l'on tient compte des erreurs de mesure de la pluie et des débits, cette erreur de 28% ne paraît pas du tout excessive.

. L'IRVC moyen pour l'hydrogramme calé (noté C/O) est de 4.8 avec un écart type de 4.9. Pour l'hydrogramme prédéterminé (noté P/O) on passe à une moyenne de 28 avec un écart type de 37. On a donc une plus forte dispersion des valeurs autour de la moyenne, vraisemblablement due aux équations statistiques de prédétermination des paramètres. En examinant de plus près les valeurs d'IRVC pour chaque individu de l'échantillon de calage (voir en annexe 4.1.5) on trouve une valeur d'IRVC à 232. Cette valeur contribue pour une bonne part à l'augmentation de l'écart type. En effet si on la supprime, on obtient un IRVC moyen de 22 et un écart type de 15.

D'autre part, pour cet échantillon de calage et pour des valeurs relatives à l'hydrogramme prédéterminé (P/O), on a trois valeurs d'IRVC supérieures à 50 soit 7.7% et 18 valeurs inférieures à 20 soit 46.2%.

Parmi ces trois valeurs d'IRVC supérieures à 50, deux concernent des années très sèches et donc des lames annuelles écoulées très faibles (21 et 52 mm).

. Si l'on examine les valeurs caractérisant la comparaison de l'hydrogramme calé et de l'hydrogramme prédéterminé, on note qu'elles sont très proches des valeurs relatives à la comparaison de l'hydrogramme prédéterminé et de l'hydrogramme observé.

Cette proximité indique que l'erreur commise par la méthode consistant à prédéterminer les paramètres du modèle provient de la qualité insuffisante des équations statistiques de régression multiple puisque l'on commet la même erreur si l'on cherche à reproduire l'hydrogramme calé (qui a servi au calcul des équations de régression) que si l'on cherche à reproduire l'hydrogramme observé.

En ce qui concerne les critères calculés sur les hydrogrammes journaliers (tableau 4.1.10), le critère de Nash moyen passe de 0.21 à 0.40 avec l'écart type qui augmente de 0.13 à 0.48 ; le coefficient de corrélation des débits journaliers passe de 0.89 à 0.86 avec l'écart type qui diminue de 0.14 à 0.10.

La méthode consistant à prédéterminer les trois paramètres de GR3 conduit à l'obtention d'hydrogrammes de bonne qualité comme en attestent les différents critères numériques présentés ici. Comme avec tout résultat statistique, on constate la présence d'individus "hors norme" donnant des résultats en dehors des intervalles de confiance.

4.1.2.1.2. Critères graphiques.

De la même façon que pour les échantillons du modèle CREC, nous avons procédé, ici, au tracé systématique des hydrogrammes observés, calés et prédéterminés.

L'examen des tracés décennaires montre des hydrogrammes prédéterminés de bonne qualité. D'une manière générale, l'allure des hydrogrammes est toujours respectée ; les erreurs proviennent souvent d'un mauvais calage (l'hydrogramme prédéterminé suit bien l'hydrogramme calé mais celui-ci ne reproduisait pas correctement l'hydrogramme observé) ou de la présence d'une pluie en début de saison qui n'a pas donné d'écoulement.

Les figures 4.1.8, 4.1.9 et 4.1.10 présentent le tracé des hydrogrammes décennaires de trois stations années de l'échantillon de calage.

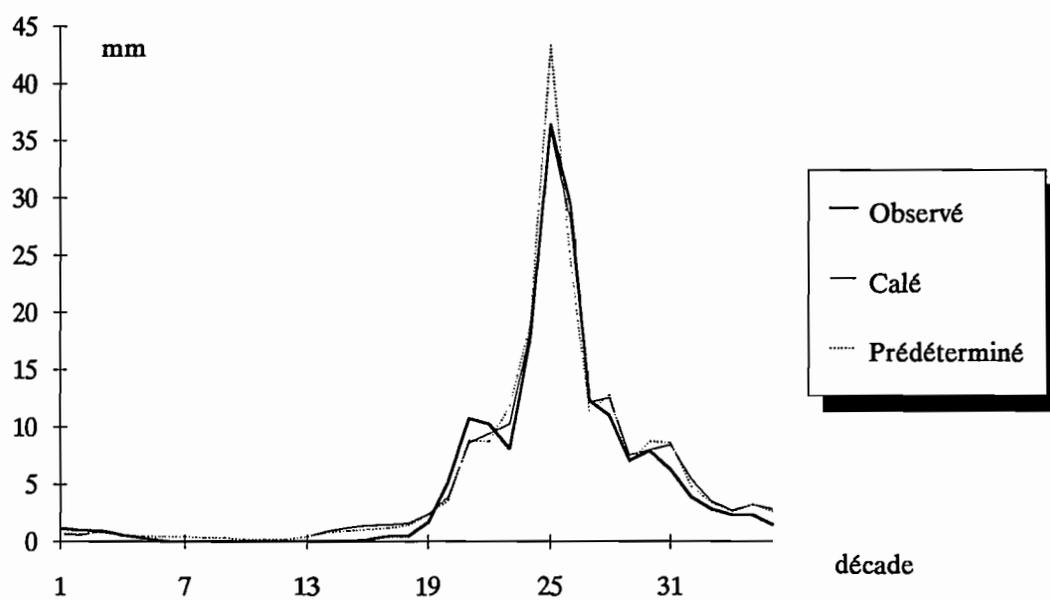


Figure 4.1.8 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980.

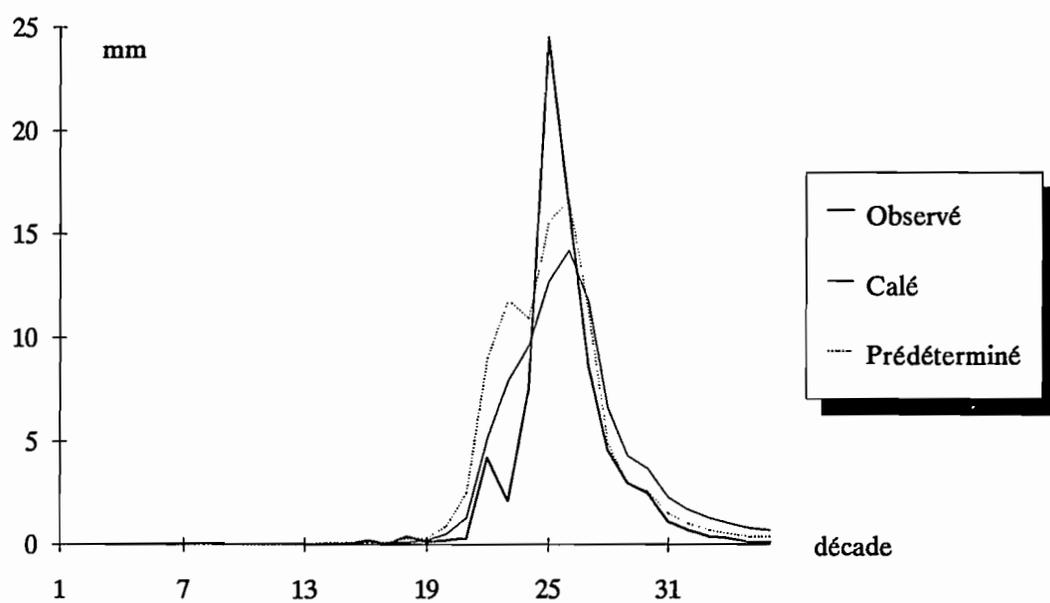


Figure 4.1.9 : Le Sien à Massadougou, 1984.

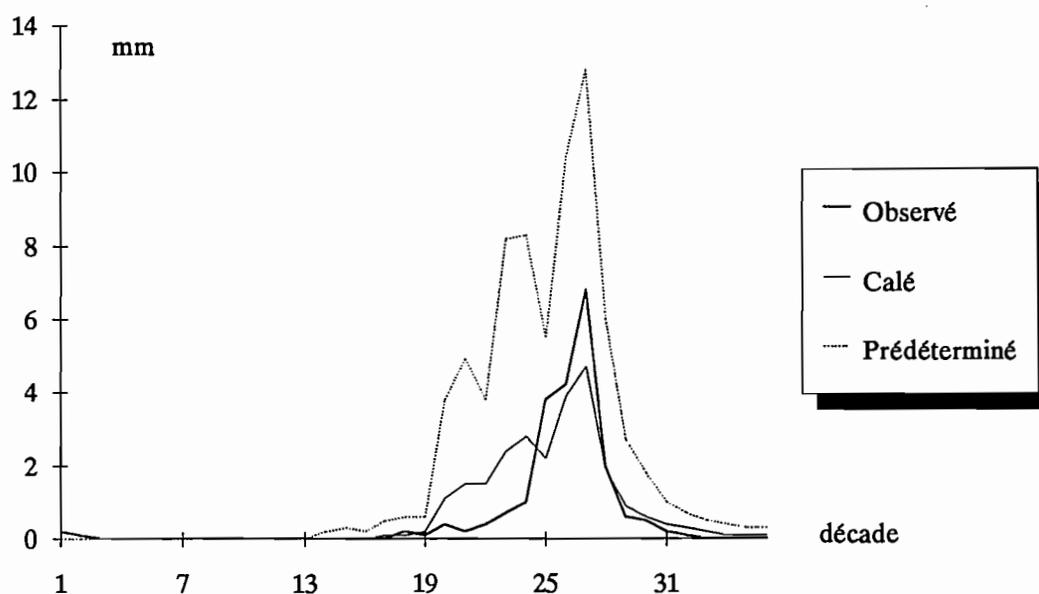


Figure 4.1.10 : Le Yani à Madji, 1983.

La figure 4.1.8 concerne le Banifing à Ziemougoula en 1980, les critères numériques pour ce tracé sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.99	0.7	0.99	0.026
P/O	0.98	2.5	0.94	0.14

Dans ce cas, on obtient un très bon hydrogramme calé et un très bon hydrogramme prédéterminé.

La figure 4.1.9 concerne le Sien à Massadougou en 1984, les critères numériques pour ce tracé sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.88	5.3	0.84	0.302
P/O	0.87	20.8	0.82	0.347

On a donc un hydrogramme calé de bonne qualité et un hydrogramme prédéterminé moyen. L'examen du graphique permet de se rendre compte de la mauvaise reproduction de la pointe de crue qui passe inaperçue à l'examen des critères numériques.

La figure 4.1.10 concerne le Yani à Madji en 1983, les critères numériques pour ce tracé sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.88	14.5	0.85	0.295
P/O	0.84	252.4	0.75	3.162

Dans ce cas, le calage est moyen et l'hydrogramme prédéterminé est de mauvaise qualité. On peut, néanmoins, remarquer que la lame décadaire maximale observée cette année là est de 7 mm et que la lame prédéterminée maximale est de 14mm. Ce mauvais comportement de la méthode a lieu ici sur une année exceptionnellement sèche (lame annuelle observée : 21.8 mm ; coefficient d'écoulement : 2.5%), ce qui permet de relativiser l'échec constaté en matière de prédétermination d'hydrogramme.

4.1.2.1.3. Conclusions.

L'examen des tracés des lames décadaires et des critères numériques d'appréciation a permis de quantifier et d'apprécier les résultats obtenus lors de l'utilisation des équations de prédétermination des paramètres avec l'échantillon de calage.

Ces résultats sont satisfaisants et conduisent à la production d'une série de lames décadaires de bonne qualité au regard des objectifs initiaux de la modélisation utilisée pour cette étude. Il ne faut toutefois pas perdre de vue qu'il s'agit ici de l'échantillon de calage. Les équations de prédétermination des paramètres se devaient donc de reproduire au mieux les paramètres de ces stations années, autorisant ainsi des hydrogrammes prédéterminés de bonne qualité.

4.1.2.2. Echantillon de validation.

L'échantillon de validation est composé de 20 individus dont la liste est donnée dans le tableau 4.1.11. Pour cet échantillon, on utilise le même processus de calcul et de test que pour les échantillons précédents.

On dispose donc de trois séries de lames décadaires à comparer : la série observée, la série calée et la série prédéterminée. On examine, dans un premier temps, les critères numériques puis les critères graphiques permettant de comparer ces trois séries.

4.1.2.2.1. Critères numériques.

Les mêmes critères numériques que précédemment ont été calculés sur les chronologies annuelles des lames décadaires.

Les trois séries sont comparées entre elles et on utilise la même notation que précédemment. Le tableau 4.1.12 donne, pour chacun des critères, la valeur moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum de l'échantillon de validation.

	Corrélation	DAC 1	DAC 2	Bilan 1	Bilan 2	IRVC
Moyenne C/O	0.92	0.105	0.145	10.45	45.43	6.67
Moyenne P/O	0.89	0.114	0.149	39.32	67.74	28.52
Moyenne P/C	0.98	0.041	0.048	38.61	52.00	27.92
Ecart type C/O	0.06	0.107	0.142	8.95	28.97	7.89
Ecart type P/O	0.06	0.123	0.146	60.89	57.62	35.18
Ecart type P/C	0.02	0.048	0.059	61.22	58.63	34.88
Mode C/O	0.90	0.041	0.095	6.10	110.7	3.37
Mode P/O	0.89	0.042	0.080	12.6	59.4	9.16
Mode P/C	0.98	0.014	0.027	10.1	20.9	10.23
Mini C/O	0.77	0.004	0.001	1.70	3.20	0.19
Mini P/O	0.75	0.003	0.017	0.60	4.60	0.11
Mini P/C	0.93	0.002	0.005	0.60	2.80	0.41
Maxi C/O	0.99	0.337	0.526	34.90	110.70	33.17
Maxi P/O	0.99	0.353	0.580	266.40	268.60	128.36
Maxi P/C	0.99	0.187	0.252	251.00	251.00	127.92

Tableau 4.1.12 : Modèle GR3. Echantillon de validation.
Critères numériques calculés sur les lames décadaires.

On trouvera en annexe 4.1.7 les tableaux complets avec les valeurs pour chaque individu.

Pour cet échantillon de validation, on a également procédé au calcul de critères numériques sur les séries de débits journaliers. Ces critères sont présentés dans le tableau 4.1.13.

	Nash	Corrélation des débits journaliers.
Moyenne C/O	0.244	0.87
Moyenne P/O	0.559	0.83
Moyenne P/C	0.447	0.96
Ecart type C/O	0.145	0.09
Ecart type P/O	0.514	0.10
Ecart type P/C	0.715	0.04
Mode C/O	0.235	0.87
Mode P/O	0.389	0.80
Mode P/C	0.159	0.96
Mini C/O	0.039	0.62
Mini P/O	0.069	0.60
Mini P/C	0.004	0.89
Maxi C/O	0.624	0.98
Maxi P/O	2.298	0.98
Maxi P/C	2.955	0.99

Tableau 4.1.13 : Modèle GR3. Echantillon de validation.
Critères numériques calculés sur les débits journaliers.

On trouvera en annexe 4.1.8 les tableaux complets avec les critères pour chaque individu.

A l'observation des tableaux 4.1.12 et 4.1.13, on peut noter :

. L'IRVC moyen passe de 7 à 29 et son écart type de 8 à 35. Cet IRVC moyen de 29 indique de bons résultats pour cet échantillon de validation. En effet, il signifie que lorsque l'on prédétermine les paramètres de GR3 pour ces 20 individus, l'erreur moyenne commise sur les lames décennales calculées n'est que de 29%.

Cette erreur de 29% est plus qu'acceptable si l'on prend en compte les éléments suivants :

- . L'imprécision de la connaissance de la pluie sur les bassins et, à un degré moindre, des débits.
- . Il s'agit, ici, d'un échantillon de validation qui représente donc des bassins versants non jaugés ; en effet, la méthode de prédétermination des paramètres n'utilise aucune mesure de débits.

. l'écart type de l'IRVC augmente et vaut 35 ; sa valeur maximale est assez élevée puisqu'elle est de 128. En examinant, de plus près, les valeurs de l'IRVC pour chaque individu on s'aperçoit que quatre de ces valeurs sur vingt, soit 20%, sont supérieures à 50 et 12 valeurs sur 20, soit 60% sont inférieures à 20. Si l'on exclut la valeur très forte de 128, la moyenne passe à 22, l'écart type à 26 et le maximum à 82.

. La corrélation des lames décennales, ainsi calculées, avec les lames observées est bonne puisque la moyenne est de 0.89 avec un maximum à 0.99.

. La comparaison des résultats obtenus pour cet échantillon de calage montre que l'on n'observe pas de baisse de la performance des équations. En effet, l'IRVC moyen de l'échantillon de calage était de 27, il vaut maintenant 29. La qualité des hydrogrammes prédéterminés de l'échantillon de validation est donc comparable à celle des hydrogrammes prédéterminés de l'échantillon de calage.

. En ce qui concerne les critères calculés sur les débits journaliers, le critère de Nash moyen vaut 0.56 et la corrélation moyenne des débits journaliers est de 0.83. Ces valeurs indiquent un comportement correct du modèle au pas de temps journalier.

Comme l'attestent les critères numériques utilisés ici, la méthode consistant à prédéterminer les paramètres du modèle GR3 par les équations du tableau 4.1.8 permet d'obtenir des séries de lames décennales de bonne qualité, calculables sur des bassins versants non jaugés. La qualité de ces séries permet d'envisager leur utilisation dans le cadre de l'étude de projets d'aménagement.

4.1.2.2.2. Critères graphiques.

Les tracés des lames décennales observées, calées et prédéterminées ont été effectués pour l'ensemble des individus de l'échantillon de validation.

L'étude de ces tracés révèle, ainsi, une bonne qualité générale des hydrogrammes décennales prédéterminés. L'allure générale de l'hydrogramme est respectée, les tracés sont parfois au-dessus parfois au-dessous de l'hydrogramme observé sans qu'il soit possible de déterminer une tendance générale.

Les figures 4.1.11, 4.1.12 et 4.1.13 présentent des exemples de ces tracés de lames décennales.

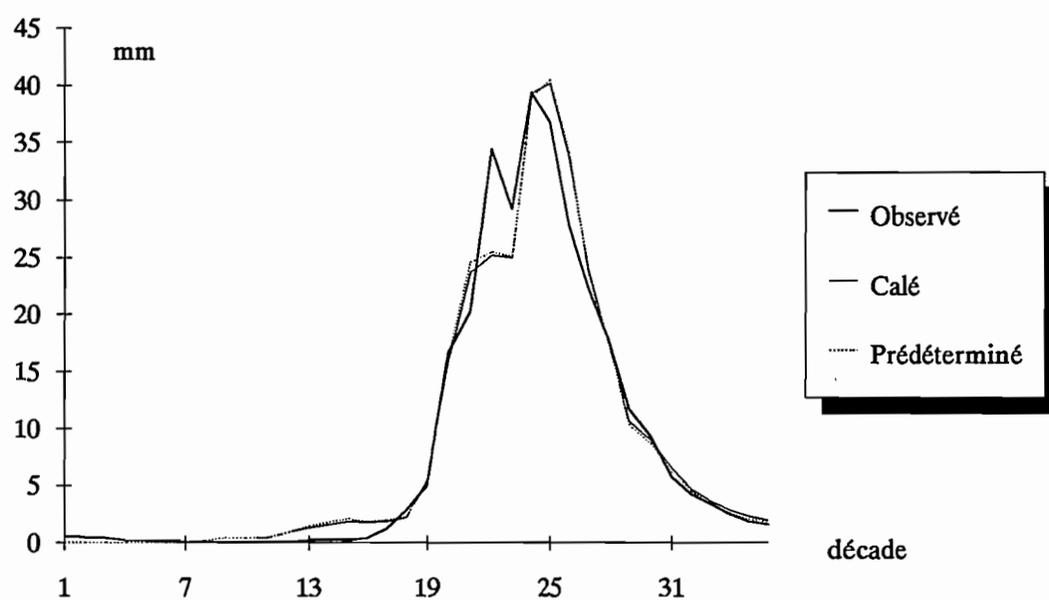


Figure 4.1.11 : La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981.

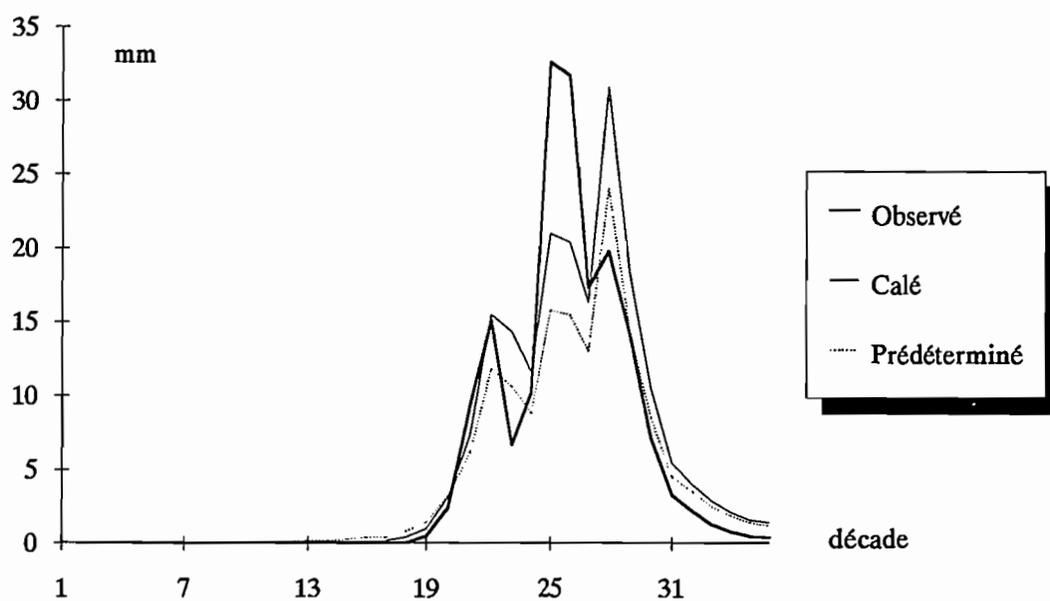


Figure 4.1.12 : La Tiemba à Lille, 1984.

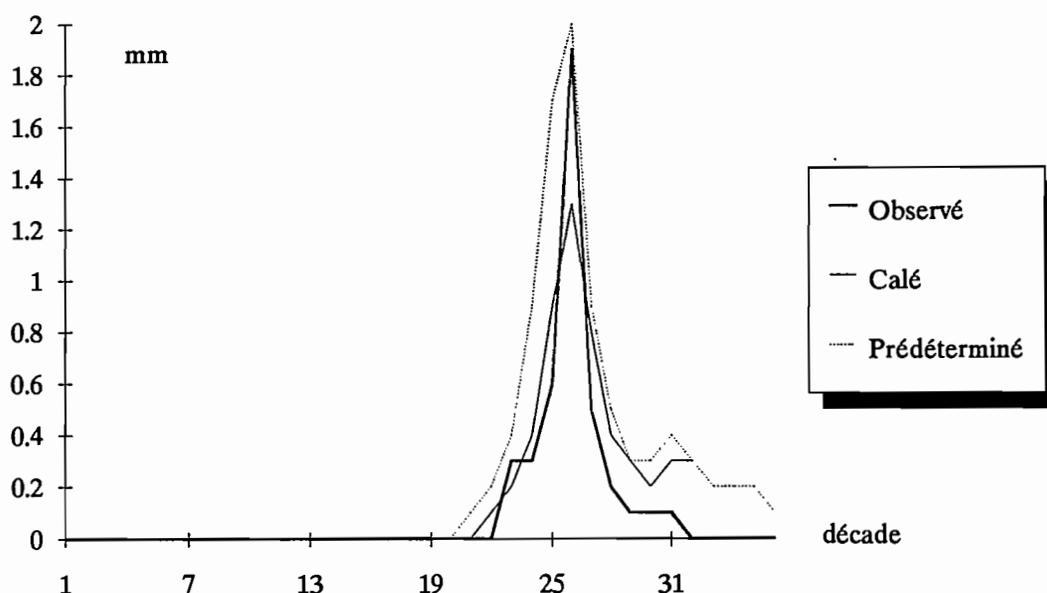


Figure 4.1.13 : Le Badenou à Rte de M'Bengue, 1983.

La figure 4.1.11 concerne la Tiemba à Dioulatiedougou en 1981, les critères numériques pour ce tracé sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.98	0.52	0.97	0.066
P/O	0.98	0.11	0.97	0.069

Pour cette station année on a un très bon hydrogramme calé et également un très bon hydrogramme prédéterminé.

La figure 4.1.12 concerne la Tiemba à Lille en 1984, les critères numériques pour ce tracé sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.90	1.91	0.88	0.235
P/O	0.90	20.28	0.87	0.287

Dans ce cas, on a un hydrogramme calé de bonne qualité bien que la crue principale soit sous estimée et la crue secondaire surestimée. Ce phénomène induit une compensation au niveau de L'IRVC qui est très bon mais il est bien repéré au niveau du critère de Nash et au niveau des coefficients de corrélation. L'hydrogramme prédéterminé est moyen, on peut remarquer qu'il suit mieux l'allure de l'hydrogramme calé que celle de l'hydrogramme observé. Ceci est logique puisque les équations de prédétermination ont été calculées sur des hydrogrammes calés avec le modèle GR3.

La figure 4.1.13 concerne le Badenou à Rte de M'Bengue en 1983, les critères numériques pour ce tracé sont les suivants :

	Corrélation décadaire	IRVC	Corrélation journalière	Nash
C/O	0.89	15.00	0.87	0.243
P/O	0.89	82.50	0.83	0.711

Dans ce cas, l'hydrogramme calé est de qualité moyenne et l'hydrogramme prédéterminé de mauvaise qualité, au regard des critères numériques. L'observation du tracé permet de se rendre compte que ces deux hydrogrammes sont quasiment égaux et qu'ils concernent, de plus, des volumes dérisoires, l'année 1983 étant très sèche. La lame décadaire maximale est, en effet, de 2 mm pour un bassin de 1800 km² !

L'examen de tous ces tracés décadaires permet donc de relativiser les résultats fournis pour les critères numériques. Nous pouvons ainsi affirmer, à la suite de cette étude, que les hydrogrammes décadaires prédéterminés sont de bonne qualité.

4.1.2.2.3. Conclusions.

L'examen approfondi des critères graphiques et numériques d'appréciation de l'adéquation des hydrogrammes prédéterminés a montré la qualité de ces hydrogrammes.

Cette méthode de prédétermination des paramètres du modèle GR3 permet donc d'obtenir des séries de lames décadaires pour des bassins versants non jaugés en zone de savane soudanaise.

Ces séries de lames décadaires permettent de quantifier les apports à l'exutoire des bassins versants et la fiabilité de ces séries permet d'envisager leur utilisation lors de l'étude de projets d'aménagement (études d'apports, irrigation, petites retenues, etc..).

4.1.3. Comparaison CREC GR3.

Ce paragraphe va nous permettre de comparer les performances des modèles CREC et GR3, placés dans des conditions d'utilisation identiques.

Nous commencerons par examiner les performances des équations de prédétermination des paramètres appliqués à l'échantillon de calage, puis, dans un deuxième temps, nous examinerons les performances des deux modèles, leur paramètres étant prédéterminés, appliqués à l'échantillon de validation.

4.1.3.1. Echantillon de calage.

Afin de comparer les performances de CREC et de GR3 sur l'échantillon de calage, il faut comparer les valeurs fournies par les tableaux 4.1.3, 4.1.4 et par les tableaux 4.1.9 et 4.1.10. On a regroupé dans le tableau 4.1.14 les valeurs moyennes, sur l'échantillon de calage de quelques valeurs numériques concernant la comparaison des hydrogrammes prédéterminés et des hydrogrammes observés (notés P/O) pour les deux modèles.

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	37	0.84	0.4581	0.79
P/O GR3	28	0.91	0.4028	0.86

Tableau 4.1.14.

Si l'on utilise le modèle CREC, l'IRVC moyen est de 37, il passe à 28 lorsque l'on utilise le modèle GR3.

Cette différence de presque 10 % est significative et indique la supériorité du modèle GR3 : au sens de l'IRVC, le modèle GR3 reproduit mieux les hydrogrammes décadaires observés que le modèle CREC. L'examen des autres critères numériques vient confirmer cette meilleure performance, les différences entre les critères concernant GR3 et les critères concernant CREC sont, en effet, toujours dans le sens profitable à GR3 et sont, de plus, significatives. Cette différence provient sans aucun doute de la meilleure élaboration des équations de prédétermination des paramètres du modèle GR3 (Cf deuxième partie). En effet, les équations statistiques qui permettent de calculer les paramètres du modèle GR3 sont de meilleure qualité que celles permettant de calculer les paramètres du modèle CREC. Le modèle CREC ayant un nombre de paramètres plus élevé, des phénomènes de compensation entre les paramètres peuvent se produire lors du calage ce qui rend l'élaboration des équations de régression multiple plus difficile et plus floue.

On trouve ici posée la question de la juste paramétrisation des modèles et de l'indépendance des paramètres entre eux. L'expérience montre que dans ce cas, et pour l'échantillon de calage, **un modèle à trois paramètres se comporte mieux qu'un modèle à sept paramètres.**

L'observation des tracés décadaires confirme les déductions faites lors de la comparaison des critères numériques. En effet, l'hydrogramme prédéterminé par GR3 est généralement plus proche de l'observé que

celui prédéterminé par CREC. La plupart du temps, l'hydrogramme prédéterminé par GR3 a une dynamique comparable à celle de l'hydrogramme observé, ce qui n'est pas toujours le cas de CREC.

Les figures 4.1.14 et 4.1.15 présentent des exemples de ces tracés décadaires.

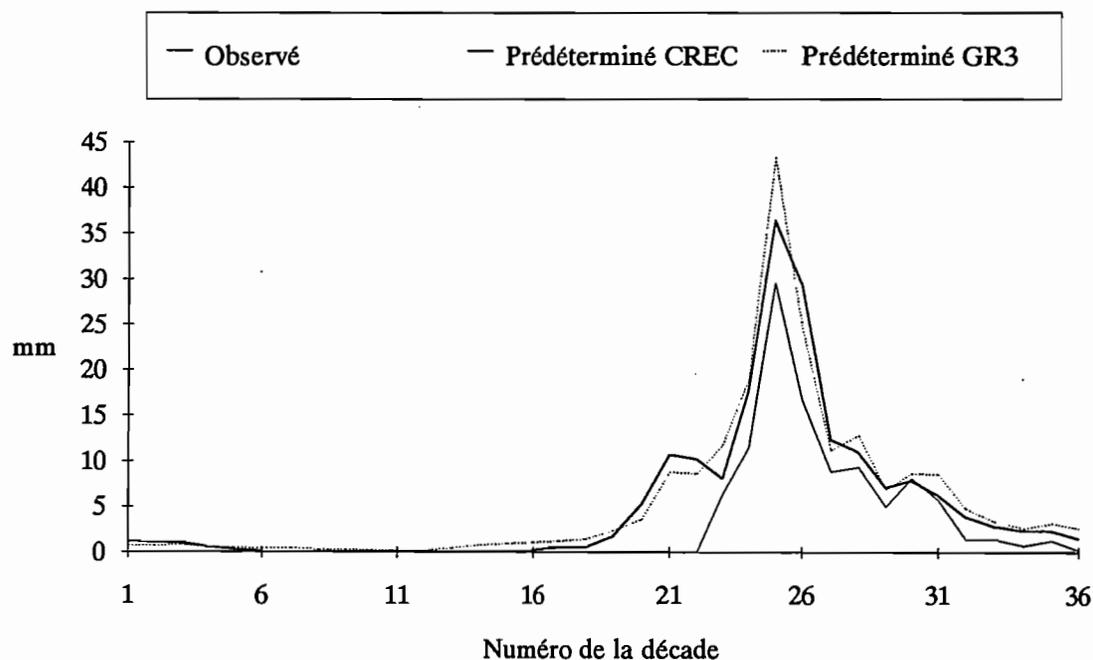


Figure 4.1.14 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980.

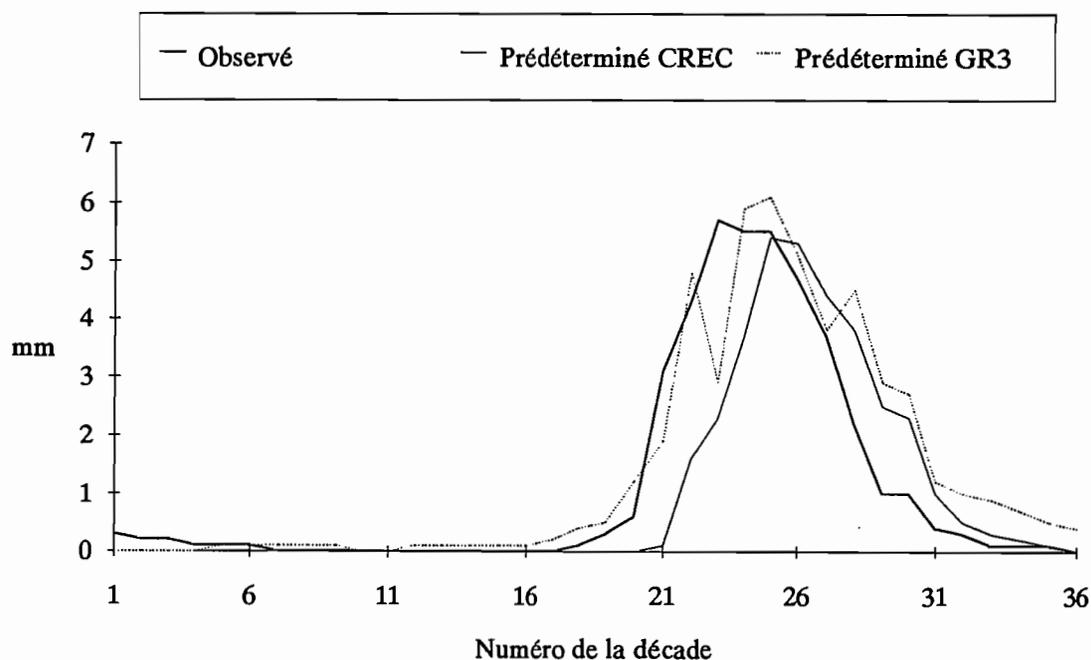


Figure 4.1.15 : Le Sien à Massadougou, 1983.

La figure 4.1.14 concerne le Banifing à Ziemougoula en 1980, les critères numériques relatifs aux tracés de CREC et de GR3 sont les suivants :

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
CREC	39.35	0.94	0.300	0.89
GR3	2.47	0.98	0.136	0.94

La figure 4.1.15 concerne le Sien à Massadougou en 1983, les critères numériques relatifs à ces tracés sont les suivants :

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
CREC	16.49	0.83	0.377	0.80
GR3	12.50	0.91	0.284	0.87

D'une manière générale, sur l'échantillon de calage, les hydrogrammes décadaires fournis par l'utilisation du modèle GR3 sont de meilleure qualité que ceux fournis par l'utilisation du modèle CREC. Ce résultat est sans doute dû à la meilleure structure des équations de prédétermination des paramètres engendrée par une meilleure paramétrisation du modèle avec, notamment, un nombre de paramètres faibles et indépendants les uns des autres.

4.1.3.2. Echantillon de validation.

La comparaison des performances des deux modèles appliqués à l'échantillon de validation peut se faire en examinant les valeurs des tableaux 4.1.6 et 4.1.7 pour CREC, 4.1.12 et 4.1.13 pour GR3. Nous avons regroupé dans le tableau 4.1.15 les valeurs moyennes, sur l'échantillon de validation, de quelques critères numériques concernant la comparaison des hydrogrammes prédéterminés et observés (notés P/O) pour les deux modèles.

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	41	0.70	0.627	0.67
P/O GR3	29	0.89	0.559	0.83

Tableau 4.1.15.

La comparaison des critères numériques obtenus pour chaque modèle et notamment la comparaison des valeurs moyennes obtenues pour l'échantillon telle qu'elle est présentée dans le tableau 4.1.15, permet de quantifier la différence entre les modèles CREC et GR3.

La valeur moyenne de l'IRVC est de 41 lorsque l'on utilise le modèle CREC, elle est de 29 lors de l'utilisation du modèle GR3. Cette différence de 12, qui correspond à une erreur de 12% sur le volume des crues, indique la supériorité du modèle GR3 au sens de ce critère numérique. L'examen des autres valeurs moyennes des critères numériques du tableau 4.1.15 indique également un meilleur comportement du modèle GR3 utilisé dans ces conditions. La corrélation sur les valeurs journalières et sur les valeurs

décadaires est meilleure et le critère de Nash est plus faible (on cherche à le minimiser lors du calage d'un modèle).

L'observation plus détaillée des critères numériques conduit également à donner l'avantage au modèle GR3. Ainsi, par exemple, le nombre de valeurs du critère de Nash supérieures à 1 est de 5/20 pour le modèle CREC contre 2/20 pour le modèle GR3. On peut aussi noter la valeur de l'écart type des coefficients de corrélation décadaire qui vaut 0.06 pour le modèle GR3 contre 0.30 pour le modèle CREC.

Comme nous l'avons précisé pour l'échantillon de calage, le nombre réduit de paramètres du modèle GR3 ainsi que leur indépendance est à l'origine de la structure plus favorable des équations de régression multiple de prédétermination des paramètres. Cette structure plus fiable et de meilleure qualité conduit bien sûr à de meilleurs résultats lorsque l'on utilise ces équations sur l'échantillon de validation.

Pour tous les individus de cet échantillon, nous avons également tracé les lames décadaires observées, prédéterminées par CREC et prédéterminées par GR3. Les figures 4.1.16 et 4.1.17 présentent des exemples de ces tracés.

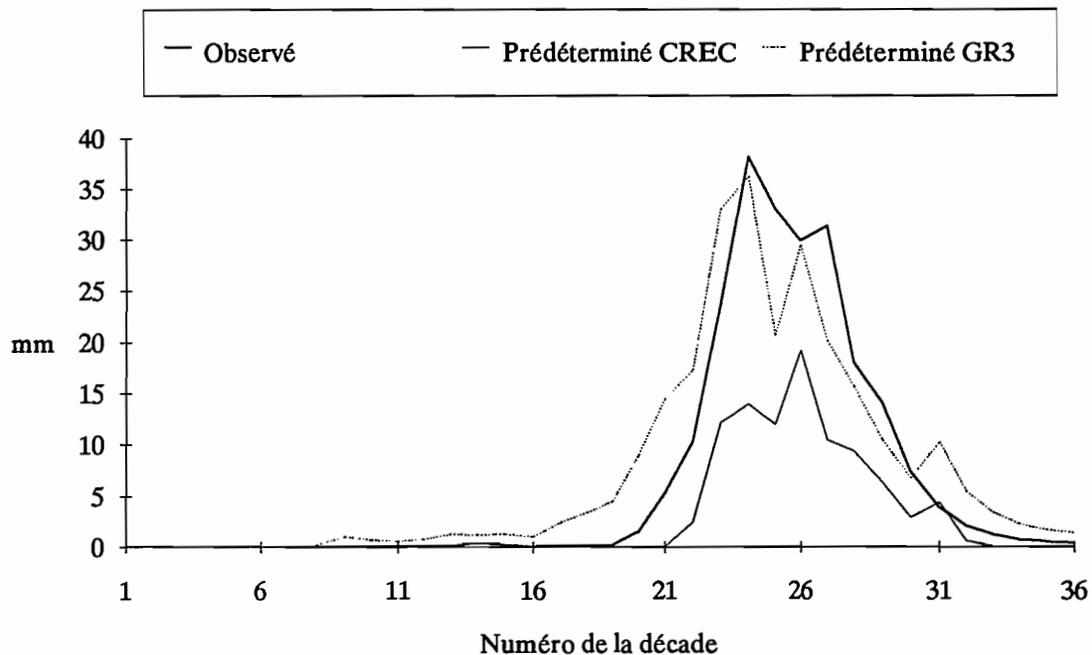


Figure 4.1.16 : La Bagoé à Kouto, 1985.

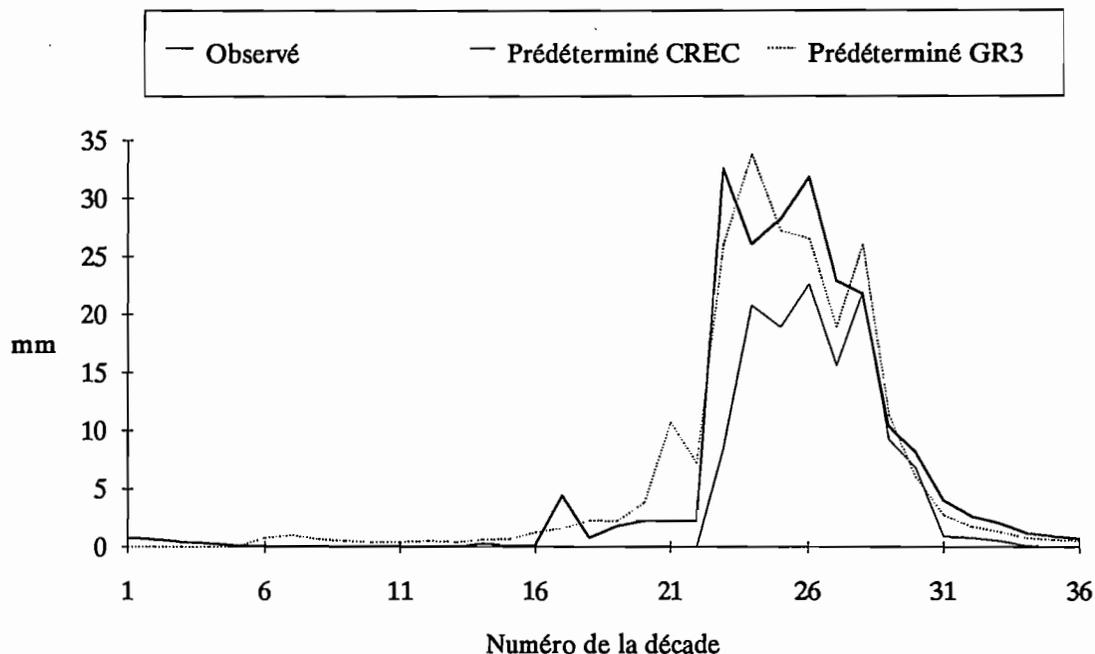


Figure 4.1.17 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1977.

La figure 4.1.16 concerne la Bagoé à Kouto en 1985, les critères numériques relatifs à ce tracé sont les suivants :

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	58.17	0.95	0.4712	0.91
P/O GR3	2.30	0.92	0.2194	0.89

Nous pouvons voir sur ce tracé que l'hydrogramme calculé par GR3 s'approche plus de l'observé que celui calculé par CREC ce qui est correctement reflété par les valeurs d'IRVC obtenues.

Les valeurs des coefficients de corrélation sont bonnes et très voisines. Si l'on met de côté l'aspect "volume de l'hydrogramme", cela traduit une assez bonne restitution de l'allure de la dynamique de l'hydrogramme : montées de crues et décrues en phase.

La figure 4.1.17 concerne le Sien à Nafana-Sienso en 1977, les critères numériques concernant ce tracé sont les suivants :

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	34.75	0.92	0.3263	0.87
P/O GR3	4.94	0.96	0.2535	0.87

Pour ce tracé, la différence au niveau des critères numériques est un peu moins nette que pour le précédent. Nous pouvons cependant constater que l'hydrogramme calculé par le modèle GR3 est plus proche de l'observé que celui calculé par CREC qui sous estime les volumes écoulés.

En conclusion, comme l'attestent les critères graphiques et numériques utilisés, on note la supériorité du modèle GR3. Cette supériorité est vraisemblablement due au nombre restreint de paramètres du modèle GR3. Cette meilleure paramétrisation conduit à des paramètres indépendants et bien identifiés, favorisant à la fois le calage automatique du modèle et le calcul ultérieur des équations de prédétermination. Le modèle CREC, quant à lui, a des paramètres moins bien identifiés et ayant, entre eux, des coefficients de corrélation non nuls (exemple : corrélation X3-X4, -0.57 ; corrélation X3-X7, 0.59 ;... Cf chapitre 3.4.2.2).

4.2. Comparaison avec des modèles autorégressifs.

Dans ce deuxième point de la troisième partie nous cherchons à évaluer les performances de la méthode mise au point (prédétermination des paramètres, puis application du modèle) en comparaison d'autres méthodes utilisables dans le même cas. Le but appliqué de gestion des ressources en eau et d'aide aux gestionnaires de projets rend cette comparaison nécessaire et très intéressante pour évaluer l'apport d'une telle démarche.

Nous aborderons deux points de comparaison ; un premier concernera les méthodes appliquées à l'échantillon de calage et en calage. On comparera de cette façon les hydrogrammes calés à l'aide de chacune des méthodes. Le deuxième portera sur la comparaison des hydrogrammes prédéterminés, c'est-à-dire sur l'utilisation des méthodes pour des bassins versants non jaugés.

4.2.1. Comparaison des hydrogrammes calés.

Pour tous les individus de l'échantillon de calage (voir liste, tableau 4.1.1) nous disposons d'une série de lames décennales précipitées observées et d'une série de lames décennales écoulées observées. C'est cette série de lames écoulées que l'on cherche à reproduire.

Pour chaque individu (= station année) nous avons calé un modèle autorégressif du type:

$$\text{Lobs}(t) = a \text{Lobs}(t-1) + b \text{Lobs}(t-2) + c \text{Pobs}(t) + d \text{Pobs}(t-1) + e \text{Pobs}(t-2).$$

où :

Lobs (t) : lame décennale écoulee observée au temps t.

Pobs (t) : lame décennale précipitée observée au temps t.

Lobs (t-1) : lame décennale écoulee observée à la décennie précédente.

Pobs (t-1) : lame décennale précipitée observée à la décennie précédente.

Lobs (t-2) : lame décennale écoulee observée deux décennies auparavant.

Pobs (t-2) : lame décennale précipitée observée deux décennies auparavant.

Ces modèles ont été calculés à l'aide du logiciel spécialisé Statgraphics par la méthode du Stepwise qui permet une sélection automatique des variables les plus significatives pour le modèle. On obtient ainsi, par exemple, les modèles suivants:

. Bagoé à Guingérini en 1983

$$\text{Lobs}(t) = 0.01939 \text{Pobs}(t-1) + 1.10584 \text{Lobs}(t-1) - 0.427651 \text{Lobs}(t-2).$$

coefficient de détermination : 0.86.

. Bagoé à Guingérini en 1982.

$$\text{Lobs}(t) = 0.048955 \text{Pobs}(t) + 0.759773 \text{Lobs}(t-1).$$

coefficient de détermination : 0.80.

A l'aide de ces modèles autorégressifs (notés MAR) calés année par année nous obtenons des hydrogrammes décennaux que l'on peut comparer aux hydrogrammes décennaux calés par les modèles CREC et GR3.

Nous avons calculé, pour ces hydrogrammes décennaux "MAR", les critères numériques classiques déjà utilisés précédemment. Le tableau 4.2.1 donne, pour ces critères la valeur moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum.

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O MAR	0.87	0.0490	0.0886	11.23	54.50	4.85
Moyenne C/O CREC	0.95	0.0863	0.1031	4.82	30.54	3.72
Moyenne C/O GR3	0.94	0.0843	0.1292	9.99	39.10	4.78
Ecart type C/O MAR	0.07	0.0398	0.0779	10.84	33.62	3.34
Ecart type C/O CREC	0.04	0.0860	0.0976	5.00	22.80	4.22
Ecart type C/O GR3	0.04	0.0757	0.1117	8.71	25.46	4.93
Mini C/O MAR	0.74	0.0071	0.0009	0.20	4.51	0.40
Mini C/O CREC	0.86	0.0139	0.0027	0.00	2.50	0.00
Mini C/O GR3	0.85	0.0024	0.0085	0.10	1.70	0.13
Maxi C/O MAR	0.97	0.2117	0.3147	59.27	156.00	14.67
Maxi C/O CREC	0.99	0.3825	0.3638	24.30	94.50	19.44
Maxi C/O GR3	0.99	0.2523	0.3852	39.90	101.30	21.28

Tableau 4.2.1.

Comme le montrent les critères du tableau 4.2.1, les trois modèles donnent des résultats équivalents. En effet les valeurs moyennes et les écarts types des critères sont souvent très proches. La seule exception concerne la corrélation des lames décennales pour laquelle les modèles CREC et GR3 sont légèrement supérieurs au modèle autorégressif.

Il faut garder à l'esprit que les valeurs concernent des hydrogrammes calés ce qui explique les bonnes valeurs de corrélation. Une nuance, différenciant le modèle autorégressif des modèles CREC et GR3, doit être introduite ici. Le modèle autorégressif utilise les valeurs des lames décennales observées aux pas de temps précédents pour calculer la valeur courante tandis que les modèles CREC et GR3 utilisent les débits observés pour déterminer un jeu de paramètres du modèle mais les valeurs elle mêmes n'interviennent pas dans le calcul. Cette nuance est de taille car pour les uns (CREC et GR3) on pourra essayer d'étendre l'utilisation à des bassins versants non jaugés et pour l'autre (modèle autorégressif) l'extension à des bassins versants non jaugés est rendue difficile du fait même de l'utilisation des lames observées.

En effet, les modèles autorégressifs, calés années par année, ne peuvent être utilisés que sur l'année de calage. Les modèles globaux CREC et GR3, comme le montre le chapitre 4.1, permettent d'étendre les calages année par année à l'aide des équations de prédétermination des paramètres. On peut ainsi envisager leur utilisation sur des bassins versants non jaugés et la vérification de la validité de cette démarche correspond à l'exploitation des résultats obtenus sur l'échantillon de validation

En conclusion, les résultats obtenus par les modèles autorégressifs en ce qui concerne l'échantillon de calage sont de même qualité que ceux obtenus par calage des modèles CREC et GR3. Cependant, la

possibilité d'extension à des bassins versants non jaugés offerte par les modèles CREC et GR3 permet de donner la préférence à l'utilisation de ce type de modèles.

4.2.2. Comparaison des hydrogrammes prédéterminés.

Au niveau de l'échantillon de validation, on réalise la comparaison avec une méthode utilisable dans les mêmes conditions. On doit donc utiliser une méthode qui permette de fournir des apports décennaux pour des bassins versants non jaugés.

Pour cela, et en reprenant la répartition en deux échantillons (calage et validation), nous avons calculé des équations de régression multiple sur les lames décennales écoulées et précipitées. Ces équations sont de la forme :

$$\text{Lobs}(t) = a \text{Lobs}(t-1) + b \text{Lobs}(t-2) + c \text{Pobs}(t) + d \text{Pobs}(t-1) + e \text{Pobs}(t-2)$$

avec :

Lobs (t) : Lame décennale écoulee observée au temps t.

Pobs (t) : Lame décennale précipitée observée au temps t.

Lobs (t-1) : Lame décennale écoulee observée à la décennie précédente

Pobs (t-1) : Lame décennale précipitée observée à la décennie précédente

Lobs (t-2) : Lame décennale écoulee observée deux décennies auparavant

Pobs (t-2) : Lame décennale précipitée observée deux décennies auparavant

En tenant compte de la répartition des bassins dans les deux échantillons (calage et validation), on a calculé, lorsque cela était possible, des équations de régression par bassin en utilisant toutes les stations années de l'échantillon de calage et en appliquant ensuite ce modèle aux individus de l'échantillon de validation.

En effet, lors de la répartition en deux échantillons, les stations années ont été considérées chacune comme des "individus" à part entière et la répartition s'est faite indépendamment des bassins. Il existe donc des bassins pour lesquels toutes les stations années disponibles sont dans l'échantillon de calage. Par le fait du hasard, toutes les stations années de l'échantillon de validation appartiennent à des bassins également présents dans l'échantillon de calage.

On a ainsi pu calculer onze équations de régression multiple correspondant aux onze bassins de l'échantillon de validation. Ces onze bassins, regroupant les vingt stations-années de l'échantillon de validation, sont les suivants :

- . Bagoé à Kouto
- . Badenou à Rte de M'Bengue
- . Bandama à Seguekiele
- . Douni à Pt 398
- . Lafigue à Rte de Badikaha
- . Mahandiabani à Wahire
- . Sien à Massadougou
- . Sien à Nafana-Sienso
- . Tiemba à Dioulatiedougou
- . Tiemba à Lille

. Yani à Madji

Ces onze bassins ont permis de calculer les onze équations de régression suivantes :

. Bagoé à Kouto

$$\text{Lobs (t)} = 1.3533 \text{ Lobs (t-1)} - 0.5403 \text{ Lobs (t-2)} + 0.0210 \text{ Pobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Lobs (t-1)	1.35331	0.094055	14.3884
Lobs (t-2)	-0.540326	0.088239	-6.1234
Pobs (t-1)	0.020999	0.005443	3.8578

$$R^2 = 0.93$$

. Badenou à Rte de M'Bengue

$$\text{Lobs (t)} = 0.0273 \text{ Pobs (t)} + 0.8009 \text{ Lobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pobs (t)	0.027296	0.006314	4.3232
Lobs (t-1)	0.800891	0.051193	15.6444

$$R^2 = 0.86$$

. Bandama à Seguekiele

$$\text{Lobs (t)} = 0.1213 \text{ Pobs (t)} + 0.4779 \text{ Lobs (t-1)} - 0.0541 \text{ Pobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pobs (t)	0.121334	0.022257	5.4516
Lobs (t-1)	0.47787	0.107102	4.4618
Pobs (t-1)	-0.054141	0.027007	-2.0047

$$R^2 = 0.62$$

. Douni à Pt 398

$$\text{Lobs (t)} = 0.6318 \text{ Lobs (t-1)} - 0.3417 \text{ Lobs (t-2)} + 0.0783 \text{ Pobs (t-2)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Lobs (t-1)	0.631755	0.096354	6.5566
Lobs (t-2)	-0.341652	0.100426	-3.4020
Pobs (t-2)	0.078294	0.011519	6.7966

$$R^2 = 0.73$$

. Lafigue à Rte de Badikaha

$$\text{Lobs (t)} = 0.0407 \text{ Pobs (t)} + 0.6245 \text{ Lobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pobs (t)	0.040742	0.006386	6.3799
Lobs (t-1)	0.624483	0.056022	11.1472

$$R^2 = 0.81$$

. Mahandiabani à Wahire

$$\text{Lobs (t)} = 1.2124 \text{ Lobs (t-1)} - 0.4161 \text{ Lobs (t-2)} + 0.0306 \text{ Pobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Lobs (t-1)	1.212436	0.141995	8.5386
Lobs (t-2)	-0.416073	0.13242	-3.1421
Pobs (t-1)	0.03056	0.009242	3.3065

$$R^2 = 0.92$$

. Sien à Massadougou

$$\text{Lobs (t)} = 0.6188 \text{ Lobs (t-1)} + 0.0471 \text{ Pobs (t-2)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Lobs (t-1)	0.618826	0.054697	11.3137
Pobs (t-2)	0.047097	0.007774	6.0579

$$R^2 = 0.77$$

. Sien à Nafana-Sienso

$$\text{Lobs (t)} = 0.7104 \text{ Lobs (t-1)} + 0.0385 \text{ Pobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Lobs (t-1)	0.710362	0.055534	12.7914
Pobs (t-1)	0.038456	0.008244	4.6645

$$R^2 = 0.81$$

. Tiemba à Dioulatiedougou

$$\text{Lobs (t)} = 0.0314 \text{ Pobs (t)} + 0.9639 \text{ Lobs (t-1)} - 0.2411 \text{ Lobs (t-2)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pobs (t)	0.03136	0.009008	3.4815
Lobs (t-1)	0.963864	0.114852	8.3922
Lobs (t-2)	-0.241126	0.107219	2.2489

$$R^2 = 0.81$$

. Tiamba à Lille

$$\text{Lobs (t)} = 1.1270 \text{ Lobs (t-1)} - 0.3848 \text{ Lobs (t-2)} + 0.0434 \text{ Pobs (t-1)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Lobs (t-1)	1.12698	0.1059	10.6419
Lobs (t-2)	-0.384788	0.096732	-3.9779
Pobs (t-1)	0.043386	0.010169	4.2666

$$R^2 = 0.89$$

. Yani à Madji

$$\text{Lobs (t)} = 0.0310 \text{ Pobs (t)} + 0.8548 \text{ Lobs (t-1)} - 0.0142 \text{ Pobs (t-2)}$$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pobs (t)	0.031006	0.005744	5.3981
Lobs (t-1)	0.854774	0.059128	14.4563
Pobs (t-2)	-0.014241	0.006966	-2.0443

$$R^2 = 0.87$$

A partir de ces onze relations, nous avons calculé les lames décadaires correspondantes pour les vingt individus de l'échantillon de validation. Ces lames ont été calculées selon le schéma suivant :

$$\text{Lcalc (t)} = a \text{ Lcalc (t-1)} + b \text{ Lcalc (t-2)} + c \text{ Pobs (t)} + d \text{ Pobs (t-1)} + e \text{ Pobs (t-2)}$$

en prenant pour $t = 0$; $\text{Lcalc (t-1)} = \text{Lcalc (t-2)} = 0$.

En effectuant les calculs de cette façon, on rend les modèles autorégressifs assimilables aux modèles CREC et GR3 utilisés avec prédétermination des paramètres. La différence entre ces deux méthodes réside dans le fait que pour les modèles CREC et GR3, on a des équations valables pour toute la zone Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, alors que pour les modèles autorégressifs, on a une équation par bassin.

Le tableau 4.2.2 donne la valeur moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum des critères numériques d'appréciation de la qualité des hydrogrammes reconstitués. Pour permettre la comparaison, on trouvera également les valeurs relatives à l'utilisation des modèles CREC et GR3 en validation. Ces valeurs sont notées conformément aux notations déjà définies soit, P/O CREC et P/O GR3.

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne P/O MAR	0.66	0.125	0.215	62.17	123.63	129.27
Moyenne P/O CREC	0.70	0.120	0.131	59.98	80.78	40.85
Moyenne P/O GR3	0.89	0.114	0.149	39.32	67.74	28.52
Ecart type P/O MAR	0.24	0.121	0.171	34.25	39.13	340.94
Ecart type P/O CREC	0.30	0.125	0.154	53.37	48.68	29.06
Ecart type P/O GR3	0.06	0.123	0.146	60.89	57.62	35.18
Mini P/O MAR	-0.20	0.007	0.009	3.19	77.70	3.24
Mini P/O CREC	0.01	0.0004	0.008	0.90	4.70	4.73
Mini P/O GR3	0.75	0.003	0.017	0.60	4.60	0.11
Maxi P/O MAR	0.89	0.464	0.651	125.57	219.62	1557.50
Maxi P/O CREC	0.98	0.433	0.615	179.50	181.70	91.28
Maxi P/O GR3	0.99	0.353	0.580	266.40	268.60	128.36

Tableau 4.2.2

L'examen des valeurs du tableau 4.2.2 amène plusieurs constatations :

. Quel que soit le critère numérique utilisé, la méthode utilisant les modèles autorégressifs est fréquemment moins bonne.

. La valeur moyenne de l'IRVC pour la méthode "MAR" est de 129. Il faut, à ce niveau, apporter une précision corrective. En effet, dans l'échantillon de validation, constitué de vingt individus, un individu ; le Badenou à Rte de M'Bengue en 1983, a un comportement extrême. L'IRVC vaut 1558 mais en observant les hydrogrammes on s'aperçoit que la lame décadaire observée maximale est de 2 mm et la lame décadaire calculée correspondante est de 8 mm. On a donc une forte valeur d'IRVC pour un individu représentant une année très sèche, donc des volumes écoulés très faibles. Si on ne tient pas compte de ce cas extrême, l'IRVC moyen de l'échantillon passe à 54.10.

En ne tenant pas compte de ce cas extrême, l'IRVC moyen se retrouve donc dans une gamme de valeurs similaires à celles obtenues avec les modèles CREC et GR3. On note cependant que cette valeur de 54.10 est la moins bonne des trois valeurs obtenues pour l'échantillon de validation.

L'observation systématique des tracés des lames décadaires observées et calculées permet d'apporter des compléments d'information au simple examen des critères numériques. On s'aperçoit, en effet, que les hydrogrammes décadaires calculés par la méthode des modèles autorégressifs ont toujours un aspect lissé et suivent rarement l'allure des hydrogrammes observés. A titre d'exemple, on peut examiner les figures 4.2.1 et 4.2.2 ainsi que les valeurs correspondantes des critères numériques d'évaluation.

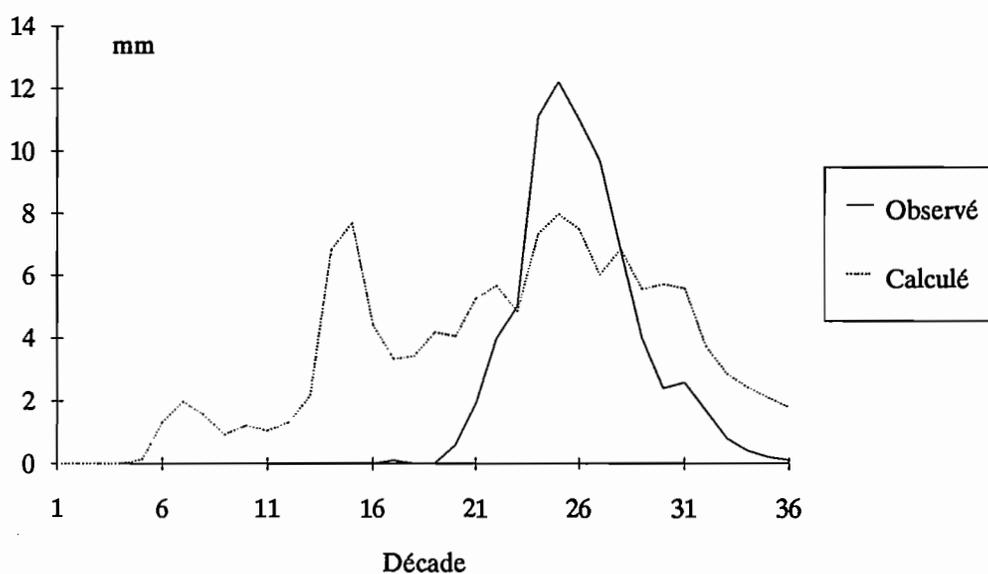


Figure 4.2.1 :Le Yanı à Madji, 1986.

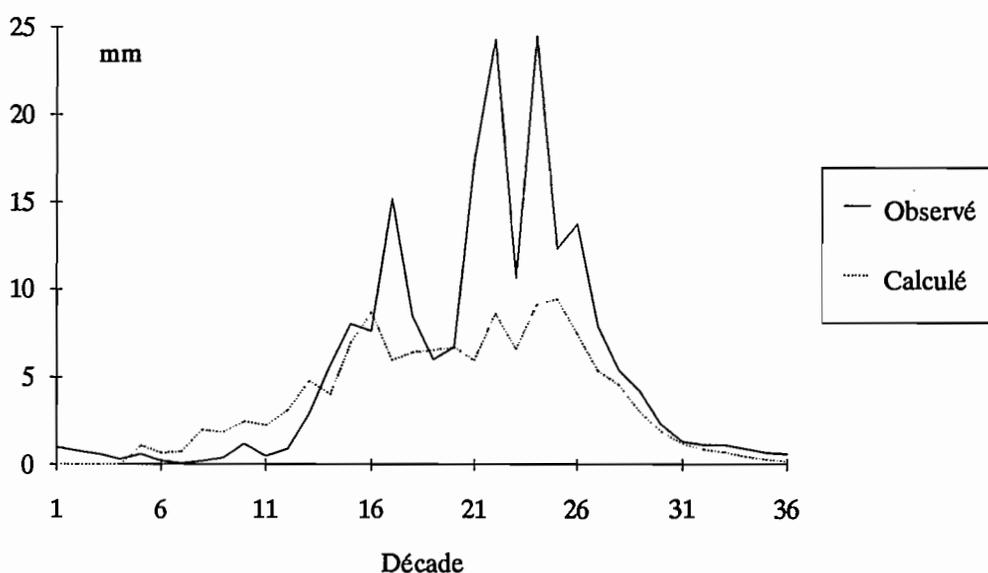


Figure 4.2.2 : Le Lafigue à Rte de Badikaha, 1981.

La figure 4.2.1 présente le tracé décadaire pour le Yanı à Madji en 1986. Les valeurs des critères numériques d'évaluation de ce tracé sont les suivantes :

Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
0.70	0.053	0.079	52.27	82.91	3.24

La simple observation du tracé décadaire indique manifestement que cet hydrogramme calculé est de mauvaise qualité. L'examen des critères numériques d'évaluation n'indique pas cette mauvaise qualité. En

effet, l'IRVC vaut 3.24, ce qui indique que le volume écoulé entre les décades 19 et 30 incluses est reproduit à 3.24 % près. Cependant le coefficient de corrélation assez faible et les fortes valeurs de Bilan1 et Bilan2 traduisent cette mauvaise qualité manifeste de l'hydrogramme calculé.

La figure 4.2.2 présente le tracé décadaire pour le Lafigue à Rte de Badikaha en 1981. Les valeurs des critères numériques d'évaluation pour cet individu sont les suivantes :

Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
0.84	0.194	0.140	65.89	92.93	44.5

L'observation du tracé montre un hydrogramme calculé ayant une allure plausible avec cependant les pointes de crues qui ne sont pas du tout reproduites. On peut noter également l'aspect lissé de l'hydrogramme calculé, aspect qu'on retrouve pour tous les hydrogrammes calculés de l'échantillon de validation. La forte valeur d'IRVC prend bien en compte le fait que les pointes de crues ne sont pas reproduites. Elle indique, en effet, que 45 % environ du volume écoulé entre les décades 19 et 30 incluses n'est pas reproduit par le modèle. Les fortes valeurs de Bilan1 et Bilan2 sont également dues à ce phénomène. La valeur de la corrélation, meilleure que dans le cas précédent, indique bien cette allure plausible de l'hydrogramme calculé.

En conclusion, l'examen des critères numériques d'évaluation et des tracés des lames décadaires montre que la méthode utilisant des modèles autorégressifs donne des résultats de moins bonne qualité que celle utilisant les modèles CREC et GR3 en prédéterminant les paramètres. Il faut de plus noter que la méthode des modèles autorégressifs n'est pas applicable à des bassins versants non jaugés contrairement aux modèles CREC et GR3. En effet, l'utilisation des modèles autorégressifs telle qu'elle est détaillé ici, nécessite au préalable d'avoir calculé le modèle sur un certain nombre d'années observées. A contrario, l'utilisation des modèles CREC et GR3 ne nécessite aucune observation de débit ; on peut utiliser ces modèles sur n'importe quel bassin de la zone de savanes soudanaises du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire.

4.3. Modifications.

Tout au long de cette étude, les modèles CREC et GR3 ont été manipulés et utilisés de nombreuses fois, que ce soit en calage, en simulation ou en validation. Au cours de ces manipulations, certaines difficultés sont apparues comme étant des obstacles à l'utilisation du modèle ou comme des carences du modèle. La fonction de transfert du modèle CREC avec le fonctionnement particulier du réservoir H s'est parfois révélée difficile à caler, le nombre restreint de paramètres de GR3 a parfois entraîné un mauvais calage du modèle,.....

Toutes ces difficultés, éclairées dans certains cas, par l'analyse effectuée lors du calage des équations de prédétermination des paramètres, nous ont poussé à tester quelques modifications possibles des modèles CREC et GR3.

Dans les faits, une modification du modèle CREC, conduisant à un modèle CREC à cinq paramètres "CREC5", a été testée ; ceci fera l'objet du premier paragraphe. Quant au second, il traitera de la modification du modèle GR3, conduisant à un modèle à quatre paramètres, GR4, ayant également été testé.

Ces nouveaux modèles modifiés ont tous été utilisés et testés de la même façon que les modèles originaux. Nous avons ainsi procédé au calage des modèles sur l'ensemble des individus des échantillons de calage et de validation. Nous avons également procédé au calcul d'équations statistiques de prédétermination des nouveaux paramètres et ces équations ont été testées sur l'échantillon de validation déjà utilisé pour CREC et GR3. Cette méthode de travail, strictement identique à celle utilisée avec CREC et GR3, permet de comparer les performances de ces nouveaux modèles avec les versions originales. Cette comparaison nous permettra, ainsi, de déterminer si les modifications ont engendré ou non des améliorations et de les mesurer.

4.3.1. Modifications du modèle CREC.

A l'aide d'un logiciel réalisé en Turbo Pascal, on peut analyser le fonctionnement interne du modèle CREC. Ce logiciel permet d'obtenir, sous forme de graphiques, la répartition des volumes entre les différents éléments du modèle. Il permet notamment d'afficher simultanément les sorties du transfert de surface, du réservoir H et du réservoir G. Les modifications apportées à CREC pour créer CREC5 sont basées sur deux constatations résultant de l'utilisation de ce logiciel sur chaque calage de CREC. Ces deux constatations sont les suivantes :

. L'écoulement de surface (cf schéma conceptuel du modèle CREC) n'est jamais utilisé, aucun volume d'eau ne transite par ces réservoirs. En effet, l'examen des graphiques pour tous les individus (stations-années) indique que le volume sortant de cette branche est toujours nul. Cet état de fait permet d'éliminer trois paramètres, les paramètres X8, X9 et X10.

. La deuxième constatation résulte de la comparaison des volumes transitant par le réservoir H et par le réservoir G. Dans la très grande majorité des cas, le fonctionnement des réservoirs H et G est exclusif. En effet si un volume s'écoule par l'orifice du réservoir H pour former le débit à l'exutoire, rien ne s'écoule par

le réservoir G et inversement. Ces deux réservoirs s'excluent l'un l'autre en ce qui concerne l'ensemble des calages réalisés sur les stations années du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Il semble donc logique de transformer cette fonction de transfert à deux réservoirs en une fonction de transfert à un seul réservoir.

Les modifications apportées au modèle CREC pour aboutir au modèle CREC5 sont donc les suivantes :

a) Elimination de la partie écoulement de surface. Les paramètres qui entraînent en jeu dans cette partie sont les paramètres X8, X9 et X10. On aboutit purement et simplement à leur suppression.

b) Remplacement de la fonction de transfert à deux réservoirs (H et G) par une fonction à un seul réservoir. La fonction de transfert existante utilisait quatre paramètres X1, X5, X6 et X2. La nouvelle fonction de transfert mise en place n'en utilise que deux. Le réservoir utilisé a en effet une loi de vidange du type : $Q = (KH)^n$, loi de vidange à deux paramètres K et n.

