

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

SPECIALITE : MECANIQUE, GENIE MECANIQUE, GENIE CIVIL

Formation Doctorale : Hydrologie "Sciences de l'Eau et Aménagement"

Ecole Doctorale : GEOSCIENCES

ADEQUATION DE DIFFERENTS MODELES GLOBAUX PLUIE-DEBIT POUR DETERMINER LES APPORTS EN EAU DANS LES ZONES DE TRANSITION ET DE FORET DE LA COTE D'IVOIRE.

Essai de régionalisation des paramètres.

par

Brou KOUAME

Soutenue le 27 novembre 1992 devant le Jury composé de :

MM.	BOCQUILLON Claude, Professeur, Université Montpellier II	Président
	OBERLIN Guy, Directeur de Recherches, ORSTOM, CEMAGREF Lyon	Rapporteur
	SERVAT Eric, Chargé de Recherches, ORSTOM, Abidjan	Examineur
	MONIOD Frédéric, Directeur de Recherches, ORSTOM, Montpellier	Directeur de Thèse

Rapporteurs: M. ASSA Ayémou, Professeur, Université d'Abidjan
M. OBERLIN Guy, Directeur de Recherches, ORSTOM

A mes parents,

A Delphine,

A mes enfants,

AVANT-PROPOS

En m'acceptant, en 1986 dans la cadre du DEA et par la suite de la Thèse, dans leurs laboratoires respectifs d'Hydrologie de l'ORSTOM et d'Hydrologie et de Modélisation de l'Université Montpellier II, Messieurs Bernard POUYAUD et Claude BOCQUILLON m'ont fait un grand honneur. Je les en remercie très sincèrement. Je souhaite exprimer ma reconnaissance à l'ORSTOM, Institution sans l'appui financier et matériel de laquelle cette thèse n'aurait probablement pas pu s'achever.

Au terme de ce travail, je ne saurais trouver les mots suffisants pour exprimer mes remerciements à celui qui a suivi pas à pas le déroulement de ce long chemin, Monsieur Eric SERVAT. Son encadrement scientifique et matériel quotidien ont contribué à créer les conditions indispensables à la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Frédéric MONIOD, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, qui a assuré la fonction de Directeur de Thèse. Les conseils qu'il nous a prodigués, malgré l'éloignement, ont chaque fois été précieux.

Que Messieurs, Guy OBERLIN, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, et Ayémou ASSA, Professeur à l'Université d'Abidjan, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je souhaite également remercier les membres de l'Antenne Hydrologique de l'ORSTOM, qui ont apporté leur concours à l'élaboration de ce travail. Il s'agit de Mesdames Elisabeth MAUROY, Célia LEVINET, de Messieurs Alain DEZETTER, Jean-Marc LAPETITE, Bruno MERCIER, Olivier VIGAND, Emmanuel Dibi KONAN.

Je voudrais remercier le Ministère de la Recherche Scientifique et de l'Enseignement Supérieur de Côte d'Ivoire pour ma mise à la disposition de l'Antenne Hydrologique de l'ORSTOM, ce qui a permis le bon déroulement de ce travail.

Il convient d'exprimer mes remerciements aux services ivoiriens de gestion des réseaux pour la mise à notre disposition des données de base: l'ANAM (Agence Nationale des Aérodrômes et de la Météorologie), et la SDH (Sous Direction de l'Hydrologie) en la personne de Monsieur Mamadou SAKHO, son Responsable.

Enfin, je n'oublie pas mes camarades de l'ENSTP (Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics) qui m'ont tout le temps soutenu par leurs encouragements.

RESUME

Dans un but d'évaluation des ressources en eau dans les zones de transition et de forêt de la Côte d'Ivoire, plusieurs modèles globaux pluie-débit sont testés. Ces modèles au pas de temps annuel, mensuel et journalier sont calés sur un ensemble de 90 stations-années en forêt et 54 en zone de transition, réparties en 27 bassins versants de 100 à 7000 km². L'analyse des différents calages fait ressortir une adéquation satisfaisante du modèle au pas de temps mensuel dans la restitution des hydrogrammes. Les modèles au pas de temps journalier ont conduit à des résultats de qualité diverse du fait, d'une part, de problèmes liés à la qualité des données journalières, issues des réseaux de mesure et souvent entachées d'erreurs, et, d'autre part, des algorithmes eux-mêmes qui prennent insuffisamment en compte les particularités liées au contexte tropical en général, et les différences de saturation du sol en saison sèche et en saison des pluies en particulier. Ce travail permet néanmoins d'offrir un panel complet de méthodes d'évaluation des ressources en eau, validé sur l'ensemble du territoire ivoirien.

MOTS CLES

Côte d'Ivoire, relation pluie-débit, estimation des apports, modélisation globale, prédétermination des paramètres, zone forestière, zone de transition.

Adequacy of different rainfall–runoff lumped models to assess water yields in the transition and forest zones of Côte d'Ivoire. Attempt of parameters regionalization.

ABSTRACT

In order to estimate the water resources in the areas of forest and transition in Côte d'Ivoire, several models dealing with rainfall / flow rate were tested. These models, with time step taken as a year, month and day, used yearly data from 90 hydrological stations in forest area and 54 in transition area. Those data were collected from 27 watersheds ranging from 100 to 7000 km² in area. The analysis of the different results shows that the models using a monthly time step fit the hydrogram better. The models using daily time step did not fit very well because of, in one hand, the field errors related to the obtention of the data, and, in the other hand, the inadequacy of the algorithms, that did not enough take into account the features due to the tropical context, and more particularly the difference of soil saturation between rainy and dry season. However, this work shows that many models can be used to estimate the water resources on the territory of the Côte d'Ivoire.

KEYWORDS

Côte d'Ivoire, rainfall/flow relation, assessment of the runoff, global modelisation, predetermination of the parameters, forest area, transition area.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	11
1. PREMIERE PARTIE	14
1.1. Description du milieu physique.....	14
1.2. Critique et analyse des observations	29
2. DEUXIEME PARTIE.....	48
2.1. Modélisation au pas de temps annuel	48
2.2. Modélisation au pas de temps mensuel.....	61
2.3. Restructuration du modèle au pas de temps mensuel.....	81
3. TROISIEME PARTIE.....	131
3.1. Modèles et critères utilisés.....	131
3.2. Calage des modèles au pas de temps journalier.....	142
3.3. Validation croisée	158
3.4. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres.....	164
3.5. Conclusions	175
CONCLUSION	177
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	182
TABLE DES MATIERES	186
LISTE DES TABLEAUX.....	190
LISTE DES FIGURES.....	196
ANNEXES.....	201

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'évaluation des ressources en eau est une des principales préoccupations dans les programmes de recherches en hydrologie sur les différents aspects du cycle de l'eau. L'Antenne Hydrologique de l'ORSTOM à Abidjan a initié dans ce sens un programme dénommé ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en Eau) qui concerne les trois zones climatiques différentes (zones de savane, de transition et de forêt) de la Côte d'Ivoire.

Les objectifs de ce travail concernent les possibilités de caractérisation et d'évaluation à différents pas de temps des ressources en eau dans une région donnée afin d'être en mesure de fournir la meilleure approximation possible des apports à l'exutoire de bassins versants, jaugés ou non, et de dimensions variées (100 à 7000 km²).

Dans l'optique de retombées pratiques et d'applications possibles de l'étude en matière d'aménagement et de gestion, nous avons choisi de ne travailler qu'avec les seules données dites de "réseau" tant en pluviométrie qu'en hydrométrie. Ces données sont généralement disponibles au pas de temps journalier.

Dans le déroulement de ce travail, nous utiliserons plusieurs modèles globaux pluie-débit fonctionnant à différents pas de temps en partant du plus grand au plus petit, c'est à dire du pas de temps annuel au pas de temps journalier en passant par le pas de temps mensuel.

La première partie de ce document décrit sommairement le milieu physique des différentes zones concernées et présente les données de base. On trouvera dans le premier chapitre un aperçu sur les paysages géomorphologiques, sur les caractéristiques climatiques, sur les régimes hydrologiques et une rapide description des sols et de la végétation. Le second chapitre critique et analyse les observations pluviométriques et hydrométriques. Ce même chapitre présente quelques unes des caractéristiques d'occupation des sols.

Précisons qu'une étude ayant été menée, plus particulièrement, par DEZETTER (1991) en zone de savane, nous avons fait porter nos travaux de modélisation plus spécifiquement sur les zones de forêt et de transition. C'est la raison pour laquelle, les données d'occupation des sols n'ont été calculées que pour des bassins versants de ces deux zones. Néanmoins le modèle que nous avons testé au pas de temps mensuel a été, ensuite, utilisé en savane dans un souci de validation sur l'ensemble du territoire ivoirien.

Dans la deuxième partie, relative aux modèles à grands pas de temps (pas de temps annuel et mensuel), le premier chapitre teste plusieurs relations d'évaluation de la lame annuelle écoulée. Le deuxième chapitre étudie l'algorithme initial de SNYDER (1963) au pas

de temps mensuel, et le troisième chapitre procède à sa restructuration par la réduction du nombre de ses paramètres et à différentes applications du modèle définitif.

Quant à la troisième partie, elle présente les différents résultats de trois modèles pluie-débit au pas de temps journalier (modèles CREC, MODGLO et GR3). Le premier chapitre décrit ces modèles et les critères numériques utilisés pour leur calage. Le deuxième chapitre expose les différents calages de ces modèles. Le troisième chapitre traite, quant à lui, de certaines techniques d'analyse de données appliquées aux paramètres, à savoir la validation croisée d'un jeu de paramètres calés, l'analyse en composantes principales et des essais de prédétermination des paramètres des modèles.

PREMIERE PARTIE

1. PREMIERE PARTIE

Cette première partie présente le milieu physique de la Côte d'Ivoire dans l'ensemble des trois zones climatiques différentes. Cette présentation du contexte fait souvent référence à l'étude d'AVENARD (*in* AVENARD et al, 1971) sur le milieu naturel de la Côte d'Ivoire.

La critique et l'analyse des données hydropluviométriques nous situent sur le volume et la qualité des informations dont nous avons disposées.

Une étude des caractéristiques d'occupation des sols permet de se rendre compte de la répartition en zones de forêt, de savane, de cultures et d'habitation sur quelques bassins versants pour lesquels on a pu disposer des informations appropriées.

1.1. DESCRIPTION DU MILEU PHYSIQUE

1.1.1. Paysages géomorphologiques

La Côte d'Ivoire s'inscrit grossièrement dans un carré de côté compris entre 4°30 et 10°30 de latitude Nord, et 2°30 et 8°30 de longitude Ouest. Elle est limitée au Sud par le Golfe de Guinée, à l'Est par le Ghana, au Nord par le Burkina Faso et le Mali, et à l'Ouest par la Guinée et le Libéria. Ses 322 463 km² de superficie sont partagés entre la forêt au Sud, la savane au Nord et une zone de transition entre les deux.

L'étude de AVENARD (*in* AVENARD et al, 1971) a révélé que peu de choses distinguent les paysages géomorphologiques de la Côte d'Ivoire des autres paysages de la plate-forme Ouest africaine essentiellement caractérisée par son "horizontalité". Le socle ivoirien, de manière générale, est incliné du Nord vers le Sud en direction de l'atlantique avec une pente régulière. Trois panneaux plus ou moins affaissés semblent cependant se distinguer: le plus élevé est le plus occidental, autour de la ville de Man, le plus affaissé est occupé par les zones des lagunes et le troisième constitue la majeure partie du modelé. Cette partie est ondulée, caractérisée par une succession de collines très monotones avec quelquefois des reliefs résiduels plus élevés.

Selon AVENARD (*in* AVENARD et al, 1971), on peut répartir les reliefs en cinq zones (Cf. figures 1.1 et 1.2):

- zone I: la retombée de la dorsale guinéenne;
- zone II: les plateaux du Nord;

- zone III: la zone de transition: glacis méridionaux et marche centrale;
- zone IV: les bas-pays intérieurs;
- zone V: la frange littorale.

Les bassins versants étudiés sont répartis dans les cinq zones ci-dessus.

1.1.1.1 . La retombée orientale de la dorsale guinéenne

La dorsale guinéenne, ensemble de reliefs vigoureux qui prolonge le Fouta-Djalou, est à l'origine du seul compartiment montagneux de Côte d'Ivoire, à l'Ouest et au Nord-Ouest du pays.

On distingue dans cette région deux massifs:

- le massif du Nimba et sa bordure, aux frontières du Libéria, de la Guinée et de la Côte d'Ivoire, qui s'élève à 1750 mètres.
- le grand ensemble du massif de Man qui est une zone non homogène, comprenant une partie montagneuse vers le Sud et une partie de hautes collines au Nord.

La zone montagneuse incluant les massifs des Dans et des Touras s'élève à une altitude de 500 à 1000 mètres avec quelques surélévations comme le Mont Tonkoui, 1189 mètres.

La zone de hautes collines a une altitude moyenne variant entre 600 et 700 mètres avec quelques reliefs qui s'élèvent aux environs de 1000 mètres.

La zone du Nord-Ouest (Odienné - Borotou, I-2) est formée d'un vaste plateau dont l'altitude varie entre 400 et 450 m. Quelques rares plateaux apparaissent sur le substratum granitique ou gneissique sous forme de buttes, de collines ou de dômes de faible importance.

L'unité de Boundiali-Madinani (I-31) s'élève à une altitude légèrement supérieure à 500 m. Les plateaux sont plus accidentés et à des altitudes plus diversifiées. L'importance des reliefs individualisés se fait nettement sentir dans le paysage.

L'unité de Mankono-Séguéla (I-32) correspond à un ensemble assez homogène de plateaux qui s'abaissent du Nord vers le Sud entre 400 et 300 m. Sur un substratum essentiellement granitique entre Séguéla et Mankono, il s'est développé une remarquable série de dômes cristallins dominant fortement l'ensemble de la pénéplaine.

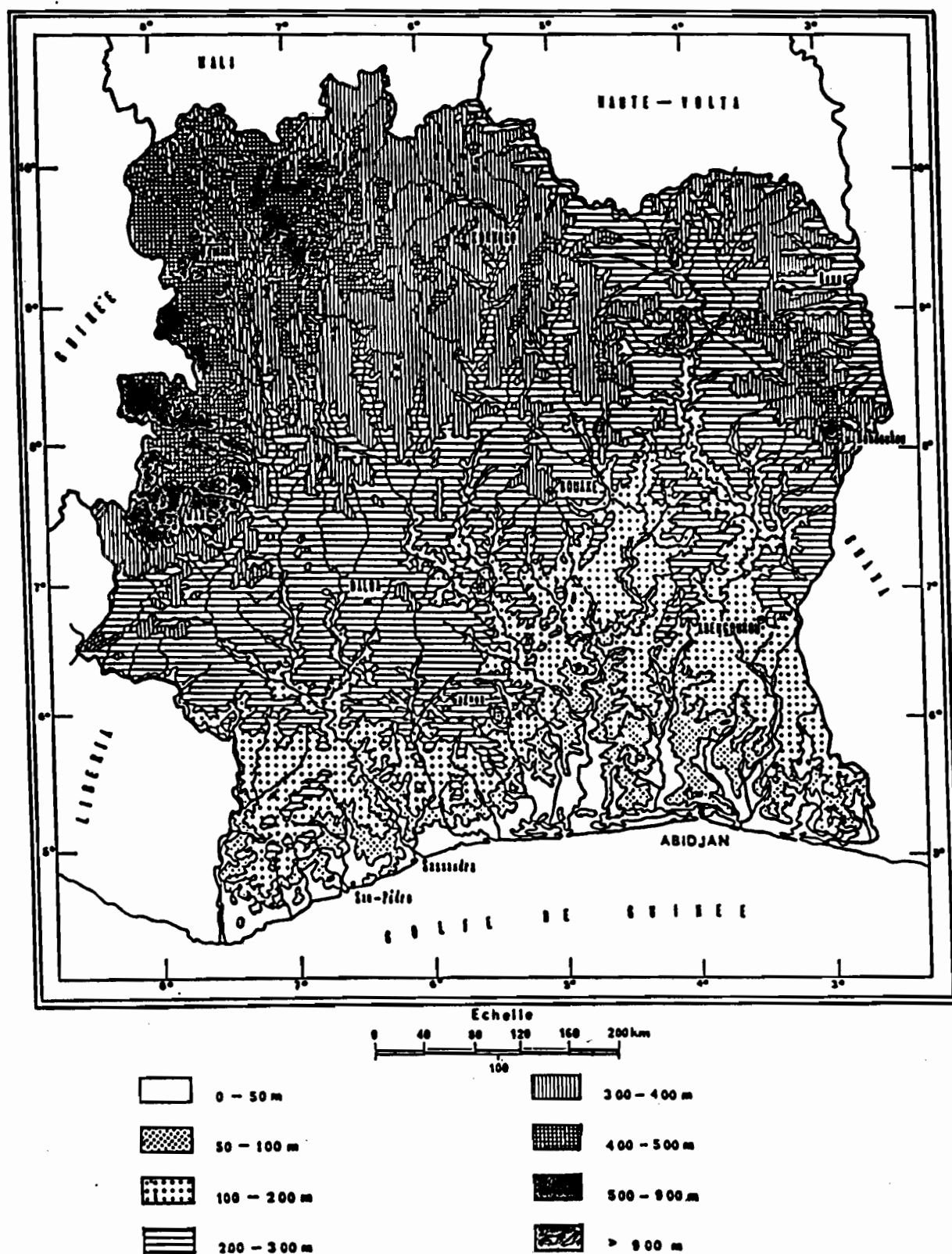
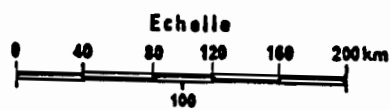


Figure 1.1: Carte du relief de la Côte d'Ivoire (AVENARD, in AVENARD et al, 1971)



Retombée Dorsale
Guinéenne S. L.

Plateaux du Nord.

Zone de transition.

Plaines intérieures.

Frange littorale.

Figure 1.2: Découpage en zones physiques (AVENARD, *in* AVENARD et al, 1971)

1.1.1.2. Les plateaux du Nord

La zone du Nord (II-1) est constituée en partie des derniers éléments de la dorsale guinéenne. C'est une zone formée de surfaces très aplanies, mollement ondulées s'abaissant progressivement de 450 à 400 m près de Boundiali jusqu'à moins de 300 m au Sud-Est dans la vallée de la Comoé.

1.1.1.3. La zone de transition: glacis méridionaux et marche centrale

Cette zone, qui s'étend approximativement entre les 8^e et 6^e parallèles, est caractérisée par un abaissement en direction de la mer au Sud. Les caractères de glacis y sont encore manifestes.

Les glacis méridionaux de l'Ouest (III-11) sont prédominés par des surfaces granitiques aplanies, gravillonnaires. Ces glacis s'abaissent de 300 vers 200 mètres d'altitude. Ils sont quelquefois établis sur du schiste.

Les glacis de l'Est (III-12), et plus précisément ceux à l'Est de la Comoé, sont moins développés. Ils se signalent par une large bande. Ces glacis sont plus rouges et plus cuirassés. Dans la partie Nord entre Tanda et Bondoukou, s'élève une série de reliefs importants, de pointements isolés ou d'alignements rocheux cuirassés. Ces hauteurs correspondant à un ensemble complexe de granites intrusifs culminent à plus de 700 m dans le massif à l'Ouest de Bondoukou.

La "marche centrale" (III-2) correspond à la zone de savane boisée coincée dans la forêt dense, qu'on appelle communément le "V Baoulé". Elle occupe l'interfluve du Bandama et du Nzi. Les glacis du Nord s'abaissent progressivement de 400 m à moins de 100 m au confluent du Bandama et du Nzi. On y distingue plusieurs unités en relation d'après Riou (1966):

- le horst granitique de Bouaké avec ses plateaux et ses longs versants;
- la longue bande granitique, déprimée, qui s'étend de Toumodi vers M'Bahiakro;
- les bas-pays schisteux et l'ensemble des collines birrimiennes du Yaouré et de Marabadiassa.

Le pays baoulé regroupe un ensemble de reliefs tabulaires tels que l'Orumba-Boka, le Mont Dido, le Kokumbo, le Blaffo-Gueto, les principaux sommets du Yaouré. Ces reliefs constituent les points culminants et dominants de cette zone avec 450 à 500 mètres d'altitude.

1.1.1.4. Les bas-pays intérieurs et la frange littorale

D'après AVENARD (*in* AVENARD et al, 1971) les bas-pays intérieurs (IV) constituent une zone différente des autres qui échappent à la vieille plate-forme africaine. C'est un ensemble de collines, de vallons, de buttes avec des plateaux mal élaborés qui s'élèvent entre 150 et 120 m. Cette zone qui correspond au front d'attaque de l'érosion atlantique est définie comme un paysage difficile à appréhender, sans grandes lignes directrices. Le paysage est aussi caractérisé par la présence d'eaux stagnantes. Le socle essentiellement schisteux est parfois parsemé de taches granitiques.

La frange littorale du Sud-Ouest (V-1), dont le socle est en majeure partie granitique, parvient jusqu'à la côte en une série de bas plateaux finement disséqués par l'érosion.

Les fleuves côtiers arrivent difficilement à se frayer des passages entre des seuils caractérisés par des rapides et quelques plaines intérieures remblayées. Dans cette région la côte est plus rocheuse à Tabou tandis que les plaines littorales s'ouvrent largement à Grand-Béréby.

1.1.2. Caractéristiques climatiques

En Côte d'Ivoire il existe deux zones climatiques principales correspondant aux deux types de paysages rencontrés: savane et forêt claire au Nord, forêt dense et humide au Sud. A ces deux types de paysages sont donc associés respectivement le climat tropical et le climat équatorial.

Le climat tropical type est caractérisé essentiellement par deux saisons bien marquées: la saison sèche en hiver boréal et la saison des pluies en été. Pendant la saison sèche les précipitations sont rares et on observe de grands écarts de température entre la nuit et la journée (la nuit étant relativement froide et la journée chaude). La saison des pluies ou "hivernage" présente quant à elle de faibles écarts de température et des moyennes assez faibles (RODIER, 1964).

Le climat équatorial est caractérisé par deux saisons des pluies (Avril-Juin et Septembre-Novembre) et deux saisons sèches (Juillet-Août et Décembre-Mars).

1.1.2.1. Mécanisme météorologique

L'Afrique Occidentale, de manière générale, est soumise toute l'année à l'influence de deux masses d'air de direction et de caractéristiques opposées (Cf. figure 1.3: LEROUX, 1984; SIRCOULON, 1986; KOUAME, 1987).

Il s'agit:

- de l'air continental originaire des régions sahariennes, chaud et très sec qu'on appelle alizé boréal ou communément *Harmattan* qui souffle du Nord vers le Sud.
- de l'air océanique des régions équatoriales chargé d'humidité appelé alizé austral ou *Mousson* soufflant dans la direction Sud-Nord.

La zone de convergence entre l'harmattan et la mousson est appelé *Front Intertropical* (F.I.T.) ou *Intertropical Convergence Zone* (I.T.C.Z) (terme anglo-saxon). La convergence de ces masses d'air n'étant pas suivie d'une augmentation de leurs vitesses, il se produit une ascendance de l'air avec la formation de nuages.

Ces deux masses d'air, et par la suite le F.I.T. lui-même, se déplacent sous l'effet principal des gradients de pression. La dépression thermique saharienne située entre l'anticyclone des Açores et l'anticyclone lybien joue le rôle moteur principal. Quand cette dépression remonte en latitude elle crée un appel de mousson qui repousse le F.I.T. vers le Nord et inversement quand elle descend vers l'équateur (ELDIN, *in* AVENARD et al, 1971). Ce déplacement du F.I.T. conditionne donc les précipitations sur l'Afrique Occidentale. On note ainsi que quand les régions situées au Nord du F.I.T., où souffle l'harmattan, se trouvent en saison sèche, celles situées au Sud sont en saison des pluies (Cf. figure 1.4: COUREL, 1984).

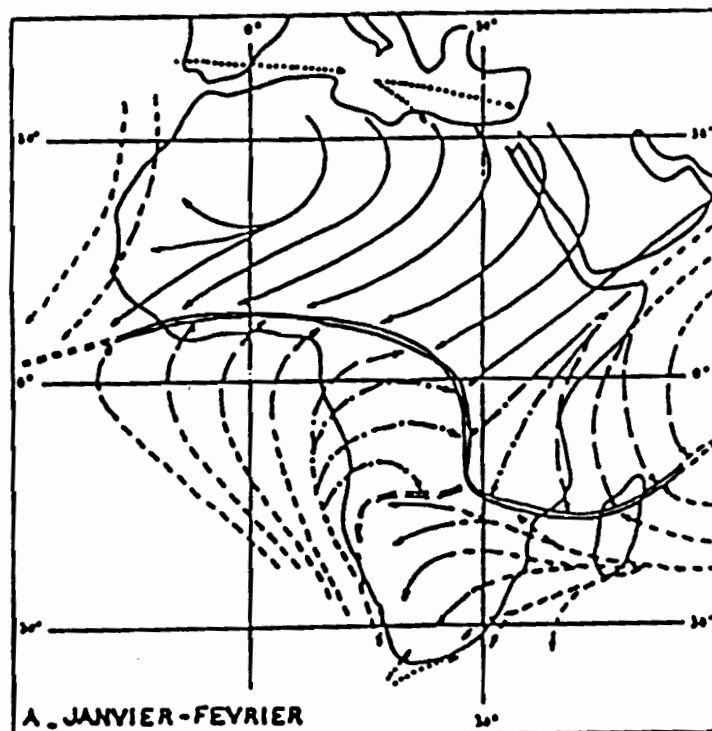
La trace au sol du F.I.T. occupe deux positions extrêmes: la position méridionale en Décembre-Janvier et la position septentrionale en Juillet-Août. Pour accomplir sa migration Sud-Nord, le F.I.T. met environ six mois et quatre mois dans le sens Nord-Sud pour revenir à sa position initiale (COUREL, 1984).

1.1.2.2. Pluviométrie

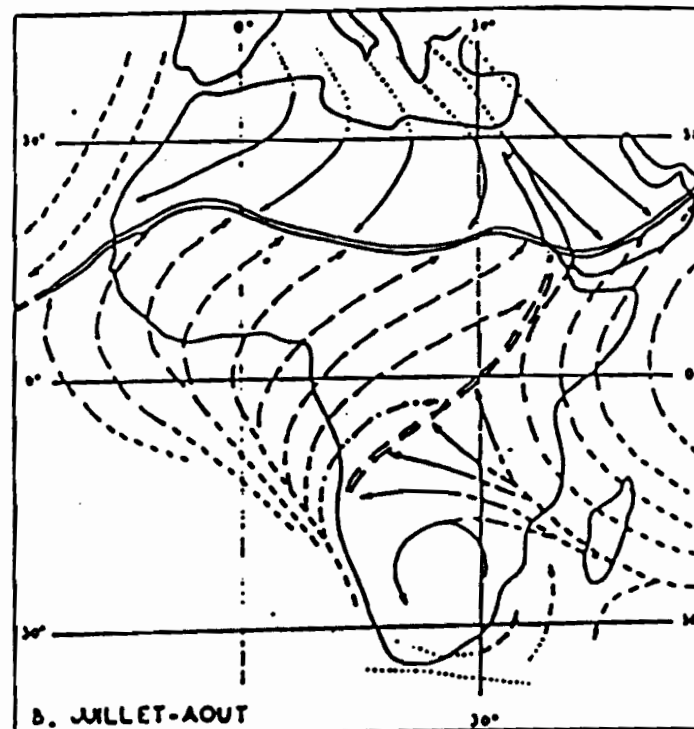
Nous donnerons ici un bref aperçu des régimes pluviométriques rencontrés en Côte d'Ivoire. D'après GIRARD (*in* AVENARD et al, 1971), la pluviométrie moyenne est comprise entre 1050 et 2500 mm du Nord au Sud. Les précipitations diminuent progressivement du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Selon la quantité des précipitations annuelles et leur répartition saisonnière, quatre régimes pluviométriques peuvent être distingués:

- Le régime tropical de transition ou climat soudanais

Ce régime couvre la partie du pays approximativement au Nord du 8^e parallèle, puis du 9^e vers l'Est. Les précipitations annuelles y sont assez abondantes (1250 à 1700 mm). Les mois



- - - - Alizé maritime
 ——— Mousson
 ——— Alizé continental
 = = = Confluence Inter Océanique



- - - - Alizé maritime continentalisé
 - - - - "Mousson" (alizé dévié)
 Front Inter tropical
 = = = Zone Inter tropicale de Confluence

Figure 1.3: Flux et discontinuités sur l'Afrique (LEROUX, 1984)

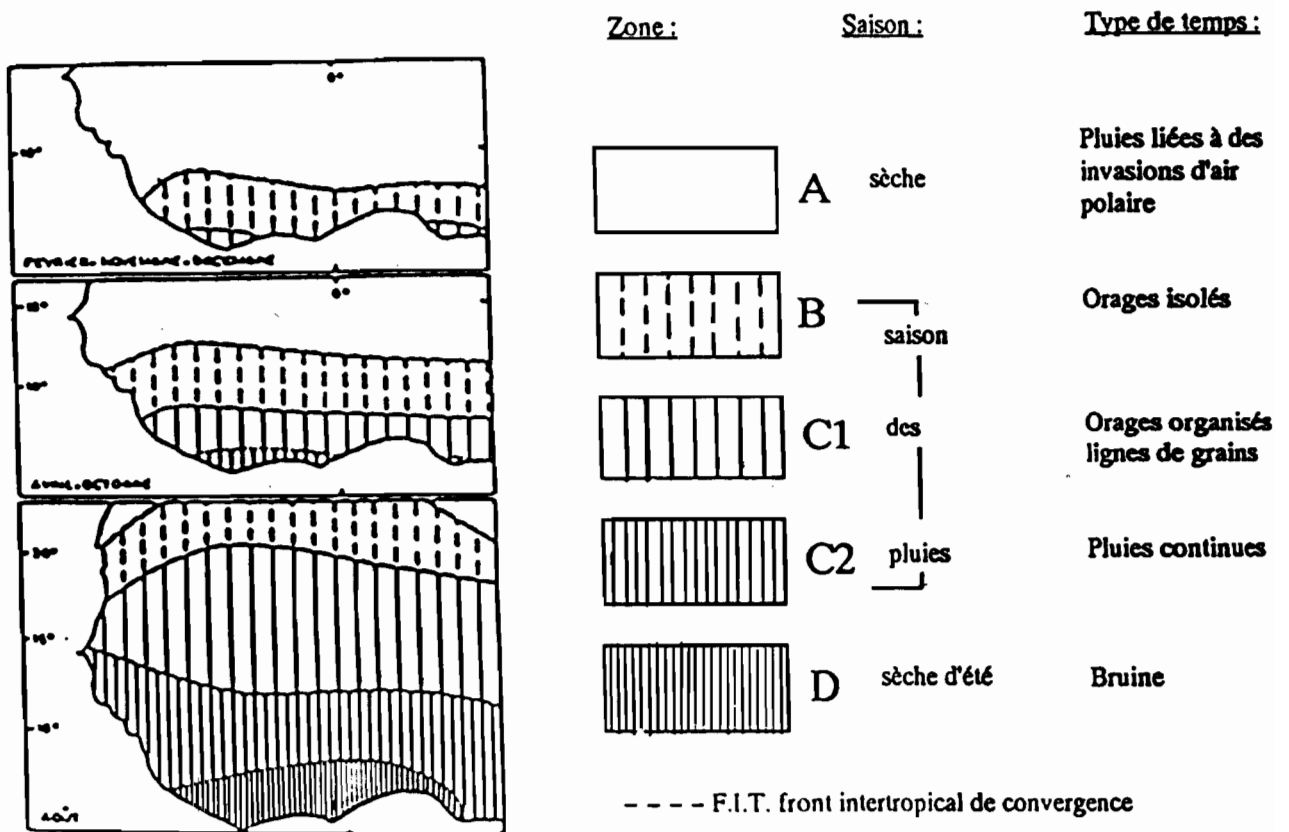


Figure 1.4: Positions moyennes mensuelles des zones climatiques et succession moyenne des types de temps associés (COUREL, 1984)

de Juillet, Août et Septembre sont les plus pluvieux. De Novembre, à Avril on observe une période sèche.

- Le régime équatorial de transition atténué ou climat baouléen

Il se situe tout juste au-dessous du régime tropical de transition et est limité au Sud approximativement par le 6^e parallèle puis le 7^e à l'Est. Il est caractérisé par deux saisons des pluies (Mars à Juin, puis Septembre et Octobre) et deux saisons sèches (Juillet et Août, et Novembre à Février).

La pluviométrie annuelle varie de l'Est à l'Ouest de cette zone entre 1100 et 1600 mm.

- Le régime équatorial de transition ou climat attien

Ce régime de la partie Sud de la Côte d'Ivoire comprend, comme le précédent, deux saisons des pluies et deux saisons sèches. La première saison des pluies d'Avril à mi-Juillet est plus importante que la seconde de Septembre à Novembre. La petite saison sèche s'observe de mi-Juillet à mi-Septembre et la grande de Décembre à Mars. Les pluies annuelles oscillent entre 1400 et 2500 mm.

- Le régime de montagne

C'est le régime du compartiment Ouest du pays où les reliefs sont les plus importants. Ce régime pluviométrique des massifs montagneux de la région de Man est caractérisé par une saison sèche et une saison des pluies, tout comme le régime soudanais. La saison sèche, plus courte que dans le cas du régime soudanais, s'étend de Novembre à Février. Quant à la saison des pluies, elle a lieu de Mars à Octobre avec un maximum en Septembre.

Les pluies annuelles varient de 1400 à plus de 2300 mm.

1.1.3. Régimes hydrologiques

Le réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire (Cf. figure 1.5) est composé de quatre fleuves principaux (le Cavally, le Sassandra, le Bandama, la Comoé), des fleuves côtiers (le Tabou, le San Pédro, le Niouniourou, le Boubo, l'Agnéby, la Mé et la Bia), et des affluents du Niger (le Baoulé, la Bagoé et le Gbanhala).

A l'exception des affluents du Niger qui coulent vers le Nord pour atteindre le fleuve Niger, le réseau hydrographique est orienté vers l'Océan Atlantique au Sud.

Les débits des cours d'eau étant liés aux précipitations, les régimes hydrologiques s'apparentent de ce fait aux régimes des précipitations. On distingue donc quatre régimes hydrologiques.

- Le régime tropical de transition

Sur les bassins de plus de 1000 km², ce régime du Nord de la Côte d'Ivoire est en général caractérisé par une crue unique en Août, Septembre et Octobre suivie d'un tarissement rapide en Novembre et Décembre, puis d'une période de basses eaux de Janvier à Mai avec de très faibles valeurs de débit.

Dans cette zone de savane plus ou moins boisée, sur les petits bassins de moins de 100 km², on note un tarissement complet vers la fin de l'année et en début de la suivante.

- Le régime équatorial de transition

La région de ce régime couvre le Sud où la végétation est forestière. Dans ce régime la présence de deux pointes de crue annuelle s'explique par les deux saisons des pluies qu'on y observe. La première période des hautes eaux, la plus importante, se situe en Juin et la seconde en Septembre–Octobre.

Une petite période des basses eaux s'observe en Juillet–Août et une autre bien marquée de Décembre à Mars.

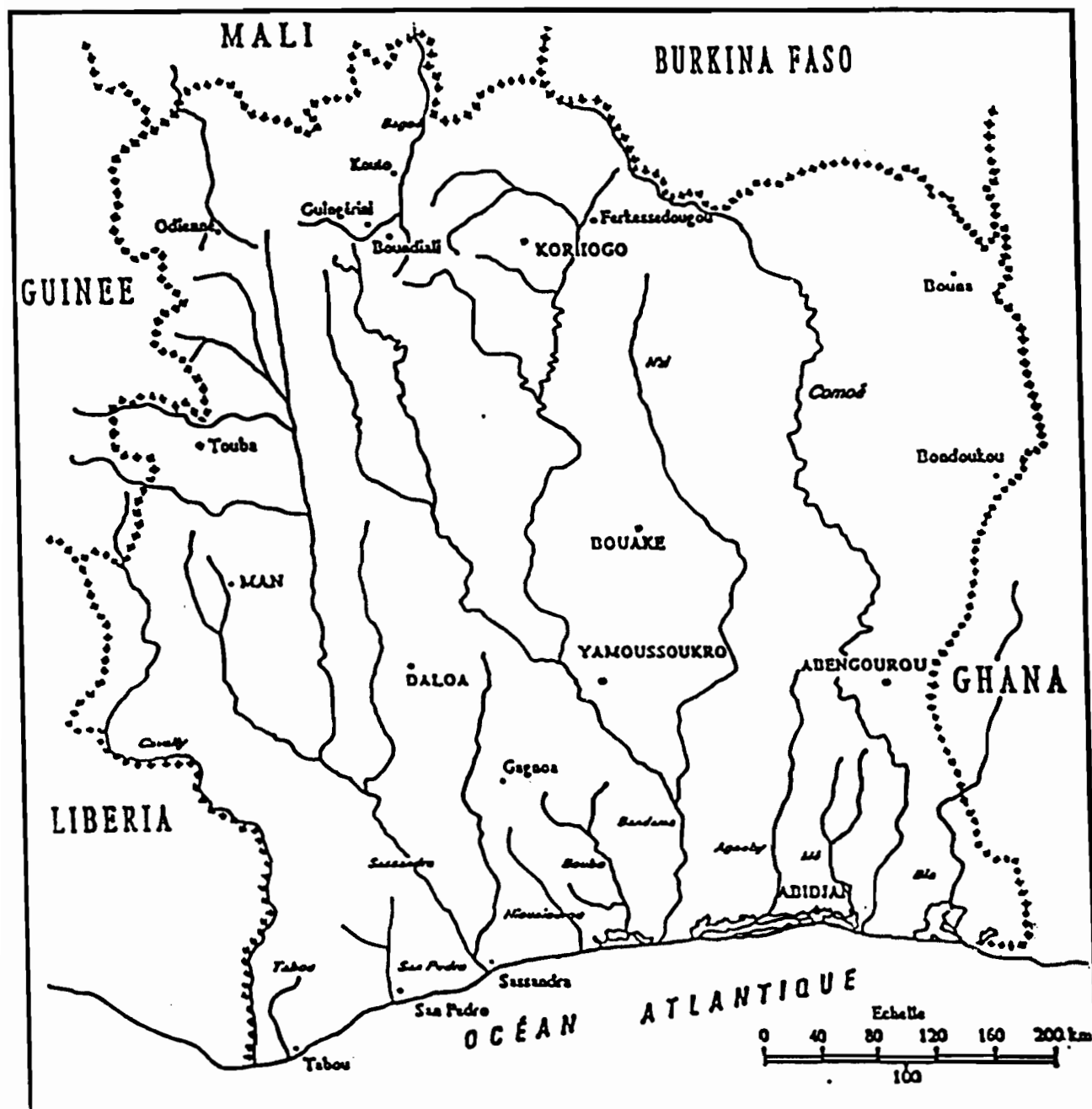


Figure 1.5: Réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire

– Le régime équatorial de transition atténué

Ce régime s'observe dans la partie centrale de la Côte d'Ivoire. C'est une région couverte de savane boisée et de forêt.

Pour ce régime intermédiaire entre les deux précédents, la période des moyennes et hautes eaux s'étend de Mai à Novembre. Ici le dédoublement de la crue annuelle n'est plus toujours bien marqué.

– Le régime de montagne

Le domaine de ce régime est celui de la partie montagneuse de l'Ouest de la Côte d'Ivoire où les précipitations annuelles sont importantes et où la végétation est forestière.

La présence des montagnes engendre des débits spécifiques élevés. La saison des moyennes et hautes eaux s'étale d'Avril à Octobre. Le maximum des crues s'observe en Septembre qui est d'ailleurs le mois le plus pluvieux.

Les mois de Janvier et Février constituent les périodes d'étiage sévère.

1.1.4. Sols et végétation

1.1.4.1. Classification et description des principaux sols

Les principaux éléments de cette classification sont tirés de l'étude de PERRAUD (*in* AVENARD et al, 1971).

Les principales classes de sols qu'on rencontre en Côte d'Ivoire sont:

- les sols ferralitiques,
- les sols ferrugineux,
- les sols bruns eutrophes,
- les sols hydromorphes,
- et les sols podzolisés.

La plus grande partie de la Côte d'Ivoire est constituée de sols ferralitiques. Ainsi plus de 90% des bassins versants étudiés est occupé par des sols ferralitiques. On rencontre sur ces bassins quelques complexes de sols ferralitiques et de sols bruns eutrophes, une petite proportion de sols ferrugineux et de buttes cuirassées, etc...

Les sols ferralitiques sont souvent caractérisés par la présence importante d'un horizon riche en éléments grossiers (débris de cuirasse, gravillons ferrugineux, graviers et cailloux de quartz plus ou moins émoussés et ferrugineux).

Selon l'importance de la pluviométrie annuelle on peut distinguer différentes sous-classes de sols ferralitiques. Ainsi en basse Côte d'Ivoire forestière et dans la région de Man où il pleut plus de 1600 mm par an, les sols ferralitiques sont fortement désaturés. En moyenne Côte d'Ivoire, les sols sont moyennement et faiblement désaturés. Dans le Nord, ces sols sont fortement et moyennement désaturés dans le secteur Nord-Ouest, moyennement et faiblement désaturés dans le secteur Centre-Nord, et moyennement et parfois faiblement ou fortement désaturés dans le secteur Nord-Est.

Les sols ferralitiques sont organisés en plusieurs groupes tels que le groupe des sols remaniés, des sols appauvris en argile, des sols rajeunis, etc... Le groupe couramment rencontré est celui des sols ferralitiques remaniés.

Le socle ou soubassement de ces différents sols est essentiellement constitué de roches granitiques et de roches schisteuses.

1.1.4.2. Végétation

L'étude de la végétation de la Côte d'Ivoire par GUILLAUMET et ADJANOHOOUN (*in* AVENARD et al, 1971) a montré que l'on peut distinguer deux domaines et six secteurs basés aussi bien sur les formations prédominantes dans le paysage que sur leur dynamisme actuel.

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

Le climax dominant du domaine guinéen dans le Sud est la forêt dense humide. Les quatre secteurs qui le constituent sont caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondant à des conditions écologiques différentes:

– Climat dû à la latitude:

Secteur ombrophile: climax principal de forêt dense humide sempervirente.

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

– Climat 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.

– Climat dû à l'altitude:

Secteur montagnard: climax principal de forêt dense humide montagnarde.

– Le domaine soudanais

Les deux secteurs qui le composent, le secteur subsoudanais et le secteur soudanais, sont caractérisés par les forêts claires et les savanes. On y retrouve des forêts-galeries et des îlots forestiers denses d'un type sec. Ces formations sont souvent dégradées par l'homme qui continue à les brûler.

Le secteur subsoudanais, le plus important, se situe au-dessus de la limite Nord de la zone guinéenne alors que le secteur soudanais occupe l'extrême Nord du pays.

1.2. CRITIQUE ET ANALYSE DES OBSERVATIONS

Afin que les résultats de cette étude de la relation pluie-débit puissent être utilisés, par la suite, dans les conditions véritablement opérationnelles d'une conception d'aménagement et de gestion, les données utilisées (pluviométrie, hydrométrie et évapotranspiration potentielle ETP) au pas de temps journalier sont celles du réseau national. Ces données ont été fournies par deux organismes: la SDH (Sous Direction de l'Hydrologie) et l'ANAM (Agence Nationale des Aérodrômes et de la Météorologie).

Dans cette partie, nous effectuerons la critique et l'analyse de ces données hydropluviométriques. Nous présenterons également le mode d'occupation des sols des bassins versants concernés par l'étude.

1.2.1. Observations pluviométriques

1.2.1.1. Répartition des observations

Sur l'ensemble des trois zones climatiques étudiées, à savoir, les zones de forêt, de transition et de savane, nous avons retenu 56 postes pluviométriques (Cf. figure 1.6). Les durées d'observation de ces stations vont de 9 à 69 ans. Nous avons considéré les postes pluviométriques dont les durées d'observation sont supérieures ou égales à 20 ans comme des postes à longue durée d'observation (SERVAT et KOUAME, 1988a), ce qui se révèle être le cas de 27 postes.

L'ensemble des postes pluviométriques, longue et courte durée, représente un total de 1615 stations-années observées dont 1220 sont complètes et 395 incomplètes (Cf. tableau 1.1). Ces dernières représentent 24% du total des stations-années observées. Ce taux assez élevé d'années incomplètes correspond à un nombre important d'années présentant des lacunes journalières, voire mensuelles. Cette situation peut s'expliquer par le fait que les lecteurs chargés d'effectuer les relevés sont des agents de circonstance (agents de sûreté, d'agriculture, instituteurs, secrétaires, etc...) qui s'absentent généralement pendant leurs congés, entraînant par là un arrêt momentané des relevés.

1.2.1.2. Etude des corrélations

Nous avons effectué des corrélations entre postes de longue durée d'observations, d'une part sur les hauteurs pluviométriques annuelles, et d'autre part sur les hauteurs de pluies mensuelles. Sur certains postes nous n'avons pas jugé nécessaire de calculer des corrélations du fait de leur éloignement et de leur isolement.

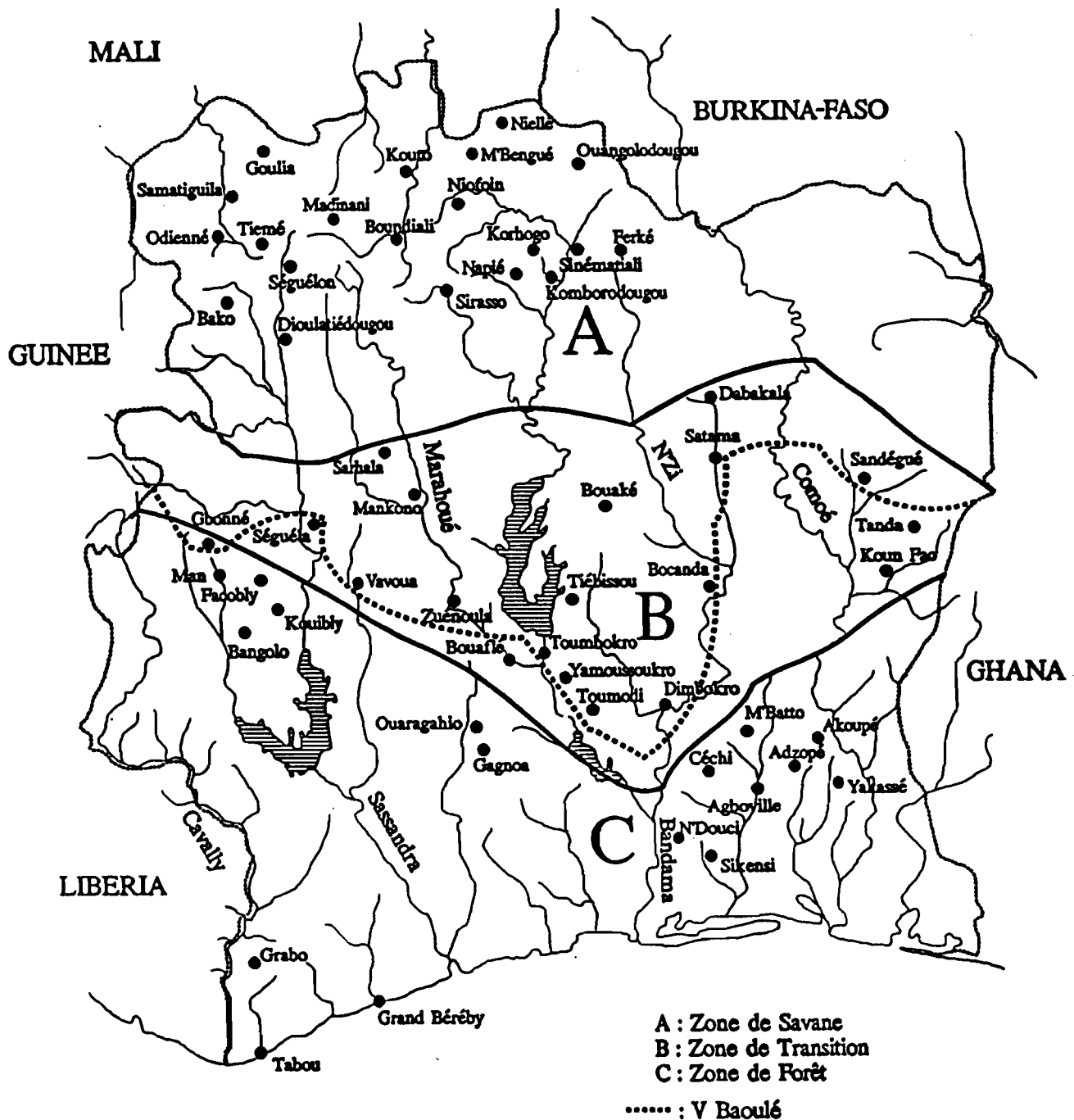


Figure 1.6: Zones climatiques et stations pluviométriques

Stations pluviométriques de longue durée				Stations pluviométriques de courte durée		
	Nom de la station	Années observées	Années complètes	Nom de la station	Années observées	Années complètes
F O R E T	Adzopé	44	42	Akoupé	9	6
	Agboville	65	48	Bangolo	10	3
	Céchi	38	31	Fakobly	12	3
	Gagnoa	68	59	Gbonné	12	3
	Grabo	43	21	Grand-Béréby	9	4
	Man	66	62	Kouibly	11	10
	N'Douci	25	19	M'Batto	12	9
	Tabou	68	53	Ouaragahio	11	5
				Sikensi	12	5
				Yakassé-Attobrou	12	10
	TOTAL	417	335	TOTAL	110	58
T R A N S I T I O N	Bocanda	34	27			
	Bouaflé	64	59			
	Bouaké	22	19	Koun-Fao	11	7
	Dabakala	66	61	Sandégué	18	15
	Dimbokro	67	61	Sarhala	9	7
	Mankono	51	42	Satama-Sokoura	9	6
	Séguéla	66	54	Tanda	12	9
	Tiébissou	36	22	Toumbokro-Irat	17	8
	Toumodi	30	18	Zouénoula	16	10
	Vavoua	35	31			
	Yamoussoukro	24	20			
	TOTAL	495	414	TOTAL	92	62
S A V A N E				Bako	14	6
	Boundiali	66	52	Dioulatiédougou	12	7
	Ferkessédougou	57	53	Goulia	12	5
	Korhogo	59	34	Komborodougou	12	4
	Kouto	25	21	M'Bengué	12	6
	Madinani	24	20	NapiéléDougou	11	2
	Odienné	67	59	Niellé	12	5
	Ouangolodougou	38	31	Niofoin	12	9
	Ticmé	23	14	Samatiguila	10	5
				Séguelon	11	5
				Sinématiali	12	6
				Sirasso	12	7
	TOTAL	359	284	TOTAL	142	67

Tableau 1.1 : Stations pluviométriques

Signalons que ces études de corrélations ont été effectuées sur les stations-années complètes.

Le tableau 1.2 indique les différents coefficients de corrélations sur les totaux annuels et mensuels.

	Totaux annuels	Totaux mensuels
FORET		
Adzopé – Agboville	0.78	0.76
Adzopé – Cédi	0.69	0.63
Agboville – Cédi	0.56	0.66
Agboville – N'Douci	0.17	0.80
Grabo – Tabou	0.76	0.59
TRANSITION		
Bocanda – Dimbokro	0.72	0.72
Bouaflé – Tiébissou	0.56	0.67
Bouaflé – Vavoua	0.78	0.72
Bouaflé – Yamoussoukro	0.65	0.79
Dabakala – Bouaké	0.52	0.72
Dimbokro – Toumodi	0.59	0.73
Dimbokro – Yamoussoukro	0.58	0.74
Mankono – Séguéla	0.72	0.70
Tiébissou – Bouaké	0.48	0.63
Toumodi – Yamoussoukro	0.55	0.67
SAVANE		
Boundiali – Kouto	0.37	0.80
Boundiali – Madinani	0.22	0.79
Ferkessédougou – Ouangolodougou	0.70	0.84
Korhogo – Ferkessédougou	0.56	0.84
Madinani – Kouto	0.31	0.83
Odienné – Tiémé	0.64	0.88
Tiémé – Madinani	0.08	0.86

Tableau 1.2: Coefficients de corrélation sur totaux annuels et mensuels

Au vu de ce tableau, on remarque que les coefficients de corrélations entre les postes ne sont pas très élevés surtout au niveau des totaux annuels pour lesquels on a obtenu de très faibles valeurs dans certains cas: Madinani–Tiémé (0.08) en zone de savane, Agboville–N'Douci (0.17) en zone de forêt, Boundiali–Madinani (0.22) en zone de savane. Ces faibles coefficients de corrélation sont révélateurs de la forte variabilité de la pluviométrie et soulignent la faible densité du réseau de mesure, qui ne peut que difficilement prendre en compte une telle dispersion (SERVAT et KOUAME, 1991).

En comparant les coefficients de corrélation sur les hauteurs pluviométriques annuelles et sur les hauteurs pluviométriques mensuelles, on note qu'à quelques exceptions près, les

seconds sont plus élevés que les premiers. L'exemple le plus frappant se situe au niveau du couple de postes Tiémé-Madinani où les coefficients de corrélation sur les hauteurs pluviométriques annuelles et mensuelles sont respectivement de 0.08 et 0.86.

On peut expliquer en partie les écarts plus ou moins importants entre ces deux types de coefficients de corrélation par la grande différence de taille que présentent les deux séries (totaux annuels et totaux mensuels). Les séries des totaux annuels sont de très courte durée, compte tenu du taux élevé d'années incomplètes d'une part, et de la concomitance des séries sur deux postes considérés d'autre part. Au niveau mensuel, on a généralement des séries de taille plus importante. Les coefficients de corrélations qui y sont calculés sont plus significatifs que ceux calculés sur les totaux annuels.

1.2.1.3. Caractérisation du régime pluviométrique

1.2.1.3.1. Précipitations annuelles

- Zone de forêt

La zone de forêt considérée ici est sous deux régimes climatiques: le régime équatorial de transition ou climat attien et le régime de montagne à l'Ouest (dans la région de Man).

La pluviométrie moyenne interannuelle dans cette région varie de 1237mm (N'Douci) à 2336mm (Tabou), avec, pour la zone considérée, un gradient positif du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Le maximum enregistré à Tabou peut s'expliquer par les effets conjugués de deux facteurs: l'influence océanique maximale et la forte densité du couvert forestier.

- Zone de transition

Le régime de cette zone est celui du type équatorial de transition atténué ou climat baouléen. Les stations que nous y avons retenues sont en majorité situées au centre du pays et plus précisément dans le V Baoulé (figure 1.6).

Dans cette région les variations de la pluviométrie sont généralement faibles: de 1052mm (Tiébissou) à 1307mm (Bouaflé). C'est là le signe d'une zone aux précipitations homogènes.

En comparaison avec la zone forestière, on constate que le V Baoulé est une zone à faibles précipitations. Certains auteurs (ELDIN, 1971 *in* AVENARD et al) justifient la faiblesse de la pluviométrie par le fait que le V Baoulé se trouve sous le vent des lignes de relief bordant le Bandama sur sa rive orientale. Ces lignes de relief arrêtent les vents humides provenant du Sud-Ouest.

- Zone de savane

La zone de savane étudiée couvre le Nord et le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. C'est une zone du régime tropical de transition. Les précipitations interannuelles observées y oscillent entre 1163mm (Ouangolodougou) et 1560mm (Odienné).

La densité des stations pluviométriques de cette zone est plus importante que celle de la zone de forêt. On constate un accroissement assez régulier de la pluviométrie interannuelle d'Est en Ouest. Le maximum est observé autour d'Odienné, du fait de la présence de la dorsale guinéenne et de son influence sur le régime des précipitations.

1.2.1.3.2. Pluies moyennes mensuelles

Nous avons calculé les pluies moyennes mensuelles sur la période de Mai à Octobre, ce qui correspond à la saison des pluies. Le tableau 1.3 présente ces moyennes mensuelles au niveau de chaque zone.

Au regard du tableau 1.3, nous pouvons faire les remarques suivantes:

Dans la zone forestière, les mois les plus arrosés sont Juin et Septembre. En Juin, le maximum de la précipitation moyenne mensuelle a été observé au Sud-Ouest à Tabou avec 531mm. Pour le mois de Septembre, la pluviométrie est moins abondante, avec un maximum de 322mm dans la région montagneuse de Man. Les mois de Juillet et d'Août constituent les mois de petite saison sèche.

En zone de transition, on a des caractéristiques semblables à celles de la zone de forêt. Mais ici la pluviométrie est moins abondante. Pour les mois les plus arrosés, comme Juin et Septembre, les plus fortes valeurs des moyennes mensuelles sont respectivement 188mm à Toumodi et 245mm à Séguéla. Les mois de Juillet et d'Août sont encore les moins pluvieux.

Contrairement aux deux zones précédentes, la zone de savane se caractérise par des précipitations abondantes pendant les mois de Juillet, d'Août et de Septembre, et par l'absence d'une petite saison sèche. Les valeurs moyennes mensuelles maximales sont respectivement 290, 371 et 276mm à la même station d'Odienné.

	Stations	Mai	Juin	Juillet	· Août	Septembre	Octobre
F O R E T	Adzopé	191	255	153	66	126	166
	Agboville	191	251	123	62	113	163
	Céchi	170	256	121	66	120	141
	Gagnoa	186	216	94	72	171	159
	Grabo	288	334	99	114	250	301
	Man	157	200	200	266	322	173
	N'Douci	180	226	114	61	119	132
	Tabou	427	531	177	114	229	189
T R A N S I T I O N	Bocanda	140	175	85	88	143	128
	Bouaflé	164	186	87	104	214	132
	Bouaké	134	133	104	139	174	109
	Dabakala	131	133	100	139	212	125
	Dimbokro	174	187	95	63	136	127
	Mankono	121	134	136	180	229	122
	Séguéla	140	132	119	183	245	166
	Tiébissou	130	160	87	92	150	92
	Vavoua	127	138	93	145	232	119
	Ya-kro	146	170	74	76	155	117
S A V A N E	Boundiali	118	168	249	333	253	132
	Ferké	131	156	182	286	237	102
	Korhogo	130	157	197	301	246	112
	Kouto	107	145	240	308	190	93
	Madinani	119	174	244	311	245	127
	Odienné	121	166	290	371	276	157
	Ouangolo	107	149	191	292	187	99
	Tiébé	132	170	268	313	233	158

Tableau 1.3: Moyennes mensuelles

1.2.1.3.3. Dispersion des séries annuelles et mensuelles

– Séries des totaux annuels

Le tableau 1.4 présente, pour chaque poste pluviométrique de longue durée, les valeurs minimales, moyennes et maximales des précipitations annuelles enregistrées, ainsi que leur écart-type et leur coefficient de variation c.v. (c.v.= écart-type/moyenne).

Si l'écart absolu entre le minimum et le maximum observés est souvent important, c'est le fait d'années exceptionnelles, tant déficitaires qu'excédentaires. La dispersion, elle, est assez faible comme en témoignent les valeurs du coefficient de variation généralement comprises entre 0.15 et 0.25.

	Stations	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type	Coefficient de variation
F O R E T	Adzopé	1395	707	2186	293	0.21
	Agboville	1374	772	2001	277	0.20
	Céchi	1321	757	2128	334	0.25
	Grabo	2187	1661	3462	436	0.20
	Man	1735	1150	3985	399	0.23
	N'Douci	1237	887	2130	264	0.21
	Gagnoa	1440	899	2099	259	0.18
	Tabou	2336	1322	3400	509	0.22
T R A N S I T I O N	Bocanda	1099	756	1692	235	0.21
	Bouaflé	1307	818	1930	260	0.20
	Bouaké	1096	726	1423	184	0.17
	Dabakala	1127	331	1742	248	0.22
	Dimbokro	1191	613	2132	237	0.20
	Séguéla	1303	919	1924	247	0.19
	Tiébissou	1052	232	1811	315	0.30
	Vavoua	1230	742	1765	239	0.19
	Toumodi	1090	827	1665	202	0.19
	Yamoussoukro	1060	826	1420	165	0.15
	Mankono	1214	627	1719	252	0.21
S A V A N E	Boundiali	1461	837	2309	321	0.22
	Ferké	1306	881	1972	232	0.18
	Korhogo	1340	811	2045	268	0.20
	Kouto	1233	851	1616	208	0.17
	Madinani	1420	1046	1764	205	0.14
	Odienné	1560	992	2188	263	0.17
	Ouangolo	1163	553	2394	361	0.31
	Tiéme	1420	1107	1642	172	0.12

Tableau 1.4: Valeurs caractéristiques de la pluie annuelle

– Séries des totaux pluviométriques mensuels

Au vu du tableau 1.5 dans lequel on a reporté les coefficients de variations des totaux pluviométriques mensuels, on s'aperçoit que ceux-ci sont généralement élevés, et ce pour les trois zones climatiques considérées. C'est surtout en saison sèche qu'ils sont les plus élevés et plus particulièrement en zone de savane. En effet, dans cette zone les pluies sont très rares et très variables en cette période de l'année, d'où la forte dispersion des séries. En zone de forêt, voire même en zone de transition, il est plus fréquent d'observer des précipitations à cette époque.

La petite saison sèche des zones de forêt et de transition peut être mise en évidence aux mois de Juillet et d'Août par les valeurs élevées des coefficients de variation.

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
FORET												
Adzopé	1.33	0.81	0.47	0.49	0.35	0.37	0.68	0.9	0.74	0.41	0.58	1
Agboville	1.18	0.7	0.41	0.39	0.31	0.33	0.67	0.9	0.6	0.5	0.41	0.97
Céchi	1.19	0.76	0.41	0.55	0.42	0.55	0.77	0.93	0.77	0.53	0.7	1.39
Gagnoa	1.24	0.59	0.44	0.32	0.31	0.36	0.76	0.8	0.49	0.45	0.57	0.84
Grabo	0.82	0.43	0.43	0.42	0.37	0.42	0.91	0.84	0.8	0.34	0.33	0.52
Man	1.39	0.79	0.48	0.37	0.37	0.37	0.53	0.46	0.36	0.78	1.14	1.38
N'Douci	1.26	0.61	0.49	0.52	0.35	0.39	0.72	0.77	0.72	0.51	0.49	1.01
Tabou	1.09	0.79	0.7	0.6	0.48	0.42	1.13	1	0.61	0.63	0.59	0.72
TRANSITION												
Bocanda	2.01	0.76	0.51	0.36	0.49	0.38	0.63	0.93	0.54	0.5	0.9	1.85
Bouaflé	1.53	0.72	0.46	0.4	0.41	0.43	0.77	0.66	0.42	0.52	0.86	1.13
Bouaké	2.2	0.98	0.57	0.31	0.44	0.59	0.63	0.71	0.48	0.52	0.9	1.5
Dabakala	2.23	1.24	0.74	0.48	0.42	0.46	0.71	0.66	0.45	0.58	0.96	1.39
Dimbokro	1.3	0.75	0.43	0.45	0.39	0.38	0.73	0.81	0.58	0.45	0.79	1.16
Mankono	1.8	0.73	0.53	0.48	0.44	0.48	0.65	0.49	0.4	0.64	0.97	1.52
Séguéla	1.57	0.87	0.61	0.52	0.7	0.4	0.68	0.55	0.44	0.53	0.71	1.16
Tiébissou	1.34	1.29	0.62	0.68	0.43	0.48	0.71	0.87	0.71	0.5	0.94	1.81
Toumodi	1.93	0.77	0.68	0.53	0.43	0.46	0.77	0.93	0.6	0.46	0.93	1.45
Vavoua	1.4	0.92	0.51	0.38	0.47	0.58	0.79	0.68	0.32	0.51	0.86	1.17
Yamoussou-kro	1.6	1	0.43	0.47	0.43	0.35	0.82	0.85	0.7	0.55	0.86	1.49
SAVANE												
Boundiali	3.5	1.43	1.33	0.61	0.44	0.4	0.41	0.36	0.42	0.54	1.01	1.99
Ferké	3.4	1.63	0.7	0.5	0.45	0.37	0.39	0.38	0.3	0.46	1	2.18
Korhogo	2.44	1.49	0.79	0.55	0.37	0.35	0.39	0.36	0.34	0.63	1.1	2.08
Kouto	3.03	1.59	0.8	0.59	0.52	0.4	0.25	0.34	0.32	0.56	1.1	2.56
Madinani	2.69	1.31	1.07	0.49	0.43	0.31	0.4	0.22	0.42	0.54	1.18	1.99
Odienné	3.33	1.41	0.72	0.52	0.42	0.44	0.32	0.27	0.35	0.42	0.79	2.13
Ouangolo	2.87	2.76	1.07	0.74	0.54	0.39	0.41	0.46	0.32	0.7	1.42	2.31
Tiemé	3.11	1.42	1.04	0.4	0.41	0.3	0.21	0.4	0.32	0.48	1.04	2.07

Tableau 1.5 : Coefficients de variation des totaux pluviométriques mensuels

1.2.1.4. Homogénéité des séries chronologiques

Dans ce paragraphe nous testerons l'homogénéité d'une série chronologique à partir de la série elle-même. On utilisera, pour ce faire, la méthode bayésienne de détection de changement de moyenne dans une série chronologique à un instant donné.

1.2.1.4.1. Description de la méthode bayésienne (Lee et Heghinian, 1977)

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

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

(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 .

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

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

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:

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

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

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

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.

1.2.1.4.2. Résultats du test sur les stations de longue durée

L'application de la méthode bayésienne sur les stations de longue durée a permis de tracer les graphiques de probabilité de changement de moyenne. Les résultats de cette démarche, présentés sur les figures reportées en annexe I, ont été normés par rapport à la valeur maximale de $p(\tau)$. A partir de ces graphiques il a été dressé le tableau 1.6 récapitulatif des dates de changement présumé de moyenne.

Le tableau 1.6 montre que l'application de cette méthode sur les séries de précipitations annuelles de longue durée n'a pas permis de mettre en évidence une "cassure" très nette dans la distribution des probabilités. Une éventuelle rupture dans les séries chronologiques pourrait généralement être située dans la période de 1963 – 1972.

Ce qui est ressenti sur le terrain, parfois de manière très sensible, à savoir une baisse de la pluviométrie depuis la fin des années 1960 ou le début des années 1970, n'est que faiblement mis en valeur par l'utilisation de cette méthode bayésienne.

Station	Date de changement de moyenne présumé
Adzopé	1968
Agboville	dès 1962 et accentuation en 1976
Bocanda	période peu marquée de 1956 à 1968
Bouaflé	1972
Bouaké	1966
Boundiali	1975 avec tendance dès 1974
Céchi	1963 avec tendance dès 1960
Dabakala	1971 avec tendance dès 1968
Dimbokro	période peu marquée de 1938 à 1945
Ferkessédougou	dès 1965 et accentuation en 1970
Gagnoa	1926
Grabo	1954 avec tendance en 1952
Korhogo	1970
Kouto	1970
Madinani	période peu marquée de 1967 à 1972
Man	1944 avec tendance en 1943
Mankono	période peu marquée de 1968 à 1974
N'Douci	période peu marquée de 1968 à 1979
Odienné	1982
Ouangolodougou	1955
Séguéla	dès 1963 avec accentuation en 1971
Tabou	1923
Tiébissou	dès 1971 avec accentuation en 1973
Toumodi	1963
Vavoua	dès 1971 avec accentuation en 1980
Yamoussoukro	1983

Tableau 1.6: Homogénéité des séries pluviométriques

1.2.2. Observations hydrométriques

1.2.2.1. Répartition des données

Dans le cadre de cette étude de la relation pluie-débit en différentes zones climatiques, nous avons sélectionné 41 stations hydrométriques sur les grands bassins du Niger, du Cavally, du Sassandra, du Bandama, de la Comoé et des fleuves côtiers (SERVAT et KOUAME, 1989b). Ces 41 bassins versants (figure 1.7) se répartissent ainsi: 16 en zone de forêt, 13 en zone de transition et 12 en zone de savane. Ces bassins ont été classés, selon leur taille, en petits ou grands bassins. La superficie des grands bassins versants est comprise entre 4000 et 7000 km² alors que celle des petits varie de 100 à 2000 km².

Les durées d'observation de tous ces bassins oscillent entre 3 et 28 ans. Sur l'ensemble des 41 bassins, seuls 14, soit 34% d'entre eux, ont des durées d'observations supérieures ou égales à 10 ans.

Sur un total de 419 stations-années observées sur l'ensemble des stations hydrométriques sélectionnées, on ne dénombre que 230 années complètes (Cf. tableau 1.7), ce qui représente 55%. Le taux d'années incomplètes est donc de 45%. Ce taux élevé hypothèque l'exploitation possible de certaines stations sans reconstitution préalable des données car il réduit énormément la longueur des séries. Comme dans le cas des observations pluviométriques, ce taux élevé peut s'expliquer par l'indisponibilité plus ou moins fréquente des lecteurs de circonstance.

1.2.2.2. Caractérisation du régime hydrométrique

1.2.2.2.1. Lame moyenne annuelle

Les lames moyennes écoulées des cours d'eau dépendent de nombreux facteurs tels que le relief, les précipitations, la végétation, la nature du sol, l'évaporation, etc., mais le facteur prépondérant reste les précipitations (RODIER, 1964; GIRARD, 1971 *in* AVENARD et al).

Les valeurs des lames moyennes annuelles du tableau 1.8 et les coefficients d'écoulement (Cf. annexe I) montrent, en effet, que les lames écoulées sont plus élevées en zone de forêt qu'en zones de transition et de savane. En zone de savane, les lames moyennes annuelles sont presque toutes supérieures à celles de la zone de transition. Remarquons que la majorité des stations de la zone de savane se trouve dans la région Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire où l'influence de la dorsale guinéenne est fortement ressentie. Les précipitations sont alors importantes et l'aptitude au ruissellement est favorisée par les reliefs du massif guinéen.