On obtient donc un modèle à 5 paramètres, trois paramètres concernent la fonction de production, X3, X4 et X7, et deux paramètres la fonction de transfert, K et n.

Cette version du modèle CREC à 5 paramètres, a été utilisée selon la même méthodologie que la version originale afin de comparer leurs performances. On a donc procédé au calage de ce modèle année par année sur l'ensemble des stations années disponibles. On a ensuite repris la séparation en deux échantillons (calage et validation) afin de calculer puis de valider des équations de prédétermination des paramètres de CREC5. Pour l'ensemble des séries de lames décadaires calées et prédéterminées, on a procédé au calcul des critères numériques de comparaison des hydrogrammes.

Pour permettre la comparaison avec le modèle CREC original, on a rassemblé dans les tableaux 4.3.1 et 4.3.2 les valeurs des critères numériques, pour l'échantillon de calage et pour l'échantillon de validation, qui concernent les hydrogrammes calés avec CREC (notés C/O CREC), les hydrogrammes calés avec CREC5 (notés CREC5), les hydrogrammes prédéterminés avec les équations de régression multiple sur les paramètres de CREC (notés P/O CREC) et les hydrogrammes prédéterminés avec les équations de régression multiple sur les paramètres de CREC 5(notés P/O CREC5).

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O CREC	0.95	0.086	0.103	4.82	30.54	3.72
Moyenne C/O CREC5	0.94	0.081	0.111	18.18	45.14	9.20
Moyenne P/O CREC	0.84	0.122	0.177	41.06	57.54	37.08
Moyenne P/O CREC5	0.91	0.105	0.142	45.95	61.26	45.97
Ecart type C/O CREC	0.04	0.086	0.098	5.00	22.80	4.22
Ecart type C/O CREC5	0.04	0.076	0.106	38.95	41.62	16.78
Ecart type P/O CREC	0.21	0.112	0.152	36.63	37.67	25.47
Ecart type P/O CREC5	0.05	0.095	0.120	56.87	56.56	47.76
Mini C/O CREC	0.86	0.014	0.003	0	2.50	0
Mini C/O CREC5	0.84	0.001	0.003	0.10	1.40	0
Mini P/O CREC	0.15	0.002	0.000	0.10	4.00	3.11
Mini P/O CREC5	0.76	0.002	0.013	0.30	3.60	2.24
Maxi C/O CREC	0.99	0.382	0.364	24.30	94.50	19.44
Maxi C/O CREC5	0.99	0.305	0.401	173.00	175.8	66.76
Maxi P/O CREC	0.99	0.512	0.587	150.60	150.60	98.91
Maxi P/O CREC5	0.99	0.380	0.415	212.80	228.10	238.65

Tableau 4.3.1 : Echantillon de calage.

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O CREC	0.94	0.094	0.106	5.41	40.86	3.40
Moyenne C/O CREC5	0.91	0.117	0.135	17.09	57.17	9.94
Moyenne P/O CREC	0.70	0.120	0.131	59.98	80.78	40.85
Moyenne P/O CREC5	0.88	0.110	0.132	93.68	106.88	75.34
Ecart type C/O CREC	0.04	0.099	0.084	6.03	30.08	2.84
Ecart type C/O CREC5	0.08	0.091	0.098	31.89	44.09	14.23
Ecart type P/O CREC	0.30	0.125	0.154	53.37	48.68	29.06
Ecart type P/O CREC5	0.06	0.117	0.122	79.04	80.23	86.46
Mini C/O CREC	0.87	0.000	0.005	0.30	1.30	0.33
Mini C/O CREC5	0.62	0.004	0.005	0.30	1.40	0.24
Mini P/O CREC	0.01	0.0004	0.008	0.90	4.70	4.73
Mini P/O CREC5	0.77	0.001	0.011	5.40	16.80	10.46
Maxi C/O CREC	0.99	0.337	0.281	26.10	120.70	8.93
Maxi C/O CREC5	0.98	0.358	0.327	142.50	114.40	62.81
Maxi P/O CREC	0.98	0.433	0.615	179.50	181.70	91.28
Maxi P/O CREC5	0.96	0.362	0.530	248.80	303.20	415.00

Tableau 4.3.2 : Echantillon de validation.

L'examen des tableaux 4.3.1 et 4.3.2 apporte différents enseignements quant à la qualité des calages effectués à l'aide du modèle CREC5.

L'IRVC moyen des hydrogrammes calés est voisin de 9.5 que ce soit pour l'échantillon de calage ou pour l'échantillon de validation. Avec l'utilisation de la version originale on obtenait un IRVC moyen de 3.5 environ. Les résultats de CREC5 sont donc légèrement moins bons en calage que ceux obtenus avec la version à 10 paramètres. Au niveau de la corrélation des lames décadaires, une légère différence apparaît également avec une moyenne de 0.91 pour CREC5 au lieu de 0.94 pour CREC mais également avec un écart type double (0.08 pour CREC5 au lieu de 0.04). Cette différence n'apparaît cependant que pour l'échantillon de validation.

S'agissant maintenant des hydrogrammes prédéterminés, on peut, dans un premier temps, examiner les équations de prédétermination des paramètres. Ces équations sont les suivantes :

. Paramètre X3

$$\text{Ln}(X3) = -34.9467 + 6.0710 \text{ Ln}(\text{Pluie Annuelle}) - 19.1376 \text{ Pr8} - 0.1027 \text{ Forêt}$$

Résultats pour Ln(X3)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-34.946703	10835017	-3.2253
Ln(Pluie Annuelle)	6.070988	1.374139	4.4180
Pr8	-19.137645	6.639372	-2.8824
Forêt	-0.102661	0.038878	-2.6406

$$R^2 = 0.55$$

. Paramètre X4

$$\text{Ln}(X4) = 19.7713 + 1.1389 \text{ Ln}(\text{Pc6}) - 4.3250 \text{ Ln}(\text{Pc10}) - 0.0152 \text{ Cultures}$$

Résultats pour Ln(X4)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	19.771333	3.434122	5.7573
Ln(Pc6)	1.138925	0.473467	2.4055
Ln(Pc10)	-4.325027	0.644439	-6.7113
Cultures	-0.015166	0.005006	-3.0294

$$R^2 = 0.65$$

. Paramètre X7

$$\text{Ln}(X7) = 6.9387 \text{ Pr7}$$

Résultats pour Ln(X7)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pr7	6.938731	0.56961	12.1816

$$R^2 = 0.83$$

. Paramètre n

$$n = -9.2158 \text{ Pr8} + 7.4441 \text{ Pr10}$$

Résultats pour n

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pr8	-9.215826	2.911548	-3.1653
Pr10	7.444085	1.994538	3.7322

$$R^2 = 0.78$$

. Paramètre K

$$K = \text{Exp} (-0.1533 - 2.0715 n)$$

Résultats pour $K = \text{Exp} (a + b n)$

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
a	-0.153252	0.356886	-0.429435
b	-2.0715	0.276735	-7.48551

$$R^2 = 0.63$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 sont donnés à titre indicatif car ils n'ont pas la signification du coefficient de détermination de la simple régression linéaire. En effet, l'utilisation de variables transformées en logarithme népérien ne permet pas de lui accorder la signification "pourcentage de variance expliquée" qu'il a dans une régression linéaire.

La comparaison de ces équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC5 avec celles du modèle original montre que les variables entrant dans les équations des paramètres X3, X4 et X7 sont sensiblement les mêmes (cf tableau 4.1.2). On retrouve en effet la Pluie Annuelle et le pourcentage de forêt dans la définition de X3, le pourcentage de cultures pour la définition de X4 et pour le paramètre X7 la Pluie Cumulée au 15 Juillet (Pc7) est remplacée par la Pluie relative au 15 Juillet ($\text{Pr7} = \text{Pc7}/\text{Pluie Annuelle}$). La pluie cumulée au 15 Août (Pc8) qui entrant dans la définition de X1, paramètre de transfert du modèle original, entre désormais dans la définition de n sous la forme de la pluie relative au 15 Août (Pr8).

On s'aperçoit que les valeurs moyennes de l'IRVC pour la version originale de CREC étaient de 41 pour l'échantillon de validation, contre 75 ici. Ces valeurs sont donc nettement en défaveur de la version à 5 paramètres. Si l'on examine, par contre, les valeurs des corrélations des lames décadaires, on obtient un très léger avantage pour la version à 5 paramètres. L'objectif de départ étant la reconstitution d'apports à l'exutoire d'un bassin versant, on se doit de privilégier un critère comme l'IRVC face à une simple corrélation.

En conclusion, les modifications apportées au modèle CREC à 10 paramètres, pour le transformer en une version à 5 paramètres n'apportent pas d'amélioration des performances au regard des objectifs fixés au départ.

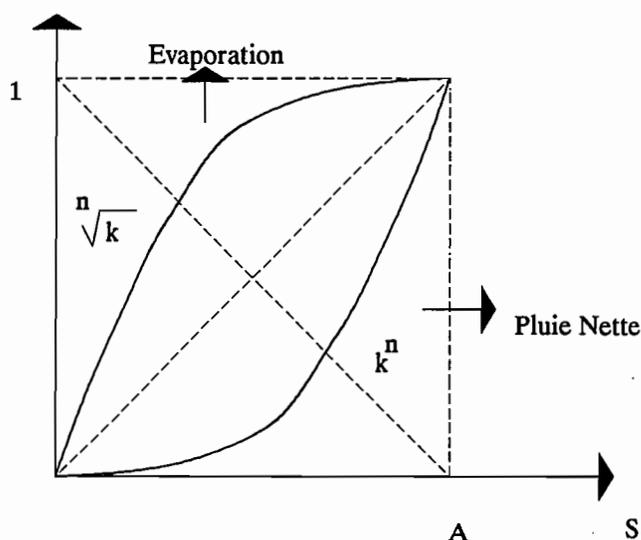
Cette diminution du nombre de paramètres, bien que positive dans l'absolu ou au regard du temps de calcul lors du calage par exemple, entraîne une baisse de performance du modèle qui le rend inutilisable

dans les conditions souhaitées (utilisation sur des bassins versants non jaugés). En effet, l'erreur moyenne sur le volume des crues passe à 75% contre 41% pour la version originale. Si une erreur de 41% est acceptable, au regard des objectifs de gestion des ressources en eau, une erreur de 75% l'est plus difficilement.

4.3.2. Modifications du modèle GR3.

La modification possible, testée ici et conduisant à la version à 4 paramètres dénommée GR4, a porté sur l'exposant des courbes de rendement de la pluie et de l'évapotranspiration. En effet, cet exposant, fixé à 2 dans la version originale a été rendu variable.

Le modèle GR4 basé sur GR3 a les mêmes paramètres que GR3 auxquels vient s'ajouter le paramètre n , exposant de la courbe de rendement de la pluie. Pour ce modèle on a gardé une symétrie par rapport à la droite $y=x$. On obtient donc le schéma suivant :



La courbe de rendement des pluies est fonction de k^n et la courbe de l'évaporation est fonction de $\sqrt[n]{k}$.

En utilisant ce modèle, on a effectué toutes les opérations de calage sur l'ensemble des individus des échantillons de calage et de validation. A l'aide de l'échantillon de calage on a ensuite constitué des équations de prédétermination des paramètres de ce modèle. A partir de ces équations on a calculé les hydrogrammes décennaires prédéterminés pour l'échantillon de calage et pour l'échantillon de validation. Les tableaux 4.3.3 et 4.3.4 regroupent les valeurs des critères numériques calculés à partir des hydrogrammes décennaires, pour l'échantillon de calage et pour l'échantillon de validation. On a également reporté dans ce tableau les valeurs concernant les hydrogrammes calés à l'aide du modèle GR3 (notés C/O GR3) et ceux calculés par prédétermination des paramètres du modèle GR3 (notés P/O GR3). Les hydrogrammes décennaires calés avec GR4 sont notés C/O GR4 et ceux calculés par prédétermination des paramètres de GR4 sont notés P/O GR4.

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O GR3	0.94	0.084	0.129	9.99	39.10	4.78
Moyenne C/O GR4	0.94	0.078	0.113	9.39	36.94	3.80
Moyenne P/O GR3	0.91	0.096	0.135	24.82	51.45	27.61
Moyenne P/O GR4	0.90	0.093	0.146	38.06	59.61	50.42
Ecart type C/O GR3	0.04	0.076	0.112	8.71	25.46	4.93
Ecart type C/O GR4	0.04	0.075	0.103	8.57	25.70	4.78
Ecart type P/O GR3	0.06	0.079	0.116	21.65	32.87	36.70
Ecart type P/O GR4	0.07	0.077	0.108	31.39	34.18	74.33
Mini C/O GR3	0.85	0.002	0.008	0.10	1.70	0.13
Mini C/O GR4	0.84	0.004	0.000	0.30	1.70	0.07
Mini P/O GR3	0.75	0.003	0.002	0	1.80	0.23
Mini P/O GR4	0.65	0.003	0.006	2.40	2.60	2.42
Maxi C/O GR3	0.99	0.252	0.385	39.90	101.30	21.28
Maxi C/O GR4	0.99	0.256	0.382	34.30	97.50	26.40
Maxi P/O GR3	0.99	0.294	0.390	82.20	138.30	232.37
Maxi P/O GR4	0.99	0.299	0.366	158.20	167.60	452.17

Tableau 4.3.3 : Echantillon de calage.

	Corrélation	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O GR3	0.92	0.105	0.145	10.45	45.43	6.67
Moyenne C/O GR4	0.93	0.097	0.134	9.50	44.11	5.33
Moyenne P/O GR3	0.89	0.114	0.149	39.32	67.74	28.52
Moyenne P/O GR4	0.87	0.113	0.148	53.68	81.88	43.26
Ecart type C/O GR3	0.06	0.107	0.142	8.95	28.97	7.89
Ecart type C/O GR4	0.04	0.097	0.126	9.24	28.30	5.01
Ecart type P/O GR3	0.06	0.123	0.146	60.89	57.62	35.18
Ecart type P/O GR4	0.08	0.115	0.152	74.47	75.20	49.61
Mini C/O GR3	0.77	0.004	0.001	1.70	3.20	0.19
Mini C/O GR4	0.83	0.004	0.001	0.30	2.40	0.00
Mini P/O GR3	0.75	0.003	0.017	0.60	4.60	0.11
Mini P/O GR4	0.72	0.007	0.007	2.70	9.10	3.62
Maxi C/O GR3	0.99	0.337	0.526	34.90	110.70	33.17
Maxi C/O GR4	0.99	0.288	0.472	41.00	110.80	20.79
Maxi P/O GR3	0.99	0.353	0.580	266.40	268.60	128.36
Maxi P/O GR4	0.99	0.370	0.623	301.90	304.10	195.00

Tableau 4.3.4 : Echantillon de validation.

Quand on examine les critères numériques regroupés dans les tableaux 4.3.3 et 4.3.4, on constate :

Pour les hydrogrammes calés à l'aide du modèle GR4, l'IRVC moyen obtenu (3.80 et 5.33) est légèrement inférieur à celui obtenu avec le calage du modèle GR3 (4.78 et 6.67). L'ajustement de l'exposant

n lors du calage permet donc une meilleure reproduction de l'hydrogramme observé. L'examen des autres critères numériques du tableau indique la même tendance ; une légère amélioration de la qualité des hydrogrammes calés.

En ce qui concerne les hydrogrammes prédéterminés, les équations de prédétermination des paramètres du modèle GR4 sont les suivants :

. Paramètre A

$$\text{Ln (A)} = -3.9105 \text{ Pr6} + 1.0480 \text{ Ln (Pc10)} + 0.0161 \text{ Cultures}$$

Résultats pour Ln (A)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pr6	-3.910455	1.201663	-3.2542
Ln (Pc10)	1.047978	0.049114	21.3379
Cultures	0.016074	0.003663	4.3883

$$R^2 = 0.9973$$

. Paramètre B

$$\text{Ln (B)} = 2.3572 \text{ Ln (Pc7)} - 8.7242 \text{ Pr9} - 0.0426 \text{ Cultures}$$

Résultats pour Ln (B)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Ln (Pc7)	2.357215	0.507619	4.6437
Pr9	-8.724226	3.58916	-2.4307
Cultures	-0.042623	0.010189	-4.1832

$$R^2 = 0.9737$$

. Paramètre C

$$\text{Ln (C)} = -11.8002 \text{ Pr7} - 0.0993 \text{ Forêt} + 2.4404 \text{ Compacité}$$

Résultats pour Ln(C)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Pr7	-11.800231	3.390694	-3.4802
Forêt	-0.099254	0.030682	-3.2349
Compacité	2.440386	1.159186	2.1053

$$R^2 = 0.8543$$

. Paramètre n

$$n = 3.6834 - 3.5658 \text{ Pr7}$$

Résultats pour n

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	3.683423	0.744189	4.9496
Pr7	-3.565792	1.708193	-2.0875

$$R^2 = 0.1007$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 sont donnés à titre indicatif car ils n'ont pas la signification du coefficient de détermination de la simple régression linéaire. En effet, l'utilisation de variables transformées en log ne permet pas de lui accorder la signification "pourcentage de variance expliquée" qu'il a dans une régression linéaire. Néanmoins, c'est un indicateur du niveau d'adéquation de la relation, un R^2 de 0.99 donne une meilleure relation qu'un R^2 de 0.10. On remarque ainsi que la relation permettant de prédéterminer l'exposant n est de mauvaise qualité ($R^2 = 0.10$). A titre indicatif, la valeur moyenne de n obtenue pour l'ensemble des calages des 39 stations années de l'échantillon de calage est de 2.19 avec un écart type de 0.59. On note donc une certaine dispersion des valeurs de n .

L'examen des critères numériques des tableaux 3.3 et 4.3.4 indique un IRVC moyen de 50 pour l'échantillon de calage, contre 28 pour GR3, et de 43 pour l'échantillon de validation, contre 29 initialement. L'utilisation du modèle GR4 en prédétermination donne des résultats qui, bien qu'étant de qualité acceptable, sont moins bons que ceux fournis par l'utilisation identique du modèle GR3. Le léger gain obtenu en calage n'est donc pas également suivi d'un gain pour l'utilisation en prédétermination. Cela est dû à la mauvaise qualité de l'équation de régression multiple du paramètre n .

La modification apportée au modèle GR3 pour obtenir le modèle GR4 testé ici n'entraîne pas d'amélioration au regard des objectifs de modélisation préalablement fixés. En effet, cette modification permet un meilleur calage du modèle, mais ce gain assez faible n'entraîne pas d'amélioration lorsqu'on utilise le modèle en prédétermination. Dans le but, préalablement fixé, de reconstituer des apports décennaux à l'exutoire de bassins versants non jaugés, il est préférable d'utiliser le modèle GR3. Le modèle GR4 donne, dans les mêmes conditions d'utilisation, des résultats de moins bonne qualité.

CONCLUSION

5. CONCLUSION

Arrivé au terme de ce travail, il convient d'en rappeler les principaux enseignements et d'esquisser, à la lumière de ces résultats, les perspectives futures ouvertes au type de modélisation utilisée.

Il faut tout d'abord rappeler que nos travaux se sont déroulés dans le cadre du programme **ERREAU**, Evaluation Régionale des Ressources en Eau, développé en Côte d'Ivoire par l'unité de recherches "Etude et gestion des Ressources en Eau" de l'ORSTOM. L'objectif essentiel de ce programme est la mise au point et l'application d'une méthodologie permettant d'évaluer les apports, en continu, à l'exutoire de bassins versants de dimensions variées (100 à 6500 km²), de zones climatiques différentes, jaugés ou non. L'aspect appliqué de gestion des ressources en eau et d'aide aux aménageurs et gestionnaires de projets est par conséquent un des principaux "fils conducteurs" de ce document.

L'outil privilégié, mis en oeuvre pour atteindre ces buts, a été la **modélisation globale de la relation pluie débit**. Trois modèles globaux, **CREC**, **GR3** et **MODGLO**, ont été retenus dans le cadre de cette modélisation dont tous les calculs étaient effectués au pas de temps journalier pour une exploitation des résultats aux pas de temps décadaire et mensuel.

L'étude et la critique des données de réseau disponibles a permis la sélection de 17 bassins versants en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), représentant un total de 91 stations années. La forte variabilité des données (les coefficients d'écoulement, par exemple, sont compris entre 0.5 % et 20 %) accentuée par la sécheresse marquée et générale en Côte d'Ivoire des années 1983 et 1984 est un fait marquant de cette étude. L'étude pluviométrique nous a permis de remarquer la tendance à la baisse de la pluviométrie annuelle à partir des années 1970, sous la même influence que la grande sécheresse au Sahel.

Les trois modèles globaux ont été calés sur l'ensemble des 91 stations années à l'aide d'un protocole de **calage automatique** utilisant les méthodes d'optimisation non linéaire de **Rosenbrock** et de **Nelder et Mead** ainsi que le **critère numérique de calage de Nash**. Ce critère a été retenu à la suite d'une étude comparative de cinq critères dont la réalisation nous a notamment permis de mettre au point un module d'évaluation comparative des hydrogrammes prenant en compte les objectifs du programme ERREAU. Ce module d'évaluation comparative permet la comparaison d'hydrogrammes au pas de temps décadaire introduisant l'**IRVC** (Indice de Reconstitution du Volume des Crues), indice d'évaluation de la reconstitution du volume des lames écoulées entre les décades 19 à 30 incluses, saison de l'écoulement dans la région Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire.

Sur un plan strictement opérationnel, ces travaux ont permis la mise au point de tout un ensemble de programmes informatiques, fonctionnant sur micro-ordinateur et constituant une véritable "chaîne de modélisation". Elle a servi de base à la réalisation du logiciel **EMILE** (Ensemble Modélisateur Intégré pour le calcul chronologique des Lames d'Eau), "système modélisateur", fonctionnant sur micro-ordinateur. Ce logiciel constitue un outil de modélisation convivial, prêt à fournir une aide non négligeable en phase d'étude de projets divers (irrigation, dimensionnement d'ouvrages à vocation agricole, ...).

Disposant des calages annuels des modèles globaux, une analyse détaillée en a été entreprise pour établir des **équations statistiques de régression multiple** permettant la **prédétermination des paramètres**

des modèles CREC et GR3. Ces équations de régression multiple font intervenir principalement des variables d'occupation du sol (pourcentage de cultures notamment) et des indices pluviométriques de répartition des pluies dans l'année (pluie cumulée au 15 juillet, par exemple). Il faut ici souligner la grande souplesse de calage de ces trois modèles pluie débit. Ces modèles ont, en effet, été initialement bâtis pour une utilisation en zone tempérée, et leur utilisation dans une zone climatique très différente conduit néanmoins à des résultats de bonne qualité. Quel que soit le modèle, le critère de Nash moyen obtenu pour l'ensemble des calages est de 0.2. L'analyse détaillée des calages a, par ailleurs, laissé apparaître un fonctionnement similaire des modèles en terme de fonction de production et de fonction de transfert. On s'est également aperçu que les paramètres des modèles ne dépendaient pas uniquement des caractéristiques physiques des bassins versants, car les essais de validations croisées n'ont pas donné de résultats probants (moins de 5 % de réussite).

Les équations de régression multiple de prédétermination des paramètres des modèles CREC et GR3 ont été testées, à la fois sur l'échantillon de calage (39 stations années) de ces mêmes équations, et sur un échantillon de validation de 20 stations années. L'application de la méthode définie à cet échantillon de validation permet de traiter le cas de bassins versants non jaugés.

Les résultats obtenus sont de qualité acceptable au regard des objectifs de gestion des ressources en eau qui étaient les nôtres. Pour le modèle CREC, on reproduit les hydrogrammes décennaux de bassins versants non jaugés avec une erreur moyenne de 41 % sur le volume écoulé entre les décades 19 à 30 incluses, tandis que pour le modèle GR3, cette erreur moyenne vaut 29 %. On a ainsi pu noter la supériorité du modèle GR3, et poser le problème de la juste paramétrisation des modèles pluie débit. Il paraît donc préférable d'utiliser le modèle GR3, qui comporte trois paramètres indépendants et bien identifiés, plutôt que les modèles CREC et MODGLO qui comportent, respectivement, 10 et 15 paramètres.

La mise au point des équations de prédétermination des paramètres des modèles permet donc de fournir un outil d'évaluation, en continu, des apports décennaux à l'exutoire de bassins versants non jaugés, avec une précision acceptable, compatible avec le point de vue des aménageurs et des gestionnaires de projets à vocation agricole. La comparaison de cet outil à des modèles autorégressifs utilisés dans le même contexte a conduit à donner un net avantage à l'utilisation des modèles globaux associés aux équations de prédétermination des paramètres.

Parmi les perspectives de développement envisageables, on peut citer :

- . la prise en compte d'autres variables descriptives des bassins versants au niveau de la définition des équations de prédétermination des paramètres. On peut penser à des caractéristiques de sol, à des indices de végétation ou de croissance de la végétation (à partir d'images satellites par exemple), plus précis que le simple partage en pourcentage de cultures, de savanes, de forêts et d'habitat.
- . une meilleure modélisation des phénomènes d'évapotranspiration. L'évapotranspiration représente, en effet, dans ces régions, 80 à 90 % du volume entrant en jeu dans le bilan hydrologique. Les modèles globaux utilisés traitent ce phénomène de manière simplifiée voire parfois simpliste. On peut penser qu'une modélisation plus fine de celui-ci, à condition toutefois de disposer des données nécessaires, apporterait un plus au fonctionnement de ces modèles.

La méthode mise au point ici, consistant à caler les modèles globaux puis à calculer des équations de prédétermination des paramètres, de par ses résultats prometteurs, mérite d'être appliquée à d'autres zones soumises à des climats semblables. On peut, par exemple, penser à d'autres pays d'Afrique de l'Ouest situés

sous les mêmes latitudes, ou à des zones relativement homogènes, d'un point de vue climatique, sur le continent Sud-Américain. Les premiers travaux de Brou KOUAME, concernant l'application de cette méthode à la zone de transition et à la zone de forêt de Côte d'Ivoire, ne semblent pas donner des résultats aussi concluants que ceux obtenus en zone de savanes soudanaises. Cette extension à d'autres pays et à d'autres zones permettrait sans doute d'apporter des éléments de réponse pour expliquer cette baisse de performance de la méthode.

Il serait également intéressant de valider davantage ces équations de prédétermination des paramètres sur la zone Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire en utilisant des données récentes et/ou des bassins pour lesquels les données n'étaient pas disponibles au moment de la mise au point de la méthode.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Avenard J. M. & al (1971) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Editions de l'ORSTOM. 391 p.
- Beven K. (1987) Towards a New Paradigm in Hydrology. AISH Publication 164.
- Brunet-Moret Y. (1976) Etablissement d'un fichier opérationnel et étude des averses exceptionnelles. Application à la Côte d'Ivoire. ORSTOM, CIEH.
- Camus H., Chaperon P., Girard G., Molinier M. (1976) Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en cultures. Côte d'Ivoire, Korhogo 1962-1972. Travaux et Documents de l'ORSTOM n°52, 77 p.
- Chevallier & al (1984) Données climatologiques de Booro Borotou. ORSTOM Adipodoumé.
- Combes V. (1985) Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC. Thèse de Docteur-Ingénieur en Sciences de l'Eau et Aménagement. USTL. Montpellier, *multigr.*
- Delhomme J. P. (1976) Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur. Ecole des Mines de Paris.
- Dezetter A. (1986) Contribution à l'étude et à la refonte de deux modèles hydropluviométriques au pas de temps journalier. Modèle Girard, Modèle Ibiza. ORSTOM Juillet-Août 1986.
- Dezetter A. (1987) Modèle global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. DEA National d'Hydrologie. USTL. Montpellier, *multigr.*
- Diskin M. H. & Simon E. (1977) A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. Journal of Hydrology, 34 : 129-149.
- Draper N.R. & Smith H. (1981) Applied regression analysis. John Wiley & sons Ed.
- Edijatno & Michel C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2/1989: 113-121.
- Fortin J. P., Charbonneau R., Lefevre J., Girard G. (1971) Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. AISH Pub 101 Vol. 2 : 548-557. Actes du colloque de Varsovie.
- Girard G. (1975 a) Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin de l'Oued Ghorfa (Mauritanie) Cah. de l'ORSTOM, série Hydrologie, Vol. XII, n°3.
- Girard G. (1975 b) Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. de l'ORSTOM, série Hydrologie, Vol. XII, n°3.
- Guilbot A. (1971) Processus d'optimisation en quatre étapes appliqué à la recherche des paramètres des modèles déterministes, Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, USTL, note LHM 16/1971.
- Guilbot A. (1986) Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. Revue Internationale des Sciences de l'Eau, Vol 2-1: 19-26.

- Himmelblau D. (1972) Applied non linear programming, Mac GrawHill, 480 p.
- Klemes V. (1986) Dilettantism in Hydrology, Transition or Destiny. Water Resources Research 22, supplement 9, Août 1986.
- Kottegoda N. T. (1980) Stochastic Water Resources Technology, The MacMillan Press Ltd, 384p.
- Kundzewicz Z. (1986) The Hydrology of Tomorrow. Hydrol. Sciences Journal 31, 2, 6/1986.
- Lebel T. (1984) Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Thèse de Docteur-Ingénieur. USMG, INPG, Grenoble.
- Leviandier T. & Ma Z. C. (1987) Influence du pas de temps sur les performances des modèles pluie débit. Critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques, Rapport final EDF, CEMAGREF.
- Matheron G. (1972) Théorie des variables régionalisées in "Traité d'informatique géologique". P. Lafitte. Masson Editeur.
- Michel C. (1983) Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre. La Houille Blanche, n°1-1983.
- Nash J. E. (1969) A course of lectures on parametric or analytical hydrology. Great Lakes Institute. University of Toronto Pr 38 : Lecture 12.
- Nash J. E. & Sutcliffe J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principle, Journal of Hydrology, 10 : 282-290.
- Nelder J. A. & Mead R. (1964) A simple method for function minimization. Computer journal, 7 : 308-313.
- Pouget J. C. (1987) Spatialisation de données en hydrologie. Mise au point d'une chaîne de traitement et application à des données pluviométriques sur la Guadeloupe. DEA, USTL, Montpellier.
- Rosenbrock H. H. (1960) An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Computer journal, 3 : 175.
- Servat E. (1986) Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes. CREC5, MODGLO et MODIBI. ORSTOM Montpellier, *multigr.*
- Servat E. & Dezetter A. (1988 a) Etude pluviométrique de la zone géographique couverte par ERREAU. Programme ERREAU, note 1.
- Servat E. & Dezetter A. (1988 b) Modélisation globale de la relation pluie débit : des outils au service de l'évaluation des ressources en eau. Hydrologie Continentale, Vol. 3, n°2, 1988 : 117-129.
- Servat E. & Dezetter A. (1988 c) SIMPLE et ROSEN : Deux méthodes d'optimisation non linéaire. Théorie et Pratique. Publication OVNih n°1, ORSTOM Montpellier.
- Servat E. & Dezetter A. (1990 a) Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise, Hydrologie Continentale, vol. 5, n°2, 1990 : 147-165.

- Servat E. & Dezetter A. (1991 a) Sélection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 36, 4, 8/1991 : 307-330.
- Servat E. & Dezetter A. (1991 b) Prise en compte du type d'occupation des sols dans une modélisation pluie débit en zone de savanes soudanaises. "AISH Symposium on Hydrological interactions between Atmosphere, Soil and Vegetation" - XX General Assembly of I.U.G.G. - 11-24 August 1991.
- Servat E. & Lapetite J.M. (1990) Occupation des sols des bassins versants du Programme ERREAU. Programme ERREAU. ORSTOM. Abidjan. Côte d'Ivoire.
- Ven Te Chow (1964) Handbook of Applied Hydrology.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	11
2. PREMIERE PARTIE	15
2.1. Description du milieu physique.....	15
2.1.1. Géomorphologie.....	15
2.1.2. Le Climat.....	19
2.1.2.1. Aperçu de la pluviométrie.....	23
2.1.2.2. Températures.....	27
2.1.2.3. Evapotranspiration.....	29
2.1.3. Régimes hydrologiques.....	30
2.1.4. Sols et végétation.....	33
2.1.5. Occupation humaine	36
2.2. Critique et Analyse des données.....	38
2.2.1. Données pluviométriques.....	38
2.2.1.1. Les stations pluviométriques de la zone ERREAU	38
2.2.1.1.1. Les stations de longue durée.	40
2.2.1.1.2. Autres stations.	41
2.2.1.2. Statistiques descriptives.	43
2.2.1.2.1. Stations pluviométriques de longue durée.	43
2.2.1.2.1.1. Totaux pluviométriques annuels	43
2.2.1.2.1.2. Totaux pluviométriques mensuels.....	44
2.2.1.2.2. Autres stations	44
2.2.1.3. Tracés des isohyètes	44
2.2.1.3.1. Rappels sur la théorie des variables régionalisées	44
2.2.1.3.1.1. Variogramme	45
2.2.1.3.1.2. Krigeage	46
2.2.1.3.2. Tracé des isohyètes.....	47
2.2.1.3.2.1. Isohyètes interannuelles - Totaux annuels.....	47
2.2.1.3.2.2. Isohyètes mensuelles interannuelles.....	48
2.2.1.4. Corrélations.....	57
2.2.1.5. Homogénéité des séries chronologiques.....	58
2.2.1.5.1. Méthode bayésienne de détection de changement de moyenne.....	58

2.2.1.5.2. Examen des stations de longue durée.....	58
2.2.1.6. Conclusions.....	68
2.2.2. Données hydrométriques.....	68
2.2.2.1. Le haut bassin du Niger.....	68
2.2.2.2. Le haut bassin du Bandama.....	72
2.2.2.3. Le haut bassin du Sassandra.....	77
2.2.3. Occupation du sol.....	80
2.2.4. Evapotranspiration potentielle.....	83
2.3. Modèles Pluie Débit.....	86
2.3.1. Le modèle CREC.....	86
2.3.1.1. Fonction de production.....	87
2.3.1.2. Fonction de transfert.....	88
2.3.2. Le modèle GR3.....	89
2.3.2.1. Le réservoir sol.....	90
2.3.2.2. Le réservoir eau gravitaire.....	91
2.3.2.3. L'hydrogramme unitaire de paramètre C.....	92
2.3.3. Le modèle MODGLO.....	92
2.3.3.1. Fonction de production.....	94
2.3.3.2. Fonction de transfert.....	99
2.4. Développements informatiques.....	100
2.4.1. Mise en forme des fichiers.....	100
2.4.2. Les programmes de modélisation.....	101
2.4.2.1. Calage.....	103
2.4.2.2. Validation - Simulation - Génération.....	106
2.4.3. Exploitation des résultats.....	106
3. DEUXIEME PARTIE.....	111
3.1. Etude et Sélection des critères numériques de calage.....	111
3.1.1. Les critères utilisés.....	111
3.1.1.1. Le critère CREC.....	112

3.1.1.2. Le critère CRECBI.....	112
3.1.1.3. Le critère de Fortin.....	113
3.1.1.4. Le critère de Nash.....	113
3.1.1.5. Le critère SExpER.....	114
3.1.2. Le module d'évaluation comparative.....	114
3.1.3. Méthodologie et résultats.....	117
3.1.3.1. Méthodologie.....	117
3.1.3.2. Résultats.....	118
3.1.3.2.1. Calages.....	118
3.1.3.2.2. Evaluation comparative et classement des critères.....	121
3.1.4. Conclusions.....	126
3.2. Calage des modèles.....	127
3.2.1. Méthodologie de calage.....	127
3.2.1.1. Les méthodes d'optimisation.....	127
3.2.1.2. Application pratique.....	132
3.2.2. Calages du modèle CREC.....	133
3.2.3. Calages du modèle GR3.....	137
3.2.4. Calages du modèle MODGLO.....	141
3.2.5. Conclusions.....	147
3.3. Validations croisées et Analyse des calages.....	147
3.3.1. Validations croisées.....	147
3.3.1.1. Définitions et méthodologie.....	147
3.3.1.2. Résultats.....	150
3.3.2. Analyse des calages.....	154
3.3.2.1. Production.....	155
3.3.2.2. Transfert.....	159
3.3.2.3. Conclusions.....	163
3.4. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres.....	165
3.4.1. Définitions des échantillons.....	165
3.4.2. Variables utilisées. Etude des corrélations.....	168

3.4.2.1. Variables utilisées.....	169
3.4.2.2. Etude des corrélations.....	170
3.4.3. Analyse en Composantes Principales. Analyse Factorielle des Correspondances.....	172
3.4.3.1. Rappels sur l'ACP et l'AFC.....	172
3.4.3.2. Application.....	173
3.4.3.2.1. L'ACP.....	173
3.4.3.2.2. L'AFC.....	184
3.4.3.3. Conclusions.....	189
3.4.4. Equations de prédétermination des paramètres des modèles.....	189
3.4.4.1. Modèle CREC.....	189
3.4.4.2. Modèle GR3.....	191
3.4.4.3. Modèle MODGLO.....	192
3.4.4.4. Conclusions.....	193
3.5. Conclusions.....	194
4. TROISIEME PARTIE.....	197
4.1. Validation des équations de prédétermination.....	198
4.1.1. Modèle CREC.....	198
4.1.1.1. Echantillon de calage.....	198
4.1.1.1.1. Critères d'appréciation numériques.....	199
4.1.1.1.2. Critères graphiques.....	202
4.1.1.1.3. Conclusions.....	205
4.1.1.2. Echantillon de validation.....	205
4.1.1.2.1. Critères numériques.....	206
4.1.1.2.2. Critères graphiques.....	208
4.1.1.2.3. Conclusions.....	211
4.1.2. Modèle GR3.....	212
4.1.2.1. Echantillon de calage.....	212
4.1.2.1.1. Critères numériques.....	212
4.1.2.1.2. Critères graphiques.....	215
4.1.2.1.3. Conclusions.....	218
4.1.2.2. Echantillon de validation.....	218
4.1.2.2.1. Critères numériques.....	218
4.1.2.2.2. Critères graphiques.....	220
4.1.2.2.3. Conclusions.....	223

4.1.3. Comparaison CREC GR3.	224
4.1.3.1. Echantillon de calage.....	224
4.1.3.2. Echantillon de validation.....	226
4.2. Comparaison avec des modèles autorégressifs.....	230
4.2.1. Comparaison des hydrogrammes calés.	230
4.2.2. Comparaison des hydrogrammes prédéterminés.....	232
4.3. Modifications.	239
4.3.1. Modifications du modèle CREC.....	239
4.3.2. Modifications du modèle GR3.	244
5. CONCLUSION	250

LISTE DES TABLEAUX

2.1.1 : Caractéristiques climatiques de la zone d'application d'ERREAU (Avenard et al, 1971).....	23
2.1.2 : Caractéristiques statistiques des seize principaux postes pluviométriques	24
2.1.3 : Paramètres pluviométriques de 5 stations de la zone d'étude	26
2.1.4 : Températures moyennes relevées à Ferkessedougou (Eldin in Avenard et al, 1971)	28
2.1.5 : ETP journalières moyennes calculées à l'aide de la formule de Penman	29
2.2.1 : Répartition des données pluviométriques	40
2.2.2 : Les 16 principales stations pluviométriques	41
2.2.3 : Autres stations pluviométriques.....	42
2.2.4 : Caractéristiques statistiques des stations de longue durée.....	43
2.2.5 : Corrélations mensuelles entre postes pluviométriques	57
2.2.6 : Homogénéité des séries pluviométriques	59
2.2.7 : Le haut bassin du Niger	68
2.2.8 : Le haut bassin du Bandama	73
2.2.9 : Le haut bassin du Sassandra.....	77
2.2.10 : Occupation du sol des bassins versants du programme ERREAU	80
2.2.11 : Caractéristiques statistiques des paramètres d'occupation du sol.....	81
2.2.12 : Valeurs des constantes utilisées pour le calcul de l'ETP Penman	83
2.2.13 : Evapotranspirations potentielles en mm/jour.	85
3.1.1. : Définition de la lame de crue.....	116
3.1.2 : Valeurs des critères de calage.....	118
3.1.3 : La Bagoé à Kouto 1981-1985. Modèle CREC.	122
3.1.4 : La Bagoé à Guingérini 1981-1983. Modèle MODGLO.	123
3.1.5 : Le Bou à Boron 1981-1985. Modèle GR3.	123
3.1.6 : Fréquences absolues de classement des critères	124
3.1.7 : Fréquences absolues des classements des critères pour le coefficient de corrélation.....	124
3.1.8 : Fréquences absolues des classements des critères pour les écarts sur les coefficients d'autocorrélation.	125
3.1.9 : Fréquences absolues des classements des critères pour Bilan1.....	125
3.1.10 : Fréquences absolues des classements des critères pour Bilan2.....	126
3.1.11 :Fréquences absolues des classements des critères pour l'IRVC.	126
3.2.1 : Conditions de l'optimisation du modèle CREC	133
3.2.2 : Caractéristiques des calages du modèle CREC.....	134
3.2.3 : Conditions de l'optimisation du modèle GR3.....	137
3.2.4 : Caractéristiques des calages du modèle GR3.	138
3.2.5 : Conditions d'optimisation du modèle MODGLO.....	141
3.2.6 : Caractéristiques des calages du modèle MODGLO.....	142
3.2.7 : Caractéristiques des calages repris.....	146

3.3.1 :Bou à Boron, CREC, Critère de Nash.....	148
3.3.2 : Bou à Boron, CREC, IRVC.....	149
3.3.3 : Liste des validations croisées des bassins.....	149
3.3.4 : Modèle CREC, Gains relevés lors des validations croisées.....	151
3.3.5 : Modèle GR3, Gains relevés lors des validations croisées.....	152
3.3.6 : Modèle MODGLO, Gains relevés lors des validations croisées.....	154
3.3.7 : Variables descriptives de la production.....	156
3.3.8 : Modèle MODGLO, Caractérisation de la fonction de transfert.....	160
3.3.9 : Modèle CREC, Caractérisation de la fonction de transfert.....	161
3.3.10 : Modèle GR3, Caractérisation de la fonction de transfert.....	161
3.4.1 : Caractéristiques des individus éliminés à la deuxième étape.....	166
3.4.2 : Echantillon de calage.....	168
3.4.3 : Echantillon de validation.....	168
3.4.4 : Résultats de l'ACP.....	173
3.4.5 : Corrélations des variables principales avec les trois premiers axes.....	174
3.4.6 : Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes.....	178
3.4.7 : Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes.....	180
3.4.8 : Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes.....	182
3.4.9 : Bornes et effectifs des classes.....	184
3.4.10 : Tableau de contingence des variables principales - 3 ^e analyse.....	186
4.1.1 : Echantillon de calage.....	198
4.1.2 : Equations de prédétermination des paramètres du modèle CREC.....	199
4.1.3 : Modèle CREC, Echantillon de calage. Critères numériques calculés sur les lames décadaires.....	200
4.1.4. : Modèle CREC, Echantillon de calage. Critères numériques calculés sur les débits journaliers.....	201
4.1.5 : Echantillon de validation.....	205
4.1.6. : Modèle CREC, Echantillon de validation. Critères numériques calculés sur les lames décadaires.....	206
4.1.7 : Modèle CREC, Echantillon de validation. Critères numériques calculés sur les débits journaliers.....	207
4.1.8 : Equations de prédétermination des paramètres du modèle GR3.....	212
4.1.9 : Modèle GR3. Echantillon de calage. Critères numériques calculés sur les lames décadaires.....	213
4.1.10. Modèle GR3. Echantillon de calage. Critères numériques calculés sur les débits journaliers.....	214
4.1.12 : Modèle GR3. Echantillon de validation. Critères numériques calculés sur les lames décadaires.....	219
4.1.13 : Modèle GR3. Echantillon de validation. Critères numériques calculés sur les débits journaliers.....	219
4.1.14. : Comparaison CREC GR3, Echantillon de calage.....	224
4.1.15. : Comparaison CREC GR3, Echantillon de validation.....	226
4.2.1. : Comparaison avec les modèles autorégressifs, Echantillon de calage.....	231
4.2.2 : Comparaison avec les modèles autorégressifs, Echantillon de validation.....	236
4.3.1 : Modèle CREC5, Echantillon de calage.....	241
4.3.2 : Modèle CREC5, Echantillon de validation.....	241

4.3.3 : Modèle GR4, Echantillon de calage.	245
4.3.4 : Modèle GR4, Echantillon de validation.	245

LISTE DES FIGURES

2.1.1 : Carte du relief de la Côte d'Ivoire (Avenard, 1971).....	16
2.1.2 : Découpage en zones physiques.....	18
2.1.3 : Coupe schématique du FIT	20
2.1.4 : Coupe schématique de la troposphère Ouest-africaine le long du méridien 0.....	21
2.1.5 : Positions moyennes mensuelles des zones climatiques et succession moyenne des types de temps associés. .	22
2.1.6 : Station d'Odienne, hauteurs annuelles précipitées.....	25
2.1.7 : Station de Boundiali, hauteurs annuelles précipitées.....	25
2.1.8 : Hyétogramme mensuel. Boundiali.	26
2.1.9 : Hyétogramme mensuel. Odienne.	27
2.1.10. : Korhogo, températures moyennes mensuelles.	28
2.1.11. : Odienne, Températures moyennes mensuelles.	29
2.1.12 : Réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire.....	31
2.1.13 : La Bagoé à Kouto, 1981, débits journaliers.....	32
2.1.14. : Limite entre les domaines soudanais et guinéens.....	35
2.2.1 : Situation des postes pluviométriques	39
2.2.2 : Les 16 principaux postes pluviométriques	40
2.2.3 : Isohyètes interannuelles.....	49
2.2.4 : Isohyètes interannuelles.....	50
2.2.5 : Isohyètes interannuelles.....	51
2.2.6 : Isohyètes interannuelles.....	52
2.2.7 : Isohyètes interannuelles.....	53
2.2.8 : Isohyètes interannuelles.....	54
2.2.9 : Isohyètes interannuelles.....	55
2.2.10 : Isohyètes interannuelles.....	56
2.2.11 : Probabilités de changement de moyenne	60
2.2.12 : Probabilités de changement de moyenne	61
2.2.13 : Probabilités de changement de moyenne	62
2.2.14 : Probabilités de changement de moyenne	63
2.2.15 : Probabilités de changement de moyenne	64
2.2.16 : Probabilités de changement de moyenne	65
2.2.17 : Probabilités de changement de moyenne	66
2.2.18 : Probabilités de changement de moyenne	67
2.2.19 : Carte du haut bassin du Niger.....	70
2.2.20 : Carte du haut bassin du Bandama.....	74
2.2.21 : Carte du haut bassin du Sassandra.....	78
2.2.22 : Le Lafigue à Rte de Badikaha - Occupation du sol	82

2.2.23 : La Bagoé à Kouto - Occupation du sol.....	82
2.3.1 : Schéma conceptuel du modèle CREC.....	87
2.3.2 : Schéma conceptuel du modèle GR3.....	90
2.3.3 : rendement de la pluie et de l'évapotranspiration en fonction du remplissage de S.....	91
2.3.4 : Schéma conceptuel du modèle MODGLO.....	93
2.4.1 : Organisation modulaire des programmes.....	102
2.4.2 : Modèle CREC, calage manuel, écran principal.....	104
2.4.3 : Modèle CREC, calage manuel, écran graphique d'aide au calage.....	104
2.4.4 : Modèle CREC, calage manuel, écran graphique d'aide au calage.....	105
2.4.5 : Ecran principal de MODELESG.....	106
2.4.6 : Exploitation graphique d'un fichier de résultats journaliers.....	107
3.1.1 : la Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle MODGLO, critère CREC <i>Bi</i>	120
3.1.2 : la Bagoé à Guingérini 1981-1983, modèle CREC, critère de Nash.....	120
3.1.3 : Le Bou à Boron 1981-1985, modèle GR3, critère CREC.....	121
3.2.1 : Séquence de simplex réguliers obtenus en minimisant $f(x)$	130
3.2.2 : Le Solomougou à Ziebatago, 1983.....	135
3.2.3 : Le Sien à Massadougou, 1981.....	136
3.2.4 : La Bagoé à Kouto, 1981.....	136
3.2.5 : Le Solomougou à Ziebatago, 1983.....	139
3.2.6 : Le Sien à Massadougou, 1981.....	139
3.2.7 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980.....	140
3.2.8 : Le Bandama à Seguekiele, 1983.....	143
3.2.9 : Le Bandama à Seguekiele, 1981.....	143
3.2.10 : La Bagoé à Kouto, 1971.....	144
3.2.11 : Le Yani à Madji, 1983.....	146
3.3.1 : Le Bou à Boron, 1981, Modèle CREC.....	157
3.3.2 : Le Bou à Boron, 1981, Modèle GR3.....	158
3.3.3 : Le Bou à Boron, 1981, Modèle MODGLO.....	158
3.3.4 : Le Doundian à Wahire, modèle CREC.....	162
3.3.5 : Le Doundian à Wahire, modèle GR3.....	163
3.4.1 : Régression Lame Annuelle - Pluie Annuelle.....	167
3.4.2 : Corrélations variables principales - Composantes 1 et 2.....	175
3.4.3 : Corrélations variables principales - Composantes 1 et 3.....	175
3.4.4 : Corrélations variables principales - Composantes 2 et 3.....	176
3.4.5 : Projection des individus dans le plan 1-2.....	177
3.4.6 : Projection des individus dans le plan 1-3.....	177
3.4.7 : Projection des individus dans le plan 2-3.....	178
3.4.8 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 2.....	179

3.4.9 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 3.	179
3.4.10 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 2 et 3.	180
3.4.11 : Corrélations variables supplémentaires - Composantes 1 et 2.	181
3.4.12 : Corrélations variables supplémentaires - Composantes 1 et 3.	181
3.4.13 : Corrélations variables supplémentaires - Composantes 2 et 3.	182
3.4.14 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 2.	183
3.4.15 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 1 et 3.	183
3.4.16 : Corrélations des variables supplémentaires - Composantes 2 et 3.	184
3.4.17 : AFC.	187
3.4.18 : AFC.	187
3.4.19 : AFC.	188
4.1.1 : Le Yani à Madji, 1980.	203
4.1.2 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1978.	203
4.1.3 : Le Lafigue à Rte de Badikaha, 1982.	204
4.1.4 : La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981.	209
4.1.5 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1977.	209
4.1.6 : La Douni à Pt 398, 1983.	210
4.1.8 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980.	216
4.1.9 : Le Sien à Massadougou, 1984.	216
4.1.10 : Le Yani à Madji, 1983.	217
4.1.11 : La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981.	221
4.1.12 : La Tiemba à Lille, 1984.	221
4.1.13 : Le Badenou à Rte de M'Bengue, 1983.	222
4.1.14 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980.	225
4.1.15 : Le Sien à Massadougou, 1983.	225
4.1.16 : La Bagoé à Kouto, 1985.	227
4.1.17 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1977.	228
4.2.1 : Le Yani à Madji, 1986.	237
4.2.2 : Le Lafigue à Rte de Badikaha, 1981.	237

ANNEXES

Station Numéro : 1090006400 Nombre d'années : 66

Station Numéro : 1090007300 Nombre d'années : 66

Nom de la station : Boundiali

Nom de la station : Dabakala

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1922	214*	1143	1956	366	1280
1923	365	1468	1957	365	1975
1924	305*	1414	1958	365	1208
1925	0*	0	1959	365	1275
1926	61*	190	1960	366	1433
1927	244*	1364	1961	365	1105
1928	366	1134	1962	365	1714
1929	365	1506	1963	365	1568
1930	273*	957	1964	366	1623
1931	365	1513	1965	365	2303
1932	335*	1347	1966	334*	1585
1933	287*	826	1967	334*	887
1934	365	1127	1968	366	1253
1935	365	1521	1969	365	1547
1936	366	1209	1970	364*	2107
1937	365	1500	1971	365	1976
1938	365	1356	1972	366	2058
1939	365	1556	1973	365	1802
1940	366	1316	1974	365	2309
1941	365	1528	1975	365	1508
1942	365	1114	1976	366	1268
1943	365	1228	1977	365	1019
1944	366	1390	1978	364*	1189
1945	365	1540	1979	304*	1665
1946	365	1022	1980	299*	1316
1947	365	1181	1981	365	1278
1948	366	1149	1982	365	1142
1949	365	1410	1983	365	837
1950	365	1581	1984	366	1123
1951	365	1854	1985	365	1428
1952	366	1770	1986	365	1291
1953	365	1840	1987	365	1218
1954	365	1869			
1955	365	1734			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1461 mm
 Calculée sur 52 années complètes
 Variance : 102830
 Coefficient de Variation : 0.2195

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1922	214*	698	1956	366	1142
1923	365	1075	1957	365	1742
1924	366	1321	1958	365	850
1925	365	1413	1959	365	1087
1926	365	1147	1960	366	1063
1927	365	1398	1961	365	956
1928	366	1297	1962	365	1227
1929	365	1078	1963	365	1337
1930	365	1334	1964	366	1313
1931	365	1158	1965	365	1487
1932	366	1104	1966	365	1264
1933	365	1269	1967	365	1118
1934	365	1132	1968	366	1639
1935	365	1446	1969	365	1016
1936	366	1129	1970	365	1011
1937	365	1117	1971	365	1159
1938	365	1156	1972	366	835
1939	365	999	1973	365	1111
1940	366	1065	1974	365	604
1941	365	872	1975	365	827
1942	365	996	1976	274*	490
1943	365	1160	1977	365	1099
1944	366	1351	1978	365	749
1945	365	1098	1979	365	1176
1946	365	837	1980	335*	938
1947	365	1288	1981	364*	522
1948	366	1036	1982	365	508
1949	365	1449	1983	365	331
1950	365	782	1984	366	1217
1951	365	1195	1985	365	1183
1952	366	1218	1986	365	916
1953	365	1174	1987	335*	1311
1954	365	1151			
1955	365	1538			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1127 mm
 Calculée sur 61 années complètes
 Variance : 61623
 Coefficient de Variation : 0.2203

Station Numéro : 1090009900 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Ferke(a)

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1970	365	1394	1976	366	1039
1971	184*	859	1977	365	880
1972	366	984	1978	365	927
1973	365	1158	1979	365	1266
1974	365	1349	1980	335*	1145
1975	365	1267			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1140 mm
Calculée sur 9 années complètes
Variance : 31968
Coefficient de Variation : 0.1568

Station Numéro : 1090010000 Nombre d'années : 57

Nom de la station : Ferke(b)

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1927	334*	1307	1956	366	1203
1928	366	1314	1957	365	1764
1929	365	1603	1958	365	925
1930	365	1120	1959	365	1608
1931	273*	1107	1960	366	1539
1932	366	1311	1961	365	1114
1933	365	1838	1962	365	1322
1934	365	1113	1963	365	1640
1935	365	1238	1964	366	1548
1936	366	1137	1965	365	1346
1937	365	1237	1966	365	1106
1938	365	1407	1967	365	1281
1939	365	1185	1968	366	1245
1940	366	1111	1969	365	1335
1941	365	1679	1970	365	1463
1942	365	1323	1971	181*	391
1943	365	1401	1972	366	984
1944	366	1256	1973	365	1158
1945	365	1441	1974	365	1349
1946	365	930	1975	365	1267
1947	365	1134	1978	334*	916
1948	366	968	1981	365	1113
1949	365	1447	1982	365	1120
1950	365	1405	1983	365	881
1951	365	1397	1984	366	1097
1952	366	1314	1985	365	1379
1953	365	1438	1986	365	1170
1954	365	1973	1987	365	1038
1955	365	1517			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1306 mm
Calculée sur 53 années complètes
Variance : 53825
Coefficient de Variation : 0.1776

Station Numéro : 1090011800 Nombre d'années : 39

Nom de la station : Katiola

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1949	0*	0	1969	365	1023
1950	245*	829	1970	365	993
1951	365	1241	1971	365	1232
1952	366	1758	1972	366	1062
1953	365	1203	1973	365	843
1954	365	1226	1974	365	1141
1955	365	1098	1975	365	1104
1956	366	906	1976	366	877
1957	365	1584	1977	365	1231
1958	365	910	1978	365	926
1959	365	943	1979	365	1259
1960	91*	6	1980	358*	1269
1961	365	990	1981	365	826
1962	365	922	1982	365	782
1963	365	1890	1983	365	628
1964	366	943	1984	366	810
1965	365	1283	1985	365	888
1966	365	1596	1986	365	822
1967	365	1157	1987	365	819
1968	366	1588			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1100 mm
Calculée sur 35 années complètes
Variance : 83855
Coefficient de Variation : 0.2632

Station Numéro : 1090012000 Nombre d'années : 17

Nom de la station : Korhogo(aero)

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1971	184*	868	1980	356*	1346
1972	366	1362	1981	365	1198
1973	365	1185	1982	365	1171
1974	365	1396	1983	365	836
1975	365	1326	1984	366	1410
1976	366	1241	1985	365	1425
1977	365	867	1986	365	1278
1978	365	1032	1987	365	1176
1979	358*	1556			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1207 mm
Calculée sur 14 années complètes
Variance : 32592
Coefficient de Variation : 0.1495

Station Numéro : 1090012100 Nombre d'années : 59

Station Numéro : 1090012700 Nombre d'années : 25

Nom de la station : Korhogo

Nom de la station : Kouto

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1905	31*	0	1952	366	1434
1906	0*	0	1953	365	1404
1907	0*	0	1954	365	1307
1908	62*	0	1955	365	1629
1909	0*	0	1956	366	1216
1910	31*	0	1957	365	2045
1911	59*	0	1958	365	925
1912	61*	0	1959	365	1187
1913	28*	0	1960	366	1705
1914	90*	0	1961	365	811
1915	90*	0	1962	365	1410
1916	31*	0	1963	365	1565
1917	0*	0	1964	366	1572
1918	28*	0	1965	365	1415
1919	0*	0	1966	365	1560
1920	122*	0	1967	365	1255
1921	120*	0	1968	366	1269
1922	365	1350	1969	365	1559
1923	31*	0	1970	365	1410
1924	335*	1364	1971	365	1152
1925	62*	0	1972	366	993
1926	365	1507	1973	365	997
1944	214*	1180	1974	365	1033
1945	365	1418	1975	365	1173
1946	365	889	1976	366	963
1947	365	1347	1977	334*	834
1948	366	1558	1978	90*	79
1949	365	1663	1979	362*	1200
1950	365	1258	1980	358*	1252
1951	365	1572			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1340 mm
 Calculée sur 34 années complètes
 Variance : 71638
 Coefficient de Variation : 0.1998

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1963	365	1251	1976	366	887
1964	366	1540	1977	365	1090
1965	365	1309	1978	365	1249
1966	361*	1102	1979	363*	1452
1967	365	1616	1980	365*	1216
1968	366	1454	1981	365	1254
1969	365	1589	1982	365	1160
1970	365	1464	1983	365	851
1971	365	1276	1984	366	924
1972	366	1096	1985	365	1138
1973	365	1139	1986	334*	925
1974	365	1160	1987	365	1237
1975	365	1210			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1233 mm
 Calculée sur 21 années complètes
 Variance : 43266
 Coefficient de Variation : 0.1687

Station Numéro : 1090013900 Nombre d'années : 24

Nom de la station : Madinani

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1962	243*	942	1975	365	1516
1963	275*	1134	1976	366	1501
1964	335*	1331	1977	365	1177
1965	306*	1379	1978	365	1259
1966	365	1684	1979	365	1438
1967	365	1645	1980	366	1234
1968	366	1270	1981	365	1462
1969	365	1764	1982	365	1617
1970	365	1133	1983	365	1203
1971	365	1711	1984	366	1277
1972	366	1566	1985	365	1415
1973	365	1046			
1974	365	1482			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1420 mm
 Calculée sur 20 années complètes
 Variance : 41857
 Coefficient de Variation : 0.1441

Station Numéro : 1090014500 Nombre d'années : 28

Nom de la station : Manignan

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1960	275*	1527	1975	280*	1345
1961	275*	1256	1976	366	1631
1962	244*	1717	1977	365	1325
1963	303*	1744	1978	365	1413
1964	366	1972	1979	362*	1690
1965	365	2034	1980	366	1356
1966	365	2098	1981	365	1554
1967	365	1886	1982	365	1149
1968	366	1633	1983	365	1141
1969	335*	2295	1984	366	1125
1970	365	1769	1985	365	1158
1971	365	1386	1986	365	1465
1972	366	1241	1987	365	1047
1973	365	1384			
1974	365	1436			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1486 mm

Calculée sur 21 années complètes

Variance : 94884

Coefficient de Variation : 0.2073

Station Numéro : 1090014800 Nombre d'années : 51

Nom de la station : Mankono

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1937	214*	953	1963	365	1632
1938	212*	612	1964	366	1189
1939	365	1096	1965	365	1100
1940	366	1273	1966	365	1209
1941	365	1188	1967	365	1018
1942	365	1092	1968	366	1555
1943	365	1127	1969	365	1164
1944	366	1586	1970	365	999
1945	365	1607	1971	302*	1431
1946	365	1008	1972	335*	832
1947	365	1367	1973	365	1336
1948	366	862	1974	365	1152
1949	365	1235	1975	338*	1173
1950	365	940	1976	366	960
1951	365	1537	1977	365	874
1952	366	1591	1978	273*	856
1953	365	1133	1979	306*	1347
1954	365	1133	1980	364*	1344
1955	365	1359	1981	365	975
1956	366	966	1982	365	1062
1957	365	1719	1983	365	627
1958	365	952	1984	366	1150
1959	365	1481	1985	365	1501
1960	366	1534	1986	365	976
1961	335*	1035	1987	365	1238
1962	365	1483			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1214 mm

Calculée sur 42 années complètes

Variance : 63525

Coefficient de Variation : 0.2076

Station Numéro : 1090015700 Nombre d'années : 38

Station Numéro : 1090016000 Nombre d'années : 67

Nom de la station : Niakaramandougou

Nom de la station : Odienne

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1950	184*	427	1970	365	1067
1951	365	1392	1971	365	1000
1952	213*	190	1972	366	946
1953	335*	1106	1973	365	1212
1954	365	1210	1974	365	945
1955	365	1376	1975	365	1270
1956	366	797	1976	366	792
1957	365	1537	1977	365	938
1958	365	1023	1978	365	1066
1959	365	1610	1979	365	1386
1960	366	1462	1980	365*	1316
1961	365	1023	1981	365	1141
1962	365	1177	1982	365	931
1963	365	1622	1983	365	564
1964	366	1207	1984	366	1283
1965	365	1274	1985	365	1215
1966	365	1348	1986	365	1087
1967	365	1022	1987	334*	1107
1968	366	1382			
1969	365	821			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1155 mm

Calculée sur 33 années complètes

Variance : 59804

Coefficient de Variation : 0.2117

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1921	230*	1248	1955	365	1565
1922	365	1848	1956	366	1417
1923	365	1190	1957	365	1863
1924	366	2188	1958	365	1496
1925	365	1666	1959	365	1576
1926	365	1815	1960	366	1421
1927	365	1588	1961	365	1570
1928	366	1736	1962	365	1626
1929	334*	2145	1963	365	1769
1930	365	1185	1964	366	1744
1931	59*	4	1965	365	1529
1932	261*	1802	1966	365	1571
1933	365	1442	1967	365	1627
1934	365	1490	1968	366	1559
1935	365	1376	1969	365	1562
1936	366	1649	1970	365	1506
1937	365	1576	1971	365	1750
1938	365	1591	1972	366	1709
1939	365	1691	1973	365	1357
1940	366	1239	1974	365	1258
1941	365	1567	1975	365	1451
1942	347*	1336	1976	366	1797
1943	365	1640	1977	365	1450
1944	366	1269	1978	364*	1588
1945	365	2127	1979	353*	1667
1946	365	1921	1980	353*	1410
1947	365	1501	1981	365	1457
1948	366	1607	1982	365	1611
1949	365	1783	1983	365	1038
1950	365	1203	1984	366	1241
1951	365	1763	1985	365	1099
1952	366	1650	1986	365	1012
1953	365	1958	1987	365	992
1954	365	2188			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1560 mm

Calculée sur 59 années complètes

Variance : 69395

Coefficient de Variation : 0.1688

Station Numéro : 1090016300 Nombre d'années : 38

Nom de la station : Ouangolodougou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1950	214*	1006	1970	365	1104
1951	365	1580	1971	365	968
1952	366	1186	1972	366	1081
1953	365	1663	1973	365	1054
1954	365	2394	1974	365	1264
1955	365	2050	1975	365	1084
1956	366	1335	1976	366	904
1957	365	1185	1977	365	678
1958	365	887	1978	365	862
1959	365	1136	1979	353*	830
1960	336*	1142	1980	358*	1294
1961	334*	739	1981	365	823
1962	365	1125	1982	365	1182
1963	365	1174	1983	365	553
1964	366	1298	1984	366	741
1965	365	1062	1985	365	1245
1966	365	1115	1986	334*	1321
1967	365	1185	1987	365	968
1968	366	1186			
1969	334*	1306			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1163 mm
 Calculée sur 31 années complètes
 Variance : 130576
 Coefficient de Variation : 0.3106

Station Numéro : 1090017900 Nombre d'années : 24

Nom de la station : Sinhala

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1962	245*	1202	1977	365	1002
1963	365	1343	1978	365	1227
1966	275*	1284	1979	365	1094
1967	272*	1253	1980	362*	1228
1968	366	1506	1981	365	1537
1969	365	1591	1982	365	1257
1970	365	1161	1983	365	1092
1971	365	1041	1984	366	1118
1972	366	936	1985	335*	900
1973	365	1029	1986	275*	905
1974	365	1083	1987	244*	952
1975	365	1294			
1976	366	1339			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1215 mm
 Calculée sur 17 années complètes
 Variance : 36313
 Coefficient de Variation : 0.1569

Station Numéro : 1090018700 Nombre d'années : 38

Nom de la station : Tafire

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1950	214*	702	1970	365	1051
1951	212*	747	1971	365	921
1952	335*	1122	1972	366	850
1953	304*	900	1973	365	994
1954	365	1263	1974	365	840
1955	365	1540	1975	365	1268
1956	366	750	1976	366	943
1957	365	1599	1977	365	1037
1958	365	850	1978	365	869
1959	365	1816	1979	356*	1688
1960	366	1149	1980	358*	1128
1961	365	1246	1981	365	1045
1962	365	1145	1982	365	880
1963	304*	1123	1983	365	665
1964	335*	968	1984	366	1122
1965	365	1259	1985	365	1138
1966	365	941	1986	365	1053
1967	365	956	1987	365	1022
1968	366	1471			
1969	365	947			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1088 mm
 Calculée sur 30 années complètes
 Variance : 65236
 Coefficient de Variation : 0.2348

Station Numéro : 1090019300 Nombre d'années : 33

Nom de la station : Tengrela

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1953	139*	869	1970	365	1280
1954	365	1683	1971	365	1155
1955	365	1282	1972	366	927
1956	366	1229	1973	365	912
1957	365	1479	1974	365	1056
1958	365	1468	1975	365	1370
1959	334*	1269	1976	366	1267
1960	366	1633	1977	365	1040
1961	365	1545	1978	365	1014
1962	365	1456	1979	214*	738
1963	365	1295	1980	273*	898
1964	366	1557	1981	245*	1317
1965	365	1071	1982	184*	846
1966	365	1150	1985	245*	730
1967	364*	1780	1986	365	782
1968	366	1280	1987	365	912
1969	365	1473			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1253 mm
 Calculée sur 25 années complètes
 Variance : 58719
 Coefficient de Variation : 0.1935

Station Numéro : 1090020500 Nombre d'années : 50

Nom de la station : Touba

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1938	92*	107	1964	366	1088
1939	365	1334	1965	365	1250
1940	366	1396	1966	365	1399
1941	365	1326	1967	365	1326
1942	365	1463	1968	366	1385
1943	365	1197	1969	365	1229
1944	366	1309	1970	365	1100
1945	365	1168	1971	365	1002
1946	365	1227	1972	366	1267
1947	365	1769	1973	343*	884
1948	366	920	1974	365	1375
1949	365	1655	1975	365	1462
1950	365	1240	1976	366	1302
1951	365	1751	1977	365	1402
1952	366	1502	1978	365	1357
1953	365	1372	1979	360*	1437
1954	365	1803	1980	334*	1195
1955	365	1476	1981	365	1025
1956	366	1148	1982	90*	126
1957	365	1683	1983	215*	704
1958	365	1331	1984	366	1570
1959	365	1466	1985	365	1481
1960	366	1124	1986	273*	1190
1961	365	986	1987	365	1409
1962	365	1228			
1963	335*	1481			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1341 mm