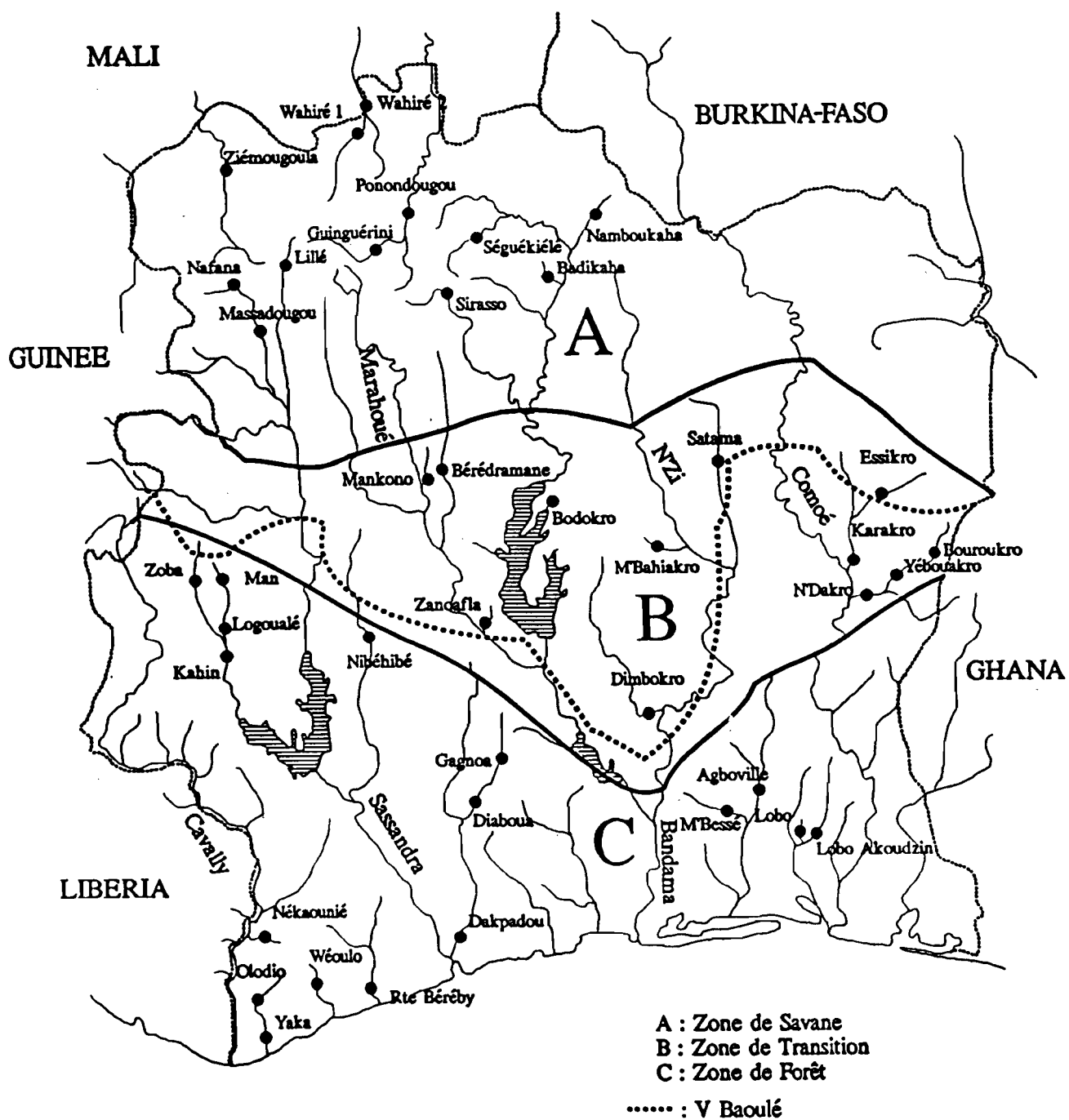


Figure 1.7: Zones climatiques et stations hydrométriques

	Nom de la station	Années observées	Années complètes
F O R E T	Agboville	8	6
	Dakpadou	18	13
	Kahin	7	6
	Diaboua	4	3
	Gagnoa	8	4
	Grand-Béréby	8	7
	Lobo	4	2
	Lobo Akoudzin	4	0
	Logoualé	17	12
	Man	27	13
	M'Bessé	27	20
	Nékaounié	8	8
	Olodio	4	3
	Wéoulo	7	5
	Yaka	8	4
	Zoba	4	3
	TOTAL	163	109
T R A N S I T I O N	Dimbokro	18	9
	Karakro	4	2
	N'Dakro	4	4
	Nibéhibé	25	16
	Bérédrumane	7	3
	Bodokro	4	3
	Bouroukro	4	3
	Essikro	4	3
	Mankono	13	4
	Rte M'Bahiakro	3	2
	Satama-Sokoura	4	1
	Yébouakro	7	5
	Zanoafla	8	6
	TOTAL	105	61
S A V A N E	Doundian	10	6
	Guinguérini	28	4
	Lille	11	4
	Mahandiabani	11	5
	Massadougou	12	6
	Nafana-Sienso	8	3
	Namboukaha	6	5
	Ponondougou	28	4
	Korhogo-Badikaha	9	5
	Siguekiellé	7	4
	Sirasso	7	3
	Ziémougoula	14	11
	TOTAL	151	60

Tableau 1.7 : Stations hydrométriques

La dispersion des lames moyennes annuelles (Cf. tableau 1.8) est assez grande comme en témoignent les valeurs des coefficients de variation comprises entre 0.10 et 0.84 en zone de forêt, 0.36 et 1.16 en zone de transition, 0.23 et 1.02 en zone de savane. Cette forte dispersion souligne la grande variabilité de l'écoulement d'une année à l'autre.

	Station	Lame moyenne annuelle (mm)	Ecart-type	Coefficient. de variation	Surface (km ²)
F O R E T	Agboville	25.9	19.7	.76	4576
	Dakpadou	137.7	41.5	.30	6538
	Kahin	288.9	84.9	.29	4379
	Diaboua	129.3	53.5	.41	1257
	Gagnoa	55.5	13.9	.25	638
	Grand-Béréby	512.7	136.4	.27	953
	Lobo	45.2	4.5	.10	456
	Logoualé	247.9	85.4	.34	1518
	Man	405.0	169.2	.42	207
	M'Bessé	102.4	85.9	.84	1195
	Nékaounié	741.3	260.2	.35	344
	Olodio	780.1	247	.32	327
	Wéoulo	435.3	122.8	.28	646
	Yaka	843.5	317.0	.38	815
	Zoba	316.5	109.5	.35	1087
T R A N S I T O N	Dimbokro	52.4	61.0	1.16	6300
	Karakro	5.5	4.5	.82	4853
	N'Dakro	26.6	18.6	.70	6408
	Nibéhibé	54.6	44.1	.81	6829
	Bérédrumane	30.3	28.7	.95	1737
	Bodokro	60.9	53.8	.88	893
	Bouroukro	41.3	15.0	.36	1394
	Essikro	41.1	23.8	.58	1283
	Mankono	130.2	104.3	.80	109
	Rte M'Bahiakro	78.5	70.5	.90	785
	Yébouakro	31.1	23.8	.76	2756
	Zanoafla	20.8	18.4	.88	182
S A V A N E	Doundian	131.8	57.8	.44	650
	Guinguérini	281.7	177.4	.63	1042
	Lille	185.7	56.3	.30	540
	Mahandiabani	134.0	31.0	.23	835
	Massadougou	110.8	55.7	.50	1325
	Nafana-Sienso	171.0	78.9	.46	615
	Namboukaha	103.6	80.8	.78	772
	Ponondougou	152.2	72.4	.47	706
	Korhogo-Badikaha	180.2	106.2	.59	440
	Siguekiellé	78.0	79.6	1.02	370
	Sirasso	71.7	59.1	.82	1030
	Ziérougoula	297.0	118.7	.40	990

Tableau 1.8: Valeurs caractéristiques de la lame annuelle écoulée

1.2.2.2. Variations saisonnières des écoulements

Comme nous l'avons signalé dans le paragraphe précédent le régime des cours d'eau est étroitement lié à celui des précipitations. Ainsi en zone forestière la période des basses eaux est observée de Décembre à Mars et celle des hautes eaux de Juin à Septembre. On note un dédoublement de la valeur maximale des lames écoulées en Juin et en Septembre, qui sont aussi les mois de fortes précipitations. Dans cette zone de forêt, les lames mensuelles écoulées sont les plus importantes compte tenu de la bonne pluviométrie.

Dans la zone de transition, la saison des basses eaux est plus longue qu'en zone de forêt. Elle s'étend de Décembre à Mai. La période des hautes eaux se situe, elle, entre les mois d'Août et d'Octobre. Le dédoublement de la lame maximale écoulée n'est plus toujours bien marqué (SIRCOULON, 1966). Les lames mensuelles écoulées sont faibles, ce qui reste en conformité avec les précipitations de cette zone.

En ce qui concerne la zone de savane où les fortes précipitations sont concentrées dans les mois de Juillet, d'Août et de Septembre, le régime des cours d'eau comporte une seule saison des hautes eaux située en Août, Septembre et Octobre. La période des basses eaux s'étend de Décembre à Mai.

1.2.2.3. Etiage absolu

Sur l'ensemble des 41 bassins versants étudiés, près de 76% ont eu des tarissements complets durant leur période d'observation. Ces étiages absolus sont observés dans les premiers mois de l'année.

De la zone forestière à la zone de savane, on constate une augmentation du nombre de mois durant lesquels certains cours d'eau ne coulent plus. Ainsi dans la zone de forêt, cette période sèche peut s'étendre de Janvier jusqu'en Mars, voire même Avril. Au niveau des zones de transition et de savane, elle peut se prolonger jusqu'en Juin.

1.2.3. Caractéristiques d'occupation du sol

Les caractéristiques d'occupation du sol de 7 des 15 bassins versants étudiés en zone de forêt et de 4 des 12 bassins en zone de transition ont pu être obtenues auprès de la Direction et Contrôle des Grands Travaux de Côte d'Ivoire (DCGTx).

A partir des cartes de jachères au 1/100 000^{ème} élaborées par le service Télédétection de la DCGTx, nous avons reconstitué par découpage puis assemblage les superficies des bassins concernés. Nous avons ensuite calculé pour chacun des 11 bassins versants, en zone de

forêt et en zone de transition, les superficies relatives occupées par la savane, la forêt, les cultures et l'habitat (Cf. tableau 1.9).

En zone de forêt, on remarquera l'important taux de mise en culture, qui atteint près de 71%. Cette activité agricole n'est cependant pas liée à un habitat dense puisque celui-ci ne représente que 2% en moyenne. Dans cette zone forestière, on ne trouve que quelques traces éparses de savane dans les bassins les plus au Nord.

Dans la zone de transition, seuls 4 bassins sur les 12 étudiés ont pu être caractérisés sur le plan de l'occupation des sols, les autres n'ayant pas été couverts par les scènes SPOT ou LANDSAT. Il est donc difficile de tirer des enseignements à partir de données aussi peu nombreuses. On peut néanmoins dire que les superficies relatives occupées par la savane (31%) et la forêt (26%) témoignent de ce que ces bassins appartiennent à la zone transitoire entre la forêt et la savane.

Bassins versants	% savane	% forêt	% cultures	% habitat
FORET				
KO à Man	0.7	16.1	79.7	3.5
KO à Logoualé	0.1	11.6	86.1	2.2
N'ZO à Zoba	66.6	31.7	0.4	
N'ZO à Kahin	0.6	27.8	69.9	1.7
MANSAN à Lobo	0	1.4	96.6	2
GUERI à Diaboua	0	28.9	67.9	3.2
GUERI à Gagnoa	0	33.8	64.6	1.6
MOYENNE	0.4	26.6	70.9	2.1
TRANSITION				
KAN à Zanoafla	25	19.2	55.4	0.4
KAN à Dimbokro	52.3	34	13	0.7
KAN à Bodokro	44.6	22.2	32.1	1.1
LOBO à Nibéhibé	3.8	30.2	65.4	0.6
MOYENNE	31.4	26.4	41.5	0.7

Tableau 1.9: Occupation des sols

1.2.4. Evaporation

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) recueillies à l'ANAM (Agence Nationale des Aérodrômes et de la Météorologie) ont été calculées par la formule de PENMAN. Nous avons utilisé sans aucune modification les fichiers de l'ANAM.

Les différents termes d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle ont été calculés à partir des mesures effectuées sur les stations synoptiques. Notons que la couverture du pays en stations synoptiques est très faible. Les données d'évapotranspiration potentielle que nous avons utilisées pour chacun de nos bassins versants sont donc des valeurs régionales.

1.2.5. Conclusion

L'analyse des données hydropluviométriques nous a permis de mettre en évidence un taux élevé d'années d'observations incomplètes. L'explication que l'on peut donner à cette situation de lacunes journalières, voire mensuelles, est l'indisponibilité occasionnelle des lecteurs de circonstance. Dans la mesure du possible nous avons complété quelques lacunes au moyen de méthodes statistiques classiques.

Malgré ce problème de lacunes, nous avons jugé les données généralement utilisables compte tenu de la vocation "appliquée" de notre travail.

DEZETTER (1991) ayant étudié très spécifiquement la zone de savane, notre approche modélisatrice concernera essentiellement les zones de forêt et de transition. Au pas de temps mensuel, cependant, le modèle sur lequel nous avons travaillé dans le cadre de cette étude a également été testé en zone de savane.

Pour les zones de forêt et de transition, nous avons donc constitué des fichiers opérationnels de pluies et de débits utilisés par la suite pour les opérations de modélisation. Compte tenu des problèmes, d'une part, du taux élevé d'années incomplètes, et, d'autre part de la concomitance nécessaire des années complètes ou reconstituées observées en pluviométrie et en hydrométrie, les fichiers opérationnels pluie-débit que nous avons pu constituer pour les deux zones s'élèvent à 144 stations-années (54 en zone de transition et 90 en zone de forêt) réparties sur 27 bassins versants.

DEUXIEME PARTIE

2. DEUXIEME PARTIE

Après avoir critiqué et analysé les données pluviométriques et hydrométriques, nous avons retenu 144 stations-années dans les deux zones de notre étude. C'est sur ces 90 stations-années en zone de forêt et 54 en zone de transition que l'ensemble des différents calages sera effectué.

Dans cette partie consacrée à la modélisation aux pas de temps annuel et mensuel, nous allons tester différents algorithmes d'évaluation des lames écoulées.

2.1. MODELISATION AU PAS DE TEMPS ANNUEL

Afin d'estimer la lame annuelle écoulée sur les différents bassins versants et de proposer une formulation utilisable dans un éventail de situations assez large, plusieurs formes de relations ont été testées en zones de forêt et de transition. Dans les relations calées, nous avons considéré deux types. Le premier type est une expression de la lame annuelle écoulée en fonction de la seule pluie annuelle. Le second type tient compte, outre de la pluie annuelle, d'autres variables explicatives telles que les pluies cumulées sur une certaine période, la pluie maximale mensuelle enregistrée au cours de l'année, etc...

2.1.1. Relations de la forme Lame annuelle écoulée = f(Pluviométrie annuelle)

Pour ce type de relations nous avons utilisé cinq formulations qui sont:

- $L = (P - A)^B$,
- $L = \text{Exp}(A + B \cdot P)$,
- $L = A(P - B)$, formule de type MEDINGER (1948),
- $L = A(P - B)^C$, formule de type COUTAGNE (1949),
- $L = A(P)^B$, formule de type DERI (1977).

où

L est la lame annuelle écoulée (en mm),

P, la pluie annuelle (en mm),

A, B et C, les paramètres à déterminer.

Nous avons optimisé les paramètres A, B et C des cinq modèles sur la totalité des 90 stations-années disponibles en zone de forêt et des 54 disponibles en zone de transition. Signalons que l'optimisation a été réalisée à l'aide d'une méthode basée sur une recherche d'optimum par les gradients conjugués.

Pour pouvoir apprécier la qualité des essais, le critère qui a été retenu est l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) qui minimise l'écart entre lame observée et lame calculée. Son expression est la suivante:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Lobs_i - Lcalc_i)^2}{N}}$$

avec

$Lobs_i$, lame observée l'année i ,

$Lcalc_i$, lame calculée l'année i ,

N , nombre d'années.

Lorsque $Lcalc_i$ tend vers $Lobs_i$, alors EQM tend vers 0.

A la suite de l'optimisation des paramètres A, B et C les équations obtenues en fonction de la pluie annuelle P sont reportées dans le tableau 2.1.

Forêt		Transition	
Modèle	Critère	Modèle	Critère
MEDINGER: $L = 0.5846 \cdot (P - 968.8)$	164.2	MEDINGER: $L = 0.1177 \cdot (P - 692)$	33.7
COUTAGNE: $L = 0.0289 \cdot (P - 700)^{1.382}$	164.9	COUTAGNE: $L = 0.00077 \cdot (P - 300.5)^{1.651}$	34.4
DERI: $L = 0.00089 \cdot (P)^{1.751}$	179.1	DERI: $0.000049 \cdot (P)^{1.974}$	35.2
$L = (P - 1005.3)^{0.929}$	165.4	$L = (P - 656.3)^{0.658}$	36.3
$L = \text{Exp}(4.2732 + 0.00095 \cdot P)$	191.0	$L = \text{Exp}(1.5821 + 0.00197 \cdot P)$	35.3

Tableau 2.1: Valeurs des paramètres et du critère sur l'échantillon complet

Au vu du tableau, on constate que la valeur du critère "écart quadratique moyen" est nettement plus faible en zone de transition qu'en zone de forêt. En outre, le modèle de type MEDINGER est légèrement plus satisfaisant que les autres car la valeur du critère est la moins élevée, tant en zone de forêt qu'en zone de transition.

Les représentations graphiques des lames annuelles observées et des lames annuelles calculées en fonction des pluies annuelles correspondantes (figures 2.1 à 2.3) montrent un certain nombre de points relativement éloignés de la courbe d'estimation.

Pour tenter d'expliquer la dispersion des points, nous avons calculé les rapports (Pluie moyenne – Pluie annuelle)/Ecart type de la série des pluies annuelles observées et (Lame moyenne – Lame annuelle)/Ecart type de la série des lames annuelles observées. Ces différents rapports ont montré que, pour les points éloignés des différentes courbes d'estimation, soit la pluie annuelle et la lame annuelle écoulée de l'année considérée sont toutes deux exceptionnelles (valeurs très élevées ou très faibles), soit c'est l'une des deux qui est exceptionnelle.

Afin de tester les différents modèles envisagés sans la présence de ces observations à caractère exceptionnel, les événements correspondants ont été retirés des échantillons, soit une réduction de 14 stations-années en zone de forêt, et de 10 en zone de transition. Les équations obtenues dans ces conditions ont été reportées dans le tableau 2.2.

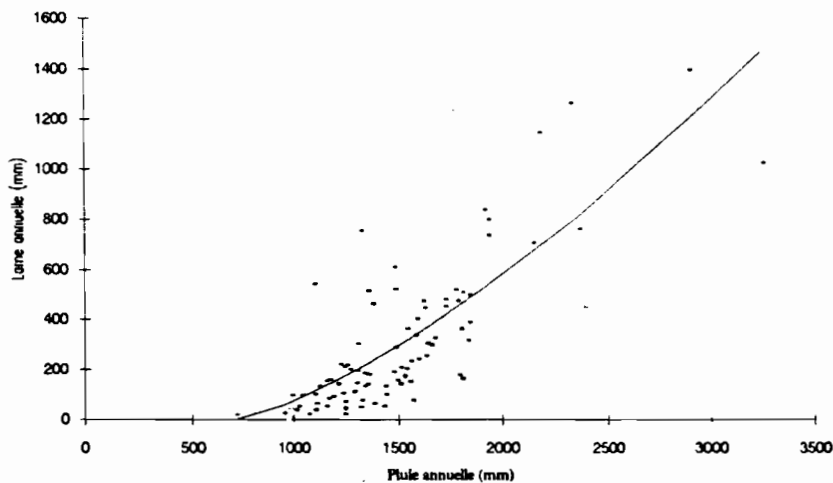


Figure 2.1: Lame écoulée = $A(\text{Pluie annuelle} - B)^C$ en zone de forêt (échantillon complet)

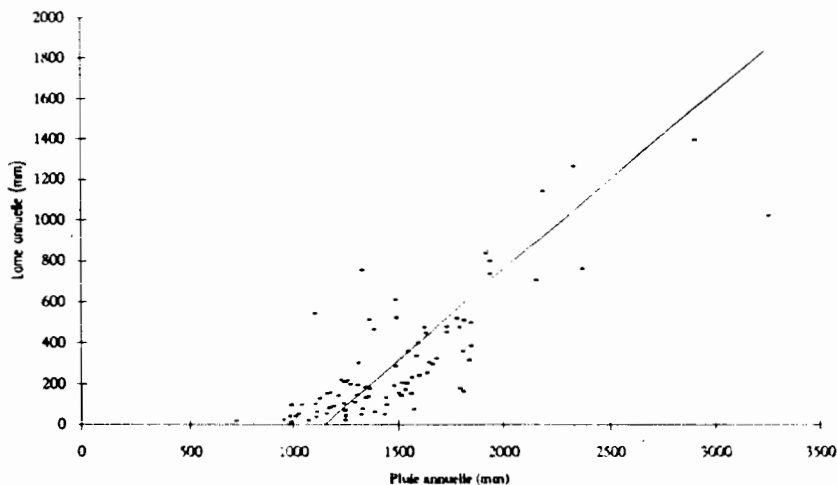


Figure 2.2: Lame écoulée = $(\text{Pluie annuelle} - A)^B$ en zone de forêt (échantillon complet)

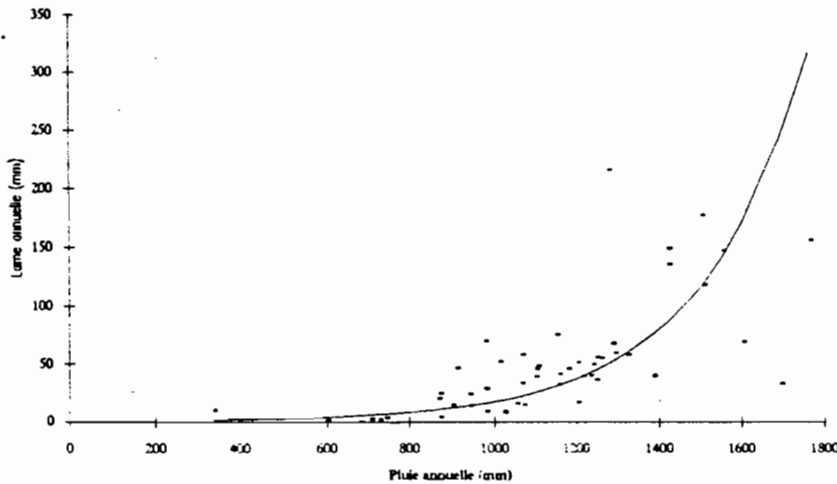


Figure 2.3: Lame écoulee = $\text{Exp}(A + B * \text{Pluie annuelle})$ en zone de transition (échantillon complet)

Forêt		Transition	
Modèle	Critère	Modèle	Critère
MEDINGER: $L = 0.6851 * (P - 1094.6)$	95.7	MEDINGER: $L = 0.1568 * (P - 828.2)$	25.7
COUTAGNE: $L = 0.00089 * (P - 622.2)^{1.853}$	91.6	COUTAGNE: $L = 0.00078 * (P - 591.8)^{1.737}$	24.8
DERI: $L = 0.00089 * (P)^{1.743}$	134.6	DERI: $L = 0.000049 * (P)^{1.976}$	28.3
$L = (P - 979.7)^{0.916}$	110.3	$L = (P - 600)^{0.645}$	32.8
$L = \text{Exp}(3.6195 + 0.00129 * P)$	116.7	$L = \text{Exp}(1.1984 + 0.0023 * P)$	25.6

Tableau 2.2: Valeurs des paramètres et du critère sur l'échantillon réduit

Comme on pouvait s'y attendre les calages sur les échantillons réduits en zone de forêt et en zone de transition donnent des valeurs de critère nettement plus faibles que dans le cas où toutes les stations-années étaient utilisées. La dispersion des points par rapport à la nouvelle courbe de la lame estimée est atténuée du fait de la suppression des années exceptionnelles. Cependant, même en ayant rejeté un certain nombre de points, la qualité des calages reste encore insuffisante, à en juger par les valeurs assez élevées du critère. Les figures 2.4 et 2.5 représentent quelques tracés des modèles établis sur les échantillons réduits.

Au niveau des stations-années exceptionnelles éliminées, il est à remarquer que sur les dix retenues en zone de transition, huit correspondent à l'année 1983. Cette situation se justifie en effet par la grande sécheresse que la Côte d'Ivoire dans son ensemble a connue au cours de cette année-là. En zone de forêt, par contre, aucune observation particulière ne peut se faire sur les quatorze stations-années à caractère exceptionnel.

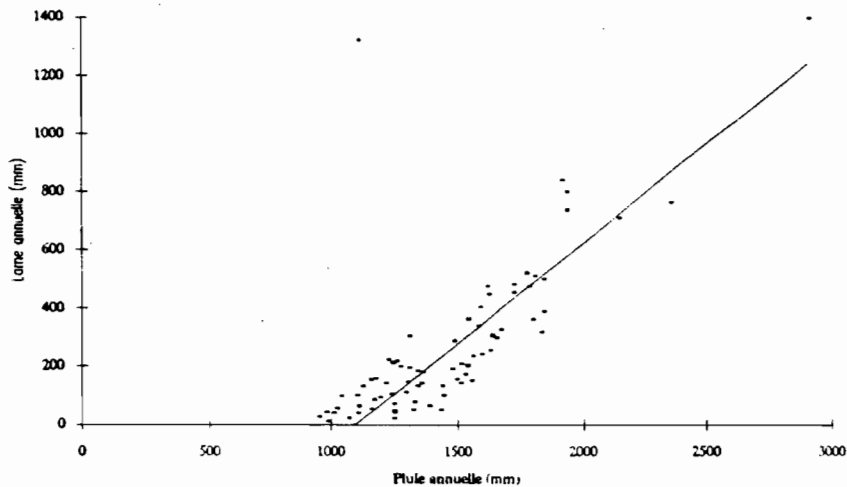


Figure 2.4: Lame écoulée = $A(\text{Pluie annuelle} - B)$ en zone de forêt (échantillon réduit)

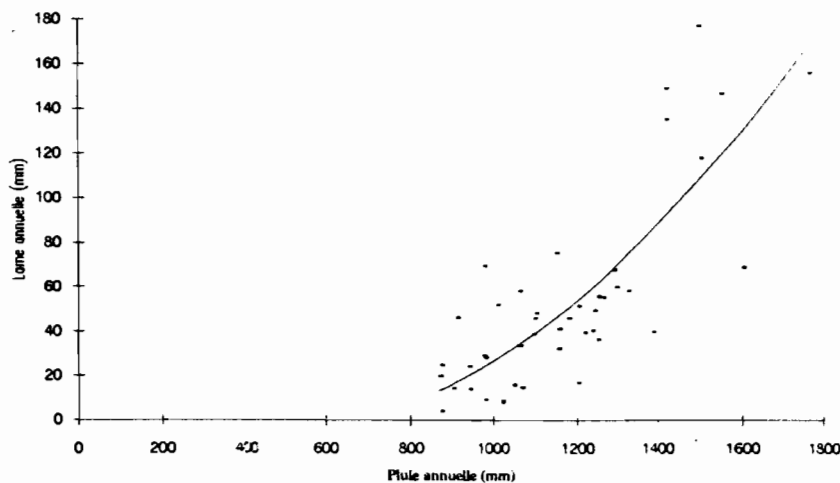


Figure 2.5: Lame écoulée = $A(\text{Pluie annuelle} - B)^C$ en zone de transition (échantillon réduit)

Bien que les résultats ne soient pas suffisamment satisfaisants, nous avons déjà une première estimation possible de la lame annuelle écoulée à partir de la seule connaissance de la pluie annuelle précipitée à l'aide des modèles de type COUTAGNE ou MEDINGER qui offrent des performances comparables.

2.1.2. Essais de régressions multiples

En zone de forêt comme en zone de transition plusieurs essais de détermination d'équations de régression multiple ont été effectués sur deux échantillons, l'un complet et l'autre réduit. Dans le cas de l'échantillon réduit, on prend en compte les pluies annuelles et cumulées de l'année précédente ($i-1$) pour l'estimation de la lame écoulée de l'année (i).

Les différentes variables explicatives ayant servi aux régressions multiples sont:

- P, pluie annuelle précipitée,
- P1, pluie cumulée du 1^{er} avril au 31 juillet (1^{ère} période pluvieuse),
- P2, pluie cumulée du 1^{er} septembre au 30 octobre (2^{ème} période pluvieuse),
- Pm, pluie maximale mensuelle enregistrée au cours de l'année,
- P', pluie annuelle de l'année antérieure,
- P'1, pluie cumulée de la 1^{ère} période pluvieuse de l'année antérieure,
- P'2, pluie cumulée de la 2^{ème} période pluvieuse de l'année antérieure,
- P'm, pluie maximale mensuelle de l'année antérieure.

Toutes ces quantités de pluie ainsi que la lame annuelle écoulée L sont exprimées en millimètres (mm).

2.1.2.1. Régression en zone de forêt

Plusieurs jeux de variables explicatives ont été testés dans le processus d'estimation de la lame annuelle écoulée. Le tableau suivant indique, pour chaque régression multiple, les variables explicatives d'entrée, celles qui sont significatives et retenues selon le test de Student et le coefficient de détermination R^2 .

Echantillon complet (90 éléments)			Echantillon réduit (60 éléments)		
Variables explicatives d'entrée	Variables significatives	Coef. R^2	Variables explicatives d'entrée	Variables significatives	Coef. R^2
P	P	0.659	P, P'	P, P'	0.793
P, Pm	P	0.661	P, P' Pm, P'm	P, P'	0.789
P1, P2, Pm	P1, P2	0.574	P1, P2, P, P'1, P'2	P1, P2, P'1, P'2, P	0.816
P, ((Pm) ²)/P	P	0.663	P1, P2, Pm, P'm, P'1, P'2	P1, P2, P'1, P'2	0.809
P, ((P1) ²)/P	P	0.652	P1, P2, P'1, P'2, Pm	P1, P2, P'1, P'2	0.811
P, P1	P	0.656	P, P1, P2, P'1, P'2, Pm	P1, P2, P'1 P'2	0.815
P1, P2	P1, P2	0.566	P, Pm, P'1, P'2	P, Pm, P'1, P'2	0.799
P+Pm	P+Pm	0.660	P, P'1, P'2	P, P'1, P'2	0.794

Tableau 2.3: Coefficients de détermination R^2 des régressions multiples calculées en zone de forêt

Le tableau 2.3. ci-dessus montre que l'estimation de la lame annuelle écoulée à l'aide des régressions multiples sur un certain nombre de données relatives à la pluviométrie est acceptable surtout dans le cas où l'on prend en compte des pluies de l'année antérieure. En effet, sur l'échantillon réduit on arrive à un coefficient de détermination R^2 de 0.816, ce qui signifie que les variables P, P1, P2, P'1, et P'2, expliquent environ 81.6% de la variabilité de la lame annuelle écoulée. La relation correspondante déterminée est:

$$L = -794.54 + 0.174 \cdot P + 0.485 \cdot P1 + 0.475 \cdot P2 + 0.214 \cdot P'1 + 0.501 \cdot P'2$$

2.1.2.2. Régression en zone de transition

Les mêmes types d'essais qu'en zone de forêt ont été effectués sur les jeux de variables en zone de transition. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant:

Echantillon complet (54 éléments)			Echantillon réduit (34 éléments)		
Variables explicatives d'entrée	Variables significatives	Coef. R^2	Variables explicatives d'entrée	Variables significatives	Coef. R^2
P	P	0.472	P, P'	P,	0.553
P, P _m	P	0.465	P, P' P _m , P' _m	P,	0.550
P1, P2, P _m	P1, P _m	0.382	P1, P2, P, P', P _m , P' _m , P'1, P'2	P, P' _m , P2	0.593
P, ((P _m) ²)/P	P	0.467	P1, P2, P _m , P' _m , P'1, P'2	P1, P _m , P' _m	0.403
P, ((P1) ²)/P	P	0.467	P1, P2, P'1, P'2, P _m	P1, P _m	0.367
P, P1	P	0.469	P, P1, P2, P'1, P'2	P	0.562
P1, P2	P1, P2	0.328	P, P _m , P1, P2, P'1, P'2	P	0.548
P, P1, P2	P	0.473	P, P', P' _m , P2	P, P', P' _m , P2	0.626

Tableau 2.4: Coefficients de détermination R^2 de la régression multiple en zone de transition

Contrairement à la zone de forêt les équations de régression du calcul de la lame annuelle écoulée sont de qualité moyenne en zone de transition. En effet les coefficients de détermination R^2 sont relativement faibles tant sur l'échantillon complet que sur l'échantillon réduit (celui-ci est réduit pour pouvoir disposer des données de l'année $i-1$).

La meilleure expression déterminée est la suivante:

$$L = -167.86 + 0.223 \cdot P - 0.183 \cdot P_2 + 0.067 \cdot P' - 0.190 \cdot P'_m$$

2.1.3. Conclusion

Il est intéressant de comparer, pour conclure cette approche au pas de temps annuel, les résultats obtenus à l'aide des formulations basées sur la seule pluviométrie annuelle et ceux obtenus dans le cadre d'une étude en régression linéaire multiple.

* En zone de forêt

Le critère EQM a été calculé pour les trois formulations retenues (tableau 2.5):

	Echantillon complet	Echantillon sans les valeurs "exceptionnelles"
COUTAGNE	164.9 (figure 2.6)	91.6 (figure 2.9)
MEDINGER	164.2 (figure 2.7)	95.7 (figure 2.10)
Régression multiple (60 valeurs)	111.4 (figure 2.8)	–

Tableau 2.5: Valeurs comparatives de l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) en zone de forêt

En ce qui concerne l'échantillon complet, tant au niveau du graphique que de la valeur du critère, l'équation issue de la régression multiple apparaît comme permettant d'atteindre une meilleure correspondance lame calculée – lame observée. Ceci est cependant obtenu au prix de l'utilisation de nombreuses variables, et de données de l'année antérieure qui ne sont pas toujours connues. Par conséquent, en cas d'impossibilité d'utilisation de cette formule, on conseillera d'avoir recours à l'expression de type COUTAGNE calée sur un échantillon sans valeurs "exceptionnelles" (celles-ci ayant, par ailleurs, une probabilité non négligeable d'être liées à des erreurs dues à la collecte proprement dite de l'information).

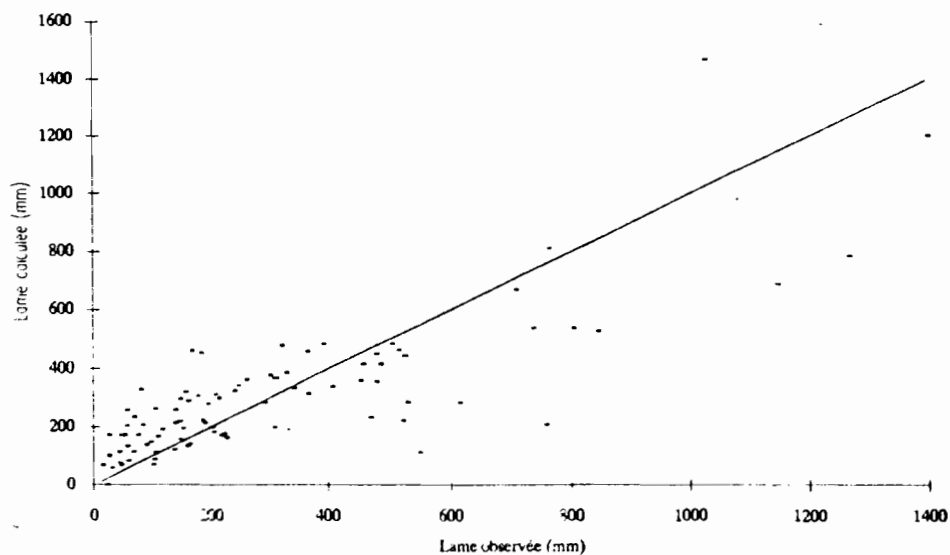


Figure 2.6: Lame calculée = F(lame observée) en zone de forêt sur échantillon complet (COUTAGNE)

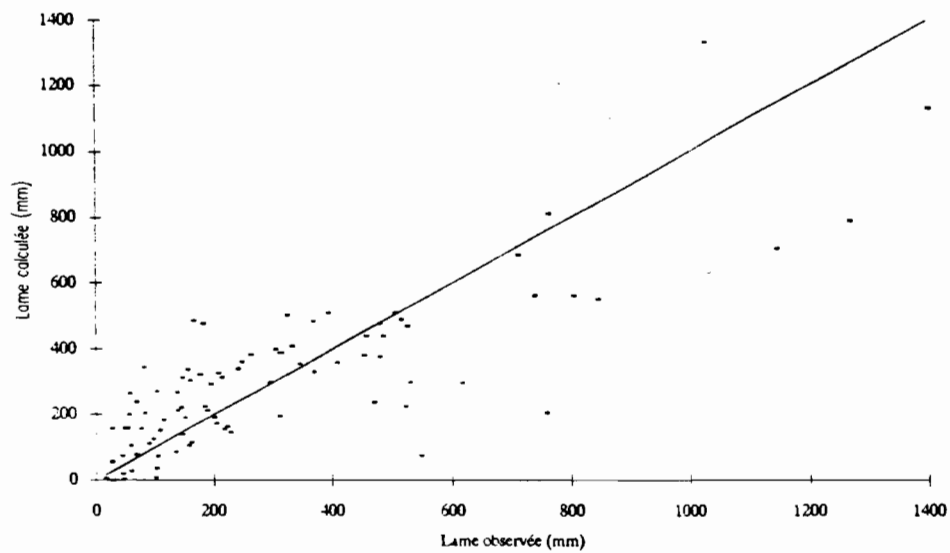


Figure 2.7: Lame calculée = F(lame observée) en zone de forêt sur échantillon complet (MEDINGER)

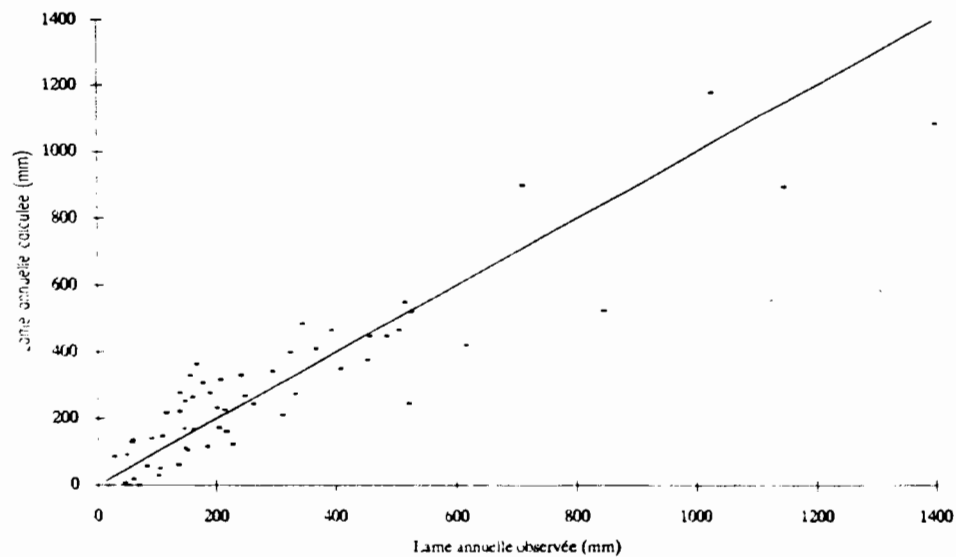


Figure 2.8: Lame calculée = F(lame observée) en zone de forêt sur échantillon complet de 60 valeurs (Régression multiple)

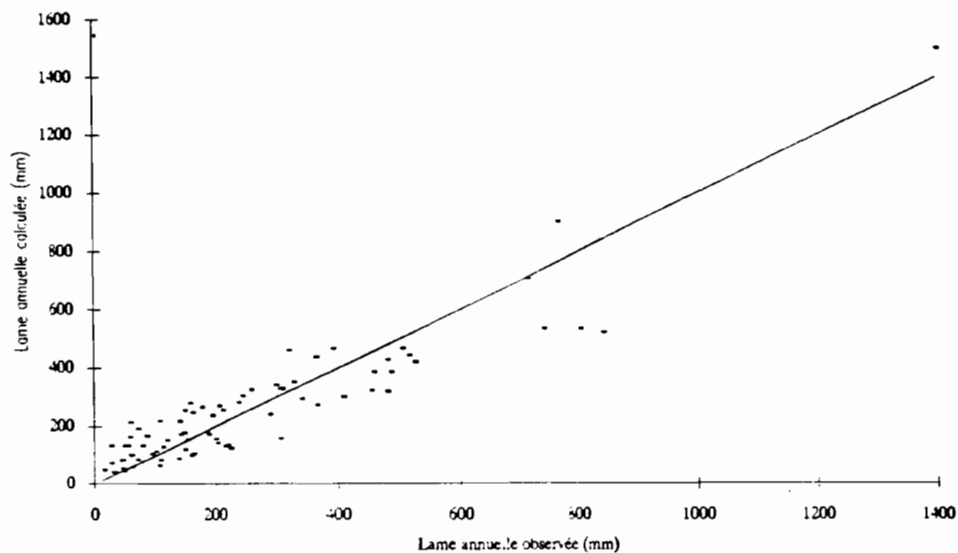


Figure 2.9: Lame calculée = F(lame observée) en zone de forêt sur échantillon réduit (COUTAGNE)

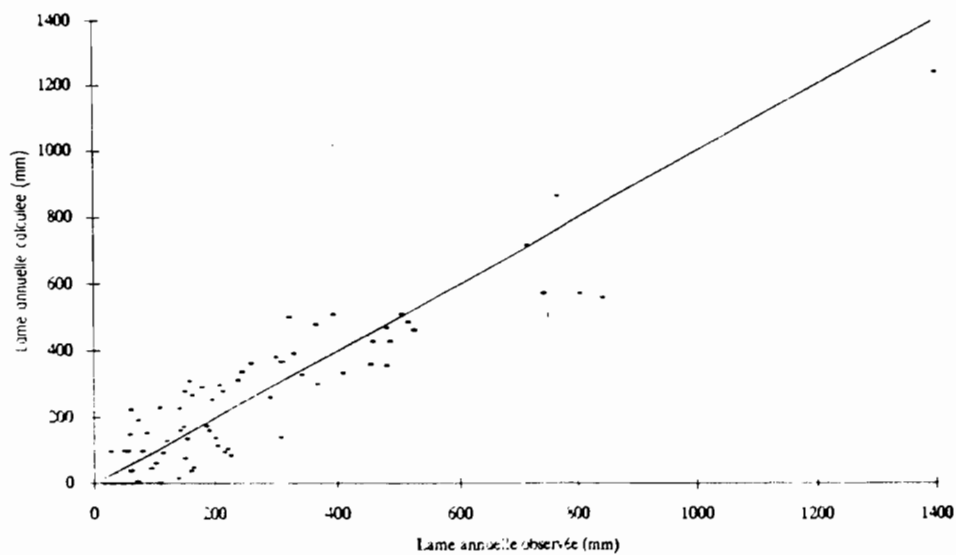


Figure 2.10: Lame calculée = F(lame observée) en zone de forêt sur échantillon réduit (MEDINGER)

* En zone de transition

Le critère EQM a été calculé, là aussi, pour tous les cas de figure (tableau 2.6).

	Echantillon complet	Echantillon sans les valeurs "exceptionnelles"
COUTAGNE	34.4 (figure 2.11)	24.8 (figure 2.14)
MEDINGER	33.7 (figure 2.12)	25.7 (figure 2.15)
Régression multiple (34 valeurs)	26.7 (figure 2.13)	-

Tableau 2.6: Valeurs comparatives de l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) en zone de transition

Dans chacun des cas, les tracés (figures 2.11 à 2.15) montrent une importante dispersion des points. Le tracé issu de la régression multiple semble, cependant, moins sous estimer les fortes valeurs de lame écoulée.

Notons également qu'en zone de transition les points "exceptionnels" retirés de l'échantillon correspondent essentiellement à l'année 1983, année sèche de période de retour avoisinant les 50 ans. Ceci confère à l'expression de type COUTAGNE calée dans ces conditions une certaine représentativité si tant est que l'on s'intéresse à des années dont la pluviométrie ne soit pas exceptionnellement déficitaire.

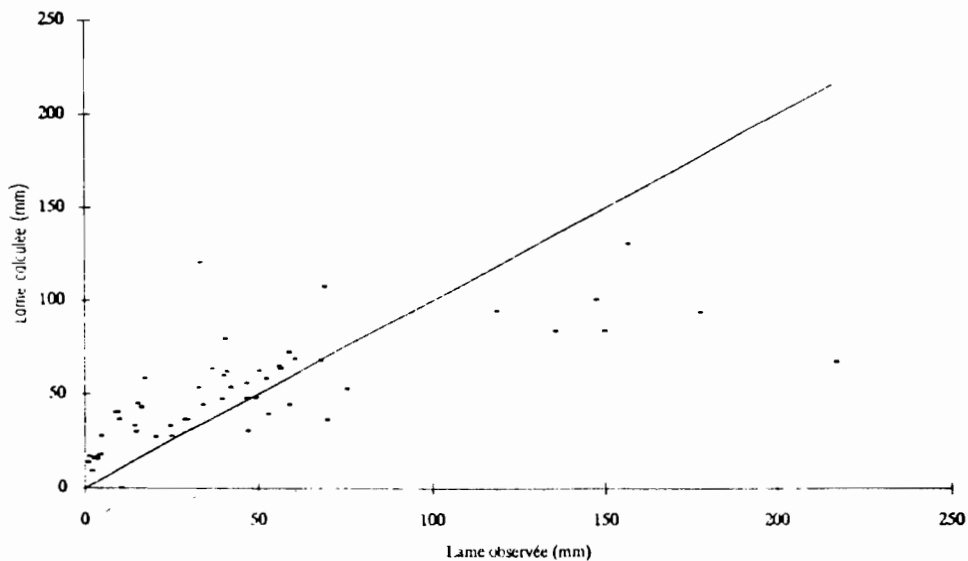


Figure 2.11: Lame calculée = F(lame observée) en zone de transition sur échantillon complet (COUTAGNE)

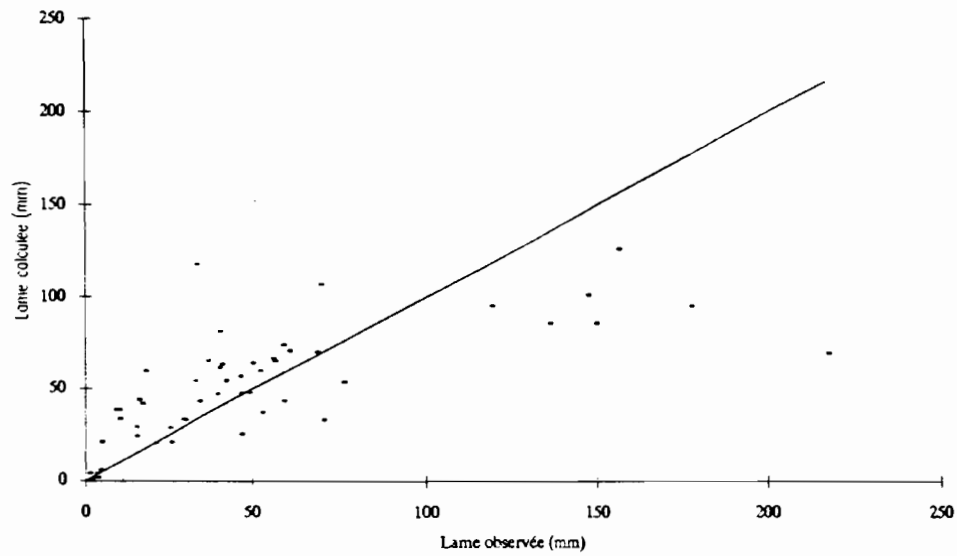


Figure 2.12: Lame calculée = $F(\text{lame observée})$ en zone de transition sur échantillon complet (MEDINGER)

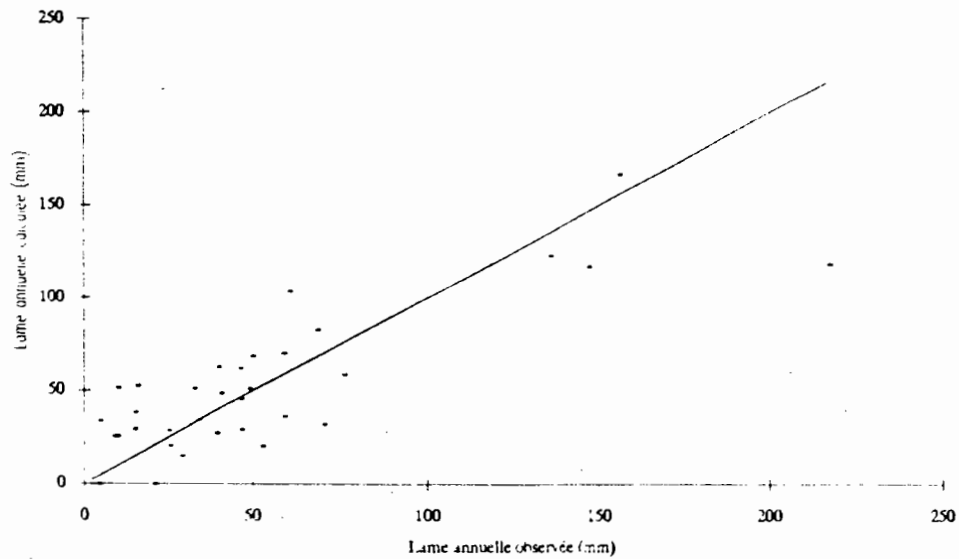


Figure 2.13: Lame calculée = $F(\text{lame observée})$ en zone de transition sur échantillon de 34 valeurs (Régression multiple)

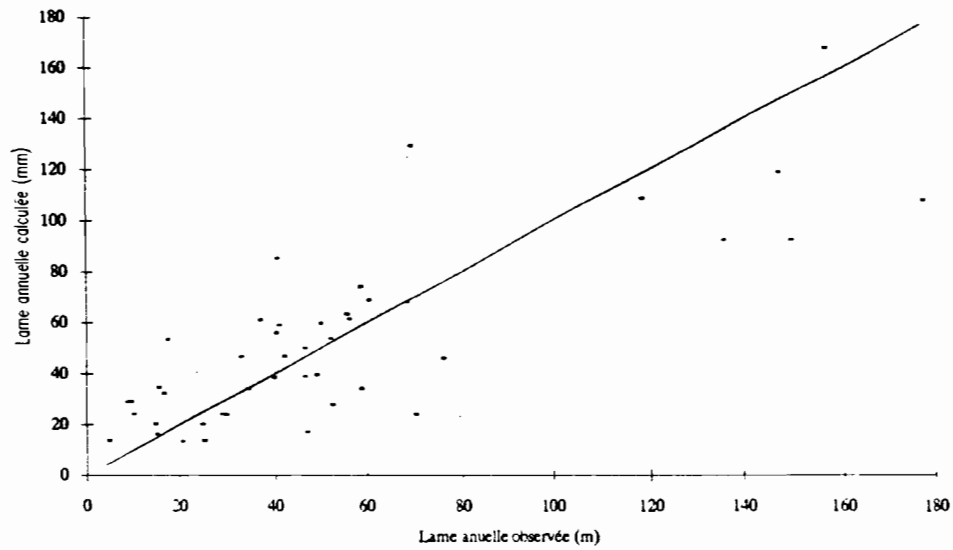


Figure 2.14: Lame calculée = $F(\text{lame observée})$ en zone de transition sur échantillon réduit (COUTAGNE)

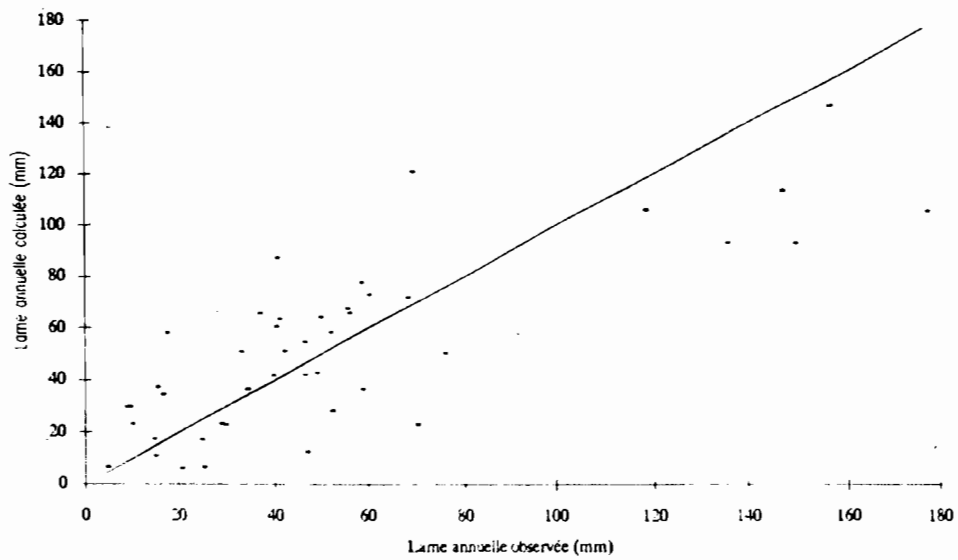


Figure 2.15: Lame calculée = $F(\text{lame observée})$ en zone de transition sur échantillon réduit (MEDINGER)

2.2. MODELISATION AU PAS DE TEMPS MENSUEL

Après cette première étude au pas de temps annuel qui permet d'estimer globalement la lame écoulée, nous nous sommes intéressés à un pas de temps plus fin qui permet déjà de décrire les hydrogrammes annuels observés. Le pas de temps mensuel, qui a été retenu, est d'une importance certaine pour les projets de développement, dans la mesure où leur faisabilité est très souvent conditionnée aux résultats des premières estimations d'apports effectués à cette échelle de temps.

En outre, un algorithme pluie-débit fonctionnant au pas de temps mensuel, permet de s'affranchir de certains problèmes de qualité des données fréquemment rencontrés: cumuls ou décalage des observations.

Soucieux d'un transfert effectif des résultats de nos travaux en direction des aménageurs et des projeteurs ivoiriens, nous avons préféré un modèle fortement inspiré des équations du bilan hydrique à un modèle global conceptuel, plus délicat à mettre en oeuvre et à appréhender pour des non-spécialistes.

Notre choix s'est porté sur un algorithme élaboré par SNYDER (1963) dans le cadre de la prévision des apports mensuels en eau de la Tennessee Valley Authority, et décrit par SINGH (1990). Après avoir étudié ce modèle, que nous appellerons modèle de SNYDER, nous l'avons adapté au contexte particulier de notre étude (zones de forêt et de transition de Côte d'Ivoire), puis restructuré pour accroître sa robustesse afin de pouvoir généraliser son utilisation.

2.2.1. Présentation du modèle initial

Le modèle que nous avons testé est le modèle développé par SNYDER en 1963 pour la prévision des apports mensuels en eau de la Tennessee Valley Authority (SINGH, 1990). SNYDER et al. (1971), plus tard, ont validé le modèle au pas de temps de cinq jours. C'est la première version du modèle au pas de temps mensuel qui nous intéresse ici. Dans cet algorithme, la lame d'eau écoulée est la résultante de trois composantes : un écoulement immédiat, un écoulement retardé, et une fonction du temps. SNYDER fait remarquer que ces trois éléments de la lame écoulée n'expriment pas nécessairement des quantités mesurables. Cette division en trois composantes est basée sur le principe qui veut que l'écoulement d'un mois donné soit composé de l'écoulement immédiat issu des averses de ce mois, et de l'écoulement retardé provenant des nappes rechargées par les pluies du même mois et celles des mois précédents.

Le troisième terme, fonction du temps, a pour objet de prendre en compte les variations des caractéristiques physiographiques des bassins versants sur de longues périodes. Nous ne disposons pas, dans le cadre de notre étude, des données permettant d'évaluer de tels changements, et, en outre, les séries chronologiques disponibles sont généralement de trop courte durée pour qu'un tel phénomène puisse être valablement pris en compte. Cette fonction du temps a donc été supprimée. SNYDER propose que l'écoulement retardé, lié à la pluviométrie d'un mois donné, s'annule totalement trente-deux mois plus tard. Cette hypothèse n'apparaît pas toujours adaptée aux zones de forêt tropicale, et plus particulièrement aux zones de transition, pour lesquelles il existe généralement une saison sèche longue et prononcée. Compte tenu de cette particularité, nous avons supposé que cinq mois, y compris le mois considéré, étaient suffisants pour estimer l'écoulement retardé.

Du fait de ce qui précède, le modèle de SNYDER que nous allons étudier et restructurer est un modèle au pas de temps mensuel, comportant neuf paramètres. La lame écoulée est la résultante de deux composantes, et son équation générale est de la forme:

$$V_q = V_{qa} + V_{qd}$$

avec :

V_q = lame écoulée (mm)

V_{qa} = écoulement immédiat (mm)

V_{qd} = écoulement retardé, résultant en partie des pluies antérieures (mm)

. Calcul de l'écoulement immédiat V_{qa} :

V_{qa} peut être exprimé comme une portion du volume précipité V_p au cours du mois i considéré, V_{pi} . Pour qu'un écoulement immédiat se produise, il faut que le volume précipité soit supérieur à un certain seuil S_v .

Soit:

$$V_{qa} = AA (V_{pi} - S_{vi})$$

avec :

i = indice du mois considéré

V_{pi} = volume précipité (mm) durant le mois i

AA = paramètre ($0 \leq AA \leq 1$)

S_{vi} = valeur du seuil pour le mois i

Afin de tenir compte des différences de capacité d'absorption du sol en saison sèche et en saison des pluies, S_v est variable. Ce paramètre doit être défini de manière à ce que sa valeur soit forte en saison sèche, car il faut une précipitation importante avant qu'un écoulement n'apparaisse; et faible en saison des pluies où le sol, déjà saturé, autorise plus facilement un phénomène de ruissellement. En première approximation, une sinusoïde permet d'exprimer les valeurs de S_v pour chaque mois de l'année. Cette sinusoïde oscille autour d'une valeur moyenne: Seuil, qui est prise comme paramètre du modèle.

La valeur du seuil pour un mois i donné peut alors être exprimé par:

$$S_{vi} = \text{Seuil}(1 + \sin(x_i)),$$

La valeur de Seuil, exprimée en mm, a été bornée à 150 de manière à éviter des valeurs aberrantes: $0 \leq \text{Seuil} \leq 150$.

En zone de forêt, les valeurs de x sont respectivement $\frac{\pi}{2}$ et $-\frac{\pi}{2}$ pour les mois de Mars (seuil maximum car fin de saison sèche) et de Septembre (fin de la deuxième saison des pluies).

En zone de transition, plus au nord, le seuil est pris maximum au mois d'avril ($x = \frac{\pi}{2}$) qui marque la fin de la saison sèche, et minimum au mois d'octobre ($x = -\frac{\pi}{2}$) à la fin de la saison des pluies.

Les figures 2.16 et 2.17 montrent la variation des sinusoïdes définies en zone de forêt et en zone de transition.

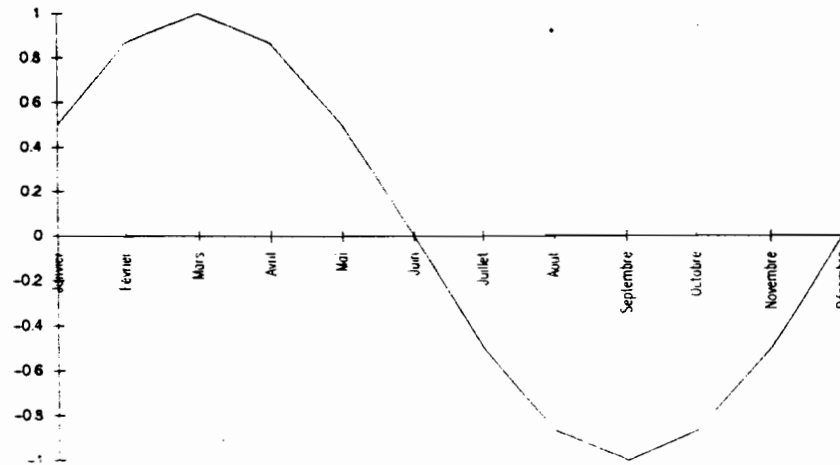


Figure 2.16: Sinusoïde en zone de forêt

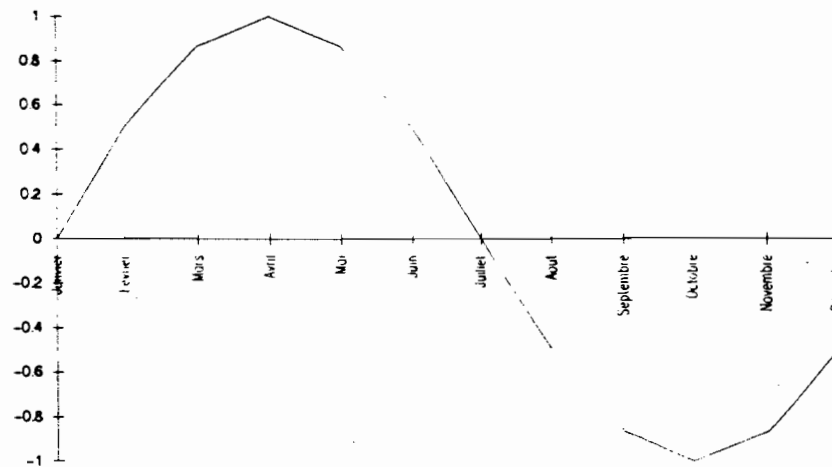


Figure 2.17: Sinusoïde en zone de transition

Calcul de l'écoulement retardé V_{qd} :

L'écoulement retardé V_{qd} prend en compte les précipitations du mois étudié, mais également celles des mois précédents. Nous avons supposé que la spécificité des deux zones d'étude (saison sèche longue et prononcée) nous permet de faire l'hypothèse que l'écoulement retardé s'annule après cinq mois.

$$V_{qd} = \sum_{i=1}^5 BBi(V_{pi} - G_i)$$

avec :

$i = 1$: mois considéré

$i = 2$: mois précédent de rang 1

$i = 3$: mois précédent de rang 2

$i = 4$: mois précédent de rang 3

$i = 5$: mois précédent de rang 4

BBi = paramètres (BBa , BBb , BBc , BBd , BBe) exprimant la proportion d'eau provenant de chaque mois (du mois considéré aux quatre mois antérieurs). ($0 \leq BBi \leq 1$).

G_i est une valeur de type seuil qui n'a pas nécessairement l'ampleur du seuil S_{vi} . SNYDER estime que G_i est probablement en phase avec S_{vi} . Son expression linéaire peut être de la forme:

$$G_i = CC + DD * S_{vi}$$

avec :

CC = paramètre (on fixe une borne supérieure à CC pour éviter l'obtention de valeurs aberrantes: $0 \leq CC \leq 100$).

DD = paramètre (DD est borné a priori à 1 : $0 \leq DD \leq 1$)

L'équation de V_{qd} devient donc:

$$V_{qd} = \sum_{i=1}^5 BBi [V_{pi} - (CC + DD * S_{vi})]$$

Le modèle complet s'écrit donc, après développement et pour le mois 1:

$$V_{q_1} = AA * V_{p_1} - AA * \text{Seuil}(1 + \sin(x_1)) + \sum_{i=1}^5 BBi * V_{pi} - CC \sum_{i=1}^5 BBi - DD \sum_{i=1}^5 BBi [\text{Seuil}(1 + \sin(x_i))]$$

Il présente donc un total de neuf paramètres pour chacun desquels il a été défini un intervalle de variation. Mais il convient de rajouter une contrainte supplémentaire sur la somme des paramètres AA et BBi :

$$AA + \sum_{i=1}^5 BBi \leq 1$$

En effet, si l'on considère pour un mois donné le volume précipité V_p , il subira au total les prélèvements suivants :

mois 1 : $(AA + BBa) V_p$

mois 2 : $BBb * V_p$

mois 3 : $BBc * V_p$

mois 4 : $BBd \cdot Vp$

mois 5 : $BBe \cdot Vp$

A la fin du cinquième mois, le reliquat éventuel s'écrit :

$$[1 - (AA + BBa)]Vp - BBb \cdot Vp - BBc \cdot Vp - BBd \cdot Vp - BBe \cdot Vp$$

Ce reliquat doit être positif ou nul. Les paramètres AA et BBi doivent donc satisfaire la condition suivante :

$$Vp(1 - AA - BBa - BBb - BBc - BBd - BBe) \geq 0$$

soit encore :

$$1 - AA - \sum_{i=1}^5 BBi \geq 0$$

d'où :

$$AA + \sum_{i=1}^5 BBi \leq 1$$

Le modèle initial, tel qu'il est décrit ci-dessus, sera, dans la suite de ce document et pour plus de commodité appelé **modèle di**.

2.2.2. Calage du modèle initial di

La phase de calage vise à déterminer le jeu de paramètres du modèle qui permettra de reproduire au mieux la lame mensuelle écoulée. Les paramètres du modèle sont optimisés de manière automatique, c'est à dire que le calage utilise une technique de convergence vers une solution optimale qui fait référence à un critère numérique. C'est le critère de Nash modifié que nous avons choisi pour effectuer ces calages. Rappelons l'expression de ce critère:

$$Nash = \frac{SCE(\text{Valeur observée} - \text{Valeur calculée})}{SCE(\text{Valeur observée} - \text{Moyenne observée})}$$

(SCE = Somme des Carrés des Ecart)

Soit:

$$Nash = \frac{\sum (Lo - Lc)^2}{\sum (Lo - L)^2}$$

avec :

L_c = Lame calculée en mm

L_o = Lame observée en mm

$\bar{L}$ = Lame observée moyenne en mm.

Le critère de Nash tend vers zéro quand L_c tend vers L_o . Ce critère est directement assimilable à un pourcentage de variance résiduelle, non expliquée par le modèle choisi.

Pour un bassin versant le calage du modèle initial sur une année donnée (i) nécessite non seulement les données de pluies et de débits mensuels de cette année, mais également celles des quatre derniers mois de l'année précédente (i-1) pour le calcul du débit retardé. Sur 144 stations-années disponibles initialement, le calage du modèle n'a pu être effectué que sur un échantillon de 94 stations-années du fait de cette contrainte.

Le modèle a été calé station-année par station-année sur l'ensemble des données disponibles en zones de forêt et de transition. Nous avons également procédé à des calages et validations sur des séries de plusieurs années consécutives pour différents bassins versants. Les essais sur plusieurs années avaient pour objectif essentiel de tester la robustesse du modèle, c'est à dire son aptitude à reproduire des situations différentes.

2.2.2.1. Calages stations-années par stations-années

Le modèle a été calé sur 60 stations-années en zone de forêt et 34 en zone de transition. A la suite des différents calages station-année par station-année sur la totalité des données disponibles, le premier constat que l'on puisse faire est la bonne qualité des valeurs du critère de Nash. En effet les valeurs moyennes du critère sont :

En zone de forêt : $\overline{\text{Nash}} = 0.084 \pm 0.104$

En zone de transition : $\overline{\text{Nash}} = 0.120 \pm 0.204$

Sur les hydrogrammes observés et calculés (Cf. exemples de quelques tracés: figures 2.18 à 2.21) on remarque que les étiages sont bien reconstitués grâce à l'utilisation d'un seuil variable en cours d'année, et qui conditionne ainsi une capacité d'absorption du sol différente selon les périodes de l'année. Les crues sont également très bien reconstituées.

La figure 2.22 (Néka à Nékaounié en 1986) est un exemple de calage de mauvaise qualité (critère de Nash élevé). Cette situation correspond à une non adéquation du modèle au problème posé de reconstitution de l'hydrogramme.

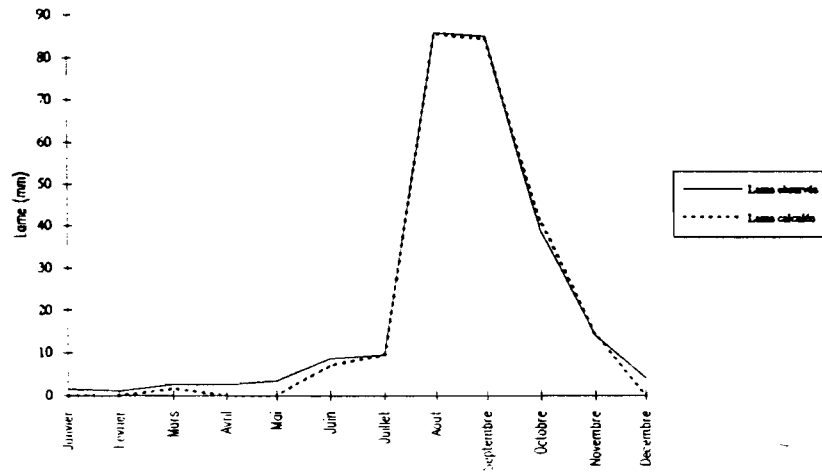


Figure 2.18: Ko à Logoualé en 1982 (Calage di)

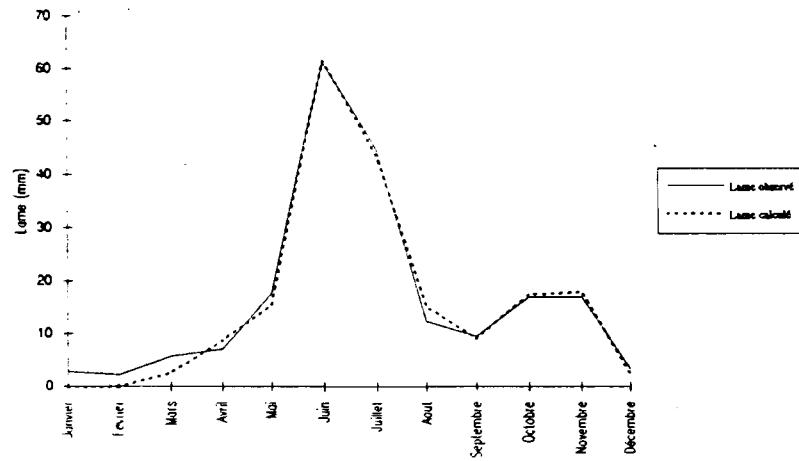


Figure 2.19: Davo à Dakpadou en 1972 (Calage di)

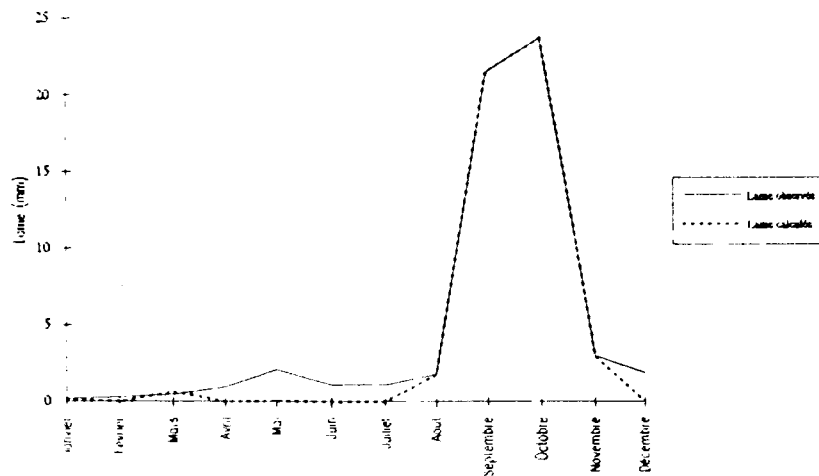


Figure 2.20: Lobo à Nibéhibé en 1971 (Calage di)

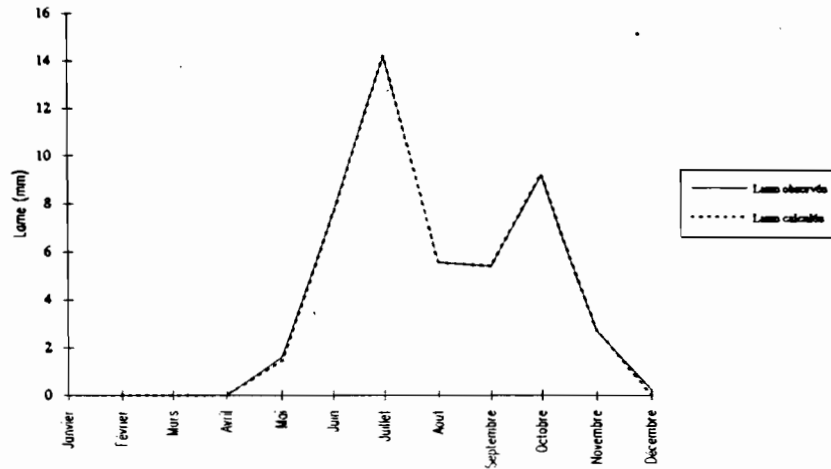


Figure 2.21: Kan à Dimbokro en 1975 (Calage di)

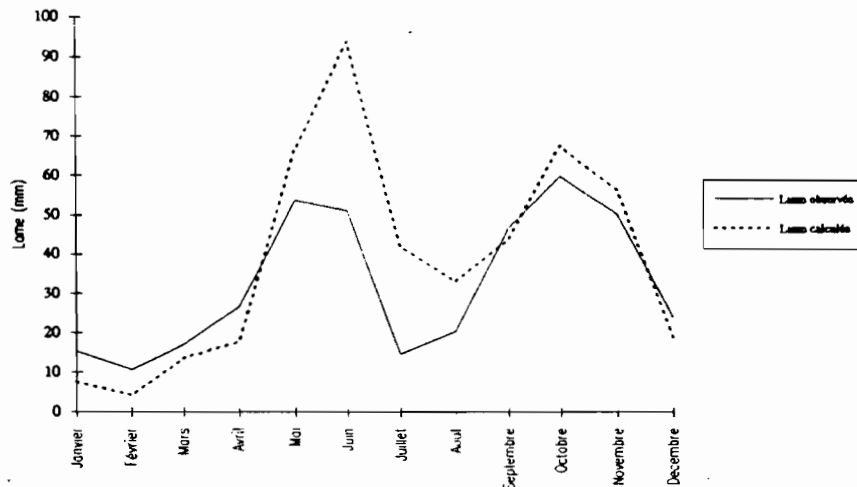


Figure 2.22: Néka à Nékaounié en 1986 (Calage di)

Après avoir procédé à l'ensemble de ces calages année par année, réalisés sur la totalité des années disponibles et sur lesquels nous reviendrons plus loin, nous allons procéder aux calages et validations sur des séries de plusieurs années.

2.2.2.2. Calages et validations sur plusieurs années

L'objectif principal visé par ces calages et validations sur des séries de plusieurs années consécutives est de tester la robustesse du modèle di. Ce travail a porté sur un certain nombre de bassins versants, situés en zone de forêt pour la plupart. Les résultats obtenus en zone de forêt sont consignés dans le tableau 2.7 et ceux en zone de transition, dans le tableau 2.8. Ces tableaux présentent le bassin versant et la période qui ont fait l'objet du calage, la ou les

périodes de validation, la valeur du critère de Nash lors du calage, et enfin la ou les valeurs du critère de Nash lors de la ou des validations.

Calage	Validation	Calage	Validation
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977-1979	1980	0.1839	0.7090
Ko à Man (207 km ²) 1971-1973	1981	0.1090	0.2775
	1985-1986		0.1991
Ko à Man (207 km ²) 1985-1986	1971-1973	0.0765	0.3001
	1981		0.9400
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984-1986	1981-1983	0.1124	0.5640
	1981-1982		0.6136
Néka à Nékaounié (344 km ²) 1980-1982	1986	0.3133	1.019
Néka à Nékouanié (344 km ²) 1980-1981	1982	0.3429	0.4070
	1986		1.206
Davo à Dakpadou(6538 km ²) 1970-1973	1977-1979	0.4799	0.3667
Davo à Dakpadou(6538 km ²) 1984-1986	1977-1979	0.2399	0.6303
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984-1986	1982-1983	0.0381	0.1440

Tableau 2.7: Critère de Nash des calages et validations du modèle di en zone de forêt

Calage	Validation	Calage	Validation
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965-1967	1968	0.1647	0.4966
	1971-1973		0.8375
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971-1973	1968	0.0853	0.2429
	1965-1967		0.3154

Tableau 2.8: Critère de Nash des calages et validations du modèle di en zone de transition

On note, d'après les différentes valeurs du critère de Nash, que les calages sur plusieurs années sont, de manière générale, satisfaisants. Ils sont par contre moins bons que ceux obtenus année par année. Quant aux validations, elles ne sont pas de très bonne qualité. Quelques représentations graphiques (figures 2.23 et 2.24 en zone de forêt; 2.25 et 2.26 en zone de transition) permettent de visualiser ce phénomène.

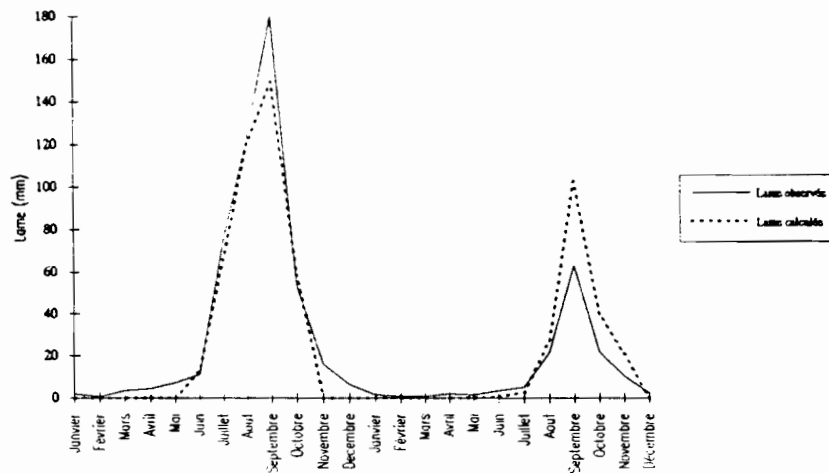


Figure 2.23: Ko à Man de 1985 à 1986 (Calage di)

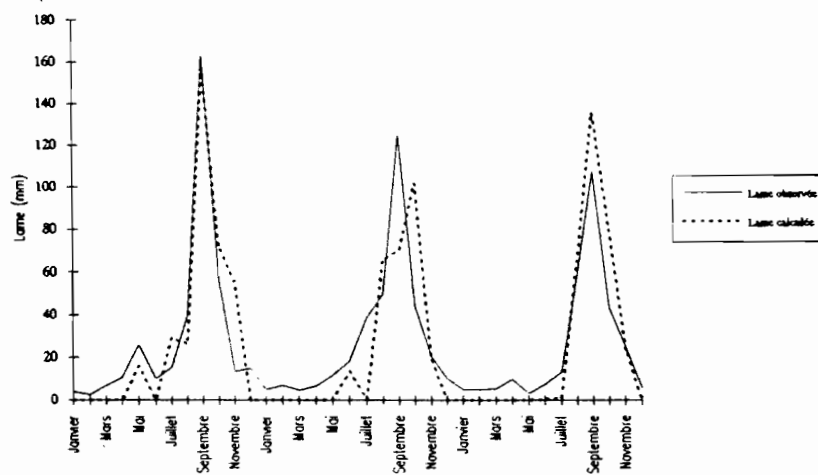


Figure 2.24: Ko à Man de 1971 à 1973 (Validation du calage di 1985-1986)

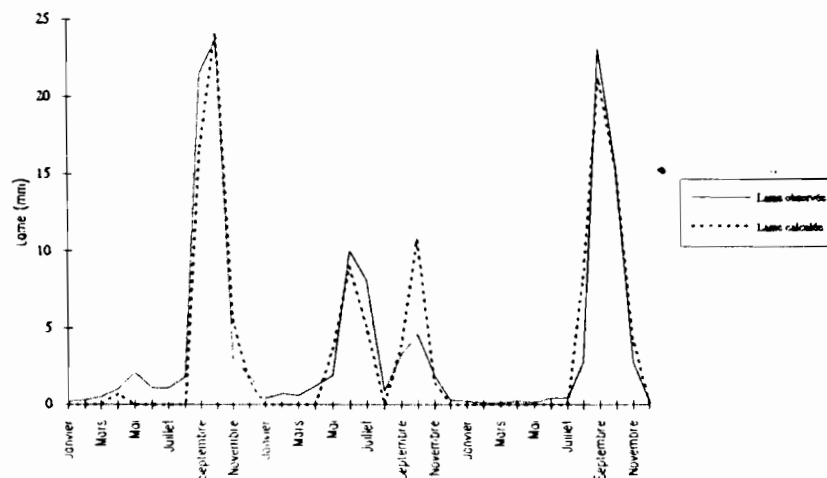


Figure 2.25: Lobo à Nibéhibé de 1971 à 1973 (Calage di)

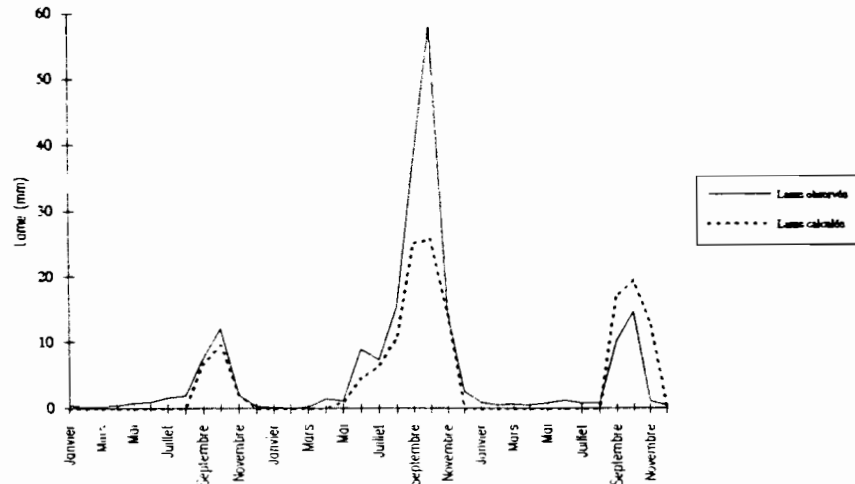


Figure 2.26: Lobo à Nibéhibé de 1965 à 1967 (Validation du calage de 1971-1973)

Il faut noter que les calages et validations du modèle sur les années 1982, 1983 et 1984 sont particulièrement délicates, du fait de la grande sécheresse de l'année 1983, dont la période de retour estimée est de l'ordre de 45 à 50 ans. Elle est survenue après une année 1982 assez sèche, également, et l'année 1984, qui succède à cette période sèche, débute alors avec un déficit hydrique tout à fait exceptionnel, ce qui l'a rendue également difficile à modéliser.

Les résultats des calages année par année et sur des séries de plusieurs années ont montré que le modèle initial di est assez performant. Le nombre important de paramètres (9) d'une part, et le pas de temps mensuel du modèle di d'autre part, peuvent expliquer en partie ces bons résultats. En effet ces calages, sur un nombre réduit de valeurs mais avec un modèle à neuf paramètres, ont plutôt tendance à prouver l'efficacité des méthodes d'optimisation non linéaire utilisées pour caler l'algorithme, que l'adéquation proprement dite de ce dernier à résoudre le problème posé. On pourrait donc qualifier cette solution de "numérique" plutôt que d'"hydrologique". Ce sont donc des cas très particuliers et par conséquent difficilement transposables. C'est d'ailleurs ce qui explique les mauvais résultats rencontrés en validation. Le nombre élevé de paramètres de calage ne permettant pas d'atteindre un niveau de validation satisfaisant, il convient de tenter d'y remédier en restructurant le modèle par le biais d'une diminution des paramètres. L'algorithme modifié, que l'on obtiendra alors, engendrera vraisemblablement une perte de qualité en calage, mais une amélioration en validation, due à son caractère plus général.

La réduction du nombre de paramètres peut être envisagée par l'attribution à certains de valeurs constantes qui ne seront donc plus optimisées. La détermination rigoureuse des paramètres qui pourront être assimilés ensuite à des constantes nécessite la réalisation de différentes études que nous allons maintenant détailler.

2.2.3. Etude de sensibilité des paramètres

Il est important lorsqu'on étudie un modèle hydrologique, de se livrer à une étude de sensibilité de ses paramètres. Une faible variation d'un paramètre sensible entraîne une forte variation de la valeur de la fonction critère, et donc une amélioration ou une dégradation importante dans la reconstitution des hydrogrammes. Un paramètre peu sensible n'a, par contre, qu'une faible influence sur le calage du modèle. Dans notre cas ce sont les paramètres peu sensibles qui seront identifiés, et une étude statistique pourrait permettre de leur attribuer des valeurs constantes.

2.2.3.1. Choix des stations–années étudiées

Pour cette étude de sensibilité, quatre stations–années particulières ont été retenues, deux en zone de forêt et deux en zone de transition. En zone de forêt, il s'agit du Davo à Dakpadou en 1972 (Davo72), et du N'Zo à Kahin en 1983 (Zoka83); en zone de transition, on utilisera la Baya à Bouroukro en 1985 (Bour85), et le Kan à Dimbokro en 1975 (Kand75). Les critères qui nous ont guidé dans le choix de ces quatre stations–années sont les suivants (Cf. tableau 2.9):

- . Les critères de Nash obtenus au cours des calages de ces stations–années sont faibles : ce sont donc de bons calages.
- . Il y a au plus un paramètre du modèle qui est venu se caler sur les bornes de son intervalle de variation.
- . Le coefficient d'écoulement observé a une valeur raisonnable.
- . Il s'agit de bassins versants de superficies variées, ce qui permet de tester différentes tailles de bassins.

Station–année	Nash calage	Paramètre calé sur une des bornes de son intervalle de variation	Coefficient d'écoulement (%)	Superficie du bassin versant (km ²)
Davo72	0.0116	BBe	15.9	6568
Zoka83	0.0012	–	18.3	4379
Bour85	0.0188	BBd	5.2	1394
Kand75	0.0002	BBe	5.1	6300

Tableau 2.9: Caractéristiques des stations–années étudiées

2.2.3.2. Méthode utilisée et résultats obtenus

Chacun des neuf paramètres du modèle di a été étudié séparément. La méthode a consisté à attribuer d'abord une première valeur quelconque au paramètre étudié en respectant toutefois son intervalle de validité. A la suite de quoi, on a procédé au calage du modèle en optimisant les seuls huit autres paramètres. Puis d'autres valeurs ont été attribuées au paramètre étudié, avec à chaque fois calage de l'algorithme portant sur les seuls huit paramètres. Les valeurs du critère de Nash obtenues à chaque fois permettent de déterminer la sensibilité du paramètre étudié. En effet, si le paramètre est sensible, il supporte une part importante du calage, et s'il s'éloigne de la valeur optimale qui lui correspond, la qualité du calage réalisé sur les seuls huit autres paramètres s'en trouvera affectée, ce qui se traduira par une forte augmentation du critère de Nash. Inversement si le paramètre n'est que peu sensible, quelle que soit la valeur qui lui sera attribuée, le niveau de calage atteint à l'aide des huit autres paramètres sera à peu près constant (d'où des valeurs constantes pour le critère de Nash). Les tableaux 2.10 et 2.11 regroupent les résultats de cette étude de sensibilité. Les valeurs soulignées sont celles obtenues dans la phase initiale de calage du modèle station-année par station-année. Afin de visualiser la sensibilité de ces paramètres, quelques graphiques représentant la valeur du critère de Nash après calage en fonction de la valeur fixée du paramètre étudié, ont été tracés (Cf. annexe II). Sur ces graphiques, la flèche indique les points correspondant aux valeurs soulignées des tableaux.

Ces différents essais montrent que les paramètres "Seuil" et "CC" sont assez peu sensibles. En effet, sur les quatre stations-années testées, le critère de Nash reste relativement bon quelle que soit la valeur du "Seuil". Il doit donc être possible d'attribuer une valeur constante à "Seuil". Dans un deuxième temps c'est le paramètre "CC" qui pourrait être fixé car le critère de Nash reste acceptable dans la majorité des cas. Les paramètres "AA" et "DD" apparaissent plus sensibles que les deux précédents. On pourra toutefois tester le comportement du modèle en leur attribuant des valeurs constantes.

De fait, les seuls paramètres qui ne semblent pas pouvoir être assimilés à des constantes sont les paramètres de type "BBi".

Des études statistiques et de corrélation sur les différents paramètres vont nous aider à déterminer quels sont ceux qu'il est possible de fixer a priori, et quelles valeurs leur donner.

DAVO72						ZOKA83					
Seuil	Nash	AA	Nash	BBa	Nash	Seuil	Nash	AA	Nash	BBa	Nash
22.35	0.0073	0.0005	0.0208	0.0130	0.0636	41.2	0.00053	0.0014	0.00054	0.00347	0.002335
42.35	0.0079	0.0053	0.0196	0.0261	0.0696	49.4	0.00221	0.014	0.00065	0.01735	0.001503
62.35	0.0082	<u>0.0526</u>	<u>0.0117</u>	0.0456	0.0479	57.6	0.00123	0.054	0.01227	<u>0.0347</u>	<u>0.001174</u>
72.35	0.0093	0.0631	0.0106	0.0652	0.0199	74.1	0.00061	0.094	0.00939	0.0416	0.001167
<u>82.35</u>	<u>0.0117</u>	0.0736	0.0102	0.0977	0.0110	<u>82.35</u>	<u>0.00117</u>	0.134	0.00261	0.0555	0.001169
92.35	0.0138	0.0842	0.0151	<u>0.1303</u>	<u>0.0117</u>	90.5	0.00235	0.174	0.00162	0.0833	0.001647
112.35	0.0174	0.1052	0.0324	0.1629	0.0150	98.8	0.00422	<u>0.194</u>	<u>0.00117</u>	0.111	0.00256
132.35	0.0171			0.1955	0.0237	107.1	0.00678	0.214	0.00255	0.1804	0.005697
142.35	0.0169			0.2607	0.0880	115.3	0.01	0.254	0.01267	0.2498	0.01034
150.00	0.0168					133.7	0.01313				
BBb	Nash	BBc	Nash	BBd	Nash	BBb	Nash	BBc	Nash	BBd	Nash
0.0211	0.4256	0.0145	0.1818	0.0013	0.0656	0.0119	0.040646	0	0.003291	0	0.0011667
0.0422	0.3403	0.0725	0.0628	0.0134	0.0796	0.0238	0.02658	0.0029	0.03125	<u>0.03646</u>	<u>0.001174</u>
0.1055	0.1403	0.1088	0.0249	0.0669	0.0243	0.0357	0.017178	0.0118	0.001477	0.3646	0.00499
0.1582	0.0380	0.1269	0.0131	<u>0.1337</u>	<u>0.0117</u>	0.0476	0.009867	<u>0.0237</u>	<u>0.001174</u>	0.7292	0.010432
<u>0.2109</u>	<u>0.0117</u>	<u>0.1451</u>	<u>0.0117</u>	0.1504	0.0149	<u>0.0952</u>	<u>0.001174</u>	0.1	0.010233		
0.2636	0.0385	0.1814	0.0247	0.1671	0.0245	0.119	0.000493	0.2	0.01362		
0.3164	0.1118	0.2176	0.0494	0.2005	0.0521	0.1428	0.000887	0.4	0.00239		
0.4218	0.1082	0.2902	0.0322	0.2674	0.1087	0.1904	0.001735	0.8	0.027969		
0.6327	0.1151	0.4352	0.1079			0.2094	0.10013				
BBe	Nash	CC	Nash	DD	Nash	BBe	Nash	CC	Nash	DD	Nash
0.0000	0.0117	50.9	0.1201	0.0132	0.0357	0	0.0011778	20	0.00207	0	0.017245
0.0007	0.0117	70.9	0.0237	0.0264	0.0317	<u>0.02393</u>	<u>0.001174</u>	40	0.00158	0.5	0.002159
0.0017	0.0117	75.9	0.0157	0.0659	0.0120	0.2393	0.0060346	<u>50.0036</u>	<u>0.001174</u>	0.6	0.001616
<u>0.0034</u>	<u>0.0117</u>	<u>80.9</u>	<u>0.0117</u>	<u>0.1318</u>	<u>0.0117</u>	0.4786	0.0026077	60	0.00095	<u>0.79024</u>	<u>0.001174</u>
0.0068	0.0118	82.9	0.0108	0.1647	0.0117	0.7179	0.029715	80	0.00449	0.9	0.000569
0.0102	0.0123	85.9	0.0106	0.1977	0.0091			100	0.005169	1	0.000298
0.0170	0.0141	90.9	0.0128	0.2636	0.0265						
0.0340	0.0224	95.9	0.0131	0.3954	0.1013						

Tableau 2.10: Sensibilité des paramètres : valeurs du critère de Nash (Davo à Dakpadou en 1972 et N'Zo à Kahin en 1983)

BOUR85						KAND75					
Seuil	Nash	AA	Nash	BBa	Nash	Seuil	Nash	AA	Nash	BBa	Nash
42.6	0.00946	0	0.00623	0	0.01834	30	0.02607	0	0.0111	0	0.04521
62.6	0.00574	0.00091993	0.00616	<u>0.038009</u>	<u>0.01878</u>	40	0.00047	0.01	0.00788	0.01	0.03419
82.6	0.02396	0.0091993	0.06816	0.1	0.02788	50	0.00017	<u>0.05736</u>	<u>0.00025</u>	<u>0.09167</u>	<u>0.00025</u>
92.6	0.02089	<u>0.091993</u>	<u>0.01878</u>	0.38009	0.07547	70	0.00017	0.1	0.05	0.25	0.0401
<u>102.6</u>	<u>0.01878</u>	0.1	0.025	0.6	0.02835	80	0.00017	0.15	0.2863	0.27	0.166
112.6	0.02628	0.125	0.12042	1	0.07547	<u>90.4</u>	<u>0.00025</u>			0.3	0.167
122.6	0.04237	0.15	0.34927			100	0.00576				
150	0.07547					120	0.0111				
						150	0.0111				
BBb	Nash	BBc	Nash	BBd	Nash	BBb	Nash	BBc	Nash	BBd	Nash
0	0.01831	0	0.02389	0	0.01852	0	0.375	0	0.10405	0	0.0111
<u>0.035813</u>	<u>0.01878</u>	0.001347	0.01833	<u>0.002985</u>	<u>0.01878</u>	0.01	0.291	0.01	0.0677	0.005	0.00602
0.35813	0.02809	<u>0.01347</u>	<u>0.01878</u>	0.1	0.0279	0.05	0.06302	<u>0.06185</u>	<u>0.00025</u>	<u>0.01853</u>	<u>0.00025</u>
0.6	0.07547	0.1347	0.01878	0.2985	0.02558	<u>0.14046</u>	<u>0.00025</u>	0.1	0.03011	0.1	0.03979
0.8	0.07547	0.5	0.01594	0.5	0.02789	0.2	0.0002667	0.2	0.1524	0.15	0.0419
0.85	0.19288			1	0.07547	0.3	0.00019			0.155	0.3813
1	0.19288									0.16	0.38247
										0.17	0.385
BBe	Nash	CC	Nash	DD	Nash	BBe	Nash	CC	Nash	DD	Nash
0	0.0047	10	0.00516	0	0.00553	0	0.00022	30	0.04897	0	0.0749
0.005	0.01621	30	0.01833	0.073187	0.00584	<u>0.00108</u>	<u>0.00025</u>	40	0.02373	0.1	0.05097
0.03	0.01878	<u>50</u>	<u>0.01878</u>	<u>0.73187</u>	<u>0.01878</u>	0.0108	0.00017	<u>53.3</u>	<u>0.00025</u>	0.2	0.0409
<u>0.062611</u>	<u>0.01878</u>	65	0.01878	1	0.01853	0.05	0.00087	70	0.00022	0.3	0.00198
0.1	0.01833	70	0.01853			0.1	0.14377	75	0.18224	<u>0.46187</u>	<u>0.00025</u>
0.3	0.02518	75	0.0281			0.2	0.2954	80	0.3188	0.5	0.00029
0.62611	0.02835	80	0.02809							0.6	0.00439
1	0.02835	100	0.02809							0.65	0.2955
										0.8	0.6583

Tableau 2.11: Sensibilité des paramètres : valeurs des critères de Nash (Baya à Bouroukro en 1985 et Kan à Dimbokro en 1975)

2.2.4. Etude des différents paramètres

Cette étude comprend une étude statistique, la recherche de corrélations possibles entre les différents paramètres du modèle et un essai de régionalisation de ces paramètres.

2.2.4.1. Etude statistique des paramètres

L'étude statistique descriptive est effectuée sur un échantillon de 60 individus en zone de forêt et de 34 individus en zone de transition représentant en fait, pour chaque paramètre, les valeurs obtenues après les calages station-année par station-année. C'est une étude de statistiques descriptives.

Les valeurs caractéristiques (moyenne, écart-type, médiane, etc...) de cette analyse en zones de forêt et de transition sont mentionnées dans les tableaux suivants (tableaux 2.12 et 2.13).

Paramètre	Seuil	AA	BBa	BBb	BBc	BBd	BBe	CC	DD
Moyenne	83.81	0.065	0.1595	0.1299	0.059	0.0498	0.0528	73.42	0.5017
Ecart-type	22.89	0.1021	0.1545	0.1089	0.0829	0.074	0.1343	20.08	0.3511
Coefficient de variation	0.2731	1.569	0.9687	0.8385	1.406	1.486	2.544	0.2735	0.6999
Médiane	82.35	0.01	0.1239	0.1116	0.0268	0.0115	0.0174	76.06	0.4167
Mode	82.35	0	0	0	0	0	0	50	0
Minimum	8.101	0	0	0	0	0	0	15.77	0
Maximum	117.6	0.499	0.7036	0.6489	0.3831	0.3037	0.9848	100	1
Etendue	109.5	0.499	0.7036	0.6489	0.3831	0.3037	0.9848	84.23	1
Premier quartile	80.74	0	0.056	0.0655	0.0064	0.003	0.0002	52.87	0.2048
Dernier quartile	97.21	0.1021	0.2091	0.1607	0.0931	0.0766	0.0538	90	0.8482

Tableau 2.12: Statistiques descriptives en zone de forêt (effectif 60)

Paramètre	Seuil	AA	BBa	BBb	BBc	BBd	BBe	CC	DD
Moyenne	93.12	0.0282	0.0681	0.0808	0.0323	0.0193	0.0283	56.68	0.7779
Ecart-type	18.56	0.029	0.0792	0.0749	0.0549	0.0405	0.0521	17.27	0.3117
Coefficient de variation	0.1993	1.031	1.162	0.9275	1.699	2.095	1.844	0.3047	0.4006
Médiane	91.58	0.0208	0.0468	0.0643	0.01	0.004	0.0058	52.5	0.999
Mode	91.59	0	0	0.058	0	0	0	50	1
Minimum	42.78	0	0	0	0	0	0	28.5	0.0014
Maximum	150	0.0955	0.3447	0.3997	0.2461	0.1966	0.2159	100	1
Etendue	107.22	0.0955	0.3447	0.3997	0.2461	0.1966	0.2159	71.5	0.9986
Premier quartile	82.35	0.001	0.0162	0.033	0.0053	0.0003	0.0011	47.03	0.4619
Dernier quartile	100.7	0.0515	0.0855	0.1177	0.0289	0.018	0.0317	72.71	1

Tableau 2.13: Statistiques descriptives en zone de transition (effectif 34)

Au regard des tableaux ci-dessus on peut noter qu'à l'exception de Seuil et de CC, les coefficients de variation des paramètres sont élevés, ce qui se traduit donc par des valeurs de paramètres assez dispersées. Le mode des paramètres AA et BBi ($i=1$ à 5) est généralement égal à zéro.

La faible dispersion des valeurs des paramètres Seuil et CC est, une fois encore, un bon indicateur pour pouvoir les fixer à des valeurs constantes.

2.2.4.2. Corrélation entre les paramètres

On recherche ici les éventuelles liaisons qui peuvent exister entre différents paramètres du modèle. Ces possibles corrélations entre paramètres peuvent biaiser les calages. Si des relations existent, il est alors possible d'exprimer certains paramètres en fonction d'autres, et de réduire, ainsi, le nombre de ceux qui doivent être optimisés.

Une analyse de corrélation linéaire a donc été réalisée. Les différents coefficients de corrélation sont regroupés dans les tableaux 2.14. et 2.15. Ces tableaux montrent qu'il n'y a pas de relation linéaire significative entre les paramètres, que ce soit en zone de forêt ou en zone de transition. Le plus souvent, le coefficient de corrélation linéaire est faible. Lorsqu'il est relativement élevé (par exemple 0.8 pour la corrélation entre BBd et BBa en zone de transition), une représentation graphique (Cf. figure 2.27) permet de montrer que la corrélation n'est le fait que de quelques points.

	Seuil	AA	BBa	BBb	BBc	BBd	BBe	CC	DD
Seuil	1	-0.259	0.396	-0.155	0.027	0.082	-0.266	-0.366	0.127
AA	-0.259	1	-0.317	0.513	-0.185	-0.080	0.459	0.270	0.207
BBa	0.396	-0.3167	1	-0.199	0.465	0.516	-0.083	-0.115	0.258
BBb	-0.155	0.513	-0.199	1	-0.293	-0.010	0.050	0.234	0.074
BBc	0.027	-0.185	0.465	-0.293	1	0.020	-0.058	0.148	0.272
BBd	0.082	-0.080	0.516	-0.010	0.020	1	0.061	0.195	-0.076
BBe	-0.266	0.459	-0.083	0.050	-0.058	0.061	1	0.012	0.186
CC	-0.366	0.270	-0.115	0.234	0.148	0.195	0.012	1	-0.119
DD	0.127	0.207	0.258	0.074	0.272	-0.076	0.186	-0.119	1

Tableau 2.14: Matrice de corrélation du modèle di en zone de forêt

	Seuil	AA	BBa	BBb	BBc	BBd	BBe	CC	DD
Seuil	1	0.405	-0.045	0.357	0.044	-0.083	-0.236	0.360	0.271
AA	0.405	1	0.092	0.311	0.226	0.133	0.049	0.275	0.415
BBa	-0.045	0.092	1	0.154	0.150	0.799	0.780	0.429	0.363
BBb	0.357	0.311	0.154	1	0.547	-0.134	-0.069	0.286	0.393
BBc	0.044	0.226	0.150	0.547	1	-0.103	-0.211	0.122	0.116
BBd	-0.083	0.133	0.799	-0.134	-0.103	1	0.745	0.355	0.234
BBe	-0.237	0.049	0.780	-0.069	-0.211	0.745	1	0.376	0.283
CC	0.360	0.275	0.429	0.286	0.122	0.355	0.376	1	0.414
DD	0.271	0.415	0.363	0.393	0.116	0.234	0.283	0.414	1

Tableau 2.15: Matrice de corrélation du modèle di en zone de transition

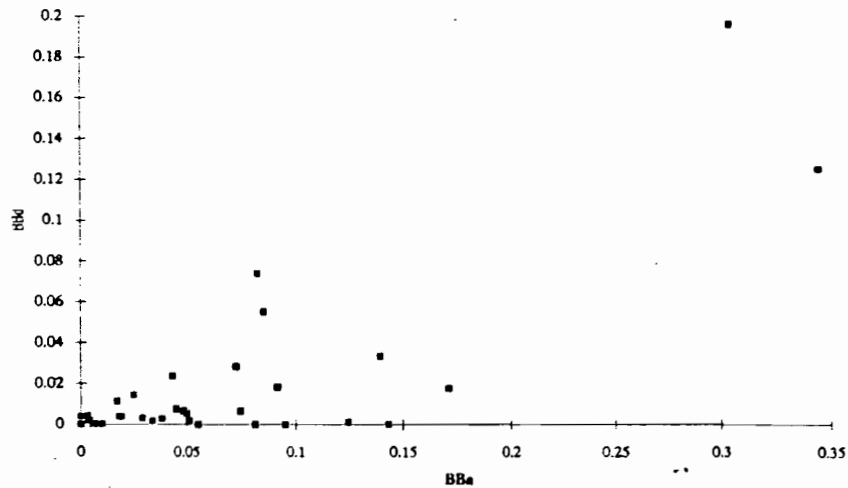


Figure 2.27: BBd en fonction de BBa

L'existence d'une relation non linéaire entre les paramètres n'est pas à écarter. Pour le vérifier, nous avons procédé à une représentation graphique des paramètres les uns en fonction des autres. Ces différents tracés, comme en témoigne l'exemple de la figure 2.28, indiquent qu'aucune relation de ce type n'est perceptible.

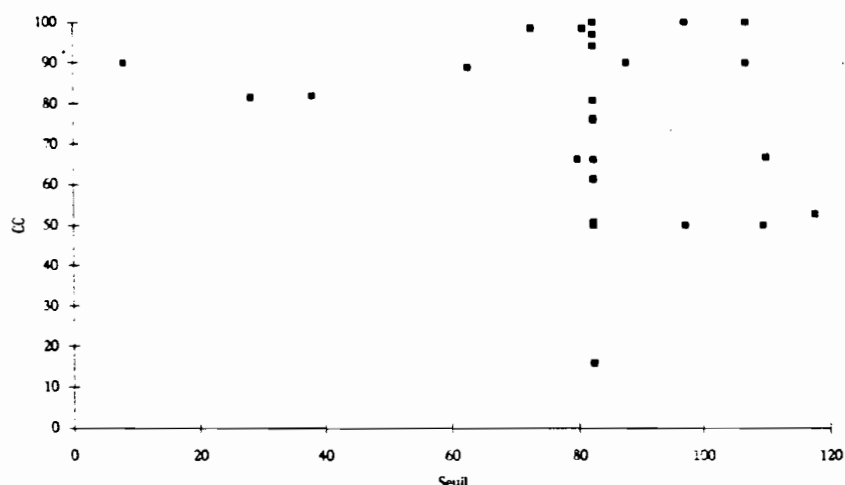


Figure 2.28: CC en fonction de Seuil en zone de forêt

Après l'analyse statistique, les études de sensibilité et de corrélation, un essai de régionalisation des paramètres a été effectué.

2.2.4.3. Essai de régionalisation des paramètres

Il arrive que certains paramètres d'un modèle soient reliés à des caractéristiques géographiques et/ou physiographiques (géologie, végétation, ...) des bassins versants étudiés. Si tel est le cas on peut envisager de les régionaliser.

L'essai de régionalisation consiste à faire la cartographie des neuf paramètres du modèle di. Pour une année et une zone données, on recense d'abord toutes les stations-années concomitantes ainsi que leurs coordonnées (latitude et longitude). Ensuite, on trace, pour chaque année considérée et pour chaque paramètre, les cartes d'isovaleurs. L'examen de ces cartes montre, malheureusement, qu'aucune organisation régionale ne peut être établie (Cf. annexe III). Il est à noter que les stations-années concomitantes en différents points des zones dont nous disposons sont peu nombreuses et par conséquent ne sont pas réparties de façon homogène. Cette grande dispersion des points peut être un handicap dans le tracé des isovaleurs des paramètres.

2.2.5. Conclusion

Des études qui précèdent, il ressort que les paramètres Seuil et CC se sont avérés peu sensibles. Les paramètres DD et AA, quant à eux, font état d'une sensibilité qui semble plus faible que pour les autres.

On pourra donc envisager de restructurer le modèle "initial" en attribuant à ces paramètres une valeur constante.

Par ailleurs, aucun enseignement particulier ne peut être tiré des études de corrélation et des tentatives de régionalisation.

2.3. RESTRUCTURATION DU MODELE AU PAS DE TEMPS MENSUEL

Notons que la restructuration du modèle di a pour objectif de diminuer le nombre des paramètres et donc d'améliorer la robustesse de cet algorithme, qui semble actuellement en état de surparamétrisation.

On s'intéressera, dans un premier temps, aux paramètres Seuil, CC, DD et AA dont on a vu qu'ils pouvaient éventuellement être fixés à des valeurs constantes, avant de prendre en compte la restructuration des paramètres de type BBi.

2.3.1. Etude des paramètres Seuil, CC, DD, et AA

Les essais ont été réalisés sur 20 stations–années (12 en zone de forêt et 8 en zone de transition). Le choix des 20 stations–années, parmi les 94 que comptent les deux zones, a été dicté par la bonne qualité des calages réalisés sur ces stations–années avec le modèle di. En zone de forêt, il s'agit du Ko à Logoualé (Kolo) et du Davo à Dakpadou (Davo); en zone de transition, de la Baya à Yébouakro (Byeb), du Kan à Dimbokro (Kand) et de la Lobo à Nibéhibé (Lobo).

2.3.1.1. Paramètre "Seuil"

Dans les paragraphes précédents, le paramètre Seuil apparaît comme étant le moins sensible et présentant la dispersion la plus faible. L'étude de sensibilité des paramètres a montré que, lorsque la valeur du paramètre Seuil varie, le critère de Nash reste bon. Par ailleurs, "Seuil" pourrait être assimilé à une grandeur physique du type "capacité de première absorption du sol". Nous ferons l'hypothèse que cette capacité varie peu sur les zones considérées, et nous fixerons le paramètre à sa valeur moyenne, c'est à dire:

En zone de forêt Seuil = $\overline{\text{Seuil}}$ = 83.81

En zone de transition Seuil = $\overline{\text{Seuil}}$ = 93.12

Le reste du modèle est, lui, inchangé par rapport au modèle di. Ce nouveau modèle où le paramètre Seuil n'est plus optimisé sera appelé **modèle si** par la suite.

Une fois le paramètre Seuil fixé à sa valeur moyenne, le processus d'optimisation des huit autres paramètres est relancé. Les résultats obtenus avec cette nouvelle formulation de l'algorithme sont de bonne qualité (Cf. tableau 2.16). Les résultats issus de ces nouveaux calages soutiennent, en effet, très bien la comparaison avec ceux effectués à l'aide du modèle "initial", puisque, dans un certain nombre de cas, ils se révèlent même meilleurs.

	Nash di	Nash si
Kolo81	0.0134	0.0152
Kolo82	0.0043	0.0038
Kolo84	0.0234	0.0090
Kolo85	0.0036	0.0031
Kolo86	0.0082	0.0014
Davo72	0.0117	0.0120
Davo74	0.0343	0.0325
Davo75	0.0581	0.0512
Davo76	0.0600	0.0156
Davo77	0.0599	0.0599
Davo85	0.0438	0.0438
Davo86	0.0584	0.0588
Byeb84	0.0018	0.0021
Byeb85	0.0331	0.0252
Kand75	0.0002	0.0005
Kand84	0.0002	0.0002
Kand85	0.0289	0.0002
Lobo71	0.0147	0.0151
Lobo73	0.0007	0.0006
Lobo74	0.0022	0.0021

Tableau 2.16: Critères de Nash des calages di et si

La représentation graphique des lames observées et calculées, comme l'indique quelques exemples (figures 2.29 en zone de forêt et 2.30 en zone de transition), montre que la reconstitution des hydrogrammes est satisfaisante.

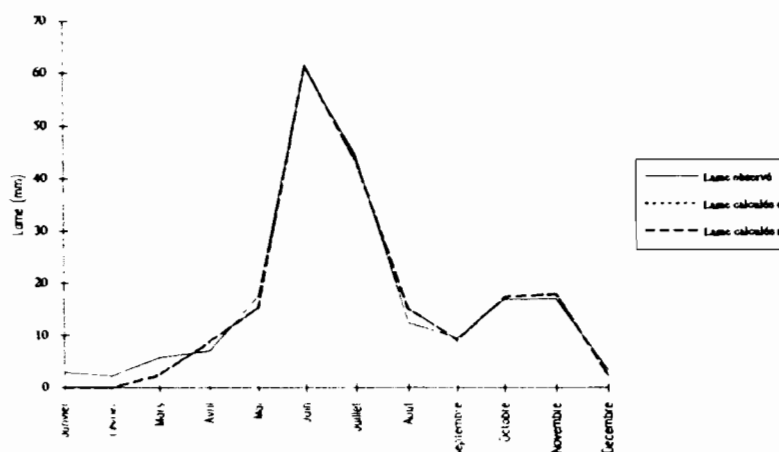


Figure 2.29: Davo à Dakpadou en 1972 (Calages di et si)

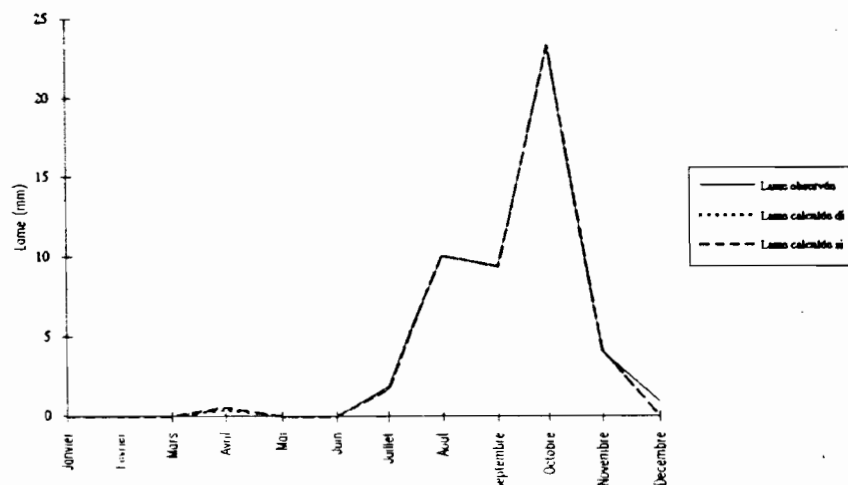


Figure 2.30: Baya à Yébouakro en 1984 (Calages di et si)

Le fait de fixer le paramètre Seuil à sa valeur moyenne ne semble donc pas altérer la qualité des performances du modèle. Ce nouvel algorithme ne comprend donc plus que huit paramètres (AA, BBa,..., BBc, CC, et DD).

2.3.1.2. Paramètre CC

Le second paramètre qui puisse être éventuellement assimilé à une constante est CC, qui présente une faible dispersion et se révèle peu sensible. Ce paramètre correspond également à une notion physique de seuil. Nous avons choisi de le fixer à sa valeur moyenne, et de ne plus l'optimiser:

En zone de forêt $CC = \overline{CC} = 73.42$

En zone de transition $CC = \overline{CC} = 56.68$

Ce nouveau modèle sera appelé **modèle ci** par la suite. Le calage de cet algorithme s'effectue en optimisant les sept autres paramètres: AA, BBa, BBb, BBc, BBd, BBc et DD.

Les résultats obtenus restent de bonne qualité (Cf. tableau 2.17). On note néanmoins une légère dégradation par rapport aux calages obtenus avec le modèle initial. Les figures 2.31 en zone de forêt et 2.32 en zone de transition permettent de se rendre compte de la qualité, cependant plus qu'acceptable, de ces calages.

	Calage di	Calage si	Calage ci
Kolo81	0.0134	0.0152	0.0123
Kolo82	0.0043	0.0038	0.0038
Kolo84	0.0234	0.009	0.0253
Kolo85	0.0036	0.0031	0.0039
Kolo86	0.0082	0.0014	0.0037
Davo72	0.0117	0.012	0.0189
Davo74	0.0343	0.0325	0.203
Davo75	0.0581	0.0512	0.0614
Davo76	0.06	0.0156	0.0167
Davo77	0.0599	0.0599	0.058
Davo85	0.0438	0.0438	0.0438
Davo86	0.0584	0.0588	0.0594
Byeb84	0.0018	0.0021	0.0062
Byeb85	0.0331	0.0252	0.0252
Kand75	0.0002	0.0005	0.0003
Kand84	0.0002	0.0002	0.0002
Kand85	0.0289	0.0002	0.0238
Lobo71	0.0147	0.0151	0.0151
Lobo73	0.0007	0.0006	0.0006
Lobo74	0.0022	0.0021	0.0021

Tableau 2.17: Critère de Nash des calages di, si, et ci

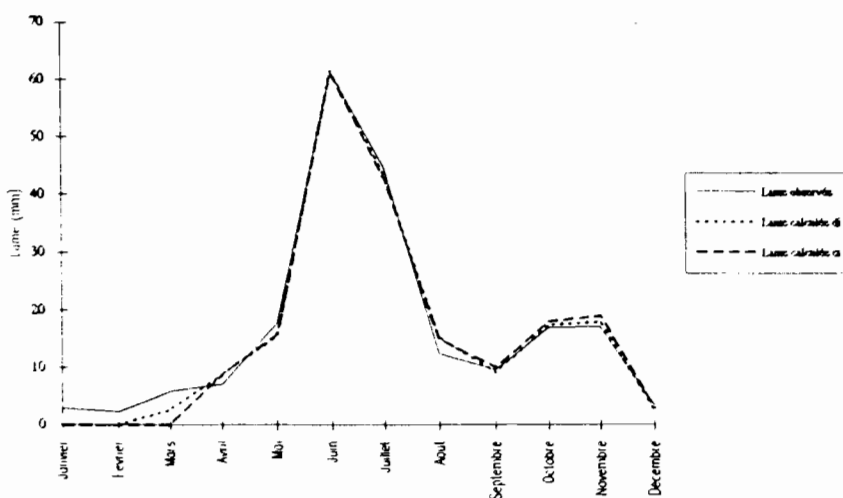


Figure 2.31: Davo à Dakpadou en 1972 (Calages di et ci)

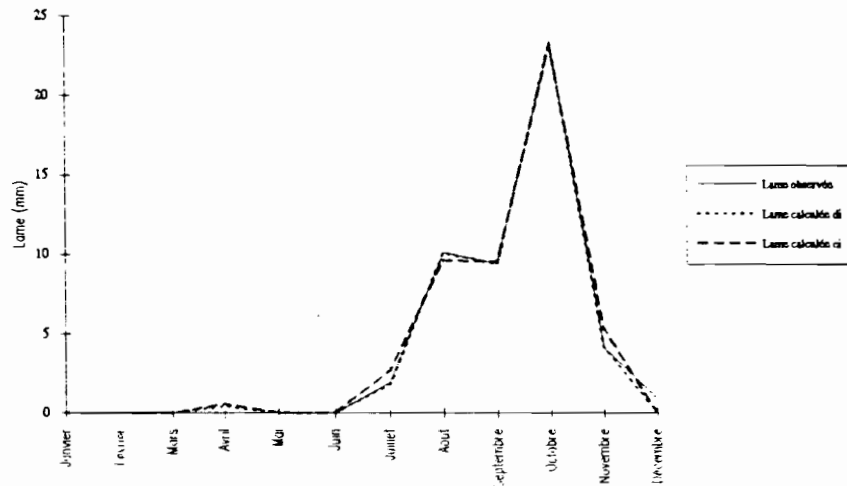


Figure 2.32: Baya à Yébouakro en 1984 (Calages di et ci)

Mis à part un cas particulier, il apparaît clairement que le fait de fixer les paramètres Seuil et CC n'a guère modifié les valeurs du critère de Nash.

Nous avons donc déjà pu diminuer le nombre de paramètres, en le réduisant de neuf à sept. Compte tenu des remarques que nous avons pu faire plus haut, c'est le gage de meilleures validations, à fortiori dans le cas de calages de l'algorithme issus de séries de courtes durées.

Nous allons maintenant tenter de réduire encore significativement le nombre de paramètres de ce modèle.

2.3.1.3. Paramètre DD

Le troisième paramètre testé est le paramètre DD. Nous avons choisi de le fixer à sa valeur médiane, du fait de l'écart important $|\text{DD moyen} - \text{DD médian}|$. La valeur moyenne accorderait, en effet, trop de poids aux quelques valeurs élevées obtenues lors de certains calages. Les valeurs retenues pour DD sont donc:

En zone de forêt	DD médian = 0.417
En zone de transition	DD médian = 1

Ce nouveau modèle à six paramètres (AA, BBa, BBb, BBc, BBd et BBe) sera appelé **modèle zi** par la suite.

L'optimisation de ses six paramètres a conduit aux résultats du tableau 2.18. Comparativement aux valeurs du critère de Nash obtenues avec les trois précédents modèles, celles de ce modèle zi sont généralement élevées, traduisant une dégradation importante de la qualité des calages. Les hydrogrammes des lames n'étant pas calés correctement, fixer le

paramètre DD s'avère impossible. Dans la suite de notre démarche, le paramètre DD restera donc "à optimiser".

	Calage di	Calage si	Calage ci	Calage zi
Kolo81	0.0134	0.0152	0.0123	0.0441
Kolo82	0.0043	0.0038	0.0038	0.0279
Kolo84	0.0234	0.009	0.0253	0.0276
Kolo85	0.0036	0.0031	0.0039	0.1159
Kolo86	0.0082	0.0014	0.0037	0.0024
Davo72	0.0117	0.012	0.0189	0.1282
Davo74	0.0343	0.0325	0.203	0.6715
Davo75	0.0581	0.0512	0.0614	0.2933
Davo76	0.06	0.0156	0.0167	0.0195
Davo77	0.0599	0.0599	0.058	0.1402
Davo85	0.0438	0.0438	0.0438	0.0459
Davo86	0.0584	0.0588	0.0594	0.0652
Byeb84	0.0018	0.0021	0.0062	0.0061
Byeb85	0.0331	0.0252	0.0252	0.0252
Kand75	0.0002	0.0005	0.0003	0.6979
Kand84	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Kand85	0.0289	0.0002	0.0238	0.0238
Lobo71	0.0147	0.0151	0.0151	0.0151
Lobo73	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006
Lobo74	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021

Tableau 2.18: Critère de Nash des calages di, si, ci, et zi

2.3.1.4. Paramètre AA

Bien que le paramètre AA présente une forte dispersion et paraisse assez sensible, nous avons tenté de le fixer. A priori, la distribution de AA étant dissymétrique positive (coefficient de dissymétrie de 2.2), il semble préférable de fixer AA à sa valeur médiane, la moyenne donnant trop de poids aux valeurs élevées. Cependant, des essais ont été réalisés en remplaçant AA par sa moyenne ou par sa médiane. Les stations-années testées sont des stations-années de zone de forêt, pour lesquelles les valeurs initiales de AA (obtenues lors du calage ci) sont différentes à la fois de AA moyen (0.065) et de AA médian (0.01).

Les résultats obtenus (Cf. tableau 2.19) confirment qu'il est préférable de fixer AA à sa valeur médiane.

	Nash di	Nash si	Nash ci	Nash (AA=moyenne)	Nash (AA=médiane)	Valeur initiale de AA
Kolo82	0.0043	0.0038	0.0038	0.0064	0.0163	0.09
Davo72	0.0117	0.0120	0.0189	0.0369	0.0194	0
Davo74	0.0343	0.0325	0.2030	0.4050	0.2277	0
Davo75	0.0581	0.0512	0.0614	0.2326	0.0677	0
Davo76	0.0600	0.0156	0.0167	0.0254	0.0392	0.1780

Tableau 2.19: Essais de calages réalisés en fixant AA à sa moyenne ou à sa médiane.

Les valeurs médianes de AA en zone de forêt et en zone de transition sont:

En zone de forêt AA médian = 0.01
 En zone de transition AA médian = 0.021

Le nouveau modèle avec Seuil, CC et AA constants sera appelé **modèle ai** par la suite.

L'optimisation s'effectue donc sur les six paramètres suivants: BBa, BBb, BBc, BBd, BBe et DD. Les résultats obtenus avec le modèle ai sont généralement de bonne qualité comme l'indique le tableau 2.20 des critères de Nash. Le paramètre AA semble donc pouvoir effectivement être fixé à sa valeur médiane.

	Calage di	Calage si	Calage ci	Calage ai
Kolo81	0.0134	0.0152	0.0123	0.0122
Kolo82	0.0043	0.0038	0.0038	0.0163
Kolo84	0.0234	0.009	0.0253	0.0267
Kolo85	0.0036	0.0031	0.0039	0.0042
Kolo86	0.0082	0.0014	0.0037	0.0128
Davo72	0.0117	0.0120	0.0189	0.0194
Davo74	0.0343	0.0325	0.2030	0.2277
Davo75	0.0581	0.0512	0.0614	0.0677
Davo76	0.0600	0.0156	0.0167	0.0392
Davo77	0.0599	0.0599	0.0580	0.0592
Davo85	0.0438	0.0438	0.0438	0.0439
Davo86	0.0584	0.0588	0.0594	0.0679
Byeb84	0.0018	0.0021	0.0062	0.0152
Byeb85	0.0331	0.0252	0.0252	0.0596
Kand75	0.0002	0.0005	0.0003	0.0655
Kand84	0.0002	0.0002	0.0002	0.0213
Kand85	0.0289	0.0002	0.0238	0.0241
Lobo71	0.0147	0.0151	0.0151	0.0151
Lobo73	0.0007	0.0006	0.0006	0.0041
Lobo74	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021

Tableau 2.20: Critère de Nash des calages di, si, ci, et ai

Les mêmes hydrogrammes que précédemment, à savoir le Davo à Dapkadou en 1972, en zone de forêt, et la Baya à Yébouakro en 1984, en zone de transition, ont été tracés (figures 2.33 et 2.34). Ils montrent une faible dégradation de la qualité des calages par rapport au modèle initial.

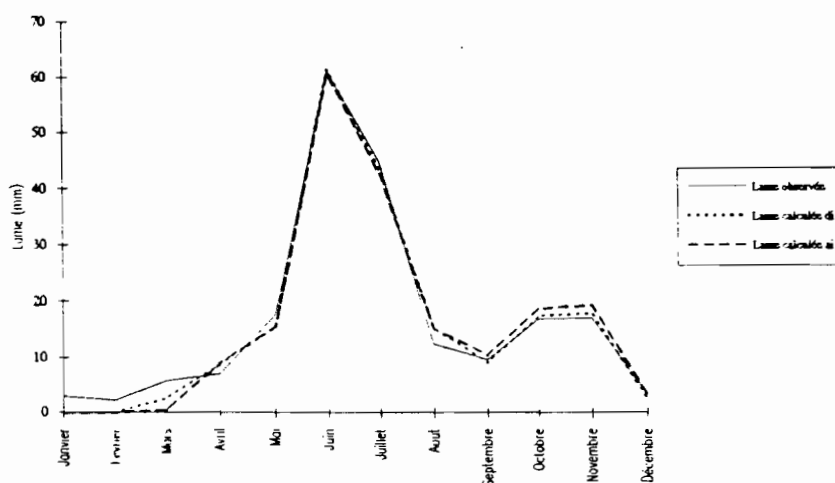


Figure 2.33: Davo à Dakpadou en 1972 (Calages di et ai)

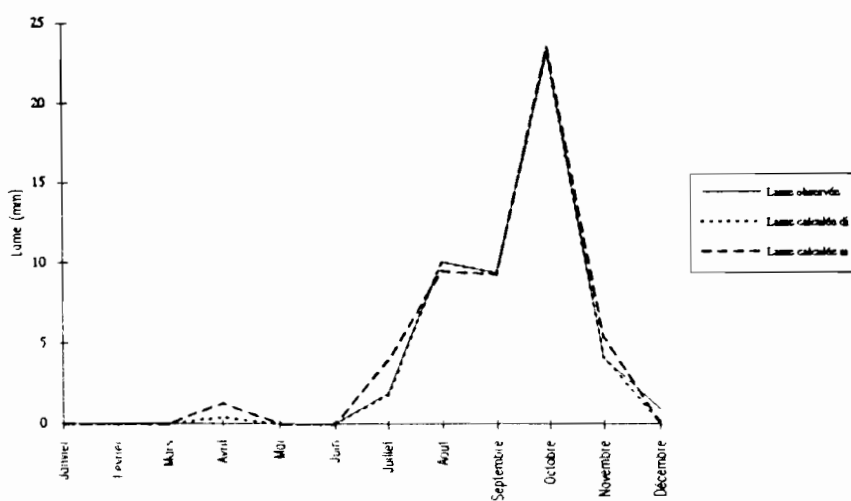


Figure 2.34: Baya à Yébouakro en 1984 (Calages di et ai)

Suite à cette première restructuration, nous sommes en présence d'un algorithme à six paramètres dont les performances sont intéressantes sur les calages station-année par station-année. Nous allons maintenant tester les capacités d'adaptation et la robustesse de l'algorithme en procédant à des calages sur des séries chronologiques de plusieurs années.

2.3.1.5. Comparaison des calages sur plusieurs années du modèle initial di et du modèle modifié ai

Plusieurs essais de calages et validations sur des séries chronologiques de plusieurs années ont été effectués avec le modèle restructuré ai. Les résultats de ces calages sont comparés à ceux déjà réalisés avec le modèle initial di (Cf. tableaux 2.21 et 2.22).

Sur ces tableaux, on remarque que les valeurs du critère de Nash issues des calages du modèle ai sont, en général, légèrement plus fortes que celles du modèle di. Cette perte de qualité du modèle ai est néanmoins faible, et il y a même deux cas de gain. par contre, la qualité des validations est à l'avantage du modèle modifié. Dans les deux cas, cependant, les valeurs du critère de Nash restent assez élevées.

Calage	Validation	Calage di	Validation di	Calage ai	Validation ai
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977–1979	1980	0.1839	0.7090	0.1253	0.4137
Ko à Man (207 km ²) 1985–1986	1971–1973	0.0765	0.3001	0.1047	0.2846
	1981		0.9400		0.7442
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984–1986	1981–1983	0.1124	0.5640	0.1581	0.4524
	1981–1982		0.6136		0.4799
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1984–1986	1977–1979	0.2399	0.6303	0.2850	0.6242
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984–1986	1982–1983	0.0381	0.1440	0.0434	0.1638

Tableau 2.21: Critère de Nash des calages et validations des modèles di et ai en zone de forêt

Calage	Validation	Calage di	Validation di	Calage ai	Validation ai
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965–1967	1968	0.1647	0.4966	0.1622	0.5984
	1971–1973		0.8375		0.8930
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971–1973	1968	0.0853	0.2429	0.0891	0.2707
	1965–1967		0.3154		0.3297

Tableau 2.22: Critère de Nash des calages et validations des modèles di et ai en zone de transition

Quelques représentations graphiques comme celles des hydrogrammes du N'Zo à Kahin (figures 2.35 et 2.36) montrent une tendance à un décalage dans le temps de la montée de la crue.

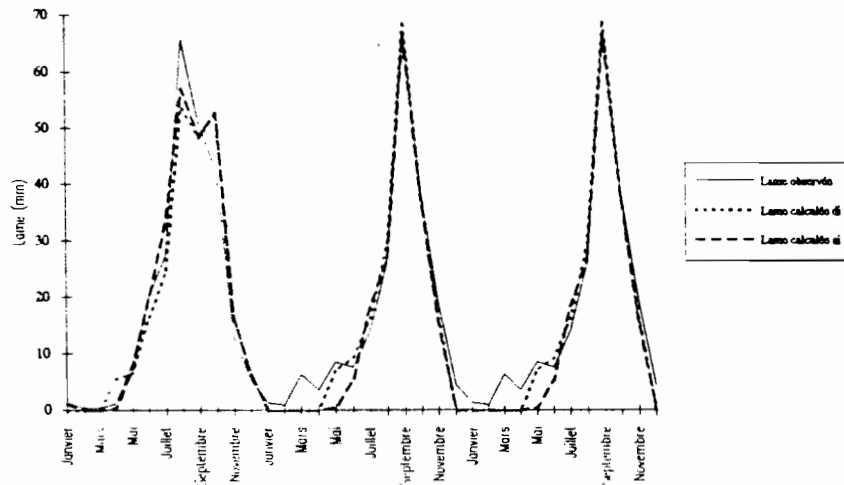


Figure 2.35: N'Zo à Kahin de 1984 à 1986 (Calages di et ai)

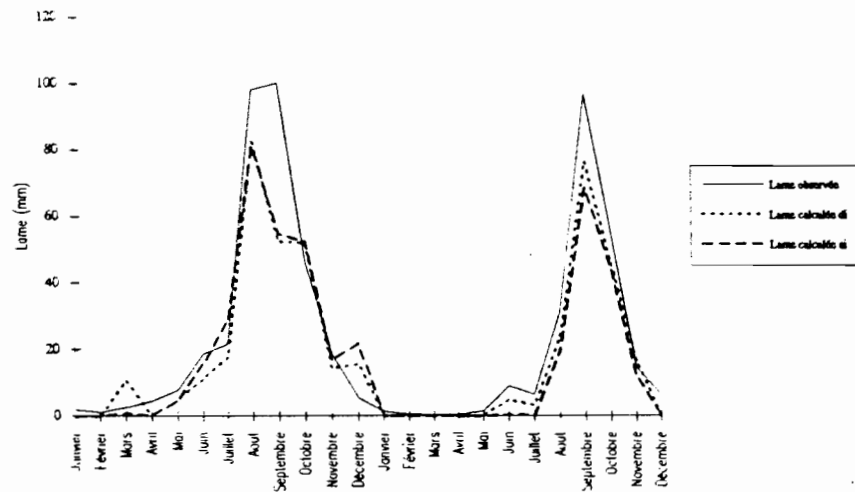


Figure 2.36: N'Zo à Kahin de 1982 à 1983
(Validation des calages di et ai réalisés de 1984 à 1986)

2.3.2. Etude des paramètres BBi

L'étude des différents paramètres a montré que les paramètres BBi (BBa, BBb, BBc, BBd, et BBc) sont très sensibles, donc difficiles, voire impossibles, à fixer. Rappelons que ces paramètres marquent les contributions respectives des différents mois pris en compte dans le calcul de l'écoulement retardé. Nous avons cherché à établir une relation entre eux, qui permettrait malgré tout de réduire le nombre de paramètres du modèle.

Le modèle considéré dans cette seconde phase de restructuration est le modèle ai, modèle à six paramètres (BBa, BBb, BBc, BBd, BBc et DD). Au cours des différentes étapes

qui ont permis d'arriver au modèle ai, nous avons noté les valeurs prises par les paramètres BBi (Cf. annexe IV): Il semble que, d'un modèle à l'autre (di à si, si à ci, etc...) les valeurs des BBi soient assez stables. Des écarts notables, sont toutefois enregistrés lorsque les valeurs fixées (par exemple, la valeur de Seuil fixée au cours de l'élaboration du modèle si) sont très éloignées des valeurs observées par calage (Cf. annexe IV). On peut également remarquer que lorsque la valeur fixée de AA est inférieure à celle qui avait été obtenue après calage, un phénomène de compensation se produit qui entraîne une augmentation de BBa. Cette situation s'explique par le fait que AA et BBa interviennent tous deux directement sur les précipitations du mois en cours.

Les paramètres BBi caractérisent les prélèvements effectués sur les précipitations du mois en cours (BBa) et des quatre mois précédents (BBb, BBc, BBd et BBe). Au fur et à mesure que le temps passe, un même mois se verra appliqué les cinq coefficients successivement. Dans ces conditions, il est admissible de supposer que la contribution effective du cinquième mois, c'est à dire au bout de quatre pas de temps, soit plus faible que celle du premier mois. Dans un premier temps, nous avons donc introduit une simple contrainte de décroissance en ce qui concerne les BBi. Par la suite différents modèles de décroissance (linéaire, exponentielle, etc...) ont été testés.

2.3.2.1. Décroissance des paramètres BBi

Le modèle retenu au départ est le modèle ai, mais avec une contrainte supplémentaire pour le calage, à savoir la décroissance des paramètres BBi.

Dans la présentation du modèle initial, nous avons estimé que cinq mois étaient suffisants pour évaluer l'écoulement retardé du fait de la particularité des zones étudiées, à savoir l'existence d'une saison sèche longue et prononcée. Avec la contrainte de décroissance simple des paramètres BBi nous avons tenté de vérifier si la prise en compte des quatre mois d'antériorité étaient réellement nécessaire. Quatre modèles ont donc été mis en oeuvre dont les contraintes sont les suivantes:

Modèle B0.0 : (modèle à six paramètres : BBa, BBb, BBc, BBd, BBe, et DD)

$$BBe \leq BBd \leq BBc \leq BBb \leq BBa$$

Modèle B0.1 : (modèle à cinq paramètres : BBa, BBb, BBc, BBd, et DD)

$$BBc \leq BBd \leq BBb \leq BBa$$

$$BBe = 0$$

Modèle B0.2 : (modèle à quatre paramètres : BBa, BBb, BBc, et DD)

$$BBc \leq BBd \leq BBb \leq BBa$$

$$BB_e = 0$$

$$BB_d = 0$$

Modèle B0.3 : (modèle à trois paramètres : BBa, BBb, et DD)

$$BB_e \leq BB_d \leq BB_c \leq BB_b \leq BB_a$$

$$BB_e = 0$$

$$BB_d = 0$$

$$BB_c = 0$$

Chaque type de modèle a été calé sur les 20 stations-années déjà retenues dans le cadre de l'étude de sensibilité des paramètres. Les résultats des différents calages effectués sont consignés dans le tableau 2.23.

	Calage ai	Calage B0.0	Calage B0.1	Calage B0.2	Calage B0.3
Kolo81	0.0122	0.0633	0.0633	0.075	0.0757
Kolo82	0.0163	0.0038	0.0036	0.0119	0.0256
Kolo84	0.0267	0.0285	0.0285	0.0295	0.0445
Kolo85	0.0042	0.0245	0.0247	0.0247	0.1166
Kolo86	0.0128	0.014	0.0193	0.0195	0.0845
Davo72	0.0194	0.0347	0.0344	0.1602	0.4051
Davo74	0.2277	0.2776	0.2599	0.5745	1.037
Davo75	0.0677	0.0872	0.0684	0.0689	0.0989
Davo76	0.0392	0.0392	0.0392	0.0392	0.0392
Davo77	0.0593	0.0962	0.0719	0.0719	0.2042
Davo85	0.0439	0.0577	0.0549	0.0974	0.0998
Davo86	0.0679	0.0944	0.1345	0.1521	0.3819
Byeb84	0.0152	0.027	0.0275	0.0833	0.2437
Byeb85	0.0596	0.0596	0.0596	0.0596	0.0709
Kand75	0.0655	0.0291	0.0291	0.165	0.389
Kand84	0.0213	0.0344	0.032	0.0852	0.3771
Kand85	0.0241	0.0353	0.0353	0.0353	0.2906
Lobo71	0.0151	0.033	0.033	0.0332	0.0344
Lobo73	0.0041	0.07	0.0522	0.0514	0.1405
Lobo74	0.0022	0.1573	0.2211	0.2141	0.2398

Tableau 2.23: Critère de Nash des calages des modèles ai, B0.0, B0.1, B0.2, et B0.3

Les calages réalisés en imposant la décroissance des paramètres BB_i , sont le plus souvent de bonne qualité. Du modèle B0.0 au modèle B0.1 les résultats restent sensiblement les mêmes. L'élimination du quatrième mois d'antériorité, à savoir $BB_e = 0$, peut donc être légitimement envisagée. La participation à l'écoulement retardé ne comprendrait alors que quatre mois, dont le mois en cours. Cependant, ces différents modèles présentent l'inconvénient qu'à l'issue du calage, plusieurs des paramètres BB_i aient la même valeur (par

exemple, $BBa = BBb = BBc$) (Cf. annexe IV). Ce qui reviendrait à supposer que les prélèvements successifs effectués sur les volumes précipités seraient identiques plusieurs mois d'affilé, ce qui est difficilement concevable. Il paraît donc plus logique d'imposer aux paramètres BBi un modèle de décroissance stricte. Plusieurs formulations différentes ont été testées.

2.3.2.2. Formulations à décroissance linéaire

Trois formulations de décroissance linéaire stricte des paramètres BBi ont été testées qui correspondent à autant de modèles:

Modèle B1: (modèle à trois paramètres : BBa , DD , et α)

Formulation retenue pour les BBi :

$$BBi = \alpha x_i + BBa$$

$$\alpha \leq 0$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Modèle B2: (modèle à deux paramètres : BBa et DD)

Formulation retenue pour les BBi :

$$BBi = BBa - \frac{BBa}{4} x_i$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Ici on a $BBc = 0$

Modèle B3 : (modèle à deux paramètres : BBa et DD)

Formulation retenue pour les BBi :

$$BBi = BBa - \frac{BBa}{3} x_i$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Ici on a $BBd = 0$ et $BBc = 0$

Le tableau 2.24 présente les valeurs du critère de Nash des différents calages effectués.

	Calage ai	Calage B1	Calage B2	Calage B3
Kolo81	0.0122	0.1229	0.215	0.1051
Kolo82	0.0163	0.0759	0.0956	0.0726
Kolo84	0.0267	0.0474	0.0474	0.031
Kolo85	0.0042	0.0364	0.0384	0.0639
Kolo86	0.0128	0.0295	0.0384	0.075
Davo72	0.0194	0.1273	0.1847	0.3572
Davo74	0.2277	0.4317	0.5655	0.8342
Davo75	0.0677	0.2404	0.1848	0.1026
Davo76	0.0392	0.1512	0.1504	0.0354
Davo77	0.0593	0.1423	0.1596	0.1499
Davo85	0.0439	0.1102	0.1102	0.1656
Davo86	0.0679	0.1783	0.2445	0.373
Byeb84	0.0152	0.0302	0.0318	0.1054
Byeb85	0.0596	0.071	0.071	0.0643
Kand75	0.0655	0.0761	0.0762	0.2218
Kand84	0.0213	0.0665	0.0666	0.2185
Kand85	0.0241	0.0896	0.0906	0.1887
Lobo71	0.0151	0.1389	0.1389	0.0915
Lobo73	0.0041	0.0811	0.0811	0.0794
Lobo74	0.0022	0.209	0.2974	0.3324

Tableau 2.24: Critère de Nash des calages di, B1, B2, et B3

Le tableau ci-dessus indique que l'introduction de la contrainte de décroissance linéaire des paramètres (modèle de type B¹) engendre une dégradation de certains calages (en particulier au niveau du Davo à Dakpadou). Cependant, le critère de Nash reste en général de qualité acceptable (< 0.2). Le modèle type B2, qui présente la contrainte supplémentaire "BB_e=0", ne présente pas de différence très sensible avec B1, mais il permet de n'optimiser que deux paramètres. Quant au modèle de type B3, avec la contrainte supplémentaire "BB_d=0", si le nombre de paramètres à optimiser n'est que de deux comme dans le cas précédent, on note, qu'à l'exception de quelques cas, ce modèle entraîne une nette dégradation au niveau du calage.

Le modèle qui semble donc donner le meilleur rapport "complexité/qualité" parmi les trois considérés est le modèle B2. Il se cale relativement bien station-année par station-année et ne comporte que deux paramètres de calage. Pour tester la robustesse de cet algorithme, nous avons effectué des calages et des validations sur des séries de plusieurs années. Les résultats obtenus sont comparés à ceux du modèle ai (six paramètres) dans les tableaux 2.25 et 2.26.

Calage	Validation	Calage ai	Validation ai	Calage B2	Validation B2
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977–1979	1980	0.1253	0.4137	0.2041	0.3500
Ko à Man (207 km ²) 1985–1986	1971–1973 1981	0.1047	0.2846 0.7442	0.1382	0.3151 0.7605
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984–1986	1981–1983 1981–1982	0.1581	0.4524 0.4799	0.1712	0.2897 0.3103
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1984–1986	1977–1979	0.2850	0.6242	0.3244	0.7532
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984–1986	1982–1983	0.0434	0.1638	0.0654	0.1331

Tableau 2.25: Critère de Nash des calages et validations du modèle B2 en zone de forêt

Calage	Validation	Calage ai	Validation ai	Calage B2	Validation B2
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965–1967	1968 1971–1973	0.1622	0.5984 0.8930	0.2506	0.0636 0.3047
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971–1973	1968 1965–1967	0.0891	0.2707 0.3297	0.1838	0.2266 0.3228

Tableau 2.26: Critère de Nash des calages et validations du modèle B2 en zone de transition

L'examen de ces tableaux révèle que le modèle B2 qui ne comporte que deux paramètres de calage (BBa et DD) permet d'obtenir en validation des résultats qui sont souvent de meilleure qualité que ceux du modèle à six paramètres, traduisant une plus grande robustesse de cet algorithme restructuré et, justifiant, a posteriori, les choix effectués jusque là.