Calculée sur 42 années complètes

Variance : 42867

Coefficient de Variation : 0.1545

Station Numéro : 1090006400 Nombre d'années : 66

Nom de la station : Boundiali

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1922	0*	0*	0*	0*	0*	78	166	302	286	244	55	14
1923	0	4	8	200	79	210	197	245	318	160	18	30
1924	5	15	47	19	112	98	333	298	332	156	0*	0*
1925	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1926	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	163	27	0*	0*
1927	0*	0*	0*	50	133	172	257	268	254	180	51	0*
1928	0	0	53	19	37	64	219	205	357	160	21	0
1929	0	3	45	58	105	258	240	265	182	292	58	0
1930	0	63	92	0*	0*	129	197	302	167	0*	3	4
1931	3	22	5	101	138	220	265	363	264	97	33	2
1932	34	37	39	126	89	93	121	351	246	187	24	0*
1933	0	15	31	63	0*	0*	95*	426	78	68	38	13
1934	0	14	73	56	100	53	209	295	198	124	0	5
1935	5	0	493	27	137	89	210	247	183	78	45	7
1936	0	54	0	102	187	180	146	262	160	48	70	0
1937	0	0	46	84	157	140	383	249	355	76	10	0
1938	0	2	153	39	197	103	213	307	181	126	35	0
1939	0	0	48	53	179	115	480	153	389	99	33	7
1940	28	0	3	43	181	215	103	388	198	139	18	0
1941	17	0	63	141	104	137	287	265	259	166	90	0
1942	0	0	0	129	139	87	109	333	128	112	50	28
1943	0	15	76	17	74	187	192	329	184	101	32	21
1944	0	0	18	66	64	220	178	411	253	111	33	38
1945	4	12	0	40	299	111	411	353	157	105	52	0
1946	0	0	39	15	100	155	230	274	105	106	0	0
1947	11	78	4	20	58	181	121	257	279	153	8	14
1948	0	0	35	124	87	138	211	263	189	90	14	0
1949	4	0	133	87	73	102	285	387	142	93	105	0
1950	0	3	8	64	116	277	310	402	266	128	7	0
1951	34	17	11	51	120	134	316	404	334	333	100	0
1952	0	24	25	109	138	132	397	195	591	152	3	6
1953	0	23	78	93	176	342	253	472	128	196	77	0
1954	0	54	102	177	129	248	262	382	202	255	57	0
1955	0	0	88	112	130	366	353	358	132	112	8	77
1956	0	31	45	40	155	189	188	245	233	95	51	11
1957	0	24	61	37	97	181	430	382	464	202	80	19
1958	109	0	6	140	93	138	147	211	187	88	69	20
1959	0	18	25	80	44	119	244	370	267	17	90	0
1960	0	0	91	92	91	202	342	153	403	47	14	0
1961	0	0	54	98	38	172	209	258	209	41	28	0
1962	0	14	4	225	85	171	190	297	386	192	151	0
1963	1	110	5	36	110	141	437	349	161	185	32	0
1964	0	0	11	25	142	173	403	480	242	54	21	72
1965	127	18	6	170	150	294	370	424	505	240	0	0
1966	0	0	33	142	61	86	262	641	238	0*	122	0

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090006400 Nombre d'années : 66

Nom de la station : Boundiali

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1967	0	21	15	86	0*	77	83	205	262	117	0	21
1968	0	28	106	116	85	237	122	208	182	169	0	0
1969	0	12	0	105	33	150	287	333	254	256	118	0
1970	0	47	104	151*	245	186	396	508	373	76	21	0
1971	0	7	34	93	219	224	213	614	401	146	0	24
1972	0	21	39	187	170	309	207	562	300	244	19	0
1973	0	0	0	70	83	118	267	592	407	252	0	15
1974	0	0	65	122	66	246	539	679	405	187	0	0
1975	0	0	91	45	131	135	291	334	474	0	8	0
1976	0	0	4	136	164	121	177	132	271	178	86	0
1977	0	0	0	26	94	245	24	255	303	72	0	0
1978	0	21	98*	104	61	149	229	186	221	120	0	0
1979	0	0	127	26	148	255	271	567	249	22	0*	0*
1980	0*	0*	8	45*	120*	198	277*	333	151*	169*	6	8
1981	0	34	140	79	154	188	205	257	142	74	5	0
1982	0	4	167	107	110	114	175	266	146	52	0	0
1983	0	19	0	69	54	168	168	163	90	69	35	3
1984	0	0	101	30	146	172	200	199	154	88	34	0
1985	0	0	44	47	77	180	288	420	229	137	6	0
1986	0	61	63	48	107	72	231	366	218	72	54	0
1987	0	0	5	18	134	156	171	332	189	205	5	4

* : Mois incomplet

Boundiali	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	15	54	81	118	168	249	333	253	132	35	8
Nbre d'années	61	61	61	60	59	63	62	64	64	62	62	60
Maximum	127	110	493	225	299	366	539	679	591	333	151	77
Minimum	0	0	0	15	33	53	24	132	78	0	0	0
Variance	477	489	5093	2482	2669	4563	10202	14729	11301	5096	1287	233
C. Variation	3.495	1.432	1.333	0.613	0.437	0.402	0.406	0.364	0.419	0.542	1.013	1.988

Station Numéro : 1090007300 Nombre d'années : 66

Nom de la station : Dabakala

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1922	0*	0*	0*	0*	0*	86	11	116	119	282	75	8
1923	6	27	56	138	143	85	127	64	233	140	56	0
1924	8	104	37	197	211	138	71	46	291	198	22	0
1925	0	9	85	79	221	189	126	138	334	140	94	0
1926	9	62	184	105	243	116	36	121	167	29	37	38
1927	54	2	16	224	195	183	52	70	278	291	25	10
1928	0	11	79	151	87	152	110	249	304	153	2	0
1929	0	33	73	99	114	239	66	116	238	79	22	0
1930	0	5	14	87	136	329	120	35	478	60	22	49
1931	0	121	31	69	223	170	234	74	164	72	0	1
1932	0	69	77	161	181	78	91	63	211	85	61	29
1933	0	20	127	119	151	126	138	224	134	101	116	14
1934	0	0	42	178	47	195	167	205	177	120	1	0
1935	60	6	69	159	77	129	28	237	419	203	61	0
1936	0	53	23	135	164	74	92	69	272	191	55	0
1937	0	35	41	50	256	95	61	99	306	95	55	26
1938	0	0	52	174	159	102	58	218	185	170	34	5
1939	0	57	134	88	202	84	87	52	163	66	67	0
1940	6	0	83	138	119	165	36	71	197	200	50	0
1941	2	0	133	61	52	170	149	71	101	53	45	37
1942	11	113	43	102	162	68	49	75	129	205	24	14
1943	0	22	69	135	160	109	70	145	245	126	65	14
1944	0	36	129	131	82	189	127	150	203	252	40	11
1945	0	15	5	50	154	106	130	192	222	222	3	0
1946	37	36	35	98	107	73	27	92	152	175	1	4
1947	10	72	45	33	77	193	52	217	384	122	19	65
1948	0	52	53	330	135	106	18	71	156	42	64	8
1949	0	4	140	73	179	94	236	290	214	199	21	0
1950	59	45	14	164	129	26	60	95	116	46	20	9
1951	7	31	86	22	78	171	119	184	261	230	0	6
1952	0	58	52	69	108	83	184	112	341	154	20	38
1953	0	161	10	87	140	167	159	81	186	142	0	44
1954	12	38	46	160	147	187	8	152	194	169	40	0
1955	0	0	108	204	153	235	184	92	380	135	48	0
1956	0	136	176	139	77	224	34	112	181	29	20	14
1957	0	4	128	254	111	164	135	380	325	205	9	27
1958	108	0	43	111	98	101	8	64	155	69	74	18
1959	0	38	76	70	102	184	89	63	307	63	54	40
1960	0	0	53	114	50	166	92	206	261	107	14	0
1961	7	0	62	132	155	122	142	41	184	111	0	0
1962	0	124	19	138	154	185	73	221	121	100	92	0
1963	26	0	0	172	172	180	182	180	236	163	26	0
1964	30	0	85	99	134	210	93	260	244	52	88	19
1965	37	81	24	200	215	187	162	182	315	73	12	0
1966	0	0	176	119	160	172	42	135	131	250	29	52

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090007300 Nombre d'années : 66

Nom de la station : Dabakala

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1967	0	56	64	83	120	135	111	270	181	67	30	0
1968	0	28	41	193	162	128	365	310	180	127	103	3
1969	0	90	90	188	45	85	73	10	84	228	124	0
1970	38	0	40	63	157	64	99	173	298	57	20	3
1971	0	11	77	165	96	112	109	171	315	89	0	14
1972	0	9	111	126	228	94	10	58	62	105	0	34
1973	0	14	13	112	147	136	77	290	239	58	6	19
1974	0	13	177	169	16	3	2	14	171	40	0	0
1975	0	0	0	77	39	92	94	122	282	55	29	37
1976	0	16	77	11	96	114	10	70	98	0*	0*	0*
1977	0	11	10	82	131	104	22	285	346	106	0	2
1978	0	8	55	136	61	162	152	28	99	40	10	0
1979	0	0	79	121	94	253	168	59	180	203	10	10
1980	27	80	18	75	231	66	141	148	124	0*	30	0
1981	0	0	118	14	74	61	86*	24	110	35	2	0
1982	0	10	29	76	73	102	16	97	24	52	28	3
1983	0	0	0	144	35	22	36	9	32	0	3	52
1984	0	1	211	68	96	80	287	116	80	271	6	0
1985	8	4	36	84	100	87	221	299	276	61	9	0
1986	0	8	20	223	188	58	120	87	99	92	20	0
1987	0	5	69	0*	137	222	58	394	295	131	0	0

* : Mois incomplet

Dabakala	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	9	31	67	122	131	133	100	139	212	125	32	12
Nbre d'années	65	65	65	64	65	66	65	66	66	64	65	65
Maximum	108	161	211	330	256	329	365	394	478	291	124	65
Minimum	0	0	0	11	16	3	2	9	24	0	0	0
Variance	370	1519	2482	3481	3096	3676	5079	8302	8992	5147	968	276
C. Variation	2.231	1.240	0.743	0.483	0.423	0.456	0.713	0.657	0.448	0.575	0.959	1.392

Station Numéro : 1090009900 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Ferke(a)

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1970	0	0	23	101	113	121	310	285	305	41	96	0
1971	0*	0*	0*	0*	0*	0*	271	270	191	62	0	65
1972	0	1	25	95	248	119	143	146	94	106	0	8
1973	0	0	62	200	63	140	137	239	226	90	1	0
1974	0	0	103	158	136	118	169	341	249	75	0	0
1975	0	0	65	87	85	116	289	371	182	24	11	38
1976	1	13	46	88	111	134	130	100	158	198	61	0
1977	7	0	23	7	124	186	28	234	206	56	3	7
1978	0	0	44	191	85	91	101	103	198	98	5	11
1979	2	0	36	14	153	247	269	238	217	56	11	26
1980	32	0*	1	41	181*	81	259	184	231	95	16*	24

* : Mois incomplet

Ferke(a)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	2	43	98	124	135	191	228	205	82	19	16
Nbre d'années	10	9	10	10	9	10	11	11	11	11	10	11
Maximum	32	13	103	200	248	247	310	371	305	198	96	65
Minimum	0	0	1	7	63	81	28	100	94	24	0	0
Variance	92	17	734	4159	2608	2126	7714	7204	2576	1954	972	385
C. Variation	2.328	2.651	0.635	0.657	0.411	0.341	0.459	0.372	0.247	0.540	1.670	1.213

Station Numéro : 1090010000 Nombre d'années : 57

Nom de la station : Ferke(b)

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1927	0	24	0	65	206	210	147	269	222	143	23	0*
1928	0	9	23	68	75	96	160	473	253	131	28	0
1929	0	18	36	54	108	289	208	470	235	131	54	0
1930	0	0	65	34	185	186	132	120	229	96	45	29
1931	0	109	0*	0*	249	75	0*	210	381	56	25	3
1932	14	109	111	106	151	147	93	220	211	142	8	2
1933	3	63	8	38	235	218	341	464	331	29	86	22
1934	0	0	77	78	47	134	191	307	167	87	24	2
1935	2	0	33	86	108	97	258	222	268	146	18	0
1936	0	6	89	124	143	178	87	129	197	115	68	0
1937	0	0	15	28	216	108	172	347	194	120	5	33
1938	0	0	76	87	258	171	168	317	214	80	36	1
1939	1	0	35	49	70	149	214	243	256	167	1	1
1940	9	0	40	79	88	134	129	313	194	126	0	0
1941	0	3	46	226	179	135	302	404	221	59	102	2
1942	9	11	35	62	154	138	86	416	174	156	44	36
1943	0	5	40	38	214	139	201	350	242	137	18	17
1944	0	0	44	102	72	142	178	238	378	92	6	4
1945	0	0	0	86	178	138	171	412	233	180	44	0
1946	73	0	55	95	110	74	132	124	199	52	10	6
1947	2	44	0	33	52	172	109	366	253	94	4	4
1948	0	4	33	153	86	106	117	180	157	86	49	0
1949	59	0	29	77	171	98	251	279	324	110	49	0
1950	0	3	10	84	103	248	259	385	223	80	12	0
1951	4	51	89	72	191	139	133	272	229	202	6	9
1952	0	30	18	49	152	79	252	348	218	145	14	8
1953	0	80	28	107	206	252	267	162	190	113	23	11
1954	0	108	74	93	160	211	254	507	320	162	83	0
1955	0	8	59	43	164	168	221	352	232	156	9	106
1956	0	18	111	112	75	87	167	163	263	91	109	7
1957	1	12	90	179	216	88	298	450	254	159	16	1
1958	22	0	103	69	122	107	38	85	221	76	78	6
1959	1	8	27	75	103	171	126	513	513	62	8	0
1960	2	0	75	166	169	198	282	207	324	50	58	8
1961	0	0	14	100	110	244	238	87	245	62	15	0
1962	0	0	14	135	94	155	102	376	315	86	45	0
1963	0	46	13	244	83	323	201	355	87	269	21	0
1964	0	0	123	113	110	148	256	238	367	76	50	67
1965	3	9	13	90	89	190	250	306	289	108	0	0
1966	0	0	122	54	157	118	61	286	190	114	3	1
1967	0	14	26	101	68	231	169	318	291	58	2	3
1968	0	34	68	154	112	191	110	268	212	66	23	9
1969	0	0	62	64	56	262	151	272	223	136	110	0
1970	0	0	28	113	144	150	309	255	330	30	104	0
1971	0	28	56	117	102	88	0*	0*	0*	0*	0*	0*

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090010000 Nombre d'années : 57

Nom de la station : Ferke(b)

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1972	0	1	25	95	248	119	143	146	94	106	0	8
1973	0	0	62	200	63	140	137	239	226	90	1	0
1974	0	0	103	158	136	118	169	341	249	75	0	0
1975	0	0	65	87	85	116	289	371	182	24	11	38
1978	0	0	44	191	85	91	101	103	198	98	5	0*
1981	0	2	95	85	101	133	240	164	208	63	25	0
1982	0	37	77	158	60	176	134	202	186	66	26	0
1983	0	27	4	76	53	139	124	236	189	3	21	11
1984	0	0	29	119	245	86	165	218	138	85	13	0
1985	0	8	37	95	58	260	229	403	190	87	13	0
1986	0	49	15	102	100	119	167	250	232	89	47	0
1987	4	9	18	45	108	237	109	256	144	99	7	1

* : Mois incomplet

Ferke(b)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	17	48	98	131	156	182	286	237	102	30	8
Nbre d'années	57	57	56	56	57	57	55	56	56	56	56	54
Maximum	73	109	123	244	258	323	341	513	513	269	110	106
Minimum	0	0	0	28	47	74	38	85	87	3	0	0
Variance	156	787	1125	2302	3455	3384	4886	11835	5215	2197	921	335
C. Variation	3.399	1.625	0.700	0.488	0.448	0.372	0.385	0.381	0.304	0.459	0.998	2.182

Station Numéro : 1090011800 Nombre d'années : 39

Nom de la station : Katiola

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1949	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1950	0*	0*	0*	0*	148	111	45	100	268	61	80	15
1951	10	68	44	98	136	152	85	115	148	240	64	82
1952	0	68	103	211	128	152	243	117	410	176	62	88
1953	0	65	70	104	121	251	243	88	133	108	7	11
1954	54	11	103	248	98	59	15	184	249	161	41	3
1955	0	0	44	127	107	156	139	91	181	241	4	8
1956	5	83	91	157	92	98	24	89	203	46	6	14
1957	4	86	32	152	97	154	221	237	311	175	21	94
1958	37	6	67	183	78	208	0	117	102	37	59	16
1959	0	7	60	93	63	151	94	133	212	79	47	5
1960	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	6
1961	0	0	37	190	182	242	35	31	168	72	25	10
1962	0	20	23	126	39	254	76	118	126	78	62	0
1963	36	89	34	194	180	215	250	252	342	263	28	7
1964	0	0	71	70	151	166	23	87	192	63	22	98
1965	39	81	21	185	123	100	222	159	194	137	25	0
1966	0	0	84	149	154	270	65	394	211	184	52	33
1967	0	60	104	84	236	137	37	192	232	58	8	11
1968	0	77	48	137	108	178	140	324	269	246	42	19
1969	0	24	74	105	63	91	37	196	114	192	125	2
1970	23	0	63	73	132	76	114	90	275	124	4	19
1971	0	113	113	106	65	126	43	92	306	127	5	136
1972	0	38	146	125	255	132	15	131	75	117	0	29
1973	0	8	30	83	112	54	55	151	184	151	17	0
1974	23	47	76	147	101	115	214	54	219	146	1	0
1975	0	6	98	180	76	148	169	137	141	60	12	77
1976	15	51	65	77	181	84	40	49	126	115	74	0
1977	19	32	44	93	65	118	30	202	473	121	3	32
1978	0	36	139	255	59	77	56	79	111	101	6	8
1979	50	0	47	131	135	244	219	61	260	61	49	1
1980	6*	23*	65*	135	212	57	194	259	107*	208*	3	0
1981	0	23	86	53	131	120	68	132	200	14	0	0
1982	0	5	56	200	105	41	33	151	40	86	65	0
1983	0	0	19	86	147	61	69	96	81	14	37	19
1984	0	0	83	56	54	43	234	111	60	135	35	0
1985	33	0	65	47	57	63	204	211	178	31	0	0
1986	0	27	34	136	69	148	87	48	187	62	24	0
1987	0	17	0	33	123	224	15	161	147	69	31	0

* : Mois incomplet

Katiola	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	10	32	65	128	118	137	104	142	198	115	31	22
Nbre d'années	36	36	35	36	37	37	37	37	36	36	37	38
Maximum	54	113	146	255	255	270	250	394	473	263	125	136
Minimum	0	0	0	33	39	41	0	31	40	14	0	0
Variance	254	1090	1113	3012	2596	4202	6711	5947	8660	4379	814	1156
C. Variation	1.642	1.039	0.514	0.427	0.430	0.473	0.787	0.545	0.470	0.574	0.922	1.535

Station Numéro : 1090012000 Nombre d'années : 17

Nom de la station : Korhogo(aero)

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1971	0*	0*	0*	0*	0*	0*	173	397	220	47	1	30
1972	0	16	59	73	354	192	176	203	146	120	0	24
1973	0	0	19	140	122	126	202	259	228	83	6	0
1974	0	0	94	158	76	105	246	260	264	180	14	0
1975	0	0	97	117	118	115	271	293	230	66	5	15
1976	5	53	107	46	96	117	151	99	182	267	117	0
1977	20	13	41	20	155	183	36	140	181	76	1	0
1978	0	0	25	169	171	86	245	87	167	80	2	0
1979	24	12	50*	76	141	237	283	287*	322*	63*	32	30
1980	58	0	8	38*	185*	72*	228*	266*	256	198*	17	20*
1981	0	27	60	92	204	186	170	271	148	34	8	0
1982	0	15	197	121	40	149	122	235	179	104	9	0
1983	0	42	3	49	98	205	145	104	154	2	29	4
1984	0	0	85	114	156	171	230	207	261	156	30	0
1985	0	2	103	91	156	119	226	374	284	63	8	0
1986	0	8	2	88	127	167	197	262	321	54	51	0
1987	31	17	22	10	66	180	136	456	111	112	36	0

* : Mois incomplet

Korhogo(a	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	9	13	61	91	139	156	188	243	208	96	21	6
Nbre d'années	16	16	15	15	15	15	16	15	16	15	17	16
Maximum	58	53	197	169	354	237	283	456	321	267	117	30
Minimum	0	0	2	10	40	86	36	87	111	2	0	0
Variance	257	239	2653	2060	5060	1718	3755	11191	3212	4032	781	123
C. Variation	1.856	1.209	0.838	0.500	0.513	0.266	0.326	0.435	0.272	0.660	1.303	1.708

Station Numéro : 1090012100 Nombre d'années : 59

Nom de la station : Korhogo

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1905	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1906	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1907	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1908	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1909	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1910	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1911	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1912	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0	0
1913	0*	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1914	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1915	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1916	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1917	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1918	0*	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1919	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1920	0	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1921	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0	0
1922	0	4	19	107	105	145	95	212	378	169	118	0
1923	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1924	27	48	22	80	162	258	338	0*	368	42	20	0
1925	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1926	6	6	51	117	247	222	236	233	262	96	26	5
1944	0*	0*	0*	0*	0*	158	195	309	314	120	25	59
1945	0	2	7	57	145	144	289	378	298	82	16	0
1946	9	0	41	51	54	55	244	104	187	127	18	0
1947	20	35	0	29	91	150	170	307	343	161	5	37
1948	0	0	64	173	118	169	232	481	133	146	42	0
1949	13	0	156	55	81	94	302	483	180	234	66	0
1950	0	30	40	38	98	133	146	384	228	157	5	0
1951	4	75	49	107	141	126	187	387	282	188	22	4
1952	0	10	20	88	134	99	260	349	333	105	14	22
1953	0	38	38	98	153	176	222	272	215	136	50	7
1954	1	27	44	139	99	172	100	335	184	150	58	0
1955	0	5	40	69	174	251	370	345	193	111	10	62
1956	0	17	83	159	146	166	48	219	243	33	103	0
1957	7	0	140	201	206	135	245	360	365	306	80	0
1958	30	0	109	57	76	53	68	170	252	68	41	0
1959	2	2	2	95	142	162	182	193	349	36	22	0
1960	3	0	78	194	120	217	111	344	443	46	50	99
1961	0	0	4	14	82	192	82	178	199	55	6	0
1962	2	7	3	121	81	187	176	360	315	133	26	0
1963	9	33	19	108	173	234	177	391	201	210	11	0
1964	0	0	49	42	163	202	200	359	234	134	123	65
1965	82	6	105	35	83	217	192	322	302	74	0	0
1966	0	0	59	142	162	94	82	551	179	261	30	0

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090012100 Nombre d'années : 59

Nom de la station : Korhogo

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1967	0	41	23	94	105	172	202	342	191	38	3	44
1968	0	58	115	76	141	184	218	264	145	61	8	0
1969	0	13	70	33	78	215	355	275	277	174	70	0
1970	0	5	11	83	153	188	262	347	207	35	120	0
1971	0	28	91	42	145	58	140	365	207	72	3	0
1972	0	4	43	110	173	163	132	140	90	106	0	33
1973	0	3	31	113	79	86	243	313	90	41	0	0
1974	0	0	23	138	76	91	191	246	230	39	0	0
1975	0	0	23	85	135	105	196	180	355	44	18	33
1976	0	19	104	13	27	88	197	40	231	197	48	0
1977	30	8	48	26	236	184	129	0*	165	4	4	0
1978	0	1	78	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1979	8	11	40*	36	181	232	191*	285*	169	28	21	0
1980	62	26*	9*	103	163	74*	282	142*	212*	133	15	32

* : Mois incomplet

Korhogo	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	12	50	87	130	157	197	301	246	112	32	11
Nbre d'années	49	45	38	38	38	38	38	35	38	39	41	47
Maximum	82	75	156	201	247	258	370	551	443	306	123	99
Minimum	0	0	0	13	27	53	48	40	90	4	0	0
Variance	243	312	1570	2303	2295	3013	6032	11408	6787	4925	1203	490
C. Variation	2.437	1.487	0.794	0.549	0.370	0.349	0.394	0.355	0.335	0.629	1.096	2.077

Station Numéro : 1090012700 Nombre d'années : 25

Nom de la station : Kouto

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1963	0	37	3	66	62	184	113	313	248	206	21	0
1964	1	0	24	46	97	186	269	330	282	157	30	119
1965	98	0	50	110	75	247	291	221	159	59	0	0
1966	0	0	41	154	71	84	136	387	119	61*	49	1
1967	0	5	40	68	79	143	309	562	370	28	13	0
1968	0	16	74	143	48	130	321	308	159	174	76	4
1969	0	48	15	27	95	295	209	411	225	213	51	0
1970	0	5	24	96	205	89	266	446	186	80	67	0
1971	0	14	20	79	161	127	170	414	156	47	32	57
1972	0	13	16	89	176	112	258	156	150	102	2	22
1973	0	0	1	87	51	61	292	414	133	64	17	19
1974	0	0	39	76	41	91	263	329	184	137	1	0
1975	0	0	76	43	198	116	240	208	187	123	20	0
1976	8	0	12	30	86	109	187	134	182	129	11	0
1977	18	3	14	29	92	214	212	236	207	65	0	0
1978	0	2	45	149	151	95	261	291	150	96	1	8
1979	1	0	38*	45	193*	200	270	409	224	40	34	0
1980	49	0	0	8	184	107	253	373	142	83	4	12*
1981	0	37	61	86	177	171	268	285	124	41	6	0
1982	0	4	61	52	89	188	257	242	162	97	9	0
1983	0	12	0	72	8	150	168	219	123	87	0	12
1984	0	0	6	63	72	93	324	130	164	61	11	0
1985	0	1	16	104	80	156	216	323	185	58	0	0
1986	0	10	22	18	0*	76	322	210	228	16	24	0
1987	0	0	19	4	154	205	124	347	308	75	0	1

* : Mois incomplet

Kouto	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	7	8	28	70	107	145	240	308	190	93	19	10
Nbre d'années	25	25	24	25	23	25	25	25	25	24	25	24
Maximum	98	48	76	154	205	295	324	562	370	213	76	119
Minimum	0	0	0	4	8	61	113	130	119	16	0	0
Variance	445	171	512	1661	3019	3281	3634	10806	3586	2730	460	670
C. Variation	3.026	1.586	0.800	0.585	0.516	0.395	0.251	0.338	0.315	0.561	1.116	2.558

Station Numéro : 1090013900 Nombre d'années : 24

Nom de la station : Madinani

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1962	0*	13	2	71	9	156	201	318	0*	171	0*	0*
1963	0*	0*	16	111	163	186	10	252	70	288	39	0*
1964	0	0	13	56	68	146	291	323	304	81	50	0*
1965	0*	0*	3	47	126	276	257	331	239	100	0	0
1966	0	0	47	99	103	157	353	410	342	173	0	0
1967	0	0	4	156	102	204	371	408	235	91	60	15
1968	0	13	91	44	42	116	190	382	193	153	19	28
1969	0	0	23	66	72	323	500	349	206	210	14	0
1970	0	11	8	67	81	172	203	342	193	44	7	6
1971	0	16	38	73	199	147	187	477	360	105	41	68
1972	0	19	22	205	174	212	260	294	262	109	9	0
1973	0	0	12	38	111	109	165	329	187	96	0	0
1974	0	0	83	98	104	143	204	250	474	123	3	0
1975	0	0	69	52	150	103	328	159	542	88	23	3
1976	97	0	33	78	188	77	234	265	179	280	71	0
1977	16	25	4	43	180	226	157	261	181	86	0	0
1978	31	11	87	80	163	147	126	224	131	214	4	42
1979	0	0	43	69	179	161	242	324	273	58	89	0
1980	27	1	2	134	165	191	161	234	148	146	16	11
1981	0	15	70	76	156	150	360	330	271	28	6	0
1982	0	25	187	148	89	229	293	299	187	160	0	0
1983	0	43	0	174	67	137	207	348	186	21	11	7
1984	0	0	34	123	101	198	236	237	234	91	24	0
1985	0	0	63	66	63	204	329	332	230	128	1	0

* : Mois incomplet

Madinani	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	8	9	40	91	119	174	244	311	245	127	21	9
Nbre d'années	21	22	24	24	24	24	24	24	23	24	23	21
Maximum	97	43	187	205	199	323	500	477	542	288	89	68
Minimum	0	0	0	38	9	77	10	159	70	21	0	0
Variance	474	130	1791	1926	2583	2947	9533	4651	10745	4693	618	287
C. Variation	2.685	1.311	1.067	0.485	0.427	0.312	0.400	0.219	0.424	0.540	1.176	1.985

Station Numéro : 1090014500 Nombre d'années : 28

Nom de la station : Manignan

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1960	0*	0*	45	52	92	246	328	258	292	162	52	0*
1961	0*	0*	63	17	89	113	389	260	247	33	45	0*
1962	0*	0*	0*	116	118	314	199	316	344	140	170	0*
1963	0*	41	26	62	162	144	302	538	284	172	13	0*
1964	0	0	0	32	133	240	413	386	355	162	119	134
1965	16	0	3	25	87	326	494	301	342	432	8	0
1966	0	0	66	51	218	139	343	554	553	154	20	0
1967	0	22	29	154	87	148	317	581	310	152	86	0
1968	0	40	31	163	77	204	412	322	169	185	31	0
1969	0	0	43	0*	114	270	547	792	216	224	88	0
1970	0	4	5	99	169	350	283	521	222	73	43	0
1971	0	22	54	59	98	82	367	340	214	105	21	26
1972	0	44	52	84	72	130	294	264	178	66	57	0
1973	0	0	13	82	46	122	365	401	212	116	22	6
1974	0	0	13	53	61	145	435	242	338	120	30	0
1975	0	0*	0*	25*	98	237	368	250	322	35	11	0
1976	0	0	102	80	101	125	320	454	209	188	53	0
1977	11	0	15	31	93	209	216	270	359	121	1	0
1978	0	19	62	33	166	211	214	285	235	162	26	3
1979	6	0	27	36*	105	191	408*	443	244*	82	147	0
1980	0	41	0	25	138	110	431	255	249	57	32	19
1981	0	10	18	141	180	109	354	378	251	115	0	0
1982	0	0	19	56	200	222	232	172	194	49	5	0
1983	0	1	0	126	82	163	200	316	218	36	0	0
1984	0	0	25	47	126	179	226	270	170	65	17	0
1985	0	0	2	34	83	134	304	333	131	109	28	0
1986	0	7	33	80	205	153	208	339	357	79	5	0
1987	0	2	0	25	125	108	174	324	215	61	0	14

* : Mois incomplet

Manignan	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	1	10	29	69	119	183	323	363	266	123	40	8
Nbre d'années	24	24	26	25	28	28	27	28	27	28	28	24
Maximum	16	44	102	163	218	350	547	792	553	432	170	134
Minimum	0	0	0	17	46	82	174	172	131	33	0	0
Variance	15	238	646	1746	1996	4927	8933	17300	7397	6184	1895	728
C. Variation	2.772	1.475	0.889	0.605	0.376	0.384	0.292	0.362	0.323	0.637	1.082	3.229

Station Numéro : 1090014800 Nombre d'années : 51

Nom de la station : Mankono

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1937	0*	0*	0*	0*	0*	91	115	309	250	132	54	2
1938	0	50	114	93	186	103	65	0*	0*	0*	0*	0*
1939	26	45	34	102	168	89	184	101	158	172	10	7
1940	6	11	116	46	175	110	175	194	229	114	96	2
1941	0	0	154	141	190	110	128	79	287	39	61	0
1942	126	61	98	74	86	83	40	176	158	165	21	6
1943	20	35	91	48	137	121	50	165	219	189	49	4
1944	0	46	108	145	233	139	207	283	247	105	49	24
1945	28	20	82	71	142	62	286	288	443	154	24	8
1946	18	0	126	131	90	167	138	58	138	110	32	0
1947	6	30	33	132	110	129	101	294	333	138	22	39
1948	0	42	62	95	109	148	0	52	332	0	16	7
1949	51	30	42	136	185	136	106	190	166	90	102	0
1950	4	70	28	93	51	45	110	99	212	171	32	27
1951	0	74	161	116	74	141	93	222	274	351	30	0
1952	0	43	33	101	95	119	389	277	303	208	4	19
1953	0	88	66	29	131	91	261	237	116	76	22	16
1954	0	39	41	202	150	125	43	167	125	183	56	0
1955	1	22	72	122	109	173	269	93	247	243	9	0
1956	27	0	76	71	20	92	99	227	248	64	0	43
1957	0	46	75	121	180	151	160	262	487	153	65	21
1958	78	21	44	112	42	137	7	78	280	52	86	17
1959	16	43	93	90	137	349	231	109	295	53	33	33
1960	0	17	91	106	124	178	152	319	391	71	11	74
1961	0	0	41	302	52	0*	204	103	280	55	0	0
1962	0	42	56	100	122	334	11	337	197	183	99	2
1963	26	90	52	203	204	180	213	145	129	321	70	0
1964	13	8	73	197	166	197	120	158	176	44	4	35
1965	36	47	39	106	68	263	145	221	121	55	0	0
1966	0	11	50	104	227	168	113	92	194	232	18	1
1967	0	40	77	99	92	141	94	233	220	20	1	0
1968	0	39	127	160	107	71	203	155	283	277	133	0
1969	23	71	63	119	0	122	107	266	138	204	52	0
1970	0	7	87	101	109	86	43	169	265	96	34	3
1971	0	78*	142	44	132	134	30	262	478	130	0*	0*
1972	0*	45	116	67	122	87	119	84	125	45	23	1
1973	0	11	81	301	121	32	59	416	198	103	8	6
1974	3	0	114	155	20	181	215	95	299	71	0	0
1975	0	78	97	8*	206	108	153	111	217	75	42	77
1976	20	39	61	124	80	100	73	100	163	178	22	0
1977	9	17	64	34	92	96	28	163	301	70	0	0
1978	0	19	22	245	72	83	97	138	179	0*	0*	0*
1979	0*	0*	80	109	173	259	213	129	284	87	13	0
1980	25	17	196	93	191	137	204	138*	155	164*	16	9
1981	0	9	52	178	174	99	83	54	250	78	0	0

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090014800 Nombre d'années : 51

Nom de la station : Mankono

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1982	0	101	79	132	103	197	102	154	58	93	28	14
1983	0	58	0	112	91	48	30	83	142	14	24	27
1984	8	23	185	78	107	105	170	148	127	179	22	0
1985	11	8	76	193	89	123	417	278	183	78	26	20
1986	0	25	42	152	132	78	204	127	164	50	3	0
1987	27	66	27	95	99	205	101	313	175	100	9	23

* : Mois incomplet

Mankono	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	13	35	79	122	121	134	136	180	229	122	32	12
Nbre d'années	48	48	50	49	50	50	51	49	50	48	48	48
Maximum	126	101	196	302	233	349	417	416	487	351	133	77
Minimum	0	0	0	29	0	32	0	52	58	0	0	0
Variance	512	676	1741	3386	2846	4111	7957	7702	8470	6014	959	319
C. Variation	1.797	0.732	0.530	0.477	0.439	0.477	0.654	0.488	0.402	0.635	0.971	1.521

Station Numéro : 1090015700 Nombre d'années : 38

Nom de la station : Niakaramandougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1950	0*	0*	0*	0*	0*	0*	106	43	130	125	21	2
1951	45	47	51	96	162	123	90	313	224	194	48	0
1952	0	0	5	39	83	49	15	0*	0*	0*	0*	0*
1953	0	50	131	62	131	0*	216	213	143	127	34	0
1954	0	8	45	200	146	102	23	284	172	162	69	0
1955	7	0	88	99	140	107	237	219	216	214	10	40
1956	0	5	36	71	82	39	30	110	316	81	22	7
1957	13	0	65	111	130	119	285	314	298	152	50	1
1958	48	20	202	79	95	120	14	113	185	101	24	24
1959	0	140	91	135	235	163	111	149	422	88	73	3
1960	0	0	24	152	108	161	69	352	405	123	65	3
1961	0	0	19	147	107	186	31	119	355	54	5	0
1962	0	23	41	149	77	123	99	268	190	137	69	1
1963	12	112	46	107	217	118	187	207	126	454	35	0
1964	7	0	68	73	251	127	84	157	303	61	17	60
1965	37	174	38	82	118	95	273	170	173	114	0	0
1966	0	0	69	58	182	176	167	361	167	121	47	0
1967	0	84	54	176	75	96	97	208	150	65	8	9
1968	0	51	33	139	89	88	199	368	218	101	66	31
1969	0	57	98	62	6	87	84	120	106	126	76	0
1970	0	63	41	88	130	43	162	236	284	0	8	14
1971	0	56	38	47	60	86	110	219	323	33	0	28
1972	0	44	92	85	154	206	47	37	132	63	0	86
1973	0	10	83	124	69	123	153	346	143	105	17	40
1974	4	11	42	134	69	131	104	110	268	73	0	0
1975	0	20	54	79	133	96	241	246	262	52	32	55
1976	0	20	55	74	58	156	37	35	136	147	72	1
1977	32	1	32	53	172	93	80	164	217	93	0	0
1978	0	1	67	265	80	46	72	151	195	167	0	22
1979	1	4	44	168	248	194	296	183	173	74	2	0
1980	4*	23	87	121	125	68	217	222	321	88	40	0
1981	0	11	87	17	172	213	149	240	143	101	8	0
1982	0	46	55	152	73	123	56	102	80	188	43	11
1983	0	2	6	86	78	62	113	78	84	18	25	12
1984	0	0	77	79	88	71	320	300	171	142	35	0
1985	4	0	147	76	112	80	161	434	163	38	0	0
1986	0	27	27	98	136	89	202	181	215	104	9	0
1987	0*	18	40	54	138	83	50	286	252	156	25	7

* : Mois incomplet

Niakarama	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	30	62	104	122	112	131	207	212	115	28	12
Nbre d'années	35	37	37	37	37	36	38	37	37	37	37	37
Maximum	48	174	202	265	251	213	320	434	422	454	76	86
Minimum	0	0	5	17	6	39	14	35	80	0	0	0
Variance	168	1635	1479	2428	3010	2048	7079	9781	7217	5547	622	405
C. Variation	2.170	1.329	0.625	0.476	0.448	0.403	0.641	0.478	0.400	0.650	0.876	1.641

Station Numéro : 1090016000 Nombre d'années : 67

Nom de la station : Odienne

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1921	0*	0*	0*	0*	62*	147	197	436	216	164	28	0
1922	0	0	10	117	159	128	343	596	290	170	36	0
1923	0	3	42	65	38	155	234	259	187	152	54	2
1924	0	63	42	55	99	242	420	602	415	190	61	0
1925	0	5	31	47	152	86	393	316	365	221	52	0
1926	0	0	35	25	58	191	350	511	359	179	89	20
1927	0	26	40	90	98	250	264	426	237	142	15	0
1928	0	3	18	60	129	71	165	467	555	224	45	0
1929	0	29	0*	101	104	475	360	377	334	302	63	0
1930	0	45	6	23	111	169	195	251	183	178	0	24
1931	0	4	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1932	0*	0*	0*	85*	214	153	318	468	369	103	92	0
1933	0	53	21	128	114	286	290	291	132	41	87	1
1934	0	0	108	46	44	78	216	539	247	201	9	0
1935	0	0	40	55	108	152	253	263	299	166	24	19
1936	0	36	12	86	223	176	220	380	336	123	53	6
1937	0	69	14	94	85	73	424	413	247	99	58	0
1938	0	0	20	117	143	138	238	400	271	210	51	4
1939	0	0	54	57	163	97	488	333	313	127	38	22
1940	8	0	0	98	140	141	119	343	158	156	77	0
1941	3	0	45	66	186	186	176	388	306	113	98	0
1942	0	0	7	26*	149	149	366	289	137	92	33	89
1943	0	26	83	61	118	135	317	457	183	220	24	15
1944	0	0	42	48	65	183	158	372	263	76	18	45
1945	0	1	18	71	215	120	455	476	552	207	11	0
1946	8	0	89	82	159	133	536	405	268	180	54	6
1947	0	65	2	7	48	240	169	454	319	164	20	12
1948	0	0	47	74	104	358	175	433	256	126	30	5
1949	1	0	25	114	183	124	333	455	230	175	145	0
1950	0	3	40	60	55	66	237	467	162	71	40	0
1951	32	9	37	92	95	97	357	445	111	338	145	6
1952	0	11	28	54	130	317	276	284	326	168	19	37
1953	0	4	71	39	84	307	371	496	336	218	33	0
1954	0	31	22	172	188	189	366	582	263	270	105	1
1955	6	61	92	136	110	143	308	231	294	150	33	2
1956	0	43	36	63	67	209	148	344	313	148	45	3
1957	0	3	96	85	95	209	254	309	492	189	107	23
1958	75	0	51	66	64	217	254	289	227	114	140	0
1959	3	1	28	93	198	94	367	186	469	46	83	9
1960	0	0	51	91	105	247	275	244	251	138	19	0
1961	0	0	5	189	68	143	329	411	281	121	24	0
1962	0	5	16	93	151	189	184	424	315	155	95	0
1963	9	25	64	137	155	197	252	301	266	352	12	0
1964	0	0	52	29	118	106	345	510	287	127	80	91
1965	7	2	36	34	160	216	240	180	446	173	36	0

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090016000 Nombre d'années : 67

Nom de la station : Odienne

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1966	0	0	79	51	30	115	255	387	320	234	57	44
1967	0	4	23	72	121	150	339	487	273	104	54	0
1968	0	20	39	163	88	195	314	289	188	225	15	24
1969	0	0	80	34	59	194	477	305	176	168	68	0
1970	0	11	33	88	202	113	303	378	267	85	26	0
1971	0	40	30	105	114	117	365	394	334	149	17	85
1972	0	32	15	174	242	213	292	306	204	199	32	0
1973	0	42	20	55	110	100	308	393	171	145	12	2
1974	0	0	76	76	73	73	296	326	185	147	7	0
1975	0	0	13	43	103	69	298	389	417	106	10	2
1976	24	0	83	99	116	117	340	270	327	324	98	0
1977	5	48	2	24	83	185	272	380	316	129	9	0
1978	0	3	60	103	230	149	335	341	192	125	27	23*
1979	10	0	22*	59*	150*	278*	330*	323	266*	142*	88*	0
1980	23*	8	6*	83*	178*	190*	204*	301	301*	75	40*	1
1981	0	0	14	54	132	181	472	239	253	90	23	0
1982	0	24	35	98	107	187	192	548	215	205	0	0
1983	0	27	0	81	45	185	240	210	148	71	29	3
1984	0	0	31	54	134	142	290	332	207	52	0	0
1985	0	0	3	42	65	142	225	258	237	116	11	1
1986	0	19	29	7	178	118	133	244	166	85	33	0
1987	13	0	16	20	131	108	100	308	181	97	5	14

* : Mois incomplet

Odienne	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	14	37	76	121	166	290	371	276	157	45	10
Nbre d'années	64	65	61	61	63	64	64	66	64	65	64	65
Maximum	75	69	108	189	242	475	536	602	555	352	145	91
Minimum	0	0	0	7	30	66	100	180	111	41	0	0
Variance	113	386	712	1592	2625	5346	8760	10061	9225	4429	1289	408
C. Variation	3.330	1.414	0.721	0.523	0.424	0.440	0.322	0.270	0.349	0.424	0.790	2.125

Station Numéro : 1090016300 Nombre d'années : 38

Nom de la station : Ouangolodougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1950	0*	0*	0*	0*	0*	129	133	405	257	74	4	3
1951	24	21	44	181	305	167	255	209	157	199	11	7
1952	0	11	11	50	136	155	125	348	238	105	3	5
1953	0	153	3	168	115	243	383	248	240	98	12	0
1954	0	35	30	40	91	296	381	700	376	393	52	0
1955	0	30	139	0	119	240	349	747	227	119	0	80
1956	0	0	106	250	107	113	168	253	208	47	20	62
1957	0	2	144	25	93	122	231	250	220	54	42	0
1958	19	0	54	38	81	103	201	77	146	85	83	0
1959	3	0	8	96	111	153	100	340	282	13	32	0
1960	0	0	24	70	102	211	188	325	148	70	0*	6
1961	0	0	0	63	44	212	162	0*	198	60	0	0
1962	0	0	0	99	105	199	101	264	228	102	27	0
1963	0	5	10	164	188	166	85	316	141	99	0	0
1964	0	0	34	95	139	135	248	290	263	54	8	31
1965	0	0	0	23	96	124	240	231	236	111	0	0
1966	0	0	61	176	67	128	80	303	147	149	4	0
1967	0	19	59	83	115	91	206	303	247	53	9	0
1968	0	0	54	130	25	85	214	348	172	129	15	14
1969	0	0	0*	23	79	232	275	314	201	126	56	0
1970	0	0	7	80	98	78	173	349	278	22	20	0
1971	0	28	6	45	59	92	152	360	157	56	0	12
1972	0	24	22	75	293	147	159	92	195	73	0	0
1973	0	0	18	100	63	134	256	208	166	103	0	6
1974	0	0	52	127	51	191	233	368	142	101	0	0
1975	0	0	29	70	112	138	257	240	179	31	5	23
1976	0	0	39	22	111	65	135	170	130	212	20	0
1977	6	0	3	11	140	111	31	156	121	99	0	0
1978	0	0	50	73	100	58	187	158	105	102	29	0
1979	0	0	59*	15*	24*	201	180*	217*	126	11*	0	0
1980	16	0	0*	87*	129*	207*	162*	407	205	44*	0*	38
1981	0	8	46	30	120	124	168	147	130	51	0	0
1982	0	2	63	182	52	209	153	190	126	203	0	0
1983	0	5	2	5	17	47	132	197	136	5	8	0
1984	0	0	16	50	103	83	106	184	85	61	54	0
1985	0	0	12	95	108	226	231	343	138	92	0	0
1986	0	3	0	110	119	182	173	399	233	0*	102	0
1987	3	0	14	2	98	139	189	280	121	114	8	0

* : Mois incomplet

Ouangolodou	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	9	34	81	107	149	191	292	187	99	17	8
Nbre d'années	37	37	34	35	35	37	36	36	38	35	36	38
Maximum	24	153	144	250	305	296	383	747	376	393	102	80
Minimum	0	0	0	0	17	47	31	77	85	5	0	0
Variance	29	666	1320	3598	3341	3397	6188	18168	3664	4860	601	301
C. Variation	2.874	2.757	1.066	0.737	0.538	0.390	0.413	0.461	0.324	0.704	1.420	2.311

Station Numéro : 1090017900 Nombre d'années : 25

Nom de la station : Sinhala

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1962	0*	0*	0*	0*	65	102	228	377	209	78	144	0
1963	0	13	31	99	63	188	216	333	151	222	28	0
1965	0*	0*	31*	131*	748*	0*	0*	526*	273*	81*	5*	0*
1966	0*	0*	43	39	120	162	242	309	233	104	33	0*
1967	0*	6	33	164	88	176	383	0*	276	104	21	0*
1968	0	33	97	107	114	221	346	100	245	163	47	35
1969	0	0	60	62	96	191	338	421	210	158	55	0
1970	0	0	5	48	180	126	197	331	265	10	0	0
1971	0	32	9	83	83	97	237	280	143	51	0	26
1972	0	40	2	65	96	93	145	191	197	85	22	0
1973	0	0	8	23	68	119	244	371	108	53	34	0
1974	0	0	9	72	141	74	278	274	168	68	0	0
1975	0	0	26	70	124	181	305	137	379	59	13	0
1976	22	6	25	101	110	138	293	189	183	238	35	0
1977	23	7	8	9	139	113	228	203	239	33	0	0
1978	15	9	20	110	167	145	224	228	173	130	8	0
1979	0	0	26	22	120	127	210	307	188	58	36	0
1980	40	3	3*	39	156	168	215	256	188	70*	16	76
1981	0	0	84	59	187	206	345	414	111	128	4	0
1982	0	17	26	106	131	177	242	305	132	120	0	0
1983	0	5	0	70	101	200	231	261	127	60	0	39
1984	0	0	119	43	137	101	233	253	113	105	13	0
1985	0	3	12	30	70	0*	204	305	171	106	0	0
1986	0	8	9	0*	140	0*	337	259	105	47	0*	0
1987	0	0*	0*	2	136	161	0*	306	217	105	25	0*

* : Mois incomplet

Sinhala	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	5	9	31	65	118	148	257	279	189	99	23	8
Nbre d'années	21	21	21	22	24	22	23	23	24	23	23	21
Maximum	40	40	119	164	187	221	383	421	379	238	144	76
Minimum	0	0	0	2	63	74	145	100	105	10	0	0
Variance	111	138	1021	1458	1206	1677	3408	6271	3992	3057	924	362
C. Variation	2.224	1.355	1.028	0.590	0.295	0.276	0.227	0.284	0.335	0.557	1.312	2.284

Station Numéro : 1090018700 Nombre d'années : 38

Nom de la station : Tafire

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1950	0*	0*	0*	0*	0*	112	126	141	186	113	23	2
1951	15	27	38	95	206	182	186	0*	0*	0*	0*	0*
1952	0*	0	9	42	64	85	188	411	224	56	0	43
1953	0	15	0*	0*	77	73	153	176	94	276	35	0
1954	0	33	87	212	56	136	67	307	219	104	42	0
1955	0	48	126	76	146	249	252	148	323	151	0	22
1956	0	0	52	128	43	113	72	106	154	17	40	26
1957	79	0	47	68	159	80	270	229	456	211	0	0
1958	0	23	66	68	122	59	10	119	157	75	99	53
1959	1	3	69	67	154	186	227	365	565	50	82	48
1960	0	0	120	87	131	82	73	150	424	56	0	27
1961	0	0	0	44	122	233	122	226	251	160	90	0
1962	0	55	13	95	80	269	90	128	222	108	84	2
1963	0	40	12	44	159	108	0*	250	0*	214	216	79
1964	35	57	42	204	14	9	0*	288	152	42	83	43
1965	14	4	46	49	125	193	321	182	223	101	0	0
1966	0	0	96	27	255	73	176	168	70	57	20	0
1967	0	2	74	135	35	110	77	303	138	73	10	0
1968	0	43	97	131	207	128	212	278	171	160	17	28
1969	0	25	25	57	44	115	130	141	117	166	128	0
1970	1	1	16	74	85	103	225	247	216	40	21	23
1971	0	47	52	68	105	113	161	115	130	54	24	51
1972	0	30	51	78	172	133	106	51	135	66	0	30
1973	0	7	73	46	67	125	142	256	137	104	0	37
1974	0	0	7	96	58	105	127	114	206	113	14	0
1975	0	21	19	60	109	90	241	325	258	102	11	32
1976	0	35	38	54	106	129	135	75	133	131	107	0
1977	12	0	58	45	202	112	75	107	313	115	0	0
1978	0	14	33	100	122	104	112	61	230	82	0	10
1979	21	0	45	127*	139	226	267*	353*	268	180	48*	14*
1980	30	6*	28*	55	211	81*	218*	156*	220	111	12	1
1981	0	0	76	75	98	86	153	296	159	97	5	0
1982	0	24	47	77	44	158	115	127	131	125	23	8
1983	0	4	1	20	75	70	121	111	102	86	58	15
1984	0	0	82	8	145	141	205	179	144	186	33	0
1985	0	11	0	89	53	122	227	354	177	90	14	0
1986	0	4	14	139	47	93	256	129	266	72	34	0
1987	0	1	31	5	73	154	53	305	234	75	56	36

* : Mois incomplet

Tafire	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	16	48	78	111	126	153	199	211	109	38	17
Nbre d'années	36	36	35	35	37	37	34	35	36	37	36	36
Maximum	79	57	126	212	255	269	321	411	565	276	216	79
Minimum	0	0	0	5	14	9	10	51	70	17	0	0
Variance	227	328	1101	2084	3330	2974	5040	8881	10435	3052	2132	426
C. Variation	2.610	1.139	0.698	0.588	0.520	0.433	0.464	0.474	0.484	0.509	1.206	1.202

Station Numéro : 1090019300 Nombre d'années : 33

Nom de la station : Tengrela

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1953	0*	0*	0*	0*	0*	0*	235*	280	247	80	29	0*
1954	0	0	24	70	117	192	324	501	290	152	13	0
1955	1	4	27	41	129	169	225	278	236	128	12	33
1956	0	0	98	50	67	165	151	254	294	97	38	16
1957	0	0	34	60	131	140	454	323	236	78	23	0
1958	13	0	6	55	89	203	363	318	220	96	105	0
1959	1	0	8	84	0*	77	188	542	274	3	94	0
1960	0	0	21	129	156	201	183	355	437	78	75	0
1961	0	0	10	76	91	124	584	401	159	97	4	0
1962	0	5	0	80	131	207	304	356	162	85	125	0
1963	0	33	21	60	88	211	114	360	207	200	0	0
1964	1	0	9	49	94	162	376	287	469	31	21	60
1965	48	0	0	1	59	202	251	144	248	116	0	0
1966	0	0	70	51	53	68	211	383	161	134	18	0
1967	0	28	4	110	48*	136	512	478	375	72	16	0
1968	0	32	32	54	50	269	257	285	105	137	19	40
1969	0	40	83	0	68	269	266	411	169	110	56	0
1970	0	0	1	81	160	154	216	455	198	7	9	0
1971	0	17	73	42	112	224	184	255	192	32	0	24
1972	0	0	5	57	121	108	171	196	178	91	0	0
1973	0	0	0	80	69	146	195	217	133	52	21	0
1974	0	0	14	61	110	60	215	347	106	139	4	0
1975	0	0	45	57	66	213	318	263	285	86	38	0
1976	19	0	25	105	110	38	172	318	137	270	73	0
1977	13	0	20	83	100	204	176	244	141	59	0	0
1978	0	0	9	48	170	96	208	227	147	108	2	0
1979	0*	0*	0*	0*	0*	42	174	158	226	49	90	0
1980	0*	8	0*	5	64	103	207	270	167	70	4	0*
1981	0*	0*	14	37	217	120	356	449	50	75	0*	0*
1982	0*	0*	42	4	105	212	178	307	0*	0*	0*	0*
1985	0*	0*	0*	0*	55	125	107	254	170	19	0	0
1986	0	33	0	21	80	79	245	180	132	13	0	0
1987	0	8	2	0	42	143	175	261	174	108	0	0

* : Mois incomplet

Tengrela	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	7	24	55	100	152	252	314	210	90	29	6
Nbre d'années	27	28	29	30	29	32	32	33	32	32	31	29
Maximum	48	40	98	129	217	269	584	542	469	270	125	60
Minimum	0	0	0	0	42	38	107	144	50	3	0	0
Variance	100	159	688	1046	1626	3789	11950	9386	8183	3014	1245	208
C. Variation	2.812	1.707	1.092	0.589	0.403	0.405	0.434	0.309	0.430	0.613	1.232	2.428

Station Numéro : 1090020500 Nombre d'années : 50

Nom de la station : Touba

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1938	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	45	60	2
1939	2	5	137	84	178	97	298	242	185	81	14	11
1940	74	22	42	117	150	131	177	260	172	164	87	0
1941	1	0	82	13	97	186	202	235	273	137	34	66
1942	9	24	78	154	215	117	144	357	195	139	3	29
1943	3	10	64	157	132	122	54	251	192	165	26	22
1944	4	28	157	60	104	82	186	318	179	99	61	37
1945	8	8	51	46	286	36	242	117	226	125	24	0
1946	57	12	72	126	96	212	108	147	216	149	34	0
1947	4	53	12	159	204	231	300	308	347	77	28	46
1948	0	38	58	208	89	183	62	31	210	10	32	0
1949	44	0	142	168	84	135	300	233	378	116	54	0
1950	30	15	61	54	152	126	180	83	349	96	46	48
1951	41	35	152	104	191	131	218	251	171	357	85	16
1952	0	24	39	120	118	90	257	282	327	186	59	0
1953	0	73	33	99	126	184	201	413	143	58	32	11
1954	0	72	133	223	81	269	215	118	298	243	150	2
1955	0	54	74	228	98	187	101	248	337	94	23	32
1956	0	96	22	104	81	79	199	165	271	131	0	0
1957	0	67	48	72	172	311	258	195	281	280	0	0
1958	0	10	35	146	112	173	22	131	619	35	31	18
1959	8	33	11	127	110	198	273	140	536	20	11	0
1960	11	0	61	86	68	225	131	211	198	135	0	0
1961	0	0	0	151	117	241	61	141	202	23	52	0
1962	0	62	29	132	71	162	122	142	316	142	51	0
1963	21	121	81	0*	545	143	204	123	61	172	11	0
1964	0	0	22	43	143	184	123	173	256	12	83	51
1965	21	20	113	93	72	115	166	264	295	91	0	0
1966	0	2	104	207	202	166	151	204	188	87	69	20
1967	0	3	56	150	144	165	77	182	433	21	6	89
1968	0	63	20	199	120	245	140	285	160	88	53	14
1969	0	49	42	95	65	159	164	225	155	167	109	0
1970	0	45	58	203	151	132	59	154	253	40	0	6
1971	0	93	104	77	141	130	78	114	174	50	41	0
1972	28	47	75	114	154	235	128	198	156	130	3	0
1973	0	9	69	110	98	91	132*	112*	184	72	0	7
1974	0	26	133	129	72	174	235	144	386	76	0	0
1975	0	0	67	129	154	105	239	249	351	143	0	25
1976	24	32	129	49	136	88	131	219	178	236	81	0
1977	7	0	18	37	202	180	35	359	519	43	2	0
1978	11	38	65	209	57	292	166	138	204	87	58	31
1979	7	3	47*	75	31	188*	342*	290	303	62	89	0
1980	17	0*	61*	62	172	108	116	395*	157	104	0*	5
1981	0	0	30	104	108	124	96	268	210	71	15	0
1982	0	41	85	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*

* : Mois incomplet

Station Numéro : 1090020500 Nombre d'années : 50

Nom de la station : Touba

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1983	0*	0*	0*	0*	0*	156	82	224	152	59	26	5
1984	0	1	123	188	169	214	194	198	317	146	21	0
1985	3	24	68	77	148	151	305	421	216	54	14	0
1986	0	98	67	59	123	119	156	337	232	0*	0*	0*
1987	0	37	25	49	197	199	79	371	322	92	12	27

* : Mois incomplet

Touba	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	9	32	68	117	139	161	162	221	260	108	36	13
Nbre d'années	48	47	46	46	47	47	46	46	48	48	47	48
Maximum	74	121	157	228	545	311	305	421	619	357	150	89
Minimum	0	0	0	13	31	36	22	31	61	10	0	0
Variance	258	931	1663	3050	6029	3401	5780	7524	11924	4920	1141	392
C. Variation	1.798	0.960	0.597	0.471	0.559	0.362	0.470	0.393	0.420	0.647	0.940	1.543

Station Numéro : 1090003300 Nombre d'années : 14

Nom de la station : Bako

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	235*	978	1982	120*	118
1977	365	1377	1983	153*	522
1978	365	1387	1984	306*	1259
1979	365	1657	1985	365	1309
1980	337*	1358	1986	365	1331
1982	76*	118	1987	365	877
1983	153*	522			
1981	243*	1196			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1323 mm
Calculée sur 6 années complètes
Variance : 52951
Coefficient de Variation : 0.1739

Station Numéro : 1090005000 Nombre d'années : 15

Nom de la station : Borotou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	239*	1196	1981	273*	946
1977	359*	1277	1982	275*	1250
1978	332*	1610	1983	274*	812
1979	276*	535	1984	182*	690
1980	365*	1284	1985	214*	1357
1981	273*	946	1986	334*	1098
1982	214*	1186	1987	365	1198
1983	274*	812			

* : Année incomplète

Station Numéro : 1090005800 Nombre d'années : 21

Nom de la station : Bougoussou

Station Numéro : 1090004800 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Bonieredougou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	355*	843	1983	334*	648
1977	356*	1260	1984	335*	738
1978	350*	974	1985	304*	1296
1979	356*	1070	1986	243*	685
1980	359*	1588	1987	304*	855
1981	365	1000			
1982	365	981			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 990 mm
Calculée sur 2 années complètes
Variance : 84
Coefficient de Variation : 0.0092

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1965	214*	1341	1976	366	1401
1966	365	1560	1977	362*	1308
1967	365	1697	1978	365	1637
1968	366	1461	1979	350*	1603
1969	365	1749	1980	325*	1102
1970	365	1376	1981	243*	917
1971	365	1583	1984	274*	1456
1972	366	1805	1985	365	1384
1973	365	1465	1986	365	1263
1974	365	1465	1987	334*	856
1975	335*	1096			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1526 mm
Calculée sur 13 années complètes
Variance : 24046
Coefficient de Variation : 0.1016

Station Numéro : 1090008800 Nombre d'années : 25

Nom de la station : Dembasso

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1963	365	1555	1976	366	1021
1964	366	1345	1977	365	905
1965	365	1660	1978	365	1178
1966	365	1121	1979	365	1426
1967	365	1353	1980	366	1295
1968	366	1214	1981	334*	999
1969	365	1333	1982	365	1232
1970	335*	1118	1983	365	850
1971	365	1358	1984	366	1000
1972	60*	32	1985	365	1372
1973	183*	467	1986	335*	900
1974	212*	594	1987	334*	766
1975	365	1209			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1246 mm
 Calculée sur 18 années complètes
 Variance : 42604
 Coefficient de Variation : 0.1657

Station Numéro : 1090009000 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Dikodougou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	240*	916	1983	306*	646
1977	273*	1005	1984	366	1246
1978	365	1135	1985	365	1239
1979	321*	1351	1986	335*	938
1980	322*	1581	1987	365	1110
1981	365	1019			
1982	365	1020			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1128 mm
 Calculée sur 6 années complètes
 Variance : 8372
 Coefficient de Variation : 0.0811

Station Numéro : 1090010200 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Foubolo

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	366	1062	1983	154*	362
1977	361*	1024	1984	275*	916
1978	326*	648	1985	183*	848
1979	302*	1011	1986	212*	486
1980	366	1381	1987	92*	185
1981	365	786			
1982	273*	756			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1076 mm
 Calculée sur 3 années complètes
 Variance : 59005
 Coefficient de Variation : 0.2257

Station Numéro : 1090011100 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Goulia

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	245*	1253	1983	275*	1141
1977	337*	1166	1984	366	1053
1978	365	1352	1985	365	1354
1979	365	1094	1986	334*	904
1980	362*	1281	1987	365	942
1981	334*	1303			
1982	335*	1093			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1159 mm
 Calculée sur 5 années complètes
 Variance : 27519
 Coefficient de Variation : 0.1431

Station Numéro : 1090011300 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Guiembe

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	245*	856	1983	303*	458
1977	306*	708	1984	244*	438
1978	364*	737	1985	365	1754
1979	362*	1544	1986	334*	1263
1980	300*	1101	1987	365	1057
1981	365	1185			
1982	335*	760			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1332 mm
 Calculée sur 3 années complètes
 Variance : 91631
 Coefficient de Variation : 0.2273

Station Numéro : 1090011900 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Kassere

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	200*	924	1982	365	889
1977	273*	905	1983	365	827
1979	160*	960	1985	90*	0
1980	362*	1385	1987	304*	1083
1981	365	1129			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 948 mm
 Calculée sur 3 années complètes
 Variance : 16997
 Coefficient de Variation : 0.1375

Station Numéro : 1090011700 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Kani

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	205*	665	1982	120*	273
1978	362*	987	1985	181*	370
1979	364*	1339	1987	365	1513
1980	366	1497			
1981	365	1123			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1378 mm
 Calculée sur 3 années complètes
 Variance : 32479
 Coefficient de Variation : 0.1308

Station Numéro : 1090012200 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Komborodougou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	199*	1765	1983	365	780
1977	214*	1565	1984	366	1293
1978	330*	2472	1985	365	1669
1979	242*	1949	1986	335*	1109
1980	269*	1028	1987	303*	794
1981	365	994			
1982	364*	1037			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1184 mm
 Calculée sur 4 années complètes
 Variance : 111630
 Coefficient de Variation : 0.2822

Station Numéro : 1090012500 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Kebi

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	184*	312	1982	151*	168
1978	331*	989	1983	120*	126
1979	331*	1250	1985	90*	99
1980	271*	905	1987	365	1331
1981	304*	1106			

* : Année incomplète

Station Numéro : 1090012600 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Kong

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	361*	884	1983	273*	984
1977	354*	819	1984	183*	1129
1978	364*	815	1985	335*	1459
1979	364*	1336	1986	365	1132
1980	366	856	1987	365	1152
1981	243*	869			
1982	365	1077			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1054 mm
 Calculée sur 4 années complètes
 Variance : 13830
 Coefficient de Variation : 0.1116

Station Numéro : 1090013800 Nombre d'années : 7

Nom de la station : Loho

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1950	214*	603	1954	365	1056
1951	365	1206	1955	337*	1360
1952	366	755	1956	335*	791
1953	365	722			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 935 mm
 Calculée sur 4 années complètes
 Variance : 41565
 Coefficient de Variation : 0.2181

Station Numéro : 1090014900 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Marabadiassa

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	243*	669	1982	365	1166
1977	363*	1300	1983	92*	153
1978	363*	902	1985	306*	1305
1979	363*	1376	1986	365	826
1980	335*	1369	1987	365	1088
1981	365	1005			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1021 mm
 Calculée sur 4 années complètes
 Variance : 15950
 Coefficient de Variation : 0.1237

Station Numéro : 1090015200 Nombre d'années : 12

Nom de la station : M'Bengue

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	243*	1035	1983	365	730
1977	365	707	1984	366	585
1978	334*	1063	1985	304*	1347
1979	114*	189	1986	337*	868
1980	366	1074	1987	306*	1517
1981	365	1445			
1982	365	1111			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 942 mm
 Calculée sur 6 années complètes
 Variance : 87680
 Coefficient de Variation : 0.3143

Station Numéro : 1090015300 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Morondo

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1979	92*	552	1985	184*	898
1980	366	1254	1986	365	1190
1981	365	1559	1987	365	1243
1982	242*	521			
1983	334*	879			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1311 mm
 Calculée sur 4 années complètes
 Variance : 21021
 Coefficient de Variation : 0.1106

Station Numéro : 1090015600 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Niapielodougou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	231*	829	1982	304*	655
1977	236*	613	1983	151*	379
1978	31*	0	1985	305*	749
1979	272*	1377	1986	304*	950
1980	366	805	1987	334*	703
1981	365	649			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 727 mm
 Calculée sur 2 années complètes
 Variance : 6123
 Coefficient de Variation : 0.1076

Station Numéro : 1090015800 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Nielle

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	245*	991	1983	334*	825
1977	365	1019	1984	336*	639
1978	363*	996	1985	365	1499
1979	362*	1036	1986	334*	1312
1980	363*	975	1987	365	947
1981	365	1376			
1982	365	1142			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1197 mm
 Calculée sur 5 années complètes
 Variance : 44140
 Coefficient de Variation : 0.1756

Station Numéro : 1090015900 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Niofoin

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	212*	1184	1983	365	816
1977	342*	1168	1984	366	987
1978	361*	1040	1985	365	1564
1979	365	1248	1986	365	1173
1980	366	1221	1987	365	966
1981	365	1132			
1982	365	1059			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1129 mm
 Calculée sur 9 années complètes
 Variance : 40330
 Coefficient de Variation : 0.1778

Station Numéro : 1090017600 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Seguelon

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	60*	181	1983	365	1120
1978	325*	1220	1984	244*	1111
1979	364*	1407	1985	153*	1097
1980	366	1348	1986	365	1395
1981	365	1732	1987	334*	767
1982	365	1425			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1404 mm
 Calculée sur 5 années complètes
 Variance : 38437
 Coefficient de Variation : 0.1396

Station Numéro : 1090017400 Nombre d'années : 10

Nom de la station : Samatiguila

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	138*	791	1984	276*	655
1977	365	1429	1985	245*	1086
1978	365	1836	1986	304*	1169
1979	365	1386	1987	365	1159
1980	366	1312			
1983	92*	400			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1424 mm
 Calculée sur 5 années complètes
 Variance : 50766
 Coefficient de Variation : 0.1582

Station Numéro : 1090017700 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Sinematiali

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	204*	966	1983	335*	788
1977	365	857	1984	366	1000
1978	273*	1069	1985	365	1106
1979	306*	1610	1986	335*	1143
1980	366	1206	1987	334*	1123
1981	365	1085			
1982	365	917			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1029 mm
 Calculée sur 6 années complètes
 Variance : 13839
 Coefficient de Variation : 0.1144

Station Numéro : 1090018000 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Sikolo

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	252*	819	1983	365	603
1978	364*	989	1984	336*	831
1979	361*	973	1985	365	884
1980	366	684	1986	365	844
1981	365	768	1987	365	1024
1982	365	673			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 783 mm
 Calculée sur 7 années complètes
 Variance : 18090
 Coefficient de Variation : 0.1718

Station Numéro : 1090019500 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Teningboue

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	244*	635	1981	365	977
1977	363*	899	1982	273*	872
1978	364*	724	1985	61*	131
1979	364*	1554	1987	304*	996
1980	366	1161			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1069 mm
 Calculée sur 2 années complètes
 Variance : 8400
 Coefficient de Variation : 0.0857

Station Numéro : 1090018300 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Sirana

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	231*	1536	1983	365	1242
1977	365	1421	1984	275*	1227
1978	365	1854	1985	334*	1414
1979	212*	1056	1986	365	1225
1981	275*	1555	1987	365	1156
1982	334*	1780			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1380 mm
 Calculée sur 5 années complètes
 Variance : 63959
 Coefficient de Variation : 0.1833

Station Numéro : 1090020100 Nombre d'années : 23

Nom de la station : Tieme

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1965	243*	288	1977	181*	293
1966	365	1633	1978	365	1409
1967	335*	1793	1979	363*	1336
1968	335*	1165	1980	365*	1567
1969	306*	1716	1981	303*	900
1970	365	1642	1982	365	1609
1971	365	1524	1983	365	1107
1972	366	1360	1984	336*	1342
1973	365	1539	1985	365	1434
1974	365	1118	1986	365	1317
1975	365	1435	1987	365	1194
1976	366	1489			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1415 mm
 Calculée sur 14 années complètes
 Variance : 29570
 Coefficient de Variation : 0.1215

Station Numéro : 1090020300 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Tienko

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	234*	1210	1983	184*	621
1977	365	940	1984	366	874
1978	364*	1493	1985	214*	723
1979	334*	1401	1986	365	869
1980	366	1606	1987	242*	507
1981	335*	1640			
1982	365	1191			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1096 mm
 Calculée sur 5 années complètes
 Variance : 78893
 Coefficient de Variation : 0.2563

Station Numéro : 1090020600 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Tortiya

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	184*	539	1983	365	705
1978	335*	671	1984	366	1038
1979	365	1300	1985	365	1239
1980	365*	1199	1986	365	858
1981	304*	886	1987	365	1096
1982	365	796			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1005 mm
 Calculée sur 7 années complètes
 Variance : 43757
 Coefficient de Variation : 0.2082

Station Numéro : 1090021200 Nombre d'années : 10

Nom de la station : Toumoukoro

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	184*	936	1984	214*	952
1978	365	1013	1985	365	1315
1979	266*	845	1986	365	1040
1980	265*	729	1987	273*	430
1981	152*	769			
1982	306*	759			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1122 mm
 Calculée sur 3 années complètes
 Variance : 18651
 Coefficient de Variation : 0.1217