2.3.2.3. Formulation à décroissance exponentielle

Deux formulations de décroissance exponentielle des paramètres BBi ont été testées qui correspondent à autant de modèles.

Modèle B5 : (modèle à trois paramètres : BBa, DD et α)

Formulation retenue pour les BBi:

$$BBi = BBa * \exp(-\alpha x_i)$$

$$\alpha \geq 0$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Modèle B6 : (modèle à trois paramètres : BBa, DD et α)

Formulation retenue pour les BBi:

$$BBi = BBa * \exp(-\alpha x_i)$$

$$\alpha \geq 0$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Ici on impose, en plus: BBe = 0 (il n'y a que quatre mois qui participent à l'écoulement)

Une représentation graphique des courbes de décroissance de ces deux modèles est illustrée par la figure 2.37.

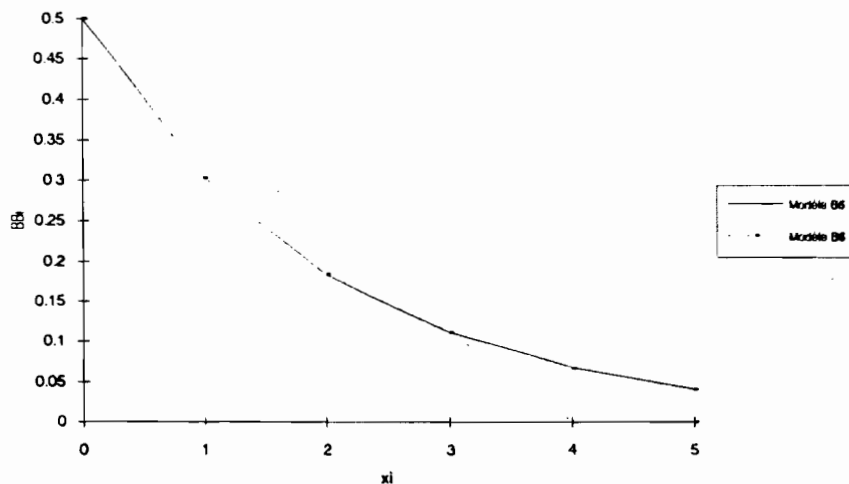


Figure 2.37: Décroissance exponentielle des BBi (exemple avec $\alpha=0.5$ et $BBa=0.5$)

Les résultats de ces deux calages sur les 20 stations-années d'essais (Cf. tableau 2.27) sont comparés à ceux des modèles ai et B2.

Les valeurs du critère de Nash du modèle B6 sont dans l'ensemble plus faibles que celles du modèle B5. On note cependant que les résultats en calage du modèle B6 sont moins bons que ceux du modèle ai, mais comparables aux résultats enregistrés par le modèle B2.

	Calage ai	Calage B2	Calage B5	Calage B6
Kolo81	0.0122	0.215	0.0701	0.0742
Kolo82	0.0163	0.0956	0.0731	0.0708
Kolo84	0.0267	0.0474	0.0311	0.0305
Kolo85	0.0042	0.0384	0.0356	0.0379
Kolo86	0.0128	0.0384	0.0218	0.0345
Davo72	0.0194	0.1847	0.1825	0.1727
Davo74	0.2277	0.5655	0.448	0.2689
Davo75	0.0677	0.1848	0.1825	0.1727
Davo76	0.0392	0.1504	0.2816	0.2816
Davo77	0.0593	0.1596	0.1574	0.1682
Davo85	0.0439	0.1102	0.4894	0.1067
Davo86	0.0679	0.2445	0.2164	0.1577
Byeb84	0.0152	0.0318	0.0269	0.0397
Byeb85	0.0596	0.071	0.0601	0.0653
Kand75	0.0655	0.0762	0.1819	0.1733
Kand84	0.0213	0.0666	0.1128	0.0558
Kand85	0.0241	0.0906	0.123	0.1
Lobo71	0.0151	0.1389	0.1267	0.1213
Lobo73	0.0041	0.0811	0.0719	0.0815
Lobo74	0.0022	0.2974	0.1981	0.2947

Tableau 2.27: Critère de Nash des calages des modèles ai, B2, B5, et B6

Les modèles B2 et B6 donnant des résultats comparables au niveau des calages station-année par station-année, il est intéressant d'étudier le comportement de ces deux modèles en calages et validations sur des séries chronologiques de plusieurs années. Les tableaux 2.28 et 2.29 rendent bien compte de la situation.

Calage	Validation	Calage B2	Validation B2	Calage B6	Validation B6
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977-1979	1980	0.2041	0.3500	0.1605	0.4301
Ko à Man (207 km ²) 1985-1986	1971-1973	0.1382	0.3151	0.1281	0.2137
	1981		0.7605		0.6637
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984-1986	1981-1983	0.1712	0.2897	0.1762	0.2948
	1981-1982		0.3103		0.3244
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1984-1986	1977-1979	0.3244	0.7532	0.337	0.5860
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984-1986	1982-1983	0.0654	0.1331	0.0554	0.1327

Tableau 2.28: Critère de Nash des calages et validations des modèles B2 et B6 en zone de forêt

Calage	Validation	Calage B2	Validation B2	Calage B6	Validation B6
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965–1967	1968	0.2506	0.0636	0.2294	0.0927
	1971–1973		0.3047		0.2773
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971–1973	1968	0.1838	0.2266	0.2259	0.2356
	1965–1967		0.3228		0.3247

Tableau 2.29: Critère de Nash des calages et validations des modèles B2 et B6 en zone de transition

Comme les calages station–année par station–année, les essais sur plusieurs années donnent sensiblement les mêmes résultats. Les résultats obtenus à l'aide du modèle B6 sont d'une qualité comparable à ceux du modèle B2.

2.3.2.4. Formulations à décroissance non linéaire

Avec la formulation à décroissance exponentielle qui est une fonction asymptotique à l'axe des abscisses, la valeur zéro n'est jamais atteinte. Or, il serait plus satisfaisant que la courbe s'annule à un moment donné afin que l'écoulement retardé provenant des mois précédents soit théoriquement nul après le dernier mois envisagé d'antériorité, respectant ainsi l'hypothèse initiale.

Les formulations à décroissance non linéaire que nous avons testées et qui recourent à l'axe des abscisses sont les suivantes:

Modèle B7 : (modèle à deux paramètres : α et DD)

Formulation retenue pour les BBi:

$$BBi = \alpha^{1/6} - \alpha^{1/(1+x_i)}$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Modèle B8 : (modèle à deux paramètres : α et DD)

Formulation retenue pour les BBi:

$$BBi = \alpha^{1/5} - \alpha^{1/(1+x_i)}$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

$$x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$$

Les modèles B7 et B8 ont les mêmes paramètres à optimiser: α et DD. Leur différence réside dans le fait que le modèle B8 ne considère que quatre mois d'antériorité (BBc = 0)

contre cinq pour B7. La figure 2.38 indique l'allure des courbes de décroissance des deux modèles.

Les résultats des calages des deux modèles sont comparés à ceux du modèle ai dans le tableau 2.30.

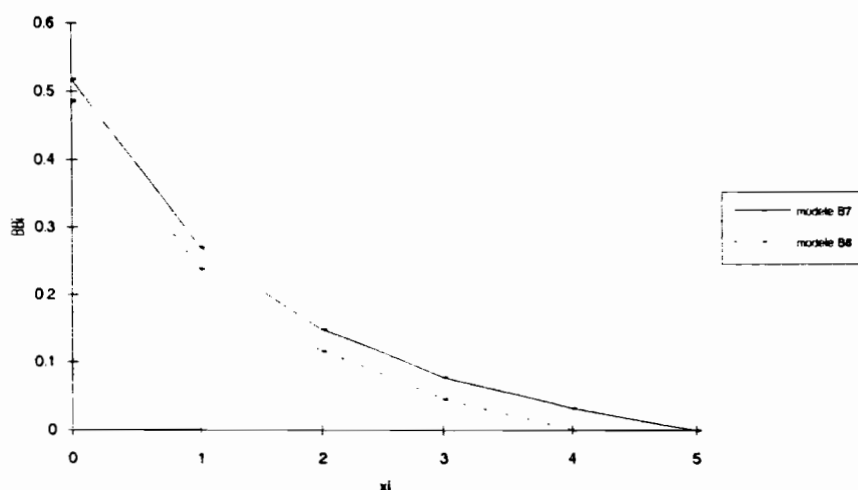


Figure 2.38: Décroissance des BBi non linéaire (exemple avec $\alpha=0.3$)

Le modèle B7 donne des résultats légèrement meilleurs que le modèle B8 mais de moins bonne qualité que les modèles B2 et ai. Ce modèle de décroissance non linéaire ne semble donc pas adapté à notre situation.

	Calage ai	Calage B2	Calage B7	Calage B8
Kolo81	0.0122	0.215	0.0695	0.0751
Kolo82	0.0163	0.0956	0.0892	0.1053
Kolo84	0.0267	0.0474	0.035	0.0437
Kolo85	0.0042	0.0384	0.07	0.0931
Kolo86	0.0128	0.0384	0.0959	0.1146
Davo72	0.0194	0.1847	0.5512	0.603
Davo74	0.2277	0.5655	0.8608	0.94
Davo75	0.0677	0.1848	0.2156	0.2275
Davo76	0.0392	0.1504	0.0618	0.0706
Davo77	0.0593	0.1596	0.3128	0.3448
Davo85	0.0439	0.1102	0.1987	0.2339
Davo86	0.0679	0.2445	0.6237	0.6231
Bycb84	0.0152	0.0318	0.1756	0.246
Bycb85	0.0596	0.071	0.088	0.1014
Kand75	0.0655	0.0762	0.1987	0.1771
Kand84	0.0213	0.0666	0.2039	0.2234
Kand85	0.0241	0.0906	0.2122	0.2608
Lobo71	0.0151	0.1389	0.1566	0.1599
Lobo73	0.0041	0.0811	0.1564	0.1886
Lobo74	0.0022	0.2974	0.4847	0.5127

Tableau 2.30: Critère de Nash des calages des modèles ai, B2, B7, et B8

Les différentes formulations testées pour la décroissance des paramètres BBi soit en calages station–année par station–année, soit en calages sur des séries chronologiques, permettent de dégager plusieurs enseignements:

- les formulations linéaires et exponentielles conduisent à des résultats de qualité comparable,
- le quatrième mois d'antériorité pris en compte dans le processus de calcul de l'écoulement retardé ne semble pas réellement nécessaire. Il est donc possible de fixer le paramètre BBe à une valeur nulle, $BBe = 0$,
- les résultats obtenus en validation sur des séries chronologiques de plusieurs années sont généralement à l'avantage des modèles à nombre de paramètres réduit, attestant ainsi d'un gain en robustesse dû à une diminution du nombre de paramètres.

Parmi les différents formulations retenues, nous avons décidé de conserver celle correspondant au modèle B2, à savoir la décroissance linéaire des BBi avec $BBe = 0$. Simplicité de l'expression et qualité des résultats ont guidé ce choix.

Rappelons que les deux paramètres à optimiser dans ce cas sont BBa et DD. La décroissance des BBi s'exprimant:

$$BBi = BBa - \frac{BBa}{4} x_i,$$

avec $x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$

2.3.3. Autres éléments de restructuration envisagés

Ces restructurations supplémentaires concernent d'une part les paramètres DD et AA et d'autre part le seuil variable Svi.

2.3.3.1. Intervalle de variation de DD et optimisation de AA

Dans tous les calages effectués jusqu'alors, la valeur du paramètre DD variait entre 0 et 1 ($0 \leq DD \leq 1$). Il est impératif que DD soit supérieur à zéro, puisque DD représente un coefficient du seuil variable. Par contre, la borne supérieure ($DD \leq 1$) a été fixée a priori. Or, nous avons remarqué que le paramètre DD se calait fréquemment sur sa borne supérieure. Pour remédier à cela nous avons refait tous les calages en autorisant le calage de DD dans l'intervalle borné: $0 \leq DD \leq 3$.

Le modèle adopté (modèle B2) ne comporte finalement que deux paramètres (BBa et DD). On peut donc raisonnablement s'autoriser l'optimisation d'un troisième paramètre en l'occurrence le paramètre AA qui est un taux d'écoulement direct, sans risque de surparamétrisation. Au cours de l'étude des paramètres, nous avons mentionné que AA présentait une forte dispersion. Son optimisation se justifie donc aisément.

2.3.3.2. Variation du seuil selon une courbe non exactement sinusoïdale en zone de transition

En première approximation, une sinusoïde a été choisie pour exprimer les variations du seuil variable Sv. En zone de forêt, le seuil est supposé maximum en mars juste avant le démarrage de l'année hydrologique. On considère que la pluie est suffisante, par la suite, pour entraîner la saturation du sol à la fin de la saison des pluies. En zone de transition, le seuil avait été choisi maximum en avril et minimum en octobre. Cependant, dans cette zone, l'observation de la pluviométrie indique plutôt que la saturation maximale du sol devrait se produire plutôt en septembre. Or, une variation sinusoïdale impose un seuil minimum six mois après le seuil maximum, soit en octobre.

Pour satisfaire au mieux cette variation du seuil en zone de transition, c'est à dire pour atteindre un maximum égal à 1 en avril et un minimum égal à -1 en septembre, nous avons construit un modèle de variation qui est la combinaison d'une équation polynomiale et d'un tronçon de droite.

Le polynôme du cinquième degré retenu devait satisfaire les conditions suivantes :

$$f(\text{Avril}) = f(x=4) = 1$$

$$f(\text{Septembre}) = f(x=9) = -1$$

$$f(x=4) = 0$$

$$f(x=9) = 0$$

$$f(x=1) = 0$$

$$f(x=13) = 0$$

x représente le rang du mois considéré (1 = janvier). Pour éviter l'existence de valeurs supérieures à 1 ou inférieures à -1, et pour permettre la répétition de la séquence avec l'amplitude souhaitée, le polynôme a été remplacé par un tronçon de droite entre les valeurs 10 et 15 (ce qui correspond à la période d'octobre à mars de l'année suivante). Cette construction hybride (Cf. figure 2.39) permet d'introduire la dissymétrie souhaitée dans la courbe de variation du seuil.

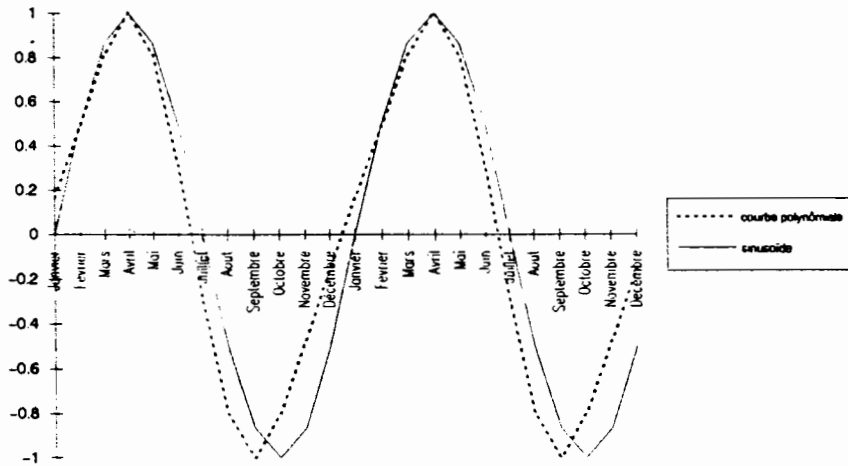


Figure 2.39: Variations du seuil en zone de transition selon la sinusoïde initiale et selon la courbe polynomiale finalement retenue

2.3.3.3. Conclusion

Le modèle initial dérivé de l'algorithme de SNYDER était un modèle à neuf paramètres: Seuil, AA, BBa, BBb, BBc, BBd, BBe, CC, et DD. Après avoir calé ce modèle sur l'ensemble des stations-années disponibles en zones de forêt et de transition, l'étude des paramètres a permis de fixer à des valeurs constantes certains d'entre eux: Seuil, CC, et AA. Le modèle ainsi obtenu (modèle ai) ne comportait plus alors que six paramètres. Cependant, les calages obtenus à l'aide de ce modèle se sont révélés très circonstanciels et donc difficilement transposables. Pour que ce modèle soit intéressant, il lui faut gagner en robustesse, ce que nous avons cherché à faire en le restructurant encore une fois.

Afin de réduire le nombre de degrés de liberté du modèle, nous avons donc imposé une loi de variation des BBi. On a tout d'abord supposé les BBi décroissants. Mais cette condition s'est révélée insuffisante. Plusieurs types de lois de variations analytiques ont été testés. C'est finalement le modèle B2, utilisant une décroissance linéaire des paramètres BBi, qui a été adopté. Le modèle B2 ne possède que deux paramètres à caler: BBa et DD. Il a un niveau d'adéquation du même ordre que celui faisant appel à une décroissance exponentielle pour les paramètres BBi. Mais il est plus satisfaisant d'un point de vue physique car il permet d'annuler effectivement le paramètre BBe, ce qui correspond à une réduction de l'antériorité dont on a vu qu'elle pouvait être envisagée.

Certains aménagements ont ensuite été portés à cet algorithme restructuré. Ils concernent d'abord la borne supérieure de l'intervalle de variation du paramètre DD qui a été portée à trois.

En outre, le modèle obtenu ne possédant que deux paramètres (BBa et DD), nous nous sommes autorisés l'optimisation du paramètre AA dont l'étude avait montré une assez forte dispersion.

De même, afin d'être plus proche de la réalité pluviométrique en zone de transition, la variation sinusoïdale du seuil a été remplacée par la combinaison d'une équation polynômiale et d'un tronçon de droite.

Le modèle définitif retenu à l'issue de ces différents essais est donc un modèle à trois paramètres: AA, BBa et DD. Ce modèle sera appelé **modèle AB2**.

2.3.4. Etude du modèle définitif

2.3.4.1. Présentation du modèle définitif AB2

Le modèle AB2 est un modèle à trois paramètres: AA, BBa, et DD. Son équation générale est: $Vq = Vqa + Vqd$

Le volume précipité (Vp) se transforme en écoulement immédiat (Vqa) d'une part, et en écoulement retardé (Vqd) d'autre part.

. Calcul de Vqa :

$Vqa = AA * (Vpi - Svi)$, avec AA: paramètre.

. Calcul de Vqd :

$$Vqd = \sum_{i=1}^5 B Bi \left[Vpi - (CC + DD * Svi) \right] \quad \text{où } B Bi = BBa \left(1 - \frac{1}{4} x_i \right)$$

avec $x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$, DD et BBa: paramètres.

2.3.4.2. Calages du modèle définitif

Le modèle AB2 a été calé, année par année, sur la totalité des 94 stations-années disponibles en zones de forêt et de transition. La qualité des calages obtenus avec le modèle définitif semble satisfaisante à en juger par les valeurs du critère de Nash obtenues après optimisation (Cf. tableau 2.31). En effet, on note que 43% des valeurs du critère de Nash sont inférieures à 0.10 et 72% à 0.20 en zone de forêt. En zone de transition, on a 50% des valeurs de Nash inférieures à 0.10, et 71% à 0.20. En moyenne, les valeurs du critère de Nash calculées sur 60 stations-années en zone de forêt et 34 en zone de transition sont les suivantes:

En zone de forêt: Nash moyen = 0.199 ± 0.181

En zone de transition: Nash moyen = 0.214 ± 0.293

FORET				TRANSITION	
Station-année	Calage AB2	Station-année	Calage AB2	Station-année	Calage AB2
kolo83	0.0038	davo79	0.2584	lobo73	0.0025
zoka83	0.0091	agne83	0.2683	neng84	0.013
kolo84	0.0163	davo70	0.2685	kand84	0.014
koma81	0.0217	nero83	0.2931	lobo71	0.0145
kolo85	0.0233	koma72	0.3162	bour85	0.0242
kavi78	0.0248	kavi80	0.3204	bere86	0.0295
zoka85	0.0264	davo73	0.3239	byeb85	0.0338
davo83	0.0323	kavi66	0.3257	lobo86	0.0365
koma74	0.0338	taya80	0.3372	kand85	0.044
zoka84	0.0338	neka82	0.3388	lobo66	0.0471
koma71	0.0345	msan84	0.3875	kanb84	0.0545
koma85	0.0363	davo78	0.3908	lobo68	0.0615
kolo86	0.0373	kavi77	0.4395	lobo65	0.0641
koma86	0.0385	nero82	0.4707	neng85	0.0739
nzo85	0.0388	neka86	0.486	byeb84	0.0827
nzo86	0.0489	neka80	0.4922	lobo74	0.0884
davo76	0.05	agne80	0.54	kand86	0.0891
koma73	0.0503	davo74	0.5505	lobo67	0.1038
kolo81	0.0542	taol86	0.5707	kanb85	0.1088
zoka86	0.0576	neka81	0.6049	kand85	0.1276
koma77	0.0584	davo71	0.674	kand75	0.1431
kolo82	0.0721			bada84	0.1843
zoka82	0.075			lobo72	0.1914
gdia85	0.0818			byeb83	0.2058
agne84	0.0875			bada85	0.2763
davo82	0.0897			lobo82	0.35
davo85	0.1057			lobo81	0.3866
ggag86	0.113			lobo83	0.3973
gdia86	0.1157			kanb86	0.4105
davo77	0.1328			fon86	0.4674
kavi79	0.1463			soun86	0.6593
taya81	0.1549			kand82	1.1103
koma78	0.1567			byeb82	1.262
davo75	0.1718				
davo72	0.1725				
kavi85	0.195				
kavi67	0.2247				
davo86	0.2365				
davo84	0.2473				

Tableau 2.31: Critère de Nash des calages AB2 station-année par station-année

Après l'optimisation année par année, nous avons procédé à des calages et validations sur des séries de plusieurs années consécutives pour les bassins versants dont les données étaient disponibles. Les valeurs du critère de Nash correspondantes sont consignées dans les tableaux 2.32 et 2.33.

Calage	Validation	Calage di	Validation di	Calage AB2	Validation AB2
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977–1979	1980	0.1839	0.7090	0.1900	0.4101
Ko à Man (207 km ²) 1971–1973	1981	0.1090	0.2775	0.1412	0.2273
	1985–1986		0.1991		0.1946
Ko à Man (207 km ²) 1985–1986	1971–1973	0.0765	0.3001	0.1295	0.2390
	1981		0.9400		0.6659
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984–1986	1981–1983	0.1124	0.5640	0.1721	0.3229
	1981–1982		0.6136		0.3442
Néka à Nékaounié (344 km ²) 1980–1982	1986	0.3133	1.019	0.3553	1.065
Néka à Nékouanié (344 km ²) 1980–1981	1982	0.3429	0.4070	0.4555	0.3105
	1986		1.206		1.019
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1970–1973	1977–1979	0.4799	0.3667	0.5922	0.3565
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1984–1986	1977–1979	0.2399	0.6303	0.3245	0.7658
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984–1986	1982–1983	0.0381	0.1440	0.0571	0.1167

Tableau 2.32: Critère de Nash des calages et validations des modèles di et AB2 en zone de forêt

Calage	Validation	Calage di	Validation di	Calage AB2	Validation AB2
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965–1967	1968	0.1647	0.4966	0.2128	0.0715
	1971–1973		0.8375		0.3464
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971–1973	1968	0.0853	0.2429	0.1538	0.1874
	1965–1967		0.3154		0.3192

Tableau 2.33: Critère de Nash des calages et validations des modèles di et AB2 en zone de transition

Les deux tableaux ci-dessus montrent les progrès réalisés lorsque l'on passe du modèle initial di au modèle définitif AB2. Pour les calages, le modèle initial donne des résultats meilleurs que le modèle définitif. Par contre, en validation, les valeurs du critère de Nash du modèle définitif sont nettement inférieures à celles du modèle de départ. Le modèle définitif AB2 répond donc positivement à notre préoccupation majeure de robustesse, gage d'une utilisation efficace et généralisable d'un tel outil.

On trouvera sur les figures 2.40 à 2.42 quelques comparaisons graphiques de calage et validation des modèles di et AB2.

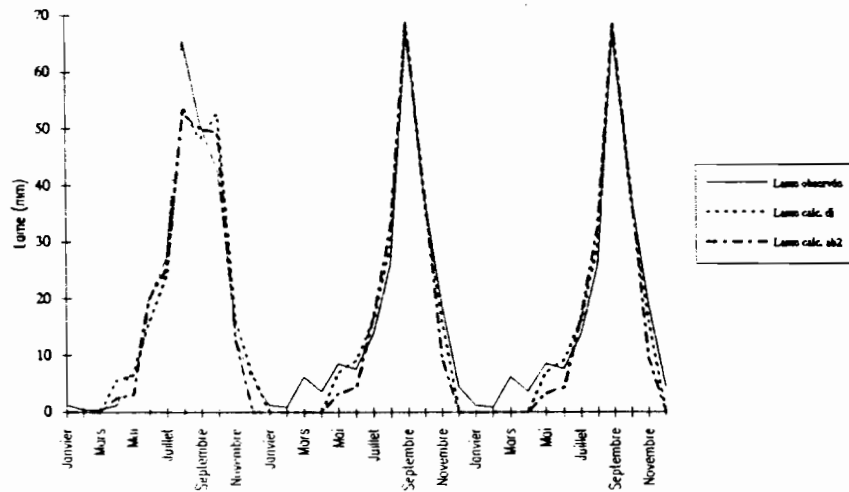


Figure 2.40: N'Zo à Kahin de 1984 à 1986 (Calages di et AB2)

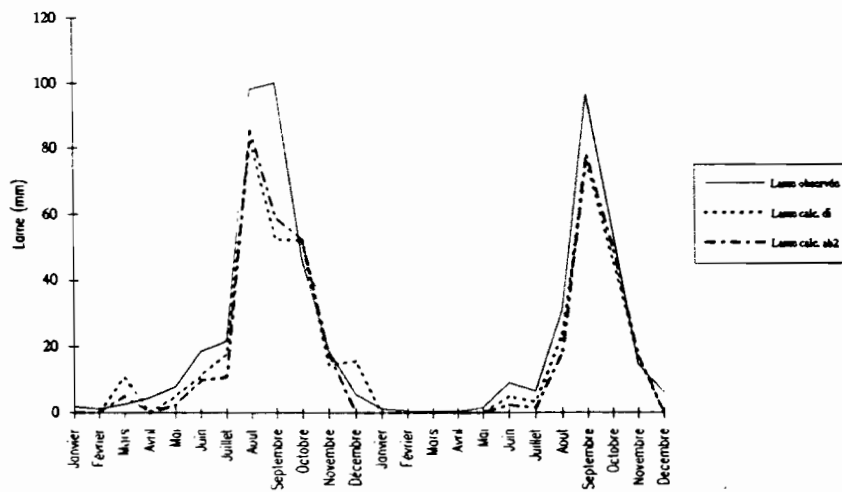


Figure 2.41: N'Zo à Kahin de 1982 à 1983 (Validation des calages di et AB2 réalisés de 1984 à 1986)

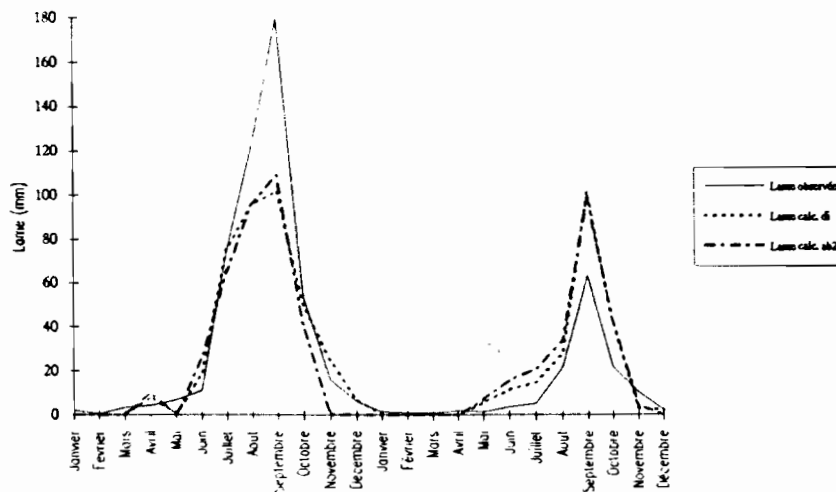


Figure 2.42: Ko à Man de 1985 à 1986 (Validation des calages di et AB2 réalisés de 1971 à 1973)

2.3.4.3. Etude des différents paramètres

Cette étude est effectuée sur les échantillons de 60 individus en zone de forêt et de 34 individus en zone de transition. Les éléments de ces échantillons sont les différentes valeurs des trois paramètres issues des calages station-année par station-année.

Les résultats de l'étude statistique ont été reportés dans les tableaux suivants (tableaux 2.34 et 2.35).

Paramètre	AA	BBa	DD
Moyenne	0.0769	0.1584	0.563
Ecart-type	0.0991	0.0885	0.5402
Coefficient de variation	1.2887	0.5587	0.9595
Médiane	0.0406	0.1338	0.4593
Mode	0	0.1307	0
Minimum	0	0.0186	0
Maximum	0.5134	0.4	2.3347
Etendue	0.5134	0.3814	2.3347
Premier quartile	0	0.0931	0.0966
Dernier quartile	0.1244	0.2169	0.881

Tableau 2.34: Statistiques descriptives en zone de forêt

Parametre	AA	BBa	DD
Moyenne	0.0147	0.1013	1.3134
Ecart-type	0.0241	0.0854	0.9743
Coefficient de variation	1.6394	0.843	0.7419
Médiane	0	0.0867	1.0766
Mode	0	0.0864	3
Minimum	0	0	0
Maximum	0.0873	0.4	3
Etendue	0.0873	0.4	3
Premier quartile	0	0.0431	0.4222
Dernier quartile	0.0158	0.1305	1.8693

Tableau 2.35: Statistiques descriptives en zone de transition

Pour chacun des paramètres, en zone de forêt comme en zone de transition, on note une forte dispersion, ce que traduisent les valeurs élevées des coefficients de variation. Cette dispersion est la plus forte pour le paramètre AA. Les distributions de AA, BBa, et DD sont fortement dissymétriques, comme le montrent les valeurs des quartiles et la comparaison des moyennes, modes et médianes.

Divers essais d'ajustements ont été réalisés pour déterminer les lois de variation des différents paramètres. Lorsque cela était possible, les lois normale, lognormale, gamma, et exponentielle ont été testées (tracés des histogrammes de fréquences, tests du χ^2 , droites de Henry). Ces essais se sont révélés infructueux. Il semble qu'aucun des paramètres du modèle AB2 n'obéisse à une loi de distribution statistique classique (simple).

En ce qui concerne les liaisons possibles entre les trois paramètres, les matrices de corrélation ci-dessous, ainsi que quelques graphiques présentés en annexe V, montrent que les paramètres AA, BBa, et DD sont indépendants les uns des autres.

	AA	BBa	DD
AA	1	0.157	0.2878
BBa	0.157	1	0.3131
DD	0.2878	0.3131	1

Tableau 2.36: Matrice de corrélation du modèle AB2 en zone de forêt

	AA	BBa	DD
AA	1	0.2360	0.4840
BBa	0.2360	1	0.5456
DD	0.4840	0.5456	1

Tableau 2.37: Matrice de corrélation du modèle AB2 en zone de transition

Une étude cartographique des paramètres AA, BBa et DD a également été réalisée. La technique utilisée est le tracé année par année des cartes d'isovaleurs des paramètres selon la latitude et la longitude dans les deux zones climatiques étudiées. L'examen des différentes cartes (Cf. annexe III) indique qu'aucune organisation régionale ne peut être valablement établie.

Notons, au niveau de ces essais de cartographie régionale, que les années sur lesquelles on a pu tracer ces cartes d'isovaleurs des paramètres sont peu nombreuses. Quand l'année existe, les bassins versants concernés sont souvent éloignés les uns des autres ce qui entraîne de nombreux artefacts.

2.3.5. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres

L'objectif visé dans l'analyse présentée ici était de tenter de déterminer des relations entre les paramètres calés du modèle AB2 et des variables climatiques, physiographiques ou agronomiques, caractéristiques des bassins versants et des stations-années étudiés.

Dans ce chapitre, on présentera d'abord les variables utilisées et une étude de corrélations entre ces variables. Ensuite, une analyse en composantes principales sera effectuée. La dernière partie concerne la mise au point d'équations de prédétermination des paramètres du modèle.

2.3.5.1. Variables utilisées, étude des corrélations

Concernant les données, il faut distinguer d'une part les individus qui sont les stations-années disponibles et d'autre part les variables qui sont, elles, soit caractéristiques d'une station-année, soit caractéristiques du calage du modèle pour la station-année considérée (c'est à dire les paramètres calés).

2.3.5.1.1. Variables utilisées

Les variables caractéristiques d'une station-année sont:

- . Pluie annuelle (Pluie_An).
- . Pluie cumulée (P_C) au 15 Mai, 15 Juin, 15 Juillet, 15 Août, 15 Septembre, 15 Octobre et 15 Novembre (P_{C5} = Pluie cumulée du 1^{er} Janvier au 15 Mai).
- . Pluie relative (P_r) au 15 Mai, 15 Juin, 15 Juillet, 15 Août, 15 Septembre, 15 Octobre et 15 Novembre ($P_{r5} = P_{C5}/\text{Pluie_An}$).
- . 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 des sols: pourcentage de zone de savane, de zone de forêt, de cultures et d'habitat.

Les pluies cumulées et les pluies relatives correspondantes sont considérées sur la période pluvieuse.

Les variables caractéristiques du calage sont les paramètres du modèle: AA, BBa et DD.

2.3.5.1.2. Etude des corrélations

Rappelons que sur certains bassins retenus dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas pu obtenir les caractéristiques d'occupation des sols. Dans chaque zone, nous disposons donc de deux échantillons: l'un avec les caractéristiques d'occupation des sols et l'autre sans ces mêmes caractéristiques. Les quatre échantillons des deux zones sont:

- zone de forêt avec occupation des sols (60 individus)
- zone de forêt sans occupation des sols (26 individus)
- zone de transition avec occupation des sols (34 individus)
- zone de transition sans occupation des sols (22 individus)

Sur chacun des échantillons étudiés, nous avons procédé au calcul des matrices de corrélation (Cf. annexe VI).

En dehors des corrélations évidentes entre les variables de la même définition, par exemple Pluie_An fortement corrélée avec Pc11, nous avons relevé les corrélations "significatives" (>0.5) suivantes:

*** Zone de forêt sans occupation des sols.**

- Superficie : corrélation avec
Compacité = 0.7949
- DD : corrélation avec
Pr9 = 0.5158
Pr10 = 0.5896

*** Zone de forêt avec occupation des sols.**

- Superficie : corrélation avec
Compacité = 0.726
Habitat = - 0.551
- Compacité : corrélation avec
Pr10 = 0.5601
- Savane : corrélation avec
Forêt = 0.5953
Culture = -0.6268
- Forêt : corrélation avec
Culture = -0.9981

$$\text{Habitat} = -0.6383$$

– AA : corrélation avec

$$\text{Habitat} = 0.5088$$

– BBA : corrélation avec

$$\text{Pluie_An} = 0.5258$$

$$\text{Pc8} = 0.5522$$

$$\text{Pc9} = 0.5517$$

$$\text{Pc10} = 0.5396$$

$$\text{Pc11} = 0.5358$$

– DD : corrélation avec

$$\text{Pluie_An} = 0.6121$$

$$\text{Pc8} = 0.5045$$

$$\text{Pc9} = 0.5913$$

$$\text{Pc10} = 0.6566$$

$$\text{Pr10} = 0.6767$$

$$\text{Pc11} = 0.6138$$

*** Zone de transition sans occupation des sols.**

– DD : corrélation avec

$$\text{BBa} = 0.5456$$

*** Zone de transition avec occupation des sols.**

– Superficie : corrélation avec

$$\text{Forêt} = 0.9312$$

– Compacité : corrélation avec

$$\text{Habitat} = -0.8363$$

– Savane : corrélation avec

$$\text{Culture} = -0.9714$$

$$\text{Habitat} = 0.5192$$

$$\text{Pr8} = 0.6615$$

$$\text{Pr9} = 0.5289$$

– Culture : corrélation avec

$$\text{Habitat} = 0.5076$$

– DD : corrélation avec

$$Pr7 = -0.5636$$

$$Pc10 = 0.5336$$

$$Pc11 = 0.5003$$

Comme on peut le constater les corrélations sont rares et souvent faibles. Cependant, il faut prendre en compte le fait que ces corrélations ne permettent que de détecter les relations linéaires entre les variables. L'existence de telles relations linéaires faibles (r de l'ordre de 0.5, 0.6) peut être le signe d'une relation non linéaire plus forte.

Nous pouvons aussi noter que sur les deux types d'échantillon, c'est celui contenant les caractéristiques d'occupation des sols qui a enregistré la plupart des corrélations. La variable "habitat" est revenue plusieurs fois dans les corrélations, mais compte tenu du fait que les pourcentages d'habitat sont très faibles, – ils varient de 0.5 % à 1.5 % –, les coefficients portant sur cette variable ne sont pas réellement significatifs.

L'étude des matrices de corrélations a permis de mettre en évidence la non existence de relations linéaires fortes entre les paramètres des modèles et les autres variables.

2.3.5.2. Analyse en Composantes Principales

2.3.5.2.1. Principes de l'ACP

On utilise généralement la technique d'Analyse en Composantes Principales (ACP) lorsque l'on étudie un nombre élevé de caractères mesurés ou non pour un certain nombre d'individus.

Dès le moment où les caractères qui servent à décrire les individus deviennent importants en nombre, la synthèse de l'information devient elle aussi difficile à faire. L'Analyse en Composantes Principales permet donc de regrouper les individus selon leur proximité dans l'espace à n dimensions des n caractères.

Avec l'ACP on définit de nouveaux axes perpendiculaires, encore appelés composantes principales, sur lesquels les individus sont projetés. Les coordonnées des individus ainsi projetés sont des combinaisons linéaires des caractères initiaux. Le nombre de composantes principales qu'on retient dépend du pourcentage de variances expliquées par chaque composante principale.

2.3.5.2.2. Application de l'ACP

L'Analyse en Composantes Principales a été menée sur les deux échantillons de chaque zone: 60 et 26 individus avec et sans occupation des sols en zone de forêt, 34 et 22 individus avec et sans occupation des sols en zone de transition.

On a distingué d'une part les variables principales, indépendantes du modèle, et d'autre part, les variables secondaires (ou supplémentaires) liées à l'utilisation du modèle.

Les variables principales sont au nombre de 17 pour les échantillons sur lesquels on ne dispose pas des données de l'occupation des sols:

- Superficie
- Pluie annuelle
- Pluies cumulées: Pc5, Pc6, Pc7, Pc8, Pc9, Pc10, Pc11
- Pluies relatives: Pr5, Pr6, Pr7, Pr8, Pr9, Pr10, Pr11.

Lorsqu'on dispose de l'occupation des sols, les variables principales sont au nombre de 21, car on rajoute les variables suivantes:

% de Zone de savane, % de Zone de forêt, % de Culture, et % d'Habitat.

A partir des différents individus et caractères, le calcul des composantes principales a conduit aux résultats suivants (tableau 2.38 et 2.39):

Composante n°	Forêt sans occupation des sols		Forêt avec occupation des sols	
	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
1	41.83	41.83	38.96	38.96
2	25.23	67.06	19.9	58.86
3	13.07	80.13	14.32	73.18
4	9.5	89.62	9.06	82.24
5	6.06	95.68	7.65	89.89

Tableau 2.38: Résultats de l'A.C.P. en zone de forêt

Composante n°	Transition sans occupation des sols		Transition avec occupation des sols	
	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
1	39.1	39.1	33.07	33.07
2	25.42	64.52	21.54	54.6
3	12.71	77.23	16.84	71.44
4	7.21	84.43	10.07	81.52
5	6.34	90.78	7.72	89.24

Tableau 2.39: Résultats de l'A.C.P. en zone de transition

Les trois premières composantes permettent d'expliquer et de regrouper environ 73 à 80% de la variance totale observée en zone de forêt et 71 à 77% en zone de transition. En considérant les cinq premières composantes, on arrive à 96% de variance expliquée en zone de forêt et à 91% en zone de transition. Pour la suite de l'analyse, nous ne retiendrons que les trois premières composantes.

Les tableaux 2.40 et 2.41 présentent les corrélations de chacune des variables avec les trois premières composantes.

Variable	Composante 1		Composante 2		Composante 3	
	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols
Superficie	0.002	-0.342	-0.369	0.372	0.363	0.184
Pluie An	-0.955	0.966	-0.031	-0.164	-0.170	-0.162
Compacité	-0.262	-0.128	-0.608	0.134	-0.011	0.259
Pc5	-0.586	0.851	0.575	0.258	0.142	-0.244
Pr5	0.209	0.087	0.719	0.688	0.364	-0.079
Pc6	-0.537	0.872	0.647	0.439	0.081	-0.046
Pr6	0.264	0.092	0.821	0.909	0.321	0.207
Pc7	-0.916	0.943	0.289	0.251	0.088	0.107
Pr7	-0.166	0.088	0.645	0.792	0.424	0.533
Pc8	-0.974	0.983	0.083	-0.045	0.088	0.122
Pr8	-0.566	0.260	0.298	0.366	0.432	0.833
Pc9	-0.994	0.925	-0.013	-0.333	-0.052	0.130
Pr9	-0.884	0.123	0.027	-0.464	0.120	0.827
Pc10	-0.963	0.903	-0.119	-0.406	-0.160	-0.014
Pr10	-0.754	-0.140	-0.504	-0.823	-0.148	0.451
Pc11	-0.961	0.949	-0.063	-0.260	-0.151	-0.126
Pr11	-0.158	-0.091	-0.431	-0.696	0.278	0.243
Savane	-0.312		-0.546		0.239	
Forêt	-0.007		-0.301		0.869	
Culture	0.021		0.292		-0.850	
Habitat	-0.094		0.452		-0.710	

Tableau 2.40: Corrélations des variables principales avec les trois premiers axes en zone de forêt

Ces corrélations ont été représentées graphiquement dans les plans composante 1-composante 2, composante 1-composante 3, et composante 2-composante 3. Ces tracés (figures 2.43 à 2.45, les autres étant en annexe) permettent de se rendre compte que la composante 1 caractérise les variables concernant la pluviométrie alors que la composante 3 caractérise elle les variables d'occupation des sols quand ces dernières existent.

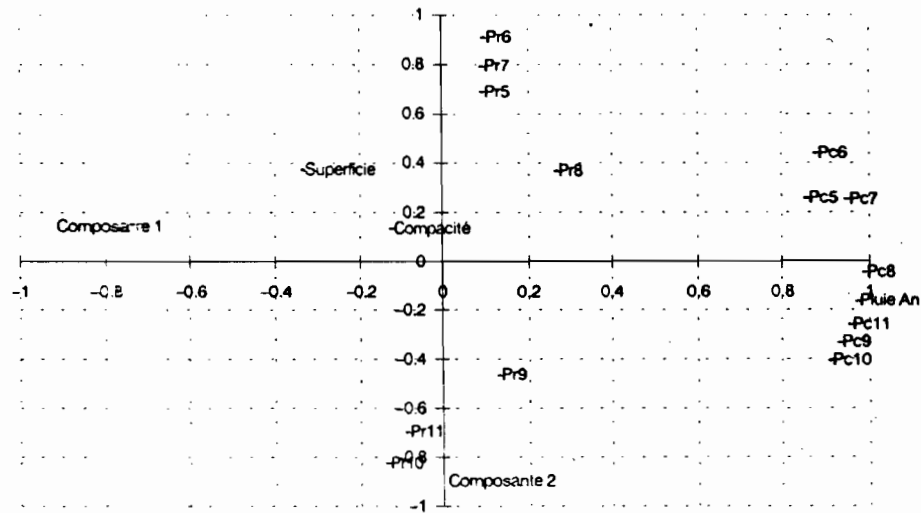


Figure 2.43: Corrélations variables principales – Composante 1 et 2
(zone de forêt sans occupation des sols)

Variable	Composante 1		Composante 2		Composante 3	
	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols
Superficie	-0.121	-0.072	0.177	-0.044	-0.616	0.754
Pluie An	0.953	-0.939	0.269	0.283	-0.105	0.165
Compacité	-0.157	0.104	-0.136	-0.260	-0.270	0.002
Pc5	0.398	-0.598	-0.380	-0.591	-0.655	0.316
Pr5	-0.522	0.143	-0.574	-0.854	-0.447	0.195
Pc6	0.566	-0.615	-0.369	-0.603	-0.648	0.390
Pr6	-0.420	0.283	-0.683	-0.879	-0.508	0.229
Pc7	0.763	-0.790	-0.387	-0.442	-0.305	0.140
Pr7	-0.458	0.240	-0.761	-0.877	-0.181	0.017
Pc8	0.931	-0.936	-0.233	-0.094	0.073	-0.108
Pr8	-0.082	0.025	-0.899	-0.735	0.245	-0.461
Pc9	0.982	-0.968	0.066	0.149	0.008	0.010
Pr9	0.447	-0.457	-0.705	-0.479	0.257	-0.538
Pc10	0.977	-0.962	0.190	0.240	-0.065	0.039
Pr10	0.377	-0.395	-0.507	-0.229	0.131	-0.685
Pc11	0.962	-0.952	0.229	0.267	-0.120	0.124
Pr11	0.362	-0.467	-0.518	-0.101	-0.172	-0.450
Savane	0.134		-0.541		0.706	
Forêt	-0.083		-0.026		-0.406	
Culture	-0.115		0.544		-0.608	
Habitat	0.213		-0.170		0.643	

Tableau 2.41: Corrélations des variables principales avec les trois premiers axes en zone de transition

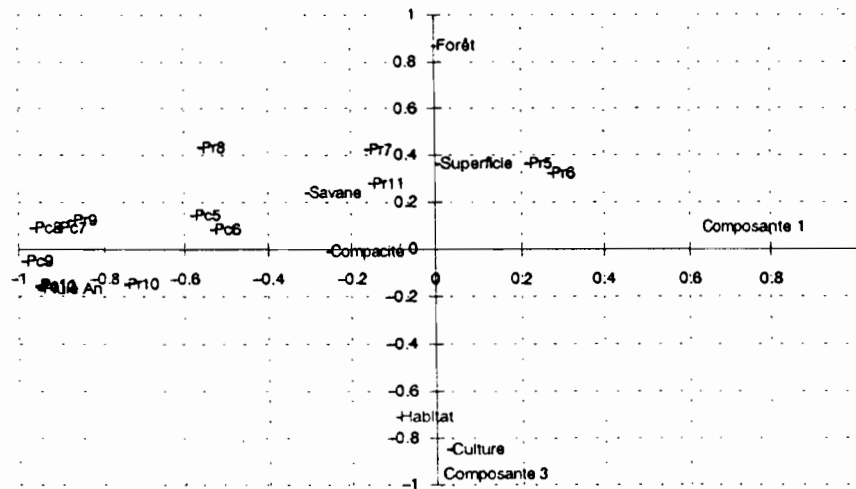


Figure 2.44 Corrélations variables principales – Composante 1 et 3
(zone de forêt avec occupation des sols)

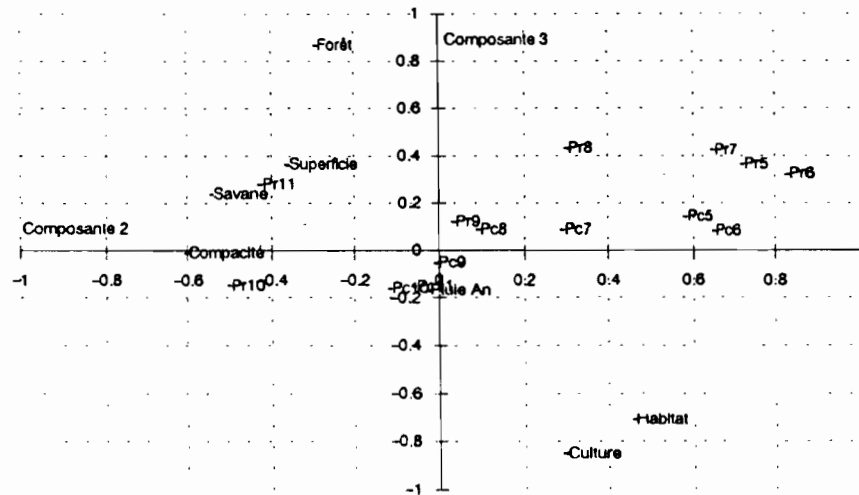


Figure 2.45: Corrélations variables principales – Composante 2 et 3
(zone de forêt avec occupation des sols)

Dans les plans définis ci-dessus: 1-2, 1-3 et 2-3, les individus c'est à dire les stations-années ont été projetés. Les différents graphiques présentant ces projections (Cf. figure 2.46 et annexe) montrent qu'aucune organisation selon les composantes principales n'a pu être clairement établie.



Figure 2.46: Projection des individus dans le plan 1-2
(zone de transition avec occupation des sols)

A partir de cette analyse de base, on superpose les variables propres au modèle et on calcule ainsi les corrélations des paramètres avec les nouveaux axes définis par l'A.C.P.

Les tableaux 2.42 et 2.43 présentent les coefficients de corrélation de chaque paramètre avec chacun des trois premiers axes.

Variable supplémentaire	Composante 1		Composante 2		Composante 3	
	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols
AA	-0.184	0.351	0.039	-0.335	-0.427	-0.073
BBa	-0.560	0.198	-0.160	0.168	0.180	0.298
DD	-0.574	0.040	-0.263	-0.543	-0.271	0.255

Tableau 2.42: Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes en zone de forêt

Variable	Composante 1		Composante 2		Composante 3	
	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols	Avec occupation des sols	Sans occupation des sols
AA	0.373	-0.265	-0.004	0.161	0.385	-0.189
BBa	0.307	-0.327	-0.208	0.037	0.058	-0.161
DD	0.470	-0.364	0.245	0.326	0.047	-0.111

Tableau 2.43: Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes en zone de transition

Les tableaux de corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes et les graphiques correspondants (Cf. figures 2.47 et 2.48) indiquent que cette corrélation est généralement faible. On ne note, en effet, que trois corrélations supérieures à 0.5.

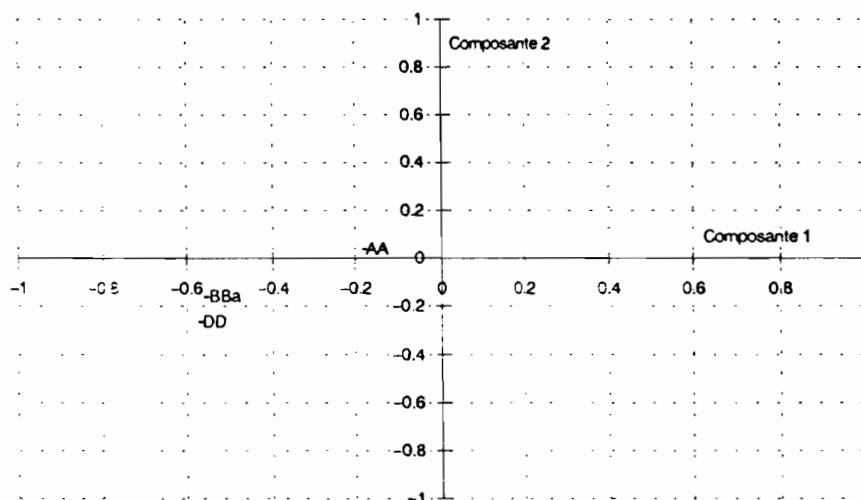


Figure 2.47: Corrélations des variables supplémentaires – Composante 1 et 2
(zone de forêt avec occupation des sols)

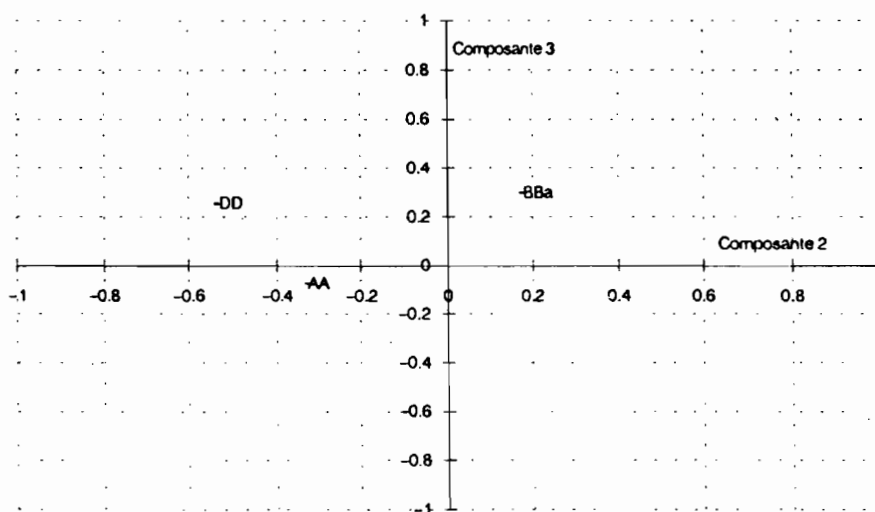


Figure 2.48: Corrélations des variables supplémentaires – Composante 2 et 3
(zone de forêt sans occupation des sols)

L'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) menée ici n'a pas conduit à des résultats particulièrement remarquables, mais a tout de même permis de définir de nouveaux axes à partir des variables de base du système. Parmi ces nouveaux axes, la première

composante tend à regrouper l'information pluviométrique tandis que la troisième représente les caractéristiques d'occupation des sols.

La projection des individus dans les plans définis par les trois premiers axes n'a pas montré d'organisation particulière quant aux années sèches ou pluvieuses.

A partir de l'analyse des variables de base du système, l'ajout des variables supplémentaires que sont les paramètres du modèle, a permis d'examiner les éventuelles relations entre les nouveaux axes et ces paramètres. A ce niveau également, on a noté que les relations restent faibles en terme de corrélation.

2.3.5.3. Prédétermination des paramètres des modèles

Cette phase de l'analyse consiste à rechercher des équations de prédétermination, pour chacun des trois paramètres du modèle, qui soient fonction des variables principales précédemment définies. La mise au point de telles équations pourrait permettre de calculer les valeurs des paramètres du modèle pour des bassins versants non jaugés, et ainsi d'estimer la lame écoulée à l'aide de cet algorithme pluie-débit.

Les données de base sont celles utilisées pour l'analyse en composantes principales à savoir deux types d'échantillons dans chaque zone. Sur chaque type, on définit deux sous-échantillons de données. Le premier sert à l'établissement des équations de prédétermination, et le second aux validations du modèle en utilisant des paramètres prédéterminés.

Sur les deux zones étudiées (zone de forêt et de zone de transition), des tirages aléatoires ont été effectués pour la répartition en deux sous-échantillons: calage et validation. Cette répartition est la suivante:

*** En zone de forêt:**

- Echantillon sans occupation des sols:
 - + prédétermination sur 50 individus,
 - + validation sur 10 individus.
- Echantillon avec occupation des sols:
 - + prédétermination sur 20 individus,
 - + validation sur 6 individus.

*** En zone de transition:**

- Echantillon sans occupation des sols:
 - + prédétermination sur 28 individus,
 - + validation sur 6 individus.
- Echantillon avec occupation des sols:

- + prédétermination sur 18 individus,
- + validation sur 4 individus.

Nous disposons ainsi de 4 échantillons de prédétermination et de 4 échantillons de validation.

2.3.5.3.1. Principe

L'élaboration des équations de prédétermination des paramètres s'est effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, l'utilisation d'une méthode de régression progressive (un Stepwise ascendant) a permis d'identifier les variables explicatives des paramètres. Puis un calage par optimisation sous contraintes a permis d'identifier les coefficients à appliquer à ces variables.

Rappelons que la méthode de Stepwise ascendant est une méthode automatique de sélection des variables. Elle permet de sélectionner une à une les variables qui apportent le plus d'information pour la régression considérée. La méthode utilise un test statistique d'entrée et de sortie de la variable dans le "modèle" régressif en cours d'élaboration. Lorsqu'une variable entre dans le modèle, on recalcule l'apport potentiel des autres variables, afin de décider de leur éventuelle utilisation.

Après la détermination des variables explicatives des paramètres AA, BBa et DD par la méthode du Stepwise, les coefficients ont été identifiés à l'aide d'un calage automatique sous contraintes. Les équations de AA et de BBa ont été calées ensemble, l'équation de DD séparément. Le critère de calage utilisé pour ces calages est celui que nous avons choisi depuis le début, c'est à dire le critère de Nash.

Pour le calage des équations de prédétermination des paramètres AA et BBa les contraintes suivantes ont été imposées:

$$0 \leq AA \leq 1$$

$$0 \leq BBa \leq 1$$

$$AA + \sum_{i=1}^5 BBi \leq 1$$

En ce qui concerne le paramètre DD la contrainte imposée est:

$$0 \leq DD \leq 3$$

2.3.5.3.2. Résultats de la prédétermination des paramètres

Les équations de prédétermination des trois paramètres établis sur chaque échantillon sont:

Forêt sans occupation des sols	Nash	Forêt avec occupation des sols	Nash
AA = $-1.10^{-5} \cdot \text{Superficie} + 8.10^{-5} \cdot \text{Pc10}$	0.728	AA = $11.23 \cdot \text{Savane} + 6.64 \cdot \text{Habitat} - 0.11$	0.683
BBa = $0.43 \cdot \text{Pr8} - 0.12$	0.884	BBa = $0.00016 \cdot \text{Pc9} - 0.05$	0.788
DD = $7.67 \cdot \text{Pr10} - 6.22 \cdot \text{Pr11} - 0.02$	0.720	DD = $10.09 \cdot \text{Pr10} - 8.56$	0.549

Tableau 2.44: Equations de prédétermination et valeurs du critère de Nash obtenues lors de leurs calages. Zone de forêt

Transition sans occupation des sols	Nash	Transition avec occupation des sols	Nash
AA = $-0.13 \cdot \text{Pr5} + 0.05$	0.855	AA = $-0.00015 \cdot \text{Pc5} + 7.10^{-5} \cdot \text{Pc9} - 2.10^{-9}$	0.744
BBa = $0.0002 \cdot \text{Pc8} - 0.07$	0.850	BBa = $0.0003 \cdot \text{Pc8} + 0.007 \cdot \text{Forêt} - 0.31$	0.595
DD = $-0.008 \cdot \text{Pc9} + 0.01 \cdot \text{Pc10} - 1.22$	0.571	DD = $-0.0054 \cdot \text{Pc7} + 0.0037 \cdot \text{Pc10} + 0.5$	0.553

Tableau 2.45: Equations de prédétermination et valeurs du critère de Nash obtenues lors de leurs calages. Zone de transition

Deux remarques principales peuvent être faites au regard des tableaux ci-dessus. La première observation est que le nombre de variables intervenant dans les équations est réduit (deux variables au plus). La seconde remarque porte sur les valeurs du critère de Nash déterminées lors de l'élaboration des équations. Ces valeurs sont en effet très élevées, donc pas satisfaisantes, et cette situation est encore soulignée par les résultats obtenus sur les échantillons de validation (Cf. tableaux 2.46 et 2.47).

Echantillon sans occupation des sols			Echantillon avec occupation des sols		
Station année	Nash calage	Nash prédétermination	Station année	Nash calage	Nash prédétermination
agne80	0.5399	2.6320	gdia86	0.1157	2.8330
davo86	0.2365	0.3473	kolo81	0.0542	0.2495
kavi78	0.0248	0.0468	koma72	0.3162	0.3996
kavi79	0.1463	0.8668	koma74	0.0338	0.4187
kavi80	0.3204	0.8405	koma77	0.0584	0.2277
neka86	0.4860	0.9900	zoka85	0.0264	0.1895
nero82	0.4707	0.5612			
nero83	0.2931	0.2877			
zoka82	0.0751	0.1335			
zoka86	0.0576	0.0777			

Tableau 2.46: Critères de Nash obtenus lors du calage du modèle AB2 et lors de l'utilisation des équations prédéterminées (validation de la prédétermination) en zone de forêt

Echantillon sans occupation des sols			Echantillon avec occupation des sols		
Station année	Nash calage	Nash prédétermination	Station année	Nash calage	Nash prédétermination
bada85	0.2763	0.2601	kand86	0.1018	9.1781
bere86	0.0295	2.0657	kanz85	0.1276	0.1747
kanz82	1.1103	2.2311	lobo82	0.3500	1.1123
kanz85	0.1276	0.6236	lobo86	0.0365	0.8883
neng84	0.0130	0.2473			
soun86	0.6593	54.4800			

Tableau 2.47: Critères de Nash obtenus lors du calage du modèle AB2 et lors de l'utilisation des équations prédéterminées (validation de la prédétermination) en zone de transition

Ces deux tableaux présentent pour chaque type d'échantillon les valeurs du critère de Nash issues d'une part du calage AB2, et d'autre part de la validation du modèle AB2 avec les paramètres prédéterminés.

Les tableaux ci-dessus montrent, de façon générale, que les validations des équations de prédétermination des paramètres ne sont pas de bonne qualité. En effet, on ne note qu'environ 25% en zone de forêt, et 10% seulement en zone de transition, de valeurs du critère de Nash en prédétermination qui soient inférieures à 0.2, contre respectivement 56% et 60% en calage. Remarquons, cependant, que sur certaines stations-années, l'hydrogramme de la lame prédéterminée est bien reconstitué (Cf. figures 2.49 et 2.50). Ces bonnes adéquations rencontrées parfois montrent que, ponctuellement, les variables retenues pour expliquer les paramètres du modèle jouent pleinement leur rôle. Elles se révèlent alors suffisantes. Cependant, dans la majorité des cas, les variables explicatives retenues car disponibles sont insuffisantes. Il conviendrait donc d'identifier des descripteurs supplémentaires du système qui permettraient d'intégrer l'information manquante.

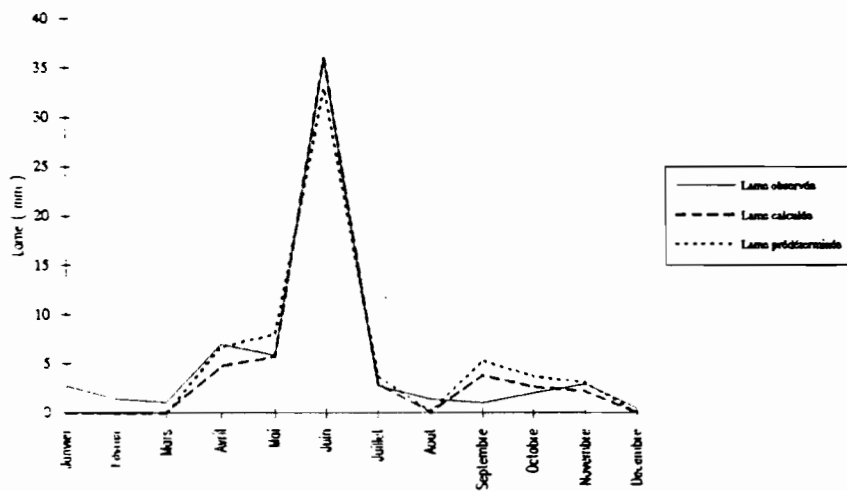


Figure 2.49: Kavi à M'Bessé en 1978 (Calage et prédétermination)

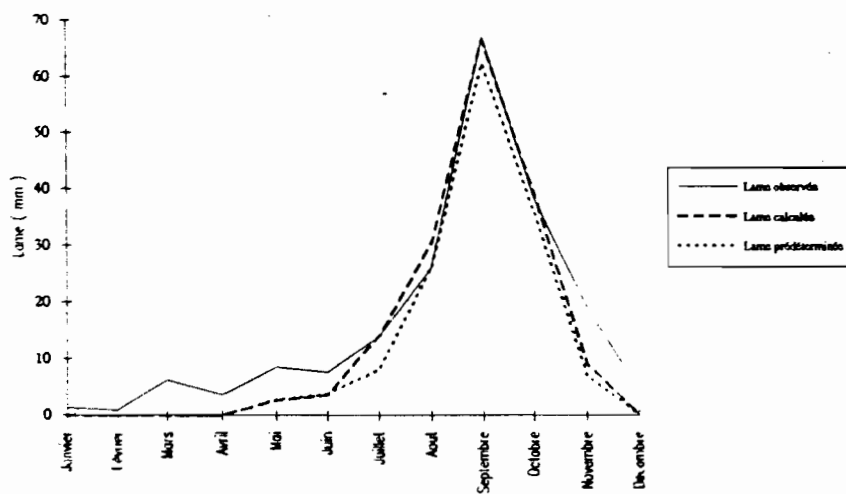


Figure 2.50: N'Zo à Kahin en 1986 (Calage et prédétermination)

2.3.6. Application du modèle de SNYDER en zone de savane

Le modèle ayant été analysé et restructuré dans le cadre de son application en zones de forêt et de transition, nous avons pensé qu'il pouvait être intéressant de le tester en zone de savane. Grâce à l'étude de DEZETTER (1991), réalisée dans le Nord-ouest de la Côte d'Ivoire, nous disposons des données de base que sont les pluies et lames mensuelles observées nécessaires à une telle étude.

Dans cette zone de savane, nous avons retenu les 15 bassins versants jugés satisfaisants par DEZETTER (1991). Ces bassins dont la superficie varie de 120 à 4700 km² totalisent 59 stations-années. Sur ces 59 stations-années, 34 seulement ont pu servir au calage année par année, du fait que pour une année considérée, le modèle prend en compte les précipitations des derniers mois de l'année antérieure.

Les calages que nous avons effectués ici sont les calages, d'une part, avec le modèle initial (modèle di) à 9 paramètres (Seuil, AA, BBa, BBb, BBc, BBd, BBe, CC et DD) et d'autre part, avec le modèle définitif (modèle AB2) à 3 paramètres (AA, BBa et DD).

Les résultats des différents calages, station-année par station-année, des modèles di et AB2 sont du même ordre de grandeur que ceux déjà obtenus en zone de forêt et de zone de transition. Le tableau 2.48 récapitule la valeur moyenne du critère de Nash dans ces trois zones climatiques.

	Nash moyen di	Nash moyen AB2
Forêt	0.084 ± 0.104	0.199 ± 0.181
Transition	0.120 ± 0.204	0.213 ± 0.293
Savane	0.088 ± 0.169	0.153 ± 0.101

Tableau 2.48: Valeurs moyennes du critère de Nash des modèles di et AB2

Les résultats des calages di et AB2 apparaissent donc satisfaisants dans l'ensemble. Ces résultats sont cependant légèrement moins bons avec le modèle AB2 réduit à 3 paramètres.

Les figures 2.51 et 2.52 représentent des calages moyens (critère de Nash moyen) des modèles di et AB2 en zone de savane.

Les modèles di et AB2 ont été calés et validés sur des séries chronologiques de plusieurs années. Les valeurs du critère de Nash de ces deux opérations sont consignées dans le tableau 2.49. On remarque qu'en calage le modèle à 9 paramètres donne de meilleures valeurs du critère de Nash par rapport au modèle réduit à 3 paramètres. Ces constatations seront cependant pondérées par la surparamétrisation dont nous faisons état précédemment, et concernant cette version à 9 paramètres de l'algorithme.

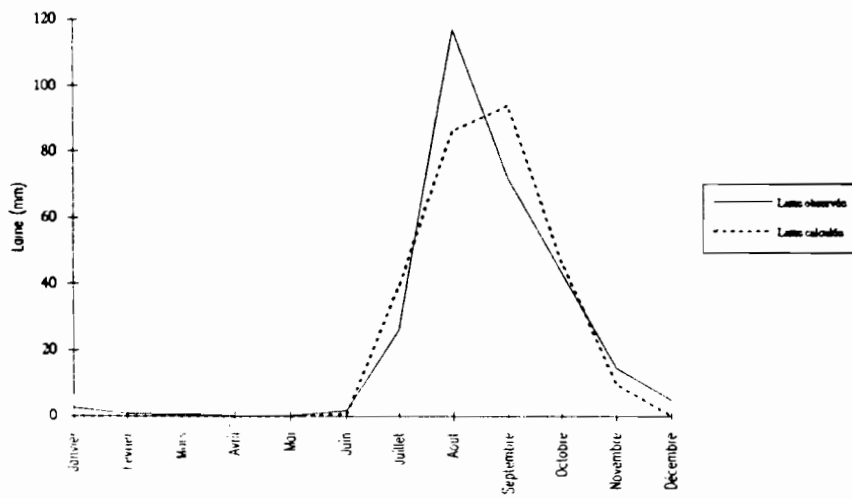


Figure 2.51: Sien à Nafana–Sienso en 1979 (calage di)

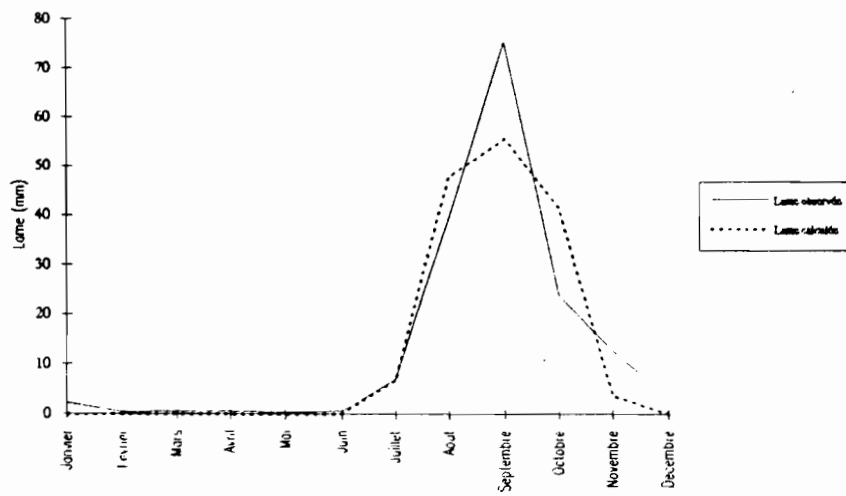


Figure 2.52: Bagoé à Kouto en 1982 (calage AB2)

Calage	Validation	calage di	Validation di	Calage AB2	Validation AB2
Bagoé à Kouto (1042 km ²) 1982–1983	1984–1985	0.0488	0.3062	0.1799	0.1485
Bagoé à Kouto (1042 km ²) 1984–1985	1982–1983	0.0172	0.1632	0.0793	0.2132
Bandama à Siguékiélé (368 km ²) 1984–1985	1982–1983	0.018	0.4411	0.2044	0.8453
Bandama à Siguékiélé (368 km ²) 1982–1983	1984–1985	0.2768	0.3592	0.2944	0.4158
Doundian à Wahiré (650 km ²) 1981–1982	1983–1984	0.0247	0.8532	0.1285	0.7322
Doundian à Wahiré (650 km ²) 1983–1984	1981–1982	0.0009	0.1198	0.2424	0.2586
Lafigué à Rte Badikaha (443 km ²) 1983–1984	1982	0.1588	0.3092	0.1696	0.3063
Sien à Massadougou (1325km ²) 1984–1985	1986	0.3637	0.4825	0.4129	0.3722
Sien à Nafana–Sienso (615 km ²) 1978–1980	1984	0.1323	1.218	0.1566	1.44
	1981		0.7617		0.3965
Sien à Nafana–Sienso (615 km ²) 1980–1981	1978–1979	0.0964	0.2429	0.1616	0.2608
	1984		1.288		1.202
Sien à Nafana–Sienso (615 km ²) 1978–1979	1980–1981	0.144	0.7532	0.2011	0.3347

Tableau 2.49: Valeurs du critère de Nash en calage et validation sur plusieurs années en zone de savane

Lorsque l'on passe à la validation des paramètres obtenus en calage des modèles di et AB2 sur d'autres stations–années, on note une dégradation considérable de la qualité des validations du modèles di à 9 paramètres, comparativement aux résultats obtenus à l'aide du modèle AB2 à 3 paramètres. Le tableau 2.50 met en évidence cette dégradation dans les trois zones climatiques étudiées (transition, forêt et savane). Parallèlement, on remarque que le modèle à 3 paramètres a un meilleur niveau d'ensemble en validation, ce qui traduit sa robustesse, tout en présentant les mêmes défaillances ponctuelles que le modèle à 9 paramètres.