Station Numéro : 1090251000 Nombre d'années : 4

Nom de la station : Boron

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1977	184*	602	1987	272*	310
1978	361*	1387			
1979	31*	46			

* : Année incomplète

Station Numéro : 1090340000 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Dianra

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1980	365*	955	1985	365	1285
1981	365	937	1986	365	1219
1982	365	889	1987	365	1015
1983	365	492			
1984	366	915			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 965 mm
 Calculée sur 7 années complètes
 Variance : 57372
 Coefficient de Variation : 0.2483

Station Numéro : 1090344000 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Dioulatiedougou

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	335*	1232	1983	365	842
1977	365	991	1984	366	1325
1978	365	1443	1985	334*	882
1979	365	1438	1986	306*	930
1980	361*	1400	1987	365	1289
1981	365	1566			
1982	334*	1149			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1270 mm
 Calculée sur 7 années complètes
 Variance : 58559
 Coefficient de Variation : 0.1905

Station Numéro : 1090751000 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Sarhala

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1979	241*	1025	1984	366	1182
1980	361*	1560	1985	365	1619
1981	365	799	1986	365	848
1982	365	1168	1987	365	1775
1983	365	569			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1137 mm
 Calculée sur 7 années complètes
 Variance : 166093
 Coefficient de Variation : 0.3584

Station Numéro : 1090528000 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Kanankoro

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1979	194*	790	1985	365	1117
1980	305*	728	1986	365	1117
1981	242*	505	1987	365	858
1982	212*	544			
1984	366	1262			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1088 mm
 Calculée sur 4 années complètes
 Variance : 21255
 Coefficient de Variation : 0.1339

Station Numéro : 1090774000 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Sirasso

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1976	235*	936	1983	365	1015
1977	355*	1016	1984	366	1119
1978	358*	1070	1985	365	1506
1979	359*	1551	1986	365	1115
1980	327*	1213	1987	365	1227
1981	365	1105			
1982	365	1161			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1178 mm
 Calculée sur 7 années complètes
 Variance : 21440
 Coefficient de Variation : 0.1243

Station Numéro : 1090941000 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Worofla

Année	Nb j Obs	Total	Année	Nb j Obs	Total
1978	334*	1105	1983	245*	624
1979	306*	1557	1984	366	1310
1980	306*	1379	1985	365	1237
1982	273*	1226	1986	334*	1277
1981	365	1207	1987	365	1118
1982	273*	1226			

* : Année incomplète

Moyenne Interannuelle : 1218 mm

Calculée sur 4 années complètes

Variance : 4702

Coefficient de Variation : 0.0563

Station Numéro : 1090003300 Nombre d'années : 14

Nom de la station : Bako

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	37	176	170	117*	191	256	32	0
1977	4	1	22	71	136	234	209	319	286	62	33	0
1978	22	19	90	22	94	227	340	218	156	141	35	23
1979	51	0	42	35	82	215	364	544	232	88	4	0
1980	35	0*	3	128	77	100	210	480	194	115	11	6
1982	0*	22*	25	71	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1983	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	260	217	28	5	12
1981	0	0	20	170	129	180	355	342	0*	0*	0*	0*
1982	0	22	25	71	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1983	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	260	217	28	5	12
1984	0*	0*	112	68	111	130	144	307	284	87	16	0
1985	0	2	15	59	86	159	250	326	290	76	47	0
1986	0	8	26	58	196	72	469	136	218	126	22	0
1987	0	1	2	1	103	133	97	233	168	101	9	31

* : Mois incomplet

Bako	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	12	7	35	69	105	163	261	311	223	101	20	8
Nbre d'années	9	8	11	11	10	10	10	11	11	11	11	11
Maximum	51	22	112	170	196	234	469	544	290	256	47	31
Minimum	0	0	2	1	37	72	97	136	156	28	4	0
Variance	327	70	1114	2001	1633	2666	12319	12281	1968	3614	201	107
C. Variation	1.453	1.274	0.961	0.653	0.385	0.318	0.426	0.356	0.199	0.597	0.715	1.361

Station Numéro : 1090004800 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Bonieredougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0	63	68	69*	82*	89*	33*	155	106*	133	46	0
1977	30*	28	110	169	80*	74*	20*	215	417	111	0*	6
1978	0	0*	109*	203*	85*	159	150	32*	89	144*	0*	4
1979	8	0	81*	122*	112*	281*	156*	79*	117	110	4*	0
1980	10*	25	157	109*	216*	130	234	222*	212*	195	62	16*
1981	0	0	106	56	279	170	94	117	140	38	0	0
1982	0	20	152	197	43	153	32	196	35	103	50	0
1983	0	2	21	110	0*	62	166	111	68	29	44	35
1984	0	2	92	38	67	128	200	126	83	0*	2	0
1985	0	18	40	211	112	104	240	171	400	0*	0*	0
1986	0	25	81	98	150	244	87	0*	0*	0*	0*	0
1987	0	0	71	0*	0*	135	185	204	157	81	22	0

* : Mois incomplet

Bonieredo	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	1	17	90	126	130	143	154	162	167	100	32	4
Nbre d'années	10	11	10	7	5	9	9	8	9	8	7	11
Maximum	8	63	157	211	279	244	240	215	417	195	62	35
Minimum	0	0	21	38	43	62	32	111	35	29	0	0
Variance	6	338	1726	3979	6884	2200	4431	1477	17848	2459	508	100
C. Variation	3.000	1.103	0.463	0.503	0.637	0.328	0.432	0.237	0.799	0.495	0.700	2.443

Station Numéro : 1090005000 Nombre d'années : 15

Nom de la station : Borotou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	65	30	227*	262*	230*	337*	46	0
1977	8	10	56	27*	206*	153	145	352	258	54	9	0
1978	10	53	78	181*	65	293	333*	223	244	113	0*	15
1979	25	0*	33	74	54	0*	0*	50	167	72	63	0
1980	27	1	60	103	179	47	176*	349	189	124	16	13
1981	0	1	20	106	201	81	341	0*	170	26	0*	0*
1982	0*	0*	0*	130	67	138	278	376	132	65	0*	0*
1983	0	24	0*	125	79	196	74	229	0*	61	0*	24
1981	0	1	20	106	201	81	341	0*	170	26	0*	0*
1982	0*	0*	0*	130	67	138	278	376	132	65	65	0
1983	0	24	0*	125	79	196	74	229	0*	61	0*	24
1984	0	24	96	126	0*	0*	0*	173	271	0*	0*	0*
1985	0*	0*	42	52	135	97	425	373	234	0*	0*	0*
1986	0*	6	50	80	213	86	192	217	96	136	22	0
1987	0	3	28	0	207	121	142	313	214	112	31	28

* : Mois incomplet

Borotou	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	7	15	48	96	124	128	229	271	190	76	36	10
Nbre d'années	10	10	10	12	13	13	10	12	12	12	7	10
Maximum	27	53	96	130	213	293	425	376	271	136	65	28
Minimum	0	1	20	0	54	30	74	50	96	26	9	0
Variance	101	253	573	1418	3987	4671	13203	9520	2805	1240	425	124
C. Variation	1.459	1.084	0.497	0.391	0.510	0.535	0.502	0.359	0.279	0.462	0.575	1.075

Station Numéro : 1090005800 Nombre d'années : 21

Nom de la station : Bougouso

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1965	0*	0*	0*	0*	0*	374	253	204	325	174	12	0
1966	0	0	66	35	158	133	204	336	356	223	23	27
1967	0	43	65	71	115	120	300	475	324	161	25	0
1968	0	11	48	68	87	101	226	245	350	263	48	15
1969	1	15	46	24	86	219	500	395	194	210	55	3
1970	0	3	24	65	185	194	193	390	217	99	8	0
1971	0	38	52	71	91	178	184	298	452	165	21	32
1972	0	35	62	168	133	353	314	301	272	126	41	0
1973	0	3	65	46	120	89	293	468	267	71	43	0
1974	0	0	116	59	110	98	313	242	350	169	8	0
1975	0	0	29	61	91	0*	226	289	212	140	38	10
1976	5	18	52	199	124	71	190	244	171	290	37	0
1977	3	2	14	28*	99	203*	202	317	387	48	4	0
1978	2	2	77	93	108	253	225	351	229	272	25	0
1979	10*	0	21*	55*	114*	226*	311	462*	195*	152*	58	0
1980	89	18*	0*	133*	49	200*	243*	287	0*	59*	20*	4
1981	0	4	9	0*	129	147	311	0*	237	80	0*	0*
1984	0	4	33	76	107	191	377	325	342	0*	0*	0*
1985	0	0	6	26	121	113	314	360	298	122	24	0
1986	0	5	66	48	213	67	207	225	237	156	40	0
1987	0	0	18	19	165	145	147	0*	198	120	16	27

* : Mois incomplet

Bougouso	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	5	10	47	70	120	167	264	319	285	160	29	6
Nbre d'années	19	19	18	16	19	17	20	18	19	18	18	19
Maximum	89	43	116	199	213	374	500	475	452	290	58	32
Minimum	0	0	6	19	49	67	147	204	171	48	4	0
Variance	391	186	741	2256	1391	7672	6413	5681	5551	4543	256	110
C. Variation	3.732	1.415	0.577	0.674	0.310	0.523	0.303	0.236	0.261	0.420	0.550	1.692

Station Numéro : 1090008800 Nombre d'années : 25

Nom de la station : Dembasso

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1963	0	43	24	111	152	154	219	348	287	187	31	0
1964	0	0	11	58	122	145	183	377	224	128	47	51
1965	33	0	4	56	111	262	291	447	350	108	0	0
1966	0	19	35	89	69	21	129	238	251	187	84	0
1967	0	14	72	85	122	155	179	426	187	38	76	0
1968	0	0	31	93	53	139	175	278	257	148	39	2
1969	0	28	0	28	51	213	238	309	178	239	49	0
1970	0	0	30	53	133	82	236	318	215	51	0*	0
1971	0	9	26	70	210	198	173	389	158	56	14	55
1972	0	32	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1973	0*	0*	0*	0*	0*	91	144	0*	148	84	0	0
1974	0	0	0*	68	38	149	0*	197	0*	142	0*	0*
1975	0	0	57	39	97	136	323	193	244	102	13	5
1976	8	0	14	77	140	76	160	124	154	222	47	0
1977	18	0	35	30	74	155	79	187	254	72	1	0
1978	0	0	46	137	90	66	250	261	163	129	21	15
1979	3	0	54	19	191	185	235	391	262	54	33	0
1980	53	0	0	39	176	111	243	289	294	62	14	15
1981	0	59	64	90	137	180	303	0*	139	20	7	0
1982	0	5	77	131	49	144	169	310	178	171	0	0
1983	0	12	0	103	57	127	175	167	140	29	13	28
1984	8	0	18	49	78	155	199	174	151	140	28	0
1985	0	2	49	112	118	146	243	392	177	133	0	0
1986	0	21	0	31	145	63	270	277	0*	60	32	0
1987	0	0	20	29	29	193	168	0*	226	100	2	0

* : Mois incomplet

Dembasso	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	5	10	30	69	106	139	208	290	211	111	25	7
Nbre d'années	24	24	22	23	23	24	23	21	22	24	22	23
Maximum	53	59	77	137	210	262	323	447	350	239	84	55
Minimum	0	0	0	19	29	21	79	124	139	20	0	0
Variance	155	245	557	1146	2420	2802	3353	8311	3251	3572	562	247
C. Variation	2.452	1.546	0.781	0.489	0.464	0.380	0.278	0.314	0.271	0.539	0.951	2.103

Station Numéro : 1090009000 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Dikodougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	80*	114*	199*	76	124	193	129	1
1977	40	3	45	56	117	194	91	147	313	0*	0*	0*
1978	0	11	76	140	81	160	94	86	262	159	46	20
1979	9	0*	44*	130*	117*	244*	207*	226*	270*	78*	25	1
1980	10	0*	5*	114*	259*	105*	348*	199*	322*	201	15*	3
1981	0	1	81	96	111	119	278	127	164	42	0	0
1982	0	0	68	194	22	172	196	169	82	114	3	0
1983	0	0*	0*	36	63	74	124	145	115	31	10	48
1984	0	0	89	127	130	146	165	273	196	95	24	0
1985	0	0	104	64	100	91	317	258	224	75	5	0
1986	0	19	5	79	107	132	211	122	166	98	0*	0
1987	86	3	54	44	179	108	62	363	108	97	2	5

* : Mois incomplet

Dikodougou	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	13	5	65	93	101	133	171	176	175	111	27	7
Nbre d'années	11	8	8	9	9	9	9	10	10	10	9	11
Maximum	86	19	104	194	179	194	317	363	313	201	129	48
Minimum	0	0	5	36	22	74	62	76	82	31	0	0
Variance	661	40	825	2410	1714	1341	6840	7634	4896	3034	1504	199
C. Variation	1.953	1.369	0.441	0.528	0.409	0.276	0.484	0.495	0.399	0.498	1.433	2.002

Station Numéro : 1090010200 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Foubolo

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0	136	50	106	76	145	16	161	140	180	53	0
1977	0	12	5	141*	117	114	42*	215	251*	105	12	10
1978	0*	10	58	155	106	51*	75*	41*	70	63*	8	12*
1979	40*	0	111	136	90	217	0*	0*	230	165	18	4
1980	10	5	50	143	207	127	214	196	193	176	41	19
1981	0	4	66	66	83	72	183	139	124	50	0	0
1982	0	61	87	118	69	134	62	139	86	0*	0*	0*
1983	0*	0*	0*	0*	103	98	80	82	0*	0	0*	0*
1984	0*	0*	0*	105	66	52	176	118	173	195	32	0
1985	0*	0*	0*	64	70	116	204	189	204	0*	0*	0*
1986	0	0	22	128	147	63	127	0*	0*	0*	0*	0*
1987	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	170	15	0

* : Mois incomplet

Foubolo	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	28	56	114	103	114	133	155	152	130	22	5
Nbre d'années	6	8	8	9	11	10	8	8	8	8	8	7
Maximum	10	136	111	155	207	217	214	215	230	195	53	19
Minimum	0	0	5	64	66	52	16	82	70	0	0	0
Variance	14	1993	983	898	1621	2075	4709	1694	2868	4443	280	44
C. Variation	2.236	1.571	0.560	0.264	0.391	0.400	0.517	0.266	0.351	0.512	0.754	1.423

Station Numéro : 1090011100 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Goulia

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	34	107	234	404	133	282	59	0
1977	38	0*	3	45	132	234	202	296	183	33	2	0
1978	0	12	126	99	119	170	263	236	217	90	5	15
1979	0	0	0	43	213	146	199	164	206	77	45	0
1980	0	8	7	25*	160*	149	197	330	238	109	6	53
1981	0	0	14	100	247	225	520	0*	102	95	0	0
1982	0	4	27	88	55	201	230	265	115	108	0*	0
1983	0*	0*	0*	79	124	123	251	226	218	117	4	0
1984	0	0	14	25	157	115	224	301	144	55	19	0
1985	0	0	0	36	134	125	396	308	247	101	8	0
1986	0	16	10	47	0*	125	186	338	96	61	26	0
1987	0	0	8	0	135	81	204	265	158	89	2	0

* : Mois incomplet

Goulia	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	5	21	56	135	150	259	285	171	101	16	6
Nbre d'années	10	9	10	10	10	12	12	11	12	12	11	12
Maximum	38	16	126	100	247	234	520	404	247	282	59	53
Minimum	0	0	0	0	34	81	186	164	96	33	0	0
Variance	128	34	1280	1009	3597	2132	9066	3756	2649	3527	355	219
C. Variation	2.991	1.297	1.713	0.568	0.445	0.308	0.368	0.215	0.300	0.586	1.182	2.617

Station Numéro : 1090011300 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Guiembe

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	70	111	177	69	129	252	48	0
1977	71	0*	0*	38	41	110	17	126	203	98	6	0
1978	0	0*	85	123	82	90	125	0	138	89	8	0
1979	44	0	42	146	70	240	329	367	161*	116*	16*	14
1980	14	21	6*	35	168	86	302	233*	160	77	0*	0*
1981	0	93	52	52	175	111	234	253	135	24	56	0
1982	0	23	44	0*	21	123	154	122	127	140	6	0
1983	0	4	0	44	78	75	126	0*	65	0*	66	0
1984	0	0	16	20	133	49	109	112	0*	0*	0*	0*
1985	0	0	35	35	73	116	399	651	329	115	0	0
1986	0	0	69	157	157	151	224	300	159	0*	48	0
1987	12	4	23	23	142	143	102	351	111	135	12	0

* : Mois incomplet

Guiembe	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	13	16	41	67	101	117	191	235	156	116	28	1
Nbre d'années	11	9	9	10	12	12	12	10	10	8	9	10
Maximum	71	93	85	157	175	240	399	651	329	252	66	14
Minimum	0	0	0	20	21	49	17	0	65	24	0	0
Variance	493	806	607	2521	2438	2106	11072	33117	4489	3810	603	18
C. Variation	1.744	1.761	0.608	0.748	0.490	0.392	0.550	0.775	0.431	0.531	0.891	3.000

Station Numéro : 1090011700 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Kani

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	0*	0*	73	76*	248*	184*	74*	10*	0*
1978	0	33*	47	200*	100	141	121	88*	147	104	6	1
1979	60	0	58*	112	52	118	348	220	258	97	15	3
1980	7	4	64	112	244	98	201	337	252	175	0	4
1981	0	12	137	93	160	98	227	189	130	77	0	0
1982	0	101	60	0*	0*	0*	0*	0*	111	0*	0*	0*
1985	0	0	78	66	103	123	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1987	7	35	35	87	222	193	110	421	144	200	25	34

* : Mois incomplet

Kani	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	11	25	70	94	147	121	202	292	174	131	9	8
Nbre d'années	7	6	6	5	6	7	5	4	6	5	5	5
Maximum	60	101	137	112	244	193	348	421	258	200	25	34
Minimum	0	0	35	66	52	73	110	189	111	77	0	0
Variance	411	1295	1073	295	4749	1291	7402	8602	3423	2310	90	163
C. Variation	1.931	1.423	0.466	0.183	0.470	0.298	0.427	0.318	0.337	0.368	1.050	1.557

Station Numéro : 1090011900 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Kassere

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	60*	111*	229	169	117	235	3	0*
1977	20	5	19	50	39	187	131	239	216	0*	0*	0*
1979	0*	0*	0*	0*	0*	17*	252	339	218	82*	52	0*
1980	37*	0	5	22*	139	195	315	266	243	149	6	9*
1981	0	22	62	54	228	153	267	192	128	24	0	0
1982	0	9	58	59	50	123	201	246	90	53	0	0
1983	0	0	0	54	24	85	212	198	187	69	0	0
1985	0	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1987	0	0	3	9	92	252	235	328	137	26	0*	0*

* : Mois incomplet

Kassere	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	5	21	45	95	166	230	247	167	93	10	0
Nbre d'années	6	7	7	5	6	6	8	8	8	6	6	3
Maximum	20	22	62	59	228	252	315	339	243	235	52	0
Minimum	0	0	0	9	24	85	131	169	90	24	0	0
Variance	56	58	652	335	4988	2883	2510	3362	2762	5796	359	0
C. Variation	2.236	1.508	1.217	0.405	0.741	0.324	0.218	0.235	0.315	0.820	1.862	0.000

Station Numéro : 1090012200 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Komborodougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	67*	163*	313*	400*	500	241	82	0*
1977	0*	0*	0*	46	308	239	32	243	391	308	0*	0*
1978	0	79*	311	384	228	151	451	245*	306*	192*	125	0*
1979	0*	0*	0*	134	347*	301	249	495*	307	92	24	0*
1980	8	0*	0*	97	286	100*	178	132	228*	0*	0*	0*
1981	0	0	144	112	136	114	175	122	150	36	6	0
1982	0	10	33	187	24	193	88	163	112	160	69*	0
1983	0	9	3	73	52	180	124	114	206	7	8	5
1984	0	0	27	140	94	173	316	282	134	112	16	0
1985	0	10	30	115	78	174	303	446	335	169	8	0
1986	0	18	0	134	108	0*	221	248	189	129	62	0
1987	8	0	27	12	160	205	0*	0*	88	242	21	31

* : Mois incomplet

Komborodo	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	7	72	130	147	192	214	219	241	150	39	5
Nbre d'années	9	7	8	11	10	9	10	8	10	10	9	7
Maximum	8	18	311	384	308	301	451	446	500	308	125	31
Minimum	0	0	0	12	24	114	32	114	88	7	6	0
Variance	11	40	9939	8539	8530	2543	13597	11030	16609	8079	1543	112
C. Variation	1.871	0.966	1.385	0.709	0.627	0.263	0.546	0.481	0.535	0.601	1.006	2.077

Station Numéro : 1090012500 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Kebi

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	0*	0*	63	68	114	0*	58	10	0
1978	4	2	93*	37	159	144	132	205	214	0*	0	0
1979	0	0	42	0*	147	215	305	315*	144*	67	14*	0*
1980	26*	0	24*	84	128	71	63	444	0*	0*	64	0*
1981	6	0	90	124	91	247	208	249	92	0	0*	0*
1982	0	0	61	37	70	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1983	0	50	0	76	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1985	0	16	82	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1987	15	0	21	2	56	142	230	480	274	110	0	0

* : Mois incomplet

Kebi	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	8	49	60	109	147	167	298	194	59	18	0
Nbre d'années	7	8	6	6	6	6	6	5	3	4	4	3
Maximum	15	50	90	124	159	247	305	480	274	110	64	0
Minimum	0	0	0	2	56	63	63	114	92	0	0	0
Variance	27	271	1029	1571	1492	4566	7743	19931	5761	1545	702	0
C. Variation	1.502	1.951	0.650	0.659	0.356	0.459	0.526	0.473	0.392	0.669	1.436	0.000

Station Numéro : 1090012600 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Kong

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0	8*	30	51	161	99	126	61*	119*	213*	18	0
1977	16	0	47	28	58*	104*	49*	190*	251*	56	0	21
1978	0	0*	60	94	160	67	76	24	211	111	12	0
1979	16	0	20	66	165	188*	180	326	262	69	45	0
1980	40	0	1	146	132	41	146	172	63	100	15	0
1981	0	0	105	64	115	153	243	189	0*	0*	0*	0*
1982	0	0	0	0	55	318	419	74	107	106	0	0
1983	0	0	0*	0*	0*	273	180	274	240	0	17	0
1984	0	60	211	401	337	0*	0*	0*	0*	120	0*	0*
1985	0	4	39	95	54	128	455	395	234	56	0*	0
1986	0	46	99	156	138	55	110	137	221	142	30	0
1987	0	11	79	11	109	133	192	375	113	125	4	0

* : Mois incomplet

Kong	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	12	63	101	142	141	213	218	181	88	16	2
Nbre d'années	12	10	11	11	10	9	10	9	8	10	9	10
Maximum	40	60	211	401	337	318	455	395	262	142	45	21
Minimum	0	0	0	0	54	41	76	24	63	0	0	0
Variance	140	439	3354	11257	5638	8192	14597	15445	4932	1643	189	38
C. Variation	1.972	1.731	0.921	1.049	0.527	0.644	0.568	0.569	0.387	0.459	0.884	3.000

Station Numéro : 1090013800 Nombre d'années : 7

Nom de la station : Loho

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1950	0*	0*	0*	0*	0*	73	84	114	218	115	0	0
1951	0	39	81	207	98	66	78	256	199	124	58	0
1952	0	12	28	42	59	79	178	79	167	34	29	48
1953	0	10	29	23	45	48	57	189	139	179	3	0
1954	8	17	77	150	72	131	21	211	150	172	48	0
1955	0	0*	60	58	242	64	224	141	238	281	12	41
1956	0	6	68	146	52	63	41	144	172	87	13	0*

* : Mois incomplet

Loho	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	1	17	57	104	95	75	97	162	183	141	23	15
Nbre d'années	6	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7	6
Maximum	8	39	81	207	242	131	224	256	238	281	58	48
Minimum	0	6	28	23	45	48	21	79	139	34	0	0
Variance	9	135	452	4480	4627	593	4797	3151	1131	5357	429	442
C. Variation	2.236	0.686	0.372	0.642	0.719	0.326	0.711	0.347	0.183	0.518	0.887	1.421

Station Numéro : 1090014900 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Marabadiassa

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	129	137*	15	55	125	162	45	0
1977	27	7*	104	84	76	90	77	224	409*	149	8	46
1978	0	14	51*	199	52	107	49	108	185	111	13	16
1979	0	0	55	102*	72	161	259	115	405	133*	75	0
1980	0*	30	82	98	212	81	191	228	196	212	26	13
1981	0	25	163	129	129	117	60	119	178	76	9	0
1982	0	34	168	165	150	193	31	165	102	109	50	0
1983	0*	0*	0*	0*	0*	66	52	36	0*	0*	0*	0*
1985	0*	0*	60	129	173	43	234	332	200	125	0	11
1986	0	38	16	133	104	120	160	21	145	62	28	0
1987	0	20	52	23	91	173	47	237	297	95	0	54

* : Mois incomplet

Marabadia	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	23	87	120	119	115	107	149	203	122	25	14
Nbre d'années	7	7	8	8	10	10	11	11	9	9	10	10
Maximum	27	38	168	199	212	193	259	332	405	212	75	54
Minimum	0	0	16	23	52	43	15	21	102	62	0	0
Variance	89	145	2584	2476	2233	2109	6964	8630	7793	1902	547	356
C. Variation	2.449	0.526	0.582	0.415	0.398	0.399	0.781	0.623	0.434	0.357	0.920	1.371

Station Numéro : 1090015200 Nombre d'années : 12

Nom de la station : M'Bengue

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	157*	136	186	146	201	181	28	0
1977	10	0	28	33	52	138	79	167	162	38	0	0
1978	0	0	99	85	158	97	193	208	136	88	0	0*
1979	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	98*	66	25	0
1980	11	0	7	13	116	231	203	231	198	30	7	28
1981	0	56	64	35	209	176	472	268	146	19	0	0
1982	0	20	75	85	43	139	181	353	120	95	0	0
1983	0	6	0	45	47	123	143	181	103	27	31	24
1984	0	0	52	77	29	47	78	104	152	41	7	0
1985	0	24	2	71	205	278	255	305	170	38	0*	0*
1986	0	0*	3	59	189	54	210	185	161	9	0	0
1987	0	0*	34	0	70	167	311	586	258	90	1	0*

* : Mois incomplet

M'Bengue	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	13	36	50	112	144	210	248	164	60	9	6
Nbre d'années	10	8	10	10	10	11	11	11	11	12	11	9
Maximum	11	56	99	85	209	278	472	586	258	181	31	28
Minimum	0	0	0	0	29	47	78	104	103	9	0	0
Variance	18	339	1096	807	4747	4302	11075	16113	1662	2098	139	118
C. Variation	1.971	1.391	0.913	0.565	0.616	0.455	0.501	0.511	0.248	0.763	1.328	1.876

Station Numéro : 1090015300 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Morondo

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1979	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	376	131	46	0*	0*
1980	9	0	37	75	191	125	128	273	227	157	21	12
1981	0	9	148	139	279	220	309	204	187	65	0	0
1982	0	12	83	30	162	0*	0*	0*	157	64	13	0*
1983	0	18	0	80	130	123	167	160	180	21	0	0*
1985	0*	0*	0*	0*	0*	31	438	109	239	81	0*	0
1986	0	43	44	43	281	53	156	212	173	163	23	0
1987	16	1	22	72	214	93	130	359	166	116	38	16

* : Mois incomplet

Morondo	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	14	55	73	209	107	221	242	182	89	16	6
Nbre d'années	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	6	5
Maximum	16	43	148	139	281	220	438	376	239	163	38	16
Minimum	0	0	0	30	130	31	128	109	131	21	0	0
Variance	39	206	2324	1195	3143	3725	13173	8484	1121	2336	177	49
C. Variation	1.495	1.039	0.870	0.474	0.268	0.568	0.519	0.381	0.184	0.542	0.847	1.245

Station Numéro : 1090015600 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Niapielodougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	97*	137	96*	78	116	193	112	1
1977	18*	0	40*	81*	145*	123	45	161	0*	0*	0*	0*
1978	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
1979	0*	0*	0*	88	91	266	264*	364	196	89	20	0
1980	2	0	6	45	56	58	225	93	129	106	70	16
1981	0	2	32	17	169	97	137	97	70	17	13	0
1982	0	17	64	90	19	94	93	90	86	103	0*	0*
1983	0	32	28	93	226	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1985	0	0	67	0*	121	0*	79	259	145	35	42	0
1986	0	11	12	148	155	324	0*	211	0*	36	53	0
1987	1	21	28	19	126	91	88	0*	126	195	8	0

* : Mois incomplet

Niapielod	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	0	10	34	71	120	149	111	169	124	97	45	2
Nbre d'années	7	8	7	7	8	8	6	8	7	8	7	8
Maximum	2	32	67	148	226	324	225	364	196	195	112	16
Minimum	0	0	6	17	19	58	45	78	70	17	8	0
Variance	1	129	477	1898	3762	7817	3314	9187	1450	4126	1176	28
C. Variation	1.700	1.089	0.644	0.612	0.509	0.595	0.518	0.567	0.307	0.665	0.757	2.506

Station Numéro : 1090015800 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Nielle

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	132	113	197	157	177	215	2	0
1977	15	0	32	21	56	122	91	280	327	77	0	0
1978	0	0	70	54	135	81*	171	220	109*	130	26	0
1979	0	0	23	34	87	195	195	222	221	32*	26	0
1980	13*	13	0	47	137*	101*	166	207	185	48	34	24
1981	0	4	68	59	228	202	394	218	133	71	0	0
1982	0	6	78	69	55	149	173	309	136	166	1	0
1983	0	30	0*	93	55	75	131	244	163	28	0	5
1984	0	0	13	90	108	47	95	204	0*	74	10	0
1985	0	0	37	141	143	369	237	319	169	84	0	0
1986	0	42	5	39	225*	125	187	407	179	102	0*	0
1987	0	0	28	6	73	114	149	392	137	47	0	0

* : Mois incomplet

Nielle	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	9	35	59	107	151	182	265	182	95	9	2
Nbre d'années	10	11	10	11	10	10	12	12	10	11	11	12
Maximum	15	42	78	141	228	369	394	407	327	215	34	24
Minimum	0	0	0	6	55	47	91	157	133	28	0	0
Variance	20	188	693	1318	2679	7324	5710	5570	2969	2842	155	45
C. Variation	3.000	1.594	0.746	0.612	0.483	0.566	0.415	0.282	0.299	0.563	1.398	2.754

Station Numéro : 1090015900 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Niofoin

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	163*	192*	215*	120*	200*	213*	81	0
1977	18*	4*	10*	55*	184*	186*	74*	258*	246*	131*	4*	0
1978	0	4*	164	174	153	96*	142*	105	95	98	10	0
1979	10	0	34	21	177	200	180	263	245	57	62	0
1980	46	0	0	129	124	135	229	237	192	95	15	20
1981	0	40	54	7	163	125	317	232	155	37	0	0
1982	0	19	80	50	29	135	257	220	130	140	0	0
1983	0	21	0	63	47	137	163	220	117	19	0	30
1984	0	0	109	43	74	184	142	180	135	97	23	0
1985	0	0	37	17	182	156	320	440	248	141	24	0
1986	0	16	1	34	130	137	205	309	268	51	23	0
1987	2	5	23	11	128	105	94	363	158	77	0	0

* : Mois incomplet

Niofoin	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	11	50	55	121	146	212	257	174	81	22	4
Nbre d'années	10	9	10	10	10	9	9	10	10	10	11	12
Maximum	46	40	164	174	182	200	320	440	268	141	81	30
Minimum	0	0	0	7	29	105	94	105	95	19	0	0
Variance	187	174	2596	2718	2613	770	5247	8039	3336	1498	658	90
C. Variation	2.388	1.176	1.014	0.950	0.424	0.190	0.342	0.349	0.332	0.476	1.190	2.287

Station Numéro : 1090017400 Nombre d'années : 10

Nom de la station : Samatiguila

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	97*	202	434	58	0
1977	10	0	19	45	106	202	182	316	404	146	0	0
1978	0	23	121	242	128	217	342	234	333	155	21	20
1979	0	0	11	51	55	175	343	391	204	69	88	0
1980	0	0	10	19	181	177	219	334	178	122	73	0
1983	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	96	241	63	0*	0*
1984	0	0*	0*	21	16	122	185	200	79	32	0*	0
1985	0*	0*	0*	52	106	106	238	342	181	61	0*	0
1986	0	16	0*	44	207	122	193	339	152	89	0*	8
1987	10	16	19	55	55	122	206	326	230	117	0	2

* : Mois incomplet

Samatigui	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	9	36	66	107	155	239	286	220	129	40	3
Nbre d'années	7	6	5	8	8	8	8	9	10	10	6	9
Maximum	10	23	121	242	207	217	343	391	404	434	88	20
Minimum	0	0	10	19	16	106	182	96	79	32	0	0
Variance	19	89	1829	4595	3703	1571	3889	7526	7562	11808	1195	39
C. Variation	1.582	1.032	1.187	1.025	0.570	0.255	0.261	0.303	0.395	0.845	0.866	1.900

Station Numéro : 1090017600 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Seguelon

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	161*	20	0*
1978	0*	17	75*	22*	94*	147*	223*	270	188	128	20	36
1979	14	12	10*	82	104	184	278	331	264	71	56	0
1980	13	6	22	44	128	181	195	311	265	120	33	32
1981	0	26	93	136	106	257	284	463	224	93	51	0
1982	0	33	151	119	82	124	205	318	243	150	0	0
1983	0	54	0	33	57	266	146	245	206	112	0	0
1984	0	0	63	133	126	252	322	214	0*	0*	0*	0*
1985	0*	0*	0*	0*	0*	142	233	397	270	55	0*	0*
1986	0	50	57	89	143	121	213	300	202	119	103	0
1987	0	11	12	7	123	113	164	0*	138	141	17	41

* : Mois incomplet

Seguelon	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	23	57	80	109	182	227	317	222	110	33	14
Nbre d'années	8	9	7	8	8	9	9	9	9	9	9	8
Maximum	14	54	151	136	143	266	322	463	270	150	103	41
Minimum	0	0	0	7	57	113	146	214	138	55	0	0
Variance	35	328	2390	2064	678	3443	3013	5134	1696	881	939	310
C. Variation	1.735	0.776	0.859	0.566	0.240	0.322	0.242	0.226	0.186	0.271	0.920	1.303

Station Numéro : 1090017700 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Sinematiali

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	88*	113	175	162	159	174	95	0*
1977	12	0	0	40	131	205	26	159	194	86	1	4
1978	0*	15	29	313	58	59	217	109	203	66	0*	0*
1979	0*	0*	47	15	231	282	368	282	204	116	47	18
1980	32	0	3	79	151	81	245	236	214	132	14	19
1981	0	0	83	148	127	130	190	165	199	39	4	0
1982	0	11	112	88	35	173	121	211	84	76	7	0
1983	0	69	5	50	66	127	145	147	171	9	0*	0
1984	0	0	24	79	281	105	120	170	149	70	3	0
1985	0	12	34	49	63	143	213	403	142	45	2	0
1986	0	41	7	88	108	130	191	282	234	62	0*	0
1987	7	6	0*	44	146	190	118	364	128	97	16	8

* : Mois incomplet

Sinematia	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	15	34	90	127	145	177	224	173	81	21	5
Nbre d'années	9	10	10	11	11	12	12	12	12	12	9	10
Maximum	32	69	112	313	281	282	368	403	234	174	95	19
Minimum	0	0	0	15	35	59	26	109	84	9	1	0
Variance	102	457	1256	6109	5168	3321	6489	7690	1677	1812	871	54
C. Variation	1.796	1.401	1.029	0.867	0.567	0.398	0.454	0.391	0.236	0.526	1.411	1.484

Station Numéro : 1090018000 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Sikolo

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	19*	183*	137	117	151	164*	50*	0*	0
1978	0	5	43	202	104	84	202	56	184	101*	4	4
1979	3	0	13*	55	128	122*	241	297	49*	57	7	2
1980	10	0	3	60	141	42	219	89	73	37	1	9
1981	0	9	51	32	144	71	106	106	137	73	40	0
1982	0	3	75	27	64	69	157	139	70	64	7	0
1983	0	5	0	25	133	62	149	92	113	15	9	0
1984	0	0	84	0*	102	104	215	167	90	59	11	0
1985	0	0	19	30	42	77	176	293	150	86	12	0
1986	0	17	11	71	120	84	170	78	129	127	38	0
1987	12	3	35	48	129	172	120	226	121	99	60	0

* : Mois incomplet

Sikolo	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	4	36	61	111	90	170	154	118	68	19	1
Nbre d'années	10	10	9	9	10	10	11	11	9	9	10	11
Maximum	12	17	84	202	144	172	241	297	184	127	60	9
Minimum	0	0	0	25	42	42	106	56	70	15	1	0
Variance	19	27	818	2706	1028	1330	1874	6458	1217	975	352	7
C. Variation	1.753	1.230	0.804	0.852	0.290	0.405	0.254	0.523	0.295	0.456	0.994	1.950

Station Numéro : 1090018300 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Sirana

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	35	186	334*	354*	349*	205*	72*	0
1977	3	0	3	45	126	256	191	405	308	83	0	0
1978	0	2	112	124	153	193	394	341	334	153	48	0
1979	0	0	52	55	137	289	523	0*	0*	0*	0*	0*
1981	0*	0*	0*	71	160	136	499	347	269	66	7	0
1982	0*	33	65	143	122	227	216	518	207	248	0	0
1983	0	15	0	130	92	201	310	347	110	32	6	0
1984	0*	0*	0*	25	79	189	267	389	195	77	4	2
1985	0	0	89	109	0*	136	284	298	341	143	15	0
1986	0	0	60	52	82	173	202	241	295	110	9	0
1987	0	8	0	0	98	126	191	316	291	96	13	17

* : Mois incomplet

Sirana	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	0	7	48	75	109	192	308	356	261	112	12	2
Nbre d'années	7	8	8	10	10	11	10	9	9	9	9	10
Maximum	3	33	112	143	160	289	523	518	341	248	48	17
Minimum	0	0	0	0	35	126	191	241	110	32	0	0
Variance	1	122	1607	2120	1326	2354	13952	5378	5143	3572	193	26
C. Variation	2.449	1.521	0.842	0.611	0.335	0.252	0.384	0.206	0.275	0.534	1.209	2.614

Station Numéro : 1090019500 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Teningbou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	73	59*	16	121	97	107	162	0
1977	8	7	17	60*	73	107	32	165	248	177	0*	7
1978	0	11	58	69	51	122	56*	104	173	45	21	15
1979	23*	0	50	31	123	177	402	143	358	162	86	0
1980	5	39	105	81	184	98	119	225	130	161	14	1
1981	0	8	137	58	175	192	63	124	140	74	7	0
1982	0	35	58	208	100	174	62	159	76	0*	0*	0*
1985	0*	0*	69	62	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1987	10	38	60	95	78	173	90	256	182	0*	0*	15

* : Mois incomplet

Teningbou	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	4	20	69	86	107	149	112	162	175	121	58	5
Nbre d'années	6	7	8	7	8	7	7	8	8	6	5	7
Maximum	10	39	137	208	184	192	402	256	358	177	162	15
Minimum	0	0	17	31	51	98	16	104	76	45	7	0
Variance	16	243	1163	2812	2145	1281	14981	2464	7228	2430	3531	40
C. Variation	1.062	0.798	0.493	0.614	0.433	0.240	1.093	0.306	0.485	0.408	1.025	1.163

Station Numéro : 1090020100 Nombre d'années : 23

Nom de la station : Tieme

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1965	8	0	1	67	122	0*	0*	0*	0*	90	1	0
1966	0	0	42	80	67	99	247	393	400	232	74	0
1967	0	6	13	113	106	242	239	487	259	329	0*	0
1968	0	52	24	69	151	182	248	0*	196	169	67	8
1969	0*	0*	83	93	139	257	290	454	226	155	20	0
1970	0	1	39	51	137	189	323	537	256	108	1	0
1971	1	8	13	98	128	123	180	473	386	75	6	33
1972	0	10	22	77	186	237	295	237	153	117	25	0
1973	0	0	20	133	81	83	297	452	253	147	12	61
1974	0	0	189	41	62	253	236	116	137	82	2	0
1975	0	0	76	75	117	137	349	166	339	150	19	6
1976	0	0	30	99	189	98	223	215	171	349	117	0
1977	0	39	0	34	55	165	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1978	2	12	96	122	238	135	299	146	112	191	42	15
1979	2	0	37	81	153*	149	321	188	204	140*	62	0
1980	26	14	13	64	181	173	360	276*	256	111	73	21
1981	0	0	55	128	174	148	0*	0*	274	100	22	0
1982	0	38	80	132	92	211	284	332	200	236	2	2
1983	0	33	0	67	57	162	195	236	147	190	21	0
1984	0	0	54	90	121	234	238	267	259	81	0*	0
1985	0	0	7	53	80	179	355	319	271	164	8	0
1986	0	30	45	57	203	138	202	256	200	174	14	0
1987	0	2	0	11	215	150	174	363	191	68	13	8

* : Mois incomplet

Tieme	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	11	41	80	132	170	268	313	233	158	30	7
Nbre d'années	22	22	23	23	22	22	20	18	21	21	20	22
Maximum	26	52	189	133	238	257	360	537	400	349	117	61
Minimum	0	0	0	11	55	83	174	116	112	68	1	0
Variance	30	249	1797	994	2854	2517	3180	15839	5532	5768	975	206
C. Variation	3.107	1.420	1.039	0.395	0.406	0.295	0.211	0.402	0.320	0.481	1.041	2.068

Station Numéro : 1090020300 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Tienko

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	102*	98	191	329	136	259	91	4
1977	28	0	24	44	128	138	129	216	141	86	6	0
1978	0	48	26	118	120*	261	194	279	309	136	1	3
1979	0	0	2	17	90	223	370	329	264	54	54	0*
1980	0	14	0	0	176	197	328	322	345	50	56	119
1981	0	0	0	0*	259	224	346	458	234	121	0	0
1982	0	0	31	90	44	147	263	191	265	162	0	0
1983	0*	0*	0*	0*	0*	0*	109	310	175	16	12	0
1984	0	0	24	0	107	150	205	262	95	33	0	0
1985	0*	0*	0*	18	54	114	335	203	0*	0*	0	0
1986	0	0	0	50	180	96	23	275	184	61	0	0
1987	0	2	0	0	72	124	187	0*	122	0*	0*	0*

* : Mois incomplet

Tienko	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	7	12	37	123	161	223	288	206	98	20	13
Nbre d'années	9	9	9	9	9	11	12	11	11	10	11	10
Maximum	28	48	31	118	259	261	370	458	345	259	91	119
Minimum	0	0	0	0	44	96	23	191	95	16	0	0
Variance	75	231	168	1604	4410	2870	10559	5143	6129	4868	924	1261
C. Variation	2.828	2.144	1.100	1.073	0.539	0.333	0.460	0.249	0.380	0.715	1.525	2.827

Station Numéro : 1090020600 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Tortiya

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	0*	0*	0*	95	193	207	43	0	0
1978	0	14	117	0*	89	39	103	29	187	75	14	5
1979	16	0	137	9	124	163	230	254	257	96	14	0
1980	0	0	58	52	128	62	202	239	331	127*	0	0
1981	0	0	144	121	203	133	174	0*	0*	112	0	0
1982	0	0	54	100	36	127	77	140	156	82	15	11
1983	0	7	6	29	169	35	68	125	175	48	24	19
1984	0	0	119	30	88	234	88	162	148	134	36	0
1985	0	0	178	9	104	70	153	347	144	189	41	5
1986	0	52	15	60	89	82	181	140	81	68	90	0
1987	34	38	44	26	149	149	82	268	156	102	10	36

* : Mois incomplet

Tortiya	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	5	11	87	48	118	109	132	190	184	95	22	7
Nbre d'années	10	10	10	9	10	10	11	10	10	10	11	11
Maximum	34	52	178	121	203	234	230	347	331	189	90	36
Minimum	0	0	6	9	36	35	68	29	81	43	0	0
Variance	117	318	3132	1359	2046	3588	3001	7352	4271	1692	634	118
C. Variation	2.157	1.603	0.643	0.761	0.384	0.548	0.415	0.452	0.355	0.433	1.139	1.584

Station Numéro : 1090021200 Nombre d'années : 10

Nom de la station : Toumoukoro

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	0*	0*	0*	199	406	248	83	0	0
1978	0	0	72	127	133	159	172	218	117	15	0	0
1979	0	0	30	24	136*	103*	119*	258*	176*	0*	0*	0*
1980	42	0	36	20*	96*	161*	155*	157*	63*	0*	0*	0*
1981	0*	0*	0*	0*	139	89	305*	0*	169	68	0*	0*
1982	0*	0*	34	67	13	115	182	193	107	47	0	0
1984	0	0*	0*	43	46	245	121	191	307	0*	0*	0*
1985	0	0	43	35	168	196	279	340	206	47	0	0
1986	0	57	0	12	197	228	215	222	59	48	0	0
1987	0	0	0	40	61	55	124	84	67	0*	0*	0*

* : Mois incomplet

Toumoukor	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	6	10	31	50	108	155	185	236	160	52	0	0
Nbre d'années	7	6	7	7	7	7	7	7	8	6	5	5
Maximum	42	57	72	127	197	245	279	406	307	83	0	0
Minimum	0	0	0	12	13	55	121	84	59	15	0	0
Variance	216	456	542	1243	4020	4448	2570	9615	6878	441	0	0
C. Variation	2.449	2.236	0.754	0.708	0.587	0.429	0.275	0.415	0.519	0.407	0.000	0.000

Station Numéro : 1090251000 Nombre d'années : 4

Nom de la station : Boron

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1977	0*	0*	0*	0*	0*	0*	92	186	178	81	65	0
1978	0	23	111	237	309*	251*	98*	74	233	17	35	0*
1979	0*	0*	46	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
1987	31	4	0	1	38	74	7	0*	109	0*	47	0*

* : Mois incomplet

Boron	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	15	13	52	119	38	74	50	130	173	49	49	0
Nbre d'années	2	2	3	2	1	1	2	2	3	2	3	1
Maximum	31	23	111	237	38	74	92	186	233	81	65	0
Minimum	0	4	0	1	38	74	7	74	109	17	35	0
Variance	237	92	2053	13936	0	0	1794	3158	2594	1034	154	0
C. Variation	1.000	0.727	0.868	0.989	0.000	0.000	0.853	0.433	0.294	0.655	0.253	0.000

Station Numéro : 1090340000 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Dianra

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1980	25	0	52	62*	74	43	160	141	251	80	11	58
1981	0	0	69	53	97	145	165	220	81	80	27	0
1982	0	11	115	38	53	152	70	201	120	129	0	0
1983	0	10	0	55	119	47	71	57	101	6	14	13
1984	0	0	21	73	86	138	148	184	151	99	17	0
1985	0	3	38	171	39	79	338	318	154	142	4	0
1986	0	12	3	35	171	73	320	279	198	73	56	0
1987	0	10	39	7	217	113	103	283	102	96	46	0

* : Mois incomplet

Dianra	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	3	6	42	62	107	99	172	210	145	88	22	9
Nbre d'années	8	8	8	7	8	8	8	8	8	8	8	8
Maximum	25	12	115	171	217	152	338	318	251	142	56	58
Minimum	0	0	0	7	39	43	70	57	81	6	0	0
Variance	68	25	1253	2348	3175	1691	9428	6364	2816	1492	343	357
C. Variation	2.646	0.897	0.839	0.787	0.527	0.416	0.565	0.380	0.367	0.439	0.852	2.132

Station Numéro : 1090344000 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Dioulatiedougou

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	2	55	99	304	76	203	93	112	229	59	0
1977	8	21	0	38	130	126	82	218	240	99	29	0
1978	17	65	73	128	90	165	240	209	314	101	24	17
1979	19	0	49	60	114	233	231	377	212	115	28	0
1980	52	3*	66*	83	158*	113	218*	318	248	84	57	0*
1981	0	2	120	176	153	107	398	343	180	72	14	0
1982	0	17	104	78	84	84	0*	285	313	170	14	0
1983	0	39	0	79	46	145	133	181	176	24	4	17
1984	0	0	122	94	124	194	172	293	213	112	1	0
1985	3	2	26	58	78	109	0*	296	175	116	17	0
1986	0	0*	0*	40	67	53	188	255	140	103	86	0
1987	0	8	14	24	155	67	220	392	182	172	34	22

* : Mois incomplet

Dioulatiedou	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	9	16	56	80	122	123	207	272	209	116	30	5
Nbre d'années	11	10	10	12	11	12	9	12	12	12	12	11
Maximum	52	65	122	176	304	233	398	392	314	229	86	22
Minimum	0	0	0	24	46	53	82	93	112	24	1	0
Variance	232	410	1993	1624	4415	2634	6785	6782	3524	2565	575	71
C. Variation	1.681	1.302	0.794	0.505	0.544	0.419	0.397	0.303	0.284	0.435	0.788	1.655

Station Numéro : 1090528000 Nombre d'années : 8

Nom de la station : Kanankoro

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1979	0*	0*	0*	0*	0*	62*	236	201	200	46	45	0
1980	11	0	16	8	67	0*	180	170	156	60	58	0*
1981	0	4	32	111	106	73	0*	145	35	0*	0*	0*
1982	0	43	0	58	0*	0*	259	68	116	0*	0*	0*
1984	0	0	206	79	195	128	174	127	287	59	8	0
1985	0	2	20	57	152	183	190	320	180	13	0	0
1986	0	7	8	36	124	91	287	281	210	41	32	0
1987	0	0	9	3	79	181	170	257	128	32	0	0

* : Mois incomplet

Kanankoro	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	2	8	42	50	121	131	214	196	164	42	24	0
Nbre d'années	7	7	7	7	6	5	7	8	8	6	6	5
Maximum	11	43	206	111	195	183	287	320	287	60	58	0
Minimum	0	0	0	3	67	73	170	68	35	13	0	0
Variance	16	206	4570	1270	1900	2019	1862	6337	4882	261	509	0
C. Variation	2.449	1.832	1.629	0.708	0.362	0.343	0.202	0.405	0.426	0.388	0.945	0.000

Station Numéro : 1090751000 Nombre d'années : 9

Nom de la station : Sarhala

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1979	0	0	132	179	150	207	264*	95*	0*	0*	0*	0*
1980	11	4	3*	122	156	91*	239	282	306	282	56*	8*
1981	0	2	39	81	216	189	144	0	63	60	5	0
1982	0	55	79	80	159	126	138	125	149	157	70	30
1983	0	23	2	68	116	68	48	92	70	24	22	36
1984	0	0	138	133	121	97	280	239	106	44	24	0
1985	10	9	57	78	133	68	253	348	569	77	3	15
1986	0	24	11	22	100	37	155	164	224	22	90	0
1987	114	38	9	42	152	145	66	575	442	155	23	16

* : Mois incomplet

Sarhala	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	15	17	58	90	145	117	165	228	241	103	34	14
Nbre d'années	9	9	8	9	9	8	8	8	8	8	7	7
Maximum	114	55	138	179	216	207	280	575	569	282	90	36
Minimum	0	0	2	22	100	37	48	0	63	22	3	0
Variance	1232	334	2559	2042	1003	3206	6411	27866	30009	7072	945	188
C. Variation	2.342	1.071	0.870	0.504	0.219	0.484	0.484	0.732	0.719	0.819	0.911	1.003

Station Numéro : 1090774000 Nombre d'années : 12

Nom de la station : Sirasso

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1976	0*	0*	0*	0*	164*	139	107	114	161	183	67	0
1977	49	0	18*	23*	92*	202	76*	191	281	81*	3*	0
1978	0	0*	111*	95	138	51	227	115	201	109*	14*	10
1979	14	0*	90	87	100*	184	359	319*	281	81	26*	10
1980	27*	1	23	73	202*	197*	0*	240*	228	181*	17	25
1981	0	28	102	88	125	180	175	190	142	70	6	0
1982	0	12	61	158	94	122	198	196	193	97	30	0
1983	0	40	0	67	123	195	136	192	174	38	41	9
1984	0	0	25	97	159	149	180	209	119	134	47	0
1985	0	0	21	99	81	150	354	491	219	80	11	0
1986	0	7	3	117	169	89	173	306	153	79	20	0
1987	7	7	9	30	192	122	84	412	143	194	23	5

* : Mois incomplet

Sirasso	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	7	11	37	91	135	144	199	242	191	106	29	5
Nbre d'années	10	9	9	10	8	11	10	10	12	9	9	12
Maximum	49	40	102	158	192	202	359	491	281	194	67	25
Minimum	0	0	0	30	81	51	84	114	119	38	6	0
Variance	214	186	1283	991	1227	1972	7774	13842	2577	2521	338	52
C. Variation	2.117	1.289	0.964	0.345	0.259	0.309	0.443	0.487	0.265	0.473	0.637	1.459

Station Numéro : 1090941000 Nombre d'années : 11

Nom de la station : Worofla

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1978	0	62	46	139	83	225	144	177	74	124	32	0*
1979	57	0*	23	231	128	169	292	294	217	99	50	0*
1980	0*	0*	87	73	103	87	291	322	200	137	54	25
1982	0	109	91	243	72	163	197	240	111	0*	0*	0*
1981	0	10	222	157	150	91	188	159	126	71	33	0
1982	0	109	91	243	72	163	197	240	111	0*	0*	0*
1983	0*	0*	0*	0*	102	124	111	129	114	40	6	0
1984	57	0	51	157	120	176	191	316	78	126	39	0
1985	5	0	163	42	105	84	347	202	75	195	16	2
1986	10	77	79	178	182	237	171	0*	182	133	28	0
1987	9	16	40	119	136	71	72	328	188	118	1	21

* : Mois incomplet

Worofla	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moyenne	15	48	89	158	114	144	200	241	134	116	29	7
Nbre d'années	9	8	10	10	11	11	11	10	11	9	9	7
Maximum	57	109	222	243	182	237	347	328	217	195	54	25
Minimum	0	0	23	42	72	71	72	129	74	40	1	0
Variance	511	1946	3332	4267	1050	3016	6077	4740	2565	1690	298	106
C. Variation	1.483	0.919	0.647	0.413	0.285	0.380	0.390	0.286	0.378	0.355	0.600	1.496

	T10-50	T10-100	X1	X2	X5	X6	X3	X4	X7	Superficie	Pluie Annuelle	Lame Annuelle	Coeff Ec.
T10-50	1	0.6897	-0.0797	0.1409	-0.0249	0.2579	0.6892	-0.1876	0.3172	0.0163	0.1531	0.1200	0.1032
T10-100	0.6897	1	-0.4549	0.3215	-0.2337	0.1582	0.4626	-0.1083	0.3016	0.2748	0.3178	0.3206	0.3260
X1	-0.0797	-0.4549	1	0.0938	0.5988	0.3322	-0.1712	0.3898	-0.1337	-0.1144	-0.4525	-0.3775	-0.3706
X2	0.1409	0.3215	0.0938	1	0.3999	0.2601	0.1512	-0.0644	0.2417	0.3104	-0.0456	0.0416	0.0057
X5	-0.0249	-0.2337	0.5988	0.3999	1	0.7882	-0.0566	0.2008	-0.0500	-0.0896	-0.3268	-0.2267	-0.2031
X6	0.2579	0.1582	0.3322	0.2601	0.7882	1	0.2514	0.0628	0.2465	-0.1487	-0.0168	0.0690	0.1072
X3	0.6892	0.4626	-0.1712	0.1512	-0.0566	0.2514	1	-0.5735	0.5942	-0.0962	0.3716	0.4106	0.4168
X4	-0.1876	-0.1083	0.3898	-0.0644	0.2008	0.0628	-0.5735	1	-0.5751	0.0258	-0.4820	-0.4164	-0.3898
X7	0.3172	0.3016	-0.1337	0.2417	-0.0500	0.2465	0.5942	-0.5751	1	0.0477	0.3798	0.4314	0.4266
Superficie	0.0163	0.2748	-0.1144	0.3104	-0.0896	-0.1487	-0.0962	0.0258	0.0477	1	0.0313	0.1119	0.1196
Pluie Annuelle	0.1531	0.3178	-0.4525	-0.0456	-0.3268	-0.0168	0.3716	-0.4820	0.3798	0.0313	1	0.8881	0.8170
Lame Annuelle	0.1200	0.3206	-0.3775	0.0416	-0.2267	0.0690	0.4106	-0.4164	0.4314	0.1119	0.8881	1	0.9776
Coeff Ec.	0.1032	0.3260	-0.3706	0.0057	-0.2031	0.1072	0.4168	-0.3898	0.4266	0.1196	0.8170	0.9776	1
Pc6	-0.1272	0.1026	-0.2494	0.0559	-0.0587	0.0653	0.0537	-0.2192	0.1815	0.0725	0.6244	0.5526	0.5188
Pr6	-0.2525	-0.1183	0.0580	0.1155	0.2359	0.1465	-0.1906	0.0812	-0.0197	0.0539	-0.0020	-0.0067	0.0100
Pc7	0.1444	0.4191	-0.3443	0.1634	-0.1447	0.1044	0.2861	-0.2801	0.2485	0.1335	0.7647	0.7118	0.6571
Pr7	0.0336	0.2427	0.0328	0.2894	0.2228	0.2224	-0.0136	0.1555	-0.0620	0.1425	-0.0399	0.0097	0.0106
Pc8	0.1470	0.4032	-0.4645	0.0340	-0.3000	-0.0101	0.3180	-0.4089	0.3123	0.0780	0.9085	0.8187	0.7561
Pr8	0.0222	0.2838	-0.1687	0.1420	-0.0089	0.0196	-0.0406	0.0528	-0.0737	0.0932	0.0178	0.0479	0.0548
Pc9	0.1264	0.3384	-0.4717	-0.0168	-0.3302	-0.0464	0.3289	-0.4629	0.3443	0.0697	0.9594	0.8473	0.7810
Pr9	-0.0932	0.0462	-0.0461	0.0856	0.0213	-0.1029	-0.1775	0.0994	-0.1562	0.1173	-0.2133	-0.2001	-0.1861
Pc10	0.1521	0.3117	-0.4543	-0.0596	-0.3222	-0.0227	0.3753	-0.4857	0.3655	0.0474	0.9895	0.8849	0.8209
Pr10	0.0067	-0.0268	-0.0546	-0.1271	0.0007	-0.0408	0.0675	-0.0897	-0.0488	0.0873	0.0604	0.0988	0.1367
Savanes	-0.0762	0.1465	-0.2464	0.1866	-0.3551	-0.3273	-0.3250	0.1523	-0.1333	0.0630	0.0940	0.0792	0.0522
Forêt	0.0298	0.4743	-0.2757	0.3320	-0.1690	-0.1606	-0.2001	0.1593	-0.1192	0.6558	-0.0069	0.0016	0.0204
Cultures	0.0577	-0.3171	0.3196	-0.3074	0.3582	0.3340	0.3548	-0.1979	0.1685	-0.3276	-0.0738	-0.0694	-0.0554
Habitat	-0.0397	-0.2150	0.2612	0.0172	0.4804	0.4188	0.3117	-0.0825	0.0075	-0.0821	-0.1093	-0.0221	0.0136
Compacité	0.0457	0.2863	-0.0496	0.2963	-0.0360	-0.0416	-0.0882	0.0336	0.0724	0.4300	-0.0204	-0.0759	-0.0689
Eaug an	0.1876	0.2874	-0.2578	0.2167	-0.1718	0.0817	0.5188	-0.3720	0.5289	0.0140	0.7910	0.8113	0.7669
Lc6	0.0294	-0.0590	-0.0297	-0.1591	0.0452	0.1084	0.4855	-0.2681	0.2099	-0.0976	0.2099	0.3104	0.3543
Lr6	-0.0063	-0.1824	0.2530	-0.1449	0.3144	0.2956	0.3541	-0.1252	0.1294	-0.1005	-0.0176	0.0804	0.1361
Lc7	0.0922	0.0027	-0.0505	-0.0900	0.0714	0.1933	0.5762	-0.3758	0.3310	-0.1000	0.3471	0.4424	0.4658
Lr7	0.0395	-0.1589	0.2780	-0.0748	0.4192	0.4310	0.3838	-0.1938	0.2076	-0.1369	0.0430	0.1305	0.1683
Lc8	0.2318	0.2577	-0.2445	0.0260	-0.1634	0.1192	0.6917	-0.5207	0.5627	-0.0448	0.7103	0.8139	0.7982
Lr8	0.1865	0.0418	0.0039	-0.1345	0.0324	0.2091	0.5733	-0.4690	0.4468	-0.2215	0.2749	0.3266	0.3443
Lc9	0.1687	0.3029	-0.3324	0.0236	-0.2189	0.0806	0.5140	-0.4583	0.4785	0.0233	0.8687	0.9678	0.9425
Lr9	0.1529	-0.0027	-0.0156	-0.3066	-0.1007	0.0554	0.4010	-0.3406	0.2072	-0.3483	0.3009	0.2590	0.2681
Lc10	0.1316	0.3244	-0.3762	0.0313	-0.2313	0.0690	0.4390	-0.4232	0.4439	0.1010	0.8815	0.9947	0.9776
Lr10	0.0227	-0.1367	0.1753	-0.1773	0.0575	-0.0661	-0.0164	0.2229	-0.2364	-0.2419	-0.4124	-0.4176	-0.4024
Egr6	0.1379	-0.0337	-0.0189	0.1650	0.1670	0.1910	0.5583	-0.5250	0.4022	-0.1601	0.0015	0.0193	0.0280
Egr7	0.3499	0.1651	0.0103	0.2659	0.2199	0.3082	0.6827	-0.5420	0.4596	-0.1233	0.0104	0.0550	0.0467
Egr8	0.3017	0.2648	-0.1118	0.3216	0.0792	0.2127	0.6504	-0.5823	0.5429	-0.0889	0.1219	0.1865	0.1783
Egr9	0.1163	0.2855	-0.0732	0.3220	0.0399	0.0648	0.1858	-0.0519	0.1718	0.0515	-0.1984	-0.1307	-0.1125
Egr10	0.0433	0.0816	0.1118	0.0084	0.0961	-0.0049	-0.0598	0.3645	-0.2583	0.0650	-0.3694	-0.2781	-0.2203
Ir6	0.5389	0.3781	-0.1756	0.2184	-0.0468	0.2437	0.9620	-0.6164	0.6741	-0.1030	0.4665	0.5056	0.5064
Ir7	0.4719	0.3627	-0.1748	0.2589	-0.0516	0.2303	0.9210	-0.6040	0.6912	-0.0777	0.5067	0.5536	0.5496
Ir8	0.3527	0.3553	-0.2088	0.2947	-0.1023	0.1708	0.7911	-0.5222	0.6694	-0.0388	0.6001	0.6500	0.6382
Ir9	0.2322	0.3499	-0.2367	0.2695	-0.1396	0.1344	0.6008	-0.3573	0.5792	0.0082	0.6765	0.7326	0.7240
Ir10	0.2019	0.3073	-0.2436	0.2118	-0.1430	0.1274	0.5578	-0.3410	0.5413	0.0108	0.7205	0.7833	0.7738

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Pc6	Pr6	Pc7	Pr7	Pc8	Pr8	Pc9	Pr9	Pc10	Pr10	Savanes	Forêt	Cultures	Habitat
T10-50	-0.1272	-0.2525	0.1444	0.0336	0.1470	0.0222	0.1264	-0.0932	0.1521	0.0067	-0.0762	0.0298	0.0577	-0.0397
T10-100	0.1026	-0.1183	0.4191	0.2427	0.4032	0.2838	0.3384	0.0462	0.3117	-0.0268	0.1465	0.4743	-0.3171	-0.2150
X1	-0.2494	0.0580	-0.3443	0.0328	-0.4645	-0.1687	-0.4717	-0.0461	-0.4543	-0.0546	-0.2464	-0.2757	0.3196	0.2612
X2	0.0559	0.1155	0.1634	0.2894	0.0340	0.1420	-0.0168	0.0856	-0.0596	-0.1271	0.1866	0.3320	-0.3074	0.0172
X5	-0.0587	0.2359	-0.1447	0.2228	-0.3000	-0.0089	-0.3302	0.0213	-0.3222	0.0007	-0.3551	-0.1690	0.3582	0.4804
X6	0.0653	0.1465	0.1044	0.2224	-0.0101	0.0196	-0.0464	-0.1029	-0.0227	-0.0408	-0.3273	-0.1606	0.3340	0.4188
X3	0.0537	-0.1906	0.2861	-0.0136	0.3180	-0.0406	0.3289	-0.1775	0.3753	0.0675	-0.3250	-0.2001	0.3548	0.3117
X4	-0.2192	0.0812	-0.2801	0.1555	-0.4089	0.0528	-0.4629	0.0994	-0.4857	-0.0897	0.1523	0.1593	-0.1979	-0.0825
X7	0.1815	-0.0197	0.2485	-0.0620	0.3123	-0.0737	0.3443	-0.1562	0.3655	-0.0488	-0.1333	-0.1192	0.1685	0.0075
Superficie	0.0725	0.0539	0.1335	0.1425	0.0780	0.0932	0.0697	0.1173	0.0474	0.0873	0.0630	0.6558	-0.3276	-0.0821
Pluie Annuelle	0.6244	-0.0020	0.7647	-0.0399	0.9085	0.0178	0.9594	-0.2133	0.9895	0.0604	0.0940	-0.0069	-0.0738	-0.1093
Lame Annuelle	0.5526	-0.0067	0.7118	0.0097	0.8187	0.0479	0.8473	-0.2001	0.8849	0.0988	0.0792	0.0016	-0.0694	-0.0221
Coeff Ec.	0.5188	0.0100	0.6571	0.0106	0.7561	0.0548	0.7810	-0.1861	0.8209	0.1367	0.0522	0.0204	-0.0554	0.0136
Pc6	1	0.7683	0.8355	0.5098	0.7014	0.3077	0.6664	0.0781	0.6447	0.2258	0.1333	0.0837	-0.1627	0.1492
Pr6	0.7683	1	0.4425	0.6865	0.1549	0.3591	0.0784	0.2598	0.0346	0.2703	0.0628	0.0942	-0.1142	0.3091
Pc7	0.8355	0.4425	1	0.6013	0.8907	0.4731	0.8156	0.1069	0.7826	0.2111	0.1581	0.1093	-0.1920	0.0921
Pr7	0.5098	0.6865	0.6013	1	0.2568	0.7129	0.0831	0.4255	-0.0007	0.2577	0.0787	0.1596	-0.1572	0.3293
Pc8	0.7014	0.1549	0.8907	0.2568	1	0.4281	0.9642	0.1204	0.9273	0.2387	0.1355	0.0705	-0.1458	-0.0677
Pr8	0.3077	0.3591	0.4731	0.7129	0.4281	1	0.2391	0.7674	0.0858	0.4517	0.0976	0.1738	-0.1661	0.1013
Pc9	0.6664	0.0784	0.8156	0.0831	0.9642	0.2391	1	0.0677	0.9763	0.2328	0.1186	0.0318	-0.1138	-0.0787
Pr9	0.0781	0.2598	0.1069	0.4255	0.1204	0.7674	0.0677	1	-0.1207	0.5826	0.0574	0.1253	-0.1119	0.1321
Pc10	0.6447	0.0346	0.7826	-0.0007	0.9273	0.0858	0.9763	-0.1207	1	0.2020	0.0799	-0.0259	-0.0552	-0.0749
Pr10	0.2258	0.2703	0.2111	0.2577	0.2387	0.4517	0.2328	0.5826	0.2020	1	-0.0948	-0.1389	0.1290	0.2349
Savanes	0.1333	0.0628	0.1581	0.0787	0.1355	0.0976	0.1186	0.0574	0.0799	-0.0948	1	0.1467	-0.9121	-0.6468
Forêt	0.0837	0.0942	0.1093	0.1596	0.0705	0.1738	0.0318	0.1253	-0.0259	-0.1389	0.1467	1	-0.5370	-0.2493
Cultures	-0.1627	-0.1142	-0.1920	-0.1572	-0.1458	-0.1661	-0.1138	-0.1119	-0.0552	0.1290	-0.9121	-0.5370	1	0.6200
Habitat	0.1492	0.3091	0.0921	0.3293	-0.0677	0.1013	-0.0787	0.1321	-0.0749	0.2349	-0.6468	-0.2493	0.6200	1
Compacité	0.1639	0.2293	0.1120	0.1804	0.0098	0.0406	-0.0177	-0.0141	-0.0129	0.0328	0.2492	0.4539	-0.4002	-0.1976
Eaug an	0.3756	-0.1315	0.5481	-0.1018	0.6757	-0.0729	0.7405	-0.2271	0.7765	0.0104	0.0401	-0.0795	-0.0013	-0.0150
Lc6	0.3810	0.3461	0.2970	0.2296	0.2196	0.0974	0.2356	0.0914	0.2418	0.2572	-0.5160	-0.2453	0.5193	0.7147
Lr6	0.2552	0.3849	0.1525	0.3155	0.0162	0.1146	0.0230	0.1714	0.0169	0.2555	-0.6173	-0.2656	0.6091	0.8629
Lc7	0.4445	0.3185	0.4313	0.2675	0.3709	0.1561	0.3772	0.0943	0.3852	0.3146	-0.5067	-0.2969	0.5341	0.6921
Lr7	0.2683	0.3576	0.2268	0.3688	0.0989	0.1836	0.0893	0.1892	0.0851	0.3191	-0.6323	-0.3359	0.6514	0.8726
Lc8	0.4609	0.0334	0.6579	0.1522	0.7252	0.2047	0.7091	-0.0518	0.7276	0.2122	-0.2274	-0.2229	0.2792	0.2844
Lr8	0.2055	0.0668	0.3709	0.2847	0.3657	0.3190	0.3055	0.0988	0.3009	0.2183	-0.4940	-0.3860	0.5713	0.5112
Lc9	0.5260	-0.0186	0.7153	0.0424	0.8210	0.0978	0.8500	-0.1233	0.8723	0.1393	-0.0163	-0.0957	0.0517	0.0566
Lr9	0.1315	-0.0706	0.2963	0.1097	0.3610	0.2505	0.3606	0.1842	0.3171	0.1200	-0.3547	-0.3649	0.4540	0.2545
Lc10	0.5291	-0.0280	0.7026	0.0063	0.8193	0.0665	0.8522	-0.1615	0.8847	0.1386	0.0504	-0.0146	-0.0382	-0.0003
Lr10	-0.4169	-0.1950	-0.2893	0.0949	-0.2685	0.2905	-0.2753	0.5171	-0.3572	0.3010	-0.2615	-0.1948	0.3027	0.1936
Egr6	0.3246	0.4502	0.1924	0.3046	0.0276	0.0542	-0.0023	-0.0234	0.0117	0.0683	-0.3708	-0.2507	0.4017	0.5584
Egr7	0.1440	0.2124	0.2596	0.4188	0.0919	0.2095	0.0254	0.0584	0.0222	0.0735	-0.4052	-0.2488	0.4314	0.5591
Egr8	0.1582	0.1178	0.3449	0.4018	0.2768	0.4066	0.1688	0.1542	0.1332	0.0774	-0.3014	-0.1682	0.3151	0.3913
Egr9	-0.0486	0.0742	0.1225	0.4356	0.0772	0.6343	-0.0076	0.6869	-0.1780	0.0561	-0.0820	0.1261	0.0065	0.2141
Egr10	-0.1350	0.1212	-0.0439	0.3887	-0.0912	0.6005	-0.1584	0.7603	-0.2608	0.6751	-0.0950	0.0209	0.0601	0.2586
Ir6	0.1931	-0.0885	0.3700	0.0032	0.3976	-0.0555	0.4224	-0.1941	0.4665	0.0558	-0.2847	-0.2169	0.3261	0.3087
Ir7	0.2063	-0.1045	0.4072	0.0162	0.4427	-0.0300	0.4703	-0.1705	0.5071	0.0622	-0.2505	-0.2066	0.2929	0.2817
Ir8	0.2594	-0.1194	0.4656	-0.0041	0.5454	0.0185	0.5715	-0.1499	0.5974	0.0555	-0.1448	-0.1409	0.1778	0.1703
Ir9	0.3096	-0.1220	0.4932	-0.0514	0.6027	-0.0014	0.6528	-0.1378	0.6687	0.0324	-0.0051	-0.0577	0.0258	0.0496
Ir10	0.3216	-0.1407	0.4827	-0.1188	0.5979	-0.1059	0.6600	-0.2639	0.7097	0.0243	0.0092	-0.0747	0.0222	0.0169