* En zone de transition (les pourcentages > 0 traduisent une amélioration)

Calage di	Validation di	% dégradation	Calage AB2	Validation AB2	% dégradation
0.1647	0.4966	-201.5	0.2128	0.0715	66.4
0.1647	0.8375	-408.5	0.2128	0.3464	-62.8
0.0853	0.2429	-184.8	0.1538	0.1874	-21.8
0.0853	0.3154	-269.7	0.1538	0.3192	-107.5

* En zone de forêt (les pourcentages > 0 traduisent une amélioration)

Calage di	Validation di	% dégradation	Calage AB2	Validation AB2	% dégradation
0.1839	0.709	-285.5	0.19	0.4101	-115.8
0.109	0.2775	-154.6	0.1412	0.2273	-61.0
0.109	0.1991	-82.7	0.1412	0.1946	-37.8
0.0765	0.3001	-292.3	0.1295	0.239	-84.6
0.0765	0.94	-1128.8	0.1295	0.6659	-414.2
0.1124	0.564	-401.8	0.1721	0.3229	-87.6
0.1124	0.6136	-445.9	0.1721	0.3442	-100.0
0.3133	1.019	-225.2	0.3553	1.065	-199.7
0.3429	0.407	-18.7	0.4555	0.3105	31.8
0.3429	1.206	-251.7	0.4555	1.019	-123.7
0.4799	0.3667	23.6	0.5922	0.3565	39.8
0.2399	0.6303	-162.7	0.3245	0.7658	-136.0
0.0381	0.144	-278.0	0.0571	0.1167	-104.4

* En zone de savane (les pourcentages > 0 traduisent une amélioration)

Calage di	Validation di	% dégradation	Calage AB2	Validation AB2	% dégradation
0.0488	0.3062	-527.5	0.1799	0.1485	17.5
0.018	0.4411	-2350.6	0.2044	0.8453	-313.6
0.0247	0.8532	-3354.3	0.1285	0.7322	-469.8
0.1588	0.3092	-94.7	0.1696	0.3063	-80.6
0.3637	0.4825	-32.7	0.4129	0.3722	9.9
0.1323	1.218	-820.6	0.1566	1.44	-819.5
0.1323	0.7617	-475.7	0.1566	0.3965	-153.2
0.0964	0.2429	-152.0	0.1616	0.2608	-61.4
0.0964	1.288	-1236.1	0.1616	1.202	-643.8
0.0172	0.1632	-848.8	0.0793	0.2132	-168.9
0.2768	0.3592	-29.8	0.2944	0.4158	-41.2
0.0009	0.1198	-13211.1	0.2424	0.2586	-6.7
0.144	0.7532	-423.1	0.2011	0.3347	-66.4

Tableau 2.50: Critères de Nash des calages et validations sur plusieurs années: pourcentage de dégradation du modèle di (9 paramètres) au modèle AB2 (3 paramètres)

Sur ce tableau, nous avons évalué cette dégradation par le rapport entre la différence des valeurs du critère de Nash obtenues en calage et en validation, et la valeur du critère de Nash en calage:

$$\% \text{ de dégradation} = \frac{\text{Calage} - \text{Validation}}{\text{Calage}} * 100$$

Les figures 2.53 et 2.54 de la Bagoé à Kouto en zone de savane sont deux exemples de calages et validations sur des séries chronologiques de plusieurs années.

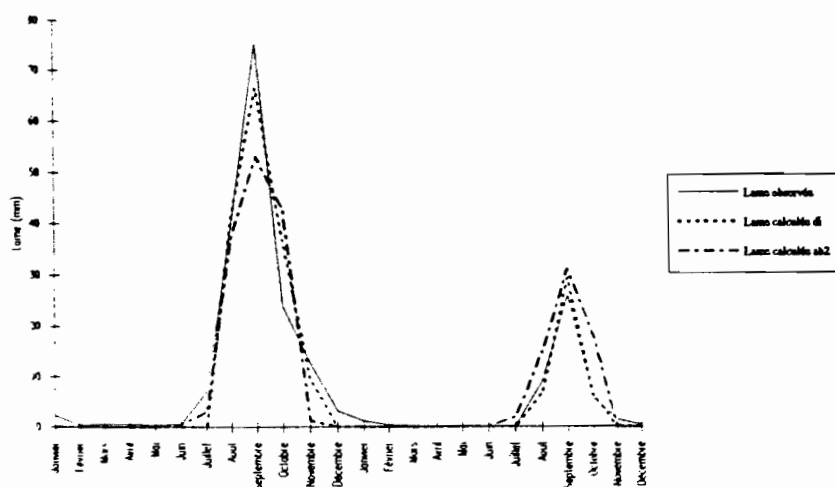


Figure 2.53: Bagoé à Kouto de 1982 à 1983 (Calages di et AB2)

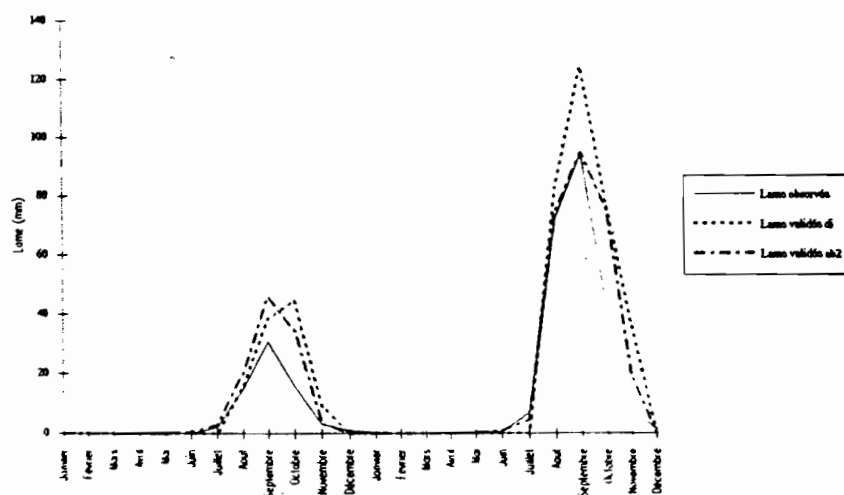


Figure 2.54: Bagoé à Kouto de 1984 à 1985 (Validation des calages di et AB2 1982-1983)

Comme en zone de forêt et en zone de transition, le modèle réduit à 3 paramètres s'avère plus robuste que le modèle initial en zone de savane. Ce résultat renforce l'intérêt du modèle que nous venons de décrire et de restructurer en profondeur. Il permet d'atteindre un même niveau de qualité dans les trois zones climatiques considérées, et il fait preuve d'une robustesse qui autorise son utilisation pour reconstituer des séries d'apports.

2.3.7. Conclusions

L'analyse et la restructuration du modèle proposé par SNYDER à partir duquel nous avons défini un modèle initial à neuf paramètres aux fins de l'adapter au contexte particulier des zones de forêt et de transition d'Afrique de l'Ouest s'est faite en plusieurs étapes. Une première étude a permis de fixer trois paramètres jugés comme étant peu sensibles. Au modèle à six paramètres ainsi obtenu, il a été appliqué une contrainte de décroissance linéaire pour les cinq paramètres représentant les contributions des mois antérieurs. Du modèle à neuf paramètres, nous avons donc abouti à un modèle à deux paramètres. Dans un souci d'améliorer les performances de cet algorithme, nous nous sommes autorisés un troisième paramètre, représentant le taux d'écoulement direct au-dessus d'un seuil pluviométrique donné.

Le modèle final est donc constitué par un algorithme à trois paramètres. Les nombreux essais réalisés montrent qu'il est assez robuste et permet d'obtenir de bons résultats en validation.

Les techniques d'analyse de données appliquées aux jeux des paramètres n'ont pas permis d'aboutir à des résultats satisfaisants en ce qui concerne l'explication des valeurs prises par les paramètres du modèle. Dans les équations de prédétermination des paramètres élaborées par régression multiple, on a noté une vraisemblable insuffisance des variables explicatives. De telles équations ne sont pas suffisamment performantes en matière de prédétermination, et ne peuvent donc pas être utilisées de manière fiable sur des bassins versants non jaugés.

La prise en compte de descripteurs supplémentaires (couvert végétal, géologie, etc.) paraît indispensable pour améliorer ces équations, et donc l'estimation, a priori, des ressources en eau en région tropicale.

TROISIEME PARTIE

3. TROISIEME PARTIE

Après la deuxième partie consacrée à la modélisation au pas de temps annuel et mensuel, intéressons-nous à la dernière phase de notre travail, à savoir l'étude des modèles au pas de temps journalier. Pour cette partie les modèles qui ont été retenus sont des modèles conceptuels globaux de la relation pluie-débit, dont le calage est automatique. Il s'effectue à l'aide des méthodes de ROSENBROCK et de NELDER et MEAD.

Dans cette partie, différents points sont abordés. Nous décrirons d'abord les trois modèles globaux (CREC, MODGLO et GR3) fonctionnant au pas de temps journalier. Ensuite, une présentation de critères numériques utilisés pour le calage de ces modèles est effectuée. Le dernier point concerne des applications aux paramètres des modèles de certaines techniques d'analyse de données.

3.1. MODELES ET CRITERES UTILISES

3.1.1. Modèles CREC, MODGLO et GR3

Une multitude de modèles hydrologiques tente de simuler les débits journaliers en un point d'une rivière à partir de la connaissance de la pluie journalière moyenne reçue par le bassin versant.

Nous avons choisi d'utiliser, dans le cadre de cette étude de la relation pluie-débit, les trois modèles suivants: le modèle CREC, le modèle MODGLO et le modèle GR3. Ce choix a été orienté par la simple raison que cette étude fait partie du programme ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en Eau) initié par l'ORSTOM en Côte d'Ivoire, où ces trois modèles ont déjà été adoptés et utilisés en zone de savane (SERVAT et DEZETTER, 1991). C'est donc une occasion de les tester en d'autres zones climatiques.

D'une manière générale, le modèle est une représentation simplifiée d'un système hydrologique complexe. Cette représentation peut être physique, analogique ou mathématique.

Les modèles que nous utiliserons sont des modèles mathématiques qui décrivent le comportement du système à l'aide d'un ensemble d'équations.

On distingue dans les modèles mathématiques plusieurs termes:

- Le modèle est dit "stochastique" lorsqu'il prend en compte les distributions de probabilité des variables aléatoires qui le composent. Dans le cas contraire il est "déterministe".

- La distinction entre "conceptuel" et "empirique" est liée au fait que les équations du modèle prennent ou non en considération les processus physiques.

- On distingue également le modèle à "discrétisation spatiale" du modèle "global". Dans le modèle à "discrétisation spatiale", le bassin versant est découpé en surfaces élémentaires, et l'écoulement à l'exutoire du bassin est la résultante du comportement de chacune de ces surfaces élémentaires. Avec le modèle global, on ne cherche pas à prendre en compte la répartition spatiale des pluies et des autres variables; on considère alors que le bassin versant réagit dans son ensemble et l'on utilise des valeurs moyennes.

Les trois modèles que nous nous proposons d'utiliser sont des modèles globaux conceptuels déterministes.

3.1.1.1. Le modèle CREC

Le modèle CREC est un modèle conceptuel global obéissant à un schéma de type à réservoirs relativement classique, qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert (COMBES, 1985; GUILBOT, 1986; SERVAT et DEZETTER, 1990). Il a été mis au point au laboratoire d'Hydrologie de l'Université des Sciences de Montpellier.

La fonction de production, qui tient compte de l'état d'humidité du sol par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration (réservoir S), fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement.

La fonction de transfert, qui restitue l'hydrogramme de sortie du bassin comprend un terme d'écoulement rapide (réservoir H) et un terme d'écoulement lent à décroissance exponentielle (réservoir G).

La version du modèle CREC que nous avons utilisée comprend 10 paramètres (X_1 , X_2 , ..., 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 .

La détermination des valeurs des différents paramètres s'effectue à l'aide des méthodes d'optimisation de ROSENBROCK et de NELDER et MEAD (ROSENBROCK, 1960; NELDER et MEAD, 1964; SERVAT et DEZETTER, 1988) utilisées en séquence.

La figure 3.1 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

3.1.1.2. Le modèle MODGLO

Le modèle MODGLO est un modèle conceptuel global qui a été développé à l'ORSTOM par GIRARD. Comme pour le modèle CREC, on peut identifier une fonction de production et une fonction de transfert (SERVAT, 1986; DEZETTER, 1987).

La fonction de production prend en compte certains mécanismes physiques de la transformation pluie-débit (capacité de rétention en eau des sols, processus d'infiltration), bien que de nombreuses hypothèses simplificatrices y aient été apportées. Cette fonction de production réalise le calcul d'un ruissellement pur éventuel (RS).

La fonction de transfert initiale a été remplacée ici par une fonction comprenant trois réservoirs en parallèle (SERVAT et DEZETTER, 1990). Chacun des réservoirs est caractérisé par un coefficient d'alimentation assurant la répartition de la lame d'eau issue de la fonction de production (EAUG), et un coefficient de vidange permettant une modulation de l'écoulement dans le temps.

Le modèle MODGLO travaille au pas de temps journalier, et calcule donc un débit moyen journalier qui est la somme du ruissellement éventuel RS et de l'écoulement retardé RB.

Les paramètres du modèle sont optimisés selon la même procédure que pour le modèle CREC.

La figure 3.2 présente le schéma conceptuel du modèle MODGLO.

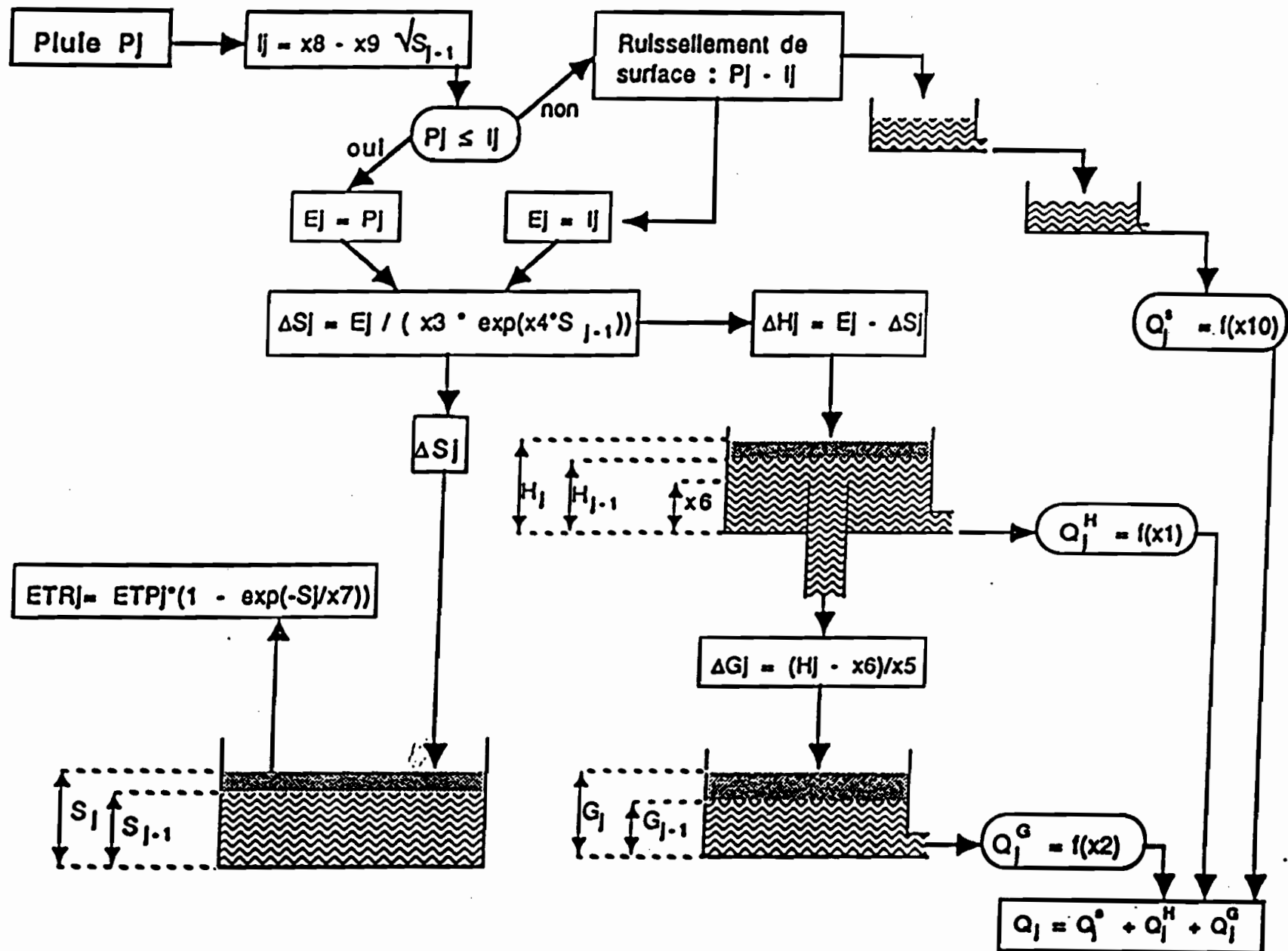


Figure 3.1 : Schéma conceptuel du modèle CREC

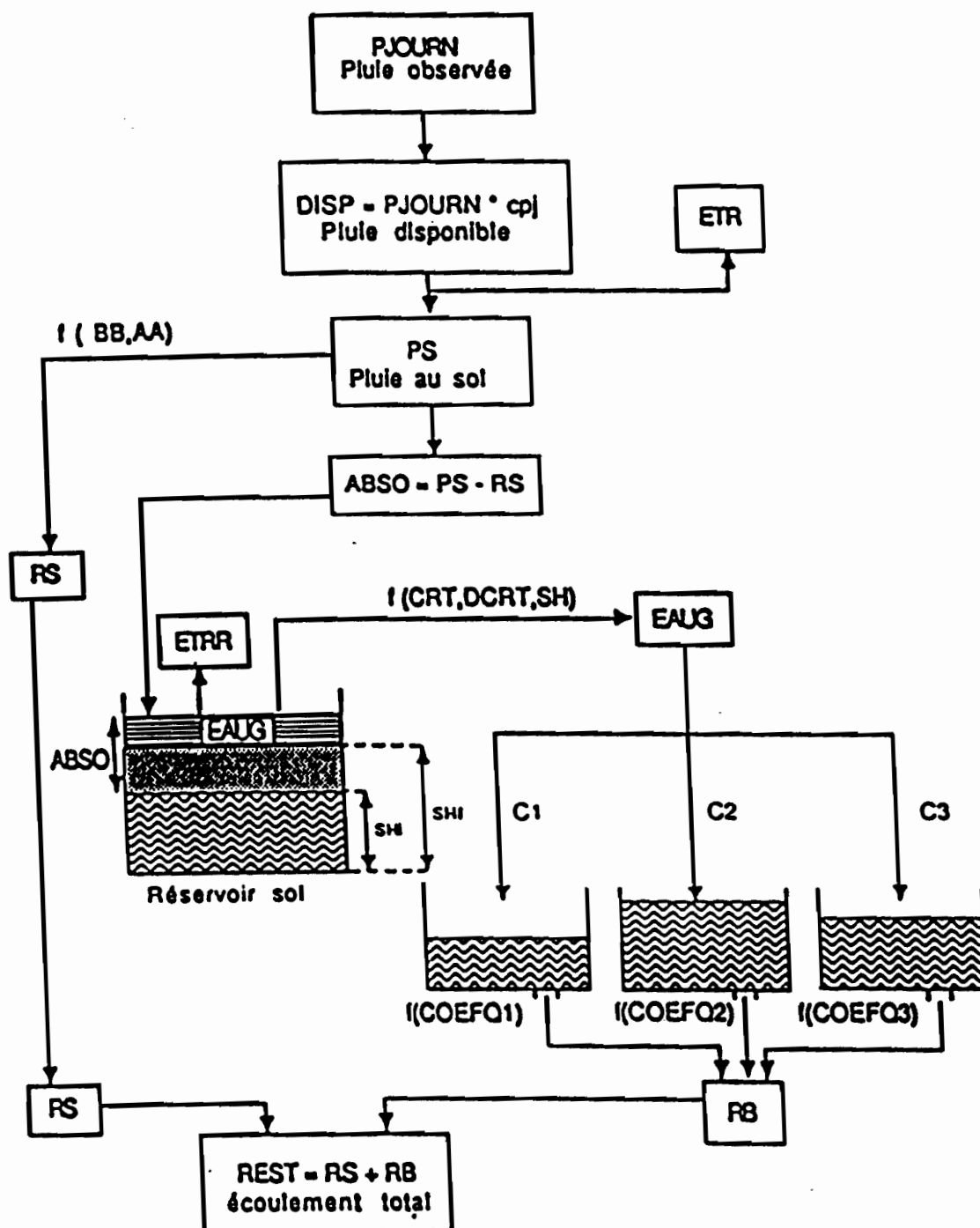


Figure 3.2 : Schéma conceptuel du modèle MODGLO

3.1.1.3. Le modèle GR3

Le modèle GR3 appartient lui aussi à la classe générale des modèles à réservoirs (EDIJATNO et MICHEL 1989).

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

- le réservoir-sol qui n'a comme seule sortie que le prélèvement occasionné par l'évapotranspiration potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette 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 du type quadratique.

D'après EDIJATNO 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 3.3 présente le schéma conceptuel du modèle GR3.

3.1.2. Les fonctions critères testées

3.1.2.1. Les critères numériques

L'optimisation automatique des paramètres d'un modèle nécessite l'utilisation d'une fonction critère, objet numérique de référence permettant d'améliorer le calage et aussi de faire des comparaisons entre modèles. Notons toutefois que chaque critère donné a une certaine influence sur la nature et la qualité du calage obtenu au terme du processus.

Parmi les nombreuses fonctions critères existant dans la littérature, cinq ont été testées afin de juger de leurs performances et de choisir celle conduisant au meilleur calage (SERVAT et DEZETTER 1990).

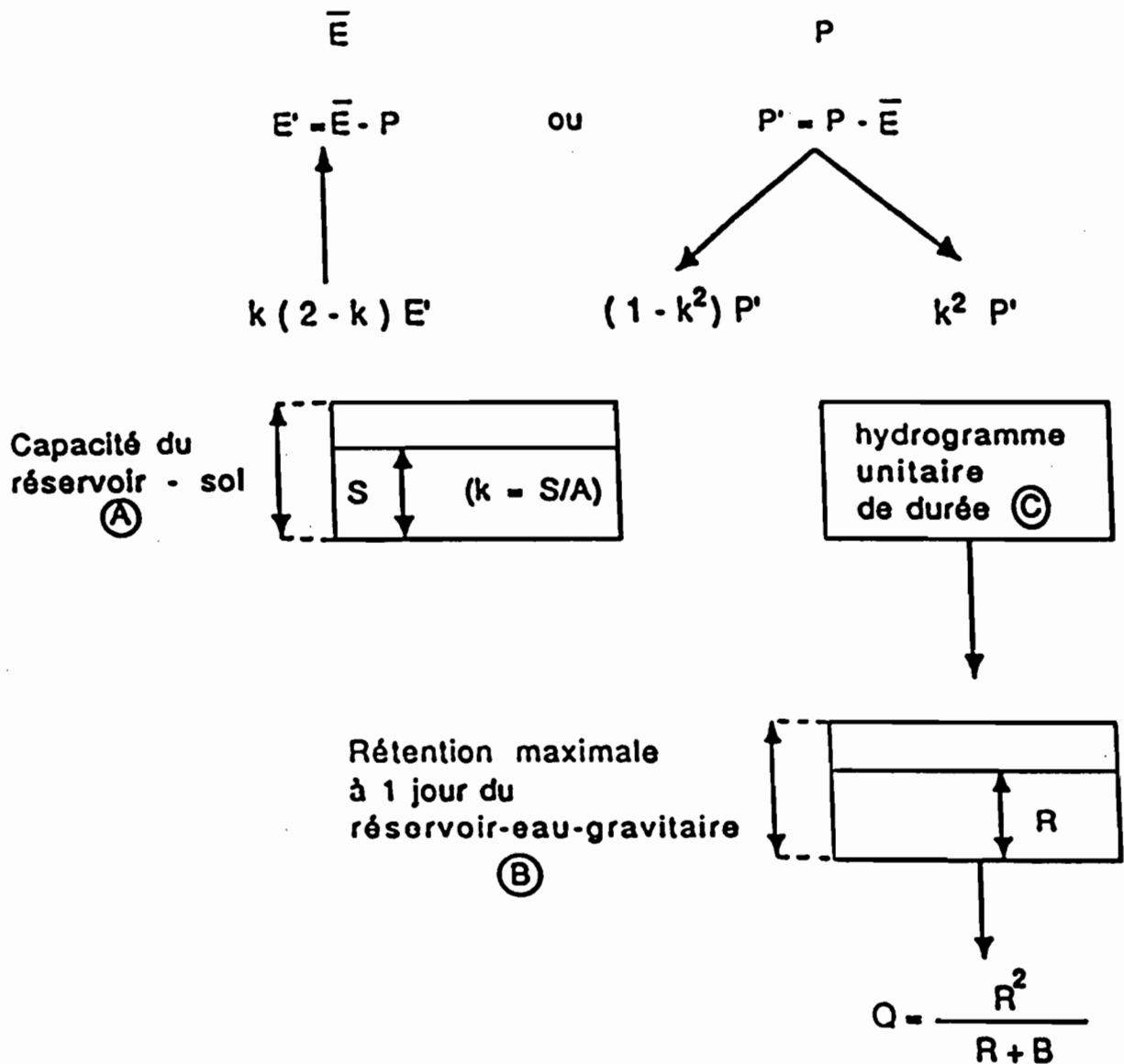


Figure 3.3 : Schéma conceptuel du modèle GR3

- Le critère CREC

Ce critère ainsi dénommé est celui qui était utilisé, à l'origine, dans le modèle CREC (COMBES, 1985). Il a pour expression:

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

avec: 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.

- Le critère CrecBi

C'est le critère de CREC auquel on a rajouté un terme de bilan. Sa formulation est la suivante:

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

Cette expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o.

- Le critère de Fortin

Ce critère est ainsi appelé parce qu'il a été 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 aussi vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o.

- Le critère de Nash

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

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_c - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_{mo})^2}$$

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o .

On peut faire une analogie de ce critère 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 un certain "rendement" du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression.

Pour une question d'homogénéité avec les autres critères, une forme modifiée du critère de Nash a été utilisée:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (Q_c - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_{mo})^2}$$

Cette nouvelle expression tend vers 0 lorsque Q_c tend vers Q_o . Elle donne le pourcentage de variance résiduelle par rapport à la variance totale.

- Le critère SExpER (Somme des Exponentielles des Ecarts Relatifs)

La formulation de ce critère est la suivante:

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

Le terme pondérateur Q_o/Q_{mo} 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 d'un point de vue pratique c'est l'écart à 1 que l'on a cherché à minimiser.

L'utilisation des cinq critères en calage systématique avec chacun des trois modèles retenus, sur quelques bassins versants de la zone de savane, a permis, à partir des tracés des séries observées et calculées, de dégager certains enseignements communs (SERVAT et DEZETTER, 1990):

(i) le critère CREC se révèle un peu "réducteur" dans la mesure où l'hydrogramme calculé a un volume qui est souvent inférieur à celui 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 du point de vue des étiages;

(v) le critère SExpER a un comportement qui est assez comparable à ceux des critères CREC et Fortin.

La seule valeur numérique de ces critères étant difficile à interpréter d'un point de vue hydrologique, SERVAT et DEZETTER (1990) ont défini un module d'évaluation comparative de la qualité des calages obtenus. Celui-ci, associé à une méthodologie du type de celle de DISKIN et SIMON (1977) a permis de départager les critères étudiés.

3.1.2.2. Le module d'évaluation comparative

Ce module d'évaluation comparative comprend plusieurs éléments d'appréciation du calage:

– **Le coefficient de corrélation lames observées–lames calculées**

Ce coefficient permet de prendre en compte les décalages dans le temps entre hydrogrammes observés et calculés

– **L'écart entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 observés et calculés**

Ces coefficients sont utilisés comme témoins de la dynamique des hydrogrammes, principalement en décrue.

– Deux coefficients d'appréciation du bilan volumique:

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

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

avec: L_o : lame écoulee observée (mm)

L_c : lame écoulee calculée (mm).

Bilan1 et Bilan2 tendent vers 0 lorsque L_c tend vers L_o . Ils sont calculés sur la totalité de la période de calage.

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

Le terme 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 donneraient 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

Les objectifs de cette étude étant la détermination des apports, la reconstitution des crues par rapport aux étiages a été privilégiée.

Dans chacune de nos zones d'étude, nous avons défini comme lame de crue, la lame écoulee sur la période pluvieuse correspondante. Ainsi, en zone de transition, la lame de crue est-elle calculée du 1^{er} Juin au 10 Novembre, et en zone de forêt du 1^{er} Mai au 20 Novembre.

Pour apprécier la reconstitution de ce volume de crue sur l'ensemble de la période considérée, à l'issue des différents calages, il a été défini l'Indice de Reconstitution du Volume de Crue (IRVC). 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 sur toute la période observée et étudiée. L'IRVC est la somme de ces écarts pondérés.

Son expression est:

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

Ou bien

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

IRVC tend vers 0 quand la crue calculée tend vers la crue observée.

L'étude systématique, à l'aide du module d'évaluation, des performances des critères sur quelques bassins versants a montré que c'est le critère de Nash qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage (SERVAT et DEZETTER, 1990).

Le critère de Nash a donc été utilisé pour la suite des opérations de modélisation afin d'atteindre les 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.

3.2. CALAGE DES MODELES AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Ce chapitre est consacré aux différents résultats enregistrés lors des opérations de modélisation au pas de temps journalier. Il s'agit du calage des modèles, de la validation croisée, de l'Analyse en Composantes Principales et de l'essai de prédétermination des paramètres.

Les différentes opérations ont été effectuées sur 90 stations-années en zone de forêt et 54 en zone de transition. Rappelons qu'en zone de forêt comme en zone de transition, nous avons distingué deux types de bassins versants: les petits bassins versants et les grands. Les petits bassins versants ont une superficie inférieure à 2 000 km² alors que celle des grands bassins est supérieure à 4 000 km².

Ajoutons ici une dernière précision, à savoir que si les calages de ces algorithmes ont été effectués au pas de temps journalier, l'interprétation (notamment graphique) en a été faite

au pas de temps décadaire (les lames décadaires étant la somme des écoulements journaliers), lequel pas de temps est fréquemment utilisé, en agronomie en particulier, pour évaluer les apports.

3.2.1. Méthodologie de calage

Le critère numérique de calage qui a été sélectionné est le critère de Nash. Ce critère a été associé à deux techniques d'optimisation non linéaire (méthodes de ROSENBROCK et de NELDER et MEAD) afin d'évaluer les solutions possibles et de retenir la meilleure d'entre elles (au sens de ce critère).

Les méthodes de ROSENBROCK et de NELDER et MEAD sont deux techniques itératives basées sur la recherche de l'optimum d'une fonction critère préalablement définie (ici le critère de Nash). Nous ne présenterons pas les algorithmes de ces deux méthodes d'optimisation car elles font l'objet de nombreuses publications (ROSENBROCK (1960), NELDER et MEAD (1964), GUILBOT (1971), HIMMELBLAU (1972), SERVAT et DEZETTER (1988a)).

Dans l'application pratique des deux méthodes, la méthodologie suivante a été adoptée:

- a) utilisation de la méthode de ROSENBROCK
- b) utilisation de la méthode de NELDER et MEAD
- c) répétition des deux précédentes séquences.

L'intérêt de la succession des deux méthodes s'explique par le fait que la méthode de ROSENBROCK est très efficace au début de la recherche de l'optimum. La méthode de NELDER et MEAD utilise donc comme point de départ le point d'arrivée de l'autre méthode et affine le résultat.

Pour l'arrêt du processus d'optimisation, nous avons défini un nombre maximum de 50 itérations par paramètre. Cette recommandation a été également adoptée pour la méthode de NELDER et MEAD. A chaque étape du processus, l'arrêt de l'optimisation se fait lorsque le maximum d'itérations est effectué ou lorsque la fonction critère de Nash ne varie plus.

Un autre point important de la méthodologie de calage a consisté à définir pour chaque paramètre des trois modèles retenus (CREC, MODGLO et GR3) un intervalle de variation et un point de départ.

3.2.2. Calage du modèle CREC

La version du modèle CREC utilisé ici comporte 10 paramètres à optimiser. Compte tenu du nombre maximum d'itérations fixé à 50 par paramètre, on aura au plus 500 itérations pour chaque séquence.

Le tableau 3.1 présente les conditions de l'optimisation.

Paramètre	Borne inférieure	Borne supérieure	Valeur de départ
X1	0.0001	1	0.20
X2	0.5	1	0.90
X3	0.0001	1	0.01
X4	0.0001	1	0.01
X5	1	200	10
X6	0	200	0.01
X7	1	200	20
X8	0	500	200
X9	0	10	7
X10	0.5	1	0.80

Tableau 3.1: Conditions de l'optimisation

Nous avons procédé, par optimisation des paramètres, au calage systématique, année par année, du modèle CREC sur l'ensemble des stations-années complètes et reconstituées, réparties de la façon suivante: en zone de forêt 62 stations-années sur les petits bassins et 28 sur les grands, et en zone de transition 26 sur les petits et 28 sur les grands.

Les tableaux 3.2 à 3.4 qui suivent, présentent respectivement les pourcentages de valeurs du critère de Nash inférieures à 0.10, 0.15 et 0.20, et les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum des principales caractéristiques des calages.

Pourcentage de calages avec "Nash" <	0.10	0.15	0.20
<u>FORET</u>			
Petits bassins	1.6	6.6	22.9
Grands bassins	7.1	14.3	32.1
<u>TRANSITION</u>			
Petits bassins	3.8	19.2	34.6
Grands bassins	21.4	39.3	57.1

Tableau 3.2: Valeurs du critère de Nash avec le modèle CREC

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne								
PBF	0.8661	0.1737	0.1774	32.59	128.8	7.51	0.3969	0.7715
GBF	0.8942	0.0798	0.1175	6.35	47.20	4.67	0.2726	0.8508
PBT	0.8660	0.1429	0.1860	2.83	17.45	8.28	0.3697	0.7781
GBT	0.9119	0.0575	0.1234	2.00	17.73	6.39	0.2189	0.8811
Ecart-type								
PBF	0.1076	0.1490	0.1482	37.97	116.19	7.05	0.2096	0.1420
GBF	0.0819	0.0564	0.1026	8.43	22.27	3.55	0.1349	0.0848
PBT	0.1218	0.1198	0.1604	2.91	13.43	7.82	0.2314	0.1721
GBT	0.0776	0.0466	0.0863	2.39	15.05	7.37	0.1409	0.0862
Minimum								
PBF	0.5727	0.0071	0.0057	0.50	4.70	0.18	0.0745	0.4023
GBF	0.6099	0.0002	0.0055	0.20	7.60	0	0.0738	0.5808
PBT	0.4810	0.0029	0.0056	0	0.10	0	0.0723	0.3238
GBT	0.6149	0.0051	0.0041	0	1.00	0	0.0449	0.6130
Maximum								
PBF	0.9921	0.7072	0.5424	151.3	478.2	40.0	0.9222	0.9637
GBF	0.9824	0.2096	0.4095	37.6	92.0	13.22	0.6638	0.9641
PBT	0.9811	0.4608	0.6359	11.5	46.9	33.33	0.8544	0.9632
GBT	0.9854	0.1676	0.3234	9.3	67.5	31.43	0.6035	0.9776

Tableau 3.3: Caractéristiques des calages du modèle CREC

DAC1: Différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2: différence d'autocorrélation d'ordre 2

PBF: Petit bassin en zone de forêt;

GBF: Grand bassin en zone de forêt;

PBT: Petit bassin en zone de transition;

GBT: Grand bassin en zone de transition

Au vu des tableaux 3.2 et 3.3 précédents, la qualité des calages apparaît comme étant très moyenne sur l'ensemble des bassins versants de forêt et de transition. Le critère de Nash moyen varie de 0.219 à 0.397. Les calages semblent par contre de bonne qualité sur les 28 stations-années des grands bassins de la zone de transition. Le critère de Nash moyen pour ces stations-années est de 0.219 et l'IRVC moyen vaut 6.39. De même, le coefficient de corrélation des lames décennales est de 0.91 et celui des lames journalières de 0.88. Dans 57% des cas, la valeur du critère de Nash y est inférieure à 0.20. Ces différentes valeurs montrent la bonne qualité des calages effectués sur les stations-années des grands bassins de la zone de transition.

Pour tous les calages effectués, nous avons tracé les hydrogrammes des lames décennales observées et calculées. Compte tenu du nombre élevé de graphiques tracés, nous avons jugé bon de ne présenter, pour chacune des deux zones, que les figures relatives à la valeur maximale, à une valeur moyenne et à la valeur minimale du critère de Nash (Cf. figures 3.4 à 3.9). Les caractéristiques de ces différents calages sont:

	Corrélation décennale	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
<u>FORET</u>								
NERO81	0.5727	0.3813	0.3585	88.5	277.7	13.54	0.9222	0.4216
DAVO70	0.9112	0.0459	0.0537	8.20	52.8	3.93	0.2928	0.8422
ZOKA85	0.9824	0.0366	0.0491	25.1	71.2	2.67	0.0738	0.9632
<u>TRANSITION</u>								
KANZ82	0.5406	0.4608	0.1705	7.70	27.9	8.84	0.8544	0.3238
BOUR84	0.9167	0.0569	0.1612	1.40	18.0	2.41	0.2542	0.8626
LOBO74	0.9854	0.0135	0.0295	1.90	7.50	0.27	0.0449	0.9776

Tableau 3.4: Caractéristiques de calages avec critère de Nash maximum, moyen et minimum (modèle CREC)

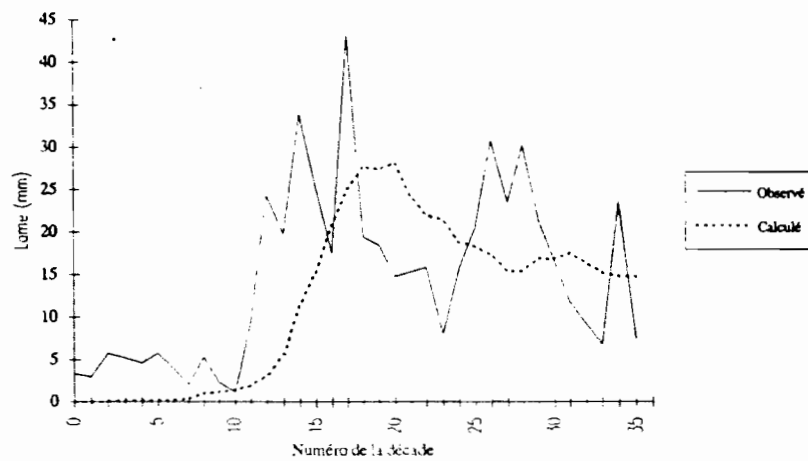


Figure 3.4: Modèle CREC, Néro à Route Grand Bérébi en 1981 (NERO81)

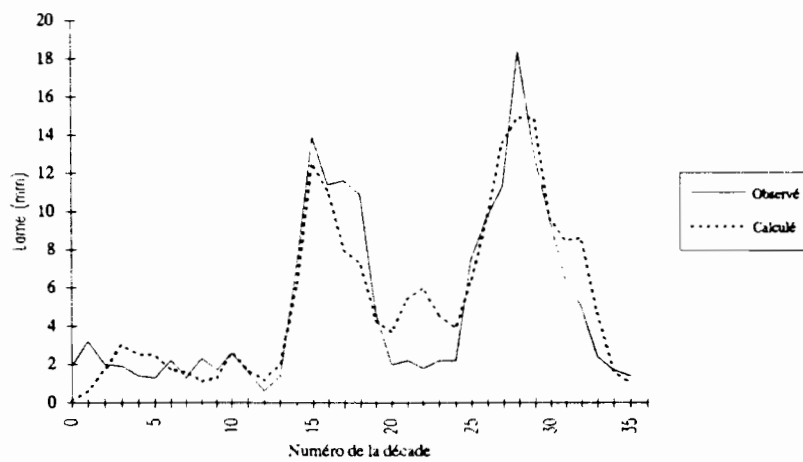


Figure 3.5: Modèle CREC, Davo à Dakpadou en 1970 (DAVO70)

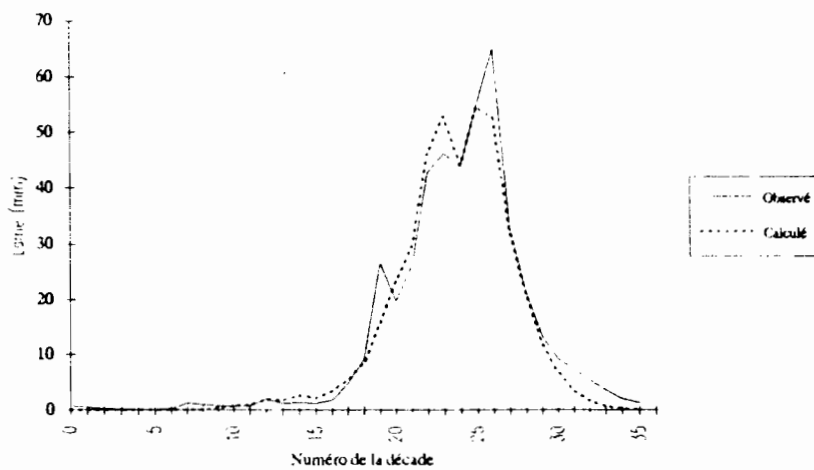


Figure 3.6: Modèle CREC, N'Zo à Kahin en 1985 (ZOKA85)

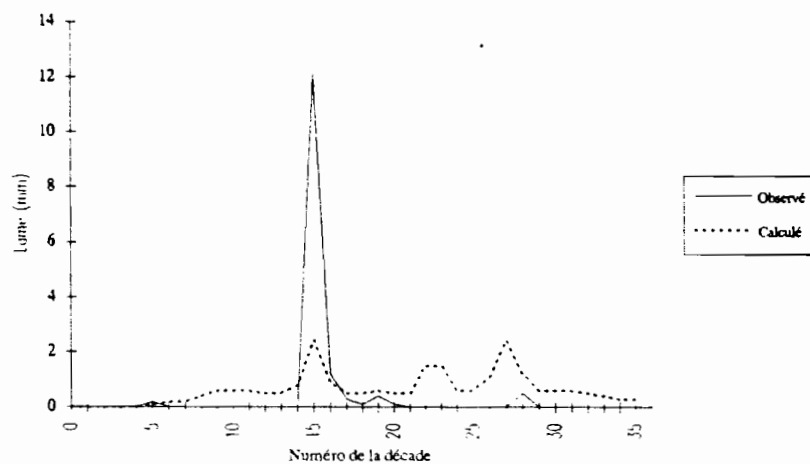


Figure 3.7: Modèle CREC, Kan à Zanoafla en 1982 (KANZ82)

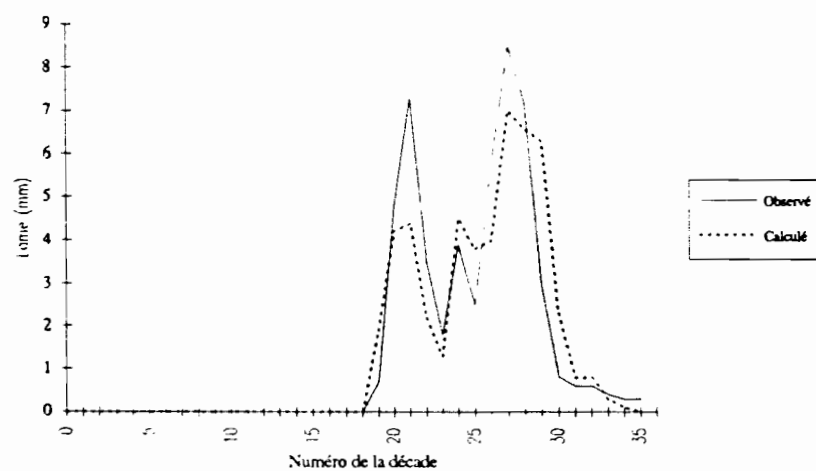


Figure 3.8: Modèle CREC, Baya à Bouroukro en 1984 (BOUR84)

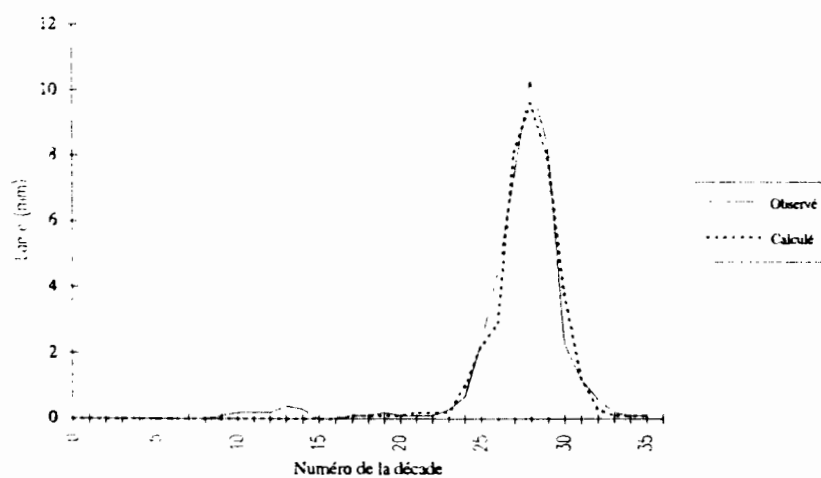


Figure 3.9: Modèle CREC, Lobo à Nibéhibé en 1974 (LOBO74)

Sur les hydrogrammes des lames décadaires observées et calculées, les périodes sèches et les pointes de crue sont généralement mal prises en compte par le modèle CREC. Cette situation peut s'expliquer d'une part, par le fait que les longues saisons sèches conduisent à une désaturation importante des horizons superficiels des sols, et que les phénomènes qui en résultent, en début de saison des pluies, sont difficilement restitués par ces modèles globaux, conçus et habituellement utilisés en zones tempérées où la pluviométrie est plus régulière. D'autre part, les algorithmes utilisés réagissent moyennement à certaines situations extrêmes (sécheresse importante et longue, précipitations très violentes) que l'on rencontre parfois en climat tropical.

3.2.3. Calage du modèle MODGLO

Le modèle MODGLO que nous avons utilisé comporte 14 paramètres à optimiser. Chaque séquence de recherche de l'optimum peut donc réaliser jusqu'à 700 itérations (14*50).

Les conditions de l'optimisation sont indiqués dans le tableau 3.5.

Comme précédemment le calage automatique a été effectué sur les 90 stations–années de la zone de forêt et les 54 de la zone de transition.

Paramètre	Borne inférieure	Borne supérieure	Valeur de départ
AA	0.01	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	0.001	1	0.5
C2	0.001	1	0.5
COEFQ1	0.001	1	0.5
COEFQ2	0.001	1	0.5
COEFQ3	0.001	1	0.5
SH1	0	1000	1
SH2	0	1000	1
SH3	0	1000	1

Tableau 3.5: Conditions de l'optimisation du modèle MODGLO

Contrairement au modèle CREC, le modèle MODGLO a enregistré beaucoup de très fortes valeurs du critère de Nash. Dans ces conditions, le calage par optimisation ne donne aucun résultat. Ainsi sur l'ensemble des 144 stations–années, 23 n'ont pu être calées par le modèle MODGLO. C'est donc sur les 121 stations–années restantes que nous avons établi les caractéristiques des calages des tableaux 3.6 et 3.7.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne								
PBF	0.8434	0.1603	0.1543	30.20	133.5	9.45	0.4271	0.7456
GBF	0.8487	0.0711	0.1226	10.86	58.13	9.27	0.3768	0.7909
PBT	0.8748	0.0910	0.1117	3.78	27.48	8.30	0.3232	0.8183
GBT	0.8618	0.0570	0.1257	4.52	25.73	13.16	0.3166	0.8291
Ecart-type								
PBF	0.1313	0.1243	0.1214	49.10	122.7	9.72	0.2119	0.1546
GBF	0.1035	0.0544	0.1140	15.56	23.06	9.47	0.1766	0.1076
PBT	0.0793	0.0602	0.0990	4.13	13.68	6.25	0.1488	0.0929
GBT	0.1163	0.0657	0.1160	4.94	18.89	11.44	0.2114	0.1220
Minimum								
PBF	0.4551	0.0053	0.0020	0.20	15.50	0.1180	0.1174	0.2980
GBF	0.5350	0.0013	0.0007	0.20	7.80	0.0527	0.0985	0.5072
PBT	0.6892	0.0069	0.0196	0.30	9.90	0.2888	0.1316	0.6336
GBT	0.5026	0.0018	0.0053	0.20	9.40	0.1828	0.1192	0.4955
Maximum								
PBF	0.9762	0.5589	0.5690	226.8	610.1	37.49	0.9114	0.9398
GBF	0.9771	0.1771	0.4010	75.5	106.9	37.74	0.7433	0.9505
PBT	0.9816	0.2213	0.3091	17.8	56.7	20.55	0.6085	0.9290
GBT	0.9663	0.2286	0.3630	18.9	90.7	52.41	0.8802	0.9393

Tableau 3.6: Caractéristiques des calages du modèle MODGLO

La qualité de ces calages automatiques avec le modèle MODGLO est médiocre (Cf. tableaux 3.6 et 3.7). La valeur du critère de Nash moyen est, en zone de forêt, de 0.427 et 0.377 respectivement sur les petits et les grands bassins. En zone de transition, cette valeur moyenne du critère de Nash est de 0.323 sur les grands bassins et de 0.317 sur les petits. Dans les deux zones, les calages sont meilleurs sur les grands bassins que sur les petits.

Sur l'ensemble des 121 stations-années des zones de forêt et de transition, les valeurs moyennes du critère de Nash varient de 0.317 à 0.427 alors que pour le modèle CREC, ces valeurs vont de 0.219 à 0.397. L'Indice de Reconstitution du Volume de Crue moyen (IRVC) dans le cas du modèle CREC va de 4.67 à 8.28, et de 8.30 à 13.6 pour le modèle MODGLO.

Pourcentage de calages avec "Nash" <	0.10	0.15	0.20
<u>FORET</u>			
Petits bassins	0	5.4	14.3
Grands bassins	3.8	7.7	23.1
<u>TRANSITION</u>			
Petits bassins	0	12.5	37.5
Grands bassins	0	13	47.8

Tableau 3.7: Valeurs du critère de Nash avec le modèle MODGLO

Ici également, nous avons tracé les hydrogrammes des lames décennales, observées et calculées, de tous les calages effectués. Comme précédemment, nous ne présentons que les tracés correspondants aux valeurs maximales, moyennes et minimales du critère de Nash, compte non tenu de la vingtaine de cas où tout calage s'est révélé impossible (Cf. figures 3.10 à 3.15). Les caractéristiques de ces calages sont définies dans le tableau 3.8.

	Corrélation décennale	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
<u>FORET</u>								
KAVI77	0.4551	0.3356	0.0804	1.70	28.3	26.90	0.9114	0.2980
TAYA81	0.9141	0.1291	0.0427	104.8	218.8	6.74	0.4014	0.7818
DAVO76	0.9771	0.0073	0.0007	9.50	47.3	0.89	0.0985	0.9505
<u>TRANSITION</u>								
LOBO81	0.7267	0.0722	0.1900	14.7	15.7	52.41	0.8802	0.6573
BADA84	0.8637	0.1352	0.3489	0.30	19.3	6.53	0.3175	0.8267
LOBO66	0.9639	0.0269	0.0686	4.10	38.5	2.94	0.1192	0.9388

Tableau 3.8: Caractéristiques de calages avec le critère de Nash maximum, moyen et minimum (modèle MODGLO)

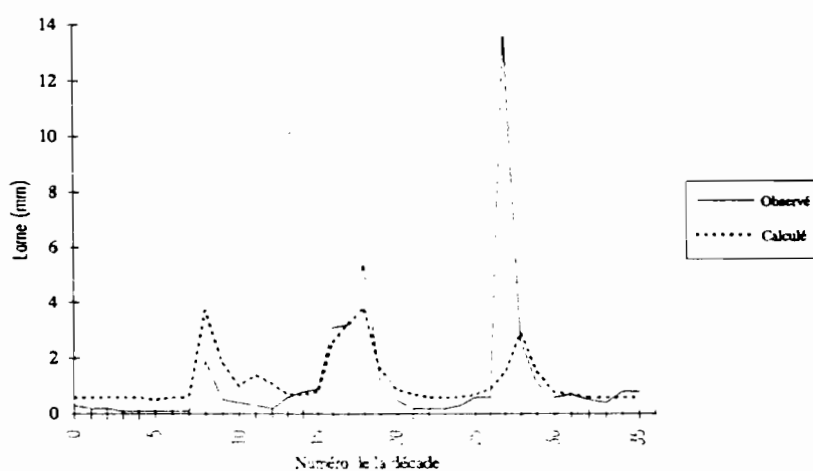


Figure 3.10: Modèle MODGLO, Kavi à M'Bessé en 1977 (KAVI77)

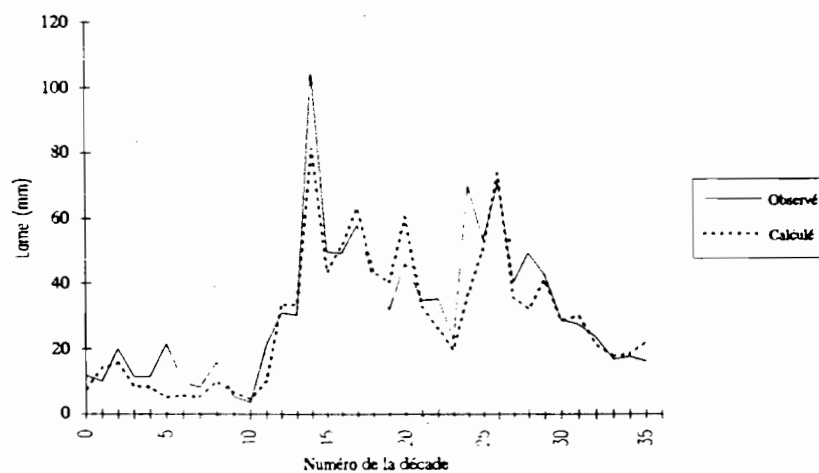


Figure 3.11: Modèle MODGLO, Tabou à Yaka en 1981 (TAYA81)

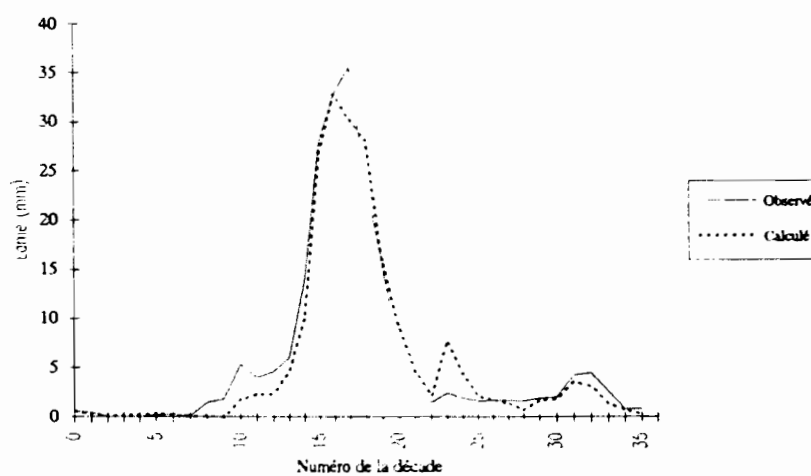


Figure 3.12: Modèle MODGLO, Davo à Dakpadou en 1976 (DAVO76)

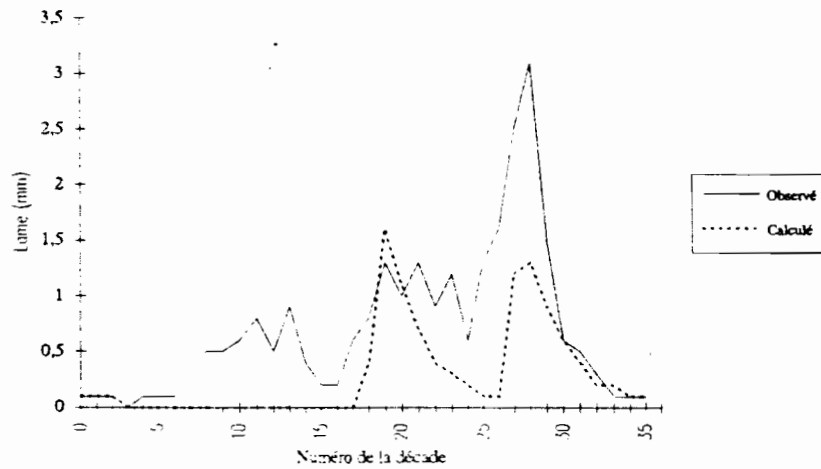


Figure 3.13: Modèle MODGLO, Lobo à Nibéhibé en 1981 (LOBO81)

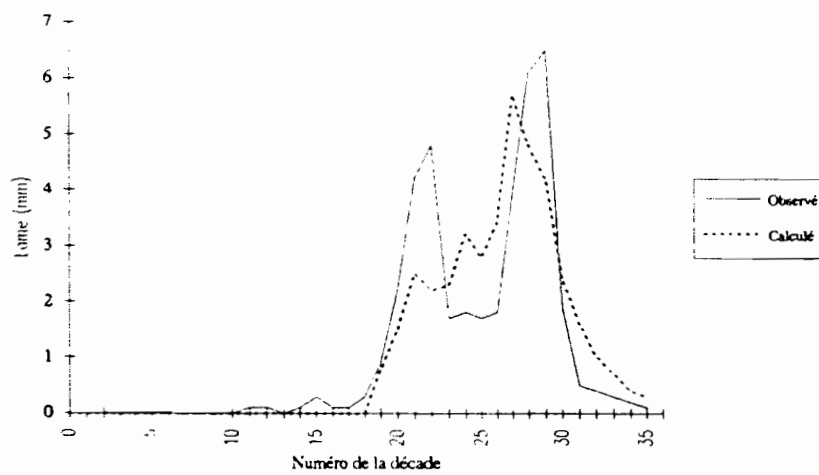


Figure 3.14: Modèle MODGLO, Baya à N'Dakro en 1984 (BADA84)

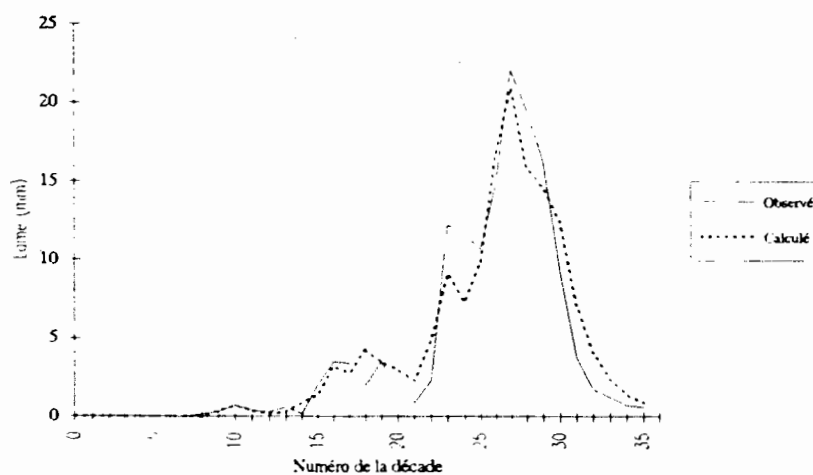


Figure 3.15: Modèle MODGLO, Lobo à Nibéhibé en 1966 (LOBO66)

3.2.4. Calages du modèle GR3

Le modèle GR3 est celui qui, parmi les trois algorithmes étudiés, possède le moins de paramètres à optimiser. Pour ce modèle à trois paramètres, deux autres valeurs ont été optimisées, le taux de remplissage initial du réservoir S, à savoir K_0 qui vaut $\frac{S_0}{A}$ et le débit de la veille Q_0 . Ces deux valeurs ont été prises en compte dans les paramètres à optimiser car elles ne peuvent pas être connues pour l'ensemble des 144 stations-années. Signalons toutefois que ces valeurs n'influencent que sur les premières valeurs de débit calculés par le modèle. Les conditions de l'optimisation ont été regroupées dans le tableau 3.9.

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 3.9: Conditions de l'optimisation du modèle GR3

Le calage, par optimisation des paramètres à l'aide du critère de Nash, a été effectué sur les 144 stations-années des zones de forêt et de transition. Nous avons noté quatre cas où le modèle GR3 n'a pu être valablement calé (valeur du critère de Nash supérieure à 1). Pour les autres stations-années, les caractéristiques des calages ont été reportés dans les tableaux 3.10 et 3.11.

Pourcentage de calages avec "Nash" <	0.10	0.15	0.20
<u>FORET</u>			
Petits bassins	1.7	10	21.7
Grands bassins	3.6	17.9	21.4
<u>TRANSITION</u>			
Petits bassins	4.2	4.2	25
Grands bassins	0	10.7	21.4

Tableau 3.10: Valeurs du critère de Nash avec le modèle GR3

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne								
PBF	0.8372	0.1506	0.1529	38.4	140.7	10.69	0.4077	0.7663
GBF	0.8443	0.0834	0.1429	11.99	58.64	7.87	0.3563	0.8022
PBT	0.8156	0.1287	0.2122	70.04	26.11	17.45	0.4176	0.7814
GBT	0.8355	0.0847	0.1867	5.83	25.82	11.41	0.3595	0.8283
Ecart-type								
PBF	0.1266	0.1099	0.1197	61.59	129.4	12.18	0.2229	0.1440
GBF	0.1099	0.0752	0.1465	9.64	24.57	12.82	0.1747	0.1117
PBT	0.1896	0.1060	0.1608	6.43	19.20	37.32	0.2608	0.2096
GBT	0.1354	0.0708	0.1173	4.19	20.47	13.23	0.2320	0.1010
Minimum								
PBF	0.4812	0.0020	0.0049	0.90	10.8	0	0.0829	0.4205
GBF	0.5010	0	0.0144	0.20	17.5	0.13	0.0731	0.4789
PBT	0.0530	0.0015	0.0016	0	3.10	0.15	0.0921	0.3626
GBT	0.3684	0.0021	0.0051	0.40	2.70	0.14	0.1045	0.5207
Maximum								
PBF	0.9754	0.4760	0.4870	415.6	528.4	60.62	0.9164	0.9642
GBF	0.9789	0.2787	0.5009	32.4	105.3	68.81	0.7743	0.9664
PBT	0.9735	0.4021	0.6155	23.8	70.6	183.3	0.9772	0.9516
GBT	0.9635	0.2745	0.4444	16.5	103.6	51.43	0.9745	0.9529

Tableau 3.11: Caractéristiques des calages du modèle GR3

Au vu des tableaux 3.10 et 3.11, la qualité des calages automatiques obtenus avec le modèle GR3 semble légèrement inférieure à celle issue de l'utilisation du modèle CREC, mais meilleure que dans le cas du modèle MODGLO qui nous avait conduit à de nombreuses impasses numériques. En effet, les valeurs moyennes du critère de Nash pour les quatre types de bassins (petits et grands bassins en zone de forêt, et petits et grands bassins en zone de transition) sont respectivement 0.408, 0.356, 0.418 et 0.359. Avec le modèle GR3, moins de 25% des valeurs du critère de Nash sont inférieures à 0.20.

Comme pour les deux premiers modèles, le tracé des lames décadaires observées et calculées a été systématiquement effectué. Les tracés de la valeur maximale, d'une valeur moyenne et de la valeur minimale du critère de Nash sont représentés sur les figures 3.16 à 3.21. Les caractéristiques correspondant à ces calages sont définies dans le tableau 3.12.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
<u>FORET</u>								
KOMA76	0.5898	0.1884	0.1449	415.6	528.4	58.91	0.9164	0.5105
MSAN84	0.8268	0.1960	0.2936	5.90	24.7	5.40	0.3897	0.7671
ZOKA85	0.9772	0.0413	0.0677	16.0	80.8	3.06	0.0731	0.9664
<u>TRANSITION</u>								
LOBO83	0.3684	0.1799	0.2256	0.90	3.70	51.43	0.9745	0.3943
BERE86	0.8220	0.0132	0.0429	2.40	13.2	4.66	0.3785	0.7897
BOUR85	0.9735	0.0981	0.0491	3.20	15.2	11.67	0.0921	0.9516

Tableau 3.12: Caractéristiques de calages avec le critère de Nash maximum, moyen et minimum (modèle GR3)

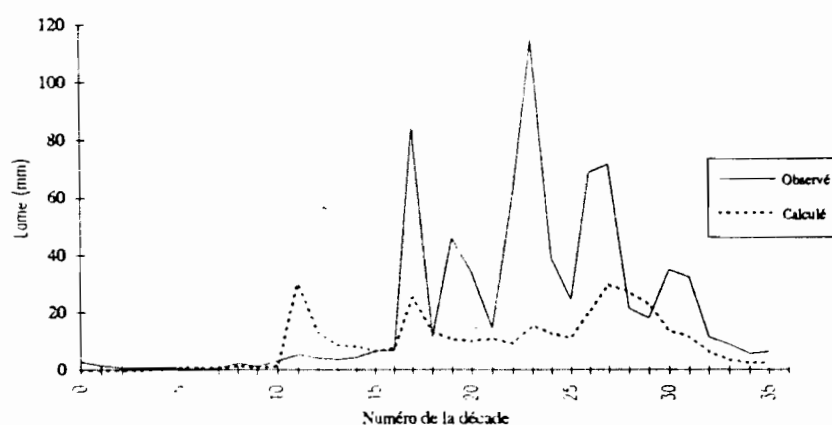


Figure 3.16: Modèle GR3, Ko à Man en 1976 (KOMA76)

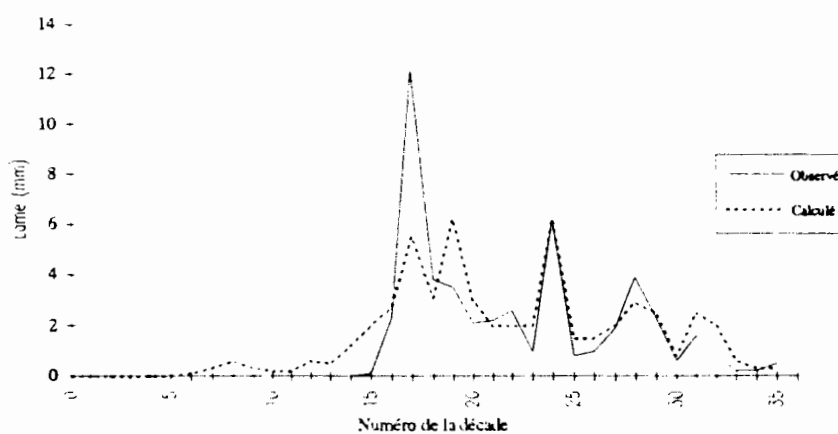


Figure 3.17: Modèle GR3, Mansan à Lobo en 1984 (MSAN84)

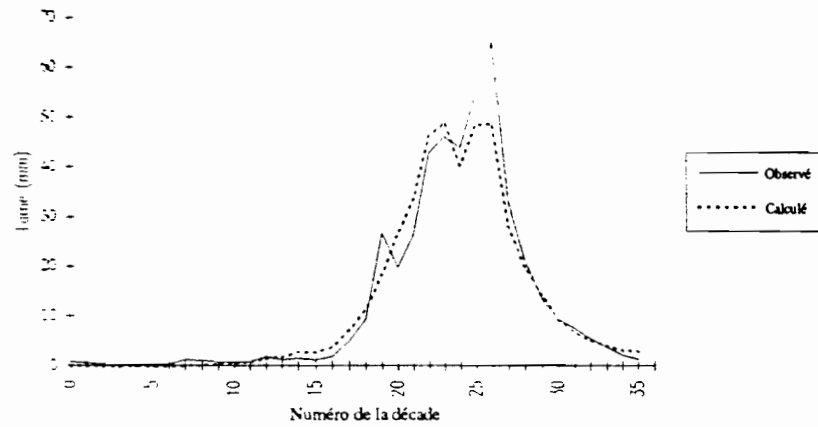


Figure 3.18: Modèle GR3, N'Zo à Kahin en 1985 (ZOKA85)

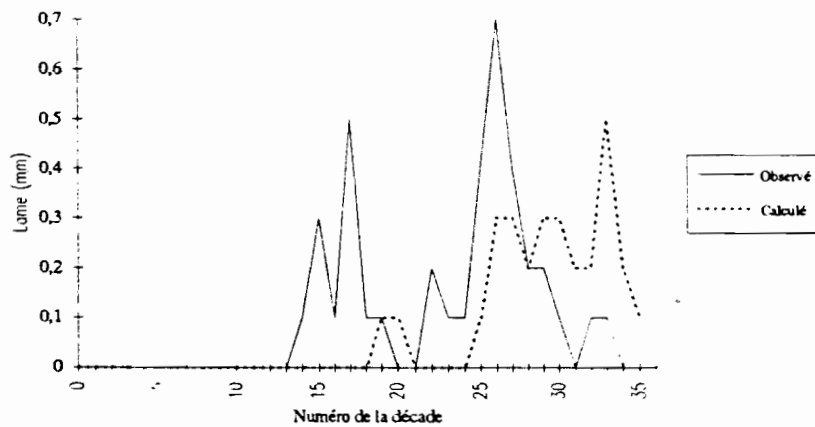


Figure 3.19: Modèle GR3, Lobo à Nibéhibé en 1983 (LOBO83)

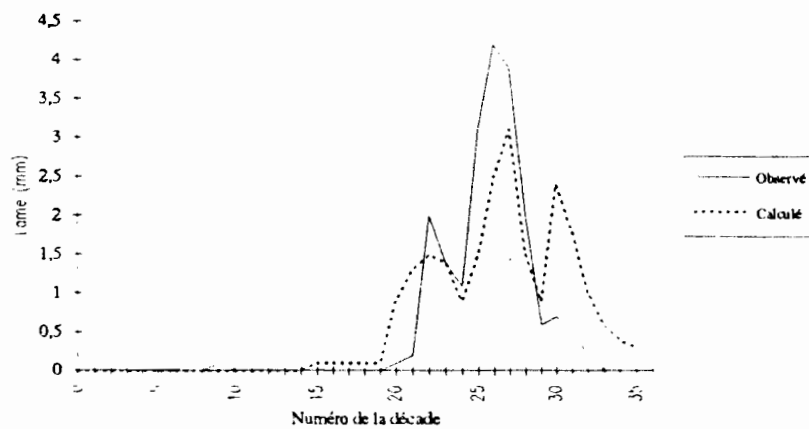


Figure 3.20: Modèle GR3, Béré à Bérédrumane en 1986 (BERE86)

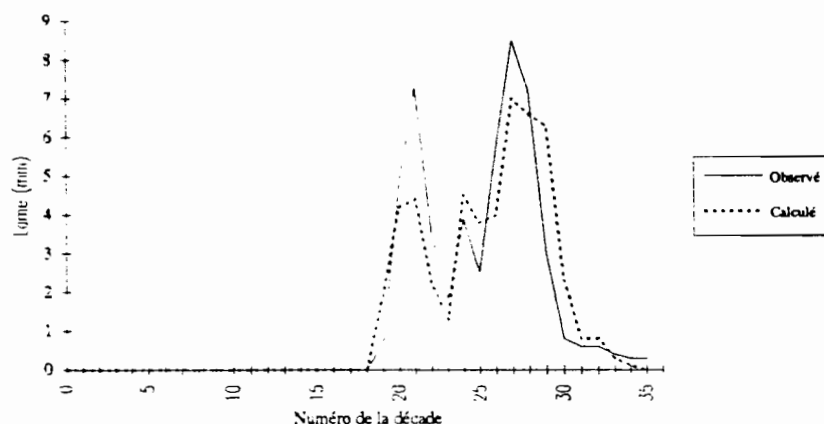


Figure 3.21: Modèle GR3, Baya à Bouroukro en 1985 (BOUR85)

Sur la figure 3.19 du calage du Lobo à Nibéhibé en 1983, qui est l'un des plus mauvais calages du modèle GR3, on note que les lames décadaires observées et calculées sont très faibles, résultat de la sécheresse exceptionnelle qui a sévi en 1983.