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Compacité	Eaug an	Lc6	Lr6	Lc7	Lr7	Lc8	Lr8	Lc9	Lr9	Lc10	Lr10	Egr6	Egr7
T10-50	0.0457	0.1876	0.0294	-0.0063	0.0922	0.0395	0.2318	0.1865	0.1687	0.1529	0.1316	0.0227	0.1379	0.3499
T10-100	0.2863	0.2874	-0.0590	-0.1824	0.0027	-0.1589	0.2577	0.0418	0.3029	-0.0027	0.3244	-0.1367	-0.0337	0.1651
X1	-0.0496	-0.2578	-0.0297	0.2530	-0.0505	0.2780	-0.2445	0.0039	-0.3324	-0.0156	-0.3762	0.1753	-0.0189	0.0103
X2	0.2963	0.2167	-0.1591	-0.1449	-0.0900	-0.0748	0.0260	-0.1345	0.0236	-0.3066	0.0313	-0.1773	0.1650	0.2659
X5	-0.0360	-0.1718	0.0452	0.3144	0.0714	0.4192	-0.1634	0.0324	-0.2189	-0.1007	-0.2313	0.0575	0.1670	0.2199
X6	-0.0416	0.0817	0.1084	0.2956	0.1933	0.4310	0.1192	0.2091	0.0806	0.0554	0.0690	-0.0661	0.1910	0.3082
X3	-0.0882	0.5188	0.4855	0.3541	0.5762	0.3838	0.6917	0.5733	0.5140	0.4010	0.4390	-0.0164	0.5583	0.6827
X4	0.0336	-0.3720	-0.2681	-0.1252	-0.3758	-0.1938	-0.5207	-0.4690	-0.4583	-0.3406	-0.4232	0.2229	-0.5250	-0.5420
X7	0.0724	0.5289	0.2099	0.1294	0.3310	0.2076	0.5627	0.4468	0.4785	0.2072	0.4439	-0.2364	0.4022	0.4596
Superficie	0.4300	0.0140	-0.0976	-0.1005	-0.1000	-0.1369	-0.0448	-0.2215	0.0233	-0.3483	0.1010	-0.2419	-0.1601	-0.1233
Pluie Annuelle	-0.0204	0.7910	0.2099	-0.0176	0.3471	0.0430	0.7103	0.2749	0.8687	0.3009	0.8815	-0.4124	0.0015	0.0104
Lame Annuelle	-0.0759	0.8113	0.3104	0.0804	0.4424	0.1305	0.8139	0.3266	0.9678	0.2590	0.9947	-0.4176	0.0193	0.0550
Coeff Ec.	-0.0689	0.7669	0.3543	0.1361	0.4658	0.1683	0.7982	0.3443	0.9425	0.2681	0.9776	-0.4024	0.0280	0.0467
Pc6	0.1639	0.3756	0.3810	0.2552	0.4445	0.2683	0.4609	0.2055	0.5260	0.1315	0.5291	-0.4169	0.3246	0.1440
Pr6	0.2293	-0.1315	0.3461	0.3849	0.3185	0.3576	0.0334	0.0668	-0.0186	-0.0706	-0.0280	-0.1950	0.4502	0.2124
Pc7	0.1120	0.5481	0.2970	0.1525	0.4313	0.2268	0.6579	0.3709	0.7153	0.2963	0.7026	-0.2893	0.1924	0.2596
Pr7	0.1804	-0.1018	0.2296	0.3155	0.2675	0.3688	0.1522	0.2847	0.0424	0.1097	0.0063	0.0949	0.3046	0.4188
Pc8	0.0098	0.6757	0.2196	0.0162	0.3709	0.0989	0.7252	0.3657	0.8210	0.3610	0.8193	-0.2685	0.0276	0.0919
Pr8	0.0406	-0.0729	0.0974	0.1146	0.1561	0.1836	0.2047	0.3190	0.0978	0.2505	0.0665	0.2905	0.0542	0.2095
Pc9	-0.0177	0.7405	0.2356	0.0230	0.3772	0.0893	0.7091	0.3055	0.8500	0.3606	0.8522	-0.2753	-0.0023	0.0254
Pr9	-0.0141	-0.2271	0.0914	0.1714	0.0943	0.1892	-0.0518	0.0988	-0.1233	0.1842	-0.1615	0.5171	-0.0234	0.0584
Pc10	-0.0129	0.7765	0.2418	0.0169	0.3852	0.0851	0.7276	0.3009	0.8723	0.3171	0.8847	-0.3572	0.0117	0.0222
Pr10	0.0328	0.0104	0.2572	0.2555	0.3146	0.3191	0.2122	0.2183	0.1393	0.1200	0.1386	0.3010	0.0683	0.0735
Savanes	0.2492	0.0401	-0.5160	-0.6173	-0.5067	-0.6323	-0.2274	-0.4940	-0.0163	-0.3547	0.0504	-0.2615	-0.3708	-0.4052
Forêt	0.4539	-0.0795	-0.2453	-0.2656	-0.2969	-0.3359	-0.2229	-0.3860	-0.0957	-0.3649	-0.0146	-0.1948	-0.2507	-0.2488
Cultures	-0.4002	-0.0013	0.5193	0.6091	0.5341	0.6514	0.2792	0.5713	0.0517	0.4540	-0.0382	0.3027	0.4017	0.4314
Habitat	-0.1976	-0.0150	0.7147	0.8629	0.6921	0.8726	0.2844	0.5112	0.0566	0.2545	-0.0003	0.1936	0.5584	0.5591
Compacité	1	-0.1155	-0.1528	-0.1516	-0.1658	-0.1733	-0.2059	-0.3174	-0.1536	-0.4377	-0.0856	-0.2355	0.0435	-0.0307
Eaug an	-0.1155	1	0.2211	0.0248	0.3404	0.0773	0.7330	0.3354	0.8383	0.3243	0.8255	-0.2244	0.0545	0.1175
Lc6	-0.1528	0.2211	1	0.8948	0.9461	0.7784	0.6004	0.5599	0.3970	0.3680	0.3317	0.0235	0.6184	0.4950
Lr6	-0.1516	0.0248	0.8948	1	0.8385	0.9317	0.4034	0.5772	0.1718	0.3567	0.1023	0.1357	0.5747	0.5170
Lc7	-0.1658	0.3404	0.9461	0.8385	1	0.8253	0.7612	0.6793	0.5418	0.4490	0.4659	0.0030	0.6464	0.5837
Lr7	-0.1733	0.0773	0.7784	0.9317	0.8253	1	0.4739	0.6971	0.2295	0.4124	0.1534	0.1526	0.5828	0.6094
Lc8	-0.2059	0.7330	0.6004	0.4034	0.7612	0.4739	1	0.7172	0.8886	0.5139	0.8342	-0.1424	0.3901	0.4701
Lr8	-0.3174	0.3354	0.5599	0.5772	0.6793	0.6971	0.7172	1	0.4550	0.7166	0.3577	0.1666	0.5462	0.6984
Lc9	-0.1536	0.8383	0.3970	0.1718	0.5418	0.2295	0.8886	0.4550	1	0.4513	0.9808	-0.2534	0.1159	0.1771
Lr9	-0.4377	0.3243	0.3680	0.3567	0.4490	0.4124	0.5139	0.7166	0.4513	1	0.3143	0.4233	0.2590	0.3849
Lc10	-0.0856	0.8255	0.3317	0.1023	0.4659	0.1534	0.8342	0.3577	0.9808	0.3143	1	-0.3366	0.0260	0.0724
Lr10	-0.2355	-0.2244	0.0235	0.1357	0.0030	0.1526	-0.1424	0.1666	-0.2534	0.4233	-0.3366	1	-0.0512	0.1190
Egr6	0.0435	0.0545	0.6184	0.5747	0.6464	0.5828	0.3901	0.5462	0.1159	0.2590	0.0260	-0.0512	1	0.8721
Egr7	-0.0307	0.1175	0.4950	0.5170	0.5837	0.6094	0.4701	0.6984	0.1771	0.3849	0.0724	0.1190	0.8721	1
Egr8	-0.0681	0.2572	0.3823	0.3528	0.5045	0.4746	0.5757	0.7653	0.3027	0.4516	0.2074	0.1109	0.7342	0.9083
Egr9	-0.0543	-0.0380	0.1700	0.2300	0.1915	0.2530	0.1361	0.3504	-0.0077	0.3769	-0.0924	0.4493	0.2620	0.4315
Egr10	-0.0311	-0.2366	0.1260	0.2261	0.1209	0.2471	-0.0743	0.1078	-0.1894	0.1657	-0.2233	0.6715	-0.0770	0.0374
Ir6	-0.0850	0.6655	0.5113	0.3589	0.6188	0.3983	0.7656	0.5975	0.6101	0.4273	0.5326	-0.0783	0.6032	0.6822
Ir7	-0.1001	0.7463	0.4726	0.3212	0.5936	0.3744	0.7920	0.6034	0.6600	0.4520	0.5838	-0.0590	0.5425	0.6466
Ir8	-0.1197	0.8878	0.3685	0.1994	0.4956	0.2603	0.8010	0.5511	0.7365	0.4379	0.6790	-0.0839	0.3700	0.4755
Ir9	-0.1091	0.9664	0.2750	0.0931	0.3791	0.1319	0.7299	0.3945	0.7873	0.3822	0.7588	-0.1268	0.1345	0.2084
Ir10	-0.0961	0.9814	0.2491	0.0569	0.3518	0.0956	0.7171	0.3396	0.8079	0.3097	0.8018	-0.2104	0.0752	0.1264

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Egr8	Egr9	Egr10	Ir6	Ir7	Ir8	Ir9	Ir10
T10-50	0.3017	0.1163	0.0433	0.5389	0.4719	0.3527	0.2322	0.2019
T10-100	0.2648	0.2855	0.0816	0.3781	0.3627	0.3553	0.3499	0.3073
X1	-0.1118	-0.0732	0.1118	-0.1756	-0.1748	-0.2088	-0.2367	-0.2436
X2	0.3216	0.3220	0.0084	0.2184	0.2589	0.2947	0.2695	0.2118
X5	0.0792	0.0399	0.0961	-0.0468	-0.0516	-0.1023	-0.1396	-0.1430
X6	0.2127	0.0648	-0.0049	0.2437	0.2303	0.1708	0.1344	0.1274
X3	0.6504	0.1858	-0.0598	0.9620	0.9210	0.7911	0.6008	0.5578
X4	-0.5823	-0.0519	0.3645	-0.6164	-0.6040	-0.5222	-0.3573	-0.3410
X7	0.5429	0.1718	-0.2583	0.6741	0.6912	0.6694	0.5792	0.5413
Superficie	-0.0889	0.0515	0.0650	-0.1030	-0.0777	-0.0388	0.0082	0.0108
Pluie Annuelle	0.1219	-0.1984	-0.3694	0.4665	0.5067	0.6001	0.6765	0.7205
Lame Annuelle	0.1865	-0.1307	-0.2781	0.5056	0.5536	0.6500	0.7326	0.7833
Coeff Ec.	0.1783	-0.1125	-0.2203	0.5064	0.5496	0.6382	0.7240	0.7738
Pc6	0.1582	-0.0486	-0.1350	0.1931	0.2063	0.2594	0.3096	0.3216
Pr6	0.1178	0.0742	0.1212	-0.0885	-0.1045	-0.1194	-0.1220	-0.1407
Pc7	0.3449	0.1225	-0.0439	0.3700	0.4072	0.4656	0.4932	0.4827
Pr7	0.4018	0.4356	0.3887	0.0032	0.0162	-0.0041	-0.0514	-0.1188
Pc8	0.2768	0.0772	-0.0912	0.3976	0.4427	0.5454	0.6027	0.5979
Pr8	0.4066	0.6343	0.6005	-0.0555	-0.0300	0.0185	-0.0014	-0.1059
Pc9	0.1688	-0.0076	-0.1584	0.4224	0.4703	0.5715	0.6528	0.6600
Pr9	0.1542	0.6869	0.7603	-0.1941	-0.1705	-0.1499	-0.1378	-0.2639
Pc10	0.1332	-0.1780	-0.2608	0.4665	0.5071	0.5974	0.6687	0.7097
Pr10	0.0774	0.0561	0.6751	0.0558	0.0622	0.0555	0.0324	0.0243
Savanes	-0.3014	-0.0820	-0.0950	-0.2847	-0.2505	-0.1448	-0.0051	0.0092
Forêt	-0.1682	0.1261	0.0209	-0.2169	-0.2066	-0.1409	-0.0577	-0.0747
Cultures	0.3151	0.0065	0.0601	0.3261	0.2929	0.1778	0.0258	0.0222
Habitat	0.3913	0.2141	0.2586	0.3087	0.2817	0.1703	0.0496	0.0169
Compacité	-0.0681	-0.0543	-0.0311	-0.0850	-0.1001	-0.1197	-0.1091	-0.0961
Eaug an	0.2572	-0.0380	-0.2366	0.6655	0.7463	0.8878	0.9664	0.9814
Lc6	0.3823	0.1700	0.1260	0.5113	0.4726	0.3685	0.2750	0.2491
Lr6	0.3528	0.2300	0.2261	0.3589	0.3212	0.1994	0.0931	0.0569
Lc7	0.5045	0.1915	0.1209	0.6188	0.5936	0.4956	0.3791	0.3518
Lr7	0.4746	0.2530	0.2471	0.3983	0.3744	0.2603	0.1319	0.0956
Lc8	0.5757	0.1361	-0.0743	0.7656	0.7920	0.8010	0.7299	0.7171
Lr8	0.7653	0.3504	0.1078	0.5975	0.6034	0.5511	0.3945	0.3396
Lc9	0.3027	-0.0077	-0.1894	0.6101	0.6600	0.7365	0.7873	0.8079
Lr9	0.4516	0.3769	0.1657	0.4273	0.4520	0.4379	0.3822	0.3097
Lc10	0.2074	-0.0924	-0.2233	0.5326	0.5838	0.6790	0.7588	0.8018
Lr10	0.1109	0.4493	0.6715	-0.0783	-0.0590	-0.0839	-0.1268	-0.2104
Egr6	0.7342	0.2620	-0.0770	0.6032	0.5425	0.3700	0.1345	0.0752
Egr7	0.9083	0.4315	0.0374	0.6822	0.6466	0.4755	0.2084	0.1264
Egr8	1	0.5713	0.0668	0.6755	0.6714	0.5876	0.3606	0.2599
Egr9	0.5713	1	0.5060	0.1783	0.1968	0.1838	0.1265	-0.0415
Egr10	0.0668	0.5060	1	-0.1247	-0.1126	-0.1158	-0.1143	-0.1921
Ir6	0.6755	0.1783	-0.1247	1	0.9872	0.9032	0.7408	0.6984
Ir7	0.6714	0.1968	-0.1126	0.9872	1	0.9537	0.8177	0.7735
Ir8	0.5876	0.1838	-0.1158	0.9032	0.9537	1	0.9420	0.9056
Ir9	0.3606	0.1265	-0.1143	0.7408	0.8177	0.9420	1	0.9807
Ir10	0.2599	-0.0415	-0.1921	0.6984	0.7735	0.9056	0.9807	1

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Superficie	Pluie Annuelle	Lame Annuelle	Coeff Ec.	Eaug an	Pc6	Pr6	Pc7	Pr7	Pc8	Pr8	Pc9	Pr9
Superficie	1	0.0313	0.1119	0.1196	0.1943	0.0725	0.0539	0.1335	0.1425	0.0780	0.0932	0.0697	0.1173
Pluie Annuelle	0.0313	1	0.8881	0.8170	0.6787	0.6244	-0.0020	0.7647	-0.0399	0.9085	0.0178	0.9594	-0.2133
Lame Annuelle	0.1119	0.8881	1	0.9776	0.7670	0.5526	-0.0067	0.7118	0.0097	0.8187	0.0479	0.8473	-0.2001
Coeff Ec.	0.1196	0.8170	0.9776	1	0.7367	0.5188	0.0100	0.6571	0.0106	0.7561	0.0548	0.7810	-0.1861
Eaug an	0.1943	0.6787	0.7670	0.7367	1	0.5535	0.1336	0.6400	0.1406	0.6802	0.1593	0.6577	-0.1162
Pc6	0.0725	0.6244	0.5526	0.5188	0.5535	1	0.7683	0.8355	0.5098	0.7014	0.3077	0.6664	0.0781
Pr6	0.0539	-0.0020	-0.0067	0.0100	0.1336	0.7683	1	0.4425	0.6865	0.1549	0.3591	0.0784	0.2598
Pc7	0.1335	0.7647	0.7118	0.6571	0.6400	0.8355	0.4425	1	0.6013	0.8907	0.4731	0.8156	0.1069
Pr7	0.1425	-0.0399	0.0097	0.0106	0.1406	0.5098	0.6865	0.6013	1	0.2568	0.7129	0.0831	0.4255
Pc8	0.0780	0.9085	0.8187	0.7561	0.6802	0.7014	0.1549	0.8907	0.2568	1	0.4281	0.9642	0.1204
Pr8	0.0932	0.0178	0.0479	0.0548	0.1593	0.3077	0.3591	0.4731	0.7129	0.4281	1	0.2391	0.7674
Pc9	0.0697	0.9594	0.8473	0.7810	0.6577	0.6664	0.0784	0.8156	0.0831	0.9642	0.2391	1	0.0677
Pr9	0.1173	-0.2133	-0.2001	-0.1861	-0.1162	0.0781	0.2598	0.1069	0.4255	0.1204	0.7674	0.0677	1
Pc10	0.0474	0.9895	0.8849	0.8209	0.6652	0.6447	0.0346	0.7826	-0.0007	0.9273	0.0858	0.9763	-0.1207
Pr10	0.0873	0.0604	0.0988	0.1367	0.0064	0.2258	0.2703	0.2111	0.2577	0.2387	0.4517	0.2328	0.5826
Lc6	-0.0976	0.2099	0.3104	0.3543	-0.0633	0.3810	0.3461	0.2970	0.2296	0.2196	0.0974	0.2356	0.0914
Lr6	-0.1005	-0.0176	0.0804	0.1361	-0.2109	0.2552	0.3849	0.1525	0.3155	0.0162	0.1146	0.0230	0.1714
Lc7	-0.1000	0.3471	0.4424	0.4658	0.0093	0.4445	0.3185	0.4313	0.2675	0.3709	0.1561	0.3772	0.0943
Lr7	-0.1369	0.0430	0.1305	0.1683	-0.1785	0.2683	0.3576	0.2268	0.3688	0.0989	0.1836	0.0893	0.1892
Lc8	-0.0448	0.7103	0.8139	0.7982	0.3607	0.4609	0.0334	0.6579	0.1522	0.7252	0.2047	0.7091	-0.0518
Lr8	-0.2215	0.2749	0.3266	0.3443	-0.0865	0.2055	0.0668	0.3709	0.2847	0.3657	0.3190	0.3055	0.0988
Lc9	0.0233	0.8687	0.9678	0.9425	0.6632	0.5260	-0.0186	0.7153	0.0424	0.8210	0.0978	0.8500	-0.1233
Lr9	-0.3483	0.3009	0.2590	0.2681	-0.0124	0.1315	-0.0706	0.2963	0.1097	0.3610	0.2505	0.3606	0.1842
Lc10	0.1010	0.8815	0.9947	0.9776	0.7391	0.5291	-0.0280	0.7026	0.0063	0.8193	0.0665	0.8522	-0.1615
Lr10	-0.2419	-0.4124	-0.4176	-0.4024	-0.4391	-0.4169	-0.1950	-0.2893	0.0949	-0.2685	0.2905	-0.2753	0.5171
Egr6	-0.0496	0.1531	0.1310	0.1428	0.2200	0.7256	0.8050	0.4793	0.5233	0.2440	0.2093	0.1795	0.0380
Egr7	0.0007	0.1158	0.1656	0.1631	0.2666	0.5288	0.5885	0.6281	0.8563	0.3387	0.5675	0.1938	0.2555
Egr8	-0.0005	0.2044	0.2629	0.2715	0.3860	0.3591	0.2768	0.5844	0.6678	0.5453	0.8850	0.3536	0.5075
Egr9	0.1367	-0.2788	-0.2138	-0.1929	-0.0380	-0.0296	0.1585	0.0287	0.3723	0.0498	0.7356	-0.0233	0.9269
Egr10	0.1401	-0.0943	0.0300	0.0867	0.0086	0.0635	0.1886	0.1045	0.2824	0.1125	0.4914	0.0882	0.6505
Egc6	0.0442	0.4294	0.4086	0.3692	0.6350	0.7689	0.5774	0.6955	0.4830	0.5392	0.3097	0.4578	0.0331
Egc7	0.1420	0.5107	0.5614	0.5214	0.7883	0.6988	0.4213	0.7953	0.5452	0.6562	0.4269	0.5562	0.0918
Egc8	0.1858	0.6048	0.6920	0.6603	0.9314	0.6087	0.2426	0.7373	0.3609	0.7379	0.4394	0.6458	0.0883
Egc9	0.2356	0.6328	0.7259	0.7046	0.9738	0.5696	0.1823	0.6717	0.2338	0.7084	0.3193	0.6693	0.0758
Egc10	0.2171	0.6699	0.7668	0.7431	0.9957	0.5602	0.1480	0.6528	0.1674	0.6915	0.2032	0.6649	-0.0641
Ir6	0.0342	0.3999	0.4087	0.3886	0.6713	0.7413	0.5810	0.6476	0.4574	0.4883	0.2611	0.4125	-0.0152
Ir7	0.1398	0.4688	0.5591	0.5447	0.8296	0.6480	0.4037	0.7460	0.5382	0.6010	0.4000	0.4982	0.0458
Ir8	0.1804	0.5287	0.6497	0.6484	0.9332	0.5257	0.2062	0.6516	0.3331	0.6524	0.4120	0.5612	0.0680
Ir9	0.2309	0.5270	0.6482	0.6607	0.9492	0.4860	0.1656	0.5734	0.2175	0.6015	0.2998	0.5568	0.0607
Ir10	0.2085	0.5703	0.6945	0.7049	0.9708	0.4825	0.1342	0.5554	0.1441	0.5818	0.1619	0.5517	-0.1055
T10	0.4709	0.3619	0.4535	0.4508	0.5940	0.3571	0.1235	0.5708	0.4013	0.5193	0.4511	0.4409	0.2358
T50	0.3415	0.5163	0.6149	0.6006	0.6992	0.4253	0.0921	0.6519	0.3207	0.6419	0.3929	0.5718	0.1287
X1	-0.2445	0.2245	0.0600	-0.0162	-0.4393	-0.0791	-0.2673	0.0047	-0.2591	0.1226	-0.1923	0.1957	-0.1046
X2	0.3141	0.5359	0.6337	0.6182	0.7067	0.4318	0.0866	0.6558	0.3006	0.6530	0.3743	0.5859	0.1057
X3	-0.2377	-0.0571	-0.0692	-0.0631	-0.0878	-0.0666	0.0076	-0.2413	-0.3004	-0.1880	-0.3448	-0.1560	-0.3456
Savanes	0.0630	0.0940	0.0792	0.0522	0.3757	0.1333	0.0628	0.1581	0.0787	0.1355	0.0976	0.1186	0.0574
Forêt	0.6558	-0.0069	0.0016	0.0204	0.2048	0.0837	0.0942	0.1093	0.1596	0.0705	0.1738	0.0318	0.1253
Cultures	-0.3276	-0.0738	-0.0694	-0.0554	-0.4061	-0.1627	-0.1142	-0.1920	-0.1572	-0.1458	-0.1661	-0.1138	-0.1119
Habitat	-0.0821	-0.1093	-0.0221	0.0136	-0.2303	0.1492	0.3091	0.0921	0.3293	-0.0677	0.1013	-0.0787	0.1321
Compacité	0.4300	-0.0204	-0.0759	-0.0689	0.0558	0.1639	0.2293	0.1120	0.1804	0.0098	0.0406	-0.0177	-0.0141

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Pc10	Pr10	Lc6	Lr6	Lc7	Lr7	Lc8	Lr8	Lc9	Lr9	Lc10	Lr10	Egr6	Egr7
Superficie	0.0474	0.0873	-0.0976	-0.1005	-0.1000	-0.1369	-0.0448	-0.2215	0.0233	-0.3483	0.1010	-0.2419	-0.0496	0.0007
Pluie Annuelle	0.9895	0.0604	0.2099	-0.0176	0.3471	0.0430	0.7103	0.2749	0.8687	0.3009	0.8815	-0.4124	0.1531	0.1158
Lame Annuelle	0.8849	0.0988	0.3104	0.0804	0.4424	0.1305	0.8139	0.3266	0.9678	0.2590	0.9947	-0.4176	0.1310	0.1656
Coeff Ec.	0.8209	0.1367	0.3543	0.1361	0.4658	0.1683	0.7982	0.3443	0.9425	0.2681	0.9776	-0.4024	0.1428	0.1631
Eaug an	0.6652	0.0064	-0.0633	-0.2109	0.0093	-0.1785	0.3607	-0.0865	0.6632	-0.0124	0.7391	-0.4391	0.2200	0.2666
Pc6	0.6447	0.2258	0.3810	0.2552	0.4445	0.2683	0.4609	0.2055	0.5260	0.1315	0.5291	-0.4169	0.7256	0.5288
Pr6	0.0346	0.2703	0.3461	0.3849	0.3185	0.3576	0.0334	0.0668	-0.0186	-0.0706	-0.0280	-0.1950	0.8050	0.5885
Pc7	0.7826	0.2111	0.2970	0.1525	0.4313	0.2268	0.6579	0.3709	0.7153	0.2963	0.7026	-0.2893	0.4793	0.6281
Pr7	-0.0007	0.2577	0.2296	0.3155	0.2675	0.3688	0.1522	0.2847	0.0424	0.1097	0.0063	0.0949	0.5233	0.8563
Pc8	0.9273	0.2387	0.2196	0.0162	0.3709	0.0989	0.7252	0.3657	0.8210	0.3610	0.8193	-0.2685	0.2440	0.3387
Pr8	0.0858	0.4517	0.0974	0.1146	0.1561	0.1836	0.2047	0.3190	0.0978	0.2505	0.0665	0.2905	0.2093	0.5675
Pc9	0.9763	0.2328	0.2356	0.0230	0.3772	0.0893	0.7091	0.3055	0.8500	0.3606	0.8522	-0.2753	0.1795	0.1938
Pr9	-0.1207	0.5826	0.0914	0.1714	0.0943	0.1892	-0.0518	0.0988	-0.1233	0.1842	-0.1615	0.5171	0.0380	0.2555
Pc10	1	0.2020	0.2418	0.0169	0.3852	0.0851	0.7276	0.3009	0.8723	0.3171	0.8847	-0.3572	0.1714	0.1415
Pr10	0.2020	1	0.2572	0.2555	0.3146	0.3191	0.2122	0.2183	0.1393	0.1200	0.1386	0.3010	0.1366	0.1812
Lc6	0.2418	0.2572	1	0.8948	0.9461	0.7784	0.6004	0.5599	0.3970	0.3680	0.3317	0.0235	0.3001	0.1889
Lr6	0.0169	0.2555	0.8948	1	0.8385	0.9317	0.4034	0.5772	0.1718	0.3567	0.1023	0.1357	0.2979	0.3051
Lc7	0.3852	0.3146	0.9461	0.8385	1	0.8253	0.7612	0.6793	0.5418	0.4490	0.4659	0.0030	0.3230	0.2782
Lr7	0.0851	0.3191	0.7784	0.9317	0.8253	1	0.4739	0.6971	0.2295	0.4124	0.1534	0.1526	0.3154	0.4398
Lc8	0.7276	0.2122	0.6004	0.4034	0.7612	0.4739	1	0.7172	0.8886	0.5139	0.8342	-0.1424	0.1202	0.2284
Lr8	0.3009	0.2183	0.5599	0.5772	0.6793	0.6971	0.7172	1	0.4550	0.7166	0.3577	0.1666	0.0532	0.3104
Lc9	0.8723	0.1393	0.3970	0.1718	0.5418	0.2295	0.8886	0.4550	1	0.4513	0.9808	-0.2534	0.1256	0.1813
Lr9	0.3171	0.1200	0.3680	0.3567	0.4490	0.4124	0.5139	0.7166	0.4513	1	0.3143	0.4233	-0.0099	0.1126
Lc10	0.8847	0.1386	0.3317	0.1023	0.4659	0.1534	0.8342	0.3577	0.9808	0.3143	1	-0.3366	0.1120	0.1602
Lr10	-0.3572	0.3010	0.0235	0.1357	0.0030	0.1526	-0.1424	0.1666	-0.2534	0.4233	-0.3366	1	-0.2683	0.0073
Egr6	0.1714	0.1366	0.3001	0.2979	0.3230	0.3154	0.1202	0.0532	0.1256	-0.0099	0.1120	-0.2683	1	0.6462
Egr7	0.1415	0.1812	0.1889	0.3051	0.2782	0.4398	0.2284	0.3104	0.1813	0.1126	0.1602	0.0073	0.6462	1
Egr8	0.2381	0.2384	0.0269	0.0299	0.1195	0.1393	0.3020	0.3340	0.2790	0.2456	0.2707	0.1215	0.2720	0.7104
Egr9	-0.2203	0.3394	-0.0140	0.0609	-0.0324	0.0510	-0.1209	0.0155	-0.1606	0.1235	-0.1871	0.4574	-0.0472	0.2080
Egr10	0.0331	0.8807	0.1546	0.2040	0.2038	0.2517	0.1239	0.1506	0.0704	0.0980	0.0675	0.3601	0.0349	0.1892
Egc6	0.4330	0.0622	0.0644	0.0003	0.1193	0.0416	0.2039	-0.0143	0.3513	-0.0018	0.3686	-0.3980	0.7687	0.6106
Egc7	0.5182	0.0932	0.0031	-0.0822	0.1017	-0.0090	0.3335	0.0440	0.5000	0.0340	0.5304	-0.3403	0.5304	0.6663
Egc8	0.6083	0.0934	-0.0635	-0.1959	0.0292	-0.1386	0.3848	0.0048	0.6138	0.0392	0.6686	-0.3391	0.3112	0.4593
Egc9	0.6346	0.0937	-0.0734	-0.2097	0.0007	-0.1773	0.3446	-0.0813	0.6358	0.0203	0.7047	-0.3569	0.2355	0.3255
Egc10	0.6673	0.0744	-0.0604	-0.2056	0.0184	-0.1685	0.3695	-0.0755	0.6647	-0.0038	0.7421	-0.4128	0.2227	0.2829
Ir6	0.3964	0.0177	0.0535	-0.0001	0.0969	0.0298	0.1621	-0.0774	0.3391	-0.0455	0.3680	-0.4262	0.7905	0.5962
Ir7	0.4678	0.0378	-0.0186	-0.0849	0.0657	-0.0194	0.2889	-0.0036	0.4841	-0.0028	0.5292	-0.3464	0.5165	0.6728
Ir8	0.5286	0.0644	-0.0943	-0.2066	-0.0254	-0.1656	0.3089	-0.0520	0.5605	0.0070	0.6289	-0.3164	0.2714	0.4320
Ir9	0.5262	0.0647	-0.1107	-0.2191	-0.0646	-0.2071	0.2453	-0.1450	0.5473	-0.0216	0.6288	-0.3334	0.2101	0.3014
Ir10	0.5649	0.0461	-0.0953	-0.2137	-0.0426	-0.1952	0.2745	-0.1374	0.5793	-0.0515	0.6707	-0.4042	0.2058	0.2566
T10	0.3634	0.0208	-0.0977	-0.2026	-0.0508	-0.1893	0.1878	-0.1203	0.3601	-0.1432	0.4308	-0.2958	0.1741	0.3980
T50	0.5178	0.0439	-0.0849	-0.2288	-0.0028	-0.1951	0.3360	-0.0643	0.5343	-0.0630	0.5932	-0.3680	0.2257	0.4112
X1	0.2206	-0.0234	0.3556	0.2546	0.3917	0.2579	0.3749	0.4053	0.1695	0.2963	0.0864	0.1580	-0.1752	-0.2065
X2	0.5374	0.0473	-0.0794	-0.2282	0.0066	-0.1931	0.3564	-0.0553	0.5563	-0.0491	0.6125	-0.3769	0.2327	0.4059
X3	-0.0890	-0.1873	-0.0669	-0.0514	-0.0904	-0.0925	-0.0746	-0.1019	-0.0622	-0.0615	-0.0713	-0.1105	0.1094	-0.1473
Savanes	0.0799	-0.0948	-0.5160	-0.6173	-0.5067	-0.6323	-0.2274	-0.4940	-0.0163	-0.3547	0.0504	-0.2615	-0.0283	-0.0043
Forêt	-0.0259	-0.1389	-0.2453	-0.2656	-0.2969	-0.3359	-0.2229	-0.3860	-0.0957	-0.3649	-0.0146	-0.1948	0.0122	0.0471
Cultures	-0.0552	0.1290	0.5193	0.6091	0.5341	0.6514	0.2792	0.5713	0.0517	0.4540	-0.0382	0.3027	0.0025	-0.0370
Habitat	-0.0749	0.2349	0.7147	0.8629	0.6921	0.8726	0.2844	0.5112	0.0566	0.2545	-0.0003	0.1936	0.2939	0.3513
Compacité	-0.0129	0.0328	-0.1528	-0.1516	-0.1658	-0.1733	-0.2059	-0.3174	-0.1536	-0.4377	-0.0856	-0.2355	0.2879	0.2422

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Egr8	Egr9	Egr10	Egc6	Egc7	Egc8	Egc9	Egc10	Ir6	Ir7	Ir8	Ir9	Ir10	T10
Superficie	-0.0005	0.1367	0.1401	0.0442	0.1420	0.1858	0.2356	0.2171	0.0342	0.1398	0.1804	0.2309	0.2085	0.4709
Pluie Annuelle	0.2044	-0.2788	-0.0943	0.4294	0.5107	0.6048	0.6328	0.6699	0.3999	0.4688	0.5287	0.5270	0.5703	0.3619
Lame Annuelle	0.2629	-0.2138	0.0300	0.4086	0.5614	0.6920	0.7259	0.7668	0.4087	0.5591	0.6497	0.6482	0.6945	0.4535
Coeff Ec.	0.2715	-0.1929	0.0867	0.3692	0.5214	0.6603	0.7046	0.7431	0.3886	0.5447	0.6484	0.6607	0.7049	0.4508
Eaug an	0.3860	-0.0380	0.0086	0.6350	0.7883	0.9314	0.9738	0.9957	0.6713	0.8296	0.9332	0.9492	0.9708	0.5940
Pc6	0.3591	-0.0296	0.0635	0.7689	0.6988	0.6087	0.5696	0.5602	0.7413	0.6480	0.5257	0.4860	0.4825	0.3571
Pr6	0.2768	0.1585	0.1886	0.5774	0.4213	0.2426	0.1823	0.1480	0.5810	0.4037	0.2062	0.1656	0.1342	0.1235
Pc7	0.5844	0.0287	0.1045	0.6955	0.7953	0.7373	0.6717	0.6528	0.6476	0.7460	0.6516	0.5734	0.5554	0.5708
Pr7	0.6678	0.3723	0.2824	0.4830	0.5452	0.3609	0.2338	0.1674	0.4574	0.5382	0.3331	0.2175	0.1441	0.4013
Pc8	0.5453	0.0498	0.1125	0.5392	0.6562	0.7379	0.7084	0.6915	0.4883	0.6010	0.6524	0.6015	0.5818	0.5193
Pr8	0.8850	0.7356	0.4914	0.3097	0.4269	0.4394	0.3193	0.2032	0.2611	0.4000	0.4120	0.2998	0.1619	0.4511
Pc9	0.3536	-0.0233	0.0882	0.4578	0.5562	0.6458	0.6693	0.6649	0.4125	0.4982	0.5612	0.5568	0.5517	0.4409
Pr9	0.5075	0.9269	0.6505	0.0331	0.0918	0.0883	0.0758	-0.0641	-0.0152	0.0458	0.0680	0.0607	-0.1055	0.2358
Pc10	0.2381	-0.2203	0.0331	0.4330	0.5182	0.6083	0.6346	0.6673	0.3964	0.4678	0.5286	0.5262	0.5649	0.3634
Pr10	0.2384	0.3394	0.8807	0.0622	0.0932	0.0934	0.0937	0.0744	0.0177	0.0378	0.0644	0.0647	0.0461	0.0208
Lc6	0.0269	-0.0140	0.1546	0.0644	0.0031	-0.0635	-0.0734	-0.0604	0.0535	-0.0186	-0.0943	-0.1107	-0.0953	-0.0977
Lr6	0.0299	0.0609	0.2040	0.0003	-0.0822	-0.1959	-0.2097	-0.2056	-0.0001	-0.0849	-0.2066	-0.2191	-0.2137	-0.2026
Lc7	0.1195	-0.0324	0.2038	0.1193	0.1017	0.0292	0.0007	0.0184	0.0969	0.0657	-0.0254	-0.0646	-0.0426	-0.0508
Lr7	0.1393	0.0510	0.2517	0.0416	-0.0090	-0.1386	-0.1773	-0.1685	0.0298	-0.0194	-0.1656	-0.2071	-0.1952	-0.1893
Lc8	0.3020	-0.1209	0.1239	0.2039	0.3335	0.3848	0.3446	0.3695	0.1621	0.2889	0.3089	0.2453	0.2745	0.1878
Lr8	0.3340	0.0155	0.1506	-0.0143	0.0440	0.0048	-0.0813	-0.0755	-0.0774	-0.0036	-0.0520	-0.1450	-0.1374	-0.1203
Lc9	0.2790	-0.1606	0.0704	0.3513	0.5000	0.6138	0.6358	0.6647	0.3391	0.4841	0.5605	0.5473	0.5793	0.3601
Lr9	0.2456	0.1235	0.0980	-0.0018	0.0340	0.0392	0.0203	-0.0038	-0.0455	-0.0028	0.0070	-0.0216	-0.0515	-0.1432
Lc10	0.2707	-0.1871	0.0675	0.3686	0.5304	0.6686	0.7047	0.7421	0.3680	0.5292	0.6289	0.6288	0.6707	0.4308
Lr10	0.1215	0.4574	0.3601	-0.3980	-0.3403	-0.3391	-0.3569	-0.4128	-0.4262	-0.3464	-0.3164	-0.3334	-0.4042	-0.2958
Egr6	0.2720	-0.0472	0.0349	0.7687	0.5304	0.3112	0.2355	0.2227	0.7905	0.5165	0.2714	0.2101	0.2058	0.1741
Egr7	0.7104	0.2080	0.1892	0.6106	0.6663	0.4593	0.3255	0.2829	0.5962	0.6728	0.4320	0.3014	0.2566	0.3980
Egr8	1	0.5370	0.3055	0.4336	0.6020	0.6330	0.5007	0.4134	0.4145	0.6196	0.6283	0.4943	0.3891	0.5539
Egr9	0.5370	1	0.5330	0.0291	0.1170	0.1520	0.1479	0.0018	0.0059	0.1055	0.1605	0.1643	-0.0135	0.3264
Egr10	0.3055	0.5330	1	0.0062	0.0874	0.1030	0.1154	0.0815	-0.0170	0.0693	0.1120	0.1309	0.0894	0.0873
Egc6	0.4336	0.0291	0.0062	1	0.8873	0.7341	0.6577	0.6352	0.9746	0.8389	0.6657	0.5969	0.5781	0.4929
Egc7	0.6020	0.1170	0.0874	0.8873	1	0.9067	0.8306	0.8003	0.8582	0.9722	0.8529	0.7717	0.7405	0.6631
Egc8	0.6330	0.1520	0.1030	0.7341	0.9067	1	0.9637	0.9414	0.7353	0.9196	0.9781	0.9257	0.8974	0.7062
Egc9	0.5007	0.1479	0.1154	0.6577	0.8306	0.9637	1	0.9822	0.6847	0.8634	0.9636	0.9766	0.9525	0.6814
Egc10	0.4134	0.0018	0.0815	0.6352	0.8003	0.9414	0.9822	1	0.6683	0.8390	0.9436	0.9595	0.9768	0.6109
Ir6	0.4145	0.0059	-0.0170	0.9746	0.8582	0.7353	0.6847	0.6683	1	0.8569	0.7035	0.6566	0.6431	0.5056
Ir7	0.6196	0.1055	0.0693	0.8389	0.9722	0.9196	0.8634	0.8390	0.8569	1	0.9110	0.8461	0.8194	0.6918
Ir8	0.6283	0.1605	0.1120	0.6657	0.8529	0.9781	0.9636	0.9436	0.7035	0.9110	1	0.9684	0.9411	0.7102
Ir9	0.4943	0.1643	0.1309	0.5969	0.7717	0.9257	0.9766	0.9595	0.6566	0.8461	0.9684	1	0.9755	0.6718
Ir10	0.3891	-0.0135	0.0894	0.5781	0.7405	0.8974	0.9525	0.9768	0.6431	0.8194	0.9411	0.9755	1	0.5859
T10	0.5539	0.3264	0.0873	0.4929	0.6631	0.7062	0.6814	0.6109	0.5056	0.6918	0.7102	0.6718	0.5859	1
T50	0.5712	0.1987	0.0921	0.5685	0.7569	0.8003	0.7718	0.7142	0.5768	0.7721	0.7860	0.7379	0.6703	0.9173
X1	-0.2327	-0.2531	-0.1849	-0.3005	-0.3548	-0.4128	-0.4721	-0.4515	-0.3955	-0.4658	-0.5179	-0.5874	-0.5620	-0.3280
X2	0.5633	0.1706	0.0912	0.5723	0.7601	0.8033	0.7752	0.7211	0.5802	0.7732	0.7864	0.7381	0.6752	0.8867
X3	-0.2143	-0.3368	-0.1607	-0.1006	-0.1998	-0.1829	-0.1609	-0.1138	-0.0502	-0.1671	-0.1635	-0.1354	-0.0759	-0.5096
Savanes	0.1398	0.1162	-0.0239	0.2239	0.3500	0.3769	0.4137	0.3822	0.2232	0.3530	0.3859	0.4224	0.3900	0.2763
Forêt	0.1631	0.2283	-0.0500	0.1208	0.1728	0.2504	0.2621	0.2077	0.1366	0.2127	0.2810	0.3012	0.2354	0.6302
Cultures	-0.1929	-0.2004	0.0355	-0.2508	-0.3801	-0.4283	-0.4640	-0.4134	-0.2572	-0.3996	-0.4485	-0.4871	-0.4313	-0.5001
Habitat	0.0038	0.0118	0.1192	0.0144	-0.0632	-0.2000	-0.2330	-0.2251	0.0224	-0.0609	-0.2128	-0.2491	-0.2375	-0.1862
Compacité	0.1098	-0.0659	0.0020	0.1810	0.1802	0.1059	0.0710	0.0601	0.1685	0.1792	0.1023	0.0787	0.0727	0.2166

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	T50	X1	X2	X3	Savanes	Forêt	Cultures	Habitat	Compacité
Superficie	0.3415	-0.2445	0.3141	-0.2377	0.0630	0.6558	-0.3276	-0.0821	0.4300
Pluie Annuelle	0.5163	0.2245	0.5359	-0.0571	0.0940	-0.0069	-0.0738	-0.1093	-0.0204
Lame Annuelle	0.6149	0.0600	0.6337	-0.0692	0.0792	0.0016	-0.0694	-0.0221	-0.0759
Coeff Ec.	0.6006	-0.0162	0.6182	-0.0631	0.0522	0.0204	-0.0554	0.0136	-0.0689
Eaug an	0.6992	-0.4393	0.7067	-0.0878	0.3757	0.2048	-0.4061	-0.2303	0.0558
Pc6	0.4253	-0.0791	0.4318	-0.0666	0.1333	0.0837	-0.1627	0.1492	0.1639
Pr6	0.0921	-0.2673	0.0866	0.0076	0.0628	0.0942	-0.1142	0.3091	0.2293
Pc7	0.6519	0.0047	0.6558	-0.2413	0.1581	0.1093	-0.1920	0.0921	0.1120
Pr7	0.3207	-0.2591	0.3006	-0.3004	0.0787	0.1596	-0.1572	0.3293	0.1804
Pc8	0.6419	0.1226	0.6530	-0.1880	0.1355	0.0705	-0.1458	-0.0677	0.0098
Pr8	0.3929	-0.1923	0.3743	-0.3448	0.0976	0.1738	-0.1661	0.1013	0.0406
Pc9	0.5718	0.1957	0.5859	-0.1560	0.1186	0.0318	-0.1138	-0.0787	-0.0177
Pr9	0.1287	-0.1046	0.1057	-0.3456	0.0574	0.1253	-0.1119	0.1321	-0.0141
Pc10	0.5178	0.2206	0.5374	-0.0890	0.0799	-0.0259	-0.0552	-0.0749	-0.0129
Pr10	0.0439	-0.0234	0.0473	-0.1873	-0.0948	-0.1389	0.1290	0.2349	0.0328
Lc6	-0.0849	0.3556	-0.0794	-0.0669	-0.5160	-0.2453	0.5193	0.7147	-0.1528
Lr6	-0.2288	0.2546	-0.2282	-0.0514	-0.6173	-0.2656	0.6091	0.8629	-0.1516
Lc7	-0.0028	0.3917	0.0066	-0.0904	-0.5067	-0.2969	0.5341	0.6921	-0.1658
Lr7	-0.1951	0.2579	-0.1931	-0.0925	-0.6323	-0.3359	0.6514	0.8726	-0.1733
Lc8	0.3360	0.3749	0.3564	-0.0746	-0.2274	-0.2229	0.2792	0.2844	-0.2059
Lr8	-0.0643	0.4053	-0.0553	-0.1019	-0.4940	-0.3860	0.5713	0.5112	-0.3174
Lc9	0.5343	0.1695	0.5563	-0.0622	-0.0163	-0.0957	0.0517	0.0566	-0.1536
Lr9	-0.0630	0.2963	-0.0491	-0.0615	-0.3547	-0.3649	0.4540	0.2545	-0.4377
Lc10	0.5932	0.0864	0.6125	-0.0713	0.0504	-0.0146	-0.0382	-0.0003	-0.0856
Lr10	-0.3680	0.1580	-0.3769	-0.1105	-0.2615	-0.1948	0.3027	0.1936	-0.2355
Egr6	0.2257	-0.1752	0.2327	0.1094	-0.0283	0.0122	0.0025	0.2939	0.2879
Egr7	0.4112	-0.2065	0.4059	-0.1473	-0.0043	0.0471	-0.0370	0.3513	0.2422
Egr8	0.5712	-0.2327	0.5633	-0.2143	0.1398	0.1631	-0.1929	0.0038	0.1098
Egr9	0.1987	-0.2531	0.1706	-0.3368	0.1162	0.2283	-0.2004	0.0118	-0.0659
Egr10	0.0921	-0.1849	0.0912	-0.1607	-0.0239	-0.0500	0.0355	0.1192	0.0020
Egc6	0.5685	-0.3005	0.5723	-0.1006	0.2239	0.1208	-0.2508	0.0144	0.1810
Egc7	0.7569	-0.3548	0.7601	-0.1998	0.3500	0.1728	-0.3801	-0.0632	0.1802
Egc8	0.8003	-0.4128	0.8033	-0.1829	0.3769	0.2504	-0.4283	-0.2000	0.1059
Egc9	0.7718	-0.4721	0.7752	-0.1609	0.4137	0.2621	-0.4640	-0.2330	0.0710
Egc10	0.7142	-0.4515	0.7211	-0.1138	0.3822	0.2077	-0.4134	-0.2251	0.0601
Ir6	0.5768	-0.3955	0.5802	-0.0502	0.2232	0.1366	-0.2572	0.0224	0.1685
Ir7	0.7721	-0.4658	0.7732	-0.1671	0.3530	0.2127	-0.3996	-0.0609	0.1792
Ir8	0.7860	-0.5179	0.7864	-0.1635	0.3859	0.2810	-0.4485	-0.2128	0.1023
Ir9	0.7379	-0.5874	0.7381	-0.1354	0.4224	0.3012	-0.4871	-0.2491	0.0787
Ir10	0.6703	-0.5620	0.6752	-0.0759	0.3900	0.2354	-0.4313	-0.2375	0.0727
T10	0.9173	-0.3280	0.8867	-0.5096	0.2763	0.6302	-0.5001	-0.1862	0.2166
T50	1	-0.2577	0.9974	-0.2605	0.3362	0.4387	-0.4691	-0.2400	0.2203
X1	-0.2577	1	-0.2422	0.0477	-0.3738	-0.3376	0.4610	0.2239	-0.0952
X2	0.9974	-0.2422	1	-0.2096	0.3412	0.3994	-0.4566	-0.2457	0.2196
X3	-0.2605	0.0477	-0.2096	1	0.0362	-0.2964	0.1047	-0.1862	0.1948
Savanes	0.3362	-0.3738	0.3412	0.0362	1	0.1467	-0.9121	-0.6468	0.2492
Forêt	0.4387	-0.3376	0.3994	-0.2964	0.1467	1	-0.5370	-0.2493	0.4539
Cultures	-0.4691	0.4610	-0.4566	0.1047	-0.9121	-0.5370	1	0.6200	-0.4002
Habitat	-0.2400	0.2239	-0.2457	-0.1862	-0.6468	-0.2493	0.6200	1	-0.1976
Compacité	0.2203	-0.0952	0.2196	0.1948	0.2492	0.4539	-0.4002	-0.1976	1

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Superficie	Pluie Annuelle	Lame Annuelle	Coeff Ec.	Eaug an	Pc6	Pr6	Pc7	Pr7	Pc8	Pr8	Pc9	Pr9
Superficie	1	0.0313	0.1119	0.1196	0.1354	0.0725	0.0539	0.1335	0.1425	0.0780	0.0932	0.0697	0.1173
Pluie Annuelle	0.0313	1	0.8881	0.8170	0.8538	0.6244	-0.0020	0.7647	-0.0399	0.9085	0.0178	0.9594	-0.2133
Lame Annuelle	0.1119	0.8881	1	0.9776	0.9627	0.5526	-0.0067	0.7118	0.0097	0.8187	0.0479	0.8473	-0.2001
Coeff Ec.	0.1196	0.8170	0.9776	1	0.9312	0.5188	0.0100	0.6571	0.0106	0.7561	0.0548	0.7810	-0.1861
Eaug an	0.1354	0.8538	0.9627	0.9312	1	0.5002	-0.0417	0.6473	-0.0458	0.7663	-0.0122	0.7978	-0.2487
Pc6	0.0725	0.6244	0.5526	0.5188	0.5002	1	0.7683	0.8355	0.5098	0.7014	0.3077	0.6664	0.0781
Pr6	0.0539	-0.0020	-0.0067	0.0100	-0.0417	0.7683	1	0.4425	0.6865	0.1549	0.3591	0.0784	0.2598
Pc7	0.1335	0.7647	0.7118	0.6571	0.6473	0.8355	0.4425	1	0.6013	0.8907	0.4731	0.8156	0.1069
Pr7	0.1425	-0.0399	0.0097	0.0106	-0.0458	0.5098	0.6865	0.6013	1	0.2568	0.7129	0.0831	0.4255
Pc8	0.0780	0.9085	0.8187	0.7561	0.7663	0.7014	0.1549	0.8907	0.2568	1	0.4281	0.9642	0.1204
Pr8	0.0932	0.0178	0.0479	0.0548	-0.0122	0.3077	0.3591	0.4731	0.7129	0.4281	1	0.2391	0.7674
Pc9	0.0697	0.9594	0.8473	0.7810	0.7978	0.6664	0.0784	0.8156	0.0831	0.9642	0.2391	1	0.0677
Pr9	0.1173	-0.2133	-0.2001	-0.1861	-0.2487	0.0781	0.2598	0.1069	0.4255	0.1204	0.7674	0.0677	1
Pc10	0.0474	0.9895	0.8849	0.8209	0.8423	0.6447	0.0346	0.7826	-0.0007	0.9273	0.0858	0.9763	-0.1207
Pr10	0.0873	0.0604	0.0988	0.1367	0.0438	0.2258	0.2703	0.2111	0.2577	0.2387	0.4517	0.2328	0.5826
Lc6	-0.0976	0.2099	0.3104	0.3543	0.2549	0.3810	0.3461	0.2970	0.2296	0.2196	0.0974	0.2356	0.0914
Lr6	-0.1005	-0.0176	0.0804	0.1361	0.0457	0.2552	0.3849	0.1525	0.3155	0.0162	0.1146	0.0230	0.1714
Lc7	-0.1000	0.3471	0.4424	0.4658	0.3968	0.4445	0.3185	0.4313	0.2675	0.3709	0.1561	0.3772	0.0943
Lr7	-0.1369	0.0430	0.1305	0.1683	0.1084	0.2683	0.3576	0.2268	0.3688	0.0989	0.1836	0.0893	0.1892
Lc8	-0.0448	0.7103	0.8139	0.7982	0.7760	0.4609	0.0334	0.6579	0.1522	0.7252	0.2047	0.7091	-0.0518
Lr8	-0.2215	0.2749	0.3266	0.3443	0.2872	0.2055	0.0668	0.3709	0.2847	0.3657	0.3190	0.3055	0.0988
Lc9	0.0233	0.8687	0.9678	0.9425	0.9124	0.5260	-0.0186	0.7153	0.0424	0.8210	0.0978	0.8500	-0.1233
Lr9	-0.3483	0.3009	0.2590	0.2681	0.1640	0.1315	-0.0706	0.2963	0.1097	0.3610	0.2505	0.3606	0.1842
Lc10	0.1010	0.8815	0.9947	0.9776	0.9498	0.5291	-0.0280	0.7026	0.0063	0.8193	0.0665	0.8522	-0.1615
Lr10	-0.2419	-0.4124	-0.4176	-0.4024	-0.4731	-0.4169	-0.1950	-0.2893	0.0949	-0.2685	0.2905	-0.2753	0.5171
Egr6	-0.1432	0.0894	0.1010	0.1364	0.1278	0.4659	0.5521	0.2102	0.2249	0.0634	-0.0559	0.0601	-0.1254
Egr7	-0.1465	-0.0040	0.0664	0.0761	0.1037	0.2009	0.3096	0.2359	0.4456	0.0653	0.1981	0.0175	0.1020
Egr8	-0.0549	0.3765	0.4636	0.4612	0.5177	0.3693	0.1893	0.5380	0.4059	0.5074	0.4138	0.4159	0.1180
Egr9	0.1145	-0.1406	-0.0703	-0.0497	-0.0678	-0.0458	0.0123	0.0468	0.2222	0.0675	0.4725	0.0150	0.5676
Egr10	0.1000	-0.5245	-0.4157	-0.3449	-0.4867	-0.3015	0.0298	-0.2244	0.2897	-0.2752	0.4823	-0.3472	0.6444
Ir6	-0.1651	0.2012	0.2316	0.2599	0.2680	0.5022	0.5016	0.2814	0.2029	0.1804	-0.0148	0.1754	-0.1123
Ir7	-0.1049	0.3362	0.4225	0.4244	0.4699	0.3696	0.2423	0.4640	0.3267	0.3622	0.1362	0.3317	-0.0395
Ir8	0.0454	0.6348	0.7698	0.7576	0.8333	0.4061	0.0202	0.6052	0.1563	0.6714	0.2211	0.6242	-0.0880
Ir9	0.1903	0.7288	0.9028	0.9197	0.9473	0.4528	-0.0033	0.6022	0.0286	0.7098	0.1184	0.7202	-0.0887
Ir10	0.1581	0.7570	0.9228	0.9378	0.9692	0.4274	-0.0541	0.5548	-0.0743	0.6610	-0.0556	0.6924	-0.2801
T10	0.5165	0.0133	0.1453	0.1678	0.1813	0.1340	0.1333	0.2823	0.4022	0.1790	0.3859	0.0757	0.2024
TS0	0.1251	-0.1330	-0.1154	-0.1112	-0.0425	-0.0783	-0.0013	-0.0171	0.1473	-0.0823	0.0869	-0.1283	0.0127
AA	0.0360	-0.1500	-0.1141	-0.0713	-0.0991	-0.0969	-0.0299	-0.0657	0.0254	-0.0934	0.0662	-0.1914	-0.1550
BB	0.1279	-0.1683	-0.1523	-0.1434	-0.0835	-0.3321	-0.3098	-0.2279	-0.2006	-0.2067	-0.1613	-0.1887	-0.0652
XIN	-0.1474	0.0649	0.0745	0.1045	0.1176	-0.1309	-0.2223	-0.0839	-0.2318	0.0244	-0.0921	0.0169	-0.1690
CRT	-0.1875	0.3319	0.0697	-0.0300	0.0823	-0.0917	-0.3828	0.0429	-0.3286	0.2400	-0.1225	0.3262	-0.0204
DCRT	-0.0559	-0.0736	-0.1890	-0.1977	-0.2874	-0.1680	-0.1884	-0.1671	-0.1893	-0.0178	0.1195	-0.0155	0.2049
C1	-0.0617	0.0479	0.0347	0.0739	0.0239	-0.0414	-0.1024	0.0402	-0.0296	0.1049	0.1360	0.0689	0.0514
C2	-0.0870	0.1084	0.1951	0.2149	0.1204	0.0442	-0.0669	0.0675	-0.0665	0.1562	0.1394	0.1313	0.0640
CQ1	-0.3141	-0.0406	-0.1122	-0.1083	-0.1386	-0.1067	-0.0824	-0.2098	-0.2637	-0.1215	-0.2039	-0.0596	-0.0704
CQ2	-0.2302	-0.1110	-0.1426	-0.1553	-0.1429	-0.0860	-0.0073	-0.1277	-0.0470	-0.1365	-0.0748	-0.1227	-0.0252
CQ3	-0.1468	-0.1215	-0.2148	-0.1963	-0.2868	-0.1599	-0.1119	-0.1872	-0.1483	-0.1271	-0.0283	-0.1238	-0.0105
Savanes	0.0630	0.0940	0.0792	0.0522	0.0854	0.1333	0.0628	0.1581	0.0787	0.1355	0.0976	0.1186	0.0574
Forêt	0.6558	-0.0069	0.0016	0.0204	0.0225	0.0837	0.0942	0.1093	0.1596	0.0705	0.1738	0.0318	0.1253
Cultures	-0.3276	-0.0738	-0.0694	-0.0554	-0.0828	-0.1627	-0.1142	-0.1920	-0.1572	-0.1458	-0.1661	-0.1138	-0.1119
Habitat	-0.0821	-0.1093	-0.0221	0.0136	-0.0380	0.1492	0.3091	0.0921	0.3293	-0.0677	0.1013	-0.0787	0.1321
Compacité	0.4300	-0.0204	-0.0759	-0.0689	-0.0268	0.1639	0.2293	0.1120	0.1804	0.0098	0.0406	-0.0177	-0.0141

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Pc10	Pr10	Lc6	Lr6	Lc7	Lr7	Lc8	Lr8	Lc9	Lr9	Lc10	Lr10	Egr6	Egr7
Superficie	0.0474	0.0873	-0.0976	-0.1005	-0.1000	-0.1369	-0.0448	-0.2215	0.0233	-0.3483	0.1010	-0.2419	-0.1432	-0.1465
Pluie Annuelle	0.9895	0.0604	0.2099	-0.0176	0.3471	0.0430	0.7103	0.2749	0.8687	0.3009	0.8815	-0.4124	0.0894	-0.0040
Lame Annuelle	0.8849	0.0988	0.3104	0.0804	0.4424	0.1305	0.8139	0.3266	0.9678	0.2590	0.9947	-0.4176	0.1010	0.0664
Coeff Ec.	0.8209	0.1367	0.3543	0.1361	0.4658	0.1683	0.7982	0.3443	0.9425	0.2681	0.9776	-0.4024	0.1364	0.0761
Eaug an	0.8423	0.0438	0.2549	0.0457	0.3968	0.1084	0.7760	0.2872	0.9124	0.1640	0.9498	-0.4731	0.1278	0.1037
Pc6	0.6447	0.2258	0.3810	0.2552	0.4445	0.2683	0.4609	0.2055	0.5260	0.1315	0.5291	-0.4169	0.4659	0.2009
Pr6	0.0346	0.2703	0.3461	0.3849	0.3185	0.3576	0.0334	0.0668	-0.0186	-0.0706	-0.0280	-0.1950	0.5521	0.3096
Pc7	0.7826	0.2111	0.2970	0.1525	0.4313	0.2268	0.6579	0.3709	0.7153	0.2963	0.7026	-0.2893	0.2102	0.2359
Pr7	-0.0007	0.2577	0.2296	0.3155	0.2675	0.3688	0.1522	0.2847	0.0424	0.1097	0.0063	0.0949	0.2249	0.4456
Pc8	0.9273	0.2387	0.2196	0.0162	0.3709	0.0989	0.7252	0.3657	0.8210	0.3610	0.8193	-0.2685	0.0634	0.0653
Pr8	0.0858	0.4517	0.0974	0.1146	0.1561	0.1836	0.2047	0.3190	0.0978	0.2505	0.0665	0.2905	-0.0559	0.1981
Pc9	0.9763	0.2328	0.2356	0.0230	0.3772	0.0893	0.7091	0.3055	0.8500	0.3606	0.8522	-0.2753	0.0601	0.0175
Pr9	-0.1207	0.5826	0.0914	0.1714	0.0943	0.1892	-0.0518	0.0988	-0.1233	0.1842	-0.1615	0.5171	-0.1254	0.1020
Pc10	1	0.2020	0.2418	0.0169	0.3852	0.0851	0.7276	0.3009	0.8723	0.3171	0.8847	-0.3572	0.0969	0.0164
Pr10	0.2020	1	0.2572	0.2555	0.3146	0.3191	0.2122	0.2183	0.1393	0.1200	0.1386	0.3010	0.0671	0.1572
Lc6	0.2418	0.2572	1	0.8948	0.9461	0.7784	0.6004	0.5599	0.3970	0.3680	0.3317	0.0235	0.5718	0.3808
Lr6	0.0169	0.2555	0.8948	1	0.8385	0.9317	0.4034	0.5772	0.1718	0.3567	0.1023	0.1357	0.5312	0.5782
Lc7	0.3852	0.3146	0.9461	0.8385	1	0.8253	0.7612	0.6793	0.5418	0.4490	0.4659	0.0030	0.5881	0.4818
Lr7	0.0851	0.3191	0.7784	0.9317	0.8253	1	0.4739	0.6971	0.2295	0.4124	0.1534	0.1526	0.5303	0.7512
Lc8	0.7276	0.2122	0.6004	0.4034	0.7612	0.4739	1	0.7172	0.8886	0.5139	0.8342	-0.1424	0.2944	0.3253
Lr8	0.3009	0.2183	0.5599	0.5772	0.6793	0.6971	0.7172	1	0.4550	0.7166	0.3577	0.1666	0.3297	0.5881
Lc9	0.8723	0.1393	0.3970	0.1718	0.5418	0.2295	0.8886	0.4550	1	0.4513	0.9808	-0.2534	0.1431	0.1310
Lr9	0.3171	0.1200	0.3680	0.3567	0.4490	0.4124	0.5139	0.7166	0.4513	1	0.3143	0.4233	0.1456	0.2537
Lc10	0.8847	0.1386	0.3317	0.1023	0.4659	0.1534	0.8342	0.3577	0.9808	0.3143	1	-0.3366	0.0993	0.0750
Lr10	-0.3572	0.3010	0.0235	0.1357	0.0030	0.1526	-0.1424	0.1666	-0.2534	0.4233	-0.3366	1	-0.1951	0.0852
Egr6	0.0969	0.0671	0.5718	0.5312	0.5881	0.5303	0.2944	0.3297	0.1431	0.1456	0.0993	-0.1951	1	0.5360
Egr7	0.0164	0.1572	0.3808	0.5782	0.4818	0.7512	0.3253	0.5881	0.1310	0.2537	0.0750	0.0852	0.5360	1
Egr8	0.3939	0.1664	0.3133	0.3314	0.4604	0.4852	0.6524	0.7044	0.5104	0.3896	0.4711	-0.0815	0.3460	0.7109
Egr9	-0.1306	-0.0028	0.0569	0.0831	0.0445	0.0711	0.0142	0.0998	-0.0293	0.1644	-0.0533	0.2441	-0.0686	0.1429
Egr10	-0.4350	0.5096	-0.0207	0.0953	-0.0365	0.0986	-0.2456	-0.0372	-0.3556	0.0564	-0.3745	0.6076	-0.2158	-0.0170
Ir6	0.2077	0.0839	0.6853	0.5997	0.7190	0.5919	0.4437	0.4003	0.2718	0.1830	0.2260	-0.2427	0.9256	0.4906
Ir7	0.3519	0.1548	0.5740	0.5329	0.7338	0.6450	0.7155	0.6245	0.4991	0.3304	0.4298	-0.1424	0.6496	0.7382
Ir8	0.6400	0.1180	0.3292	0.1831	0.5053	0.2866	0.8509	0.5411	0.7788	0.2802	0.7693	-0.2968	0.2771	0.3871
Ir9	0.7295	0.1021	0.3095	0.1230	0.4299	0.1627	0.7648	0.3252	0.8643	0.1955	0.8999	-0.3924	0.1567	0.1496
Ir10	0.7527	0.0780	0.2790	0.0873	0.4024	0.1360	0.7394	0.2821	0.8624	0.1329	0.9139	-0.4658	0.1662	0.1181
T10	0.0102	-0.0413	-0.0927	-0.0651	-0.0592	-0.0256	0.0328	-0.0010	0.0564	-0.2346	0.1213	-0.2635	-0.0558	0.1450
T50	-0.1355	-0.0352	-0.0365	0.0781	-0.0357	0.1135	-0.0652	0.1694	-0.1215	0.0421	-0.1216	0.0128	-0.0214	0.1808
AA	-0.1681	-0.1420	-0.0694	-0.1937	-0.1159	-0.2578	-0.1216	-0.1275	-0.1852	-0.2527	-0.1473	-0.2609	-0.0660	-0.2746
BB	-0.1758	-0.0917	-0.1656	-0.1180	-0.1823	-0.1541	-0.1196	-0.0515	-0.1574	-0.0108	-0.1613	-0.0594	-0.1047	-0.1030
XIN	0.0485	-0.0891	0.1241	-0.0214	0.0858	-0.1082	0.0728	-0.0116	0.0386	-0.0701	0.0580	-0.1963	0.0055	-0.2024
CRT	0.3218	-0.0697	-0.0538	-0.1625	-0.0057	-0.1341	0.1542	0.1749	0.1427	0.3162	0.0924	0.1636	-0.0785	-0.0397
DCRT	-0.0484	0.1633	-0.2742	-0.2816	-0.2866	-0.2617	-0.3282	-0.3155	-0.2020	-0.0397	-0.1794	0.2286	-0.3583	-0.4051
C1	0.0568	0.0600	-0.1268	-0.1842	-0.1378	-0.2257	-0.0119	-0.1392	0.0447	0.0417	0.0485	0.0672	0.0211	-0.1539
C2	0.1161	0.0855	-0.0298	-0.1609	-0.0544	-0.2034	0.0788	-0.0949	0.1816	0.0915	0.1924	-0.0367	-0.1900	-0.2202
CQ1	-0.0409	-0.0064	0.0673	0.1496	0.0557	0.1484	-0.0204	0.1330	-0.0503	0.2747	-0.0935	0.1883	0.0165	0.0435
CQ2	-0.1306	-0.1512	-0.1066	-0.0641	-0.1351	-0.0655	-0.1311	-0.0440	-0.1183	0.0295	-0.1344	0.1567	-0.0689	0.0225
CQ3	-0.1250	-0.0382	-0.1695	-0.1935	-0.2238	-0.2331	-0.2529	-0.1822	-0.2055	0.0354	-0.2021	0.1660	-0.1948	-0.2386
Savanes	0.0799	-0.0948	-0.5160	-0.6173	-0.5067	-0.6323	-0.2274	-0.4940	-0.0163	-0.3547	0.0504	-0.2615	-0.3059	-0.4358
Forêt	-0.0259	-0.1389	-0.2453	-0.2656	-0.2969	-0.3359	-0.2229	-0.3860	-0.0957	-0.3649	-0.0146	-0.1948	-0.1738	-0.2363
Cultures	-0.0552	0.1290	0.5193	0.6091	0.5341	0.6514	0.2792	0.5713	0.0517	0.4540	-0.0382	0.3027	0.3158	0.4484
Habitat	-0.0749	0.2349	0.7147	0.8629	0.6921	0.8726	0.2844	0.5112	0.0566	0.2545	-0.0003	0.1936	0.4913	0.6451
Compacité	-0.0129	0.0328	-0.1528	-0.1516	-0.1658	-0.1733	-0.2059	-0.3174	-0.1536	-0.4377	-0.0856	-0.2355	0.1064	-0.0405

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	Egr8	Egr9	Egr10	Ir6	Ir7	Ir8	Ir9	Ir10	T10	T50	AA	BB	XIN	CRT
Superficie	-0.0549	0.1145	0.1000	-0.1651	-0.1049	0.0454	0.1903	0.1581	0.5165	0.1251	0.0360	0.1279	-0.1474	-0.1875
Pluie Annuelle	0.3765	-0.1406	-0.5245	0.2012	0.3362	0.6348	0.7288	0.7570	0.0133	-0.1330	-0.1500	-0.1683	0.0649	0.3319
Lame Annuelle	0.4636	-0.0703	-0.4157	0.2316	0.4225	0.7698	0.9028	0.9228	0.1453	-0.1154	-0.1141	-0.1523	0.0745	0.0697
Coeff Ec.	0.4612	-0.0497	-0.3449	0.2599	0.4244	0.7576	0.9197	0.9378	0.1678	-0.1112	-0.0713	-0.1434	0.1045	-0.0300
Eaug an	0.5177	-0.0678	-0.4867	0.2680	0.4699	0.8333	0.9473	0.9692	0.1813	-0.0425	-0.0991	-0.0835	0.1176	0.0823
Pc6	0.3693	-0.0458	-0.3015	0.5022	0.3696	0.4061	0.4528	0.4274	0.1340	-0.0783	-0.0969	-0.3321	-0.1309	-0.0917
Pr6	0.1893	0.0123	0.0298	0.5016	0.2423	0.0202	-0.0033	-0.0541	0.1333	-0.0013	-0.0299	-0.3098	-0.2223	-0.3828
Pc7	0.5380	0.0468	-0.2244	0.2814	0.4640	0.6052	0.6022	0.5548	0.2823	-0.0171	-0.0657	-0.2279	-0.0839	0.0429
Pr7	0.4059	0.2222	0.2897	0.2029	0.3267	0.1563	0.0286	-0.0743	0.4022	0.1473	0.0254	-0.2006	-0.2318	-0.3286
Pc8	0.5074	0.0675	-0.2752	0.1804	0.3622	0.6714	0.7098	0.6610	0.1790	-0.0823	-0.0934	-0.2067	0.0244	0.2400
Pr8	0.4138	0.4725	0.4823	-0.0148	0.1362	0.2211	0.1184	-0.0556	0.3859	0.0869	0.0662	-0.1613	-0.0921	-0.1225
Pc9	0.4159	0.0150	-0.3472	0.1754	0.3317	0.6242	0.7202	0.6924	0.0757	-0.1283	-0.1914	-0.1887	0.0169	0.3262
Pr9	0.1180	0.5676	0.6444	-0.1123	-0.0395	-0.0880	-0.0887	-0.2801	0.2024	0.0127	-0.1550	-0.0652	-0.1690	-0.0204
Pc10	0.3939	-0.1306	-0.4350	0.2077	0.3519	0.6400	0.7295	0.7527	0.0102	-0.1355	-0.1681	-0.1758	0.0485	0.3218
Pr10	0.1664	-0.0028	0.5096	0.0839	0.1548	0.1180	0.1021	0.0780	-0.0413	-0.0352	-0.1420	-0.0917	-0.0891	-0.0697
Lc6	0.3133	0.0569	-0.0207	0.6853	0.5740	0.3292	0.3095	0.2790	-0.0927	-0.0365	-0.0694	-0.1656	0.1241	-0.0538
Lr6	0.3314	0.0831	0.0953	0.5997	0.5329	0.1831	0.1230	0.0873	-0.0651	0.0781	-0.1937	-0.1180	-0.0214	-0.1625
Lc7	0.4604	0.0445	-0.0365	0.7190	0.7338	0.5053	0.4299	0.4024	-0.0592	-0.0357	-0.1159	-0.1823	0.0858	-0.0057
Lr7	0.4852	0.0711	0.0986	0.5919	0.6450	0.2866	0.1627	0.1360	-0.0256	0.1135	-0.2578	-0.1541	-0.1082	-0.1341
Lc8	0.6524	0.0142	-0.2456	0.4437	0.7155	0.8509	0.7648	0.7394	0.0328	-0.0652	-0.1216	-0.1196	0.0728	0.1542
Lr8	0.7044	0.0998	-0.0372	0.4003	0.6245	0.5411	0.3252	0.2821	-0.0010	0.1694	-0.1275	-0.0515	-0.0116	0.1749
Lc9	0.5104	-0.0293	-0.3556	0.2718	0.4991	0.7788	0.8643	0.8624	0.0564	-0.1215	-0.1852	-0.1574	0.0386	0.1427
Lr9	0.3896	0.1644	0.0564	0.1830	0.3304	0.2802	0.1955	0.1329	-0.2346	0.0421	-0.2527	-0.0108	-0.0701	0.3162
Lc10	0.4711	-0.0533	-0.3745	0.2260	0.4298	0.7693	0.8999	0.9139	0.1213	-0.1216	-0.1473	-0.1613	0.0580	0.0924
Lr10	-0.0815	0.2441	0.6076	-0.2427	-0.1424	-0.2968	-0.3924	-0.4658	-0.2635	0.0128	-0.2609	-0.0594	-0.1963	0.1636
Egr6	0.3460	-0.0686	-0.2158	0.9256	0.6496	0.2771	0.1567	0.1662	-0.0558	-0.0214	-0.0660	-0.1047	0.0055	-0.0785
Egr7	0.7109	0.1429	-0.0170	0.4906	0.7382	0.3871	0.1496	0.1181	0.1450	0.1808	-0.2746	-0.1030	-0.2024	-0.0397
Egr8	1	0.2478	-0.1876	0.3951	0.7227	0.8063	0.5874	0.5136	0.2679	0.1701	-0.1648	-0.0689	-0.0926	0.1435
Egr9	0.2478	1	0.3267	-0.0429	0.0629	0.0853	0.1145	-0.0665	0.4384	0.1053	-0.0618	0.0101	-0.0484	0.0233
Egr10	-0.1876	0.3267	1	-0.2131	-0.1455	-0.2938	-0.3280	-0.4159	0.1478	0.0307	0.0528	-0.0414	-0.0185	-0.2875
Ir6	0.3951	-0.0429	-0.2131	1	0.7277	0.4136	0.2937	0.2962	-0.0441	-0.0296	-0.1228	-0.1893	0.1041	-0.0897
Ir7	0.7227	0.0629	-0.1455	0.7277	1	0.7491	0.5100	0.4784	0.1108	0.0500	-0.1525	-0.0332	0.0518	0.0180
Ir8	0.8063	0.0853	-0.2938	0.4136	0.7491	1	0.8671	0.8254	0.2385	0.0401	-0.0743	0.0013	0.0990	0.0676
Ir9	0.5874	0.1145	-0.3280	0.2937	0.5100	0.8671	1	0.9646	0.3140	0.0197	-0.0517	-0.0451	0.1396	-0.0370
Ir10	0.5136	-0.0665	-0.4159	0.2962	0.4784	0.8254	0.9646	1	0.2096	-0.0103	-0.0454	-0.0511	0.1634	-0.0166
T10	0.2679	0.4384	0.1478	-0.0441	0.1108	0.2385	0.3140	0.2096	1	0.5500	0.1700	-0.0822	-0.0299	-0.3468
T50	0.1701	0.1053	0.0307	-0.0296	0.0500	0.0401	0.0197	-0.0103	0.5500	1	0.0425	0.0512	-0.0872	-0.1733
AA	-0.1648	-0.0618	0.0528	-0.1228	-0.1525	-0.0743	-0.0517	-0.0454	0.1700	0.0425	1	0.2336	0.5262	-0.2206
BB	-0.0689	0.0101	-0.0414	-0.1893	-0.0332	0.0013	-0.0451	-0.0511	-0.0822	0.0512	0.2336	1	0.3105	0.1094
XIN	-0.0926	-0.0484	-0.0185	0.1041	0.0518	0.0990	0.1396	0.1634	-0.0299	-0.0872	0.5262	0.3105	1	0.0522
CRT	0.1435	0.0233	-0.2875	-0.0897	0.0180	0.0676	-0.0370	-0.0166	-0.3468	-0.1733	-0.2206	0.1094	0.0522	1
DCRT	-0.6008	-0.1089	0.3346	-0.3912	-0.5069	-0.5075	-0.3544	-0.3329	-0.1103	-0.1245	0.1437	-0.0749	0.0741	-0.0907
C1	0.0158	0.2390	0.2361	0.0271	0.0083	0.0939	0.1085	0.0783	0.1012	-0.0925	0.0026	-0.0407	0.2065	-0.0856
C2	-0.0453	0.0221	0.0903	-0.1045	-0.1002	0.0815	0.1457	0.1202	0.1065	0.1018	0.0575	-0.0182	0.1256	-0.1254
CQ1	-0.0792	-0.3151	-0.0213	0.0060	-0.0446	-0.1246	-0.1710	-0.1507	-0.4819	-0.0690	-0.1378	0.0978	-0.1600	0.0779
CQ2	0.0066	0.0438	-0.0733	-0.1166	-0.1148	-0.1309	-0.1456	-0.1600	-0.1731	-0.0915	-0.1798	0.0121	-0.3053	0.0531
CQ3	-0.3365	-0.0335	0.1537	-0.2093	-0.2891	-0.3510	-0.3019	-0.2894	-0.1912	-0.1091	0.1318	-0.0731	0.0817	0.0031
Savanes	-0.1973	0.0118	-0.0622	-0.3540	-0.3267	-0.0638	0.0583	0.0421	0.1177	-0.1337	0.1292	0.0916	0.0426	-0.0903
Forêt	-0.1203	0.2102	0.0206	-0.1867	-0.2454	-0.0589	0.1077	0.0454	0.6255	0.1281	0.1518	-0.0743	0.0006	-0.1734
Cultures	0.2062	-0.1066	0.0411	0.3628	0.3652	0.0740	-0.0983	-0.0561	-0.3678	0.0601	-0.1662	-0.0451	-0.0278	0.1621
Habitat	0.3315	0.1160	0.0898	0.5101	0.4780	0.1257	0.0233	-0.0014	-0.0106	0.0820	-0.2079	-0.0860	-0.1619	-0.1433
Compacité	-0.0831	-0.1795	-0.0698	-0.0119	-0.0443	-0.0999	-0.0315	0.0001	0.2818	0.0691	0.1967	-0.0431	-0.0425	-0.0401

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

	DCRT	C1	C2	CQ1	CQ2	CQ3	Savanes	Forêt	Cultures	Habitat	Compacité
Superficie	-0.0559	-0.0617	-0.0870	-0.3141	-0.2302	-0.1468	0.0630	0.6558	-0.3276	-0.0821	0.4300
Pluie Annuelle	-0.0736	0.0479	0.1084	-0.0406	-0.1110	-0.1215	0.0940	-0.0069	-0.0738	-0.1093	-0.0204
Lame Annuelle	-0.1890	0.0347	0.1951	-0.1122	-0.1426	-0.2148	0.0792	0.0016	-0.0694	-0.0221	-0.0759
Coeff Ec.	-0.1977	0.0739	0.2149	-0.1083	-0.1553	-0.1963	0.0522	0.0204	-0.0554	0.0136	-0.0689
Eaug an	-0.2874	0.0239	0.1204	-0.1386	-0.1429	-0.2868	0.0854	0.0225	-0.0828	-0.0380	-0.0268
Pc6	-0.1680	-0.0414	0.0442	-0.1067	-0.0860	-0.1599	0.1333	0.0837	-0.1627	0.1492	0.1639
Pr6	-0.1884	-0.1024	-0.0669	-0.0824	-0.0073	-0.1119	0.0628	0.0942	-0.1142	0.3091	0.2293
Pc7	-0.1671	0.0402	0.0675	-0.2098	-0.1277	-0.1872	0.1581	0.1093	-0.1920	0.0921	0.1120
Pr7	-0.1893	-0.0296	-0.0665	-0.2637	-0.0470	-0.1483	0.0787	0.1596	-0.1572	0.3293	0.1804
Pc8	-0.0178	0.1049	0.1562	-0.1215	-0.1365	-0.1271	0.1355	0.0705	-0.1458	-0.0677	0.0098
Pr8	0.1195	0.1360	0.1394	-0.2039	-0.0748	-0.0283	0.0976	0.1738	-0.1661	0.1013	0.0406
Pc9	-0.0155	0.0689	0.1313	-0.0596	-0.1227	-0.1238	0.1186	0.0318	-0.1138	-0.0787	-0.0177
Pr9	0.2049	0.0514	0.0640	-0.0704	-0.0252	-0.0105	0.0574	0.1253	-0.1119	0.1321	-0.0141
Pc10	-0.0484	0.0568	0.1161	-0.0409	-0.1306	-0.1250	0.0799	-0.0259	-0.0552	-0.0749	-0.0129
Pr10	0.1633	0.0600	0.0855	-0.0064	-0.1512	-0.0382	-0.0948	-0.1389	0.1290	0.2349	0.0328
Lc6	-0.2742	-0.1268	-0.0298	0.0673	-0.1066	-0.1695	-0.5160	-0.2453	0.5193	0.7147	-0.1528
Lr6	-0.2816	-0.1842	-0.1609	0.1496	-0.0641	-0.1935	-0.6173	-0.2656	0.6091	0.8629	-0.1516
Lc7	-0.2866	-0.1378	-0.0544	0.0557	-0.1351	-0.2238	-0.5067	-0.2969	0.5341	0.6921	-0.1658
Lr7	-0.2617	-0.2257	-0.2034	0.1484	-0.0655	-0.2331	-0.6323	-0.3359	0.6514	0.8726	-0.1733
Lc8	-0.3282	-0.0119	0.0788	-0.0204	-0.1311	-0.2529	-0.2274	-0.2229	0.2792	0.2844	-0.2059
Lr8	-0.3155	-0.1392	-0.0949	0.1330	-0.0440	-0.1822	-0.4940	-0.3860	0.5713	0.5112	-0.3174
Lc9	-0.2020	0.0447	0.1816	-0.0503	-0.1183	-0.2055	-0.0163	-0.0957	0.0517	0.0566	-0.1536
Lr9	-0.0397	0.0417	0.0915	0.2747	0.0295	0.0354	-0.3547	-0.3649	0.4540	0.2545	-0.4377
Lc10	-0.1794	0.0485	0.1924	-0.0935	-0.1344	-0.2021	0.0504	-0.0146	-0.0382	-0.0003	-0.0856
Lr10	0.2286	0.0672	-0.0367	0.1883	0.1567	0.1660	-0.2615	-0.1948	0.3027	0.1936	-0.2355
Egr6	-0.3583	0.0211	-0.1900	0.0165	-0.0689	-0.1948	-0.3059	-0.1738	0.3158	0.4913	0.1064
Egr7	-0.4051	-0.1539	-0.2202	0.0435	0.0225	-0.2386	-0.4358	-0.2363	0.4484	0.6451	-0.0405
Egr8	-0.6008	0.0158	-0.0453	-0.0792	0.0066	-0.3365	-0.1973	-0.1203	0.2062	0.3315	-0.0831
Egr9	-0.1089	0.2390	0.0221	-0.3151	0.0438	-0.0335	0.0118	0.2102	-0.1066	0.1160	-0.1795
Egr10	0.3346	0.2361	0.0903	-0.0213	-0.0733	0.1537	-0.0622	0.0206	0.0411	0.0898	-0.0698
Ir6	-0.3912	0.0271	-0.1045	0.0060	-0.1166	-0.2093	-0.3540	-0.1867	0.3628	0.5101	-0.0119
Ir7	-0.5069	0.0083	-0.1002	-0.0446	-0.1148	-0.2891	-0.3267	-0.2454	0.3652	0.4780	-0.0443
Ir8	-0.5075	0.0939	0.0815	-0.1246	-0.1309	-0.3510	-0.0638	-0.0589	0.0740	0.1257	-0.0999
Ir9	-0.3544	0.1085	0.1457	-0.1710	-0.1456	-0.3019	0.0583	0.1077	-0.0983	0.0233	-0.0315
Ir10	-0.3329	0.0783	0.1202	-0.1507	-0.1600	-0.2894	0.0421	0.0454	-0.0561	-0.0014	0.0001
T10	-0.1103	0.1012	0.1065	-0.4819	-0.1731	-0.1912	0.1177	0.6255	-0.3678	-0.0106	0.2818
T50	-0.1245	-0.0925	0.1018	-0.0690	-0.0915	-0.1091	-0.1337	0.1281	0.0601	0.0820	0.0691
AA	0.1437	0.0026	0.0575	-0.1378	-0.1798	0.1318	0.1292	0.1518	-0.1662	-0.2079	0.1967
BB	-0.0749	-0.0407	-0.0182	0.0978	0.0121	-0.0731	0.0916	-0.0743	-0.0451	-0.0860	-0.0431
XIN	0.0741	0.2065	0.1256	-0.1600	-0.3053	0.0817	0.0426	0.0006	-0.0278	-0.1619	-0.0425
CRT	-0.0907	-0.0856	-0.1254	0.0779	0.0531	0.0031	-0.0903	-0.1734	0.1621	-0.1433	-0.0401
DCRT	1	0.0190	0.1796	0.1405	-0.0634	0.3578	0.0919	0.0130	-0.0712	-0.2622	0.0427
C1	0.0190	1	0.2549	-0.2042	-0.0266	0.3265	0.2735	0.1099	-0.2764	-0.2163	-0.0087
C2	0.1796	0.2549	1	-0.0581	-0.2662	0.3761	0.2516	0.0960	-0.2519	-0.2053	-0.2151
CQ1	0.1405	-0.2042	-0.0581	1	0.3467	0.0495	-0.3027	-0.4524	0.4544	0.0924	-0.3236
CQ2	-0.0634	-0.0266	-0.2662	0.3467	1	-0.1347	-0.0649	-0.1854	0.1361	-0.0030	-0.1444
CQ3	0.3578	0.3265	0.3761	0.0495	-0.1347	1	0.1750	-0.0224	-0.1377	-0.1376	-0.0243
Savanes	0.0919	0.2735	0.2516	-0.3027	-0.0649	0.1750	1	0.1467	-0.9121	-0.6468	0.2492
Forêt	0.0130	0.1099	0.0960	-0.4524	-0.1854	-0.0224	0.1467	1	-0.5370	-0.2493	0.4539
Cultures	-0.0712	-0.2764	-0.2519	0.4544	0.1361	-0.1377	-0.9121	-0.5370	1	0.6200	-0.4002
Habitat	-0.2622	-0.2163	-0.2053	0.0924	-0.0030	-0.1376	-0.6468	-0.2493	0.6200	1	-0.1976
Compacité	0.0427	-0.0087	-0.2151	-0.3236	-0.1444	-0.0243	0.2492	0.4539	-0.4002	-0.1976	1

0.51 Corrélations supérieures à 0.5

0.49 Corrélations inférieures à 0.5

Comparaison Prédéterminé/Calé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BG28282N	0.9755	0.0145	0.0307	80.70	83.30	35.44	0.2109	0.9738
BG28383N	0.9941	0.0160	0.0314	21.10	22.30	44.58	0.2745	0.9935
BK38282N	0.9939	0.0183	0.0555	70.40	70.40	44.31	0.2262	0.9935
BK38383N	0.9832	0.0418	0.1139	21.50	21.50	51.96	0.2845	0.9820
BM28484N	0.8143	0.1292	0.3243	0.90	3.10	4.65	0.3506	0.8145
BM28585N	0.9967	0.0088	0.0086	75.80	81.00	58.81	0.5102	0.9964
BS28383N	0.9114	0.1045	0.1885	11.80	11.80	65.56	0.4127	0.8899
BS28585N	0.8939	0.0495	0.0663	7.30	98.50	5.56	0.2857	0.8547
BZ37878N	0.9898	0.0081	0.0006	69.30	76.70	29.95	0.1497	0.9893
BZ38080N	0.9599	0.1159	0.1530	73.10	73.10	40.60	0.1965	0.9497
DO18484N	0.9654	0.0952	0.0990	19.60	33.20	13.70	0.1176	0.9478
DO18686N	0.3885	0.1219	0.3321	68.90	73.10	89.79	1.1321	0.3685
DW18080N	0.9810	0.0012	0.0083	80.90	80.90	54.88	0.3625	0.9811
DW18181N	0.9796	0.0668	0.1335	60.20	63.80	19.55	0.0866	0.9658
DW18282N	0.9960	0.0402	0.0477	38.90	39.30	20.05	0.0522	0.9931
DW18383N	0.9927	0.0148	0.0375	9.80	10.40	14.47	0.0317	0.9922
DW18484N	0.8708	0.1734	0.3929	20.60	31.80	48.70	0.2883	0.8674
KN27777N	0.9851	0.0682	0.1181	36.60	36.60	56.57	0.2153	0.9829
KN28383N	0.9256	0.0038	0.0271	9.40	16.80	18.32	0.1689	0.9178
KN28484N	0.9938	0.0326	0.0459	16.10	16.50	22.91	0.0892	0.9931
LA18282N	0.2536	0.0927	0.2851	120.00	120.00	98.89	1.6603	0.2165
LA18383N	0.3330	0.0788	0.1681	33.40	33.40	96.69	1.3831	0.3333
LA18484N	0.8068	0.1895	0.1402	78.50	98.70	36.43	0.5506	0.7805
MW18383N	0.9688	0.0607	0.1684	56.10	56.10	47.05	0.2435	0.9650
SM18383N	0.9285	0.0160	0.0282	6.00	11.60	16.49	0.1545	0.9250
SM18484N	0.9313	0.0621	0.1910	5.20	25.40	14.76	0.1563	0.9205
SM18585N	0.5788	0.1203	0.2686	157.50	157.50	90.10	1.1343	0.5762
SN17878N	0.9859	0.0027	0.0052	47.30	68.30	34.19	0.2461	0.9857
SN18181N	0.8829	0.0308	0.0419	119.40	119.40	51.75	0.4560	0.8796
SN18484N	0.9585	0.0339	0.1081	15.20	21.20	18.54	0.1128	0.9480
TD38383N	0.9934	0.0011	0.0036	31.60	36.80	62.99	0.5545	0.9899
TD38484N	0.9895	0.0256	0.0552	27.50	27.90	14.91	0.0365	0.9876
TL28282N	0.9791	0.0095	0.0381	79.10	79.10	24.72	0.0891	0.9786
TL28383N	0.9973	0.0043	0.0091	63.10	65.50	49.57	0.3098	0.9972
YK38282N	0.9708	0.0387	0.0781	6.30	12.50	10.57	0.0837	0.9599
YK38383N	0.8831	0.0917	0.1783	5.40	9.00	26.43	0.2770	0.8703
YK38686N	0.9711	0.0574	0.1700	9.80	25.20	10.34	0.2405	0.8810
YM18080N	0.9908	0.0359	0.0535	9.10	18.10	6.27	0.0245	0.9889
YM18383N	0.6288	0.0347	0.0061	3.00	23.20	27.95	0.7064	0.6031
Moyenne	0.8878	0.0541	0.1080	42.73	50.08	37.92	0.3555	0.8778
Ecart type	0.1892	0.0485	0.1025	38.03	37.02	25.82	0.3743	0.1936
Mini	0.2536	0.0011	0.0006	0.90	3.10	4.65	0.0245	0.2165
Maxi	0.9973	0.1895	0.3929	157.50	157.50	98.89	1.6603	0.9972

Comparaison Calé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BG28282N	0.9695	0.0738	0.1165	9.00	61.00	1.26	0.1442	0.9255
BG28383N	0.9910	0.0229	0.0133	3.20	8.00	2.24	0.0700	0.9647
BK38282N	0.9885	0.0271	0.0659	10.10	27.50	1.30	0.0354	0.9829
BK38383N	0.9898	0.0147	0.0027	3.20	8.00	0.73	0.0348	0.9831
BM28484N	0.8580	0.3825	0.2623	0.70	2.50	19.44	0.2056	0.8470
BM28585N	0.9608	0.0281	0.0240	6.10	39.90	2.26	0.1106	0.9436
BS28383N	0.9651	0.1678	0.0535	0.50	4.90	1.95	0.2582	0.8610
BS28585N	0.9092	0.2476	0.2449	7.10	81.10	1.91	0.5078	0.7004
BZ37878N	0.9729	0.0587	0.0905	4.30	53.10	5.20	0.0855	0.9582
BZ38080N	0.9873	0.0390	0.1052	2.70	32.70	2.09	0.0690	0.9650
DO18484N	0.8945	0.0845	0.2186	10.70	49.70	7.76	0.4832	0.7201
DO18686N	0.8808	0.1653	0.0434	6.40	41.60	4.32	0.4456	0.7442
DW18080N	0.9849	0.0140	0.0477	8.40	26.80	6.12	0.0564	0.9714
DW18181N	0.9779	0.0154	0.0195	10.70	46.30	0.70	0.0564	0.9717
DW18282N	0.9879	0.0184	0.0124	0.00	30.20	3.96	0.0473	0.9762
DW18383N	0.9938	0.0292	0.0367	0.40	8.00	0.43	0.0659	0.9665
DW18484N	0.9738	0.0357	0.0398	4.00	15.40	13.81	0.0951	0.9517
KN27777N	0.9427	0.0170	0.1615	0.70	21.50	1.01	0.2076	0.8905
KN28383N	0.9520	0.0502	0.0687	1.50	13.90	0.85	0.2120	0.8876
KN28484N	0.9643	0.1352	0.1863	1.90	15.70	1.31	0.1339	0.9309
LA18282N	0.9109	0.1130	0.1034	6.80	44.20	1.20	0.3474	0.8087
LA18383N	0.9259	0.2161	0.3283	0.40	14.20	9.03	0.3371	0.8143
LA18484N	0.9443	0.0519	0.0378	10.00	42.00	0.15	0.3434	0.8110
MW18383N	0.9952	0.0183	0.0074	1.60	11.20	0.26	0.0438	0.9779
SM18383N	0.9416	0.0179	0.0266	0.20	11.20	0.00	0.1811	0.9049
SM18484N	0.9520	0.0994	0.0672	6.00	22.20	10.15	0.1913	0.8999
SM18585N	0.8738	0.2501	0.3638	6.90	70.30	3.18	0.3191	0.8255
SN17878N	0.9130	0.2108	0.2757	5.70	61.10	2.97	0.2201	0.8834
SN18181N	0.8805	0.0212	0.0498	2.90	94.50	1.04	0.2795	0.8489
SN18484N	0.9498	0.1203	0.1857	2.40	23.60	0.74	0.2727	0.8529
TD38383N	0.9683	0.0731	0.0120	3.40	15.20	0.78	0.1192	0.9392
TD38484N	0.9761	0.0654	0.1457	2.10	33.90	4.70	0.0736	0.9632
TL28282N	0.9766	0.0396	0.0848	24.30	63.30	1.89	0.0909	0.9550
TL28383N	0.9810	0.0196	0.0333	16.50	33.50	5.71	0.1765	0.9094
YK38282N	0.9448	0.0496	0.0593	1.50	11.70	3.57	0.3429	0.8098
YK38383N	0.9310	0.2078	0.2618	0.00	5.40	1.41	0.4986	0.7053
YK38686N	0.9823	0.0498	0.0623	1.80	16.60	8.10	0.1797	0.9060
YM18080N	0.9855	0.0146	0.0038	0.80	19.80	0.82	0.0706	0.9641
YM18383N	0.9318	0.1013	0.1006	2.90	9.50	10.63	0.2237	0.8836
Moyenne	0.9515	0.0863	0.1031	4.82	30.54	3.72	0.1958	0.8924
Ecart type	0.0375	0.0860	0.0976	5.00	22.80	4.22	0.1380	0.0812
Mini	0.8580	0.0140	0.0027	0.00	2.50	0.00	0.0348	0.7004
Maxi	0.9952	0.3825	0.3638	24.30	94.50	19.44	0.5078	0.9831

Comparaison Prédéterminé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BG28282N	0.9336	0.0883	0.1471	89.70	95.10	36.25	0.3360	0.8941
BG28383N	0.9860	0.0068	0.0181	17.90	26.10	41.34	0.3172	0.9586
BK38282N	0.9890	0.0088	0.0104	80.50	80.50	43.58	0.2605	0.9827
BK38383N	0.9671	0.0271	0.1166	24.70	24.70	52.31	0.3294	0.9606
BM28484N	0.6910	0.5117	0.5866	1.60	4.00	13.89	0.4805	0.6834
BM28585N	0.9645	0.0369	0.0326	81.90	90.50	62.40	0.5244	0.9476
BS28383N	0.8870	0.2723	0.2420	11.30	13.50	62.34	0.5523	0.7609
BS28585N	0.7658	0.2970	0.3112	14.40	122.00	3.54	0.6172	0.6224
BZ37878N	0.9508	0.0506	0.0899	73.60	78.40	26.31	0.2265	0.9340
BZ38080N	0.9366	0.0769	0.0477	75.80	76.40	39.35	0.2998	0.8857
DO18484N	0.8337	0.1797	0.3176	30.30	71.50	20.40	0.5758	0.6578
DO18686N	0.3270	0.2872	0.3755	62.50	70.10	89.35	1.0511	0.2610
DW18080N	0.9422	0.0152	0.0394	72.50	78.70	52.11	0.4010	0.9300
DW18181N	0.9460	0.0515	0.1530	49.50	82.50	18.99	0.1585	0.9241
DW18282N	0.9815	0.0586	0.0354	38.90	47.10	16.88	0.1047	0.9627
DW18383N	0.9831	0.0144	0.0008	10.20	15.40	14.84	0.1051	0.9536
DW18484N	0.9208	0.2092	0.3531	16.60	27.00	28.17	0.1958	0.9055
KN27777N	0.9177	0.0852	0.2796	35.90	42.90	58.15	0.4103	0.8710
KN28383N	0.8643	0.0539	0.0415	7.90	20.30	19.02	0.3759	0.7936
KN28484N	0.9601	0.1677	0.2322	14.20	20.60	21.90	0.2132	0.9248
LA18282N	0.1466	0.2057	0.3885	113.20	113.20	98.91	1.3913	0.1176
LA18383N	0.1660	0.2949	0.4964	33.80	34.40	96.39	1.2614	0.2024
LA18484N	0.7562	0.1376	0.1780	68.50	95.10	36.53	0.6977	0.6181
MW18383N	0.9600	0.0424	0.1610	57.70	57.70	47.19	0.2895	0.9369
SM18383N	0.8275	0.0019	0.0016	6.20	19.80	16.49	0.3773	0.7960
SM18484N	0.9100	0.1615	0.2581	0.80	26.60	3.11	0.2752	0.8520
SM18585N	0.5424	0.1298	0.0952	150.60	150.60	89.79	1.0514	0.5528
SN17878N	0.9000	0.2135	0.2706	41.60	93.40	38.17	0.4156	0.8687
SN18181N	0.7803	0.0096	0.0079	116.50	126.70	51.25	0.6087	0.7419
SN18484N	0.8808	0.1542	0.2938	12.80	37.80	17.67	0.3735	0.7976
TD38383N	0.9672	0.0742	0.0083	28.20	42.00	61.72	0.6243	0.9326
TD38484N	0.9622	0.0911	0.2009	25.40	48.60	20.31	0.1087	0.9516
TL28282N	0.9525	0.0491	0.1228	54.80	109.80	22.35	0.1710	0.9281
TL28383N	0.9793	0.0154	0.0425	46.60	79.40	41.03	0.4337	0.9088
YK38282N	0.8826	0.0883	0.1373	7.80	22.20	14.52	0.4257	0.7528
YK38383N	0.7792	0.2995	0.4401	5.40	12.80	24.65	0.6042	0.6003
YK38686N	0.9292	0.1072	0.2323	11.60	33.40	19.29	0.4178	0.7669
YM18080N	0.9685	0.0505	0.0498	9.90	31.30	5.50	0.1112	0.9443
YM18383N	0.6518	0.1360	0.1067	0.10	21.90	20.29	0.6925	0.5733
Moyenne	0.8382	0.1221	0.1775	41.06	57.54	37.08	0.4581	0.7861
Ecart type	0.2100	0.1116	0.1515	36.63	37.67	25.47	0.3040	0.2137
Mini	0.1466	0.0019	0.0008	0.10	4.00	3.11	0.1047	0.1176
Maxi	0.9890	0.5117	0.5866	150.60	150.60	98.91	1.3913	0.9827

Comparaison Prédéterminé/Calé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BK38181N	0.9826	0.0128	0.0365	93.40	93.40	43.92	0.2431	0.9825
BK38484N	0.9031	0.0425	0.1265	42.60	42.60	63.99	0.5122	0.9043
BK38585N	0.9739	0.0831	0.0739	135.30	135.30	59.00	0.4427	0.9557
BM28383N	0.6232	0.2254	0.5091	0.90	4.50	24.39	0.6140	0.6276
BS28181N	0.8318	0.1073	0.0464	2.00	52.00	5.30	0.3648	0.8149
BS28282N	0.7836	0.0355	0.1420	22.40	32.40	36.86	0.4426	0.7693
BS28484N	0.8695	0.0214	0.1781	0.60	12.20	16.37	0.2212	0.8867
DO18383N	0.0892	0.1125	0.0526	104.20	105.80	91.66	1.1274	0.0766
LA18181N	0.1443	0.1392	0.0228	137.10	174.50	70.16	1.3280	0.1484
MW18484N	0.8485	0.1207	0.3283	2.60	47.80	7.19	0.2910	0.8493
SM18181N	0.7750	0.0307	0.0326	103.30	103.30	53.20	0.5904	0.7718
SM18686N	0.4689	0.0369	0.1024	42.40	43.40	75.39	1.0529	0.4583
SN17777N	0.9778	0.0196	0.0508	76.30	76.50	36.65	0.1777	0.9653
SN17979N	0.9899	0.0070	0.0062	80.60	83.60	28.12	0.1395	0.9834
SN18080N	0.9110	0.0541	0.0285	60.00	76.00	30.74	0.2402	0.8934
SN18383N	0.3474	0.0161	0.0954	42.00	47.40	76.17	1.0801	0.3334
TD38181N	0.9930	0.0052	0.0223	13.00	47.20	6.14	0.0314	0.9920
TL28484N	0.9902	0.0073	0.0024	0.90	39.70	7.14	0.0385	0.9898
YM18181N	0.9651	0.0026	0.0134	176.60	176.80	81.25	1.1042	0.9636
YM18686N	0.9473	0.0089	0.0857	24.00	35.00	26.20	0.3102	0.9427
Moyenne	0.7708	0.0544	0.0978	58.01	71.47	41.99	0.5176	0.7654
Ecart type	0.2856	0.0591	0.1231	53.21	48.26	27.75	0.4029	0.2864
Mini	0.0892	0.0026	0.0024	0.60	4.50	5.30	0.0314	0.0766
Maxi	0.9930	0.2254	0.5091	176.60	176.80	91.66	1.3280	0.9920

Comparaison Calé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BK38181N	0.9951	0.0081	0.0148	4.70	24.70	0.78	0.0195	0.9907
BK38484N	0.9805	0.0400	0.0864	1.00	12.40	3.33	0.0830	0.9577
BK38585N	0.9920	0.0104	0.0287	6.90	26.50	2.49	0.0290	0.9857
BM28383N	0.9451	0.2775	0.1458	0.30	1.30	7.50	0.1514	0.9203
BS28181N	0.9676	0.0878	0.0687	1.30	31.50	1.41	0.1833	0.9044
BS28282N	0.8993	0.3372	0.2182	1.50	24.10	5.58	0.4492	0.7424
BS28484N	0.9158	0.1570	0.2813	1.20	10.40	0.50	0.3802	0.7881
DO18383N	0.9565	0.1940	0.0070	13.20	37.00	3.85	0.2109	0.8918
LA18181N	0.9528	0.0715	0.0797	9.00	51.00	2.00	0.2363	0.8749
MW18484N	0.9547	0.1369	0.1583	7.00	26.60	6.95	0.0959	0.9536
SM18181N	0.8722	0.0153	0.0565	3.50	80.10	0.78	0.2049	0.8926
SM18686N	0.9280	0.0932	0.1659	4.40	16.00	7.57	0.2508	0.8667
SN17777N	0.9637	0.0453	0.0672	11.10	50.10	0.95	0.1635	0.9167
SN17979N	0.8771	0.2416	0.2505	26.10	120.70	8.93	0.3726	0.7978
SN18080N	0.8955	0.0556	0.2129	4.50	96.70	6.48	0.2756	0.8539
SN18383N	0.9189	0.0001	0.0757	1.20	24.00	1.14	0.2991	0.8376
TD38181N	0.9719	0.0062	0.0280	2.20	59.60	0.33	0.0785	0.9602
TL28484N	0.9282	0.0443	0.1063	4.80	54.80	0.90	0.1841	0.9039
YM18181N	0.9479	0.0318	0.0650	2.00	41.80	1.66	0.1427	0.9262
YM18686N	0.9240	0.0280	0.0047	2.30	27.90	4.95	0.1361	0.9298
Moyennes	0.9393	0.0941	0.1061	5.41	40.86	3.40	0.1973	0.8947
Ecart type	0.0357	0.0988	0.0837	6.03	30.08	2.84	0.1162	0.0660
Mini	0.8722	0.0001	0.0047	0.30	1.30	0.33	0.0195	0.7424
Maxi	0.9951	0.3372	0.2813	26.10	120.70	8.93	0.4492	0.9907

Comparaison Prédéterminé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BK38181N	0.9789	0.0029	0.0174	102.00	102.00	43.32	0.2659	0.9737
BK38484N	0.8806	0.0013	0.0369	42.00	42.00	63.02	0.5525	0.8596
BK38585N	0.9511	0.0721	0.0440	129.00	130.00	58.17	0.4712	0.9125
BM28383N	0.5869	0.4335	0.6154	0.90	4.70	22.50	0.6561	0.5622
BS28181N	0.7924	0.2071	0.1296	7.50	55.50	4.73	0.5281	0.7153
BS28282N	0.7108	0.3015	0.0752	20.90	36.70	33.33	0.6832	0.5771
BS28484N	0.6845	0.0899	0.3290	2.20	19.40	6.44	0.6100	0.6247
DO18383N	0.0093	0.2936	0.0850	105.30	111.90	91.28	1.1343	0.0078
LA18181N	0.1149	0.2118	0.0568	147.10	168.30	71.18	1.3153	0.1080
MW18484N	0.8874	0.1797	0.3289	8.90	40.70	10.67	0.2863	0.8691
SM18181N	0.6952	0.0208	0.0081	103.20	118.60	53.36	0.6922	0.6679
SM18686N	0.4468	0.0603	0.0701	46.70	47.30	77.30	1.0619	0.4159
SN17777N	0.9206	0.0256	0.0152	83.40	83.60	34.75	0.3263	0.8680
SN17979N	0.8454	0.2373	0.2474	56.80	102.00	22.26	0.4402	0.7702
SN18080N	0.7421	0.1360	0.2780	79.00	132.20	32.63	0.5486	0.7030
SN18383N	0.1363	0.0190	0.0164	40.70	51.10	75.86	1.1405	0.1255
TD38181N	0.9638	0.0004	0.0523	13.30	77.90	6.02	0.1220	0.9486
TL28484N	0.9171	0.0347	0.1061	6.30	65.10	6.70	0.2120	0.8900
YM18181N	0.9353	0.0298	0.0540	179.50	181.70	85.08	1.1021	0.9142
YM18686N	0.8806	0.0308	0.0632	25.00	44.80	18.49	0.3847	0.8758
Moyenne	0.7040	0.1194	0.1315	59.99	80.78	40.85	0.6267	0.6695
Ecart type	0.2998	0.1249	0.1541	53.37	48.68	29.06	0.3496	0.2942
Mini	0.0093	0.0004	0.0081	0.90	4.70	4.73	0.1220	0.0078
Maxi	0.9789	0.4335	0.6154	179.50	181.70	91.28	1.3153	0.9737

Comparaison Calé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BG28282N	0.9629	0.0792	0.1650	23.00	67.60	2.62	0.1299	0.9350
BG28383N	0.9850	0.0550	0.1015	4.40	14.00	4.07	0.0622	0.9712
BK38282N	0.9892	0.0242	0.0630	5.50	27.50	0.21	0.0444	0.9780
BK38383N	0.9911	0.0146	0.0144	5.50	9.70	5.60	0.0365	0.9834
BM28484N	0.9625	0.2481	0.1129	0.50	1.70	5.56	0.1078	0.9417
BM28585N	0.9442	0.0024	0.0304	10.60	54.20	3.59	0.1418	0.9275
BS28383N	0.9656	0.1554	0.0813	1.50	5.50	5.19	0.2253	0.8805
BS28585N	0.9059	0.2035	0.2932	39.90	101.30	7.83	0.4257	0.7576
BZ37878N	0.9707	0.0420	0.0719	11.60	51.20	2.10	0.0856	0.9571
BZ38080N	0.9941	0.0130	0.0445	12.70	27.90	0.70	0.0263	0.9878
DO18484N	0.8571	0.0348	0.1856	25.00	66.00	21.28	0.4988	0.7114
DO18686N	0.8450	0.1412	0.0579	2.20	44.00	1.29	0.5056	0.7035
DW18080N	0.9497	0.0063	0.1201	26.00	61.00	7.65	0.1424	0.9284
DW18181N	0.9698	0.0046	0.0620	18.00	75.80	5.08	0.0800	0.9600
DW18282N	0.9781	0.0510	0.0127	14.10	41.90	3.01	0.0689	0.9659
DW18383N	0.9572	0.0485	0.1176	13.40	28.60	4.18	0.1514	0.9258
DW18484N	0.8873	0.1980	0.3689	13.60	34.20	2.80	0.2680	0.8695
KN27777N	0.9162	0.0405	0.2603	4.40	27.60	2.02	0.2629	0.8594
KN28383N	0.9635	0.0553	0.0507	4.60	15.40	1.07	0.2082	0.8858
KN28484N	0.9462	0.1037	0.1701	8.80	26.20	0.58	0.1554	0.9210
LA18282N	0.8605	0.0188	0.0085	7.10	48.70	11.82	0.3775	0.7908
LA18383N	0.9408	0.0790	0.2396	2.30	13.50	9.75	0.1800	0.9061
LA18484N	0.9344	0.1407	0.0406	4.30	51.50	5.66	0.2403	0.8652
MW18383N	0.9823	0.0154	0.0345	16.00	30.20	2.81	0.0888	0.9577
SM18181N	0.9120	0.0032	0.0469	6.50	71.10	0.67	0.2456	0.8695
SM18383N	0.9114	0.0597	0.0283	5.20	19.00	0.27	0.2309	0.8783
SM18484N	0.8830	0.2042	0.3556	8.60	37.40	5.28	0.3023	0.8391
SM18585N	0.8545	0.2523	0.3852	8.10	85.30	3.49	0.3603	0.8006
SN17878N	0.9072	0.2037	0.2405	0.60	65.20	0.13	0.2289	0.8781
SN18181N	0.9058	0.0156	0.0561	13.50	87.30	1.56	0.2459	0.8696
SN18484N	0.8951	0.1937	0.3522	10.80	40.00	8.47	0.3477	0.8099
TD38383N	0.9616	0.0806	0.0391	0.10	13.90	0.39	0.1264	0.9347
TD38484N	0.9853	0.0472	0.1296	4.00	23.00	3.71	0.0533	0.9731
TL28282N	0.9639	0.0591	0.1597	28.00	76.60	2.18	0.1224	0.9398
TL28383N	0.9860	0.0055	0.0184	2.70	25.10	2.65	0.1355	0.9297
YK38282N	0.9283	0.0402	0.0364	10.40	21.00	7.62	0.3095	0.8306
YK38383N	0.8898	0.1844	0.2583	1.50	7.90	3.52	0.5161	0.6880
YK38686N	0.9668	0.0912	0.1582	14.90	28.10	19.94	0.1094	0.9461
YM18080N	0.9800	0.0299	0.0147	6.10	25.30	0.41	0.0887	0.9558
YM18383N	0.8793	0.1280	0.1813	3.60	12.60	14.49	0.2955	0.8452
Moyenne	0.9367	0.0843	0.1292	9.99	39.10	4.78	0.2058	0.8890
Ecart type	0.0437	0.0757	0.1117	8.71	25.46	4.93	0.1339	0.0790
Mini	0.8450	0.0024	0.0085	0.10	1.70	0.13	0.0263	0.6880
Maxi	0.9941	0.2523	0.3852	39.90	101.30	21.28	0.5161	0.9878

Comparaison Prédéterminé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BG28282N	0.9126	0.1028	0.1970	36.30	87.50	24.64	0.2769	0.8811
BG28383N	0.9783	0.0513	0.0875	38.60	41.00	72.10	0.4763	0.9653
BK38282N	0.9885	0.0123	0.0417	55.80	59.60	35.83	0.2068	0.9753
BK38383N	0.9766	0.0143	0.0025	6.90	14.50	21.17	0.1315	0.9668
BM28484N	0.9508	0.2868	0.1846	0.00	1.80	8.33	0.1705	0.9340
BM28585N	0.9401	0.0105	0.0272	68.00	90.60	51.64	0.6853	0.8940
BS28383N	0.9495	0.2076	0.1491	7.00	9.20	33.77	0.3327	0.8447
BS28585N	0.7644	0.2937	0.3367	56.50	138.30	19.95	0.6078	0.6401
BZ37878N	0.9674	0.0407	0.0722	10.20	54.40	9.39	0.1069	0.9522
BZ38080N	0.9801	0.0611	0.0233	15.70	39.90	2.47	0.1364	0.9366
DO18484N	0.8308	0.2198	0.3899	24.20	72.60	21.92	0.5923	0.6493
DO18686N	0.7451	0.0327	0.0608	15.40	53.40	25.90	0.6049	0.6368
DW18080N	0.9183	0.0310	0.1208	48.70	88.10	42.93	0.3790	0.9021
DW18181N	0.9630	0.0269	0.0917	45.00	85.20	6.79	0.1470	0.9445
DW18282N	0.9756	0.0557	0.0150	2.40	42.80	3.66	0.0823	0.9619
DW18383N	0.9397	0.0332	0.0849	0.80	29.40	11.24	0.1972	0.9072
DW18484N	0.8869	0.1589	0.3362	36.90	45.10	43.10	0.3635	0.8643
KN27777N	0.9109	0.0097	0.2381	6.50	26.50	13.28	0.3057	0.8417
KN28383N	0.9527	0.0727	0.0967	0.40	18.60	13.68	0.2496	0.8800
KN28484N	0.9374	0.0770	0.1545	17.40	36.40	34.89	0.3093	0.9117
LA18282N	0.7935	0.1455	0.0995	5.10	59.70	24.40	0.4741	0.7258
LA18383N	0.9144	0.1736	0.2459	9.20	17.20	33.21	0.4062	0.8810
LA18484N	0.8577	0.0816	0.0169	6.10	73.50	0.23	0.4192	0.7876
MW18383N	0.9441	0.0032	0.0017	38.60	59.60	37.63	0.3038	0.9213
SM18181N	0.9032	0.0375	0.0052	13.30	70.30	6.44	0.2893	0.8495
SM18383N	0.9059	0.0585	0.0256	8.90	18.50	12.50	0.2837	0.8657
SM18484N	0.8750	0.1772	0.3055	17.20	35.60	20.84	0.3471	0.8204
SM18585N	0.7774	0.1671	0.3175	82.20	136.40	29.89	0.6659	0.6863
SN17878N	0.9057	0.1965	0.2271	65.00	90.60	43.70	0.5169	0.8723
SN18181N	0.8630	0.0500	0.0087	23.80	96.60	7.89	0.3939	0.7968
SN18484N	0.8945	0.1813	0.3301	15.20	36.40	20.61	0.4058	0.8085
TD38383N	0.9639	0.0827	0.0402	6.90	14.70	13.48	0.1490	0.9323
TD38484N	0.9539	0.0893	0.1844	23.60	46.60	18.67	0.1521	0.9452
TL28282N	0.9658	0.0550	0.1513	43.90	79.90	8.65	0.1259	0.9399
TL28383N	0.9876	0.0027	0.0075	14.40	28.80	5.95	0.1615	0.9182
YK38282N	0.9053	0.0629	0.0727	9.10	22.10	5.48	0.3583	0.8028
YK38383N	0.8735	0.2206	0.3111	6.60	11.00	34.51	0.6124	0.6617
YK38686N	0.9763	0.0618	0.1440	13.30	25.90	13.78	0.2417	0.8774
YM18080N	0.9850	0.0604	0.0110	45.40	46.60	37.61	0.2813	0.9539
YM18383N	0.8387	0.1140	0.1764	52.30	52.90	232.37	3.1620	0.7456
Moyenne	0.9138	0.0955	0.1348	24.82	51.45	27.61	0.4028	0.8570
Ecart type	0.0645	0.0792	0.1160	21.65	32.87	36.70	0.4775	0.0984
Mini	0.7451	0.0027	0.0017	0.00	1.80	0.23	0.0823	0.6368
Maxi	0.9885	0.2937	0.3899	82.20	138.30	232.37	3.1620	0.9753

Comparaison Prédéterminé/Calé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BG28282N	0.9517	0.0236	0.0320	59.30	81.30	26.56	0.1797	0.9409
BG28383N	0.9884	0.0037	0.0140	34.20	34.20	65.36	0.6028	0.9870
BK38282N	0.9982	0.0119	0.0212	61.30	61.30	35.69	0.1723	0.9977
BK38383N	0.9889	0.0003	0.0120	12.40	12.40	25.35	0.1075	0.9839
BM28484N	0.9958	0.0387	0.0718	0.50	0.50	13.16	0.0551	0.9896
BM28585N	0.9744	0.0082	0.0576	57.40	71.20	46.39	0.7395	0.9389
BS28383N	0.9787	0.0522	0.0678	5.50	6.30	27.16	0.1465	0.9573
BS28585N	0.9126	0.0902	0.0435	16.60	102.20	11.24	0.2533	0.8716
BZ37878N	0.9980	0.0013	0.0003	21.80	38.00	11.26	0.0289	0.9975
BZ38080N	0.9883	0.0741	0.0678	3.00	19.40	3.19	0.1334	0.9408
DO18484N	0.9488	0.1849	0.2044	0.80	35.80	0.81	0.2361	0.8817
DO18686N	0.9467	0.1086	0.1187	17.60	32.60	24.93	0.2030	0.9066
DW18080N	0.9820	0.0248	0.0007	74.70	74.70	46.99	0.3281	0.9627
DW18181N	0.9941	0.0223	0.0297	27.00	42.60	12.51	0.0814	0.9813
DW18282N	0.9969	0.0047	0.0023	11.70	23.30	6.48	0.0142	0.9966
DW18383N	0.9858	0.0153	0.0327	14.20	16.60	14.80	0.0547	0.9843
DW18484N	0.9857	0.0391	0.0327	23.30	23.70	39.20	0.2614	0.9837
KN27777N	0.9977	0.0308	0.0223	10.90	11.10	14.99	0.0432	0.9865
KN28383N	0.9924	0.0174	0.0460	5.00	8.80	12.74	0.0724	0.9809
KN28484N	0.9917	0.0267	0.0155	26.20	29.80	35.27	0.1960	0.9888
LA18282N	0.9004	0.1643	0.1080	2.00	36.40	14.27	0.2135	0.8870
LA18383N	0.9774	0.0947	0.0063	11.50	14.90	39.14	0.2865	0.9708
LA18484N	0.9501	0.0591	0.0575	10.40	53.60	6.24	0.1386	0.9540
MW18383N	0.9731	0.0122	0.0362	54.60	56.40	39.33	0.2527	0.9657
SM18181N	0.9940	0.0407	0.0417	6.80	23.80	7.16	0.0569	0.9833
SM18383N	0.9925	0.0012	0.0027	3.70	8.30	12.20	0.0710	0.9893
SM18484N	0.9733	0.0270	0.0501	8.60	24.40	14.78	0.1180	0.9697
SM18585N	0.9263	0.0852	0.0677	74.10	92.30	34.58	0.6614	0.8915
SN17878N	0.9900	0.0072	0.0134	65.60	81.40	43.89	0.3923	0.9891
SN18181N	0.9575	0.0656	0.0648	10.30	62.30	6.23	0.1465	0.9434
SN18484N	0.9982	0.0123	0.0221	26.00	26.00	26.81	0.0953	0.9947
TD38383N	0.9985	0.0022	0.0011	7.00	7.00	13.14	0.0293	0.9958
TD38484N	0.9781	0.0421	0.0549	27.60	38.80	21.58	0.1052	0.9730
TL28282N	0.9985	0.0042	0.0083	15.90	19.70	6.33	0.0098	0.9978
TL28383N	0.9938	0.0082	0.0259	17.10	21.90	8.84	0.0311	0.9874
YK38282N	0.9919	0.0227	0.0363	1.30	7.30	1.99	0.0207	0.9900
YK38383N	0.9948	0.0361	0.0528	5.10	5.10	29.93	0.1490	0.9828
YK38686N	0.9683	0.0294	0.0142	1.60	19.80	5.14	0.1541	0.9226
YM18080N	0.9968	0.0305	0.0257	39.30	40.50	38.18	0.2578	0.9955
YM18383N	0.9936	0.0140	0.0049	48.70	48.70	190.30	4.5353	0.9569
Moyenne	0.9786	0.0384	0.0397	23.02	35.36	25.85	0.2909	0.9650
Ecart type	0.0243	0.0423	0.0388	22.11	26.17	30.75	0.7086	0.0353
Mini	0.9004	0.0003	0.0003	0.50	0.50	0.81	0.0098	0.8716
Maxi	0.9985	0.1849	0.2044	74.70	102.20	190.30	4.5353	0.9978

Comparaison Calé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BK38181N	0.9874	0.0042	0.0251	8.10	31.90	0.34	0.0393	0.9806
BK38484N	0.9810	0.0396	0.0945	4.90	13.90	2.06	0.0702	0.9652
BK38585N	0.9792	0.0220	0.0028	23.10	47.50	1.17	0.0744	0.9639
BM28383N	0.8907	0.3371	0.3063	1.80	3.20	15.00	0.2431	0.8744
BS28181N	0.9853	0.0346	0.0143	2.80	16.00	4.63	0.1508	0.9216
BS28282N	0.8992	0.2481	0.1061	8.30	29.70	0.85	0.3338	0.8131
BS28484N	0.7713	0.2782	0.5257	9.10	21.50	33.17	0.6240	0.6219
DO18383N	0.9047	0.2022	0.1736	15.90	57.10	12.11	0.3718	0.7951
LA18181N	0.9544	0.0129	0.0462	2.00	50.60	6.13	0.1770	0.9073
MW18484N	0.8827	0.2032	0.3846	25.20	52.60	8.75	0.2725	0.8641
SM18686N	0.8805	0.1042	0.1880	1.70	24.70	9.91	0.3297	0.8190
SN17777N	0.9515	0.0575	0.0472	6.80	62.00	3.36	0.1545	0.9197
SN17979N	0.8703	0.2289	0.2447	34.90	110.70	3.52	0.3677	0.7977
SN18080N	0.8657	0.0566	0.2366	6.10	110.70	10.60	0.3610	0.7997
SN18383N	0.9124	0.0223	0.1003	6.10	24.70	2.09	0.3470	0.8101
TD38181N	0.9828	0.0045	0.0323	7.00	44.40	0.52	0.0664	0.9665
TL28484N	0.9032	0.0375	0.1405	13.00	65.00	1.91	0.2345	0.8762
YM18181N	0.9371	0.0406	0.0902	15.40	58.00	0.19	0.1646	0.9179
YM18686N	0.8923	0.0585	0.0009	6.30	38.90	10.48	0.2463	0.8697
Moyenne	0.9175	0.1049	0.1453	10.45	45.43	6.67	0.2436	0.8676
Ecart type	0.0555	0.1070	0.1420	8.95	28.97	7.89	0.1446	0.0866
Mini	0.7713	0.0042	0.0009	1.70	3.20	0.19	0.0393	0.6219
Maxi	0.9874	0.3371	0.5257	34.90	110.70	33.17	0.6240	0.9806

Comparaison Prédéterminé/Observé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BK38181N	0.9871	0.0123	0.0171	66.20	71.20	33.20	0.1875	0.9797
BK38484N	0.9664	0.0378	0.1095	5.20	19.20	14.29	0.1440	0.9458
BK38585N	0.9222	0.0361	0.0166	33.30	98.70	2.30	0.2194	0.8881
BM28383N	0.8930	0.3253	0.2763	4.60	4.60	82.50	0.7106	0.8259
BS28181N	0.9660	0.1311	0.0803	9.60	28.00	14.39	0.2188	0.8958
BS28282N	0.8728	0.3532	0.2390	8.90	34.90	2.88	0.4745	0.7361
BS28484N	0.7533	0.3130	0.5804	14.40	25.00	50.00	0.6645	0.6017
DO18383N	0.8445	0.2486	0.2156	47.20	72.40	48.26	0.6689	0.7467
LA18181N	0.8948	0.0112	0.0235	49.40	76.20	9.16	0.4610	0.7808
MW18484N	0.8163	0.1300	0.3219	12.60	59.40	1.08	0.3887	0.7862
SM18686N	0.8129	0.0830	0.0642	0.60	29.80	1.62	0.7208	0.7138
SN17777N	0.9590	0.0423	0.0399	8.60	64.00	4.94	0.2535	0.8693
SN17979N	0.8189	0.2785	0.3045	82.70	120.90	38.21	0.5352	0.7480
SN18080N	0.8790	0.0200	0.1634	23.20	97.40	5.61	0.6074	0.7586
SN18383N	0.9031	0.0205	0.1100	2.20	27.40	7.03	0.3668	0.8037
TD38181N	0.9819	0.0029	0.0369	7.90	44.90	0.11	0.0695	0.9652
TL28484N	0.8976	0.0448	0.1484	25.10	65.50	20.28	0.2867	0.8660
YM18181N	0.9049	0.0293	0.0619	266.40	268.60	128.36	2.2977	0.8850
YM18686N	0.9196	0.0469	0.0281	79.00	80.00	77.58	1.3453	0.8934
Moyenne	0.8944	0.1140	0.1493	39.32	67.79	28.52	0.5590	0.8258
Ecart type	0.0641	0.1230	0.1456	60.89	57.62	35.18	0.5136	0.0971
Mini	0.7533	0.0029	0.0166	0.60	4.60	0.11	0.0695	0.6017
Maxi	0.9871	0.3532	0.5804	266.40	268.60	128.36	2.2977	0.9797

Comparaison Prédéterminé/Calé

Nom de Fich	Corr_dec	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corr_jou
BK38181N	0.9984	0.0081	0.0079	74.30	74.90	32.98	0.1592	0.9983
BK38484N	0.9966	0.0018	0.0150	10.10	11.90	16.02	0.0807	0.9809
BK38585N	0.9315	0.0141	0.0138	10.20	88.20	3.52	0.1708	0.9126
BM28383N	0.9718	0.0119	0.0300	2.80	2.80	58.70	0.7623	0.9191
BS28181N	0.9821	0.0965	0.0660	6.80	19.60	10.23	0.0815	0.9711
BS28282N	0.9669	0.1051	0.1329	0.60	20.20	3.69	0.2172	0.8976
BS28484N	0.9835	0.0348	0.0547	5.30	7.10	12.64	0.0890	0.9691
DO18383N	0.9857	0.0464	0.0420	63.10	72.10	53.85	0.4684	0.9769
LA18181N	0.9328	0.0240	0.0227	47.40	63.20	3.23	0.2738	0.8886
MW18484N	0.9566	0.0732	0.0627	12.60	28.40	9.04	0.1475	0.9263
SM18686N	0.9340	0.1872	0.2521	1.10	20.90	9.20	0.5264	0.9080
SN17777N	0.9941	0.0152	0.0074	1.80	19.40	1.53	0.1268	0.9417
SN17979N	0.9752	0.0496	0.0598	117.60	119.60	40.31	0.2714	0.9702
SN18080N	0.9815	0.0767	0.0732	17.10	58.30	18.13	0.3837	0.9597
SN18383N	0.9958	0.0019	0.0097	3.90	7.70	8.94	0.0401	0.9875
TD38181N	0.9998	0.0016	0.0045	0.90	6.70	0.41	0.0039	0.9981
TL28484N	0.9991	0.0073	0.0079	38.10	41.90	21.77	0.0777	0.9963
YM18181N	0.9603	0.0113	0.0283	251.00	251.00	127.92	2.9555	0.9590
YM18686N	0.9941	0.0117	0.0272	72.70	74.10	98.37	1.6512	0.9853
Moyenne	0.9758	0.0410	0.0483	38.81	52.00	27.92	0.4467	0.9551
Ecart type	0.0231	0.0484	0.0589	61.22	58.63	34.88	0.7154	0.0360
Mini	0.9315	0.0016	0.0045	0.60	2.80	0.41	0.0039	0.8886
Maxi	0.9998	0.1872	0.2521	251.00	251.00	127.92	2.9555	0.9983

ANNEXES

Article paru dans Hydrologie Continentale, Volume 5, n° 2, 1990.

Sélection de critères numériques de calage
dans le cadre d'une modélisation pluie débit
en zone de savane soudanaise.

Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise

Eric SERVAT (1) et Alain DEZETTER (1)

RÉSUMÉ

Dans le cadre de travaux de modélisation pluie-débit menés en zone de savane soudanaise dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, on cherche à reconstituer les apports à l'exutoire de bassins versants au pas de temps décadaire. Du fait de l'utilisation d'algorithmes employant des procédures de calage automatique des paramètres, il est apparu nécessaire de procéder à un choix en ce qui concerne les critères numériques de calage à utiliser. Les auteurs présentent les algorithmes, les données et les critères qu'ils ont utilisés. Ils analysent ensuite les résultats obtenus à l'issue des calages entrepris. Cette analyse se fait essentiellement à l'aide d'un module d'évaluation comparative prenant en compte des éléments autres que la seule valeur du critère et permettant de caractériser la qualité des résultats d'un point de vue hydrologique. A l'issue de cette analyse, le critère défini par Nash semble s'imposer assez nettement aux autres formulations retenues.

MOTS-CLÉS: Modélisation pluie-débit — Optimisation — Fonctions critères — Calage automatique — Savane soudanaise.

ABSTRACT

SELECTION OF CALIBRATION OBJECTIVE FUNCTIONS FOR RAINFALL-RUNOFF MODELLING IN THE SUDANESE SAVANNAH ZONE.

In the context of rainfall-runoff modelling carried out in the sudanese savannah area in the north-west Ivory Coast, attempts are being made to reconstitute the basin outflow in ten-day time steps. By using algorithms with automatic parameter setting procedures, it was necessary to make a choice concerning the calibration objective functions to be used. The authors present the algorithms, data and objective functions they have used. They then analyse the results obtained from the calibrations made. This analysis was carried out with the help of a comparative evaluation procedure taking into account elements other than the value of the objective function alone, including the quality of the results from a hydrological point of view. Following this analysis, the objective function defined by Nash seems to stand out quite clearly by comparison with the other formulae selected.

KEY WORDS: Rainfall-runoff modelling — Optimisation — Objective functions — Automatic setting procedures — Sudanese savannah.

1. INTRODUCTION

Dans une optique d'aide au développement par la mise en place de projets de différents teneurs (irrigations, alimentation en eau potable, etc.), des travaux de modélisation de la relation pluie-débit sont en cours en zone de savane soudanaise, dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Cette région, dont la pluie moyenne annuelle se situe entre 1 200 et 1 400 mm, a une évapotranspiration potentielle de l'ordre de 1 800 à 2 000 mm/an. C'est une région à faible relief, hormis quelques collines dans la partie la plus occidentale, dont les paysages sont essentiellement constitués de savane arborée, voire parfois de forêt claire. L'objectif visé par cette modélisation est la reconstitution des apports au pas de temps décadaire, fréquemment utilisé en agronomie.

(1) Hydrologues ORSTOM, Antenne hydrologique de l'ORSTOM en Côte d'Ivoire, 06 BP 1203, Cedex 1 Abidjan 06.

Pour ce faire, on emploie des modèles conceptuels globaux et déterministes reliant lame précipitée et lame écoulée. Ces algorithmes doivent pouvoir prendre en compte les données du réseau national de Côte-d'Ivoire, qui sont, en pratique, les seuls éléments accessibles aux aménageurs pour pouvoir procéder à des simulations sur de longues durées.

La zone de savane est caractérisée par une saison sèche de longue durée (novembre à avril) et des pluies principalement regroupées de juin à septembre. Les coefficients d'écoulement mesurés sur les bassins versants étudiés sont très faibles : ils ne dépassent que rarement 12 % et peuvent descendre certaines années jusqu'à 1 ou 2 %. Ces conditions d'utilisation sont donc très particulières pour des modèles généralement conçus en zone tempérée.

Avant d'entreprendre une opération systématique de simulation et de reconstitution de séries hydrométriques, nous avons procédé à une série de tests afin d'apprécier la qualité des résultats affichés par les différents modèles utilisés. Ces algorithmes employant des procédures de calage automatique de leurs différents paramètres, il est rapidement apparu nécessaire de procéder à un choix en ce qui concerne les critères numériques de calage.

Plusieurs de ces critères ont donc été testés afin de déterminer, parmi ceux qui ont été retenus, la formulation la mieux appropriée à la nature du problème (reconstitution d'apports décennaux) et à la spécificité des données. Cinq critères numériques ont été testés, en utilisant pour cela trois modèles pluie-débit différents et quatre bassins versants (mais cinq périodes de calages distinctes). L'interprétation de ces tests a été effectuée à l'aide d'un module d'évaluation de la qualité des calages basé sur des critères hydrologiques : corrélation entre lames observées et lames calculées, coefficient d'autocorrélation, bilans volumiques et reconstitution du volume de crue. Nous reviendrons plus en détail sur la nature de ce module.

2. MODÈLES, DONNÉES ET CRITÈRES UTILISÉS

2.1. LES MODÈLES GLOBAUX

2.1.1. Le modèle CREC

CREC est un modèle conceptuel global basé sur un schéma à réservoirs relativement classique, qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert (COMBES, 1985 ; GUILBOT, 1986 ; SERVAT et DEZETTER, 1988).

La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol, par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration, et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement. La fonction de transfert comprend, elle, un terme d'écoulement rapide et un terme d'écoulement lent (représenté par une exponentielle décroissante). La version de CREC que nous avons utilisée comprend 10 paramètres (X_1, X_2, \dots, X_{10}). Elle offre la possibilité d'un ruissellement de surface transitant par un réservoir linéaire. Le modèle travaille au pas de temps journalier et calcule donc un débit moyen journalier Q_j qui est la somme d'un éventuel ruissellement de surface Q_j^S , d'un écoulement rapide Q_j^H et d'un écoulement lent Q_j^G .

Les différents paramètres sont optimisés à l'aide des méthodes de ROSENBROCK (1960) et de NELDER et MEAD (1964) utilisées en séquence.

La figure 1 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

2.1.2. Le modèle MODGLO

C'est un modèle conceptuel global pour lequel il est également possible d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert (SERVAT, 1986 ; DEZETTER, 1987).

Au niveau de la fonction de production, il est fait appel à certains mécanismes physiques de la transformation pluie-débit (prise en compte de la capacité de rétention en eau des sols, des processus d'infiltration), bien que de nombreuses hypothèses simplificatrices y aient été apportées. La fonction de transfert utilisée ici comprend trois réservoirs en parallèle. Chacun d'eux est caractérisé par un coefficient d'alimentation (répartition entre les différents réservoirs de la lame d'eau issue de la fonction de production) et un coefficient de vidange permettant une modulation de l'écoulement dans le temps. Ce modèle travaille au pas de temps journalier et calcule donc un débit moyen journalier.

Les paramètres de MODGLO sont optimisés selon la même procédure que pour CREC.

La figure 2 présente le schéma conceptuel du modèle MODGLO.