3.2.5. Conclusions

Le calage automatique, par optimisation des paramètres, des modèles CREC, MODGLO et GR3 sur l'ensemble des 144 stations-années a donné des résultats de qualité moyenne à médiocre selon les algorithmes, à en juger par les valeurs relativement élevées du critère de Nash. Le modèle CREC apparaît légèrement plus performant que les deux autres. Les trois modèles semblent s'adapter plus facilement aux grands bassins qu'à ceux de faible superficie. Ceci peut s'expliquer tant par leur pas de temps de calcul, qui n'est pas réellement significatif pour des bassins versants de faible superficie, que par la prise en compte inexistante ou insuffisante de mécanismes complexes (rôle de la litière, importance de l'interception et de l'évaporation, etc...), qui se retrouvent plus ou moins lissés et intégrés à une échelle d'espace plus grande.

3.3. VALIDATION CROISEE

La validation croisée effectuée consiste, pour un bassin versant donné, en l'utilisation d'un jeu de paramètres calés d'une année sur les autres années disponibles qui, elles, n'ont pas servi au calage de ces paramètres. Ce type de validation peut permettre de situer rapidement le caractère "général" des calages effectués. Il permet donc de se faire une idée de l'importance des caractéristiques intrinsèques du bassin versant sur les valeurs prises par les paramètres du modèle.

Pour comprendre la méthodologie de la validation croisée, prenons par exemple le bassin du N'Zo à Kahin qui compte 6 années de données (1981–1986). Avec chaque modèle, 6 calages annuels ont été effectués sur ce bassin, ce qui donne 6 jeux de paramètres. On valide alors chaque jeu de paramètres sur les 6 années, la validation sur la même année correspondant au calage bien évidemment.

La comparaison des résultats obtenus par le calage et la validation croisée s'est faite sur trois valeurs caractéristiques: la corrélation décadaire, l'Indice de Reconstitution du Volume de Crue (IRVC) du module d'évaluation comparative, et le critère de Nash. En considérant le N'Zo à Kahin, le tableau 3.13 donne l'écart en pourcentage entre les valeurs du calage et celles de la validation avec le modèle CREC et le critère de Nash.

Calage Années de données	1981	1982	1983	1984	1985	1986
1981	0.18	-222	-542	-102	-528	-238
1982	-106	0.13	-237	-54	-70	-20
1983	-232	-208	0.13	-296	-352	-235
1984	-47	-81	-447	0.22	-55	-37
1985	-471	-114	-240	-149	0.07	-68
1986	-31	-12	-354	-25	-57	0.19

Tableau 3.13: Ecart en % entre calage et validation, modèle CREC et critère de Nash, N'Zo à Kahin

Sur la diagonale de ce tableau, on trouve les valeurs du critère de Nash pour les calages annuels. Le critère de Nash du calage de l'année 1983 est de 0.13, mais l'application du jeu de paramètres de l'année 1982 par exemple sur cette même année donne une valeur de 0.40, ce qui conduit à un écart de -208%. On parle de perte quand la valeur est négative et de gain quand elle est positive. Dans notre exemple, on a une perte de 208% sur le critère de Nash. Cela signifie que l'hydrogramme obtenu par validation est de moins bonne qualité que l'hydrogramme calé.

En examinant le tableau 3.13, on note que la validation croisée avec le modèle CREC et le critère de Nash sur le Bassin du N'Zo à Kahin n'a conduit qu'à des pertes, souvent importantes.

Les tableaux 3.14 et 3.15 sont du même type que le tableau précédent mais présentent cette fois l'IRVC et la corrélation décadaire sur le même bassin du N'Zo.

Calage	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Années de données						
1981	5.73	-617	-1272	-228	-908	-606
1982	-987	2.74	-1014	-469	-183	1.46
1983	-538	-525	6.7	-606	-621	-522
1984	-1449	-1768	-4894	1.18	-1554	-900
1985	-1516	-365	-122	-919	2.63	-455
1986	-267	67.1	-1006	-191	-34.3	5.01

Tableau 3.14: Ecart en % entre calage et validation, modèle CREC et l'IRVC, N'Zo à Kahin

Calage	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Années de données						
1981	0.95	-3.41	1.10	-6.15	-9.31	-5.09
1982	-1.22	0.97	-2.75	-2.94	-4.59	-1.61
1983	-1.89	-10.1	0.97	-10.0	-21.0	-8.20
1984	-3.43	-1.58	-4.03	0.91	-1.89	-1.45
1985	-7.74	-2.45	-8.73	-0.15	0.98	-1.51
1986	0.73	0.35	-1.31	-1.35	-5.01	0.92

Tableau 3.15: Ecart en % entre calage et validation, modèle CREC et coefficient de corrélation décadaire, N'Zo à Kahin

Comme le tableau 3.13, les valeurs de la diagonale de ces deux tableaux sont les valeurs de calage, les autres représentant l'écart entre valeurs de calage et valeurs de validation.

Le modèle CREC étudié avec l'IRVC a enregistré 2 gains contre 28 pertes, alors qu'il présente 3 gains et 27 pertes du point de vue du coefficient de corrélation décadaire.

Pour les 27 bassins versants des deux zones étudiées, nous avons dressé par modèle les tableaux des trois valeurs caractéristiques (Nash, IRVC et Corrélation décadaire) considérées, soit un total de 81 tableaux. L'examen de ces tableaux montre que le nombre de gains obtenus est très faible comparativement aux pertes. Compte tenu du nombre important de tableaux, nous n'avons relevé par modèle que le pourcentage de gains par rapport au total de validations effectuées par bassin. Les tableaux 3.16 à 3.18 indiquent ces pourcentages pour les trois valeurs caractéristiques (Nash, IRVC et Corrélation décadaire).

Au regard des tableaux, on note que l'application du jeu de paramètres calés d'une année sur une autre année n'a pas engendré d'amélioration notable au niveau des trois critères considérés (Nash, Corrélation décadaire et IRVC). En effet le nombre de cas de gains enregistré est très faible. Pour le modèle CREC, on note 9 gains avec le critère de Nash, 91

avec la corrélation décadaire et 124 avec l'IRVC, soit respectivement 0.8%, 8.3% et 11.3% du nombre total de validations effectuées. Pour le modèle MODGLO, les pourcentages de gains des trois critères dans le même ordre que précédemment sont 5.1%, 13.6% et 10.2%. Quant au modèle GR3, il a enregistré 0.3%, 13% et 20.7% de gains avec le critère de Nash, la corrélation décadaire et l'IRVC.

Bassin	Nombre total de validations	Critère	% de gain
Kan à Zanoafla	20	Nash	5
Ko à Man	156	Nash	0.6
Lobo à Nibéhibé	240	Nash	0.8
Néka à Nékaounié	30	Nash	13.3
Néro à Rte Bérébi	12	Nash	8.3
Baya à N'Dakro	6	Corrélation	16.7
Davo à Dakpadou	272	Corrélation	9.9
Guéri à Diaboua	6	Corrélation	16.7
Guéri à Gagnoa	6	Corrélation	33.3
Kan à Bodokro	12	Corrélation	16.7
Kan à Zanoafla	20	Corrélation	5
Kavi à M'Bessé	132	Corrélation	12.9
Ko à Logoualé	42	Corrélation	4.8
Ko à Man	156	Corrélation	3.2
Lobo à Nibéhibé	240	Corrélation	7.9
Néka à Nékaounié	30	Corrélation	23.3
Néro à Rte Bérébi	12	Corrélation	16.7
N'Zo à Kahin	30	Corrélation	6.7
N'Zo à Zoba	6	Corrélation	16.7
Tabou à Olodio	2	Corrélation	50
Tabou à Yaka	12	Corrélation	8.3
Agnéby à Agboville	20	IRVC	5
Davo à Dakpadou	272	IRVC	18.4
Dioré à Karakro	2	IRVC	50
Guéri à Gagnoa	6	IRVC	16.7
Kan à Dimbokro	42	IRVC	7.1
Kan à Zanoafla	20	IRVC	15
Kavi à M'Bessé	132	IRVC	18.9
Ko à Logoualé	42	IRVC	4.8
Ko à Man	156	IRVC	7
Lobo à Nibéhibé	240	IRVC	5
Mansan à Lobo	6	IRVC	16.7
Néka à Nékaounié	30	IRVC	16.7
Néro à Rte Bérébi	12	IRVC	8.3
N'Zo à Kahin	30	IRVC	6.7
Tabou à Olodio	2	IRVC	50
Tabou à Yaka	12	IRVC	50

Tableau 3.16: Validation croisée, gains avec le modèle CREC

Il résulte de l'ensemble de ces validations croisées que c'est le critère de Nash qui est le moins sensible à une quelconque amélioration.

En examinant les calages des années sur lesquelles la validation croisée a occasionné des gains, on se rend compte que ces années sont en général celles où il y a eu, initialement, les plus mauvais calages (selon le critère de Nash). Ces gains pourraient donc avoir un caractère relativement aléatoire.

Bassin	Nombre total de validations	Critère	% de gain
Agnéby à Agboville	20	Nash	25
Baya à Yébouakro	20	Nash	10
Davo à Dakpadou	272	Nash	2.2
Guéri à Diaboua	6	Nash	33.3
Kan à Bodokro	12	Nash	16.7
Kan à Dimbokro	42	Nash	9.5
Kan à Zanoafla	20	Nash	5
Kavi à M'Bessé	132	Nash	9.1
Lobo à Nibéhibé	240	Nash	7.1
Mansan à Lobo	6	Nash	33.3
Néka à Nékaounié	30	Nash	10
Baya à Yébouakro	20	Corrélation	10
Davo à Dakpadou	272	Corrélation	24.6
Guéri à Gagnoa	6	Corrélation	33.3
Kavi à M'Bessé	132	Corrélation	16.7
Ko à Logoualé	42	Corrélation	2.4
Ko à Man	156	Corrélation	5.1
Lobo à Nibéhibé	240	Corrélation	15
Néka à Nékaounié	30	Corrélation	26.7
Néro à Rte Bérébi	12	Corrélation	8.3
N'Zo à Kahin	30	Corrélation	6.7
Baya à Yébouakro	20	IRVC	10
Davo à Dakpadou	272	IRVC	13.2
Guéri à Diaboua	6	IRVC	16.7
Guéri à Gagnoa	6	IRVC	16.7
Kan à Dimbokro	42	IRVC	11.9
Kavi à M'Bessé	132	IRVC	14.4
Ko à Logoualé	42	IRVC	4.8
Ko à Man	156	IRVC	7.7
Lobo à Nibéhibé	240	IRVC	7.1
Néka à Nékaounié	30	IRVC	16.7
Néro à Rte Bérébi	12	IRVC	16.7
N'Zo à Kahin	30	IRVC	3.3
N'Zo à Zoba	6	IRVC	16.7
Tabou à Olodio	2	IRVC	100
Tabou à Yaka	12	IRVC	50

Tableau 3.17: Validation croisée, gains avec le modèle MODGLO

Bassin	Nombre total de validations	Critère	% de gain
Davo à Dakpadou	272	Nash	0.4
Lobo à Nibéhibé	240	Nash	0.8
Agnéby à Agboville	20	Corrélation	20
Béré à Bérédrmane	2	Corrélation	50
Davo à Dakpadou	272	Corrélation	15.8
Kan à Bodokro	12	Corrélation	16.7
Kan à Zanoafla	20	Corrélation	25
Kavi à M'Bessé	132	Corrélation	16.7
Ko à Logoualé	42	Corrélation	7.1
Ko à Man	156	Corrélation	9.6
Lobo à Nibéhibé	240	Corrélation	14.6
Néka à Nékaounié	30	Corrélation	16.7
Néro à Rte Bérébi	12	Corrélation	25
N'Zo à Kahin	30	Corrélation	6.7
Tabou à Olodio	2	Corrélation	50
Tabou à Yaka	12	Corrélation	8.3
Agnéby à Agboville	20	IRVC	45
Baya à Yébouakro	20	IRVC	20
Davo à Dakpadou	272	IRVC	32
Dodo à Wéoulo	2	IRVC	50
Guéri à Diaboua	6	IRVC	33.3
Guéri à Gagnoa	6	IRVC	33.3
Kan à Dimbokro	42	IRVC	40.5
Kan à Zanoafla	20	IRVC	10
Kavi à M'Bessé	132	IRVC	23.5
Ko à Logoualé	42	IRVC	7.1
Ko à Man	156	IRVC	7.7
Lobo à Nibéhibé	240	IRVC	13.3
Mansan à Lobo	6	IRVC	33.3
Néka à Nékaounié	30	IRVC	20
Néro à Rte Bérébi	12	IRVC	16.7
N'Zo à Kahin	30	IRVC	10
N'Zo à Zoba	6	IRVC	50
Soungourou à M'Bahiakro	6	IRVC	16.7
Tabou à Olodio	2	IRVC	50
Tabou à Yaka	12	IRVC	50

Tableau 3.18: Validation croisée, gains avec le modèle GR3

Par contre, les pertes liées à l'utilisation d'un jeu de données calé sur une autre année sont pratiquement systématiques, et se traduisent par une dégradation extrêmement importante des différents critères d'appréciation considérés.

Compte tenu de ces mauvais résultats, on peut dire que les paramètres calés d'une année donnée semblent très spécifiques et caractéristiques de cette année. Cela pourrait traduire le fait que les caractéristiques intrinsèques des bassins versants sont loin d'être les

seules à avoir un rôle important dans la réponse du bassin versant aux précipitations, et dans les valeurs prises par les paramètres calés des modèles.

3.4. TECHNIQUES D'ANALYSE DE DONNEES APPLIQUEES AUX JEUX DE PARAMETRES

Comme dans le cas de l'étude réalisée au pas de temps mensuel, nous avons commencé par une étude de corrélation linéaire simple, suivie d'une Analyse en Composantes Principales. Les résultats sont extrêmement décevants et ne permettent en rien de caractériser, d'une manière ou d'une autre, les valeurs prises par les paramètres à l'issue des calages.

Nous avons donc décidé, dans notre exposé, de passer directement aux essais de prédétermination des paramètres des modèles au moyen d'équations de régression multiple.

Compte tenu du fait que sur certains des bassins versants retenus, nous n'avons pas pu obtenir les caractéristiques d'occupation des sols; les données ont été scindées en deux types: les données avec des caractéristiques d'occupation des sols et les données sans ces caractéristiques. Sur chaque type, on définit deux échantillons de données. Le premier échantillon sert à l'établissement des équations de prédétermination, et le second à leur validation.

3.4.1. Variables et échantillons

3.4.1.1. Variables utilisées

Les variables utilisées pour tenter d'expliquer et de prédéterminer les valeurs des paramètres sont les mêmes que précédemment.

Rappelons rapidement qu'il s'agit de:

- . Pluie annuelle (Pluie_An).
- . Pluie cumulée (P_C) au 15 Mai, 15 Juin, 15 Juillet, 15 Août, 15 Septembre, 15 Octobre et 15 Novembre (P_{C5} = Pluie cumulée du 1^{er} Janvier au 15 Mai).
- . Pluie relative (P_r) au 15 Mai, 15 Juin, 15 Juillet, 15 Août, 15 Septembre, 15 Octobre et 15 Novembre ($P_{r5} = P_{C5}/\text{Pluie_An}$).
- . Superficie.

. Compacité: coefficient de Gravelius = $\frac{0.28 * P}{\sqrt{S}}$ (P: périmètre, S: superficie du Bassin).

. Occupation des sols: pourcentage de savane, de forêt, de cultures et d'habitat.

A ces variables qui sont autant de descripteurs du bassin versant et du contexte climatique de l'année considérée, viennent s'ajouter les variables caractéristiques du calage que sont les paramètres proprement dits du modèle considéré.

3.4.1.2. Structure des échantillons

Pour chacune des deux zones étudiées (forêt et transition), nous avons défini les échantillons de calage et de validation par tirage aléatoire. La répartition numérique est la suivante (les échantillons ont été constitués sur la base approximative de 2/3 calage, 1/3 validation):

* En zone de forêt:

– Echantillon sans occupation des sols:

+ prédétermination sur 60 individus,

+ validation sur 30 individus.

– Echantillon avec occupation des sols:

+ prédétermination sur 25 individus,

+ validation sur 13 individus.

* En zone de transition:

– Echantillon sans occupation des sols:

+ prédétermination sur 40 individus,

+ validation sur 14 individus.

– Echantillon avec occupation des sols:

+ prédétermination sur 20 individus,

+ validation sur 12 individus.

3.4.2. Equations de prédétermination des paramètres des modèles

Comme pour le modèle à pas de temps mensuel, c'est un Stepwise ascendant qui a été utilisé pour élaborer les équations de prédétermination.

La méthode admet une constante qui peut être prise en compte si elle est significative (valeur t de Student correspondant $> |1|$). Dans les cas contraires, l'équation est recalculée sans constante.

Les résultats obtenus par l'application de cette méthode sont présentés pour chacun des trois modèles pluie-débit étudiés.

3.4.2.1. Modèle CREC

Il est rapidement apparu nécessaire d'utiliser les valeurs transformées par le logarithme népérien $\ln(X)$, afin d'éviter d'obtenir des valeurs négatives. Pour une question d'homogénéité, les variables explicatives Pluie annuelle et Pluies cumulées ont été également transformées.

Pour ce modèle, et compte tenu des calages obtenus jusqu'alors, il est nécessaire de calculer sept équations de régression correspondant à chacun des sept paramètres $X_1, \dots, X_7$ réellement utilisés. Les trois paramètres X_8, X_9 et X_{10} sont, en effet, inopérants dans l'ensemble des calages effectués

Les tableaux 3.21 à 3.24 présentent les résultats donnés par le modèle CREC. Ces résultats concernent les valeurs transformées $\ln(X_i)$ ($i = 1$ à 7).

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
$\ln(X_1)$ ($R^2 = 0.8611$)	Compacité	-3.905834	0.204221	-19.1255
$\ln(X_2)$ ($R^2 = 0.1138$)	Constante	1.567761	0.591004	-2.6527
	Superficie	0.000026	0.000009	2.8305
	$\ln(P_{c8})$	0.190052	0.084755	2.2424
$\ln(X_3)$ ($R^2 = 0.4271$)	Constante	-45.725507	6.244928	-7.322
	$\ln(\text{Pluie_An})$	5.014283	0.786759	6.3733
	Compacité	3.842995	1.256544	3.0584
$\ln(X_4)$ ($R^2 = 0.9546$)	$\ln(\text{Pluie_An})$	-1.003521	0.08025	-12.5049
	P_{t5}	7.096079	1.908115	3.7189
$\ln(X_5)$ ($R^2 = 0.7142$)	$\ln(P_{c5})$	0.30585	0.025497	12.142
	Constante	66.95088	20.04529	3.34
$\ln(X_6)$ ($R^2 = 0.4225$)	P_{t6}	-128.512	41.56520	-3.918
	X_4	1854.966	299.8663	6.186
$\ln(X_7)$ ($R^2 = 0.3335$)	Constante	23.18281	3.51559	6.5943
	$\ln(P_{c6})$	-2.976098	0.53869	-5.5247

Tableau 3.19: Modèle CREC. équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon sans occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(X1) (R ² = 0.9002)	Compacité	-4.110424	0.279302	14.7168
Ln(X2) (R ² = 0.2434)	Constante Forêt	-0.333636 0.563221	0.053606 0.190722	-6.2238 2.9531
Ln(X3) (R ² = 0.2968)	Constante P _{r5}	0.567836- 11.46277	0.983218 3.435896	-0.5775 -3.3362
Ln(X4) (R ² = 0.1479)	Constante Ln(Pluie_An)	6.937972 -1.653061	5.292604 0.727331	1.3109 -2.2728
Ln(X5) (R ² = 0.1874)	Constante P _{r6}	0.013311 3.401386	0.554652 1.330709	0.024 2.5561
Ln(X6) (R ² = 0.6388)	Constante Superficie P _{r8} X7	82.71965 -0.004613 -129.3145 0.256208	38.06876 0.002011 51.45252 0.057301	2.1729 -2.2943 -2.5133 4.4712
Ln(X7) (R ² = 0.2247)	Constante P _{r7}	6.212067 -2.838042	0.539164 1.006151	11.5217 -2.8207

Tableau 3.20: Modèle CREC, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon avec occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Ln(X1) (R ² = 0.3078)	Constante Superficie Ln(P _{c11})	22.777207 -0.000342 -3.817919	7.417655 0.000129 1.066405	3.0707 -2.6444 3.5802
Ln(X2) (R ² = 0.1158)	Constante Compacité	0.437992 -0.442069	0.243395 0.17888	1.7995 -2.4713
Ln(X3) (R ² = 0.4831)	Constante P _{r5} Ln(P _{c6}) P _{r6} P _{r11}	-26.38750 -11.77132 1.066629 4.229277 16.85204	4.390869 2.522793 0.479026 2.018372 4.484914	-6.0096 -4.666 2.2267 2.0954 3.7575
Ln(X4) (R ² = 0.2885)	Constante Ln(P _{c10})	7.271214 -1.73334	2.911487 0.422698	2.4974 -4.1007
Ln(X5) (R ² = 0.3531)	Constante Ln(P _{c11})	16.974763 -2.102299	3.086129 0.44535	5.5003 -4.7206
Ln(X6) (R ² = 0.5519)	Constante P _{r11} X5	-278.6114 283.7902 0.763223	142.6530 143.6157 0.114969	-1.9531 1.976 6.6385
Ln(X7) (R ² = 0.1535)	Constante Ln(P _{c10})	-11.34396 2.101556	5.095356 0.739758	-2.2263 2.8409

Tableau 3.21: Modèle CREC, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon sans occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(X1) ($R^2 = 0.3534$)	Constante	-11.05855	1.727737	-6.4006
	P _{r5}	18.623364	5.519196	3.3743
Ln(X2) ($R^2 = 0.5789$)	Constante	0.894939	0.386156	2.3176
	Superficie	0.000025	9.18E-07	2.7344
	Compacité	-0.895224	0.27242	-3.2863
Ln(X3) ($R^2 = 0.5560$)	Constante	-18.77775	5.560997	-3.3767
	Compacité	-4.373065	1.594101	-2.7433
	Ln(P _{c9})	2.887409	0.721334	4.0029
Ln(X4) ($R^2 = 0.5661$)	Constante	6.837209	3.696743	1.8495
	Compacité	2.322032	1.059699	2.1912
	Ln(P _{c9})	-2.142131	0.479516	-4.4673
Ln(X5)	--	--	--	--
Ln(X6) ($R^2 = 0.5973$)	Constante	-109.4888	38.21936	-2.8647
	P _{c8}	0.146957	0.048286	3.0434
	X1	830.4068	162.8430	5.0994
Ln(X7) ($R^2 = 0.1220$)	Constante	6.663407	1.534952	4.3411
	P _{r7}	-5.371841	2.815673	-1.9078

Tableau 3.22: Modèle CREC, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon avec occupation des sols

L'examen des différents tableaux présentant les équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC inspire quelques remarques:

- Les variables Pluies relatives et Pluies cumulées de début de saison des pluies (P_{c5} à P_{c7} et P_{r5} à P_{r7}) interviennent fréquemment dans les équations de prédétermination des paramètres. Le coefficient de compacité apparaît, également, à plusieurs reprises.
- Les variables d'occupation des sols (% de savane, de forêt, de cultures et d'habitat) n'ont jamais été prises en compte dans les équations à l'exception de celle établie pour le paramètre X2 en zone de forêt.
- Sur les quatre échantillons de calage, la régression multiple établie pour le paramètre X6 nécessite la prise en compte de certains autres paramètres en tant que variables explicatives.
- La recherche d'une équation de régression, pour le paramètre X5, dans le cas de l'échantillon avec occupation des sols en zone de transition, n'a pas permis d'identifier de variables explicatives.
- Globalement, on peut affirmer que les paramètres du modèle CREC ne sont pas convenablement expliqués par les régressions obtenues à l'aide des descripteurs que nous avons pu définir (les valeurs élevées de certains coefficients de détermination sont peu significatives car calculées sur des logarithmes).

3.4.2.2. Modèle MODGLO

Le même processus d'identification d'équations de prédétermination que précédemment a été suivi dans le cas du modèle MODGLO. Dans les tableaux qui suivent, nous présenterons les équations de prédétermination dans le cas où des variables explicatives ont été retenues et où le coefficient de détermination R^2 n'est pas proche de 0.

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(CRT) ($R^2 = 0.9859$)	Ln(P_{c7})	0.880123	0.013701	64.2396
Ln(DCRT) ($R^2 = 0.1142$)	Constante	5.621653	1.569816	3.5811
	Compacité	-2.346851	0.972358	-2.4136
	P_{r6}	2.976114	1.453667	2.0473
Ln(COEFQ1) ($R^2 = 0.1034$)	Constante	14.60745	6.338153	2.3047
	Ln(Pluie_An)	-2.423678	0.86767	-2.7933

Tableau 3.23: Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon sans occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(BB) ($R^2 = 0.2249$)	Constante	4.61088	0.427281	10.7912
	Culture	-1.592375	0.564333	-2.8217
Ln(CRT) ($R^2 = 0.3612$)	Constante	2.770588	0.839852	3.2989
	P_{r7}	5.982443	1.567276	3.8171
Ln(DCRT) ($R^2 = 0.3609$)	Constante	11.73077	2.107653	5.5658
	Compacité	-5.604591	1.469303	-3.8145
Ln(C1) ($R^2 = 0.1345$)	Constante	50.69765	23.92652	2.1189
	P_{r11}	-52.79550	24.27653	-2.1748
Ln(COEFQ1) ($R^2 = 0.1536$)	Constante	23.37681	11.32536	2.0641
	Ln(P_{c11})	-3.608457	1.559501	-2.3139
Ln(COEFQ2) ($R^2 = 0.1624$)	Constante	28.069042	12.98268	2.162
	Ln(Pluie_An)	-4.241812	1.784133	-2.3775
Ln(COEFQ3) ($R^2 = 0.2166$)	Constante	8.886719	4.533361	1.9603
	Compacité	-8.732997	3.16033	-2.7633

Tableau 3.24: Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon avec occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(AA) ($R^2 = 0.1028$)	Constante	5.789986	2.919966	1.9829
	Ln(P_{c11})	-0.985431	0.421372	-2.3386
Ln(DCRT) ($R^2 = 0.3191$)	Constante	12.49856	4.230857	2.9541
	P_{r8}	6.376271	1.758279	3.6264
	P_{r11}	-12.11894	4.215867	-2.8746
Ln(COEFQ1) ($R^2 = 0.4859$)	Constante	25.27997	4.896793	5.1626
	Superficie	-0.000243	0.000079	-3.0594
	Ln(Pluie_An)	-3.837058	0.703052	-5.4577
Ln(COEFQ2) ($R^2 = 0.2523$)	Constante	14.11928	5.518306	2.5586
	Superficie	-0.000267	0.000096	-2.7791
	Ln(P_{c11})	-2.218776	0.793344	-2.7967
Ln(COEFQ3) ($R^2 = 0.4638$)	Superficie	-0.000344	0.000059	-5.8077

Tableau 3.25: Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon sans occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(AA) ($R^2 = 0.4022$)	Constante	17.03885	7.034708	2.4221
	Forêt	-10.19930	3.426959	-2.9762
	Ln(P_{c8})	-2.377406	1.061412	-2.2399
Ln(BB) ($R^2 = 0.1243$)	Constante	4.468986	0.630409	7.089
	Forêt	-4.258005	2.214715	-1.9226
Ln(XIN) ($R^2 = 0.6292$)	Forêt	-2.429022	0.4278	-5.6779
Ln(SH) ($R^2 = 0.3224$)	Constante	14.112954	3.528559	3.9996
	Forêt	-7.823658	2.990433	-2.6162
	P_{r9}	-9.315273	4.125845	-2.2578
Ln(DCRT) ($R^2 = 0.5062$)	Constante	19.197855	4.238705	4.5292
	Superficie	-0.000127	0.000046	-2.7397
	Ln(P_{c9})	-2.030339	0.624109	-3.2532
Ln(COEFQ1) ($R^2 = 0.5433$)	Constante	21.169869	7.459306	2.838
	Superficie	-0.000282	0.000082	-3.4489
	Ln(P_{c9})	-3.261006	1.098312	-2.9691
Ln(COEFQ2) ($R^2 = 0.2638$)	Constante	-0.909338	0.782424	-1.1622
	Superficie	-0.000391	0.00014	-2.7943

Tableau 3.26: Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon avec occupation des sols

Le modèle MODGLO n'a pas permis d'identifier de nombreuses équations de prédétermination (Cf. tableaux 3.25 à 3.28). Le grand nombre de paramètres de cet algorithme, à la base d'effet de compensation numérique et de calages automatiques approximatifs, est un

handicap certain pour une approche de ce type. On notera, simplement, qu'en zone de transition, les variables Superficie et % de forêt sont souvent prisés en compte dans les équations.

Les variables Pluies cumulées et Pluies relatives de début de saison des pluies apparaissent très peu, contrairement à ce que nous avons observé avec le modèle CREC.

3.4.2.3. Modèle GR3

Les résultats des différentes régressions multiples, qui ont pu être élaborées, ont été reportés dans les tableaux suivants:

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(A) ($R^2 = 0.9913$)	Ln(P _{c8})	1.060893	0.012922	82.1018
Ln(B) ($R^2 = 0.4604$)	Constante	-17.10494	3.634523	-4.7062
	Compacité	4.154616	0.731539	5.6793
	Ln(P _{c11})	2.39431	0.457317	5.2356
Ln(C) ($R^2 = 0.1978$)	Constante	-22.18893	5.13506	-4.3211
	Ln(P _{c11})	2.787551	0.706886	3.9434

Tableau 3.27: Modèle GR3, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon sans occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(B) ($R^2 = 0.5434$)	Constante	-12.04402	5.815832	-2.0709
	Compacité	3.401004	1.326021	2.5648
	Culture	-2.413963	1.163501	-2.0747
	Ln(P _{c10})	2.111325	0.811995	2.6002
Ln(C) ($R^2 = 0.2939$)	Constante	-2.154546	0.346913	-6.2106
	Superficie	-0.00035	0.000135	-2.601
	Savane	131.8358	51.56498	2.5567

Tableau 3.28: Modèle GR3, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon avec occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(B) ($R^2 = 0.1608$)	Constante	-8.963387	5.130093	-1.7472
	Ln(Pluie_An)	2.148827	0.738275	2.9106
Ln(C) ($R^2 = 0.1178$)	Constante	-1.221451	0.563516	-2.1676
	Superficie	-0.000306	0.000123	-2.4911

Tableau 3.29: Modèle GR3, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon sans occupation des sols

Paramètre	Variable	Coefficient	Erreur Standard	Valeur t
Ln(A) ($R^2 = 0.2927$)	Constante	6.886533	0.232584	29.609
	Culture	1.288124	0.432699	2.977
Ln(B) ($R^2 = 0.6651$)	Constante	14.66647	3.285977	4.4634
	Compacité	-8.766749	2.068956	-4.2373
	Forêt	11.61986	3.76452	3.0867

Tableau 3.30: Modèle GR3, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon avec occupation des sols

Ces tableaux indiquent que les trois équations des trois paramètres A, B et C ont pu être établies simultanément pour un seul des quatre échantillons. Sur les trois autres échantillons, la recherche de régressions multiples n'a donné que deux équations de prédétermination des paramètres.

La prise en compte des variables d'occupation des sols telles que le % de Cultures, le % de Forêt et le % de Savane est remarquable dans les équations établies. Les variables de début de saison des pluies (P_{r5} à P_{r7} et P_{c5} à P_{c7}) n'apparaissent pas dans les équations établies pour le modèle GR3, contrairement à ce qui est observé pour le modèle CREC.

3.4.3. Essais de validation des équations de prédétermination

La validation, très hypothétique, des équations de prédétermination a porté sur les échantillons que nous avons constitués précédemment. Elle n'a pu avoir lieu, bien entendu, que dans les cas où ces équations avaient été établies pour l'ensemble des paramètres d'un modèle donné.

3.4.3.1. Valeurs des critères numériques

Les critères numériques suivants ont été calculés pour l'appréciation des résultats de ces validations. Ce sont:

- Coefficients de corrélation des lames décadaires.
- Différence d'autocorrélation d'ordre 1 (DAC1).
- Différence d'autocorrélation d'ordre 2 (DAC2).
- Bilan 1.
- Bilan 2.

- IRVC.
- Critère de Nash sur les débits journaliers.
- Coefficients de corrélation des débits journaliers.

Pour chaque échantillon, on compare d'une part les séries observées et les séries calées, et, d'autre part, les séries observées et les séries prédéterminées. On notera par O/C la comparaison série observée et série calée, et par O/P la comparaison série observée et série prédéterminée. Lorsque l'abréviation O/C ou O/P est précédée de (sans) ou (avec) cela signifie qu'il s'agit de l'échantillon sans occupation des sols ou de l'échantillon avec occupation des sols.

Les tableaux 3.33 et 3.34 présentent pour chaque échantillon la valeur moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum des deux comparaisons.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
MOYENNE								
(sans) O/C	0.878	0.138	0.146	25.55	91.84	5.83	0.365	0.793
(sans) O/P	0.762	0.144	0.155	131.1	167.1	54.8	0.755	0.640
(avec) O/C	0.935	0.090	0.118	32.5	102.2	6.77	0.242	0.872
(avec) O/P	0.840	0.122	0.140	164.5	200.3	57.4	0.806	0.771
ECART-TYPE								
(sans) O/C	0.111	0.140	0.145	39.26	88.86	4.57	0.229	0.140
(sans) O/P	0.210	0.138	0.118	136.8	132.3	39.39	0.391	0.286
(avec) O/C	0.042	0.059	0.106	44.85	99.87	5.62	0.120	0.067
(avec) O/P	0.179	0.093	0.123	191.1	185.6	32.41	0.541	0.174
MINIMUM								
(sans) O/C	0.610	0.017	0.006	0.60	10.6	0.18	0.074	0.432
(sans) O/P	0.102	0.018	0.002	13.3	36.0	8.01	0.228	0.038
(avec) O/C	0.808	0.017	0.021	0.80	10.6	0.55	0.074	0.730
(avec) O/P	0.414	0.005	0.013	9.90	31.5	16.75	0.205	0.389
MAXIMUM								
(sans) O/C	0.983	0.707	0.490	151.3	342.2	17.66	1.023	0.964
(sans) O/P	0.966	0.620	0.520	509.4	509.4	189.0	1.564	0.949
(avec) O/C	0.983	0.218	0.344	137.1	358.3	19.47	0.499	0.964
(avec) O/P	0.958	0.317	0.368	683.8	685.4	127.9	1.87	0.925

Tableau 3.31: Comparaison calage et validation (modèle CREC) en zone de forêt

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
MOYENNE								
(sans) O/C	0.887	0.096	0.144	2.54	23.08	7.86	0.282	0.833
(sans) O/P	0.772	0.175	0.126	34.5	44.51	59.97	0.690	0.752
ECART-TYPE								
(sans) O/C	0.094	0.094	0.132	2.160	18.20	8.14	0.212	0.146
(sans) O/P	0.243	0.251	0.155	41.77	42.04	41.02	0.336	0.182
MINIMUM								
(sans) O/C	0.615	0.005	0.004	0	0.1	0	0.067	0.505
(sans) O/P	0.207	0.010	0.001	2.8	3.0	10.79	0.165	0.412
MAXIMUM								
(sans) O/C	0.977	0.372	0.516	8.5	67.5	31.43	0.70	0.966
(sans) O/P	0.965	0.942	0.596	164.7	166.5	169.4	1.359	0.954

Tableau 3.32 Comparaison calage et validation (modèle CREC) en zone de transition

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
MOYENNE								
(sans) O/C	0.837	0.138	0.153	18.30	87.60	9.81	0.392	0.773
(sans) O/P	0.793	0.151	0.166	69.84	123.6	35.26	0.717	0.719
ECART-TYPE								
(sans) O/C	0.120	0.115	0.139	23.55	76.47	11.43	0.217	0.144
(sans) O/P	0.144	0.159	0.144	87.05	101.1	27.31	0.413	0.171
MINIMUM								
(sans) O/C	0.501	0.004	0	0.20	10.8	0.133	0.073	0.465
(sans) O/P	0.463	0.002	0.003	1.20	12.0	0.935	0.188	0.434
MAXIMUM								
(sans) O/C	0.977	0.396	0.487	117.3	336	60.62	0.826	0.966
(sans) O/P	0.959	0.613	0.560	404.6	416.2	99.56	1.538	0.937

Tableau 3.33: Comparaison calage et validation (modèle GR3) en zone de forêt

Ces différents tableaux montrent que dans le cas où une telle validation a pu être tentée, elle se traduit par une dégradation considérable des valeurs des critères d'appréciation. Par

exemple, le critère de Nash moyen, avec le modèle CREC, varie de 0.69 à 0.81 en validation, alors qu'il va de 0.24 à 0.36 en calage. De même, et pour le seul cas valable de validation, avec le modèle GR3, le critère de Nash moyen passe-t-il de 0.39 à 0.72.

Cette dégradation est encore plus sensible si l'on s'intéresse au critère Reconstitution du Volume de Crue. Dans le cas du modèle CREC, sa valeur moyenne est comprise entre 6% et 8% lors des calages alors qu'elle oscille entre 55% et 60% en prédétermination. Pour le modèle GR3, elle passe de 10% à 35%, confirmant ainsi l'impossibilité d'utiliser valablement les équations de prédétermination qui ont pu être établies.

3.5. CONCLUSIONS

L'étude réalisée au pas de temps journalier avec plusieurs algorithmes pluie-débit n'a pas conduit à des résultats aussi satisfaisants qu'à des pas de temps plus importants, tels que l'année ou le mois.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce constat:

- ces algorithmes conceptuels ont été initialement élaborés pour fonctionner en zone de climat tempéré, sans saisons sèches longues et sévères.
- les mécanismes complexes de fonctionnement d'une forêt tropicale ne sont pas pris en compte dans ces algorithmes: pas de simulation possible du fonctionnement de la litière, pas de prise en considération de l'interception, module de calcul de l'ETR très approximatif, etc...
- les données de réseaux recueillies au pas de temps journalier sont parfois entachées d'erreurs (cumuls en particulier) qui perturbent l'utilisation de ces algorithmes, alors que leur importance diminue considérablement à de plus grands pas de temps.

CONCLUSION

CONCLUSION

Arrivés au terme de ce travail, il convient d'en tirer les principaux enseignements et d'esquisser certaines perspectives en ce qui concerne la modélisation pluie-débit.

Rappelons tout d'abord que nos travaux se sont déroulés dans le cadre du programme ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en Eau), développé par l'Unité de Recherches "Etude et Gestion des Ressources en Eau" de l'ORSTOM, au sein de l'Antenne Hydrologique d'Abidjan. Ce programme avait essentiellement pour objectif la mise au point et l'utilisation d'outils permettant l'évaluation des ressources en eau sur des bassins versants de dimensions variées (100 à 7000 km²), tout en cherchant à rendre ces outils utilisables pour des bassins versants non jaugés.

L'économie de la Côte d'Ivoire, pays en développement, est principalement liée à l'agriculture, et, à un degré moindre, à une relative industrialisation dont l'énergie est tirée à 60% de l'hydroélectricité. C'est dire l'importance considérable que revêt la disponibilité des ressources en eau. C'est la raison pour laquelle, dans un souci constant d'obtenir des résultats facilement et rapidement utilisables dans le cadre de projets de développement, nous avons privilégié les données enregistrées par les réseaux nationaux (au pas de temps journalier), par rapport aux données denses et à fort coefficient de fiabilité que nous aurions pu tirer des études menées sur bassins versants expérimentaux et représentatifs. Ces données de réseaux sont, en effet, les seules aisément accessibles aux gestionnaires de projets et aux aménageurs.

Si le programme ERREAU s'intéresse à l'ensemble de la Côte d'Ivoire, nous avons, quant à nous, fait porter nos efforts essentiellement sur les zones de forêt et de transition. L'étude et la critique des données de réseaux disponibles a permis de sélectionner, au total, 27 bassins versants ce qui représente 90 stations-années en forêt et 54 en zone de transition. Ces données sont caractérisées par une très forte variabilité (elle se remarque tant au niveau de la pluviométrie que des coefficients d'écoulement), et par une sécheresse extrêmement sévère, observée sur toute l'étendue du territoire ivoirien en 1983 et 1984.

Notre démarche a consisté à tenter d'identifier des méthodes d'estimation des ressources en eau à différents pas de temps: du plus grand (annuel) au plus fin (journalier).

Plusieurs formulations permettant d'estimer la lame écoulée annuelle ont été testées. Relations empiriques basées sur la seule utilisation de l'information "pluviométrie annuelle", ou relations issues d'une approche en régression multiple, elles se montrent toutes assez

approximatives, reproduisant avec peu de fiabilité les événements à caractère exceptionnel. Dans la mesure où l'on disposerait de l'information pluviométrique sur l'année considérée et celle qui la précède, certaines des équations que nous proposons permettent, néanmoins, d'avancer un ordre de grandeur tout à fait acceptable en ce qui concerne la lame écoulée. Il est clair, cependant, que la lame écoulée annuelle dépendant de nombreux paramètres autres que la hauteur de pluie annuelle (végétation, répartition de la pluie dans le temps, etc.), ces méthodes, au caractère global très marqué, seront toujours limitées dans leurs performances.

Nous nous sommes donc attachés à reconstituer les hydrogrammes annuels au pas de temps mensuel. Nous avons opté, pour cela, et toujours dans l'optique d'un transfert aisé vers les opérateurs du développement ivoirien, pour un modèle simple basé sur la description du bilan hydrologique, initialement proposé par SNYDER. Partis d'un algorithme à neuf paramètres, dont les qualités de robustesse (utilisation des jeux de paramètres calés sur d'autres années) se sont révélées particulièrement faibles, nous avons procédé à une analyse et à une restructuration qui ont abouti à un modèle au pas de temps mensuel à trois paramètres. Les performances de cet algorithme (appelé ici modèle AB2) sont tout à fait satisfaisantes. Il se montre d'une utilisation robuste dans la plus grande partie des cas où nous l'avons utilisé. Ce travail a permis, encore une fois, de poser avec acuité le problème de la juste paramétrisation des modèles pluie-débit. Nombreux sont les algorithmes qui présentent des paramètres en surnombre, et dont l'utilisation en simulation pour l'évaluation de ressources pourrait être envisagée de manière plus fiable, après une analyse et une restructuration du type de celles que nous avons conduites ici.

Le modèle AB2 présentant de bons résultats en zones de forêt et de transition, son utilisation a également été validée en zone de savane. Les résultats de ce test se sont révélés suffisamment probants pour que nous proposons, aujourd'hui, l'utilisation de cet algorithme sur l'ensemble du territoire ivoirien.

Au pas de temps journalier, la modélisation de la relation pluie-débit à l'aide de modèles conceptuels globaux n'a pas conduit à des résultats aussi satisfaisants que ceux qui avaient été obtenus par DEZETTER en savane. Les causes d'un tel échec sont vraisemblablement très diverses, mais on peut cependant en avancer quelques unes:

- ces algorithmes conceptuels ont été initialement élaborés pour fonctionner en zone de climat tempéré, sans avoir à affronter de saisons sèches longues et sévères qui conduisent à une forte désaturation du sol. Il est, en effet, particulièrement symptomatique de constater que tous les algorithmes éprouvent les pires difficultés à restituer la lame écoulée observée en tout début de saison des pluies.

- les mécanismes complexes de fonctionnement d'une forêt tropicale ne sont pas pris en compte par ces algorithmes: pas de simulation possible du fonctionnement de la litière, pas de prise en considération de l'interception due au couvert végétal, modélisation simpliste de l'ETR, etc.
- les données de réseaux recueillies au pas de temps journalier sont parfois entachées d'erreurs (cumuls en particulier) qui perturbent l'utilisation de ces algorithmes, alors que leur importance diminue considérablement à de plus grands pas de temps.

Les essais de validation croisée, réalisés lors de cette phase de modélisation au pas de temps journalier, viennent, néanmoins, renforcer l'idée qui veut que la relation pluie-débit ne soit pas uniquement, et loin de là, le seul fait de variables intrinsèques des bassins versants. La répartition de la pluviométrie dans le temps, et tout ce qui en découle en matière de croissance de la végétation, joue, à n'en pas douter, un rôle très important qui conditionne la réponse du bassin versant.

Dans l'optique d'une utilisation de ces algorithmes sur des bassins versants non jaugés, nous avons tenté d'établir des équations de prédétermination des paramètres du modèle mensuel AB2. Cette tentative s'est soldée par un échec. Certaines des variables explicatives que nous avons retenues se sont montrées performantes, mais elles sont insuffisantes. Il faudrait pouvoir intégrer de nouveaux descripteurs tels que la géologie des bassins versants, ou des caractéristiques liées au couvert végétal et à son développement (indice foliaire par exemple?), ou d'autres encore pour espérer combler ce qui nous sépare encore d'une véritable prédétermination des paramètres des modèles pluie-débit.

A l'issue de cette réflexion plusieurs perspectives s'offrent à nous désormais:

- pour les raisons évoquées plus haut la modélisation au pas de temps mensuel offre certaines garanties quant à la fiabilité des données, tout en conservant un intérêt certain pour les différents opérateurs du développement économique et rural de la Côte d'Ivoire. Il serait donc intéressant de comparer l'approche qui fut la notre à une modélisation globale conceptuelle au pas de temps mensuel. Ceci dans un souci de recherche d'un outil le plus fiable possible.
- bon nombre de projets agronomiques nécessitent la prise en compte des apports au pas de temps décadaire. Nous devrions donc poursuivre et compléter notre approche de la modélisation de la relation pluie-débit en Côte d'Ivoire à un tel pas de temps, à l'aide d'algorithme de type bilan ou de type conceptuel.

En Afrique de l'Ouest en général, et dans l'ensemble de la sous-région en particulier, il est important de multiplier ces travaux de modélisation. De la confrontation de ces multiples expériences et de leurs résultats, acquis dans une grande diversité de situation, il devrait être possible de tirer les conclusions qui permettront d'élaborer un ou plusieurs algorithmes mieux adaptés au contexte climatique particulier des régions tropicales que ne le sont les algorithmes utilisés aujourd'hui.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AVENARD J.M., ELDIN M., GIRARD G., SIRCOULON J., TOUCHEBEUF P., GUILLAUMET J.L., ADJANOHOUN E., PERRAUD A., 1971. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Editions de l'ORSTOM.
- 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. Université MONTPELLIER II
- COUREL M.F., 1984. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de Doctorat d'Etat es-lettres et sciences humaines. Université PARIS I.
- COUTAGNE A., 1949. Contribution à l'étude de l'écoulement en Algérie. Annuaire Hydrologique 1947-1948 S.C.E.G.T.
- DERI J., 1977. Etude générale de la ressource en eau en Algérie. note manuscrite + annexes A.N.R.H.
- DEZETTER A., 1987. Modèle global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. DEA National d'Hydrologie. Université MONTPELLIER II.
- DEZETTER A., 1991. Modélisation globale de la relation pluie débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université MONTPELLIER II.
- DISKIN M.H., SIMON E., 1977. A procedure for the selection of objective function for hydrologic simulation models. J. Hydrol., 34: 129-149.
- EDIJATNO, MICHEL C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2: 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.
- GODWIN R.B., FOXWORTHY B.L., VLADIMIROV V.A., 1990. Guidelines for water resource assessments of river basins. IHP-III, Project 9.2, UNESCO, PARIS.

- GUILBOT A., 1971. Processus d'optimisation en quatre étapes appliqué à la recherche des paramètres des modèles déterministes, Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation. Université MONTPELLIER II, 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.
- KOUAME B., 1987. Forme des averses, variabilité spatiale et temporelle au nord-ouest de la Côte d'Ivoire. DEA, Université MONTPELLIER II.
- LEE A.F.S., HEGHINIAN S.M., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables. A Bayesian approach. *Technometrics*, 19: 503-506.
- LEROUX M., 1984. La mousson. *Bulletin de l'IFAN T. XXXVI*, série A. n°3.
- MEDINGER G., 1948. Tableau général de l'hydrologie algérienne dans *Hydrologie Algérienne*, recueil des observations de 1924 à 1946 S.C.E.G.T.
- 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 principles. *J. Hydrol*, 10: 282-290.
- NELDER J.A., MEAD R., 1964. A simple method for function minimization. *Computer Journal*, 7: 308-313.
- PNOE/UNESCO, 1987. Evaluation environnementale intégrée du développement des ressources en eau. Directives méthodologiques. UNESCO, Paris.
- REFSGAARD J.C., ALLEY W.M., VUGLINSKY V.S., 1989. Methodology for distinguishing between man's influence and climatic effects on the Hydrological cycle. IHP-III, Project 6.3, UNESCO, PARIS.
- RODIER J., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo. Thèse de Docteur-Ingénieur. Faculté des Sciences de Toulouse.
- 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., 1988a. SIMPLE et ROSEN: deux méthodes d'optimisation non linéaire. Théorie et pratique. Notice OVNIh 1. ORSTOM Montpellier.
- SERVAT E., DEZETTER A., 1988b. 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.
- SERVAT E., DEZETTER A., 1991. Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. Hydrol. continent. vol. 5, n° 2, 1990: 147-165.
- SERVAT E., KOUAME B., 1989a. Modélisation conceptuelle globale de la relation pluie-débit en Côte d'Ivoire. Etude pluviométrique. IIRSDA Adiopodoumé.
- SERVAT E., KOUAME B., 1989b. Modélisation conceptuelle globale de la relation pluie-débit en Côte d'Ivoire. Etude hydrométrique. IIRSDA Adiopodoumé.
- SERVAT E., KOUAME B., 1991. Modélisation pluie-débit en zone de forêt tropicale. Apports et adéquation pour la gestion des ressources en eau. Communication au VII^{ème} Congrès Mondial des Ressources en Eau, 13-18 mai 1991 Rabat, MAROC.
- SINGH V.P., 1990. Hydrologic Systems, Volume II, Watershed Modeling. Edited by Prentice Hall Inc.
- SIRCOULON J., 1966. Répertoire des stations hydrométriques de Côte d'Ivoire. Tome 1. Centre ORSTOM d'Adiopodoumé.
- SIRCOULON J., 1976. Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIII, n°2.
- SNYDER W.M., 1963. A water yield model derived from monthly runoff data. International Association of Scientific Hydrology Publication n° 63, 18-30.
- SNYDER W.M., MILS W.C., STEPHENS J.C., 1971. A three-component, nonlinear water-yield model. Proceedings of the First Bilateral U.S. -Japan Seminar in Hydrology, 19.1-19.16, Honolulu, Hawaii.
- UNESCO, 1989. Evaluation of national guides on methods of hydrological computations. IHP-III, Project 2.1 (c) J.W. Van der Made. (Ed.).

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	11
1. PREMIERE PARTIE	14
1.1. Description du milieu physique.....	14
1.1.1. Paysages géomorphologiques.....	14
1.1.1.1 . La retombée orientale de la dorsale guinéenne	15
1.1.1.2. Les plateaux du Nord.....	18
1.1.1.3. La zone de transition: glacis méridionaux et marche centrale.....	18
1.1.1.4. Les bas-pays intérieurs et la frange littorale	19
1.1.2. Caractéristiques climatiques.....	19
1.1.2.1. Mécanisme météorologique	19
1.1.2.2. Pluviométrie	20
1.1.3. Régimes hydrologiques	23
1.1.4. Sols et végétation	26
1.1.4.1. Classification et description des principaux sols.....	26
1.1.4.2. Végétation	27
1.2. Critique et analyse des observations	29
1.2.1. Observations pluviométriques.....	29
1.2.1.1. Répartition des observations	29
1.2.1.2. Etude des corrélations.....	29
1.2.1.3. Caractérisation du régime pluviométrique	33
1.2.1.3.1. Précipitations annuelles	33
1.2.1.3.2. Pluies moyennes mensuelles	34
1.2.1.3.3. Dispersion des séries annuelles et mensuelles.....	35
1.2.1.4. Homogénéité des séries chronologiques.....	38
1.2.1.4.1. Description de la méthode bayésienne (Lee et Heghinian, 1977).....	38
1.2.1.4.2. Résultats du test sur les stations de longue durée.....	39
1.2.2. Observations hydrométriques.....	40
1.2.2.1. Répartition des données.....	40
1.2.2.2. Caractérisation du régime hydrométrique	40
1.2.2.2.1. Lamé moyenne annuelle.....	40
1.2.2.2.2. Variations saisonnières des écoulements.....	44
1.2.2.2.3. Etiage absolu	44
1.2.3. Caractéristiques d'occupation du sol	44
1.2.4. Evaporation	46
1.2.5. Conclusion.....	46
2. DEUXIEME PARTIE	48
2.1. Modélisation au pas de temps annuel	48
2.1.1. Relations de la forme Lamé annuelle écoulée= $f(\text{Pluviométrie annuelle})$	48
2.1.2. Essais de régressions multiples	52
2.1.2.1. Régression en zone de forêt.....	53
2.1.2.2. Régression en zone de transition.....	54
2.1.3. Conclusion.....	54

2.2. Modélisation au pas de temps mensuel.....	61
2.2.1. Présentation du modèle initial	61
2.2.2. Calage du modèle initial di.....	66
2.2.2.1. Calages stations-années par stations-années.....	67
2.2.2.2. Calages et validations sur plusieurs années	69
2.2.3. Etude de sensibilité des paramètres.....	73
2.2.3.1. Choix des stations-années étudiées	73
2.2.3.2. Méthode utilisée et résultats obtenus	74
2.2.4. Etude des différents paramètres.....	77
2.2.4.1. Etude statistique des paramètres	77
2.2.4.2. Corrélation entre les paramètres.....	78
2.2.4.3. Essai de régionalisation des paramètres.....	80
2.2.5. Conclusion	80
2.3. Restructuration du modèle au pas de temps mensuel.....	81
2.3.1. Etude des paramètres Scuil, CC, DD, et AA	81
2.3.1.1. Paramètre "Scuil"	81
2.3.1.2. Paramètre CC	83
2.3.1.3. Paramètre DD.....	85
2.3.1.4. Paramètre AA.....	86
2.3.1.5. Comparaison des calages sur plusieurs années du modèle initial di et du modèle modifié ai.....	89
2.3.2. Etude des paramètres BBi.....	90
2.3.2.1. Décroissance des paramètres BBi	91
2.3.2.2. Formulations à décroissance linéaire	93
2.3.2.3. Formulation à décroissance exponentielle.....	95
2.3.2.4. Formulations à décroissance non linéaire	98
2.3.3. Autres éléments de restructuration envisagés.....	100
2.3.3.1. Intervalle de variation de DD et optimisation de AA	100
2.3.3.2. Variation du seuil selon une courbe non exactement sinusoïdale en zone de transition.....	101
2.3.3.3. Conclusion.....	102
2.3.4. Etude du modèle définitif	103
2.3.4.1. Présentation du modèle définitif AB2.....	103
2.3.4.2. Calages du modèle définitif.....	103
2.3.4.3. Etude des différents paramètres.....	107
2.3.5. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres.....	109
2.3.5.1. Variables utilisées, étude des corrélations	109
2.3.5.1.1. Variables utilisées	109
2.3.5.1.2. Etude des corrélations.....	110
2.3.5.2. Analyse en Composantes Principales	112
2.3.5.2.1. Principes de l'ACP	112
2.3.5.2.2. Application de l'ACP	113
2.3.5.3. Prédétermination des paramètres des modèles	119
2.3.5.3.1. Principe.....	120
2.3.5.3.2. Résultats de la prédétermination des paramètres	121
2.3.6. Application du modèle de SNYDER en zone de savane	123
2.3.7. Conclusions	129

3. TROISIEME PARTIE.....	131
3.1. Modèles et critères utilisés.....	131
3.1.1. Modèles CREC, MODGLO et GR3.....	131
3.1.1.1. Le modèle CREC.....	132
3.1.1.2. Le modèle MODGLO.....	133
3.1.1.3. Le modèle GR3.....	136
3.1.2. Les fonctions critères testées.....	136
3.1.2.1. Les critères numériques.....	136
3.1.2.2. Le module d'évaluation comparative.....	140
3.2. Calage des modèles au pas de temps journalier.....	142
3.2.1. Méthodologie de calage.....	143
3.2.2. Calage du modèle CREC.....	144
3.2.3. Calage du modèle MODGLO.....	149
3.2.4. Calages du modèle GR3.....	154
3.2.5. Conclusions.....	158
3.3. Validation croisée.....	158
3.4. Techniques d'analyse de données appliquées aux jeux de paramètres.....	164
3.4.1. Variables et échantillons.....	164
3.4.1.1. Variables utilisées.....	164
3.4.1.2. Structure des échantillons.....	165
3.4.2. Equations de prédétermination des paramètres des modèles.....	166
3.4.2.1. Modèle CREC.....	166
3.4.2.2. Modèle MODGLO.....	169
3.4.2.3. Modèle GR3.....	171
3.4.3. Essais de validation des équations de prédétermination.....	172
3.4.3.1. Valeurs des critères numériques.....	172
3.5. Conclusions.....	175
CONCLUSION.....	177
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	182
TABLE DES MATIERES.....	186
LISTE DES TABLEAUX.....	190
LISTE DES FIGURES.....	196
ANNEXES.....	201

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE

Tableau 1.1. :	Stations pluviométriques	page 31
Tableau 1.2 :	Coefficients de corrélation sur totaux annuels et mensuels	page 32
Tableau 1.3 :	Moyennes mensuelles	page 35
Tableau 1.4 :	Valeurs caractéristiques de la pluie annuelle	page 36
Tableau 1.5 :	Coefficients de variation des totaux pluviométriques mensuels	page 37
Tableau 1.6 :	Homogénéité des séries pluviométriques	page 39
Tableau 1.7 :	Stations hydrométriques	page 41
Tableau 1.8 :	Valeurs caractéristiques de la lame annuelle écoulée	page 43
Tableau 1.9 :	Occupation des sols	page 45

DEUXIEME PARTIE

Tableau 2.1 :	Valeurs des paramètres et du critère sur l'échantillon complet	page 49
Tableau 2.2 :	Valeurs des paramètres et du critère sur l'échantillon réduit	page 51
Tableau 2.3 :	Coefficients de détermination R^2 des régressions multiples calculées en zone de forêt	page 53
Tableau 2.4 :	Coefficients de détermination R^2 de la régression multiple calculée en zone de transition	page 54
Tableau 2.5 :	Valeurs comparatives de l'écart quadratique moyen (EQM) en zone de forêt	page 55
Tableau 2.6 :	Valeurs comparatives de l'écart quadratique moyen (EQM) en zone de transition	page 58
Tableau 2.7 :	Critère de Nash des calages et validations du modèle di en zone de forêt	page 70
Tableau 2.8 :	Critère de Nash des calages et validations du modèle di en zone de transition	page 70
Tableau 2.9 :	Caractéristiques des stations-années étudiées	page 73

Tableau 2.10 :	Sensibilité des paramètres : valeurs du critère de Nash (Davo à Dakpadou en 1972 et N'Zo à Kahin en 1983)	page 75
Tableau 2.11 :	Sensibilité des paramètres : valeurs du critère de Nash (Baya à Bouroukro en 1985 et Kan à Dimbokro en 1975)	page 76
Tableau 2.12 :	Statistiques descriptives en zone de forêt (effectif 60)	page 77
Tableau 2.13 :	Statistiques descriptives en zone de transition (effectif 34)	page 77
Tableau 2.14 :	Matrice de corrélation du modèle di en zone de forêt	page 78
Tableau 2.15 :	Matrice de corrélation du modèle di en zone de transition	page 79
Tableau 2.16 :	Critères de Nash des calages di et si	page 82
Tableau 2.17 :	Critères de Nash des calages di, si et ci	page 84
Tableau 2.18 :	Critères de Nash des calages di, si, ci et zi	page 86
Tableau 2.19 :	Essais de calages en fixant AA à sa valeur moyenne ou médiane	page 87
Tableau 2.20 :	Critères de Nash des calages di, si, ci et ai	page 87
Tableau 2.21 :	Critères de Nash des calages et validations di et ai en zone de forêt	page 89
Tableau 2.22 :	Critères de Nash des calages et validations di et ai en zone de transition	page 89
Tableau 2.23 :	Critères de Nash des calages et validations ai, B0.0, B0.1, B0.2 et B0.3	page 92
Tableau 2.24 :	Critères de Nash des calages di, B1, B2 et B3	page 94
Tableau 2.25 :	Critères de Nash des calages et validations du modèle B2 en zone de forêt	page 95
Tableau 2.26 :	Critères de Nash des calages et validations du modèle B2 en zone de transition	page 95
Tableau 2.27 :	Critères de Nash des calages des modèles ai, B2, B5 et B6	page 97
Tableau 2.28 :	Critères de Nash des calages et validations des modèles B2 et B6 en zone de forêt	page 97
Tableau 2.29 :	Critères de Nash des calages et validations des modèles B2 et B6 en zone de transition	page 98
Tableau 2.30 :	Critères de Nash des calages des modèles ai, B2, B7 et B8	page 99
Tableau 2.31 :	Critères de Nash des calages AB2 station-année par station-année	page 104
Tableau 2.32 :	Critères de Nash des calages et validations des modèles di et AB2 en zone de forêt	page 105

Tableau 2.33 :	Critères de Nash des calages et validations des modèles di et AB2 en zone de transition	page 105
Tableau 2.34 :	Statistiques descriptives en zone de forêt	page 107
Tableau 2.35 :	Statistiques descriptives en zone de transition	page 107
Tableau 2.36 :	Matrice de corrélation du modèle AB2 en zone de forêt	page 108
Tableau 2.37 :	Matrice de corrélation du modèle AB2 en zone de transition	page 108
Tableau 2.38 :	Résultats de l'A.C.P. en zone de forêt	page 113
Tableau 2.39 :	Résultats de l'A.C.P. en zone de transition	page 113
Tableau 2.40 :	Corrélations des variables principales avec les trois premiers axes en zone de forêt	page 114
Tableau 2.41 :	Corrélations des variables principales avec les trois premiers axes en zone de transition	page 115
Tableau 2.42 :	Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes en zone de forêt	page 117
Tableau 2.43 :	Corrélations des variables supplémentaires avec les trois premiers axes en zone de transition	page 117
Tableau 2.44 :	Equations de prédétermination et valeurs du critère de Nash obtenues lors de leurs calages en zone de forêt	page 121
Tableau 2.45 :	Equations de prédétermination et valeurs du critère de Nash obtenues lors de leurs calages en zone de transition	page 121
Tableau 2.46 :	Critères de Nash obtenus lors du calage du modèle AB2 et lors de l'utilisation des équations prédéterminées (validation de la prédétermination) en zone de forêt	page 121
Tableau 2.47 :	Critères de Nash obtenus lors du calage du modèle AB2 et lors de l'utilisation des équations prédéterminées (validation de la prédétermination) en zone de transition	page 122
Tableau 2.48 :	Valeurs moyennes du critère de Nash des modèles di et AB2	page 124
Tableau 2.49 :	Valeurs du critère de Nash en calage et validation sur plusieurs années en zone de savane	page 126
Tableau 2.50 :	Critères de Nash des calages et validations sur plusieurs années : pourcentage de dégradation du modèle di (9 paramètres) au modèle AB2 (3 paramètres)	page 127

TROISIEME PARTIE

Tableau 3.1 :	Conditions de l'optimisation du modèle CREC	page 144
Tableau 3.2 :	Valeurs du critère de Nash avec le modèle CREC	page 144
Tableau 3.3 :	Caractéristiques des calages du modèle CREC	page 145
Tableau 3.4 :	Caractéristiques des calages avec le critère de Nash maximum, moyen et minimum (modèle CREC)	page 146
Tableau 3.5 :	Conditions de l'optimisation du modèle MODGLO	page 149
Tableau 3.6 :	Caractéristiques des calages du modèle MODGLO	page 150
Tableau 3.7 :	Valeurs du critère de Nash avec le modèle MODGLO	page 151
Tableau 3.8 :	Caractéristiques des calages avec le critère de Nash maximum, moyen et minimum (modèle MODGLO)	page 151
Tableau 3.9 :	Conditions de l'optimisation du modèle GR3	page 154
Tableau 3.10 :	Valeurs du critère de Nash avec le modèle GR3	page 154
Tableau 3.11 :	Caractéristiques des calages du modèle GR3	page 155
Tableau 3.12 :	Caractéristiques des calages avec le critère de Nash maximum, moyen et minimum (modèle GR3)	page 156
Tableau 3.13 :	Ecart en % entre calage et validation, CREC et critère de Nash, N'Zo à Kahin	page 159
Tableau 3.14 :	Ecart en % entre calage et validation, CREC et l'IRVC, N'Zo à Kahin	page 160
Tableau 3.15 :	Ecart en % entre calage et validation, CREC et corrélation décadaire, N'Zo à Kahin	page 160
Tableau 3.16 :	Validation croisée, gains avec CREC	page 161
Tableau 3.17 :	Validation croisée, gains avec MODGLO	page 162
Tableau 3.18 :	Validation croisée, gains avec GR3	page 163
Tableau 3.19 :	Modèle CREC, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon sans occupation des sols	page 166
Tableau 3.20 :	Modèle CREC, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon avec occupation des sols	page 167
Tableau 3.21 :	Modèle CREC, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon sans occupation des sols	page 167
Tableau 3.22 :	Modèle CREC, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon avec occupation des sols	page 168
Tableau 3.23 :	Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon sans occupation des sols	page 169

Tableau 3.24 :	Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon avec occupation des sols	page 169
Tableau 3.25 :	Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de transtion sur l'échantillon sans occupation des sols	page 170
Tableau 3.26 :	Modèle MODGLO, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon avec occupation des sols	page 170
Tableau 3.27 :	Modèle GR3, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon sans occupation des sols	page 171
Tableau 3.28 :	Modèle GR3, équations obtenues en zone de forêt sur l'échantillon avec occupation des sols	page 171
Tableau 3.29 :	Modèle GR3, équations obtenues en zone de transition sur l'échantillon sans occupation des sols	page 171
Tableau 3.30 :	Modèle GR3, équations obtenues en zone de transition sur échantillon avec occupation des sols	page 172
Tableau 3.31 :	Comparaison calage et validation (CREC) en zone de forêt	page 173
Tableau 3.32 :	Comparaison calage et validation (CREC) en zone de transition	page 174
Tableau 3.33 :	Comparaison calage et validation (GR3) en zone de forêt	page 174

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE

Figure 1.1 :	Carte du relief de la Côte d'Ivoire	page 16
Figure 1.2 :	Découpage en zones physiques	page 17
Figure 1.3 :	Flux et discontinuités sur l'Afrique	page 21
Figure 1.4 :	Positions moyennes mensuelles des zones climatiques et succession moyenne des types de temps associés	page 22
Figure 1.5 :	Réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire	page 25
Figure 1.6 :	Zones climatiques et stations pluviométriques	page 30
Figure 1.7 :	Zones climatiques et stations hydrométriques	page 42

DEUXIEME PARTIE

Figure 2.1 :	Lame écoulée = $A (Pluie\ annuelle - B)^C$ en zone de forêt sur échantillon complet	page 50
Figure 2.2 :	Lame écoulée = $(Pluie\ annuelle - A)^B$ en zone de forêt sur échantillon complet	page 50
Figure 2.3 :	Lame écoulée = $Exp(A+B*Pluie\ annuelle)$ en zone de transition sur échantillon complet	page 51
Figure 2.4 :	Lame écoulée = $A (Pluie\ annuelle - B)$ en zone de forêt sur échantillon réduit	page 52
Figure 2.5 :	Lame écoulée = $A (Pluie\ annuelle - B)^C$ en zone de transition sur échantillon réduit	page 52
Figure 2.6 :	Lame écoulée = F (lame observée) en zone de forêt sur échantillon complet (COUTAGNE)	page 55
Figure 2.7 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de forêt sur échantillon complet (MEDINGER)	page 56
Figure 2.8 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de forêt sur échantillon complet (régression multiple)	page 56
Figure 2.9 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de forêt sur échantillon réduit (COUTAGNE)	page 57
Figure 2.10 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de forêt sur échantillon réduit (MEDINGER)	page 57