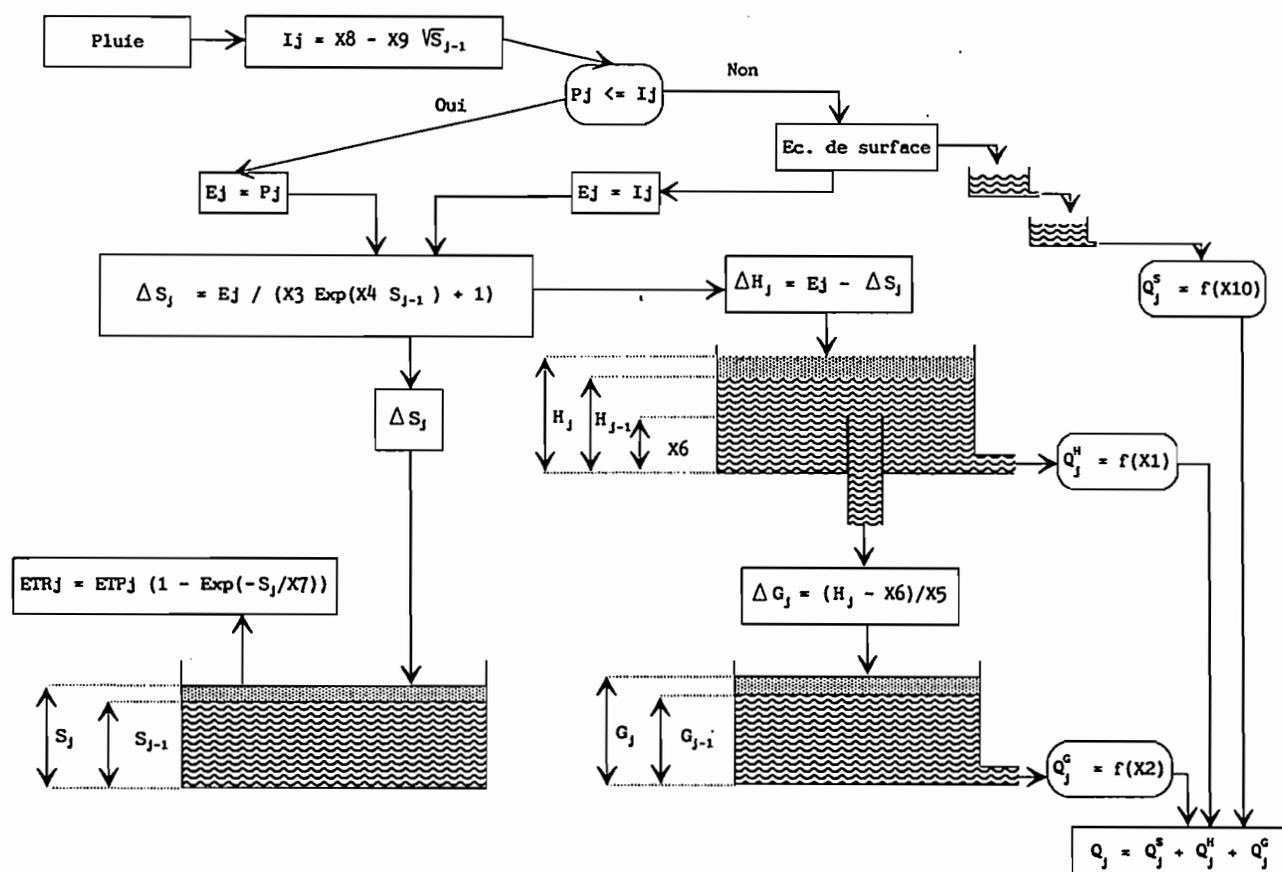


FIG. 1. — Schéma conceptuel du modèle CREC.

2.1.3. Le modèle GR3

Le modèle GR3 appartient, lui aussi, à la catégorie des modèles à réservoirs (EDJATNO et MICHEL, 1989).

L'architecture de cet algorithme repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire :

- le réservoir-sol, qui n'a comme seule sortie que le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage ;
- un hydrogramme unitaire, qui décrit la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir, à savoir :

- le réservoir-eau-gravitaire. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est du type quadratique.

D'après EDJATNO et MICHEL (1989), cet ensemble de trois opérateurs dont chacun dépend d'un seul paramètre semble être, à l'heure actuelle, le schéma le plus simple pour rendre compte de façon acceptable de la transformation « pluie-débit ».

La figure 3 présente le schéma conceptuel du modèle GR3.

2.2. LES DONNÉES UTILISÉES

L'étude a porté sur quatre bassins versants situés dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire (cf. fig. 4). Leurs caractéristiques annuelles en matière de précipitations et d'écoulements ont été regroupées dans le tableau I. D'une manière générale, on notera que 1983 apparaît comme une année sèche à très faible écoulement. Cela s'est vérifié sur l'ensemble du territoire de Côte d'Ivoire où la sécheresse a été très durement ressentie.

FIG. 2. — Schéma conceptuel du modèle MODGLO.

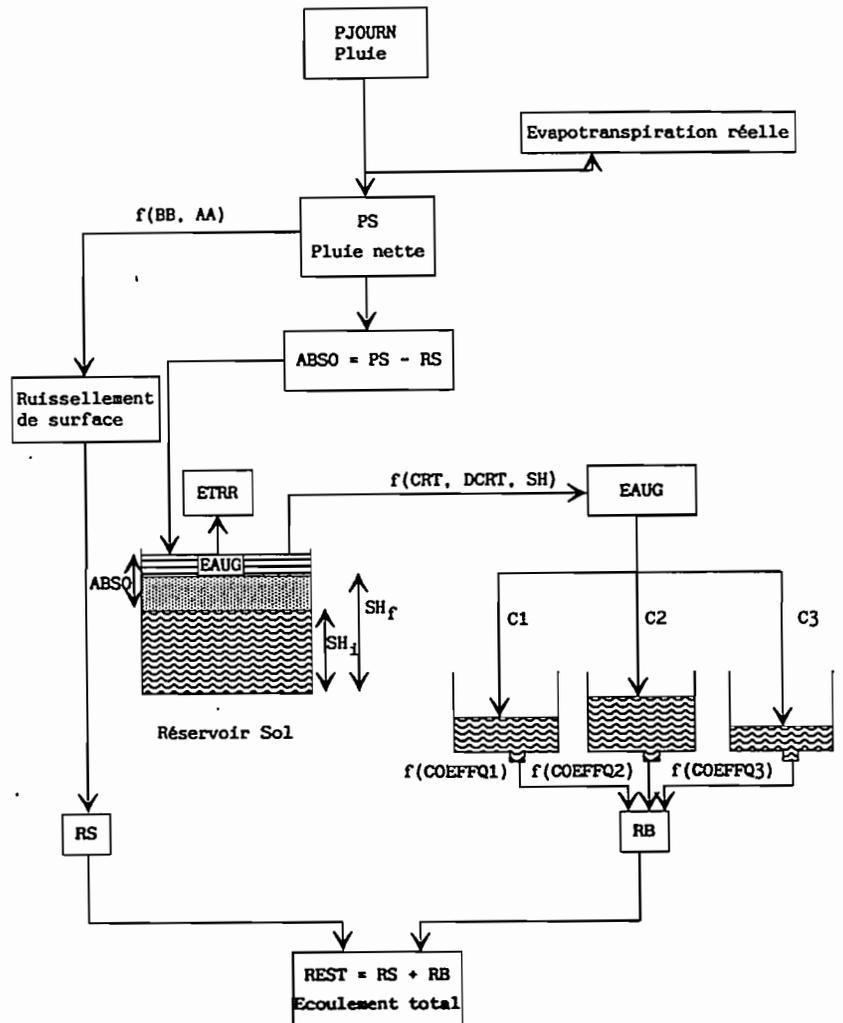


TABLEAU I
Caractéristiques annuelles des précipitations et de l'écoulement pour les différents bassins versants étudiés.

Bassins versants		1973	1974	1975	1976	...	1981	1982	1983	1984	1985
Bagoé à Guingérini S= 1042 km ²	LP	---	---	---	---	...	1412.0	1454.0	1103.7	---	---
	LE	---	---	---	---	...	299.5	233.9	52.1	---	---
	CE	---	---	---	---	...	21.2	16.1	4.7	---	---
Bagoé à Kouto I S= 4700 km ²	LP	1424.0	1827.4	1463.1	1290.9	...	---	---	---	---	---
	LE	141.3	126.7	183.8	111.9	...	---	---	---	---	---
	CE	9.9	6.9	12.6	8.7	...	---	---	---	---	---
Bagoé à Kouto II S= 4700 km ²	LP	---	---	---	---	...	1340.2	1315.9	970.6	1146.6	1376.8
	LE	---	---	---	---	...	221.1	166.5	45.0	67.1	223.4
	CE	---	---	---	---	...	16.5	12.7	4.6	5.9	16.2
Bou à Boron S= 3710 km ²	LP	---	---	---	---	...	1052.9	1076.4	852.6	1055.6	1437.5
	LE	---	---	---	---	...	96.9	42.0	9.6	33.4	134.2
	CE	---	---	---	---	...	9.2	3.9	1.1	3.2	9.3
Lafigue rte de Badikaha S= 443 km ²	LP	---	---	---	---	...	1198.2	1170.7	835.6	1410.1	---
	LE	---	---	---	---	...	195.5	115.4	35.6	160.7	---
	CE	---	---	---	---	...	16.3	9.9	4.3	11.4	---

LP: Lamé précipitée (mm)
LE: Lamé écoulée (mm)
CE: Coefficient d'écoulement (%)

Annexes .

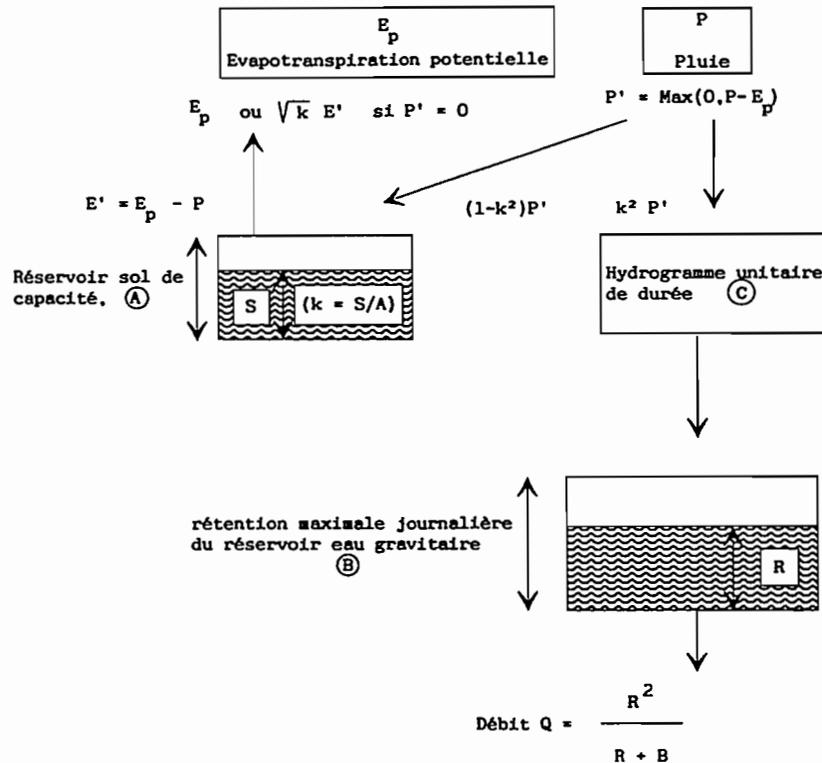


FIG. 3. — Schéma conceptuel du modèle GR3.

2.3. LES FONCTIONS CRITÈRES TESTÉES

L'utilisation des méthodes d'optimisation confère au calage des modèles un aspect déterministe et systématique, lié à la technique mathématique proprement dite, et qu'il convient de distinguer d'un aspect plus subjectif lié à la qualité variable des données et à l'adéquation du modèle au régime hydrologique considéré. Dans tous les cas de figure, l'optimisation automatique des paramètres d'un modèle nécessite l'utilisation d'une fonction critère, « objet » numérique de référence devant permettre l'amélioration du calage. Le choix de ce critère n'est cependant pas sans influence sur la nature et la qualité du calage obtenu au terme du processus.

Dans le cadre de cette étude nous avons testé plusieurs formulations de fonctions critères afin de juger de leurs performances et d'en retenir une pour la suite des opérations plus systématiques de modélisation pluie-débit. Les objectifs que nous nous étions fixés sont les suivants :

- reconstitution la plus précise possible des volumes de crues en saison des pluies (rappelons ici que les études menées ont comme objectif la détermination des apports) ;
- restitution de la dynamique des hydrogrammes ;
- absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés.

Nous avons accordé moins d'importance à la reconstitution précise des étiages qui sont souvent très faibles, issus de longues périodes sans ou à très faibles précipitations, et généralement assez simples à reproduire pour des modèles à réservoir.

Il existe, dans la littérature, un très grand nombre de critères. Il n'entrait pas dans nos intentions d'en mener une étude exhaustive, ce qui est pratiquement irréalisable. Nous avons donc étudié cinq critères différents dont trois ont fait l'objet de nombreuses utilisations en modélisation hydrologique, les deux derniers ayant été construits en prenant en compte des éléments différents.

2.3.1. Le critère CREC

Ce critère est ainsi dénommé car c'est celui qui était utilisé, à l'origine, dans le modèle CREC (COMBES, 1985).

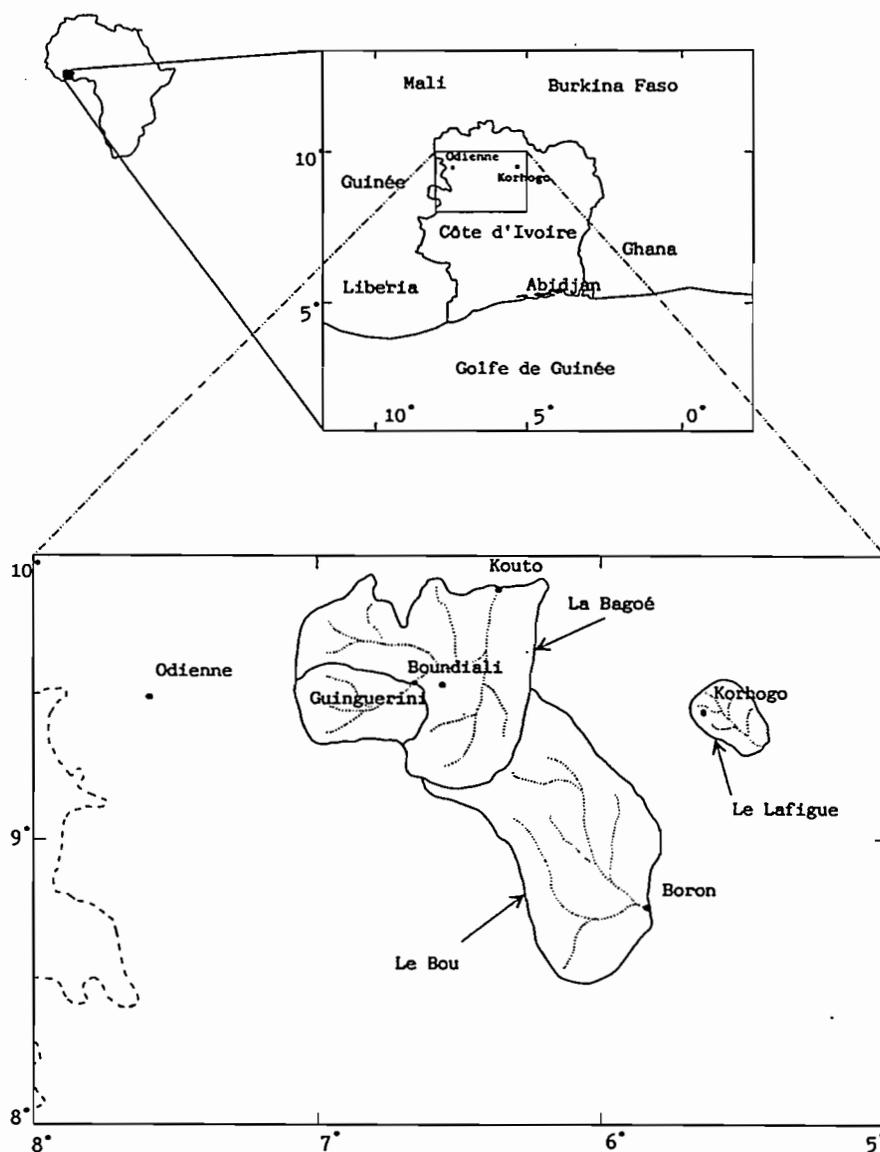


FIG. 4. — Carte de situation des quatre bassins versants étudiés dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire.

Son expression est la suivante :

$$1/N * \Sigma [|1 - (Q_c/Q_o)| * |1 - (Q_o/Q_{mo})|]$$

avec : N : nombre d'observations

Qc : débit calculé

Qo : débit observé

Qmo : débit moyen observé.

Cette expression tend vers 0 lorsque Qc tend vers Qo.

2.3.2. Le critère CrecBi

Ce critère n'est autre que le critère Crec auquel nous avons rajouté un terme de bilan. La formulation devient donc :

$$1/N * \Sigma [|1 - (Q_c/Q_o)| * |1 - (Q_o/Q_{mo})|] + 1/N * |\Sigma(Q_o - Q_c)/Q_{mo}|$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o .

Dans un premier temps, ce terme de bilan avait été utilisé comme coefficient de pondération multiplicateur. Son influence était alors prépondérante et nuisait à la qualité de la dynamique des hydrogrammes reconstitués. Il a donc finalement été pris en compte sous la forme d'un élément additif dont l'ordre de grandeur est comparable au premier terme du critère.

2.3.3 Le critère de Fortin

Appelé ainsi parce que proposé par FORTIN *et al.*, (1971). Son expression est la suivante :

$$1/N * \Sigma |(Q_c - Q_o)/Q_o * (1 + (|Q_o - Q_{mo}|/Q_{mo}))|$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o .

2.3.4. Le critère de Nash

Proposé par NASH (1969) et repris par NASH et SUTCLIFFE (1970), ce critère a pour formulation :

$$1 - [\Sigma(Q_c - Q_o)^2 / \Sigma(Q_o - Q_{mo})^2]$$

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o .

Il est facile de faire, en ce qui le concerne, une analogie avec une régression. Le terme $\Sigma(Q_o - Q_{mo})^2$ correspond à un terme de variance de la série observée. Le terme $\Sigma(Q_c - Q_o)^2$ peut être assimilé à un terme de variance résiduelle. La formulation du critère traduit donc une certaine « efficacité » (ou « rendement ») du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression.

D'un point de vue pratique, nous avons utilisé une forme modifiée du critère de Nash :

$$\Sigma (Q_c - Q_o)^2 / \Sigma(Q_o - Q_{mo})^2$$

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o . Elle ne donne pas la proportion de variance expliquée par le modèle, mais le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale.

2.3.5. Le critère SExpER (Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs)

Ce critère fait intervenir un terme qui le rend très sensible aux modifications sur Q_c :

$$1/N * \Sigma [\text{Exp} (|Q_c - Q_o|/Q_o) * (Q_o/Q_{mo})]$$

Le terme pondérateur Q_o/Q_{mo} a pour objet de donner un poids plus important aux fortes valeurs (le débit moyen observé étant généralement très faible, le rapport Q_o/Q_{mo} atteint des valeurs importantes en période de crue et faibles durant les étiages).

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o , mais, par souci d'homogénéité, c'est l'écart à 1 que nous avons cherché à minimiser.

Ces 5 critères numériques ont été utilisés en calage avec chacun des trois modèles présentés. L'examen des solutions optimales auxquelles nous sommes ainsi arrivés peut être envisagé sous plusieurs aspects. Nous avons, en ce qui nous concerne, privilégié l'utilisation systématique d'un module d'évaluation de la qualité des hydrogrammes ainsi reconstitués. Nous disposons alors de données permettant d'apprécier, globalement ou en fonction du modèle utilisé, les performances de tel ou tel critère.

3. RÉSULTATS DES CALAGES

Les calages des modèles sont effectués au pas de temps journalier, ce qui semble être le plus adéquat (LEVIAN-DIER et MA, 1987). Les valeurs des critères présentées par la suite ont été obtenues avec ce pas de temps journalier. Cependant, les tracés des hydrogrammes observés et calculés (calés) sont effectués au pas de temps décadaire, souvent retenu dans le cadre de projets à vocation agronomique, par agrégation des volumes écoulés sur ces intervalles de dix jours. Les éléments du module d'évaluation comparative, sur lequel nous nous appuyons par la suite, sont relatifs à ces hydrogrammes et sont donc calculés, en ce qui les concerne, à des pas de temps décadaires.

L'ensemble des valeurs prises par les fonctions critères à l'issue des phases de calage a été regroupé dans le tableau II.

TABLEAU II
Valeurs des critères numériques issus des différents calages.

Critère	Modèle	Bagoé Ko 73-76	Bagoé Ko 81-85	Bagoé Gu 81-83	Bou 81-85	Lafigue 81-84
Crec	CREC	0.968	0.667	0.769	1.163	0.796
	MODGLO	0.894	0.717	0.765	0.863	0.807
	GR3	6.914	1.305	5.249	1.098	0.761
CrecBi	CREC	1.173	0.736	0.806	1.359	0.881
	MODGLO	0.943	0.621	0.782	1.121	0.903
	GR3	8.305	1.793	5.682	1.602	0.873
Fortin	CREC	1.877	1.362	1.385	2.279	1.512
	MODGLO	1.404	1.047	1.114	1.456	1.460
	GR3	8.424	1.914	5.803	1.789	1.452
Nash	CREC	0.334	0.137	0.184	0.197	0.353
	MODGLO	0.369	0.133	0.185	0.205	0.490
	GR3	0.632	0.131	0.178	0.199	0.389
SExpER	CREC	1.388	1.581	1.255	1.733	1.228
	MODGLO	0.955	0.507	0.512	1.040	1.355
	GR3	P d C	P d C	P d C	P d C	1.015

P d C: Pas de Convergence

Plusieurs remarques s'imposent :

— une interprétation simple des valeurs des critères est difficile. Seul le critère de Nash peut être relié à une grandeur statistique : le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale observée. Celui-ci varie, selon les cas, entre 13 % et 63 % ;

— l'association du modèle GR3 et du critère SExpER semble ne pas fonctionner correctement puisque dans 4 cas sur 5 il n'y a pas de convergence :

— hormis l'association avec SExpER, on notera que le modèle GR3 a certaines difficultés avec les calages de la Bagoé à Kouto (1973-1976) et de la Bagoé à Guingerini. Il est cependant difficile de faire la part entre les influences respectives du modèle lui-même, de la fonction critère, et de l'association « modèle-critère » dans ces mauvais résultats. Ceci, *a fortiori*, lorsque l'on considère le bon résultat de GR3 sur la Bagoé à Guingerini avec le critère de Nash.

Le seul examen des valeurs prises par les fonctions critères à l'issue des calages ne peut suffire à juger de la qualité des hydrogrammes calculés. Mis à part le critère de Nash, il est difficile d'apprécier qualitativement les résultats. En outre, les différentes formulations ne sont pas sans influence sur l'allure et les valeurs des séries calculées. Telle fonction critère aura un poids important sur les étiages, telle autre sur les points de crue. Leur convergence sera plus ou moins rapide et précise, leur pertinence pouvant être variable selon l'algorithme (et donc les équations) auquel ils sont associés. En conséquence, si la valeur du critère peut permettre d'éliminer ou de rejeter certaines solutions, il faut déterminer d'autres éléments d'appréciation, permettant de juger de la qualité des hydrogrammes calculés, d'un point de vue « hydrologique ». Le premier de ces éléments qui vient à l'esprit est l'examen des tracés des séries chronologiques observées et calculées.

3.1. LA BAGOÉ À GUINGÉRINI 1981-1983

Dans tous les cas, 1983, année au coefficient d'écoulement particulièrement faible (4,7 %) est restituée surestimée. Son influence dans le processus de calage est importante, et a pour conséquence une légère et systématique sous-estimation des hydrogrammes calculés en 1981 et 1982. Cependant, le niveau de calage atteint pour ces deux années, laisse supposer que les algorithmes utilisés, sont en mesure de reproduire correctement les hydrogrammes observés pour des années « normales ». C'est ce que montre, par exemple, la figure 5.

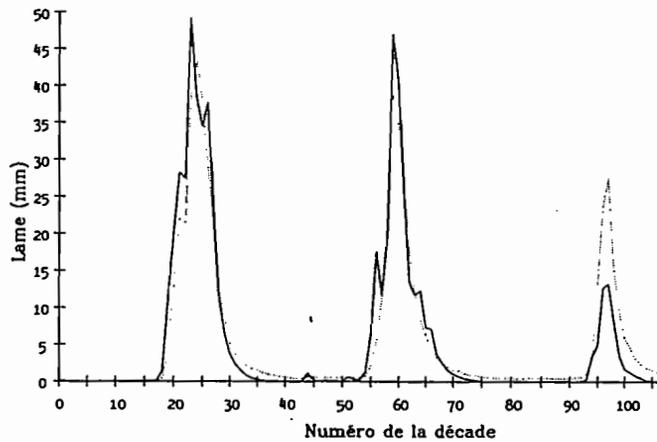


FIG. 5. — La Bagoé à Guingérini, 1981-1983, modèle CREC et critère Nash. Hydrographes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observé, — — — calculé.

3.2. LA BAGOÉ À KOUTO 1973-1976

L'ensemble des calages obtenus sur la Bagoé à Kouto (1973-1976) est d'une qualité très moyenne, quels que soient le critère et les modèles considérés. Ils présentent tous les mêmes caractéristiques, à savoir :

- l'hydrogramme de 1974 surestimé ;
- les hydrographes de 1973, 1975, et 1976 sous-estimés.

L'année 1974 a un coefficient d'écoulement relativement faible (6,9 %) qui peut introduire un biais important dans le processus d'optimisation. Ceci pourrait expliquer le dysfonctionnement systématique : 1974 d'une part. 1973, 1975 et 1976 d'autre part comme le montre l'exemple de la figure 6.

3.3. LA BAGOÉ À KOUTO 1981-1985

Les hydrographes calculés sont généralement d'assez bonne qualité malgré la prise en compte de deux années à très faibles coefficients d'écoulement, en 1983 et 1984.

Les années 1981 et 1982 sont généralement un peu sous-estimées alors que 1985 se révèle un peu excédentaire comme le montre l'exemple de la figure 7 (MODGLO + CrecBi).

On n'observe généralement pas ou peu de décalages. La dynamique des hydrographes est bonne, notamment en décrue, malgré, parfois, un excédent pour les étiages (CREC + Nash, fig. 8).

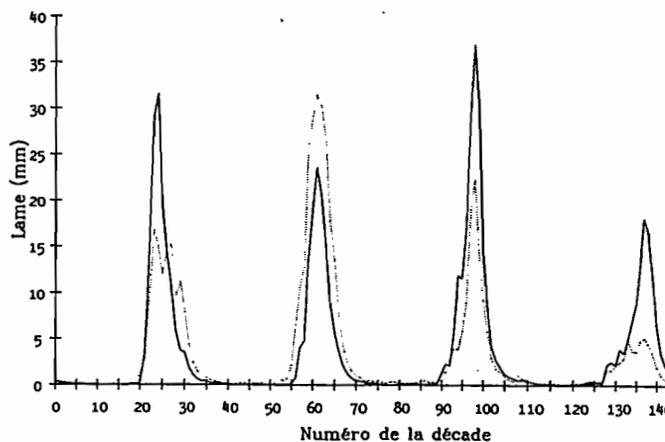


FIG. 6. — La Bagoé à Kouto, 1973-1976, modèle MODGLO et critère de Nash. Hydrographes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observés, — — — calculés.

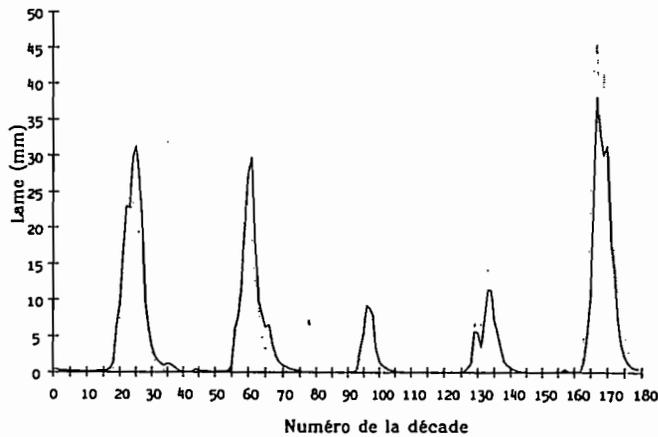


FIG. 7. — La Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle MODGLO et critère CrecBi. Hydrogrammes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observé, - - - calculé.

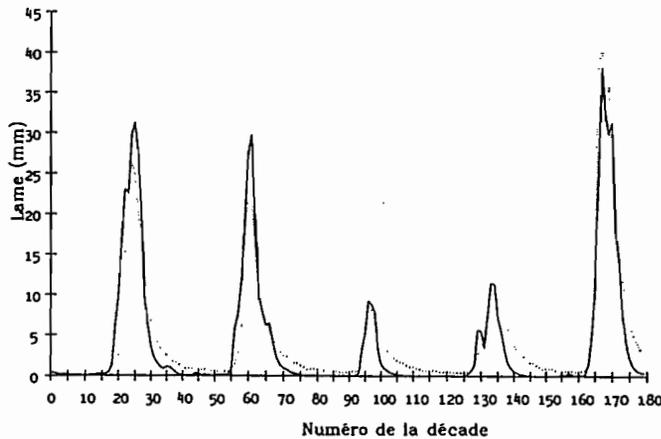


FIG. 8. — La Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle CREC et critère de Nash. Hydrogrammes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observé, - - - calculé.

3.4. LE BOU À BORON 1981-1985

Les coefficients d'écoulement des années 1982 à 1984 sont particulièrement faibles (3,9 %, 1,1 %, 3,2 %). Quant à l'année 1985 elle est beaucoup plus pluvieuse que les 4 années qui la précèdent (plus de 33 % de pluviométrie supplémentaire). Cette courte série chronologique présente donc des comportements extrêmes et opposés qui rendent la tâche plus difficile en matière d'optimisation des paramètres.

Etant donné la particularité de la période disponible pour le calage, les résultats obtenus avec l'association CREC + Nash sont plutôt satisfaisants. Seule l'année 1981 est largement sous-estimée (fig. 9). On retrouve partout cette même tendance, plus ou moins accentuée (fig. 10).

3.5. LE LAFIGUE À ROUTE DE BADIKAHA 1981-1984

C'est l'association CREC + Nash (fig. 11) qui permet d'obtenir le meilleur tracé d'hydrogramme calculé. L'année 1983 pose, une nouvelle fois, des problèmes qui se révèlent difficiles à résoudre pour les algorithmes utilisés.

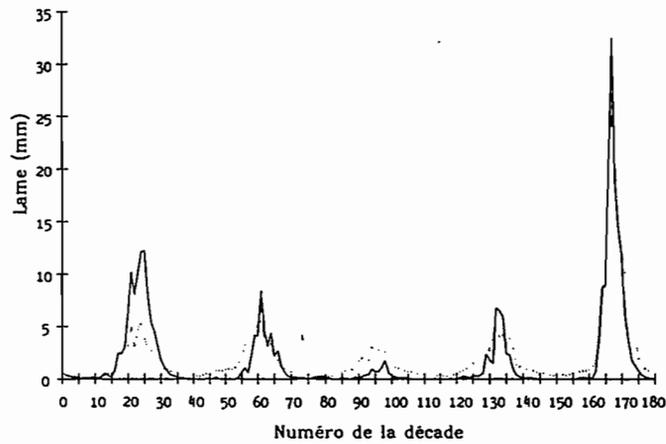


FIG. 9. — Le Bou à Boron, 1981-1985, modèle CREC et critère de Nash. Hydrogrammes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observé, - - - calculé.

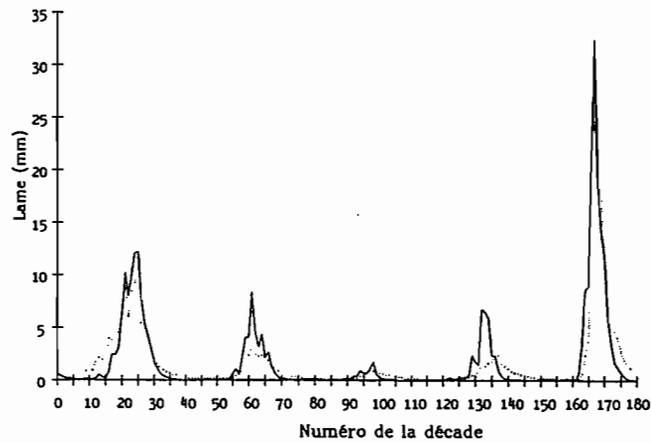


FIG. 10. — Le Bou à Boron, 1981-1985, modèle GR3 et critère CREC. Hydrogrammes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observé, - - - calculé.

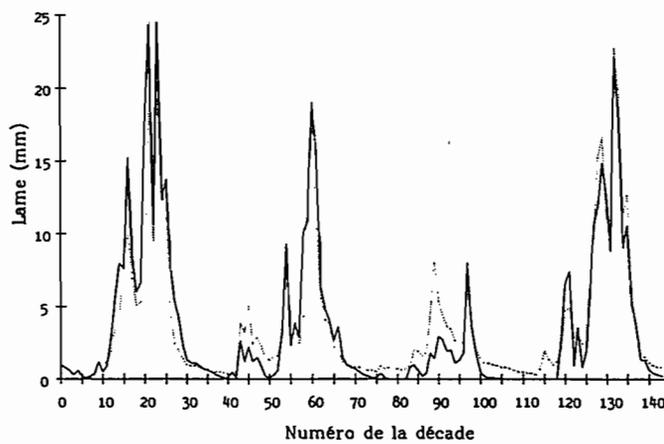


FIG. 11. — Le Lafigue à route de Badikaha, 1981-1984, modèle CREC et critère de Nash. Hydrogrammes observés et calculés au pas de temps décadaire. — observé, - - - calculé.

4. COMPORTEMENT DES CRITÈRES NUMÉRIQUES

4.1. CARACTÉRISATION GRAPHIQUE

Quel que soit le modèle utilisé, l'examen des tracés des séries observées et calculées permet de dégager certains enseignements communs relatifs au comportement des fonctions critères :

- (i) le critère CREC se révèle un peu « réducteur » dans la mesure où l'hydrogramme calculé a un volume qui est souvent inférieur à l'observé. Il respecte, par contre, assez bien la dynamique des hydrogrammes ;
- (ii) la prise en compte du terme de bilan sous une forme purement additive dans CrecBi lui accorde une influence excessive. Cela se traduit, dans certains cas, par une compensation en terme de bilan (et donc de volume de crue) qui se répercute sur une seule année ;
- (iii) le critère de Fortin a un comportement similaire au critère CREC, en ce sens qu'il est généralement assez « réducteur » ;
- (iv) le critère de Nash se révèle très performant en matière de dynamique d'hydrogramme et de pointes de crues. Son comportement est, par contre, moins intéressant lorsque l'on s'intéresse aux étiages ;
- (v) le critère SExpER a un comportement qui est assez comparable à ceux des critères CREC et Fortin.

4.2. CARACTÉRISATION HYDROLOGIQUE

Partant de l'hypothèse que nous avons, dans chacun des cas, obtenu un calage optimal pour chaque association « modèle-critère », nous avons cherché à évaluer les performances des critères proprement dits pour une série d'observations et pour un modèle donné. Nous avons, pour cela, défini un module d'évaluation comparative de la qualité des calages obtenus, dont les éléments ont été choisis en fonction de caractéristiques hydrologiques. Cette approche est assez voisine de celle de DISKIN et SIMON (1977), mais elle paraît plus appropriée car réalisée par référence à des éléments hydrologiques et non à la seule valeur du critère.

4.2.1. Le module d'évaluation comparative

Ce module d'évaluation comparative est bâti autour de plusieurs éléments d'appréciation du calage.

Le coefficient de corrélation lames observées-lames calculées. Il permet de prendre en compte, principalement, les décalages dans le temps entre hydrogrammes observés et calculés, et, à un degré moindre, les écarts quantitatifs entre les deux séries.

L'écart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés. Les écarts d'ordre 1 sont assez peu significatifs. Nous avons donc utilisé les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 comme témoins de la dynamique des hydrogrammes, en particulier en décrue.

Deux coefficients d'appréciation du bilan volumique :

$$\text{Bilan1} = |\Sigma(L_o - L_c)|$$

$$\text{Bilan2} = \Sigma |(L_o - L_c)|$$

avec : L_o = lame écoulee observée (mm)

L_c = lame écoulee calculée (mm).

Bilan1 et Bilan2 tendent vers 0 quand L_c tend vers L_o .

Ces deux bilans sont calculés sur la totalité de la période de calage. Le terme Bilan1 ne peut suffire car il ne peut rendre compte des compensations numériques qui lui donneront une faible valeur sans que, pour autant, l'hydrogramme calculé soit de bonne qualité. Le terme Bilan2 ne peut suffire non plus, dans la mesure où de légères oscillations de part et d'autre de la courbe observée sont acceptables. Celles-ci conféreront donc une valeur élevée à Bilan2 alors que l'allure générale de l'hydrogramme observé et le volume de la crue seraient bien restitués.

L'Indice de Reconstitution du Volume de Crue (IRVC). Au regard des objectifs appliqués de ces travaux de modélisation, nous avons privilégié la reconstitution des crues par rapport à celle des étiages. Pour la région concernée, et afin de nous limiter dans le temps, nous avons défini comme lame de crue, la lame écoulee entre les décades 19 et 30 incluses (c'est-à-dire du 1^{er} juillet au 31 octobre). Le tableau III montre que pour les bassins étudiés la lame écoulee durant cette période est toujours de l'ordre ou supérieure à 80 %. L'appréciation de la reconstitution globale et pluriannuelle des volumes de crue, à l'issue des différents calages, se fait à l'aide d'un indice défini comme : Indice de Reconstitution du Volume de Crue (IRVC).

TABLEAU III
Lames totales écoulées du 1^{er} juillet au 31 octobre.

Bassin versant et période	Lame écoulée totale (mm)	Lame écoulée décades 19-30	% écoulé entre 1/07 et 31/10
Bagoé à Kouto 1981-1985	723.0	668.5	92.5
Bagoé à Kouto 1973-1976	563.1	485.0	86.1
Bagoé à Guingérini 1981-1983	585.3	552.1	94.3
Bou à Boron 1981-1985	316.1	290.9	92.0
Lafigue rte Badik. 1981-1984	506.9	386.9	76.3

Cet indice est défini sur l'ensemble de la période considérée. Pour chaque année on évalue l'écart en % entre la crue calculée et la crue observée. Pour chacune des années, la valeur absolue de cet écart est pondérée par un coefficient traduisant l'importance de la crue annuelle par rapport au volume de crue écoulé sur toute la période. L'IRVC est la somme de ces écarts pondérés.

Pour une série observée de n années, on aura :

$$IRVC = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\text{Crue année } i}{\sum_{i=1}^n \text{crues annuelles}} \times 100 \left| \frac{\text{Crue année } i \text{ Calc.}}{\text{Crue année } i \text{ Obs}} - 1 \right| \right]$$

c'est-à-dire :

$$IRVC = \sum_{i=1}^n \text{Coef. pondération } i * \left| \text{Ecart « Observé - Calculé » année } i \text{ en } \% \right|$$

IRVC tend vers 0 lorsque la crue calculée tend vers la crue observée. (A titre indicatif, une erreur systématique de 10 % sur les crues annuelles d'une série donnée correspond à une valeur de 10 pour l'IRVC).

4.2.2. Evaluation des critères

Méthodologie

Ayant défini un module d'évaluation comparative des performances des critères représentatif de caractéristiques hydrologiques, nous avons alors suivi une méthodologie calquée sur celle de DISKIN et SIMON (1977).

Pour une période et pour un modèle donné, nous avons donc procédé comme suit :

- les valeurs des différents termes du module sont calculées pour chacun des critères ;
- pour chaque terme du module, on établit un classement des performances des critères auxquels on attribue donc un rang (rang 1 pour le meilleur, rang 5 pour le plus mauvais) ;
- pour chaque critère, on somme les différents rangs obtenus, et on obtient ainsi une « note » comprise entre 5 et 25 (5 dans le meilleur des cas, 25 dans le pire).

A titre d'exemple, le tableau IV présente cette « notation » pour la Bagoé à Guingérini.

TABLEAU IV

Valeurs des différents termes du module d'évaluation des critères numériques. Exemple de la Bagoé à Kouto (1981-1985), modèle GR3.

	Critères de calage				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Coef Correl.	0.889	0.887	0.882	0.955	0.936
Dif. autocor.	0.082	0.078	0.082	0.021	0.001
Bilan1	388.4	341.7	292.2	8.8	183.7
Bilan2	418.8	378.9	347.8	235.0	312.7
IRVC	54.5	47.9	40.8	14.6	34.7

	Critères de calage (rangs après classement)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
Coef Correl.	3	4	5	1	2
Dif. autocor.	5	3	4	2	1
Bilan1	5	4	3	1	2
Bilan2	5	4	3	1	2
IRVC	5	4	3	1	2
Somme ("note")	23	19	18	6	9

Interprétation

Le tableau V fait apparaître les classements respectifs de chaque critère et leur fréquence. Le critère de NASH semble s'imposer nettement, étant classé 1^{er} 12 fois sur 15, et en étant, au pire, classé 3^e. Derrière lui, les critères CrecBi et Fortin, respectivement classés 12 et 9 fois dans les trois premiers semblent avoir les meilleurs comportements.

Une étude plus détaillée peut être menée en examinant le comportement des critères relativement à chaque élément du module d'évaluation.

TABLEAU V
Fréquences des classements des différents critères.

Rang	Critères de calage (fréquence des rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	1	2	12	1
2	1	4	6	2	5
3	5	4	4	1	-
4	6	3	3	-	2
5	3	2	1	-	7

Les ex-aequo n'ont pas été départagés, ce qui explique que le total par ligne ne soit pas toujours égal à 15.

Le coefficient de corrélation (tabl. VI).

Le critère de Nash semble très supérieur aux autres en matière de corrélation entre lames observées et calculées. Il apparaît 12 fois sur 15 en première position et il présente l'intervalle de valeurs le plus réduit (0,760-0,955). Les autres critères ont des performances qui sont tout à fait comparables entre elles, mais à un niveau nettement inférieur.

Ecart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés (tabl. VII).

Les critères Crec et Fortin semblent assez peu performants en matière d'autocorrélation. Il est, par contre assez difficile de séparer les trois autres. On notera simplement que le critère de Nash présente l'intervalle de variation le plus réduit.

Bilan1 et Bilan2 (tabl. VIII et IX).

Les critères CrecBi et Nash apparaissent très nettement comme les deux critères respectant le mieux le volume écoulé (et ce même si le critère de Nash ne descend pas, ponctuellement, au niveau de précision de CrecBi). C'est, cependant, avec le critère de Nash que, 11 fois sur 15, la somme des écarts absolus entre valeurs observées et calculées (Bilan2) est la plus faible. L'association avec Bilan1 indique également qu'il existe moins de compensations numériques que pour les autres critères.

IRVC.

Au regard de l'Indice de Reconstitution du Volume de Crue, le critère de Nash fait état d'une certaine supériorité. Il n'atteint jamais de valeurs très élevées et devance très nettement les autres critères. Le calage à l'aide de cette fonction critère semble donc permettre une meilleure prise en compte de la lame de crue.

TABLEAU VI

Fréquences des classements des différents critères au regard du coefficient de corrélation entre lames écoulées observées et calculées.

Rang	Critères de calage (fréquence des rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SEXP
1	1	2	-	12	-
2	1	3	5	2	4
3	7	3	2	-	3
4	5	6	3	-	2
5	1	1	5	1	6
valeur min.	0.382	0.382	0.570	0.760	0.470
valeur max.	0.944	0.946	0.946	0.955	0.943

TABLEAU VII

Fréquences des classements des différents critères au regard de l'écart entre les coefficients d'autocorrélation observés et calculés.

Rang	Critères de calage (fréquence des rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SEXP
1	-	-	5	6	4
2	3	4	3	2	3
3	5	3	2	1	4
4	4	7	2	3	-
5	3	1	3	3	4
valeur min.	0.016	0.007	0.002	0.003	0.001
valeur max.	0.716	0.716	0.183	0.123	0.203

TABLEAU VIII
Fréquences des classements des différents critères au regard du terme Bilan1.

Rang	Critères de calage (fréquence des rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	-	12	3	-
2	1	-	-	11	3
3	2	8	3	-	2
4	9	6	-	1	-
5	3	1	-	-	10
valeur min.	20.0	18.8	0.1	6.1	67.6
valeur max.	792.7	729.0	723.7	138.7	692.2

TABLEAU IX
Fréquences des classements des différents critères au regard du terme Bilan2.

Rang	Critères de calage (fréquence des rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	2	3	1	10	-
2	1	4	3	2	4
3	7	3	3	-	3
4	3	5	1	3	2
5	2	-	7	-	6
valeur min.	146.2	154.9	179.3	149.1	163.0
valeur max.	826.3	779.0	774.5	412.5	435.8

TABLEAU X
Fréquences des classements des différents critères au regard du terme IRVC.

Rang	Critères de calage (fréquence des rangs)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	-	2	13	-
2	2	4	2	1	5
3	4	5	5	1	1
4	6	5	2	-	3
5	3	1	4	-	6
valeur min.	19.6	24.7	12.6	14.6	25.7
valeur max.	154.7	144.1	142.9	48.6	119.2

4.3. CONVERGENCE

L'utilisation d'une fonction critère particulière est également liée à sa capacité de convergence rapide vers une solution stable. Nous avons tracé certains de ces processus de convergence.

Sur ce point, les différents critères ont généralement un comportement assez similaire, ce qui n'en fait pas un élément véritablement caractéristique. Leur vitesse de convergence est du même ordre, lorsque cette convergence existe, ainsi qu'en témoignent les tracés que nous avons retenus. Ils concernent la Bagoé à Kouto (période 1981 à 1985) calée avec chacun des trois modèles utilisés (fig. 12, 13 et 14).

Si, du point de vue des modèles, la convergence apparaît plus rapide pour GR3, cela est uniquement dû au nombre plus réduit de paramètres à optimiser que compte cet algorithme.

5. CONCLUSION

Les critères que nous avons utilisés peuvent être classés en trois catégories :

- la première regroupe les critères Crec, Fortin et SExpER. Ils sont bâtis autour de l'écart relatif entre lame observée et lame calculée, et pondérés par des coefficients qui diffèrent ;
- la seconde concerne le critère CrecBi. Celui-ci n'est autre que le critère Crec auquel nous avons ajouté un terme de bilan ;
- la troisième est représentée par le critère de Nash dont la formulation est liée à une approche statistique classique.

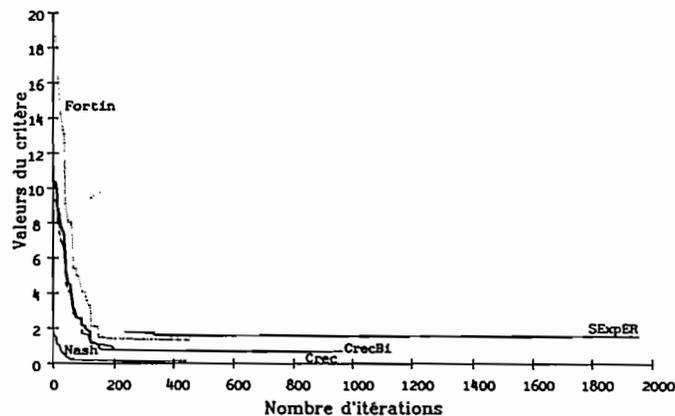


FIG. 12. — La Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle CREC. Tracés des processus de convergence pour les différentes fonctions critères. —·— Crec, - - - Fortin, —·— CrecBi, — Nash, — SExpER.

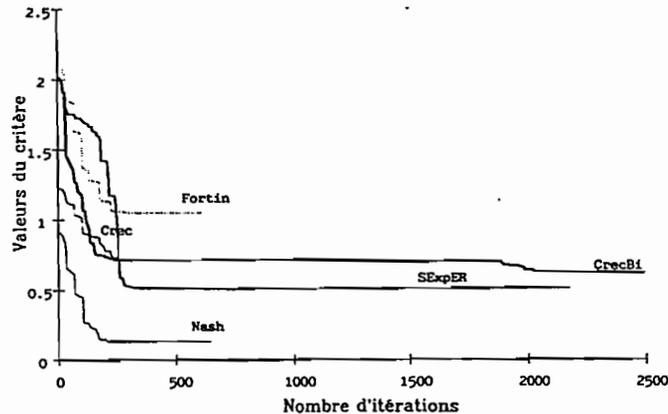


FIG. 13. — La Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle MODGLO. Tracés des processus de convergence pour les différentes fonctions critères. —·— Crec, - - - Fortin, —·— CrecBi, — Nash, — SExpER.

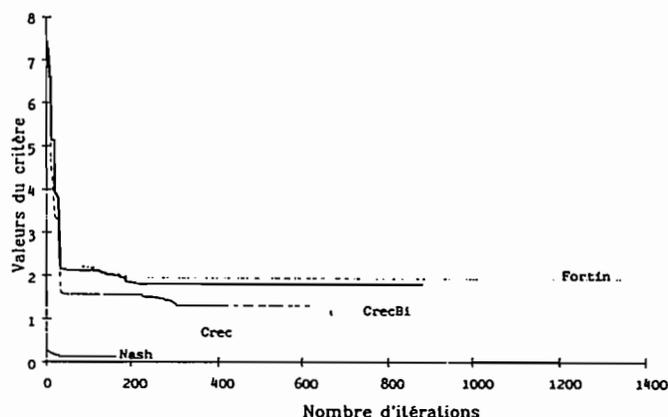


FIG. 14. — La Bagoé à Kouto, 1981-1985, modèle GR3. Tracés des processus de convergence pour les différentes fonctions critères. — Crec, --- Fortin, — CrecBi, — Nash.

Les périodes pour lesquelles nous avons procédé au calage sont souvent critiques pour des modèles à réservoirs du type de ceux utilisés ici. Elles sont, en effet, caractérisées par une période exceptionnellement sèche observée principalement en 1983, et dont les effets étaient encore ressentis en 1984. Les coefficients d'écoulement γ sont extrêmement faibles, la lame écoulée ne représentant plus alors qu'une partie presque négligeable du bilan hydrologique. C'est dire l'importance vraisemblable de l'évapotranspiration qui est, malheureusement, trop souvent négligée dans les modèles « pluie-débit » élaborés par les hydrologues.

Malgré cette particularité, plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude au caractère systématique. Les performances des différents modèles utilisés sont satisfaisantes. On note une certaine difficulté, pour les trois algorithmes employés, à « redémarrer » après la saison sèche. Les premières crues sont souvent mal reproduites. La longue période de désaturation que l'on observe dans le nord de la Côte d'Ivoire (peu ou pas de pluie pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois) pose de sérieux problèmes aux modèles construits sur un schéma de type à réservoir. Il est, de plus, difficile d'intégrer une année aussi exceptionnelle que 1983 dans une courte période de calage.

Concernant les critères on note plusieurs points :

- les critères Crec, Fortin et SExpER ont un comportement très voisin et que nous qualifierons de « réducteur » dans la mesure où l'hydrogramme calculé a souvent des valeurs inférieures à celles de l'hydrogramme observé ;
- dans CrecBi, la prise en compte d'un terme de bilan s'est montrée relativement inadaptée puisqu'elle conduit souvent à des compensations numériques par rapport à l'hydrogramme observé ;
- le critère de Nash présente un bon comportement d'ensemble bien qu'il montre quelques faiblesses en étiage.

Une étude systématique à l'aide d'un module d'évaluation des performances des critères a confirmé ces premières conclusions.

Le tableau V montre clairement que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage. Ce qui est confirmé lorsque l'on considère chaque élément du module pris séparément :

- coefficient de corrélation : le critère de Nash est très supérieur aux autres. Son utilisation n'introduit que peu de décalages entre hydrogrammes observés et calculés ;
- coefficient d'autocorrélation : les critères Crecbi, Nash et SExpER sont les plus performants, avec, néanmoins, un avantage au critère de Nash qui présente les écarts les plus faibles avec le coefficient observé. Il respecte donc bien la dynamique des hydrogrammes ;
- Bilan1 : si le critère CrecBi apparaît comme largement supérieur aux autres, le critère de Nash est plus régulier, ce que traduit son intervalle de variation plus réduit ;

— Bilan2 : on confirme, ici, ce que l'on observe avec Bilan1. Le critère de Nash a le meilleur comportement. Il présente moins de compensations numériques par rapport à l'hydrogramme observé que ne le fait CrecBi ;

— IRVC : la prise en compte de cet indice est importante au regard de l'objectif affiché en matière de détermination d'apports. On note là, une très nette supériorité du critère de Nash pour lequel on a toujours $IRVC < 50$, ce qui est loin d'être le cas avec les autres critères. Il permet donc une meilleure prise en compte de la lame de crue.

Au regard des objectifs visés (reconstitution la plus précise possible des volumes de crue en saison des pluies, restitution de la dynamique des hydrogrammes, absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés) et de la nature des données disponibles, quelque soit l'algorithme utilisé, c'est son association avec le critère de Nash qui permet d'accéder au meilleur niveau de résultats.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction de l'Eau du ministère des Travaux Publics de Côte d'Ivoire et l'Agence Nationale pour les Aéroports et la Météorologie pour la consultation et l'utilisation des banques de données.

Les auteurs remercient Jean-Marc LAPETITE (ORSTOM) pour sa contribution dans le cadre du traitement des données d'évapotranspiration potentielle.

BIBLIOGRAPHIE

- COMBES (V.), 1985. — Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC. Thèse Docteur-Ingénieur en Sciences de l'Eau et Aménagement. USTL. Montpellier, *multigr.*
- DEZETTER (A.), 1987. — Modèle global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. DEA National d'Hydrologie. USTL. Montpellier, *multigr.*
- DISKIN (M.H.), SIMON (E.), 1977. — A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. *J. Hydrol.*, 34 : 129-149.
- EDJATNO. MICHEL (C.), 1989. — Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2 : 113-121.
- FORTIN (J.P.), CHARBONNEAU (R.), LEFÈVRE (J.), GIRARD (G.), 1971. — Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. *AISH Pub 101 Vol. 2* : 548-557. Actes du colloque de Varsovie.
- GUILBOT (A.), 1986. — Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. *Revue Internationale des Sciences de l'Eau*, Vol. 2-1 : 19-26.
- LEVIANDIER (T.), MA (Z.C.), 1987. — Influence du pas de temps sur les performances des modèles pluie-débit. Critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques, Rapport final. EDG, CEMAGREF.
- NASH (J.E.), 1969. — A course of lectures on parametric or analytical hydrology. Great Lakes Institute. University of Toronto Pr 38: Lecture 12.
- NASH (J.E.), SUTCLIFFE (J.V.), 1970. — River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principle, *J. Hydrol.*, 10 : 282-290.
- NELDER (J.A.), MEAD (R.), 1964. — A simple method for function minimization. *Computer Journal*, 7 : 308-313.
- ROSENBROCK (H.H.), 1960. — An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer Journal*, 3, 175.
- SERVAT (E.), 1986. — Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes. CREC5, MODGLO et MODIBI. ORSTOM Montpellier, *multigr.*
- SERVAT (E.), DEZETTER (A.), 1988. — Modélisation globale de la relation pluie-débit : des outils au service de l'évaluation des ressources en eau. *Hydrol. continent.*, vol. 3 n° 2, 1988: 117-129.

ANNEXES

Article paru dans Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques, 36, 4, 8/1991

**Selection of calibration objective functions
in the context of rainfall-runoff modelling
in a sudanese savannah area.**

Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area

ERIC SERVAT & ALAIN DEZETIER

Hydrology Laboratory, ORSTOM, BP1203, Cidex 1, Abidjan 06, Ivory Coast

Abstract In the context of rainfall-runoff modelling carried out on the sudanese savannah area in the northwest of the Ivory Coast, attempts are being made to reconstitute the flow at the outlets of catchments in 10 day time steps. By using algorithms with automatic fitting procedures for the parameters, it appeared necessary to make a choice concerning the calibration objective functions to be used. The paper presents the algorithms, data and objective functions that have been used. The results obtained from the calibrations made have been analysed. That analysis was done principally with the help of a comparative evaluation modulus which takes into account elements other than the value of the objective function alone and which enables the quality of the results to be picked out from a hydrological point of view. At the conclusion of the analysis, the objective function defined by Nash seems to stand out quite clearly in relation to the other formulae examined.

Sélection de fonctions critères dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise

Résumé Dans le cadre de travaux de modélisation pluie-débit menés en zone de savane soudanaise dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, on cherche à reconstituer les apports à l'exutoire du bassins versants au pas de temps décadaire. Du fait de l'utilisation d'algorithmes employant des procédures de calage automatique des paramètres, il est apparu nécessaire de procéder à un choix en ce qui concerne les critères numériques de calage à utiliser. Les auteurs présentent les algorithmes, les données et les critères qu'ils ont utilisés. Ils analysent ensuite les résultats obtenus à l'issue des calages entrepris. Cette analyse se fait essentiellement à l'aide d'un module d'évaluation comparative prenant en compte des éléments autres que la seule valeur du critère et permettant de caractériser la qualité des résultats d'un point de vue hydrologique. A l'issue de cette analyse, le critère défini par Nash semble s'imposer assez nettement par rapport aux autres formulations retenues.

INTRODUCTION

As an aid to a development perspective when setting up projects with different concerns (irrigation, potable water supply, etc.), the modelling of the rainfall-runoff relationship is underway in the sudanese savannah area in the northwest of the Ivory Coast. The aim is the estimation of supplies in 10 day time steps, frequently used in agronomy. For this, lumped deterministic and conceptual models are used which link the precipitation to the amount of runoff. Such algorithms must be able to take into account the data of the Ivory Coast national network which are, in practice, the only elements available to developers for them to be able to undertake simulations over long periods.

The savannah area is characterized by a long dry season (November to April) with rain mainly concentrated from June to September. The runoff coefficients measured on the catchments studied are very low; they rarely exceed 12% and in some years can drop to 1 or 2%. Such conditions are, therefore, very exceptional for models which are generally designed for use in temperate zones.

Before initiating a systematic programme for simulating and reconstituting hydrometric series, a series of tests was performed in order to evaluate the quality of the results obtained with the various models used. Since the algorithms employed use automatic calibration procedures for fitting the various model parameters, it quickly appeared necessary to make a choice concerning the calibration objective functions.

Several of the objective functions were tested in order to determine among those selected that formulation best adapted to the nature of the problem (estimation of flow in 10 day time steps) and to the specificity of the data. Five objective functions were tested, using three different rainfall-runoff models and four catchments (but five distinct calibration periods). The interpretation of the tests was carried out with the help of a modulus for evaluating the quality of the calibrations, based on hydrological criteria, viz. correlation between observed depth of runoff and calculated depth of runoff, autocorrelation coefficient, volume balances, and estimation of the flood volume. The nature of the modulus will be examined in greater detail below.

MODELS, DATA AND OBJECTIVE FUNCTIONS USED

Lumped models

The lumped models used will be briefly described. More information will be found in the references quoted.

The CREC Model CREC is a conceptual model based on a relatively classical storage schema which enables the identification of a production function and of a transfer function (Combes, 1985; Guilbot, 1986; Servat & Dezetter, 1988). The CREC version used herein has 10 parameters (X_1, X_2, \dots, X_{10}) and gives the possibility of surface runoff passing through a linear reservoir. The production function (X_3, X_4, X_7, X_8, X_9) takes into consideration the state of soil humidity using the level of water in a reservoir

supplying evapotranspiration and gives the proportion of precipitated water in the runoff. The transfer function (X_1, X_2, X_5, X_6) consists of a rapid runoff term and a slow runoff term (represented by a decreasing exponential). X_6 is the value of a threshold which controls the outlet of the rapid runoff reservoir. The model works in daily time steps and calculates therefore an average daily discharge which is the sum of a possible surface runoff Q_j^S , a rapid flow Q_j^H and a slow flow Q_j^G .

The different parameters are optimized with the methods of Rosenbrock (1960) and Nelder & Mead (1964) used in sequence. Figure 1 presents the conceptual schema of the CREC model.

The MODGLO model This is a lumped conceptual model for which it is also possible to identify a production function and a transfer function (Servat, 1986; Dezetter, 1987). At the production function level, some physical mechanisms for rainfall-runoff transformation are called upon (consideration of the water retention capacity of soils: *CRT, DCRT, SH*, and of the infiltration processes: *BB, AA*) although numerous simplifying assumptions have been made. The transfer function consists of three parallel reservoirs. Each one is characterized by a supply coefficient (with the volumes resulting from the production function split between the reservoirs: *C1, C2, C3*) and a recession coefficient enabling the flow to be modulated in time (*COEFFQ1, COEFFQ2, COEFFQ3*). This model operates in daily time steps and therefore calculates an average daily discharge.

The MODGLO parameters are optimized according to the same procedure as for CREC. Figure 2 shows the conceptual schema of the MODGLO model.

The GR3 model The GR3 model is also a storage model (Edijatno & Michel, 1989). The structure of this algorithm is based on three concepts:

- (a) the ground reservoir (*A*), whose only outlet is the removal of water by evapotranspiration and which controls the division of the net rainfall between itself and the routing submodel;
- (b) an access time (*C*), which is the delay between net rainfall appearing and the time it gets into the second reservoir; and
- (c) the water gravity reservoir (*B*) which receives delayed inputs (cf. above) and whose only outlet is the flow of the river with a recession of the quadratic type.

According to Edijatno & Michel (1989), this set of three operators each of which depends on a single parameter seems to be, at present, the simplest schema for giving an account of the rainfall-runoff transformation in the simplest way.

The GR3 parameters are optimized according to the same procedure as for the CREC and MODGLO models. Figure 3 presents the conceptual schema of the GR3 model.

The data used

Four catchments situated in the northwest of the Ivory Coast were used at

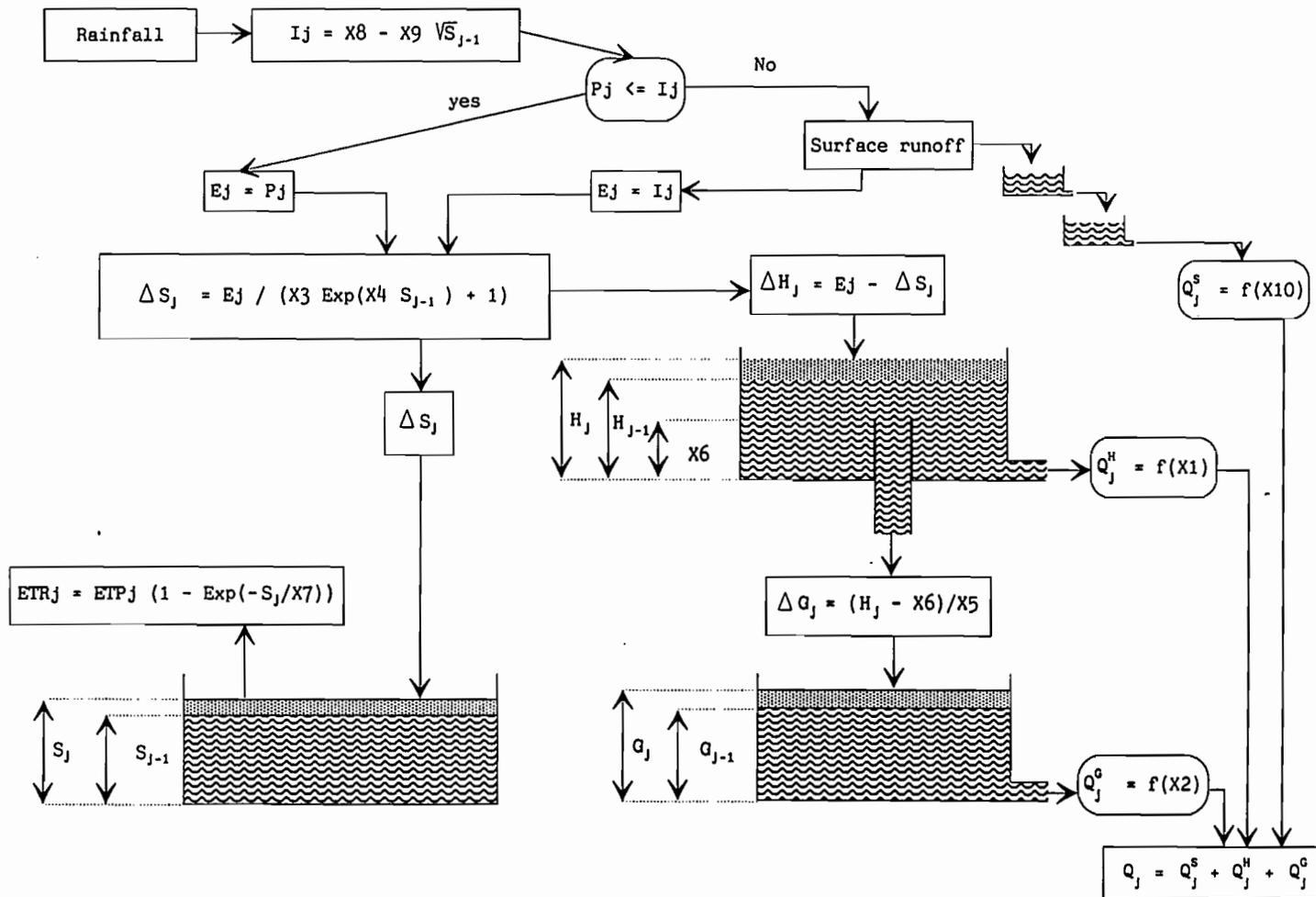


Fig. 1 Conceptual schema of the CREC model.

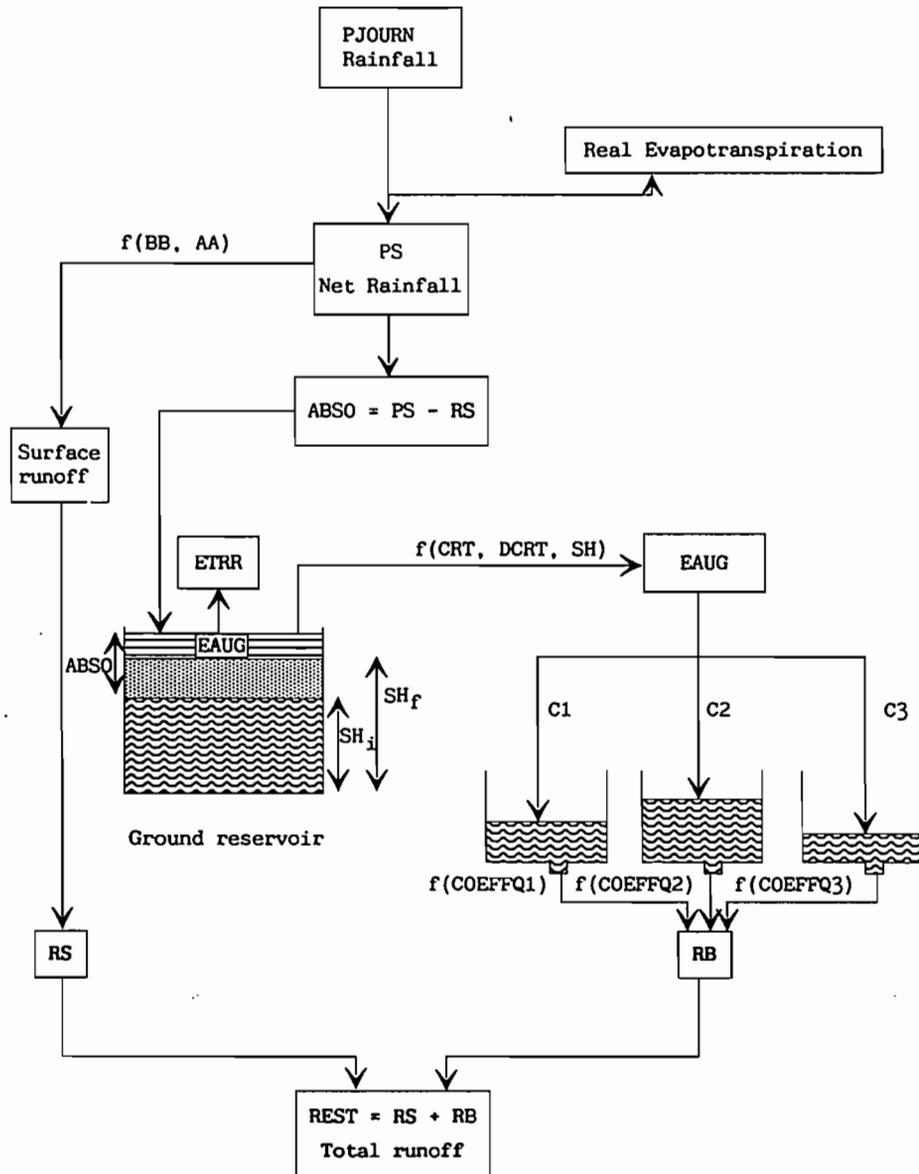


Fig. 2 Conceptual schema of the MODGLO model.

this stage of the programme (Fig. 4).

The Bagoé at Guingérini This catchment has an area of 1042 km². It is situated in the Niger basin, east of Odienné. The calibration period covers the years 1981, 1982 and 1983. The annual characteristics of precipitation and runoff have been grouped together in Table 1. 1983 appears to be a very dry year with a very low runoff. This was confirmed throughout the Ivory Coast where the drought was felt very severely.