Figure 2.11 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de transition sur échantillon complet (COUTAGNE)	page 58
Figure 2.12 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de transition sur échantillon complet (MEDINGER)	page 59
Figure 2.13 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de transition sur échantillon de 34 valeurs (régression multiple)	page 59
Figure 2.14 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de transition sur échantillon réduit (COUTAGNE)	page 60
Figure 2.15 :	Lame calculée = F (lame observée) en zone de transition sur échantillon réduit (MEDINGER)	page 60
Figure 2.16 :	Sinusoïde en zone de forêt	page 64
Figure 2.17 :	Sinusoïde en zone de transition	page 64
Figure 2.18 :	Ko à Logoualé en 1982 (calage di)	page 68
Figure 2.19 :	Davo à Dakpadou en 1972 (calage di)	page 68
Figure 2.20 :	Lobo à Nibéhibé en 1971 (calage di)	page 68
Figure 2.21 :	Kan à Dimbokro en 1975 (calage di)	page 69
Figure 2.22 :	Néka à Nékaounié en 1986 (calage di)	page 69
Figure 2.23 :	Ko à Man de 1985 à 1986 (calage di)	page 71
Figure 2.24 :	Ko à Man de 1971 à 1973 (validation du calage di 1985–1986)	page 71
Figure 2.25 :	Lobo à Nibéhibé de 1971 à 1973 (calage di)	page 71
Figure 2.26 :	Lobo à Nibéhibé de 1965 à 1967 (validation du calage di 1971–1973)	page 72
Figure 2.27 :	BBd en fonction de BBa	page 79
Figure 2.28 :	CC en fonction de Seuil en zone de forêt	page 80
Figure 2.29 :	Davo à Dakpadou en 1972 (calages di et si)	page 82
Figure 2.30 :	Baya à Yébouakro en 1984 (calages di et si)	page 83
Figure 2.31 :	Davo à Dakpadou en 1972 (calages di et ci)	page 84
Figure 2.32 :	Baya à Yébouakro en 1984 (calages di et ci)	page 85
Figure 2.33 :	Davo à Dakpadou en 1972 (calages di et ai)	page 88
Figure 2.34 :	Baya à Yébouakro en 1984 (calages di et ai)	page 88
Figure 2.35 :	N'Zo à Kahin de 1984 à 1986 (calages di et ai)	page 90
Figure 2.36 :	N'Zo à Kahin de 1982 à 1983 (validation des calages di et ai réalisés de 1984 à 1986)	page 90
Figure 2.37 :	Décroissance exponentielle des BBi ($\alpha=0.5, BBa=0.5$)	page 96
Figure 2.38 :	Décroissance des BBi non linéaire (exemple avec $\alpha=0.3$)	page 99
Figure 2.39 :	Variations du seuil en zone de transition selon la sinusoïde initiale et selon la courbe polynomiale finalement retenue	page 102

Figure 2.40 :	N'Zo à Kahin de 1984 à 1986 (calages di et AB2)	page 106
Figure 2.41 :	N'Zo à Kahin de 1982 à 1983 (validation des calages di et AB2 réalisés de 1984 à 1986)	page 106
Figure 2.42 :	Ko à Man de 1985 à 1986 (validation des calages di et AB2 réalisés de 1971 à 1973)	page 106
Figure 2.43 :	Corrélations variables principales – Composante 1 et 2 (zone de forêt sans occupation des sols)	page 115
Figure 2.44 :	Corrélations variables principales – Composante 1 et 3 (zone de forêt sans occupation des sols)	page 116
Figure 2.45 :	Corrélations variables principales – Composante 2 et 3 (zone de forêt avec occupation des sols)	page 116
Figure 2.46 :	Projection des individus dans le plan 1–2 (zone de transition avec occupation des sols)	page 117
Figure 2.47 :	Corrélations des variables supplémentaires Composante 1 et 2 (zone de forêt avec occupation des sols)	page 118
Figure 2.48 :	Corrélations des variables supplémentaires Composante 2 et 3 (zone de forêt sans occupation des sols)	page 118
Figure 2.49 :	Kavi à M'Bessé en 1978 (calage et prédétermination)	page 123
Figure 2.50 :	N'Zo à Kahin en 1986 (calage et prédétermination)	page 123
Figure 2.51 :	Sien à Nafana–Sienso en 1979 (calage di)	page 125
Figure 2.52 :	Bagoé à Kouto en 1982 (calage AB2)	page 124
Figure 2.53 :	Bagoé à Kouto de 1982 à 1983 (calages di et AB2)	page 128
Figure 2.54 :	Bagoé à Kouto de 1984 à 1985 (validation des calages di et AB2 1982–1983)	page 128

TROISIEME PARTIE

Figure 3.1 :	Schéma conceptuel du modèle CREC	page 134
Figure 3.2 :	Schéma conceptuel du modèle MODGLO	page 135
Figure 3.3 :	Schéma conceptuel du modèle GR3	page 137
Figure 3.4 :	Modèle CREC, Néro à Route Grand Bérébi en 1981	page 147
Figure 3.5 :	Modèle CREC, Davo à Dakpadou en 1970	page 147
Figure 3.6 :	Modèle CREC, N'Zo à Kahin en 1985	page 147
Figure 3.7 :	Modèle CREC, Kan à Zanoafla en 1982	page 148
Figure 3.8 :	Modèle CREC, Baya à Bouroukro en 1984	page 148
Figure 3.9 :	Modèle CREC, Lobo à Nibéhibé en 1974	page 148
Figure 3.10 :	Modèle MODGLO, Kavi à M'Bessé en 1977	page 152

Figure 3.11:	Modèle MODGLO, Tabou à Yaka en 1981	page 152
Figure 3.12:	Modèle MODGLO, Davo à Dakpadou en 1976	page 152
Figure 3.13:	Modèle MODGLO, Lobo à Nibéhibé en 1981	page 153
Figure 3.14:	Modèle MODGLO, Baya à N'Dakro en 1984	page 153
Figure 3.15:	Modèle MODGLO, Lobo à Nibéhibé en 1966	page 153
Figure 3.16 :	Modèle GR3, Ko à Man en 1976	page 156
Figure 3.17 :	Modèle GR3, Mansan à Lobo en 1984	page 156
Figure 3.18 :	Modèle GR3, N'Zo à Kahin en 1985	page 157
Figure 3.19 :	Modèle GR3, Lobo à Nibéhibé en 1983	page 157
Figure 3.20 :	Modèle GR3, Béré à Bérédrumane en 1986	page 157
Figure 3.21 :	Modèle GR3, Baya à Bouroukro en 1985	page 158

ANNEXES

Annexe I		page 201
Annexe II		page 217
Annexe III		page 230
Annexe IV		page 242
Annexe V		page 250
Annexe VI		page 257

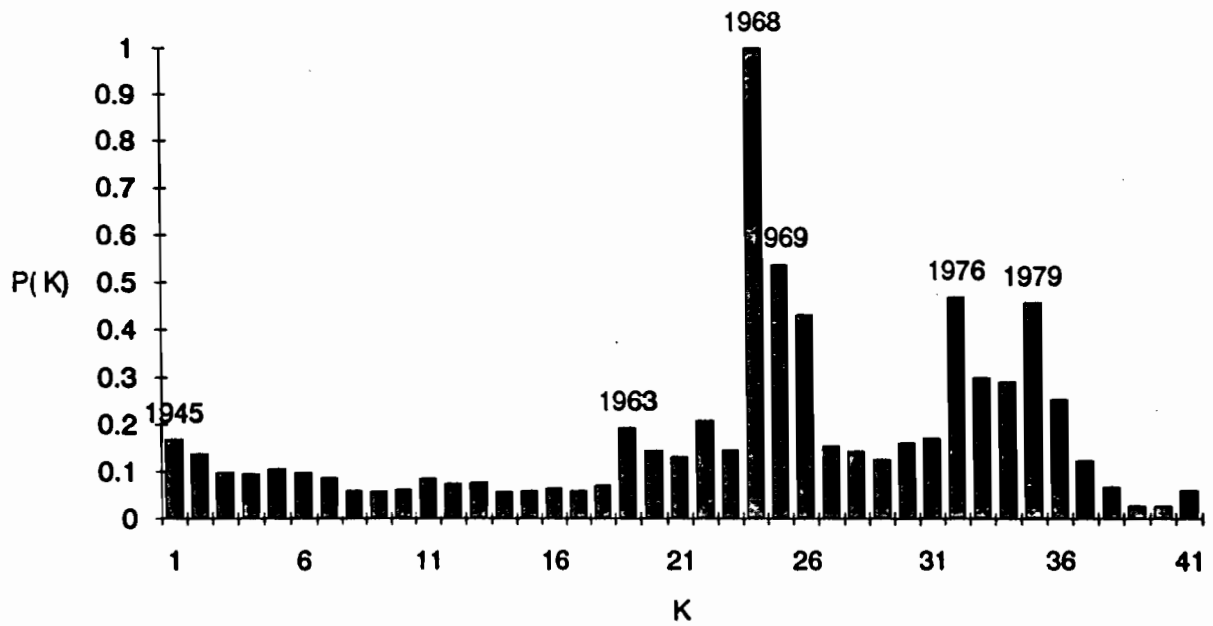
ANNEXE I

Analyse des données

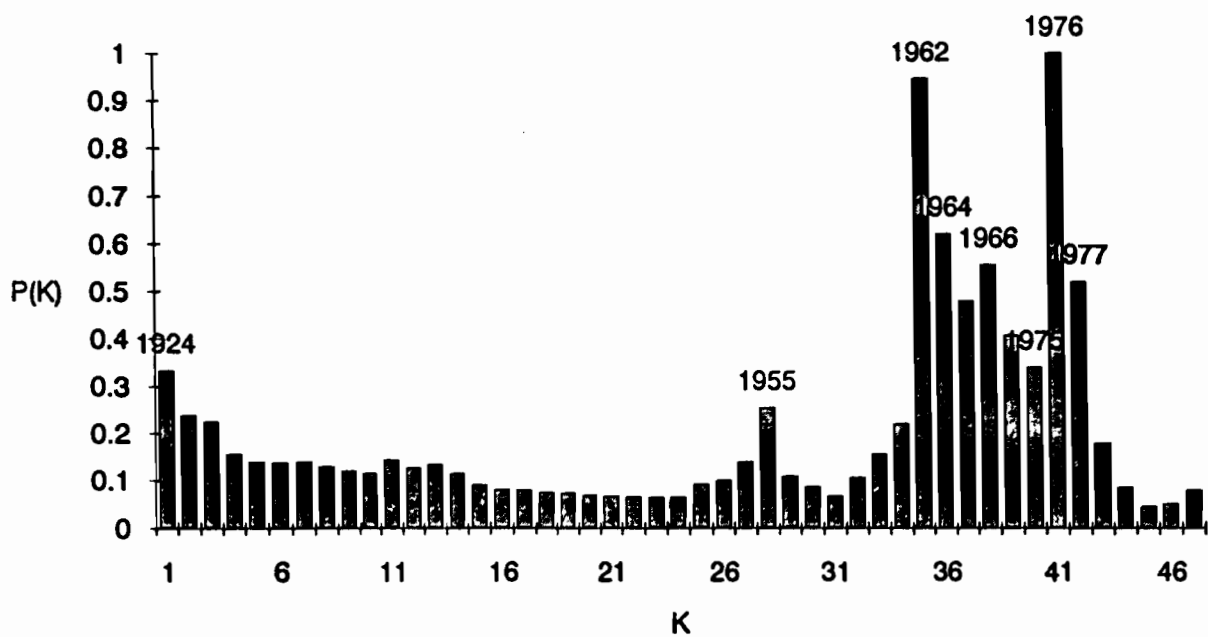
Probabilités de changement de moyenne

Pluie annuelle, lame annuelle écoulée et coefficients d'écoulement

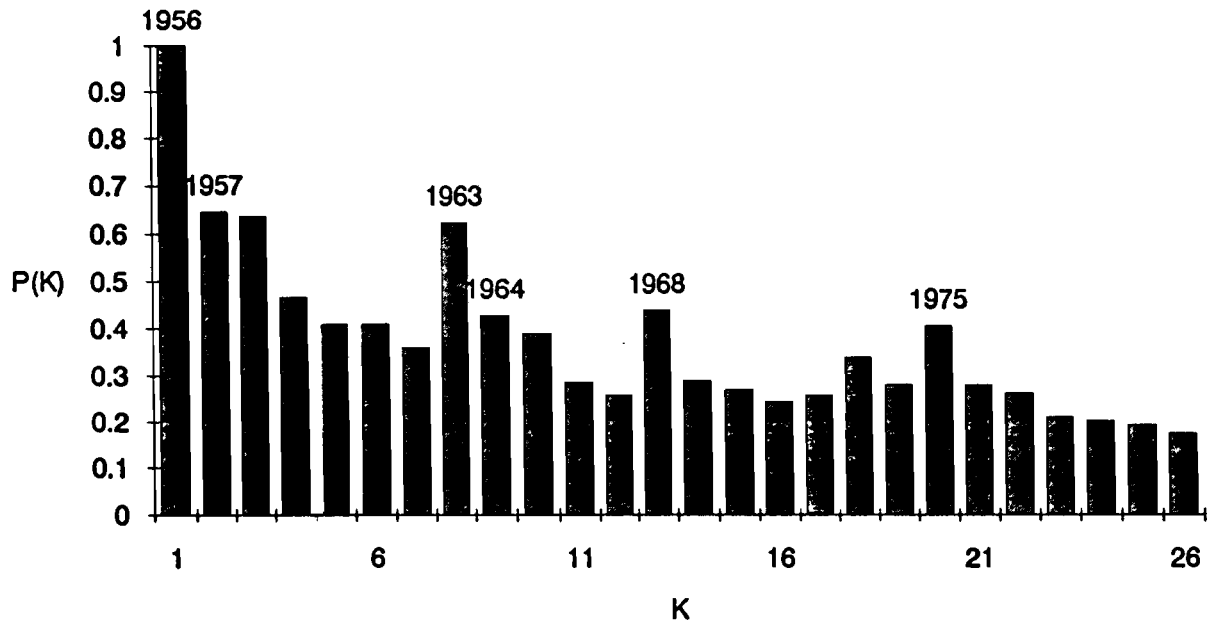
STATION D'ADZOPE



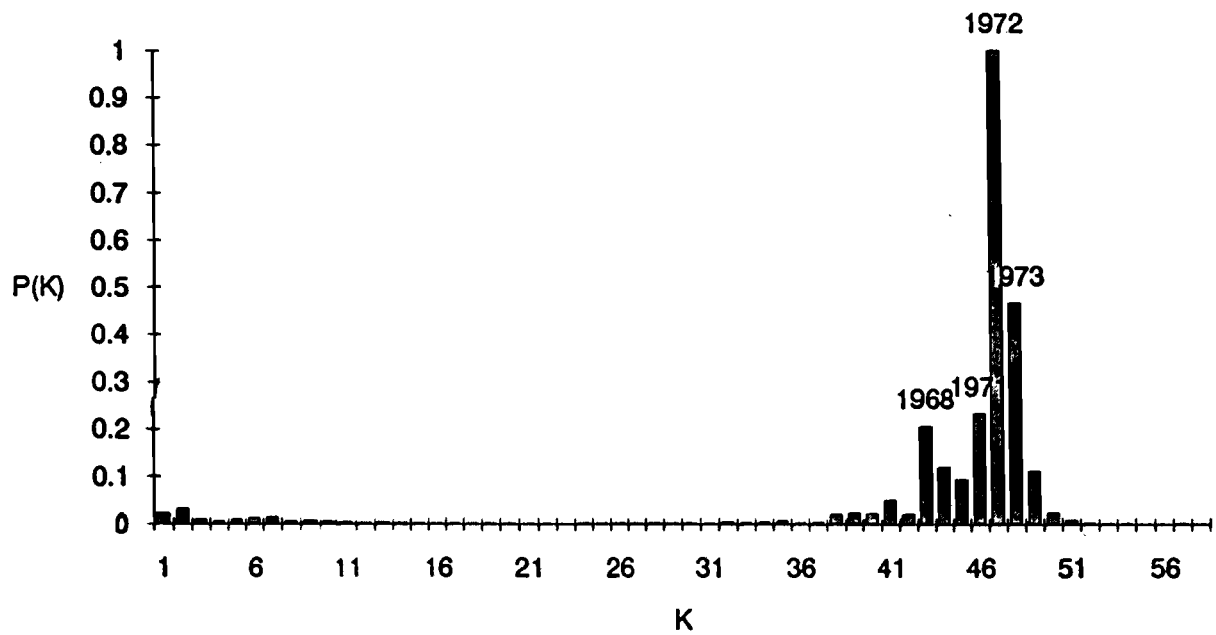
STATION D'AGBOVILLE



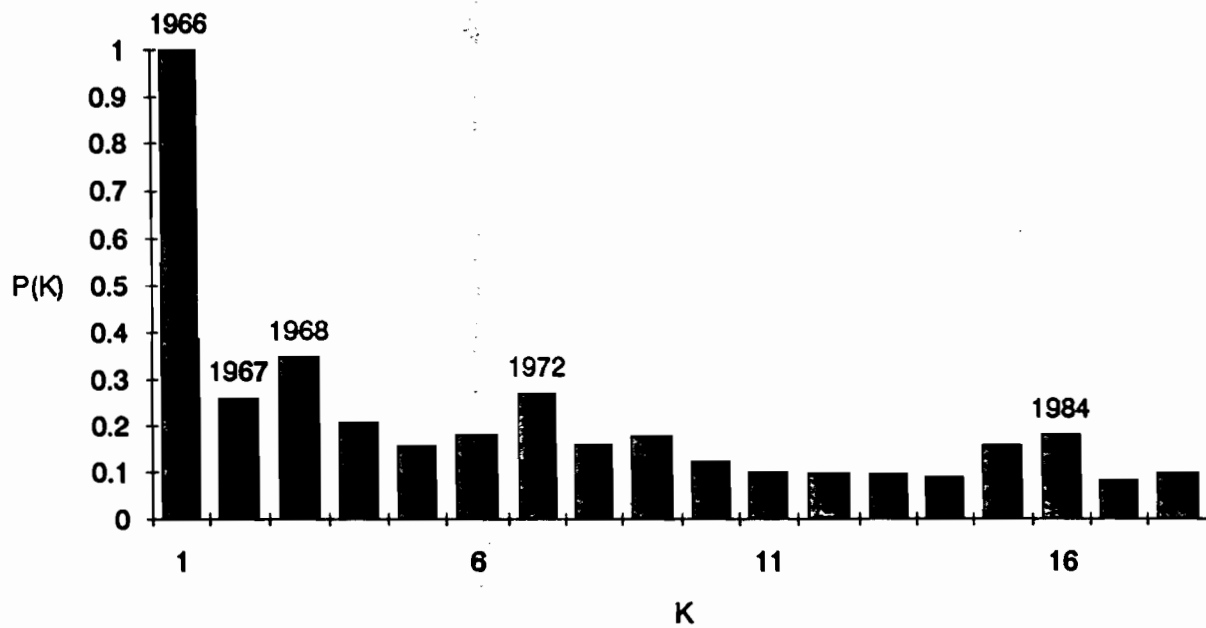
STATION DE BOCANDA



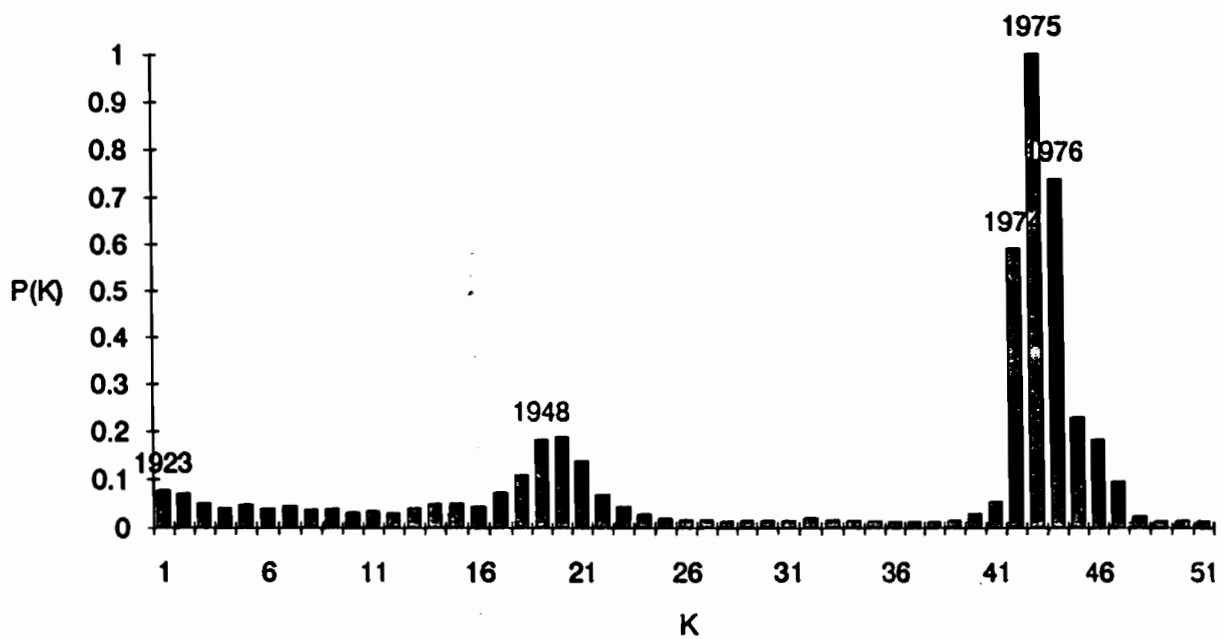
STATION DE BOUAFLE



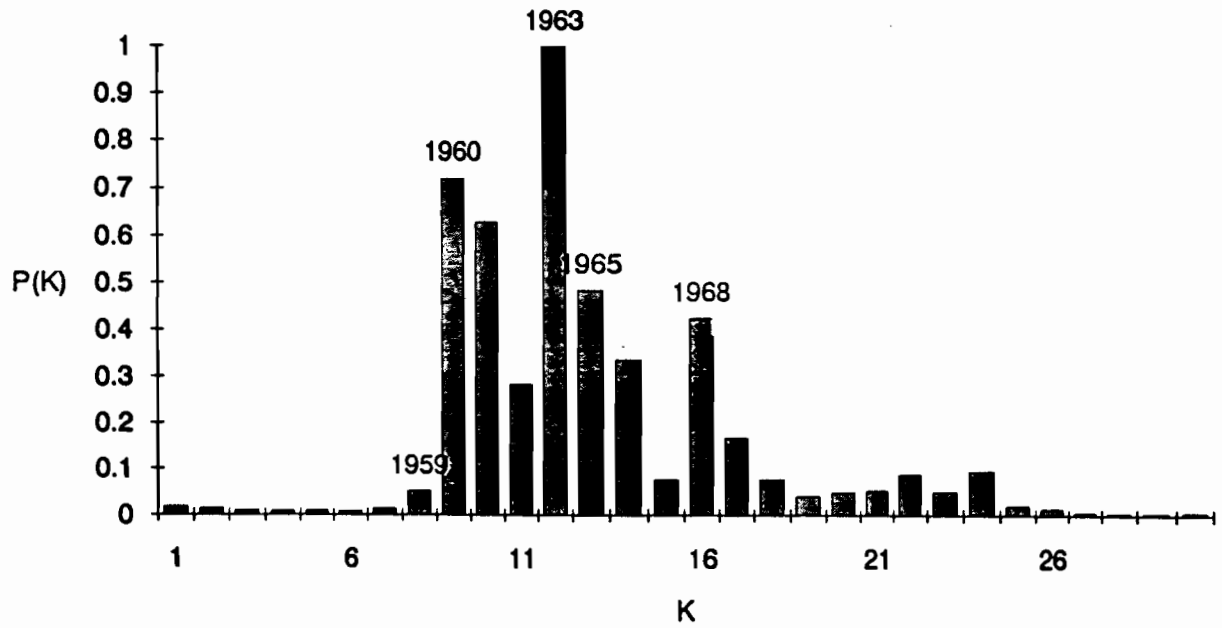
STATION DE BOUAKE



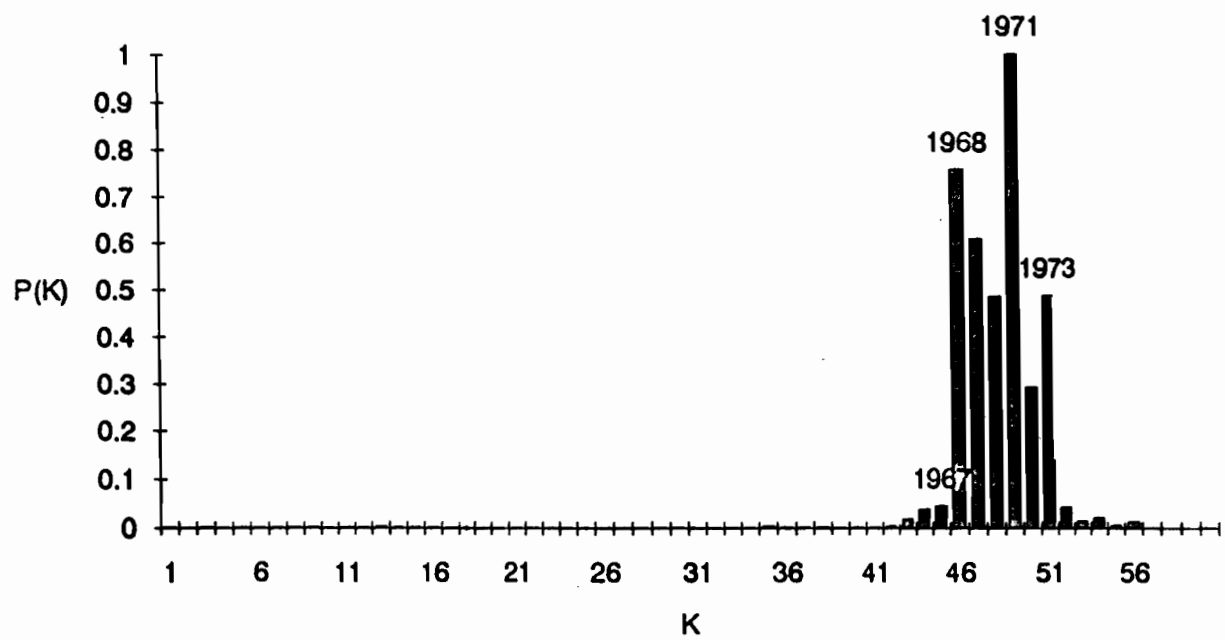
STATION DE BOUNDIALI



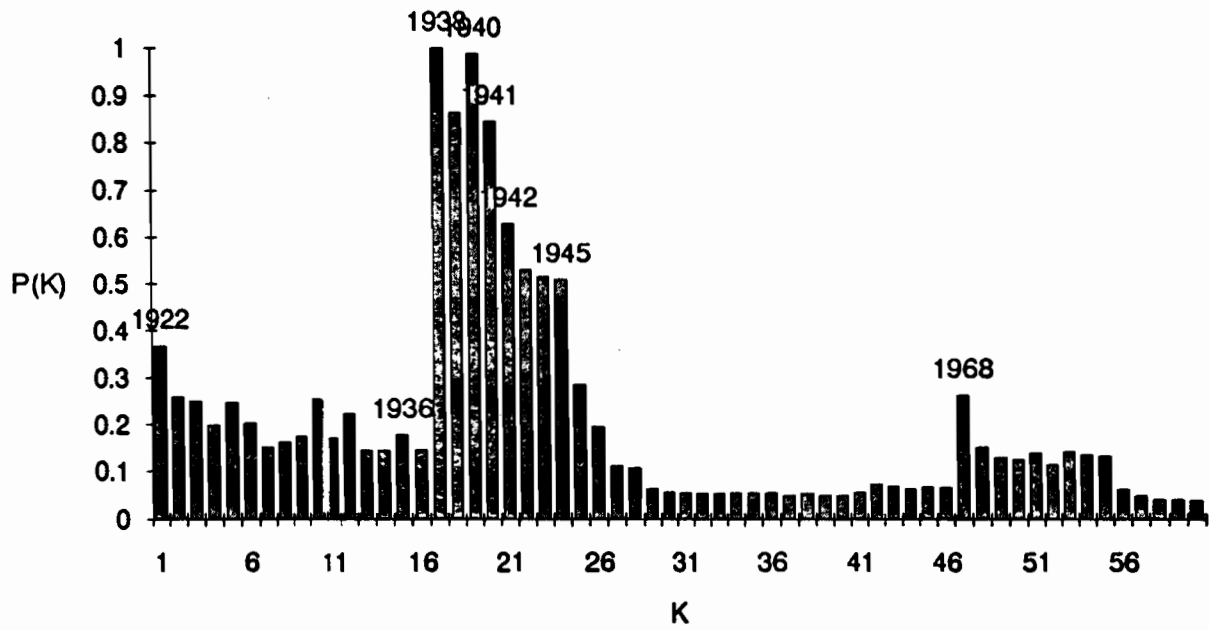
STATION DE CECHI



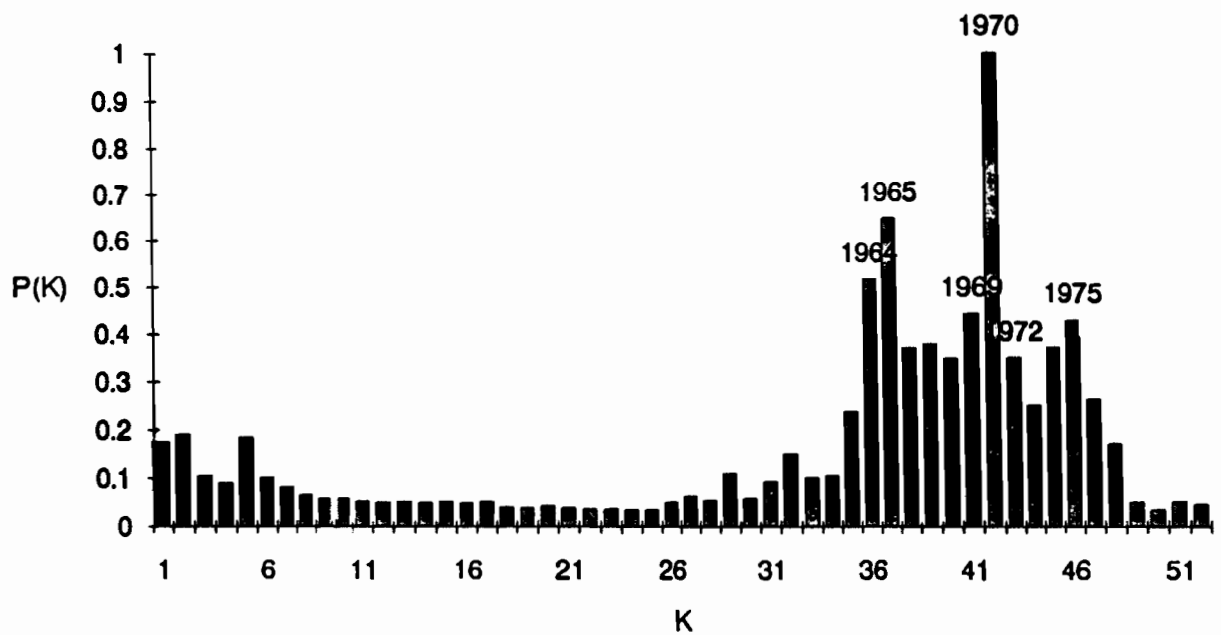
STATION DE DABAKALA



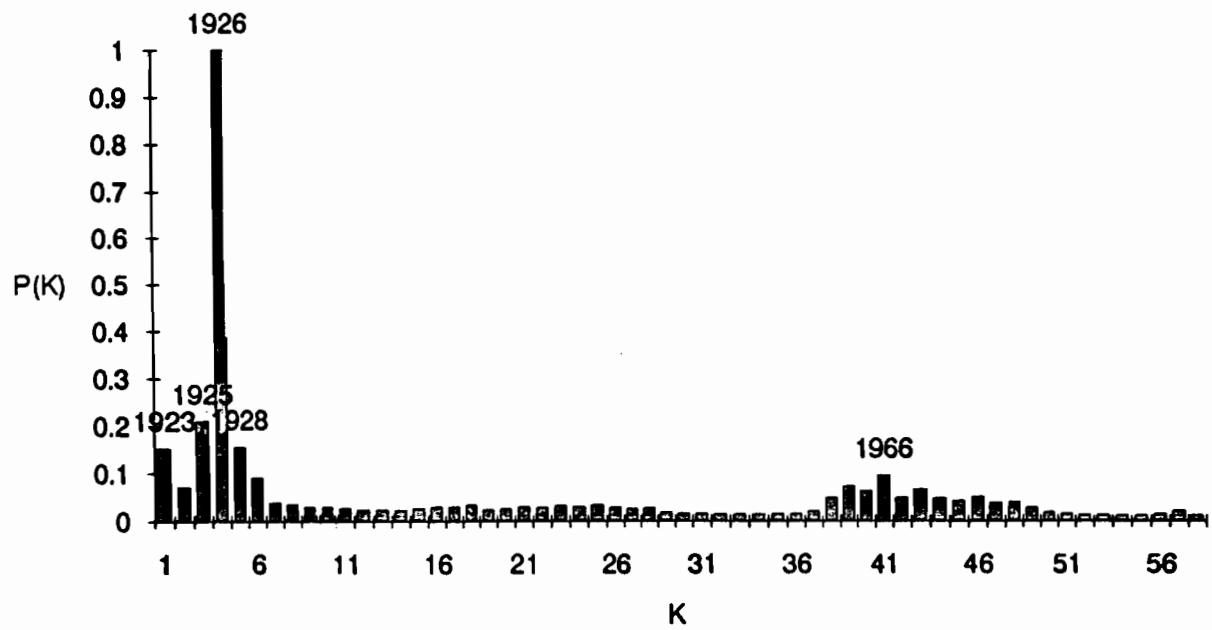
STATION DE DIMBOKRO



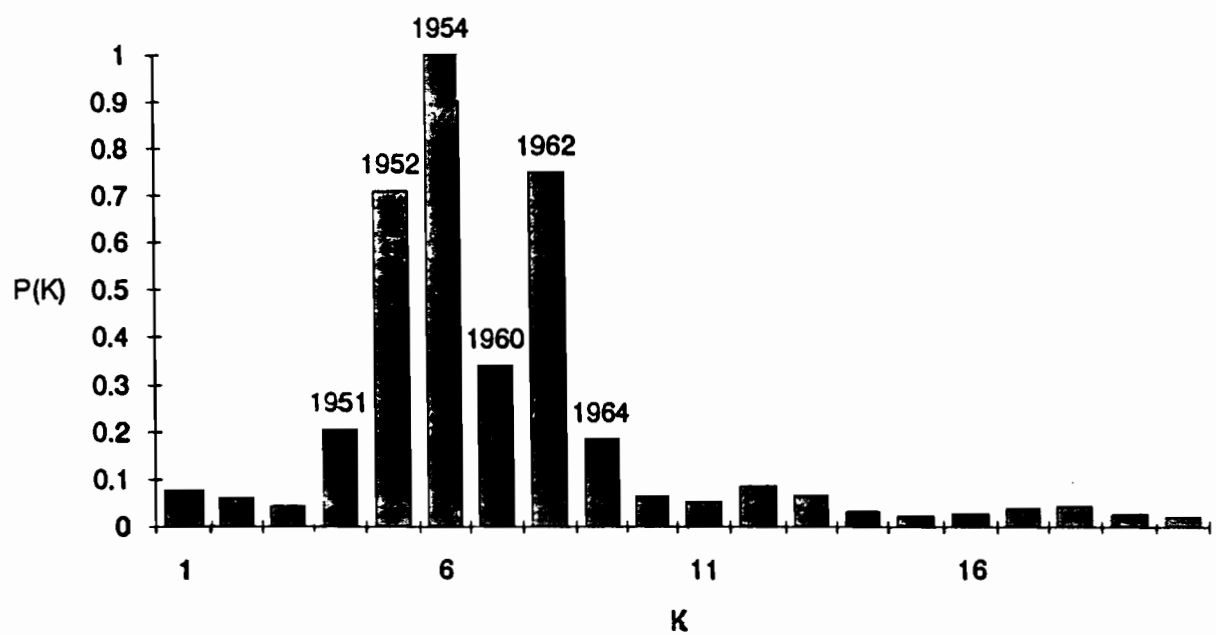
STATION DE FERKESSEDOUGOU



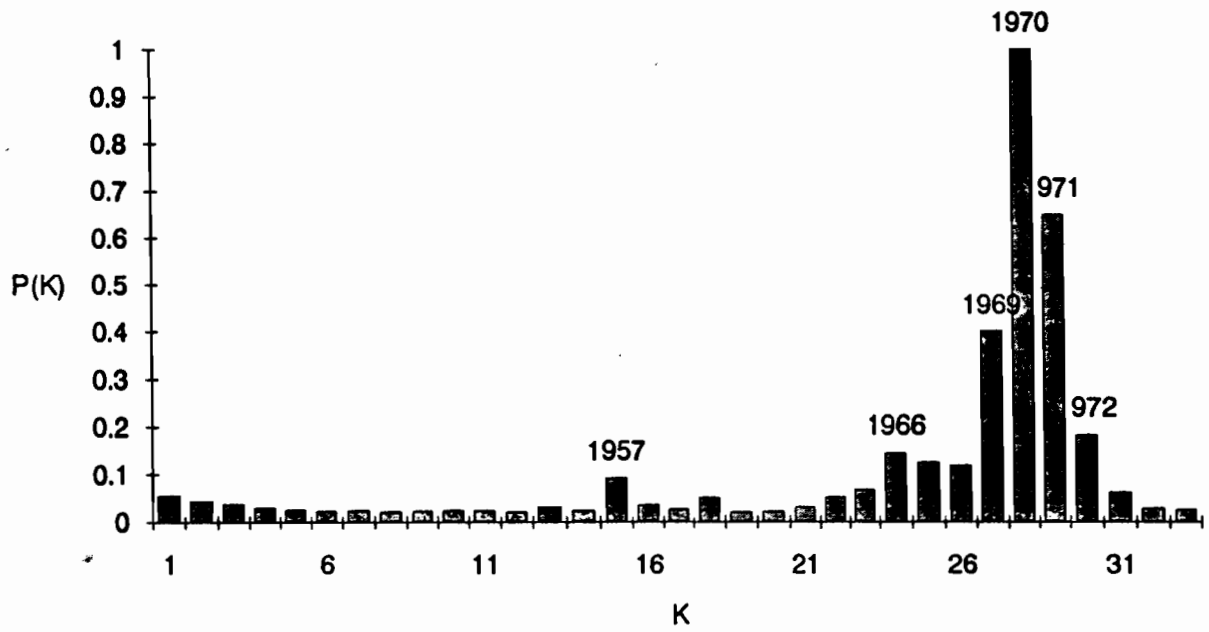
STATION DE GAGNOA



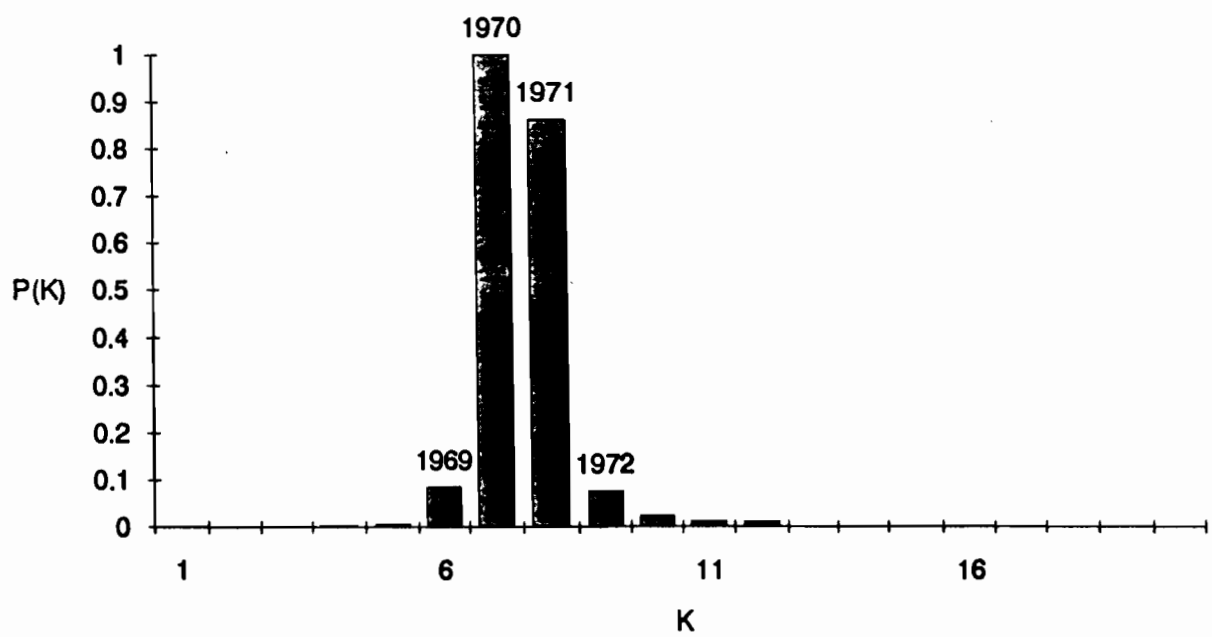
STATION DE GRABO



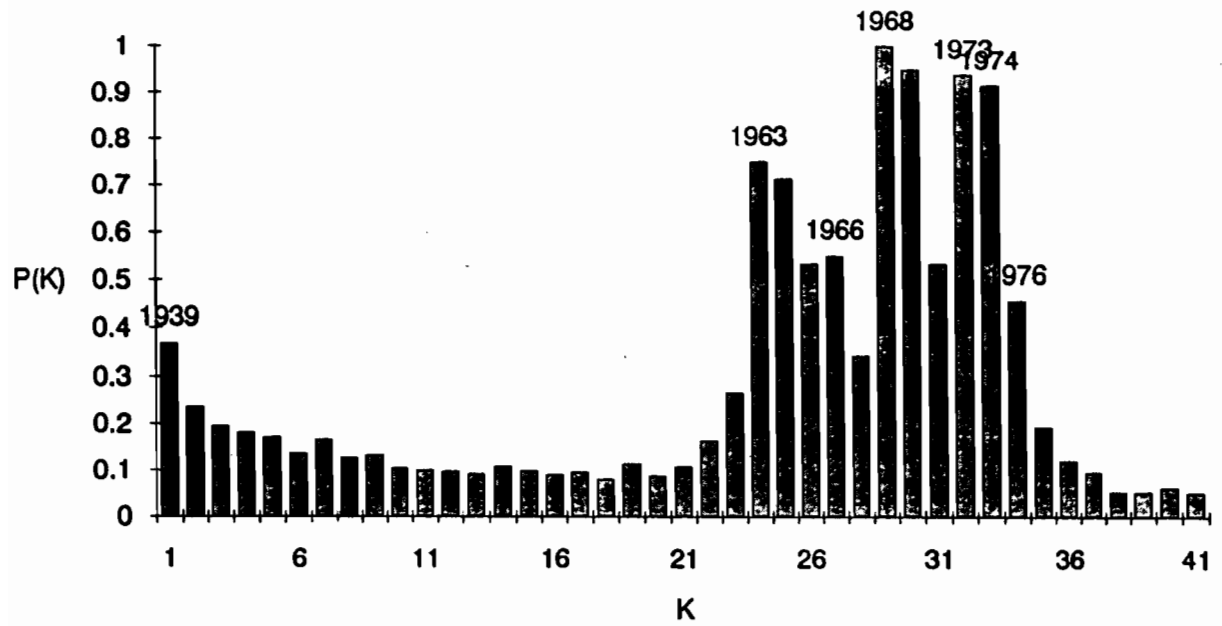
STATION DE KORHOGO



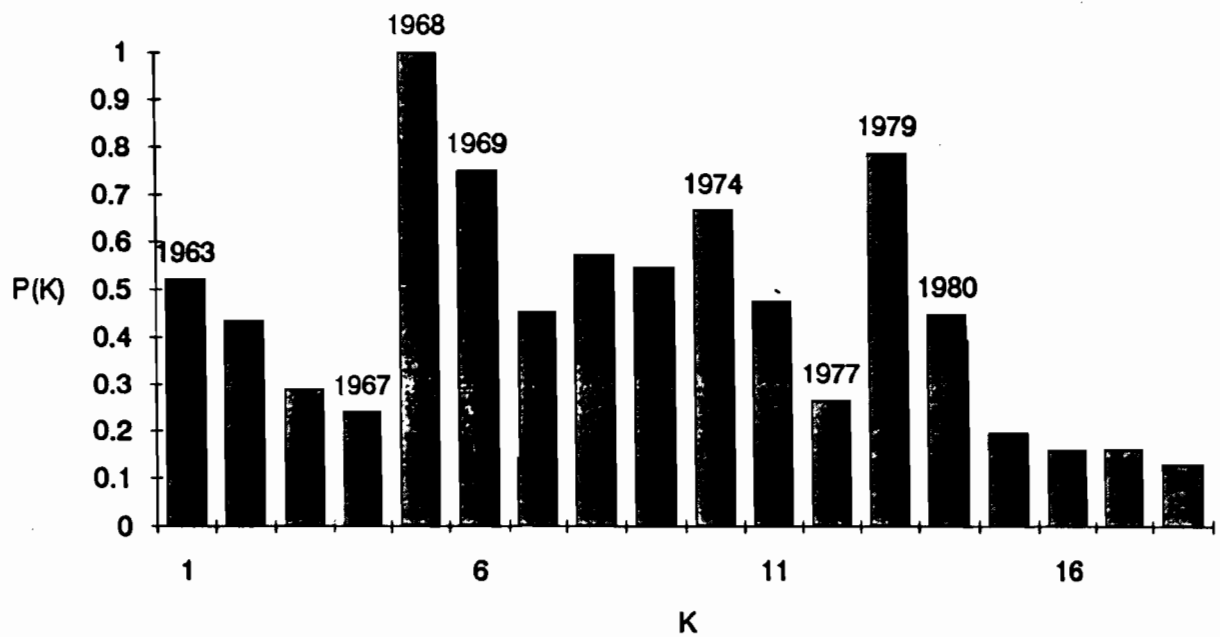
STATION DE KOUTO



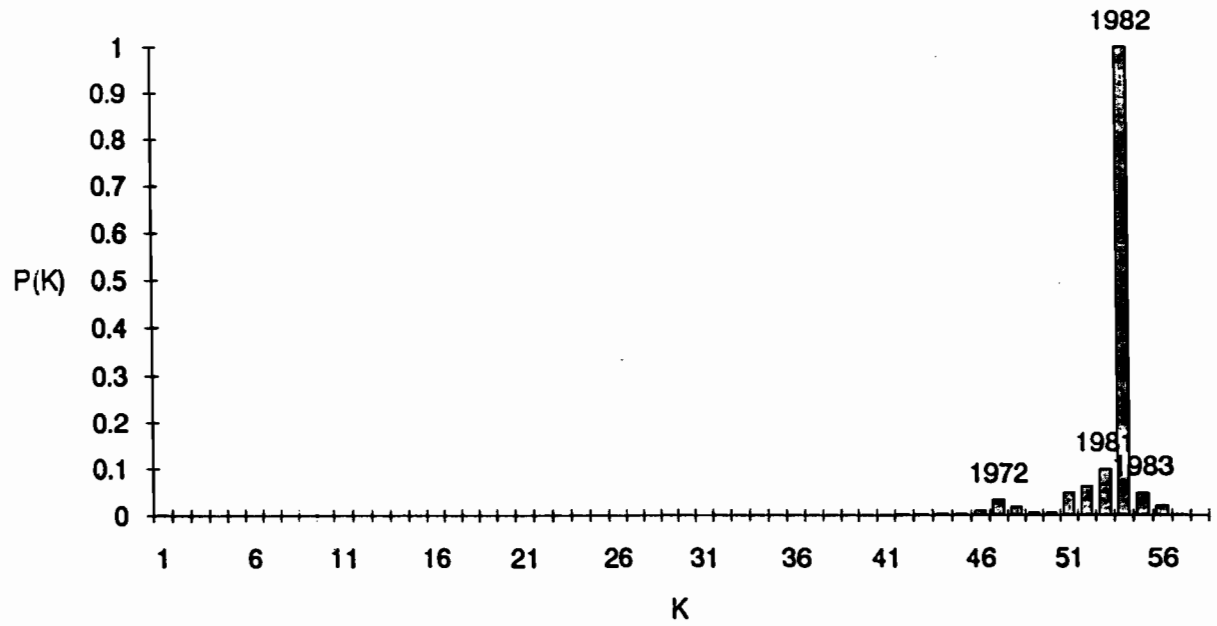
STATION DE MANKONO



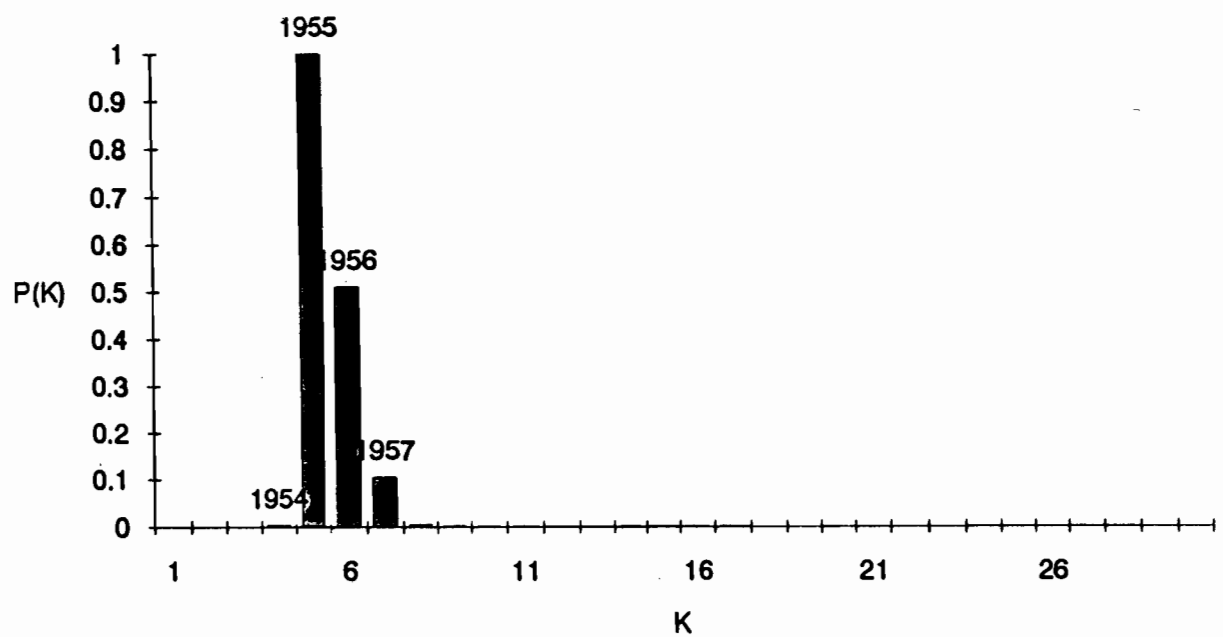
STATION DE N'DOUCI



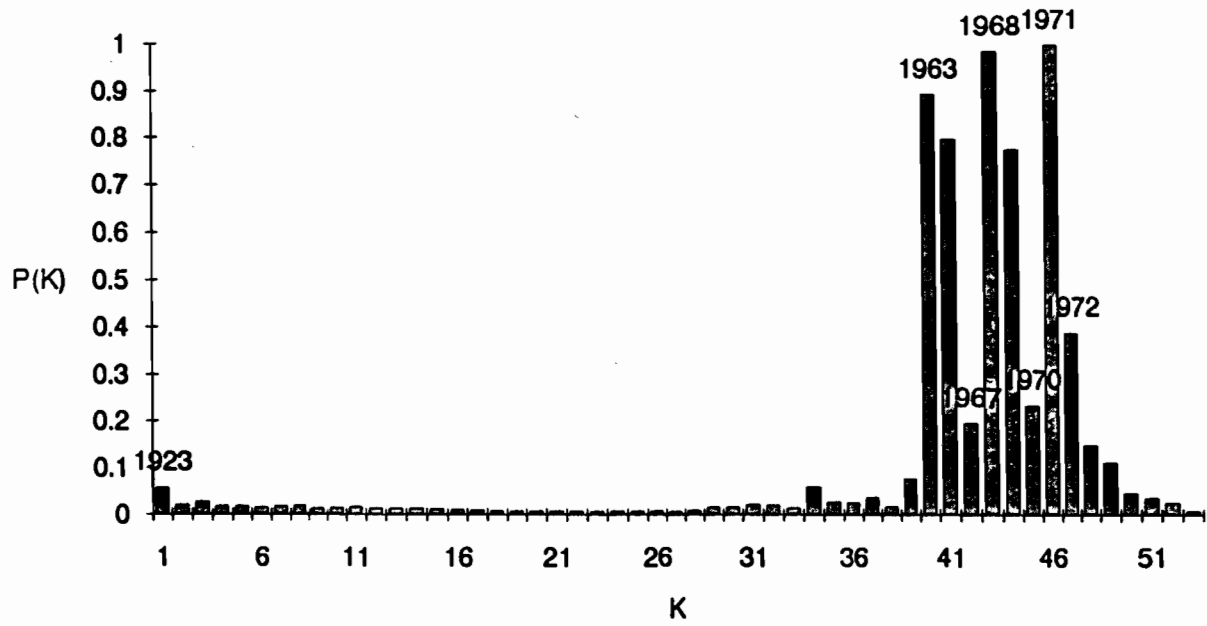
STATION D'ODIENNE



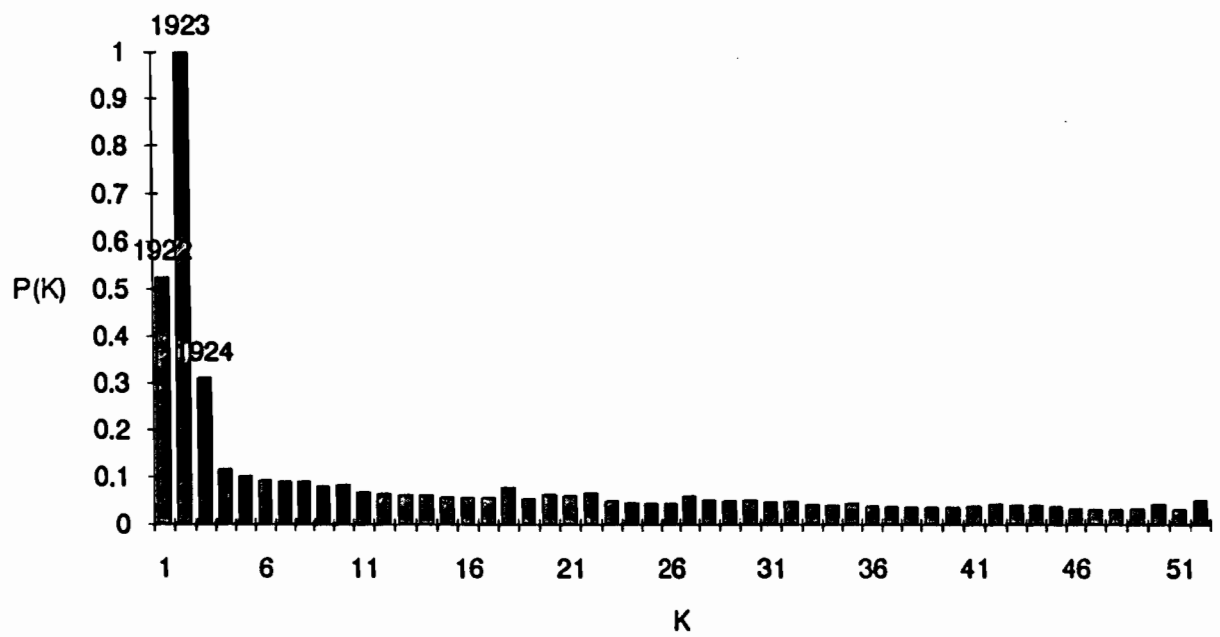
STATION DE OUANGOLODOUGOU



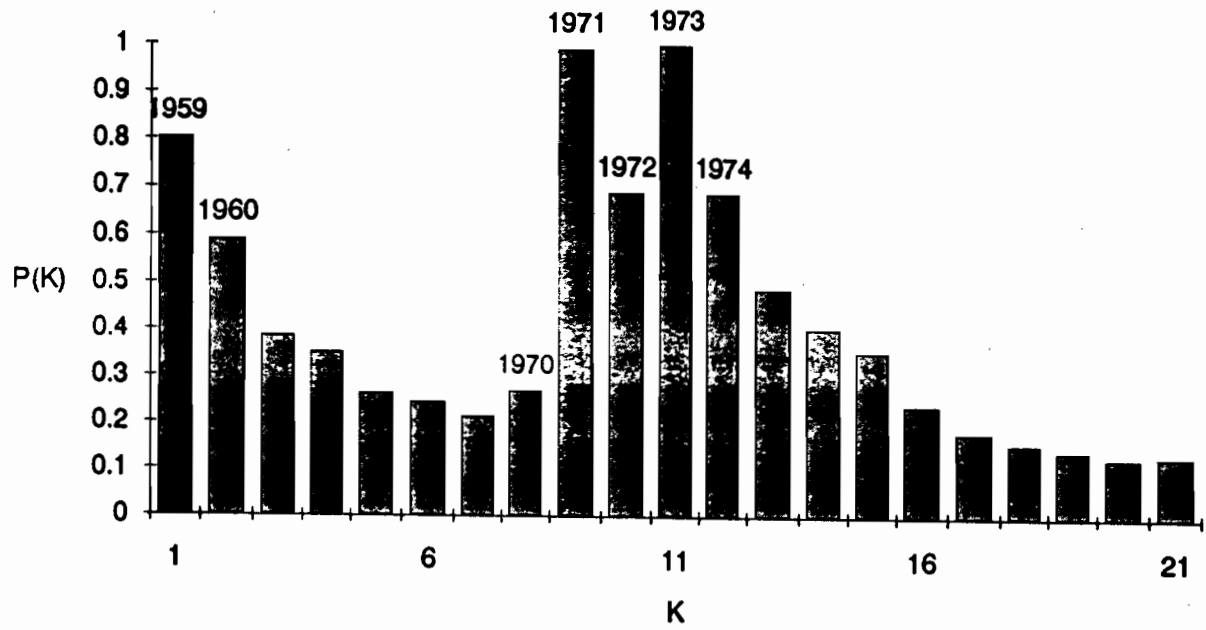
STATION DE SEGUELA



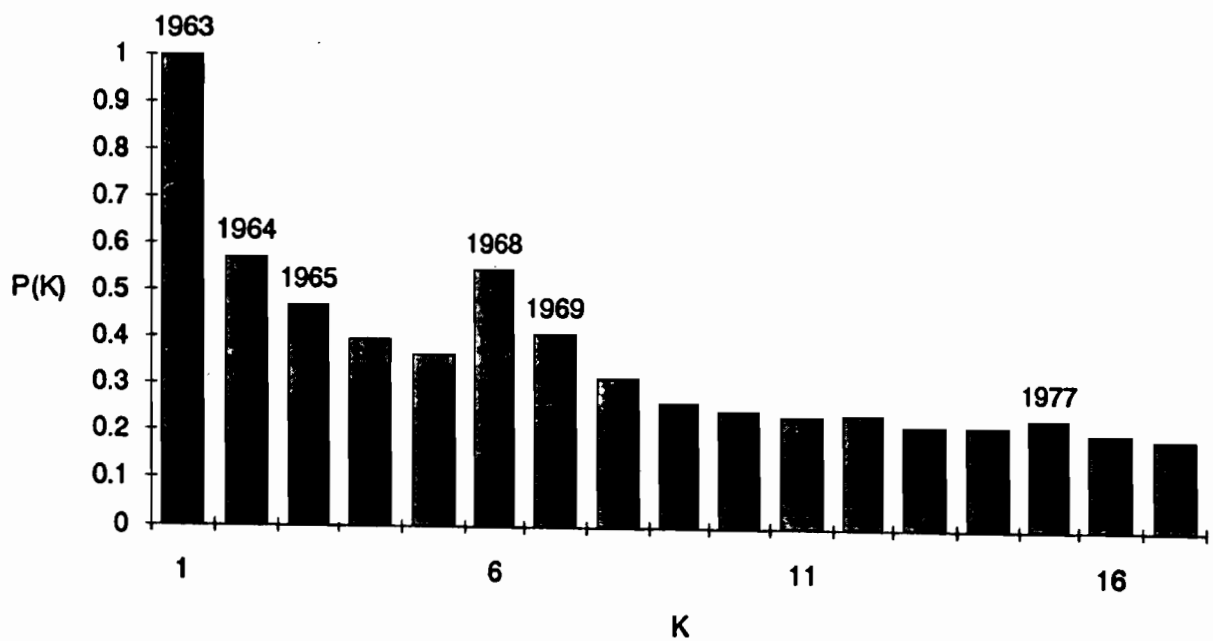
STATION DE TABOU



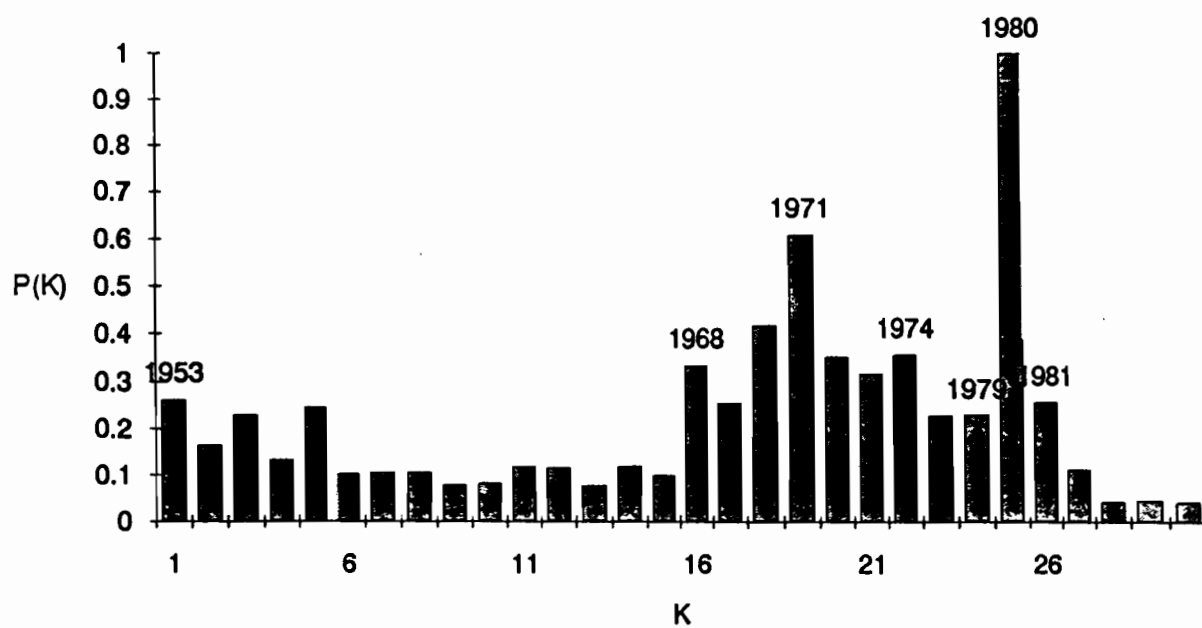
STATION DE TIEBISSOU



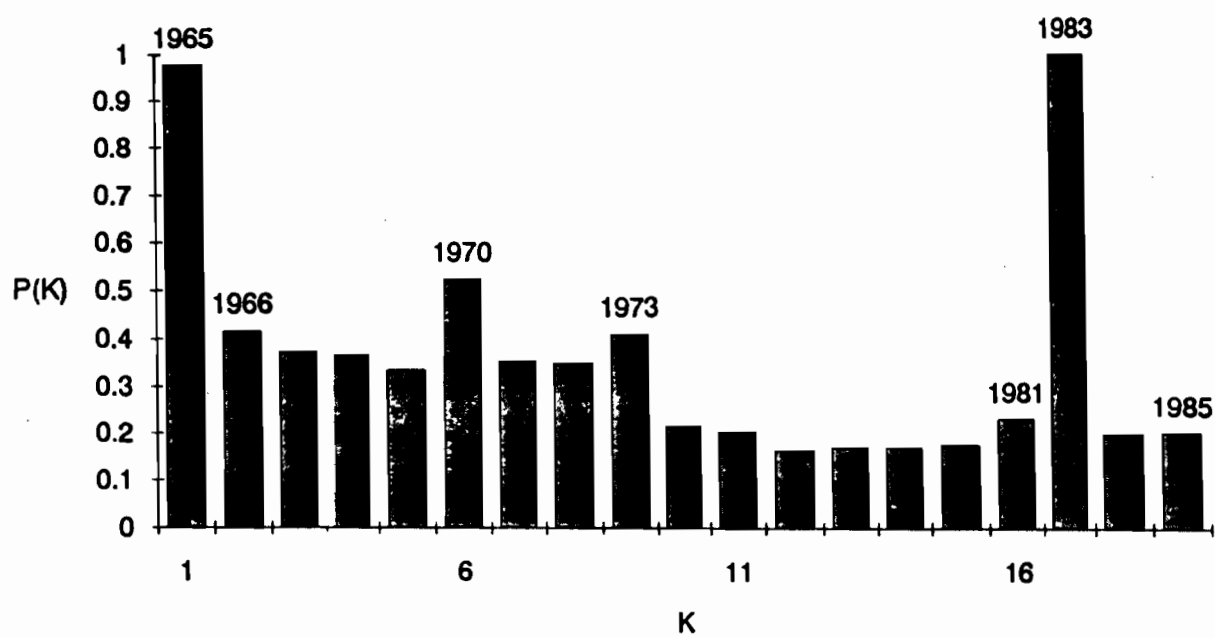
STATION DE TOUMODI



STATION DE VAVOUA



STATION DE YAMOUSOUKRO



Pluie annuelle, lame annuelle écoulée et coefficient d'écoulement en transition

	Pluie An	Lame An	Coef. éc.
soun83	726	2.8	0.39%
soun85	1423	149.3	10.5%
soun86	1020	8.2	0.80%
kanb83	726	0.6	0.08%
kanb84	1096	39.3	3.6%
kanb85	1423	135.3	9.5%
kanb86	1020	9	0.88%
kanz81	1048	16.1	1.5%
kanz82	1066	15	1.4%
kanz84	1200	17.1	1.4%
kanz85	1295	60.1	4.6%
kanz86	899	14.5	1.6%
bere85	1602	69.1	4.3%
bere86	867	20.2	2.3%
fon85	1501	177	11.8%
fon86	976	69.8	7.2%
neng83	678	0.4	0.06%
neng84	1289	67.9	5.3%
neng85	1098	46.2	4.2%
byeb81	1155	41.7	3.6%
byeb82	870	4.1	0.47%
byeb83	706	1.9	0.27%
byeb84	1239	49.7	4.0%
byeb85	1062	58.5	5.5%
bour84	1202	51.8	4.3%
bur85	1009	52.2	5.2%
dior83	598	1.4	0.23%
dior85	1248	36.5	2.9%
bada83	705	3	0.43%
bada84	1215	39.9	3.3%
bada85	1102	48.7	4.4%
kand71	1695	33.1	2.0%
kand74	975	29.4	3.0%
kand75	909	46.5	5.1%
kand83	337	10	3.0%
kand84	1150	75.6	6.6%
kand85	1283	216.3	16.9%
kand86	977	9.4	1.0%

	Pluie An	Lame An	Coef. éc.
lobo64	1261	55.4	4.4%
lobo65	978	28.6	2.9%
lobo66	1554	146.9	9.5%
lobo67	1154	32.6	2.8%
lobo68	1765	156.2	8.9%
lobo70	1386	40.2	2.9%
lobo71	1325	58.4	4.4%
lobo72	1062	33.9	3.2%
lobo73	1177	46.1	3.9%
lobo74	1234	40.6	3.3%
lobo80	1505	118.1	7.8%
lobo81	870	24.9	2.9%
lobo82	938	24.5	2.6%
lobo83	742	3.8	0.51%
lobo85	1250	55.9	4.5%
lobo86	940	14.2	1.5%

Pluie annuelle, lame annuelle écoulée et coefficient d'écoulement en forêt

	Pluie an.	Lame éc.	Coef. éc.
kavi65	1185	94	7.9%
kavi66	1347	142.3	10.6%
kavi67	1096	101.4	9.3%
kavi72	1239	72.6	5.9%
kavi76	1469	191.2	13.0%
kavi77	976	43.1	4.4%
kavi78	1103	64.6	5.9%
kavi79	1489	157.4	10.6%
kavi80	1151	54	4.7%
kavi82	984	98.3	10.0%
kavi84	1239	23.1	1.9%
kavi85	1240	43.6	3.5%
msan83	707	19.6	2.8%
msan84	1240	49.7	4.0%
msan86	1099	40.3	3.7%
koma70	1150.2	155.2	13.5%
koma71	1798	362.6	20.2%
koma72	1576	340	21.6%
koma73	1478	289.1	19.6%
koma74	1353	517.9	38.3%
koma76	1321	756.1	57.2%
koma77	1914	840.5	43.9%
koma78	1476.7	612.1	41.5%
koma80	1615	476.2	29.5%
koma81	1831	319.6	17.5%
koma84	1635	306.5	18.7%
koma85	1722	482	28.0%
koma86	1332	135.5	10.2%
kolo80	1536	364.2	23.7%
kolo81	1589	243	15.3%
kolo82	1626	257.1	15.8%
kolo83	1207	144.3	12.0%
kolo84	1523	174.2	11.4%
kolo85	1584	405	25.6%
kolo86	1285	112.5	8.8%
ggag82	1377	65.4	4.7%
ggag85	1562	77.8	5.0%
ggag86	1004	41	4.1%
gdia84	1787	179.4	10.0%
gdia85	1548	153.4	9.9%
gdia86	1017	55.5	5.5%
dodo82	1784	476.6	26.7%
dodo85	1374	467	34.0%
taya79	2321	1265	54.5%
taya80	2905	1397	48.1%
taya81	2176	1145	52.6%
taya86	1772	520.3	29.4%
laol85	1932	736.6	38.1%
laol86	1841	501	27.2%

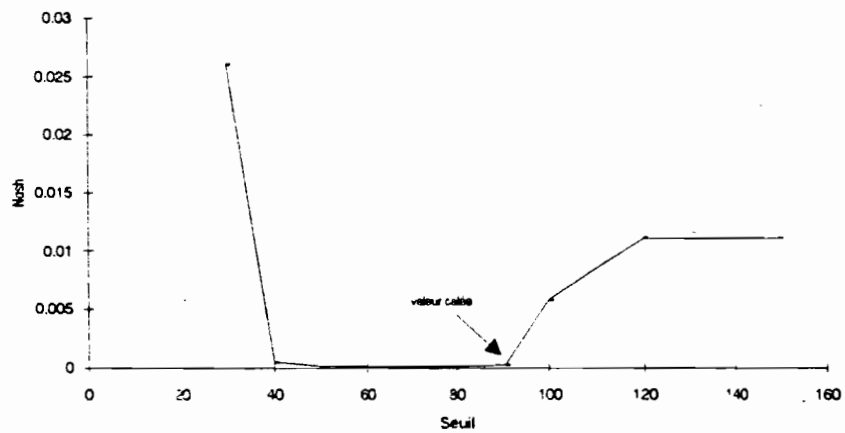
	Pluie an.	Lame éc.	Coef. éc.
neka79	2358	761.6	32.3%
neka80	3247	1026	31.6%
neka81	2144	708.4	33.0%
neka82	1807	511.8	28.3%
neka85	1932	801.2	41.5%
neka86	1841	389.5	21.2%
nero81	1480	525.2	35.5%
nero82	1772	522.7	29.5%
nero83	1302	305.6	23.5%
nero85	1098	544.5	49.6%
nzo84	1635	309	18.9%
nzo85	1722	454.5	26.4%
nzo86	1332	186	14.0%
zoka81	1654	298.6	18.1%
zoka82	1670	327.3	19.6%
zoka83	1219	223.2	18.3%
zoka84	1553	236.4	15.2%
zoka85	1621	450.6	27.8%
zoka86	1298	197.3	15.2%
davo69	1249	218.6	17.5%
davo70	1352	181.7	13.4%
davo71	1503	143.8	9.6%
davo72	1265	200.8	15.9%
davo73	1429	135.2	9.5%
davo74	1230	105.9	8.6%
davo75	1162	86.4	7.4%
davo76	1236	212.6	17.2%
davo77	1294	148.2	11.5%
davo78	1118	132.8	11.9%
davo79	1505	210.3	14.0%
davo81	1433	100.5	7.0%
davo82	1168	159.3	13.6%
davo83	1319	79.3	6.0%
davo84	1802	164	9.1%
davo85	1531	204.3	13.3%
davo86	1033	99.8	9.7%
agne79	1423	53.5	3.8%
agne80	1065	23.1	2.2%
agne82	946	27.7	2.9%
agne83	979	12.2	1.2%
agne84	1313	52.5	4.0%