Eric Servat & Alain Dezetter

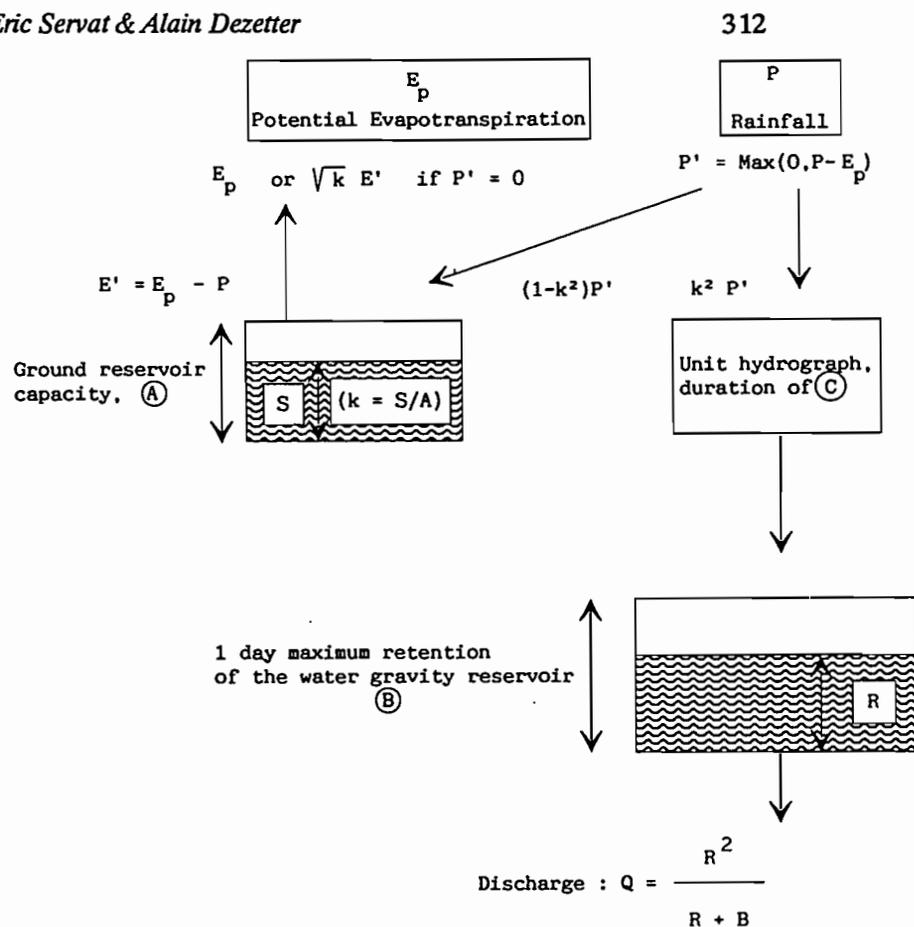


Fig. 3 Conceptual schema of the GR3 model.

The Bagoé at Kouto This catchment has an area of 4700 km². It includes the Bagoé at Guingérini catchment, and is also in the Niger catchment, east of Odienné. Calibrations were carried out over two distinct periods: 1973 to 1976 and 1981 to 1985. The annual characteristics of each of those periods have been grouped together in Tables 2 and 3. The years 1983 and 1984 show particularly low runoff depths and runoff coefficients.

The Bou at Boron The Bou at Boron catchment has an area of 3710 km². It is in the Bandama catchment, southwest of Korhogo. Calibrations were made over the period 1981 to 1985. Their characteristics have been reproduced in Table 4. The runoff coefficients for the years 1982 to 1984 are particularly low with, in particular, the value of 1.1% in 1983 which leads one to expect serious modelling difficulties.

The Lafigue at Badikaha road The Lafigue at Badikaha road catchment has an area of 443 km². It is in the Bandama catchment. The town of

Korhogo is situated in the catchment. Calibrations were done over the period 1981 to 1984. The main features have been reproduced in Table 5. The pronounced drought and the very low runoff coefficient for 1983 will once again be noted.

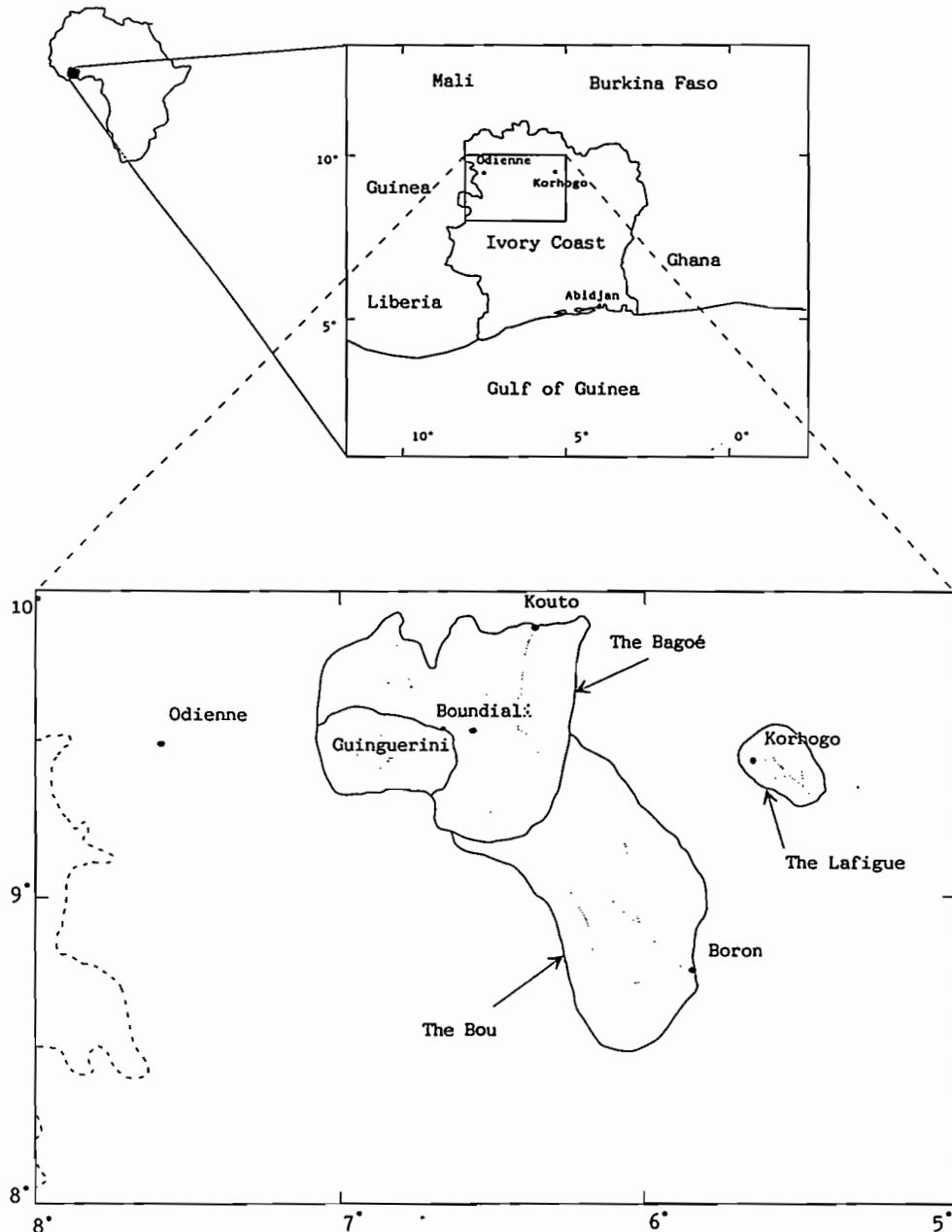


Fig. 4 Map of the situation of the four catchments studied in the northwest of the Ivory Coast.

Table 1 Precipitation and runoff annual characteristics of the Bagoé at Guingerini catchment (1981–1983)

Year	1981	1982	1983
Depth of rain (mm)	1412.0	1454.0	1103.7
Depth of runoff (mm)	299.5	233.9	52.1
Runoff coefficient (%)	21.2	16.1	4.7

Table 2 Annual precipitation and runoff characteristics of the Bagoé at Kouto catchment (1973–1976)

Year	1973	1974	1975	1976
Depth of rain (mm)	1424.0	1827.4	1463.1	1290.9
Depth of runoff (mm)	141.3	126.7	183.8	111.9
Runoff coefficient (%)	9.9	6.9	12.6	8.7

Table 3 Annual precipitation and runoff characteristics of the Bagoé at Kouto catchment (1981–1985)

Year	1981	1982	1983	1984	1985
Depth of rain (mm)	1340.2	1315.9	970.6	1146.6	1376.8
Depth of runoff (mm)	221.1	166.5	45.0	67.1	223.4
Runoff coefficient (%)	16.5	12.7	4.6	5.9	16.2

Table 4 Annual precipitation and runoff characteristics of the Bou at Boron catchment

Year	1981	1982	1983	1984	1985
Depth of rain (mm)	1052.9	1076.4	852.6	1055.6	1437.5
Depth of runoff (mm)	96.9	42.0	9.6	33.4	134.2
Runoff coefficient (%)	9.2	3.9	1.1	3.2	9.3

Table 5 Annual precipitation and runoff characteristics of the Lafigue at Badikaha road

Year	1973	1974	1975	1976
Depth of rain (mm)	1198.2	1170.7	835.6	1410.1
Depth of runoff (mm)	195.5	115.4	35.6	160.7
Runoff coefficient (%)	16.3	9.9	4.3	11.4

The objective functions tested

The automatic optimization of the parameters of a model requires the use of an objective function, i.e. a reference numerical "quantity" enabling the calibration to be improved. The choice of an objective function is not, however, without influence on the kind and quality of calibration at the end of the process.

In the context of this study several objective function formulations were tested in order to judge their performances and to select one for further systematic operations. The objectives set were the following:

- (a) reconstitution as precisely as possible of the volume of floods in the rainy season (let it be recalled that the objective of the studies carried out was to determine water supplies);
- (b) restoration of hydrograph dynamics; and
- (c) no time lag between observed and calculated hydrographs.

Less importance was attached to the precise reconstitution of low flows, often very low as a result of long periods without or with very low precipitation, and generally quite simple to reproduce with storage models.

There is a very large number of objective functions in the literature. It was not the intention to carry out an exhaustive study thereof which is, in practice, not possible. Five different objective functions were therefore studied, three of which were the subject of numerous uses in hydrological modelling. The remaining two were set up considering elements which seemed important.

The Crec objective function This objective function, so-called for it is the one which was originally used in the CREC model, (Combes, 1985) is expressed as follows:

$$1/N \cdot \sum [|1 - (Q_c/Q_o)| \cdot |1 - (Q_o/Q_{mo})|]$$

with: N = number of observations;
 Q_c = calculated discharge;
 Q_o = observed discharge; and
 Q_{mo} = observed mean discharge.

This expression tends towards 0 when Q_c tends towards Q_o .

The CrecBi objective function This objective function is none other than the Crec objective function to which has been added a balance term. The formulation therefore becomes:

$$1/N \cdot \sum [|1 - (Q_c/Q_o)| \cdot |1 - (Q_o/Q_{mo})|] + 1/N \cdot | \sum (Q_o - Q_c) / Q_{mo} |$$

This expression tends towards 0 when Q_c tends towards Q_o .

Initially, this balance term was used as a multiplier weighting coefficient. Its influence was therefore dominating and harmed the quality of the reconstituted hydrograph dynamics. It was finally taken into consideration in the form given, i.e. an additive element whose size is comparable to the first term

of the objective function.

The Fortin objective function This was put forward by Fortin *et al.*, (1971). Its expression is as follows:

$$1/N \cdot \sum \left[(Q_c - Q_o) / Q_o \cdot (1 + (|Q_o - Q_{mo}| / Q_{mo})) \right]$$

This expression tends towards 0 when Q_c tends towards Q_o .

The Nash objective function First proposed by Nash (1969) and again by Nash & Sutcliffe (1970), the formulation of this objective function is:

$$1 - \left[\sum (Q_c - Q_o)^2 / \sum (Q_o - Q_{mo})^2 \right]$$

This expression tends towards 1 when Q_c tends towards Q_o .

It is easy, as far as it is concerned, to draw an analogy with a regression analysis. The term $\sum (Q_o - Q_{mo})^2$ corresponds to a form of the variance of the observed series. The term $\sum (Q_c - Q_o)^2$ can be likened to a form of residual variance. The formulation of the Nash objective function thus expresses a kind of "efficiency" (or "yield") in a model similar in the R^2 of a regression analysis.

From a technical point of view a modified form of the Nash objective function was used:

$$\sum (Q_c - Q_o)^2 / \sum (Q_o - Q_{mo})^2$$

This expression tends towards 0 when Q_c tends towards Q_o . It does not give the proportion of the variance explained by the model but the percentage of the residual variance compared to the total variance.

The SExpER objective function (sum of the exponentials of relative deviations) This objective function brings in a term which makes it very sensitive to changes in Q_c :

$$1/N \cdot \sum \left[\exp(|Q_c - Q_o| / Q_o) \cdot (Q_o / Q_{mo}) \right]$$

The purpose of the weighting term Q_o / Q_{mo} is to give greater weight to high values (since the average observed runoff is generally very low, the Q_o / Q_{mo} relationship reaches significant values during high flow periods but low values when water levels are low).

This expression tends towards 1 when Q_c tends towards Q_o but, concerned with homogeneity, the deviation from 1 has been minimized.

The above five objective functions were used in calibrating each of the three models presented. The optimizations were performed with the following constraints:

- (a) a limited number of iterations for Rosenbrock's method ($50 \times P$ where P is the number of parameters to be optimized simultaneously);

- (b) an end-of-run criterion based on the stop of progress for Nelder & Mead's method;
- (c) the same initial parameters in each case; and
- (d) the same intervals of variation for the parameters in each case.

Examination of the optimal solutions found can be envisaged from several points of view. In the studies reported here, the systematic use of a module for evaluating the quality of the hydrographs thus reconstituted was favoured. Data were therefore available for enabling the performances of this or that objective function to be appraised either globally or depending on the model used.

RESULTS OF THE CALIBRATIONS

The calibrations, carried out in daily time steps (Leviandier & Ma, 1987), used a 10 day time step basis, which is the frequency selected concerning simulation and reconstitution. All the values taken by the objective functions at the end of the calibration phases have been regrouped in Table 6.

Several remarks are necessary:

- (a) a simple interpretation of the values of the objective functions is difficult. Only the Nash function can be linked directly to a statistical measure, viz. the percentage of residual variance compared to the total variance observed. This varies, depending on the case, between 13% and 63%;
- (b) the combination of the GR3 model and the SExpER objective function did not appear to function correctly since in four out of five cases there was no convergence. This can be attributed to a set of causes linked together, difficult to differentiate, and among which are the objective function expression, the initial parameters, and the methodology used; and

Table 6 Objective function (OF) values resulting from the calibrations

OF	Model	Bagoé Kouto 1973-1976	Bagoé Kouto 1981-1985	Bagoé Guingerini 1981-1983	Bou 1981-1985	Lafigue 1981-1984
Crec	CREC	0.968	0.667	0.769	1.163	0.796
	MODGLO	0.894	0.717	0.765	0.863	0.807
	GR3	6.914	1.305	5.249	1.098	0.761
CrecBi	CREC	1.173	0.736	0.806	1.359	0.881
	MODGLO	0.943	0.621	0.782	1.121	0.903
	GR3	8.305	1.793	5.682	1.602	0.873
Fortin	CREC	1.877	1.362	1.385	2.279	1.512
	MODGLO	1.404	1.047	1.114	1.456	1.460
	GR3	8.424	1.914	5.803	1.789	1.452
Nash	CREC	0.334	0.137	0.184	0.197	0.353
	MODGLO	0.369	0.133	0.185	0.205	0.490
	GR3	0.632	0.131	0.178	0.199	0.389
SExpER	CREC	1.388	1.581	1.255	1.733	1.228
	MODGLO	0.955	0.507	0.512	1.040	1.355
	GR3	NC	NC	NC	NC	1.015

NC: no convergence.

- (c) except for the combination with SExpER it will be noted that the GR3 model had some difficulties with calibrations for the Bagoé at Kouto (1973–1976) and for the Bagoé at Guingérini. It is, however, difficult to differentiate among the respective influences at work, e.g. the model itself, the objective function and the "model-objective function" association in these bad results, all the more so when one considers the good results of the GR3 model on the Bagoé at Guingérini with the Nash objective function.

Examining only the values taken by the objective functions at the end of the calibrations is not enough to judge the quality of the calculated hydrographs. Apart from the Nash objective function, it is difficult to appreciate the quality of the results. The objective functions are, in fact, a help with the calibration in so far as they constitute an objective to be reached. Their formulations are not, however, without influence on the shape and values of the series calculated. One objective function will have an important effect on low levels of flow, another one on the flood level peak. Their convergence will be more or less quick and precise and their relevance can be variable depending on the algorithm (and therefore the equations) with which they are associated. As a result, if the value of any objective function can enable some solutions to be eliminated or rejected, other elements of appraisal must be determined, enabling the quality of the hydrograph as a whole to be judged from a hydrological point of view. The first of these elements which comes to mind is the study of the hydrographs of the observed and calculated chronological series.

The Bagoé at Guingérini (1981–1983)

In all cases, 1983, a year with a particularly low runoff coefficient (4.7%), seems overestimated. Its influence on the calibration process is certainly important and has, as a result, a slight and systematic under-evaluation of the hydrographs calculated in 1981 and 1982. However, the level of adequacy reached in those two years lets one suppose that the algorithms used are able to reproduce correctly the hydrographs observed in "normal" years. This is what Fig. 5 shows, for example.

The Bagoé at Kouto (1973–1976)

All the calibrations obtained on the Bagoé at Kouto (1973–1976) are of very average quality whatever the objective functions and models considered. They all have the same characteristics, namely:

- (a) the 1974 hydrograph is over-estimated; and
- (b) the 1973, 1975 and 1976 hydrographs are under-estimated.

The year 1974 has a relatively low runoff coefficient (6.9%) which can introduce a significant bias into the optimization process. This could explain the systematic dysfunction that 1974, on the one hand, and 1973, 1975 and 1976 on the other hand, show (Fig. 6).

319

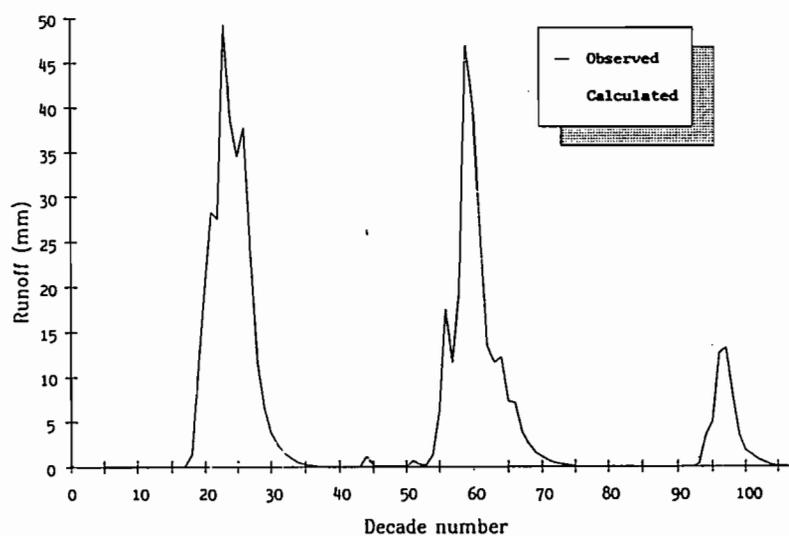
Selection of calibration objective functions

Fig 5 *The Bagoé at Guingérini, 1981-1983, CREC model and Nash objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.*

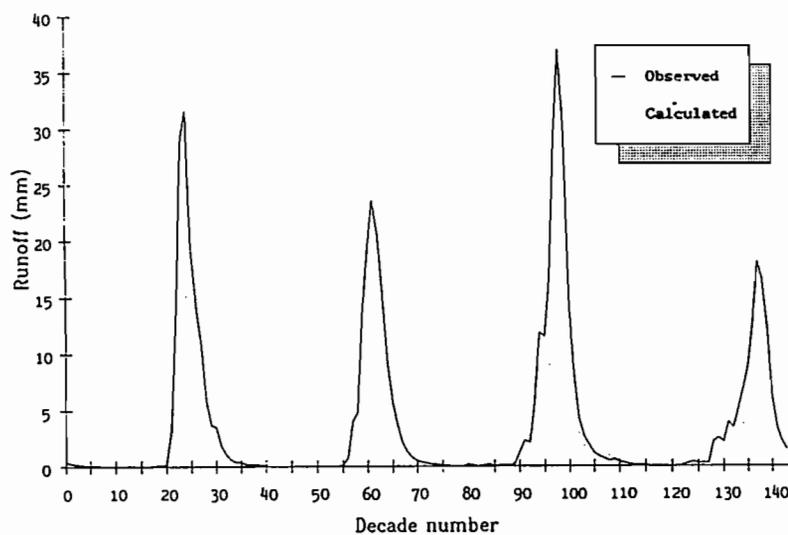


Fig. 6 *The Bagoé at Kouto, 1973-1976, MODGLO model and Nash objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.*

The Bagoé at Kouto 1981-1985

The hydrographs calculated are generally of quite good quality despite the consideration of two years with very low runoff coefficients, in 1983 and 1984. The years 1981 and 1982 are generally slightly underestimated

whereas 1985 is shown to be slightly in excess (Fig. 7, MODGLO and CrecBi). Few or no time lags are observed. The hydrograph dynamics are good, particularly when the water level is recessing, despite, sometimes, a surplus when the water is low (CREC and Nash, cf. Fig. 8).

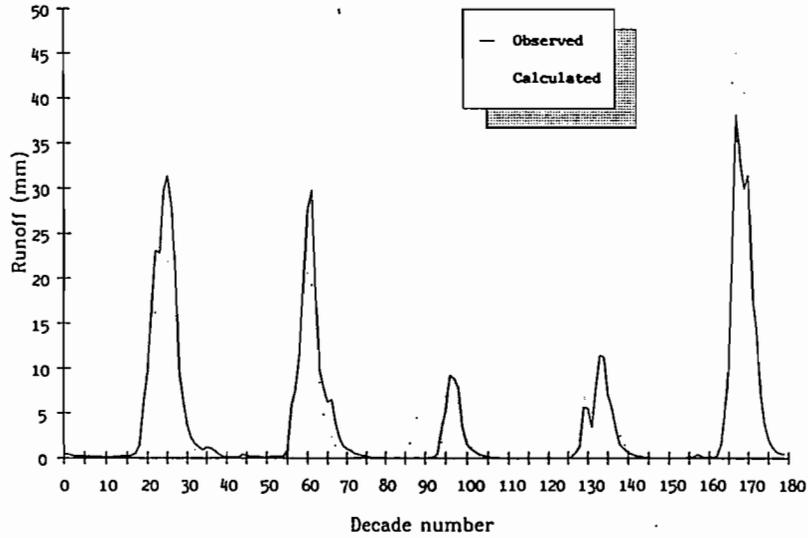


Fig. 7 *The Bagoé at Kouto, 1981–1985, MODGLO model and CrecBi objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.*

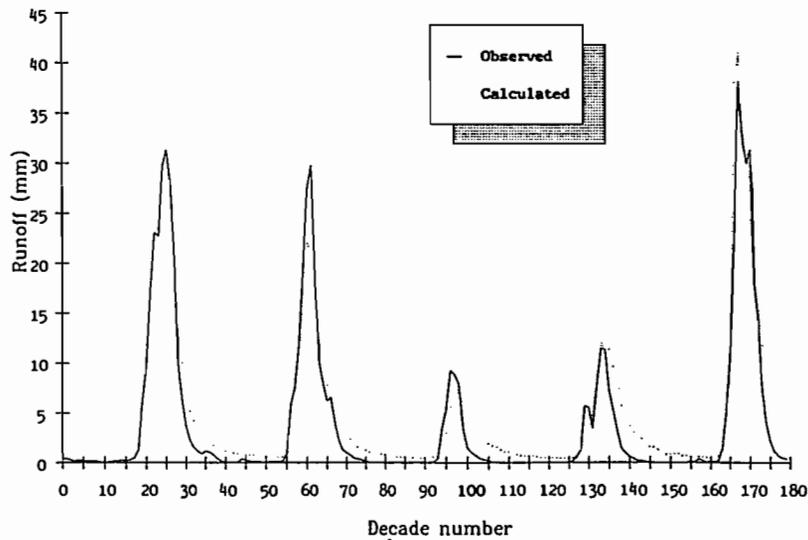


Fig. 8 *The Bagoé at Kouto, 1981–1985, CREC model and Nash objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.*

The Bou at Boron 1981–1985

The runoff coefficients for the years 1982–1984 are particularly low (3.9%, 1.1%, 3.2%). 1985 was much rainier than the four preceding years (more than 33% of additional rainfall). This chronological series shows therefore extreme and opposite behaviour which make the task of optimizing the parameters more difficult.

Given the distinctive features of the period available for calibration, the results obtained with the combination CREC and Nash are fairly satisfactory. Only 1981 is greatly underestimated (Fig. 9). This same trend is found everywhere, more or less pronounced (Fig. 10).

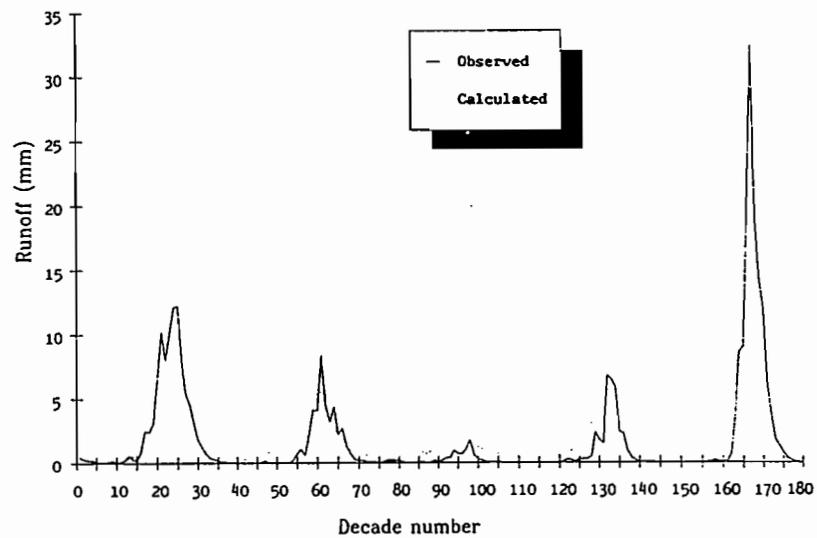


Fig. 9 The Bou at Boron, 1981–1985, CREC model and Nash objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.

The Lafigue at the Badikaha road 1981–1984

It is the CREC and Nash combination (Fig. 11) that enables the best calculated hydrograph to be obtained. 1983 poses once again problems which are shown to be difficult to solve with the algorithms used.

BEHAVIOUR OF OBJECTIVE FUNCTIONS

Graphic characterization

Whatever the model used, examination of the plots of observed and calculated

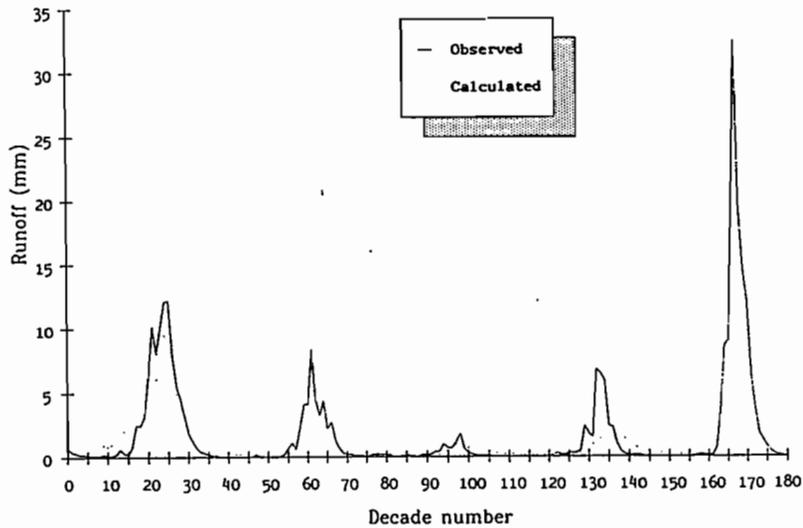


Fig. 10 *The Bou at Boron, 1981-1985, GR3 model and Crec objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.*

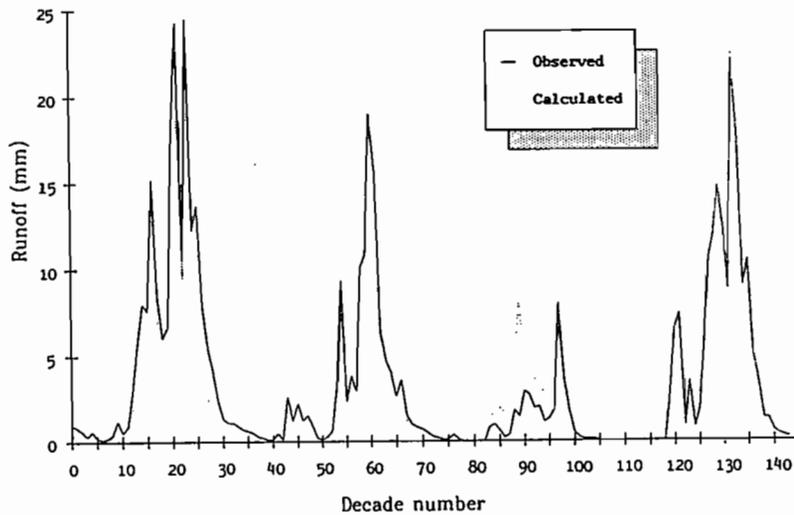


Fig. 11 *The Lafique at Badikaha road, 1981-1984, CREC model and Nash objective function: observed and calculated hydrographs for a 10 day time step.*

series brings out some common points relating the behaviour of the objective function:

- (a) the Crec objective function is shown to cause a little "reducing" in so far as the calculated hydrograph has a volume often lower than that observed. It respects, however, the dynamics of the hydrographs quite well;
- (b) consideration of the balance term in a purely additive form in CrecBi

- certainly gives it excessive influence. This results, in some cases, in compensation by the balance term (and therefore the volume of flood) which is reflected in one year only;
- (c) the behaviour of the Fortin objective function is similar to the Crec one in the sense that it is generally quite "reducing";
 - (d) the Nash objective function is shown to be outstanding concerning hydrograph dynamics and flood peaks. Its behaviour is, on the other hand, worse when low flows are concerned; and
 - (e) the SExpER objective function has a behaviour which is quite similar to those of the Crec and Fortin objective functions.

Hydrological characterization

Starting from the assumption that in each case an optimal calibration was obtained for each "model-objective function" combination, attempts to evaluate the performance of the objective functions themselves for a series of observations and for a given model were made.

For this, a comparative evaluation modulus of the quality of the calibrations obtained was defined with elements selected according to hydrological characteristics. This approach is quite close to that of Diskin & Simon (1977), but it is drawn up with reference to hydrological elements and not only to the value of the objective function.

The comparative evaluation modulus This comparative evaluation modulus is built up around several elements for assessing the calibration.

- (a) *The coefficient of correlation between observed and calculated depths of runoffs* This enables the consideration, in particular, of the time lags between observed and calculated hydrographs and, to a less extent, of the quantitative deviations between the two series.
- (b) *The deviation between the coefficients of autocorrelation observed and calculated at lag 2* Deviations at lag 1 are not very important. Autocorrelation coefficients at lag 2 were therefore used as evidence of the dynamics of the hydrographs, particularly when the water level is recessing.

- (c) *Two coefficients for evaluating the volume balance*

$$\text{Balance 1} = \left| \sum (L_o - L_c) \right|$$

$$\text{Balance 2} = \sum |(L_o - L_c)|$$

with: L_o = observed depth of runoff (mm); and

L_c = calculated depth of runoff (mm).

Balance 1 and Balance 2 tend towards 0 when L_c tends towards L_o .

These two balances are calculated over the whole calibration period. Balance 1 alone is not enough, since numerical compensations can intervene which will give a low value to this coefficient without the calculated hydrograph necessarily being of good quality. Balance 2 on

its own is not enough since slight oscillations on either side of the observed curve can be accepted after all. These would give Balance 2 a high value even if the general shapes of the observed hydrograph and the volume of the floods were closely matched.

- (d) *The index for the reconstitution of the volume of the floods (IRVF)* With regard to the applied objectives of these modelling studies, the reconstitution of floods has been favoured rather than of low waters. For the area concerned, and in order to be limited in time, the depth of runoff between 1 July and 31 October has been defined as the flood. Table 7 shows that, concerning the catchments studied, the depth of runoff during this period is always about 80% or more of the total depth of runoff. Appraisal of the overall reconstitution of flood volumes after the various calibrations is done with the help of the index for the reconstitution of the volumes of the floods (*IRVF*). This index is defined over the whole period under consideration. For each year the percentage deviation between observed and calculated floods is calculated. For each year, the absolute value of this deviation is weighted by a coefficient expressing the importance of the annual flood compared to the whole period flood. The *IRVF* is the sum of the weighted deviations. An observed series of n years gives:

$$IRVF = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\text{flood, year } i}{\sum_{i=1}^n \text{annual floods}} \times 100 \left| \frac{\text{Calc. flood, year } i}{\text{Obs. flood, year } i} - 1 \right| \right]$$

i.e.

$$IRVF = \sum_{i=1}^n w_i \times |\text{"observed - calculated" deviation (\%), year } i|$$

The *IRVF* tends towards 0 when the calculated flood tends towards the observed flood. For information, a systematic error of 10% on the annual floods of a given series corresponds to a value of 10 for the *IRVF*.

Table 7 Runoff from 1 July to 31 October over the whole periods

<i>Catchment and period</i>	<i>Total runoff (mm)</i>	<i>Total runoff 1 July-31 October (mm)</i>	<i>Runoff % 1 July-31 October</i>
<i>Bagoé at Kouto 1981-1985</i>	723.0	668.5	92.5
<i>Bagoé at Kouto 1973-1976</i>	563.1	485.0	86.1
<i>Bagoé at Guingérini 1981-1983</i>	585.3	552.1	94.3
<i>Boué at Boron 1981-1985</i>	316.1	290.9	92.0
<i>Lafigue road Badikaha 1981-1984</i>	506.9	386.9	76.3

Evaluation of the objective functions

- (a) *Methodology* Having defined a comparative evaluation for the perfor-

mances of the objective functions which is representative of hydrological characteristics, a methodology modelled on that of Diskin & Simon (1977) was then followed.

For a given period and model, the procedure was:

- (i) the values of the different terms of the modulus are calculated for each of the objective functions;
- (ii) for each term of the modulus, a performance classification of the objective functions is established, and a number is given (1 for the best rank, 5 for the worst rank);
- (iii) for each objective function, the different numbers obtained are added, thus yielding a "grade" between 5 and 25 (5 in the best case and 25 in the worst).

As an example, Table 8 presents this "grading" for the Bagoé at Guingérini.

Table 8 Values of the terms of the objective functions evaluation modulus: example of the Bagoé at Kouto (1981–1985), GR3 model

	Objective functions				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SE _{exp} ER
Correlation coefficient	0.889	0.887	0.882	0.955	0.936
Autocorrelation difference	0.082	0.078	0.082	0.021	0.001
Balance 1	388.4	341.7	292.2	8.8	183.7
Balance 2	418.8	378.9	347.8	235.0	312.7
IRVF	54.5	47.9	40.8	14.6	34.7

	Objective functions (classification)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SE _{exp} ER
Correlation coefficient	3	4	5	1	2
Autocorrelation difference	5	3	4	2	1
Balance 1	5	4	3	1	2
Balance 2	5	4	3	1	2
IRVF	5	4	3	1	2
<i>Sum ("grade")</i>	<i>23</i>	<i>19</i>	<i>18</i>	<i>6</i>	<i>9</i>

- (b) **Interpretation.** Considering all the cases studied, Table 9 brings out the respective classifications of each objective functions and their frequency. The Nash objective function clearly seems to dominate from a study of Table 9 since it is ranked first 12 times out of 15, and at the worst it is ranked third. After it, the CrecBi and Fortin objective functions, respectively ranked 12 and 9 times among the first three seem to have the best behaviour.

A more detailed study can be carried out by studying the behaviour of the objective functions in relation to each of the evaluation modulus elements:

Table 9 Rank frequencies for the different objective functions; the equally placed objective functions have not been differentiated

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	1	2	12	1
2	1	4	6	2	5
3	5	4	4	1	-
4	6	3	3	-	2
5	3	2	1	-	7

- (i) *the correlation coefficient* (Table 10) The Nash objective function seems very superior to the others concerning the correlation between observed and calculated runoffs. It comes first 12 times out of 15 and it shows the lowest interval between values (0.760–0.955). The other objective functions have performances which are quite similar to each other but at a much lower level;

Table 10 Rank frequencies of the objective functions for the correlation coefficient between observed and calculated depths of runoff

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	1	2	-	12	-
2	1	3	5	2	4
3	7	3	2	-	3
4	5	6	3	-	2
5	1	1	5	1	6
Minimum value	0.382	0.382	0.570	0.760	0.470
Maximum value	0.944	0.946	0.946	0.955	0.943

- (ii) *deviations between the observed and calculated autocorrelation coefficients at lag 2* (Table 11) The Crec and Fortin objective functions do not seem very outstanding concerning autocorrelation. It is, on the other hand, quite difficult to separate the other three. It will simply be noted that the Nash objective function gives the lowest variation interval;
- (iii) *Balance 1 and Balance 2* (Tables 12 and 13) The CrecBi and Nash objective functions appear quite clearly as the two objective functions which best respect the volumes (even if the Nash objective function does not, on occasions, reach the level of precision of CrecBi). It is, however, with the Nash objective function that, 11 times out of 15, the sum of the absolute deviations between observed and calculated values (Balance 2) is the lowest. The combination with Balance 1 also indicates that there are fewer numerical

327

*Selection of calibration objective functions***Table 11** Rank frequencies of the objective functions for the deviations between the observed and calculated autocorrelation coefficients at lag 2

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	-	5	6	4
2	3	4	3	2	3
3	5	3	2	1	4
4	4	7	2	3	-
5	3	1	3	3	4
Minimum value	0.016	0.007	0.002	0.003	0.001
Maximum value	0.716	0.716	0.183	0.123	0.203

Table 12 Rank frequencies of the objective functions for the term Balance 1

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	-	12	3	-
2	1	-	-	11	3
3	2	8	3	-	2
4	9	6	-	1	-
5	3	1	-	-	10
Minimum value	20.0	18.8	0.1	6.1	67.6
Maximum value	792.7	729.0	723.7	138.7	692.2

Table 13 Rank frequencies of the objective functions for the term Balance 2

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	2	3	1	10	-
2	1	4	3	2	4
3	7	3	3	-	3
4	3	5	1	3	2
5	2	-	7	-	6
Minimum value	146.2	154.9	179.3	149.1	163.0
Maximum value	826.3	779.0	774.5	412.5	435.8

- (iv) compensations than for the other objective functions; and *IRVF* (Table 14) Concerning the index of the reconstitution of the volume of floods (*IRVF*), the Nash objective function shows an obvious superiority. It never reaches very high values and is quite clearly ahead of the other objective functions. The calibra-

tion using this objective function seems therefore to enable a better representation of the flood.

Table 14 Rank frequencies of the objective functions for the term *IRVF*

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	<i>Crec</i>	<i>Fortin</i>	<i>CrecBi</i>	<i>Nash</i>	<i>SExpER</i>
1	-	-	2	13	-
2	2	4	2	1	5
3	4	5	5	1	1
4	6	5	2	-	3
5	3	1	4	-	6
<i>Minimum value</i>	19.6	24.7	12.6	14.6	25.7
<i>Maximum value</i>	154.7	144.1	142.9	48.6	119.2

BEHAVIOUR OF OBJECTIVE FUNCTIONS WITH GENERATED DATA

It is difficult to state to what extent the previous results are biased by the fact that none of the models used describes the physical processes perfectly, and that lumped models do not take into consideration the areal irregularities of the input and of the parameters. In order to avoid this, a supplementary numerical experiment was carried out with input/output data and parameters of "perfect" models. The use of these generated data and the application of the calibration procedures with the different objective functions would produce parameter estimates which, when compared with the original ones, yield results not containing the above mentioned bias.

Data have been generated from the rainfalls and the catchment of the Bagoé at Kouto for 1981–1985. After the calibrations of the models were performed, results were interpreted following the same methodology as used above. Since the "observed data" were generated via the models themselves, the quality of the calibrations is excellent and they show very low differences between observed and calculated hydrographs. Table 15 brings out the respective classification of each objective function and its frequency. The Nash objective function still dominates since it is ranked first twice and second once (with the MODGLO model). As next best, it is confirmed that the Fortin objective function has the best behaviour (once first, twice third). Moreover the Nash objective function is always ranked first regarding *IRVF*, which is very important from a project management viewpoint.

CONCLUSION

The objective functions that have been used can be put into three categories:
 (a) the first category groups together the *Crec*, *Fortin* and *SExpER* objective functions which are built up around the relative deviation between

Table 15 Rank frequencies for the different objective functions after calibration from generated data; the equally placed objective functions have not been differentiated

Rank	Objective functions (rank frequencies)				
	Crec	Fortin	CrecBi	Nash	SExpER
1	-	1	-	2	-
2	-	-	1	1	2
3	1	2	-	-	-
4	2	-	-	-	-
5	-	-	2	-	1

observed and calculated depth of runoff, and weighted by coefficients which are different;

- (b) the second category concerns the CrecBi objective function, none other than the Crec one to which a balance term has been added; and
- (c) the third category is represented by the Nash objective function whose formulation is linked to a classic statistical measure.

The periods for which calibrations were carried out are often critical for classical storage models of the type used here. They are, in fact, characterized by an exceptionally dry period observed principally in 1983, but also in 1984. The runoff coefficients are extremely low, with the depth of runoff representing only an almost negligible part of the water balance. This points to the likely importance of evapotranspiration which is unfortunately too often neglected in the rainfall-runoff models prepared by hydrologists.

Despite this distinctive feature, several lessons of a systematic nature can be learned from this study. There is nothing exceptional about the performances of the different models used, but generally speaking, they can be considered satisfactory. Some difficulties may be noted for the three algorithms used in "starting up again" after the dry season. The first floods are often badly reproduced. The long period of desaturation which is observed in the north of the Ivory Coast (little or no rain for several weeks, even several months) poses serious problems for the models built up according to a storage type schema. It is, moreover, difficult to integrate such an exceptional year as 1983 into a short calibration period.

Concerning the objective functions several points may be noted:

- (a) the Crec, Fortin and SExpER objective functions have very similar behaviours which may be qualified as "reducing" in so far as the calculated hydrograph often has lower values than the observed one;
- (b) in CrecBi, the consideration of a balance term in the form of an additive element has been shown to be relatively disadvantageous, since it often leads to numerical compensations compared to the observed hydrograph; and
- (c) the Nash objective function behaves well on the whole although it shows some weakness with low flows.

A systematic study using an evaluation modulus for the performances of the objective functions has confirmed the first conclusions. Table 9 clearly

shows that the Nash objective function stands out as the one which enables, overall, the best calibration. This is confirmed when each element of the modulus is taken separately. A study performed with generated data, to avoid bias due to the lumped models themselves, corroborates these conclusions.

With regard to the objectives aimed at (most precise estimation possible of the floods in the rainy season, restoration of the dynamics of the hydrographs, no time lags between observed and calculated hydrographs), the nature of the available data and the regional and climatic context (sudanese savannah area), it therefore appears clearly that it is the use of the Nash objective function which enables one to attain the best results.

Acknowledgements The authors would like to acknowledge the Hydrology Sub-Direction of the Water Direction of the Public Works Ministry of the Ivory Coast, and the Ivorian National Agency for Airports and Meteorology for the use of their data banks. Jean Marc Lapetite (ORSTOM) is thanked for his help with the drawings and for the treatment of the potential evapotranspiration data.

REFERENCES

- Combes, V. (1985) Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC. PhD Thesis, USIL, Montpellier, France.
- Dezetter, A. (1987) Modèle global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. DEA National d'Hydrologie. USIL, Montpellier, France.
- Diskin, M. H. & Simon, E. (1977) A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. *J. Hydrol.* 34, 129-149.
- Edijatno & Michel, C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, no. 2, 113-121.
- Fortin, J. P., Charbonneau, R., Lefèvre, J. & Girard, G. (1971) Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. LASH Publ. no. 101, Vol 2: 548-557. *Actes du Colloque de Varsovie*.
- Guilbot, A. (1986) Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. *Rev. Int. Sci. Eau*, 2(1), 19-26.
- Leviandier, T. & Ma, Z. C. (1987) Influence du pas de temps sur les performances des modèles pluie-débit. *Critères d'Applications Opérationnelles de Modèles Hydrologiques*. Rapport final, EDF, CEMAGREF, France.
- Nash, J. E. (1969) A course of lectures on parametric or analytical hydrology. Great Lakes Institute, University of Toronto, Canada. Fr 38, Lecture 12.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Nelder, J. A. & Mead, R. (1964) A simple method for function minimization. *Computer J.* 7, 308-313.
- Rosenbrock, H. H. (1960) An automatic method for finding the greatest or least of a function. *Computer J.* 3, 175.
- Servat, E. (1986) Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes. CRECS, MODGLO et MODIBI. ORSTOM Montpellier, France.
- Servat, E. & Dezetter, A. (1988) Modélisation globale de la relation pluie-débit: des outils au service de l'évaluation des ressources en eau. *Hydrol. Continent* 3(2), 117-129.

Received 20 June 1990; accepted 15 January 1991

ANNEXES

Communication au congrès de l'AISH de Vienne, Août 91

Prise en compte du type d'occupation des sols
dans une modélisation pluie débit en zone de savane soudanaise

PRISE EN COMPTE DU TYPE D'OCCUPATION DES SOLS DANS UNE MODELISATION PLUIE DEBIT EN SAVANE SOUDANAISE

E. SERVAT & A. DEZETTER

Antenne Hydrologique ORSTOM, 06 BP 1203, CIDEX 1, Abidjan
06, Ivory Coast

ABSTRACT Les différents projets d'aide au développement élaborés et réalisés dans le Nord de la Côte d'Ivoire nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources naturelles en général, et des ressources en eau en particulier. C'est dans cette optique qu'ont été réalisés des travaux de modélisation de la relation pluie-débit sur 17 bassins versants (100 à 4500 km²) des hauts bassins du Niger, du Bandama et du Sassandra. L'objectif était de caractériser les valeurs des paramètres après calage, afin de pouvoir utiliser ces algorithmes en simulation sur des bassins versants, non jaugés ou mal connus, dans le cadre de projets d'aménagement. Ces modèles "pluie-débit" ont été calés année par année sur les bassins versants retenus. On a, ensuite, procédé, sur les jeux de paramètres calés, à une analyse de données (ACP, régression linéaire multiple) destinée à mettre en évidence les relations entre les valeurs prises par les paramètres des modèles et différentes variables climatiques, physiques ou caractéristiques de l'occupation des sols. L'importance de ces dernières apparaît clairement. Elles entrent systématiquement dans les relations établies pour prédéterminer les valeurs des paramètres des modèles, permettant d'améliorer très sensiblement la validité de ces relations et donc la qualité des résultats qui en découlent. Ces relations ont été validées et testées. Elles présentent un niveau d'adéquation tout à fait satisfaisant entre hydrogrammes annuels observés et calculés, ce qui autorise leur utilisation dans le cadre de projets d'aménagements, à vocation agronomique en particulier.

INTRODUCTION

Les différents projets d'aide au développement élaborés et réalisés dans le Nord de la Côte d'Ivoire (périmètres d'irrigation, alimentation en eau potable, lutte contre l'onchocercose, etc.) visent, entre autres, à freiner le départ des populations rurales vers les grands centres urbains du Centre (Bouaké) et du Sud (Abidjan), en développant l'agriculture et en améliorant les conditions de vie dans ces régions plus défavorisées.

Les projets de restructuration et d'intensification des pratiques agricoles, si on ne considérait que ceux-ci, nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources naturelles en général, et des ressources en eau en particulier.

C'est dans cette optique que s'inscrivent les travaux de modélisation de la relation pluie-débit que nous avons réalisés en zone de savane soudanaise (Fig. 1). Cette étude a porté sur 16 bassins versants du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, de superficie variant de 100 à 4500 km², et situés sur les hauts bassins du Niger, du Bandama et du Sassandra.

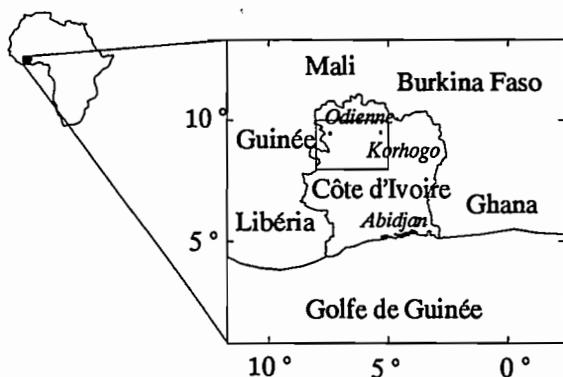


FIG. 1 Carte de situation de la zone d'étude

Afin de réaliser cette étude dans des conditions véritablement opérationnelles, les données utilisées ont été celles fournies par les réseaux de mesure nationaux de Côte d'Ivoire. Ces données,

disponibles au pas de temps journalier, sont les seuls éléments véritablement accessibles aux aménageurs pour bâtir un projet et procéder à des simulations de fonctionnement sur de longues durées.

L'objectif principal que nous avons fixé à nos travaux consistait à être en mesure de fournir des outils fiables de modélisation pluie-débit, qui puissent également être utilisés sur des bassins versants non jaugés. Dans ce but, nous avons cherché à établir des équations de prédétermination des paramètres de ces modèles, à partir de différentes variables géomorphologiques, climatiques ou d'occupation des sols.

BASSINS VERSANTS, DONNEES ET MODELES UTILISES

Bassins versants et données

Les cours d'eau des 16 bassins versants retenus dans le cadre de cette étude présentent une crue unique, dont le maximum se situe généralement en Août ou Septembre, conséquence d'une seule saison des pluies qui débute habituellement en Juin pour s'arrêter en Octobre.

L'essentiel des données sur lesquelles nous avons pu travailler couvre la fin des années 1970 et les années 1980 jusqu'en 1985 ou 1986 selon les cas. Cette période est caractérisée par une forte variabilité des précipitations annuelles. L'année 1983, caractérisée par une sécheresse très marquée sur l'ensemble du territoire ivoirien, a vu, par exemple, un total précipité de 879 mm sur le bassin du Yani à Madji (1013 km²), alors qu'en 1981 la pluviométrie annuelle était de

1559 mm. En conséquence, les lames écoulées présentent, également, une très importante dispersion. On notera, sur ce même bassin du Yani, 21.8 mm écoulés en 1983 pour 164.9 mm en 1981.

Sur l'ensemble de ces bassins les coefficients d'écoulement restent très faibles. Ils ne dépassent que très rarement 12 à 15%, sont très souvent inférieurs à 10%, et présentent parfois des valeurs inférieures à 5%.

Les caractéristiques propres à chacun de ces bassins versants ont été regroupées dans le Tableau 1, ainsi que les pourcentages relatifs aux différents types d'occupation des sols.

On note, sur la zone étudiée, une densité d'habitat très faible, avec un maximum de 4.4% observé sur le bassin du Lafigue, et qui correspond à la présence de la ville de Korhogo. L'existence de cette agglomération importante explique également la forte couverture du bassin en cultures (64.5%). Ce bassin

mis à part, les pourcentages de savane varient de 55.7 à 95.9%, ceux de forêt claire de 0.0 à 24.3%, et ceux de cultures de 0.3 à 44.0% (les pourcentages relatifs à l'habitat sont peu significatifs).

D'un bassin à l'autre, la nature de l'occupation des sols varie donc très sensiblement. Des cartes ont été dressées à partir des photos satellite (Servat & Lapetite, 1990), et nous présentons à titre d'exemple celle du Lafigue Route de Badikaha (Fig. 2).

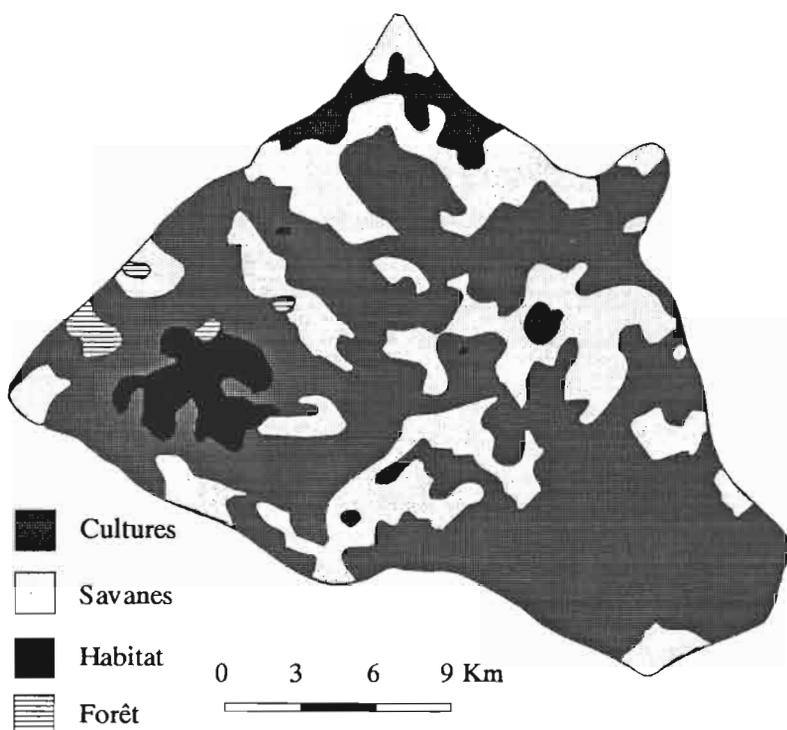


FIG. 2 Carte d'occupation des sols du bassin du Lafigue Route de Badikaha

TABLEAU 1 Caractéristiques des bassins versants étudiés. ((i): période d'observation incomplète; S: Savane; F: Forêt claire; C: Cultures; H: Habitat).

Nom du Bassin	Superf. (km ²)	Période étudiée	Pluie annu. (mm)	Lam e écoule (mm)	Coef. écoule (%)	S (%)	F (%)	C (%)	H (%)
Doundian à Wahire	650	1980 à 1984	1091 à 1537	55 à 252	4.9 à 16.4	75.0	13.0	11.7	0.3
Banifing à Ziemougou	990	1978 à 1985 (i)	1103 à 1457	182 à 276	13.0 à 22.2	70.3	17.1	12.4	0.2
Bandama à Seguekiele	368	1981 à 1985	895 à 1540	16 à 176	1.8 à 11.4	68.1	0.8	30.5	0.6
Bagoé à Kouto	4700	1968 à 1985 (i)	970 à 1827	45 à 355	4.6 à 21.8	59.8	23.8	5.9	0.5
Bagoé à Guingérini	1042	1981 à 1983	1103 à 1454	52 à 299	4.7 à 21.2	70.2	24.3	5.3	0.2
Lafigue à Rte Badik.	443	1981 à 1984	835 à 1410	35 à 195	4.2 à 16.3	30.0	1.1	64.5	4.4
Badenou à M'Bengue	1800	1983 à 1985	680 à 1288	3 à 138	0.5 à 10.8	66.9	6.4	25.8	0.9
Yoreloro à Kategue	338	1982 à 1986 (i)	914 à 1163	14 à 66	1.5 à 5.7	59.4	9.1	31.0	0.5
Yani à Madji	1013	1980 à 1986 (i)	879 à 1559	21 à 164	2.4 à 10.5	83.6	9.4	6.8	0.2
Douni à Pt. 398	120	1983 à 1986 (i)	1011 à 1240	77 à 247	7.6 à 22.5	55.7	0.0	44.0	0.3
Kobani à Nimbrini	342	1977 à 1984 (i)	994 à 1038	47 à 70	4.7 à 6.7	70.9	6.2	22.7	0.2
Mahandiab .à Wahire	835	1983 à 1984	1092 à 1117	86 à 119	7.7 à 10.9	80.5	15.4	4.0	0.1
Sien à Nafana	615	1977 à 1984	1038 à 1667	57 à 284	5.4 à 17.0	58.0	0.9	40.9	0.2
Sien à Massadou.	1325	1981 à 1986	1011 à 1610	40 à 193	3.8 à 15.4	55.9	8.7	35.0	0.4
Tiemba à Lille	541	1982 à 1984	1177 à 1616	135 à 279	11.5 à 17.3	95.9	3.5	0.3	0.3
Tiemba à Dioulatie.	2790	1981 à 1984(i)	973 à 1520	59 à 298	6.1 à 19.5	91.3	3.7	4.4	0.6

Modèles pluie-débit

Deux modèles globaux conceptuels et déterministes ont été utilisés pour mener à bien cette étude: CREC (Guilbot, 1985) et GR3 (Edijatno & Michel, 1989).

CREC est basé sur un schéma à réservoirs relativement classique qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert.

La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration, et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement. La fonction de transfert comprend, elle, un terme d'écoulement rapide et un terme d'écoulement lent.

Cette version de CREC utilise 7 paramètres que l'on peut répartir en 3 paramètres de production (X3, X4 et X7) et 4 paramètres de transfert (X1, X2, X5 et X6).

L'architecture de GR3 repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire:

- (a) le réservoir-sol (paramètre A), qui n'a comme seule sortie que le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage;
- (b) un hydrogramme unitaire (paramètre C), qui décrit la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir, à savoir:
- (c) le réservoir-eau-gravitaire (paramètre B). Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est du type quadratique.

METHODOLOGIE

Sur les bassins versants retenus, les débits observés au début du mois de Janvier sont nuls ou très faibles. Il a donc été décidé de travailler en années civiles (1er Janvier - 31 Décembre), considérées comme hydrologiquement indépendantes.

Après avoir éliminé les années d'observation pour lesquelles les données étaient incomplètes ou douteuses, nous disposons d'un total de 60 années pour les 16 bassins versants.

Les modèles CREC et GR3 ont été calés parallèlement pour chaque année prise individuellement, en utilisant la fonction critère de Nash (Servat & Dezetter, 1990 a). Pour chacun de ces algorithmes "pluie - débit", nous disposons donc de 60 jeux de paramètres calés dans des contextes différents (bassins différents, conditions climatiques variant d'une année à l'autre).

Une première exploitation de ces résultats a été réalisée par validation croisée (Servat & Dezetter, 1990 b). Nous ne rentrerons pas ici dans les détails, mais nous signalerons cependant qu'une des conclusions importantes de cette étude est que pour un bassin versant donné, le calage obtenu une année se révèle généralement inadéquat pour les autres années. Ce qui conduirait à penser que

les calages seraient plus dépendants de facteurs externes (climat, végétation, etc.) variant chaque année, que de facteurs intrinsèques au bassin versant.

Pour chacun des modèles, les 60 jeux de paramètres calés ont ensuite été étudiés à l'aide des techniques d'Analyse en Composantes Principales et de Régression Multiple. Les variables explicatives retenues étaient les suivantes:

- (a) Caractéristiques du bassin: Superficie (km²), Indice de Compacité de Gravelius.
- (b) Caractéristiques climatiques annuelles:
 - (i) Pluie Annuelle en mm (PA)
 - (ii) Pluies cumulées, en mm, du 1er Janvier aux dates suivantes: 15 Juin (Pc6), 15 Juillet (Pc7), 15 Août (Pc8), 15 Septembre (Pc9), 15 Octobre (Pc10).
 - (iii) Pluies relatives (en %), définies par le rapport "Pluie cumulée du 1er Janvier à la date D/Pluie Annuelle", aux dates suivantes: 15 Juin (Pr6), 15 Juillet (Pr7), 15 Août (Pr8), 15 Septembre (Pr9), 15 Octobre (Pr10).
- (c) Caractéristiques d'occupation des sols: pourcentages respectifs de savane, de forêt claire, de cultures et d'habitat.

L'utilisation de la méthode de régression multiple dite du "Stepwise" (Drapper & Smith, 1981) a permis d'obtenir des équations de prédétermination des paramètres des modèles. Ces équations ont été obtenues sur un échantillon, tiré au hasard, de 40 jeux de calages annuels auxquels étaient associées les variables explicatives correspondantes. Ces relations ont ensuite été validées sur les 20 "stations-années" non utilisées pour établir les équations.

RESULTATS

La recherche de relations significatives entre un paramètre et l'une quelconque des variables explicatives s'est révélée totalement infructueuse.

L'Analyse en Composantes Principales n'a pas, non plus, permis d'identifier de relations claires entre paramètres et variables. Les composantes principales sont assez faiblement définies, les trois premières cumulées n'expliquant que 69.7% de la variance totale du système. La première composante (34.3% de la variance) est bien corrélée avec les termes de pluie cumulée ($R = 0.96$ avec Pc7, $R = 0.93$ avec Pc8), la seconde (17.9% de la variance) est difficile à définir précisément, et la troisième (17.4% de la variance) reflète l'antagonisme observé entre le couple (Savane, Forêt) et le couple (Culture, Habitat).

Les corrélations entre les paramètres des modèles et ces composantes principales sont très faibles, à quelques nuances près, cependant, pour le modèle GR3. En effet, sa structure, au nombre de paramètres réduit, leur garantit un rôle plus marqué et une indépendance plus grande.

La recherche, par la méthode du Stepwise, d'équations de régression multiple a conduit aux relations qui figurent dans le Tableau 2.

TABLEAU 2 Equations de prédétermination des paramètres des modèles CREC et GR3.

Modèle CREC	Modèle GR3
$\text{Ln X1} = 29.171 - 5.320 \text{ Ln Pc8}$	$\text{Ln A} = 7.752 + 0.0095 \text{ Cultures}$ $- 4.450 \text{ Pr6}$
$\text{Ln X2} = -0.559 + 0.787 \text{ Pr7}$	$\text{Ln B} = -16.308 + 0.031 \text{ Cultures}$ $+ 3.453 \text{ Ln Pc8}$
$\text{Ln X3} = -21.977 - 0.049 \text{ Forêt}$ $+ 2.553 \text{ Ln PA}$	$\text{Ln C} = 2.957 \text{ Compacité} - 0.114 \text{ Forêt}$ $- 12.721 \text{ Pr7}$
$\text{Ln X4} = 7.765 - 2.556 \text{ Ln PA}$ $- 0.011 \text{ Cultures} + 1.029 \text{ Ln Pc8}$	
$\text{Ln X5} = 9.753 + 0.018 \text{ Cultures}$ $+ 8.913 \text{ Pr7} - 1.838 \text{ Ln Pc8}$	
$\text{X6} = 0.918 \text{ Cultures}$	
$\text{Ln X7} = 0.598 \text{ Ln Pc7}$	

L'importance des paramètres d'occupation des sols apparaît clairement. Pour le modèle CREC ils contribuent à définir X3 et X4, paramètres de production, ainsi que X5 et X6, paramètres de transfert. Pour GR3, on retrouve le pourcentage de cultures ou le pourcentage de forêt dans la définition de chacun des paramètres.

Une autre caractéristique de ces équations, qui peut être indirectement reliée à la nature de l'occupation des sols, est l'importance des termes de pluie cumulée ou relative des premiers mois de saison des pluies. Une des hypothèses que l'on peut avancer à ce sujet est que ces variables caractérisent le démarrage après la saison sèche, la croissance et l'importance de la couverture végétale, élément fondamental au vu de l'importance des phénomènes d'évapotranspiration dans les bilans hydriques en zone de savane soudanaise.

Ces relations ont ensuite été validées sur les 20 stations années qui n'avaient pas été utilisées pour leur calage. Le Tableau 3 présente les valeurs moyennes de critères de comparaison entre hydrogrammes observés et hydrogrammes reconstitués à l'aide des équations de prédétermination des paramètres: coefficients de corrélation entre lames observées et calculées, écarts entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1, et écart en % entre les volumes écoulés observés et calculés du 1er Juillet au 31 Octobre (période considérée comme primordiale en ce qui concerne la détermination des apports en eau). Ces critères de comparaison mettent en évidence la bonne qualité des lames prédéterminées. Les mauvais coefficients de corrélation et les fortes valeurs d'écarts sur les

volumes sont observés pour les hydrogrammes prédéterminés dans le cas des années exceptionnellement sèches (1983 et à un degré moindre 1984). L'erreur réalisée se voit, dans ce cas, tout à fait relativisée, au vu des faibles valeurs des lames écoulées observées ces années là (lame décadaire maximale de l'ordre de 5mm).

Le modèle GR3 présente de meilleurs résultats que CREC. Ceci est lié à la qualité de la définition et à l'indépendance de ses paramètres. A l'inverse, les nombreux paramètres de CREC, mal définis, sont relativement interdépendants les uns des autres. Ceci entraîne, dans le processus de calage du modèle, des phénomènes de compensation qui nuisent à la qualité des équations de prédétermination établies par la suite.

TABLEAU 3 Critères de comparaison entre hydrogrammes observés et prédéterminés.

	Modèle CREC	Modèle GR3
Coefficient de corrélation entre lames observées et lames calculées	moyenne: 0.70 maximum: 0.98 minimum: 0.009	moyenne: 0.89 maximum: 0.99 minimum: 0.81
Ecart sur le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 observé et calculé	moyenne: 0.12 maximum: 0.43 minimum: 0.0004	moyenne: 0.11 maximum: 0.35 minimum: 0.003
Ecart entre volumes écoulés observés et calculés (1/07 au 31/10) en %	moyenne: 40.85 maximum: 91.28 minimum: 4.73	moyenne: 28.52 maximum: 128.4 minimum: 0.11

Les Figures 3, 4 et 5 présentent, à titre d'exemple, trois hydrogrammes annuels reconstitués par prédétermination des paramètres de CREC et GR3.

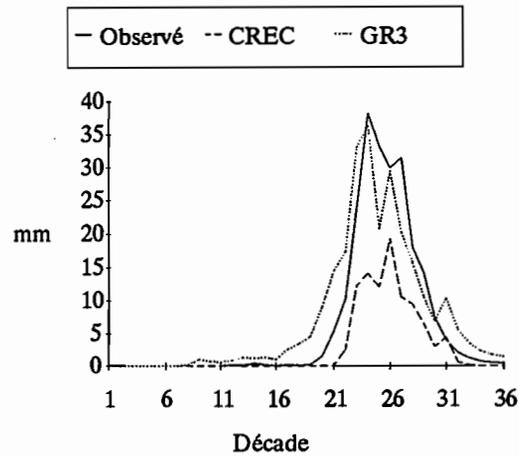


FIG. 3 La Bagoé à Kouto, 1985. Hydrogrammes observé et prédéterminés (CREC et GR3).

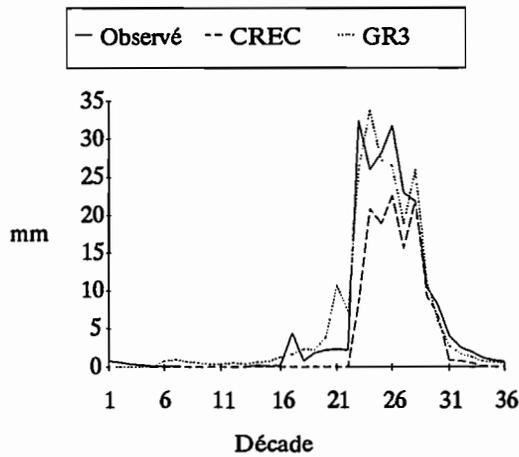


FIG. 4 Le Sien à Nafana-Sienso, 1977. Hydrogrammes observé et prédéterminés (CREC et GR3).

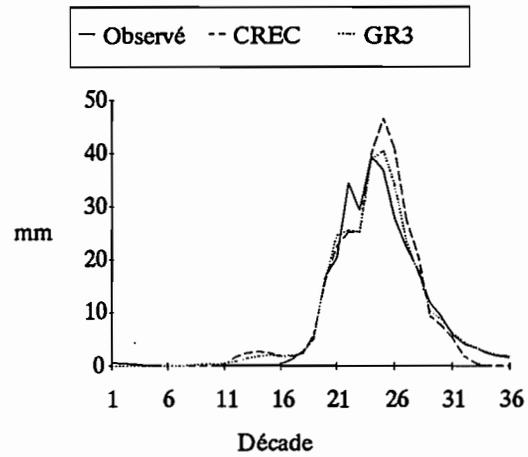


FIG. 5 La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981. Hydrogrammes observé et prédéterminés (CREC et GR3).

CONCLUSION

La méthodologie appliquée dans le cadre de cette étude (regroupement en "stations - années", calages annuels systématiques, caractérisation des jeux de paramètres calés et recherche d'équations de prédétermination des paramètres au moyen des techniques de régression multiple) a permis d'accéder à des résultats de bonne qualité, autorisant le calcul d'apports sur des bassins non jaugés en zone de savane soudanaise. Ces hydrogrammes prédéterminés ont une précision qui les rend utilisables dans le cadre d'études de projets d'aménagements.

Les relations auxquelles nous avons abouti mettent en évidence l'importance du type d'occupation des sols sur la réponse du bassin versant en termes d'écoulement. Elles mettent également l'accent, de manière indirecte, sur la nécessité de pouvoir prendre en compte des variables caractéristiques de la

couverture végétale proprement dite. Ce qui permettrait d'améliorer sensiblement la représentation des phénomènes d'évapotranspiration, primordiaux dans le bilan hydrique en zone de savane soudanaise.

On remarquera, par ailleurs, que c'est un modèle au nombre de paramètres réduit, GR3, qui conduit aux meilleurs résultats. Ce qui pose, une fois encore, le problème de la juste paramétrisation des modèles, et de la nécessité de l'indépendance des paramètres.

Signalons, pour terminer, qu'à la suite de ces résultats, cette méthodologie devrait se voir appliquée avec les mêmes objectifs dans des régions dont le climat est comparable, c'est à dire qui présentent une saison sèche longue et marquée: Nordeste Brésilien, pourtour méditerranéen, autres pays d'Afrique de la zone soudanaise.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction de l'Eau du Ministère des Travaux Publics de Côte d'Ivoire et l'Agence Nationale pour les Aéroports et la Météorologie pour la consultation et l'utilisation des banques de données.

Les auteurs remercient Jean-Marc LAPETITE (ORSTOM) pour sa contribution dans le cadre du traitement des données d'évapotranspiration potentielle.

REFERENCES

- Draper N.R. & Smith H. (1981) Applied regression analysis. John Wiley & sons Ed.
- Edijatno & Michel C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2/1989: 113-121.
- Guilbot A. (1986) Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. Revue Internationale des Sciences de l'Eau, Vol 2-1: 19-26.
- Servat E. & Dezetter A. (1990 a) Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. Hydrologie Continentale. Accepté pour publication.
- Servat E. & Dezetter A. (1990 b) Modélisation pluie-débit. Analyse des calages des fonctions de transfert et de production. Programme ERREAU. ORSTOM. Abidjan. Côte d'Ivoire.
- Servat E. & Lapetite J.M. (1990) Occupation des sols des bassins versants du Programme ERREAU. Programme ERREAU. ORSTOM. Abidjan. Côte d'Ivoire.