ANNEXE II

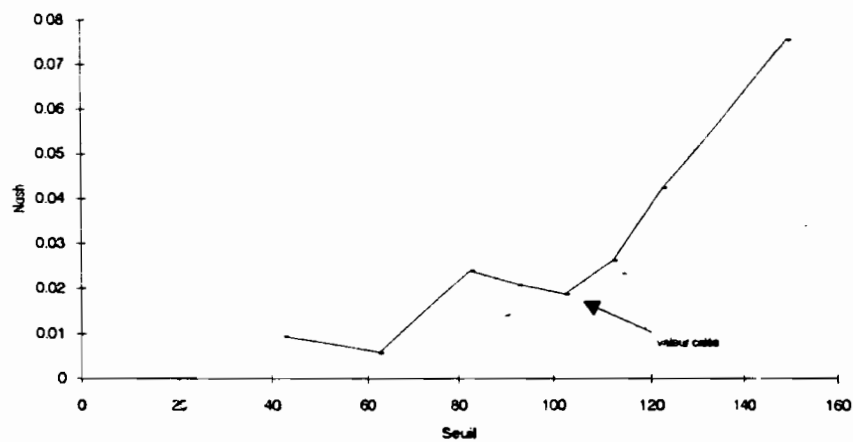
Sensibilité des paramètres

Graphiques de sensibilité

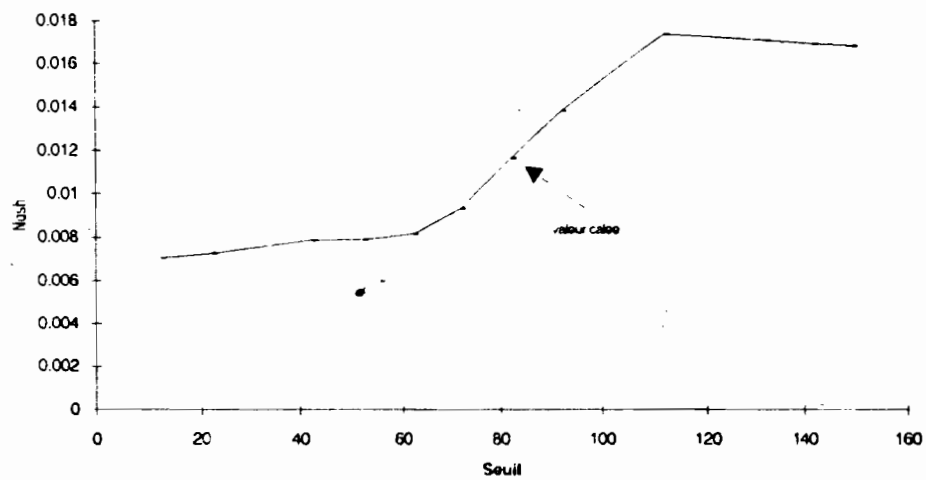
Etude de sensibilité: Seuil (Kan à Dimbokro en 1975)



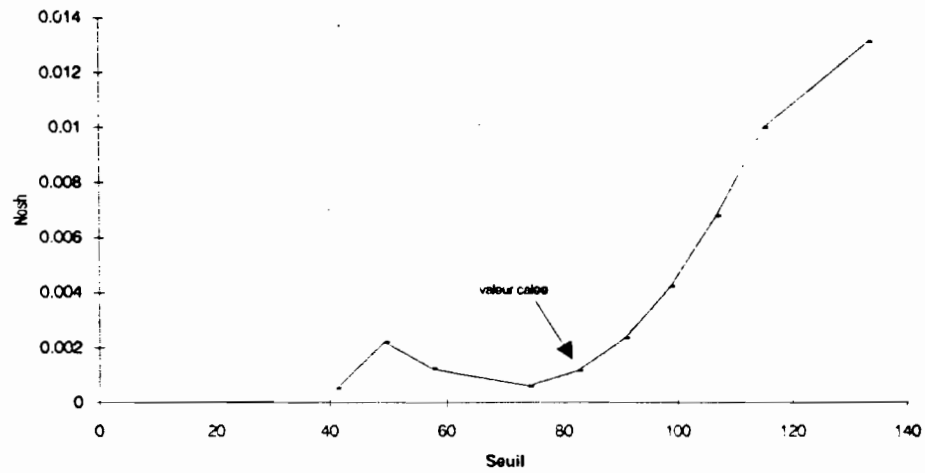
Etude de sensibilité: Seuil (Bays à Bouroukro en 1985)



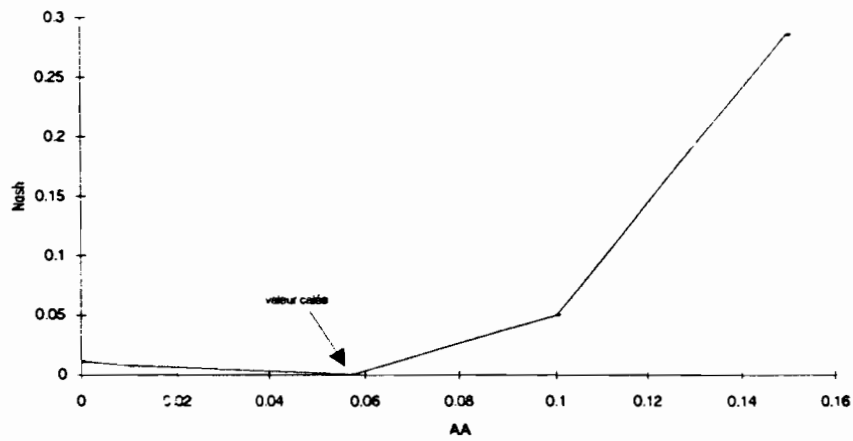
Etude de sensibilité: Seuil (Dava à Dakpadou en 1972)



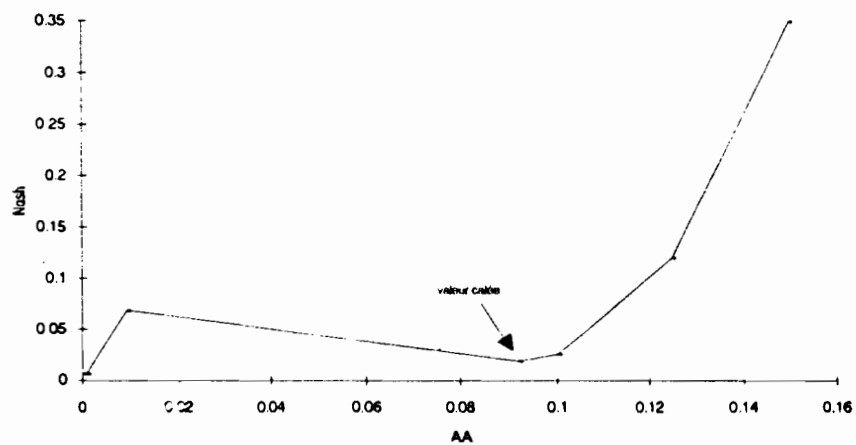
Etude de sensibilité: Seuil (N'Zo à Kahin en 1983)



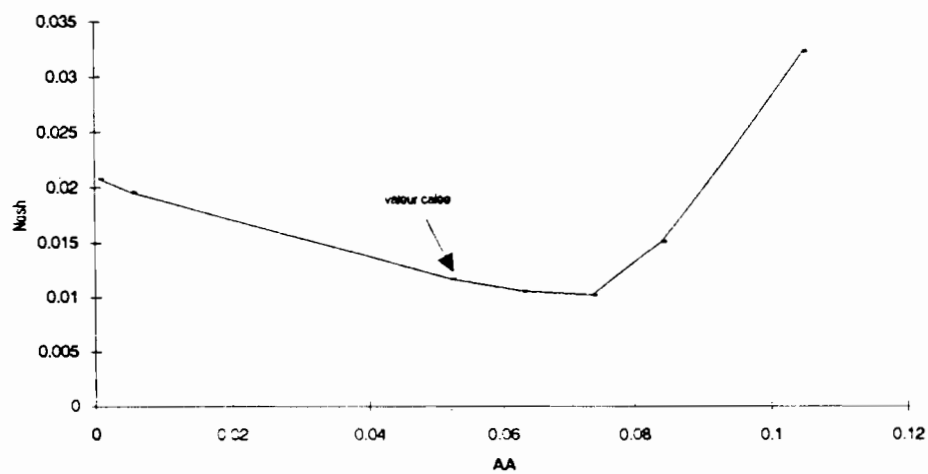
Etude de sensibilité: AA (Kan à Dimbokro en 1975)



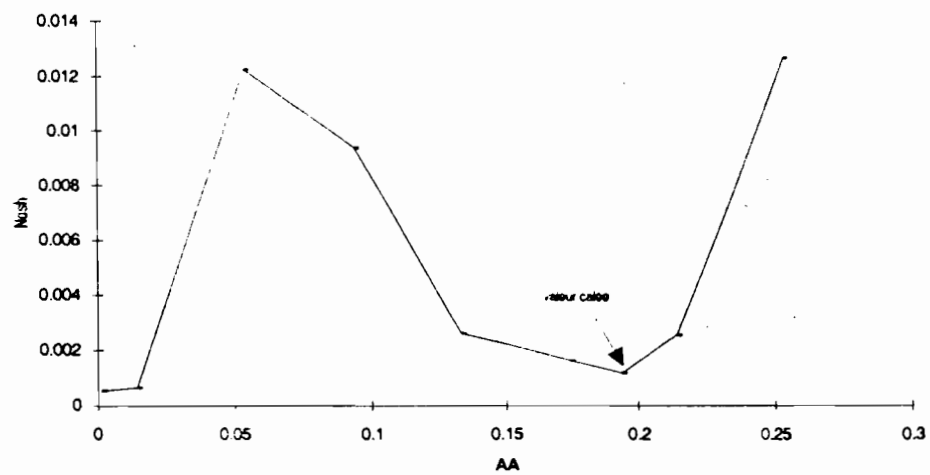
Etude de sensibilité: AA (Baya à Bouroukro en 1985)



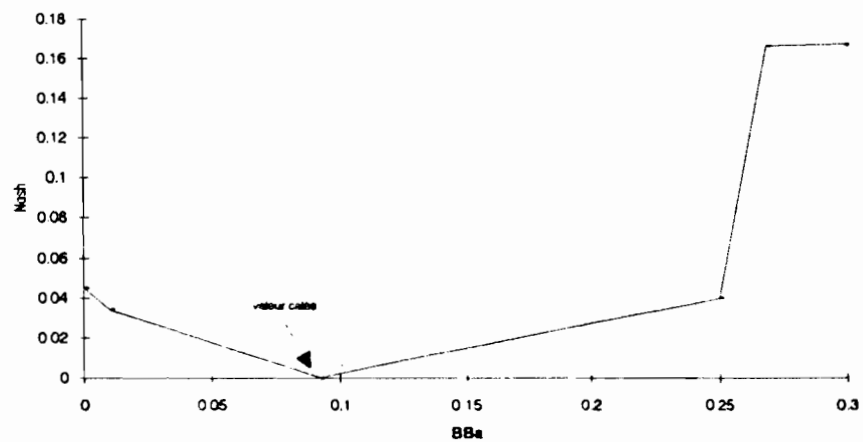
Etude de sensibilité: AA (Davo à Dakoudou en 1972)



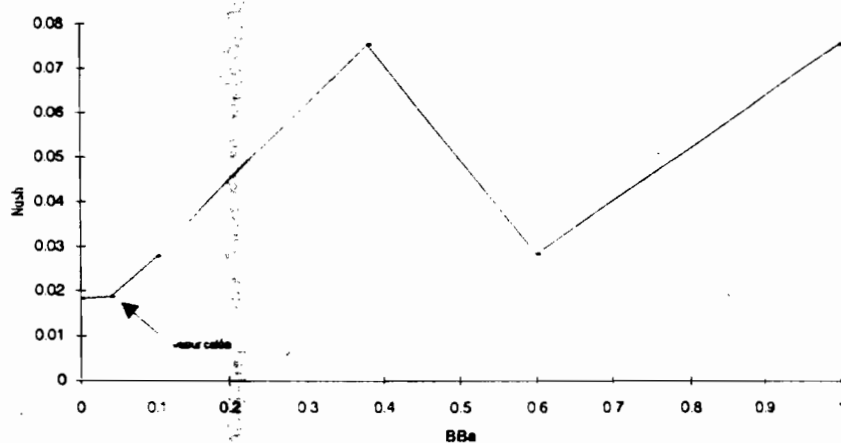
Etude de sensibilité: AA (N'Zo à Kahin en 1983)



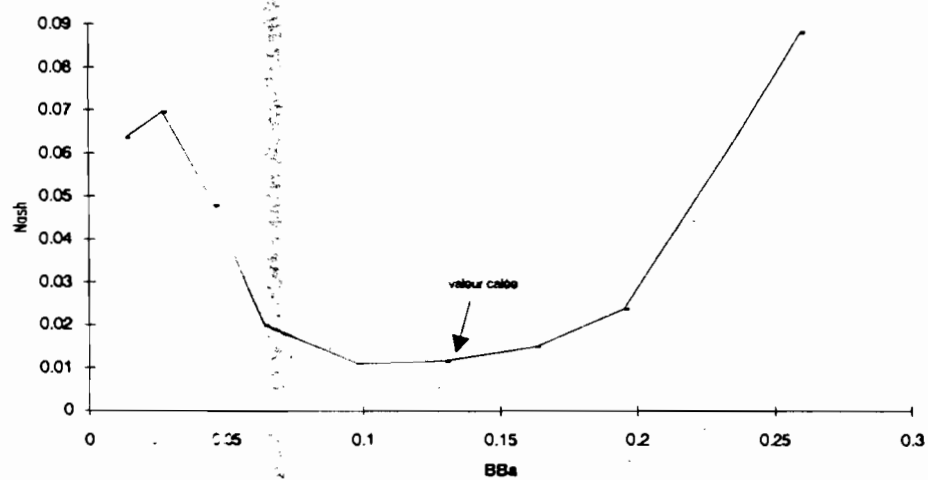
Etude de sensibilité: BBa (Kao à Dimbokro en 1975)



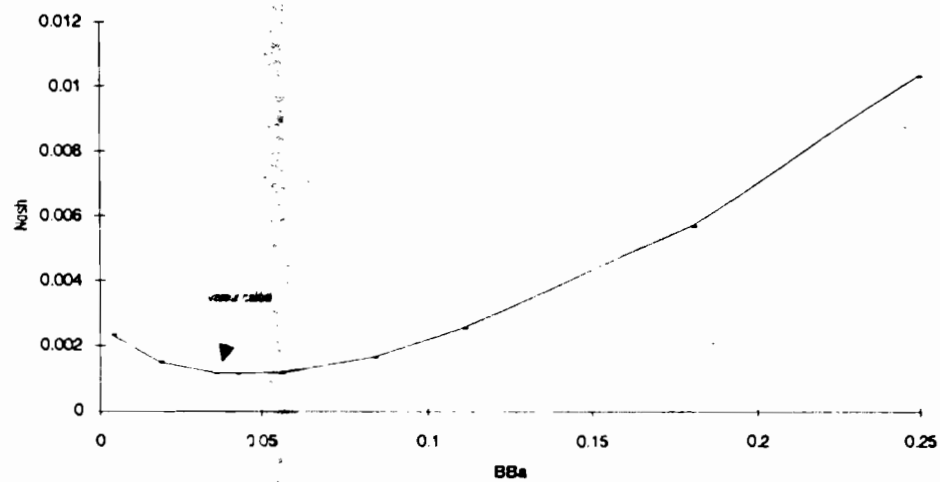
Etude de sensibilité: BBa (Baya à Bouroukro en 1985)



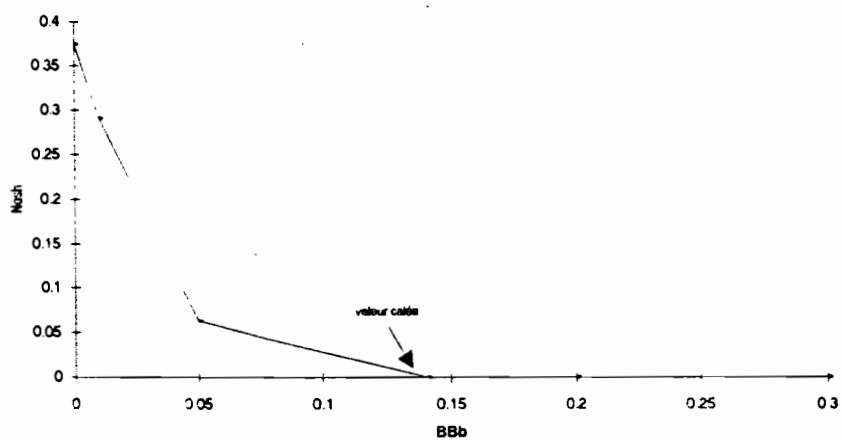
Etude de sensibilité: BBa (Davo à Dakpadou en 1972)



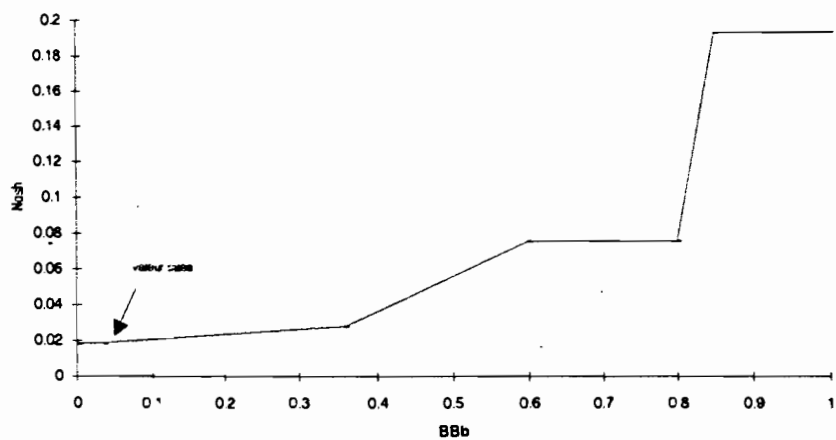
Etude de sensibilité: BBa (N'Zo à Kahin en 1983)



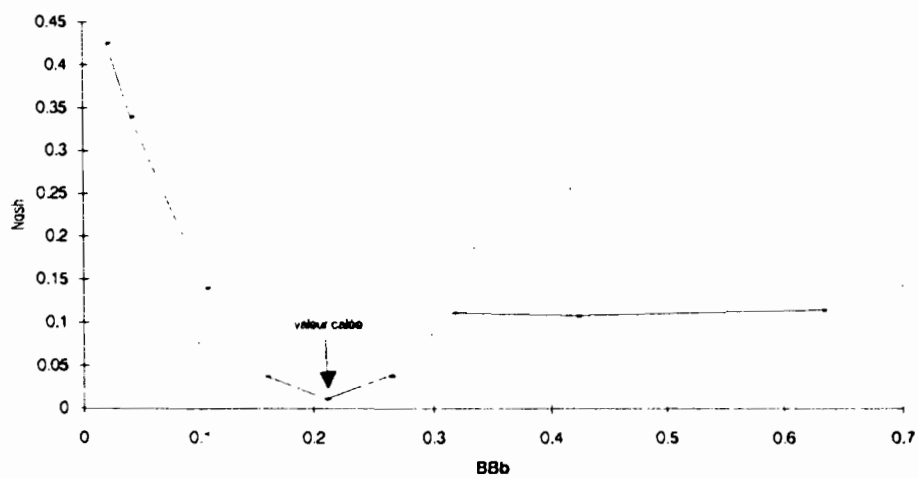
Etude de sensibilité: BBb (Kani Dimbokro en 1975)



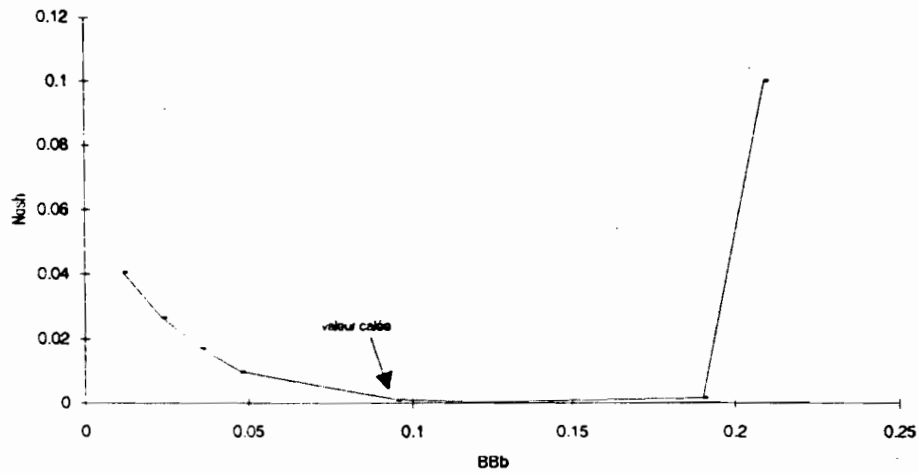
Etude de sensibilité: BBb (Baya à Bouroukro en 1985)



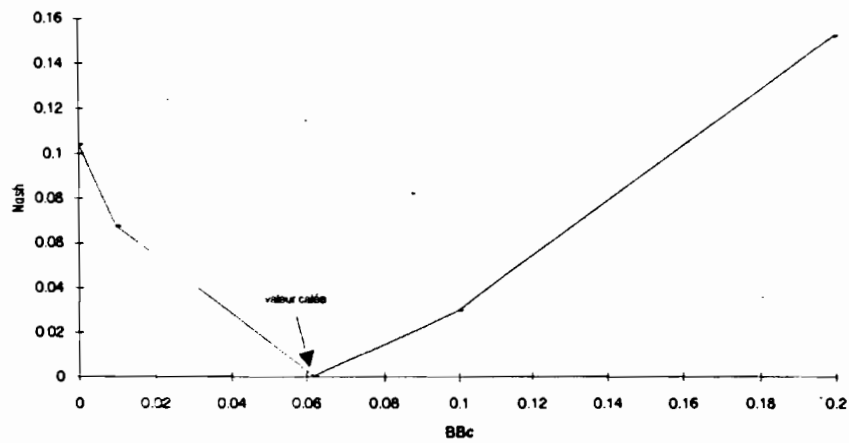
Etude de sensibilité: BBb (Davo à Dakoadou en 1972)



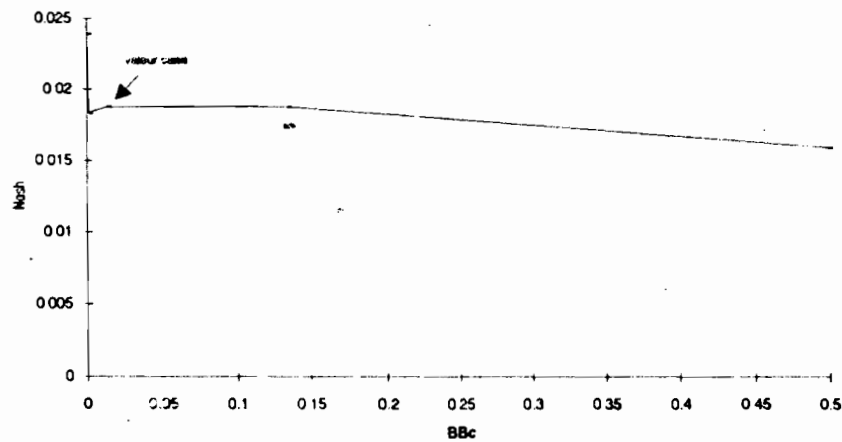
Etude de sensibilité: BBb (N'Zo à Kahin en 1983)



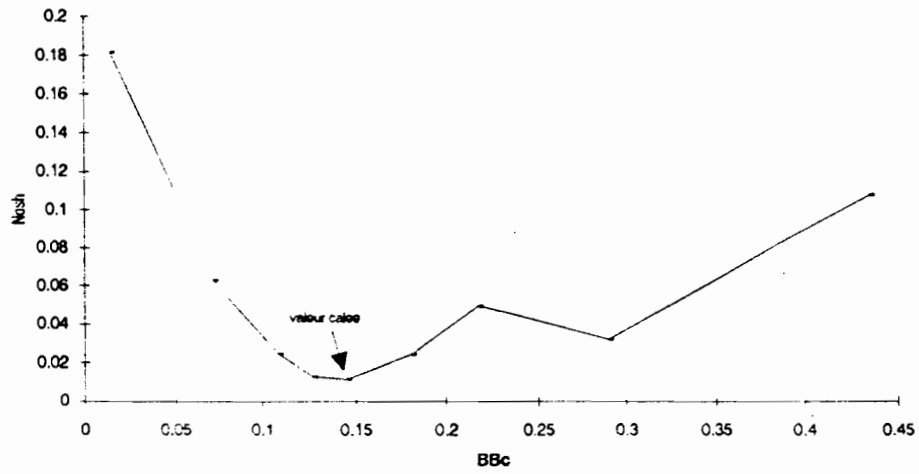
Etude de sensibilité: BBc (Kan à Dimbokro en 1975)



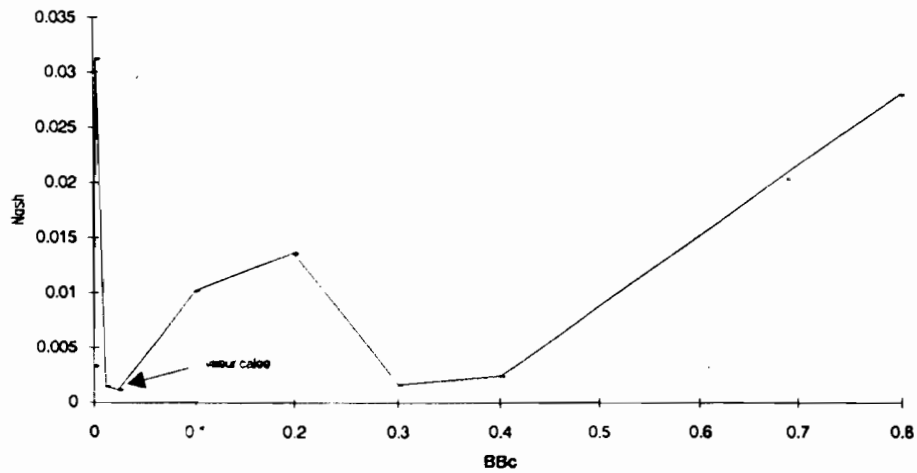
Etude de sensibilité: BBc (Baya à Bouroukro en 1985)



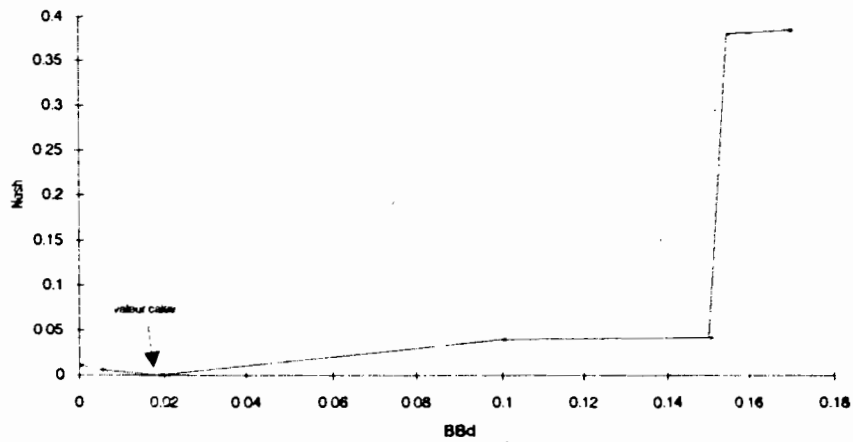
Etude de sensibilité: BBc (Davo à Dakpado en 1972)



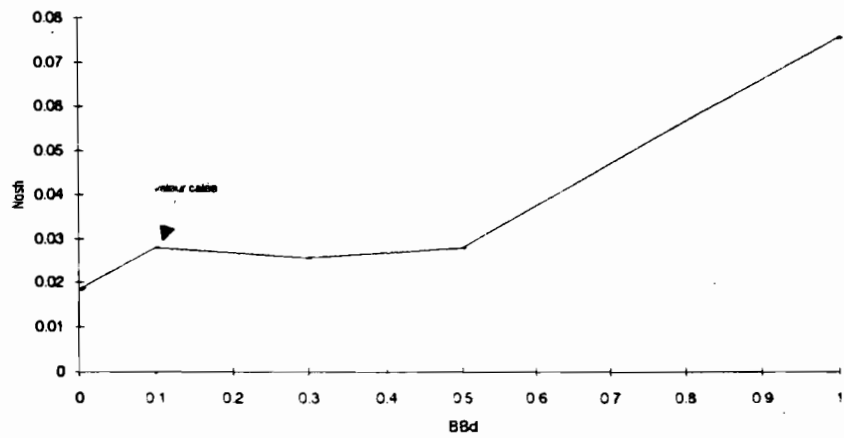
Etude de sensibilité: BBc (N'Zo à Kahin en 1983)



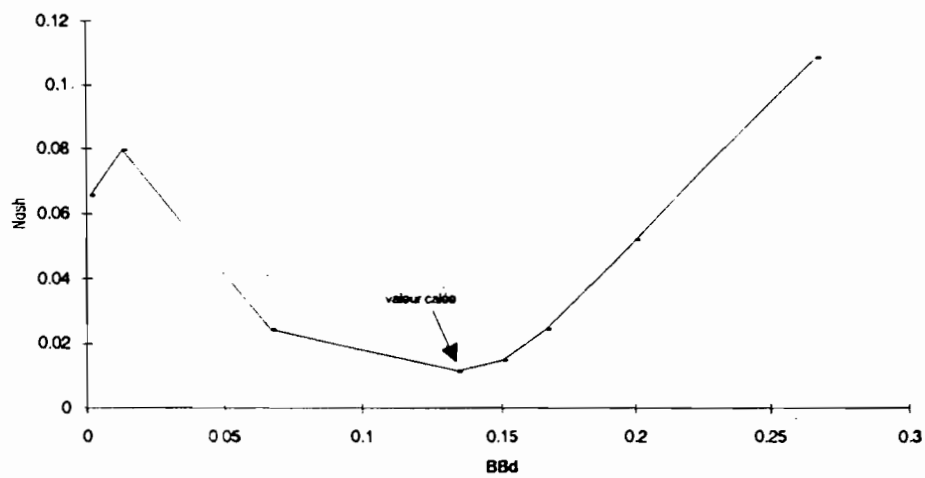
Etude de sensibilité: BBd (Kan à Dimbokro en 1975)



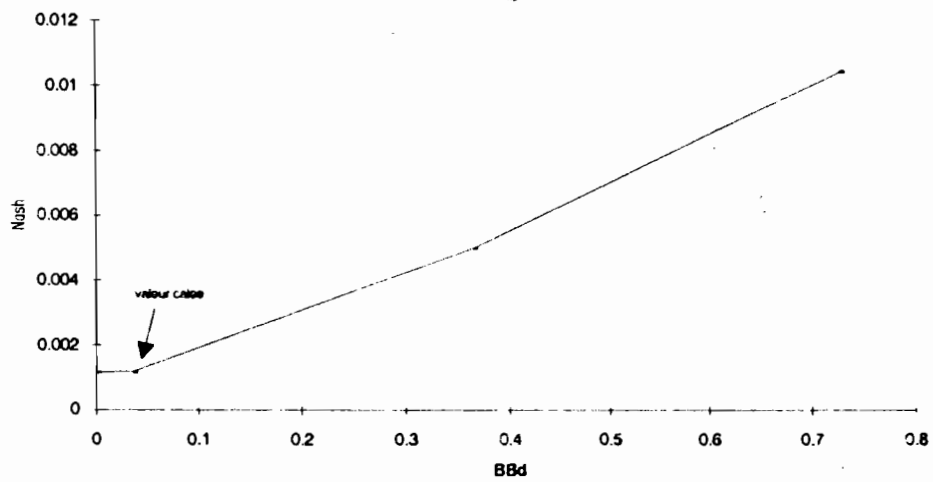
Etude de sensibilité: BBd (Baya à Bouroukre en 1985)



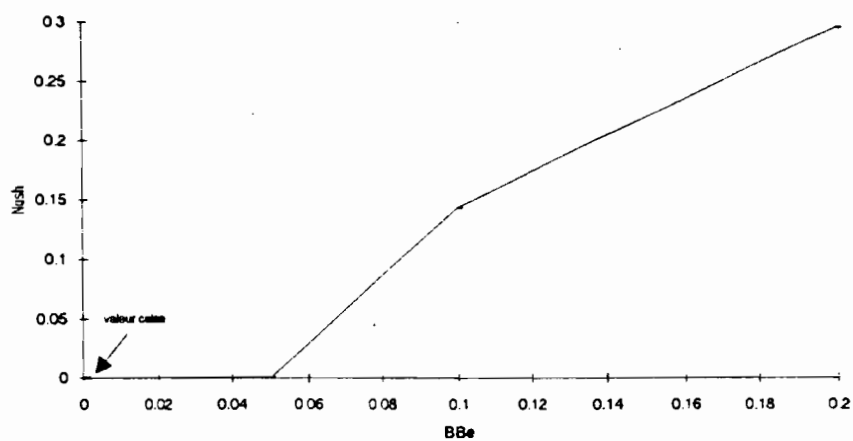
Etude de sensibilité: BBd (Davo à Dakpadou en 1972)



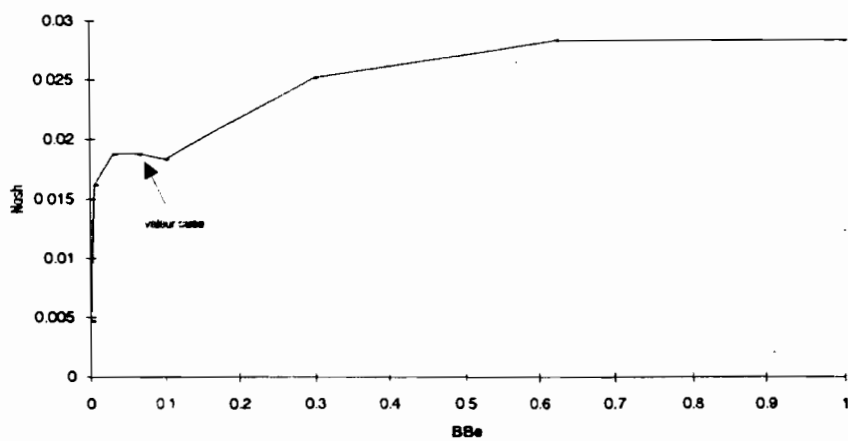
Etude de sensibilité: BBd (N'Zo à Kahin en 1983)



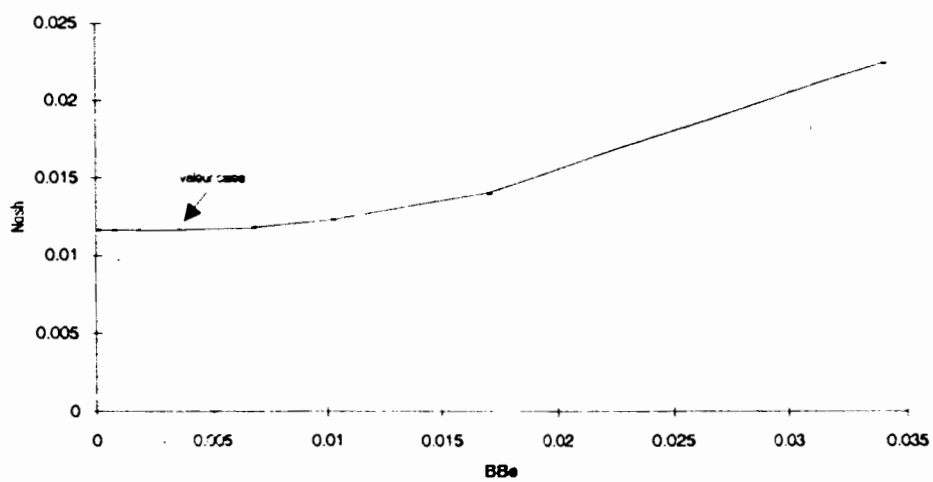
Etude de sensibilité: BBe (Kan à Dimbokro en 1975)



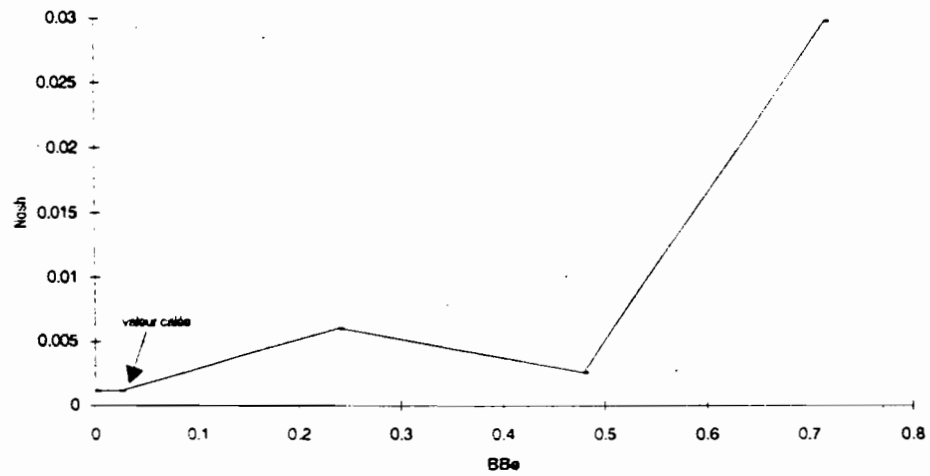
Etude de sensibilité: BBe (Baya à Bouroukro en 1985)



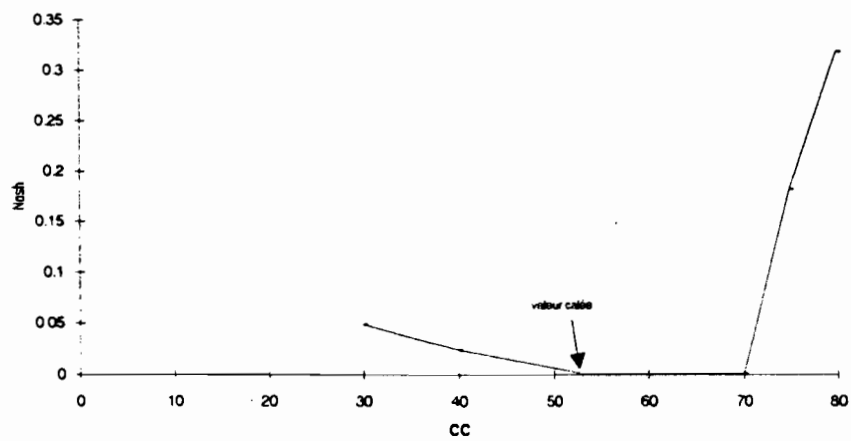
Etude de sensibilité: BBe (Davo à Dakpadou en 1972)



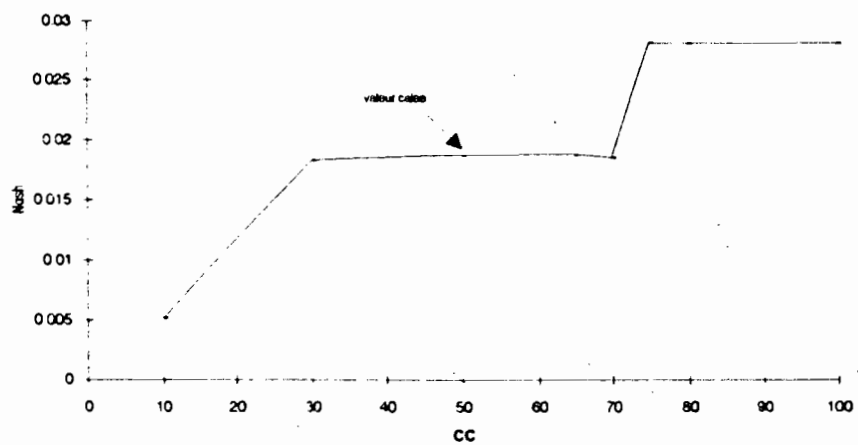
Etude de sensibilité: BBe (N'Zo à Kahin en 1983)



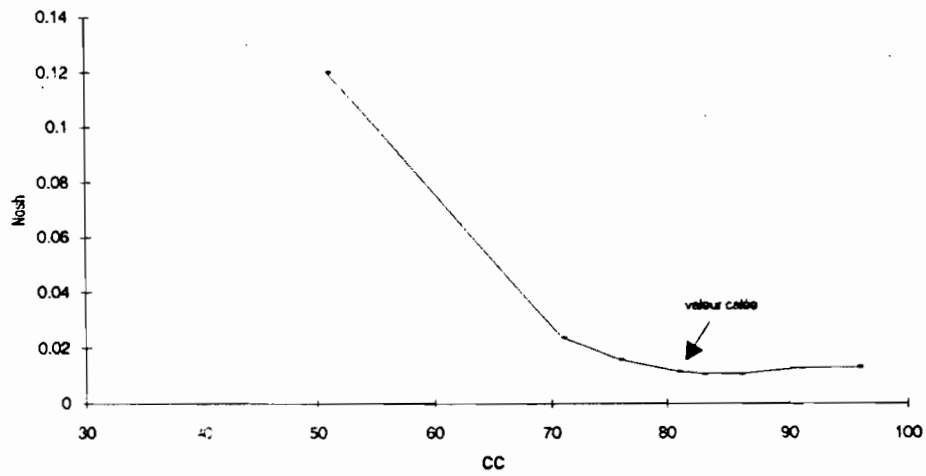
Etude de sensibilité: CC (Kou à Dimbokro en 1975)



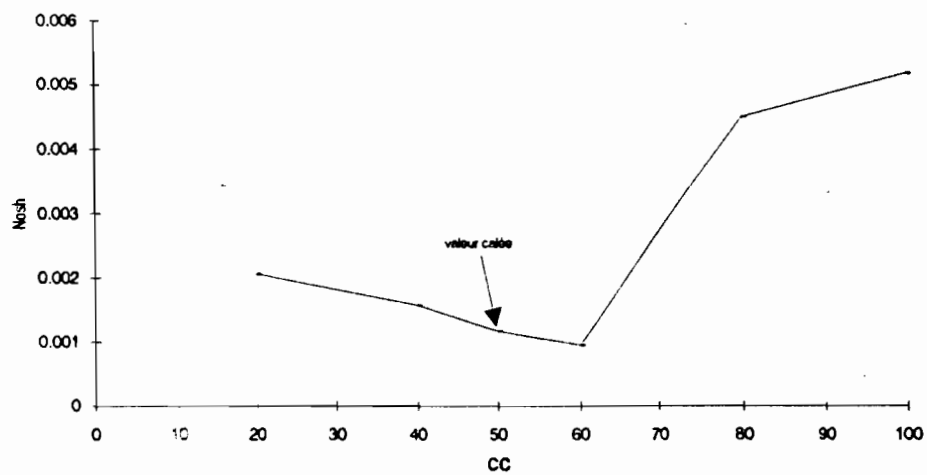
Etude de sensibilité: CC (Baya à Bouroukro en 1985)



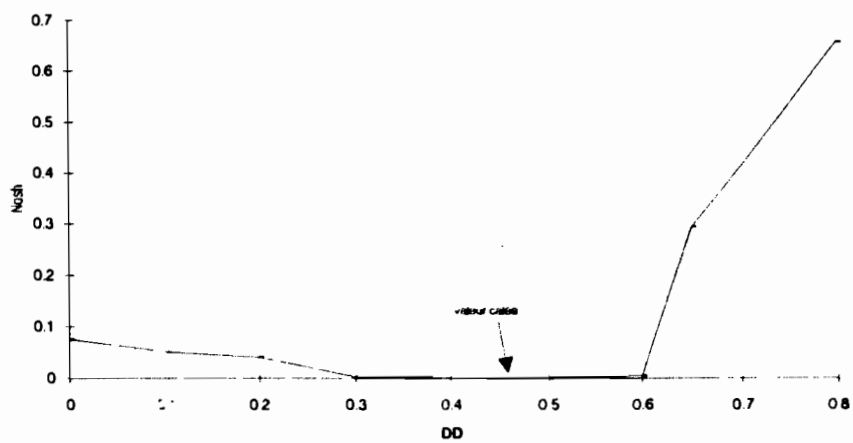
Etude de sensibilité: CC (Davo à Dakpadou en 1972)



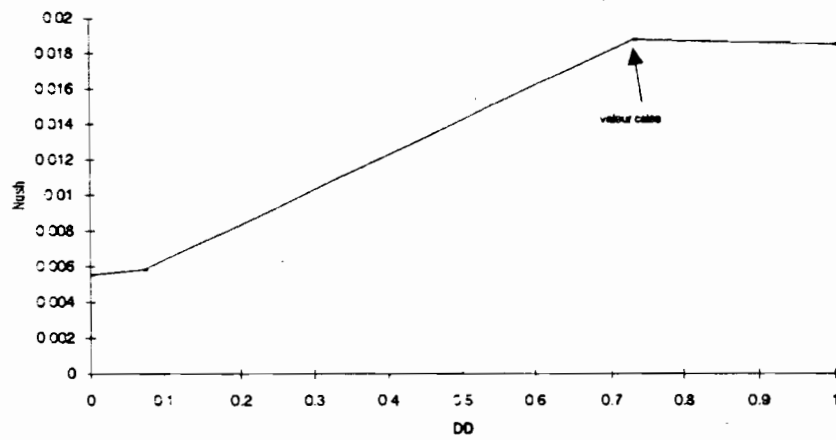
Etude de sensibilité: CC (N'Zo à Kahin en 1983)



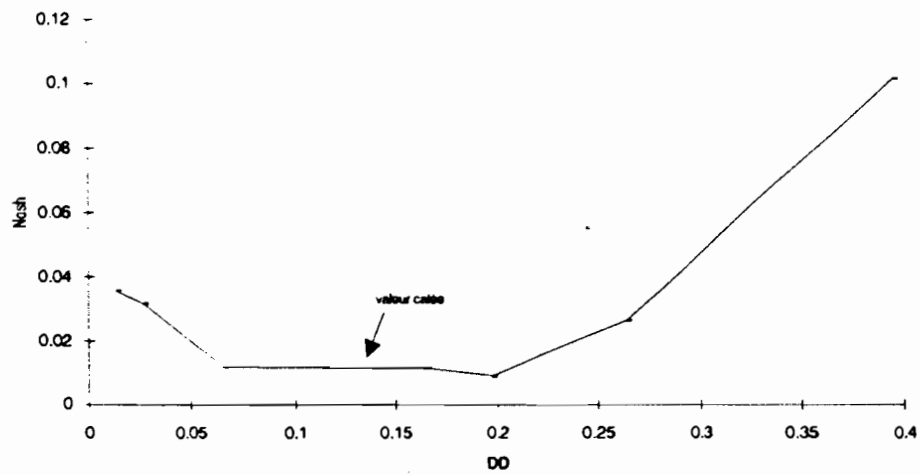
Etude de sensibilité: DD (Ken à Dimbokro en 1975)



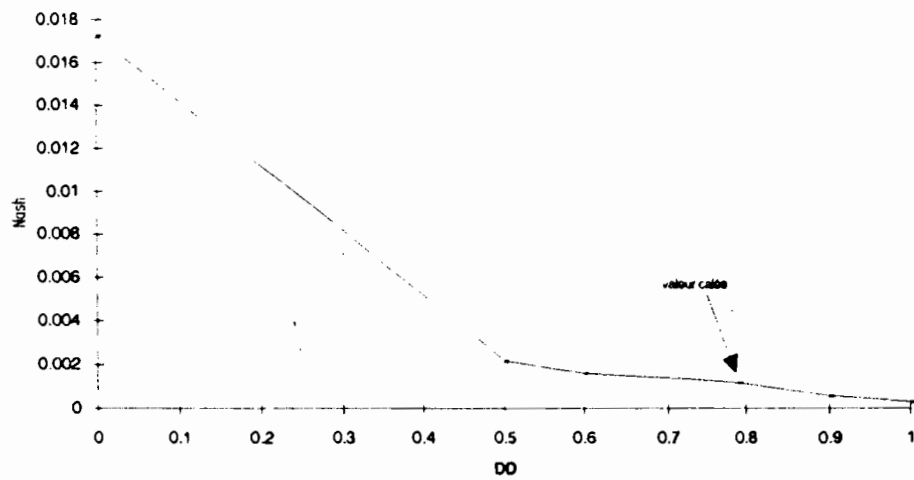
Etude de sensibilité: DD (Baya à Bouroukro en 1985)



Etude de sensibilité: DD (Davo à Dakpadou en 1972)



Etude de sensibilité: DD (N Zo à Kahin en 1983)



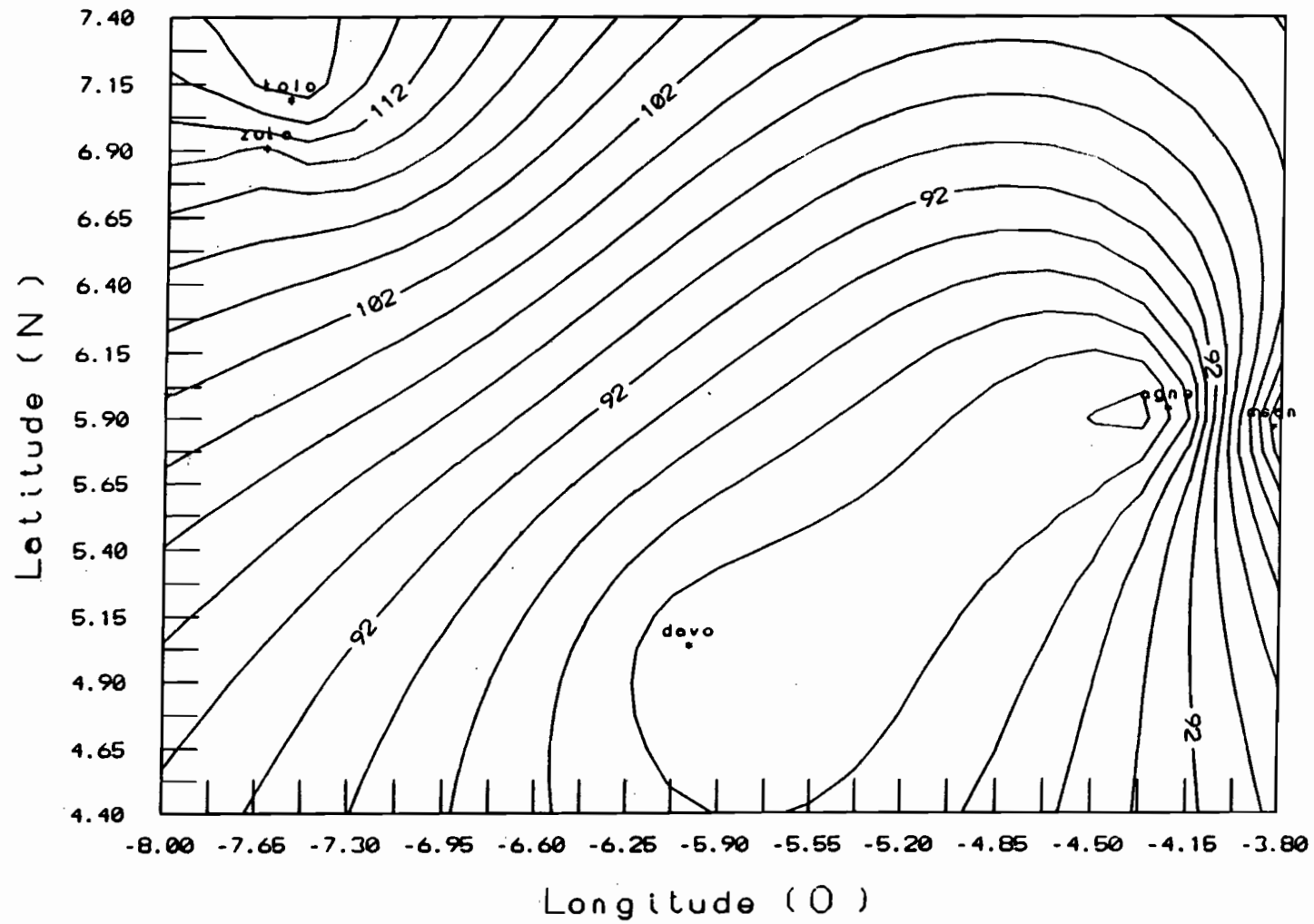
ANNEXE III

Essais de régionalisation des paramètres

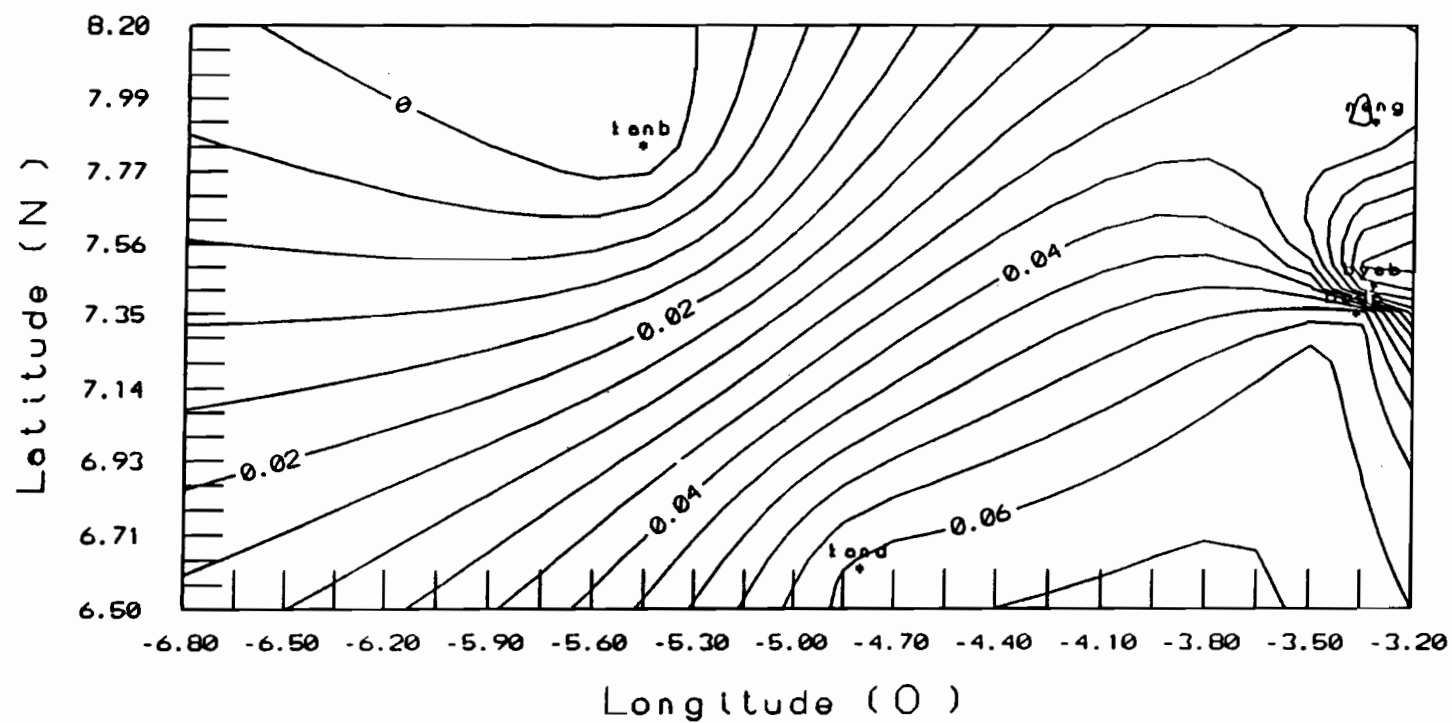
Courbes d'isovaleurs (modèle initial à 9 paramètres)

Courbes d'isovaleurs (modèle définitif à 3 paramètres)

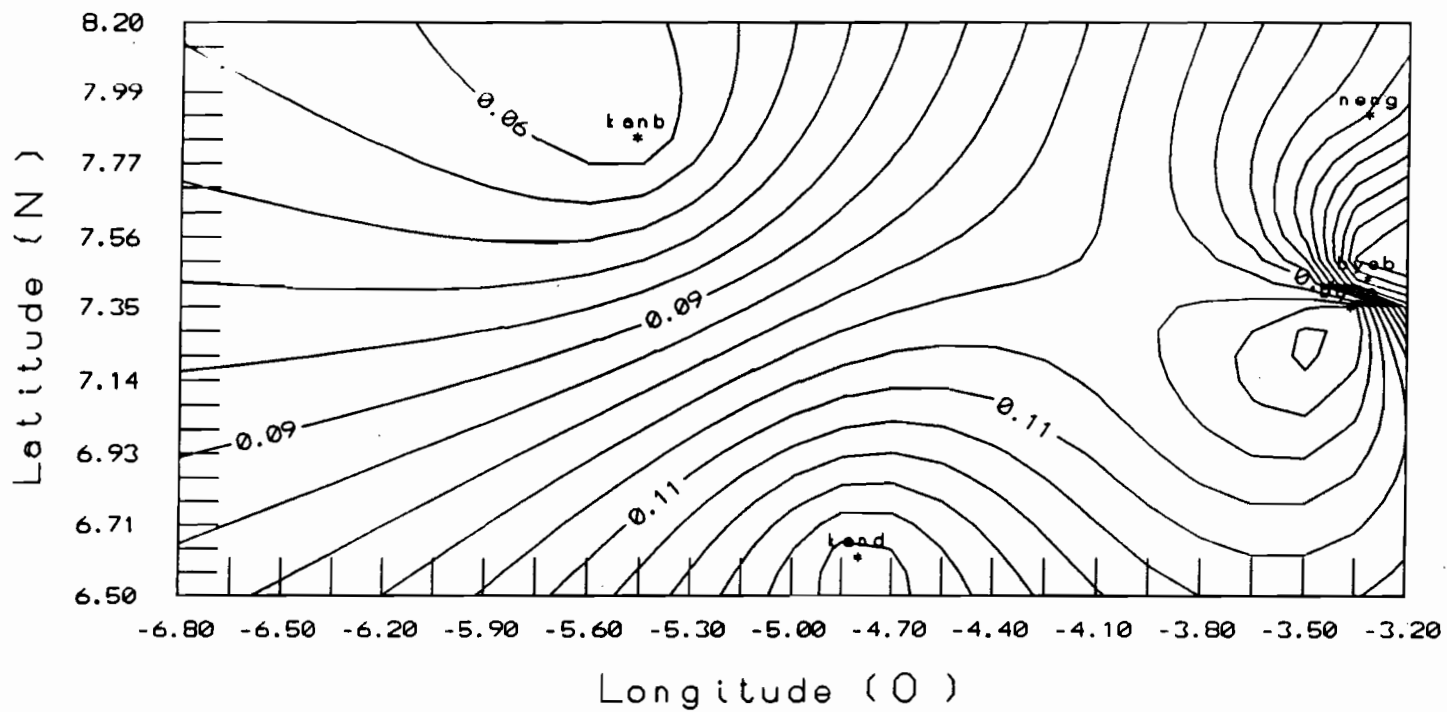
Isovaleurs de SEUIL en foret en 1984



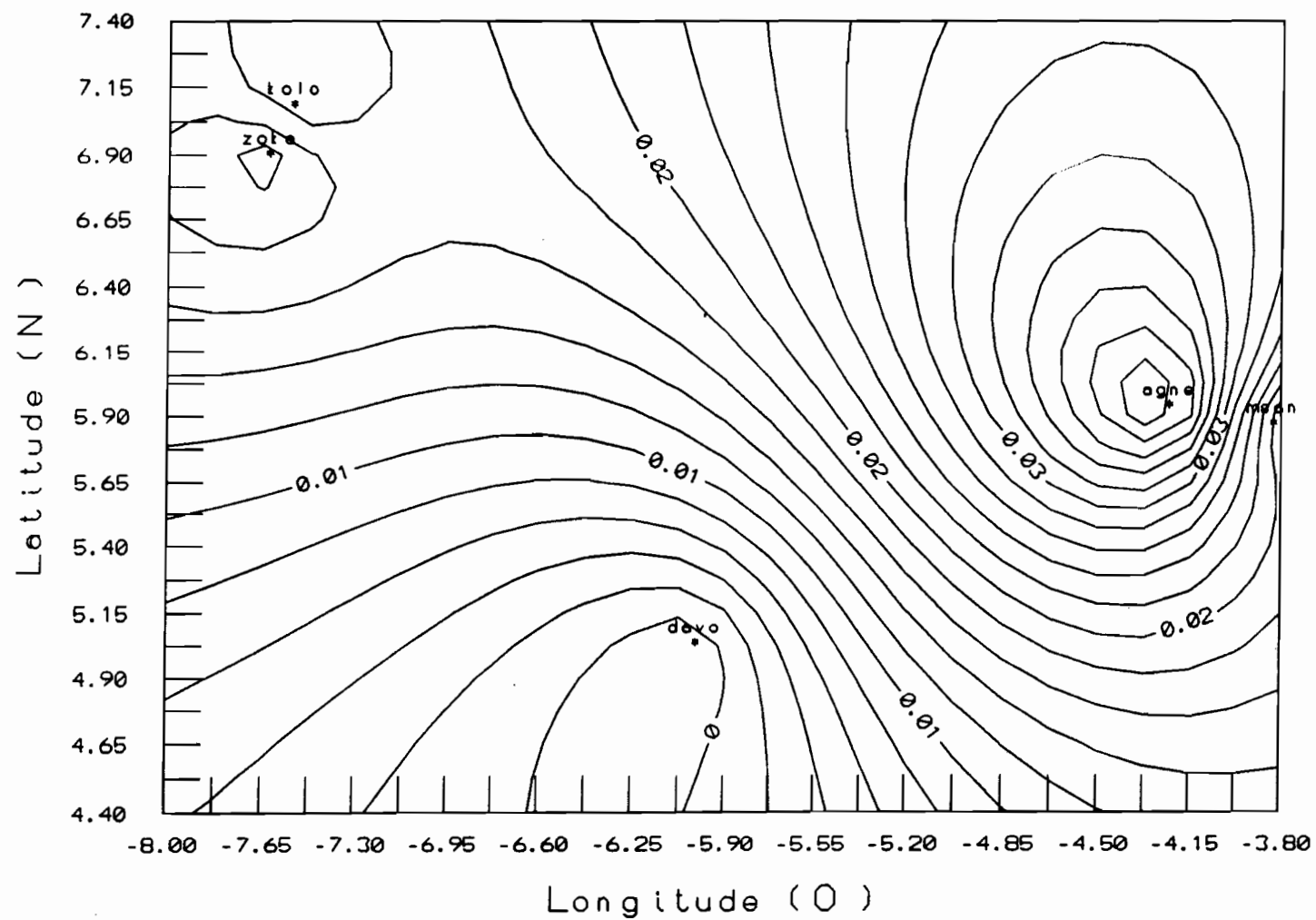
Isovaleurs de AA en transition en 1984



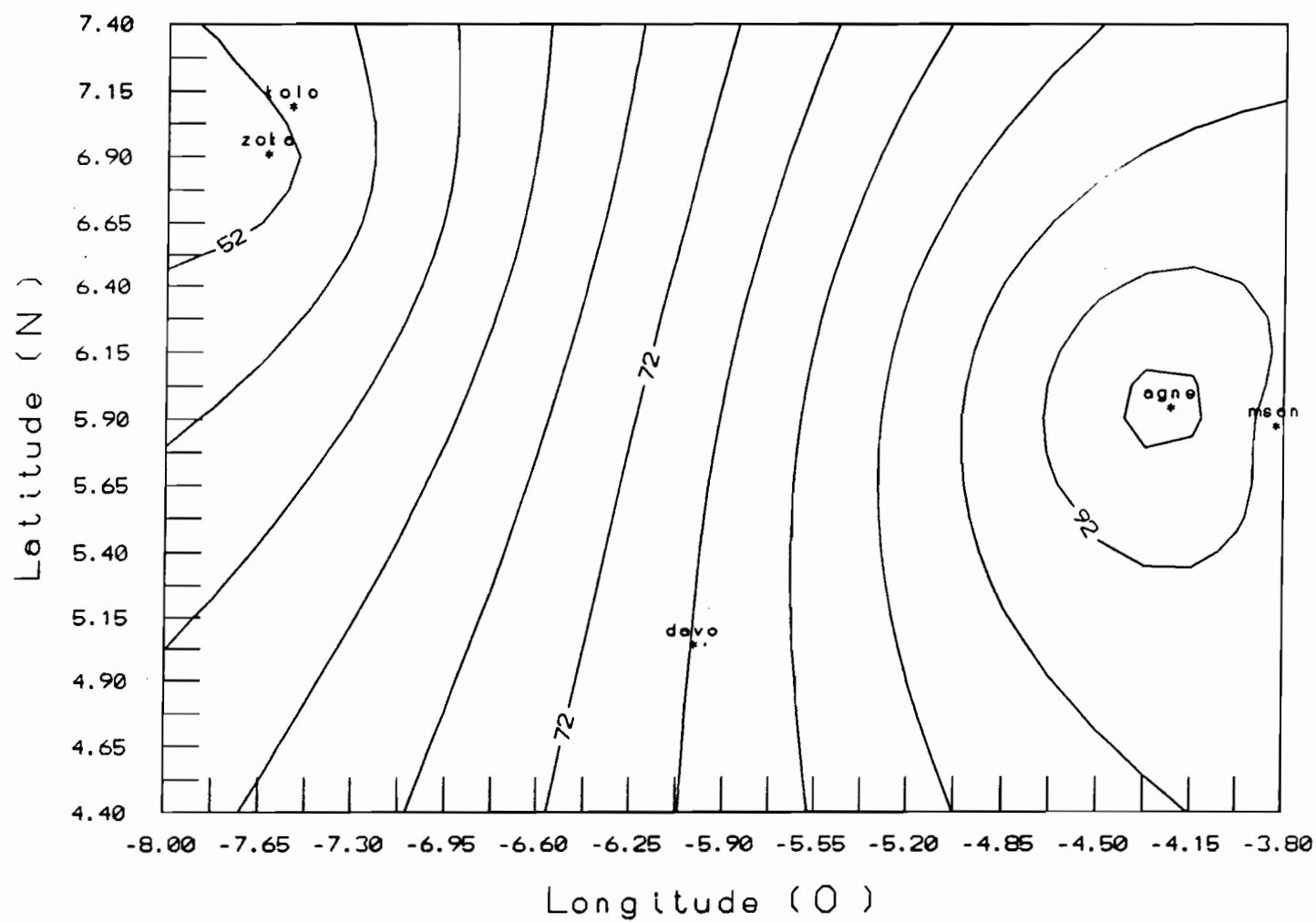
Isovaleurs de BBa en transition en 1984



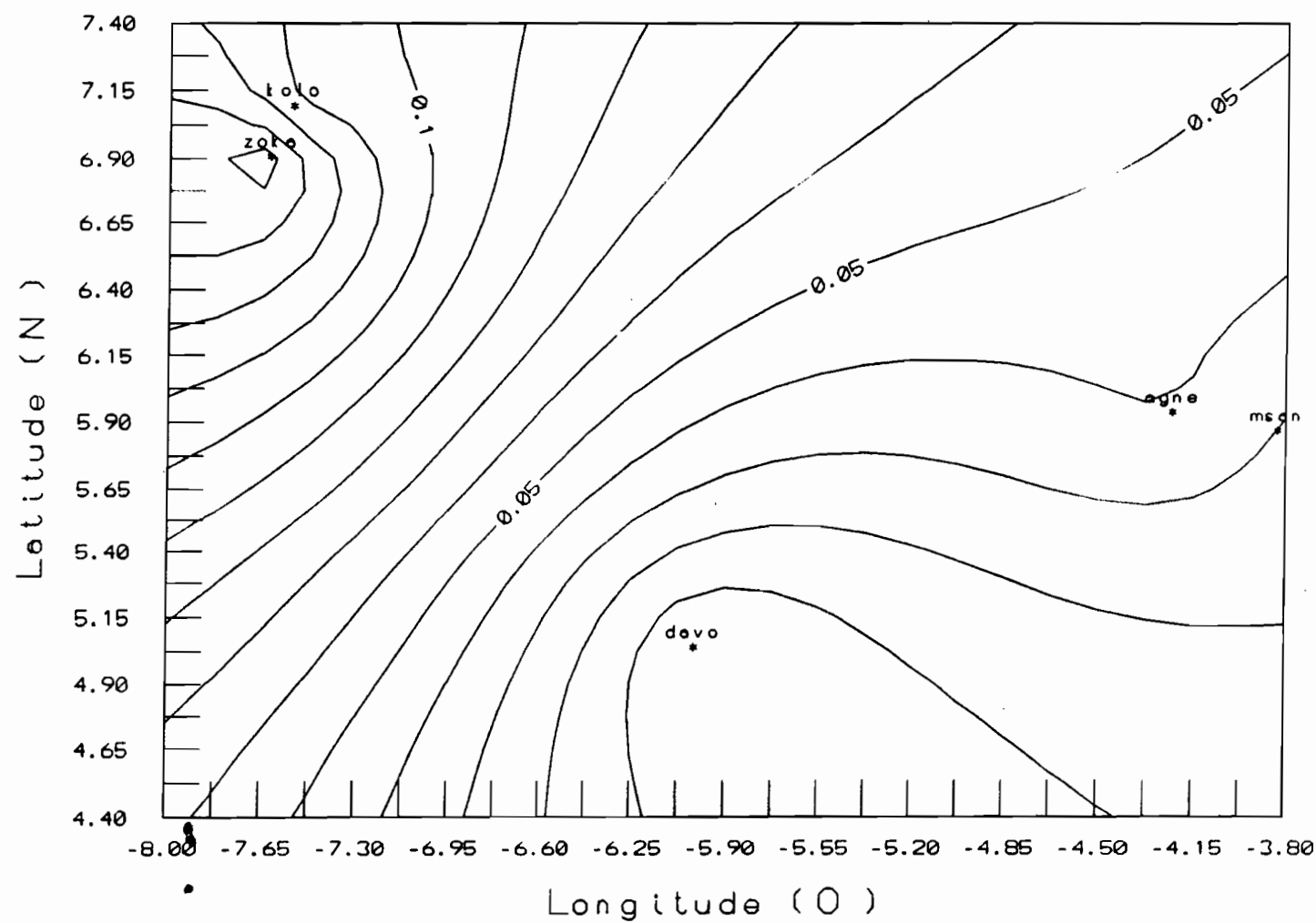
Isovaleurs de BBe en foret en 1984



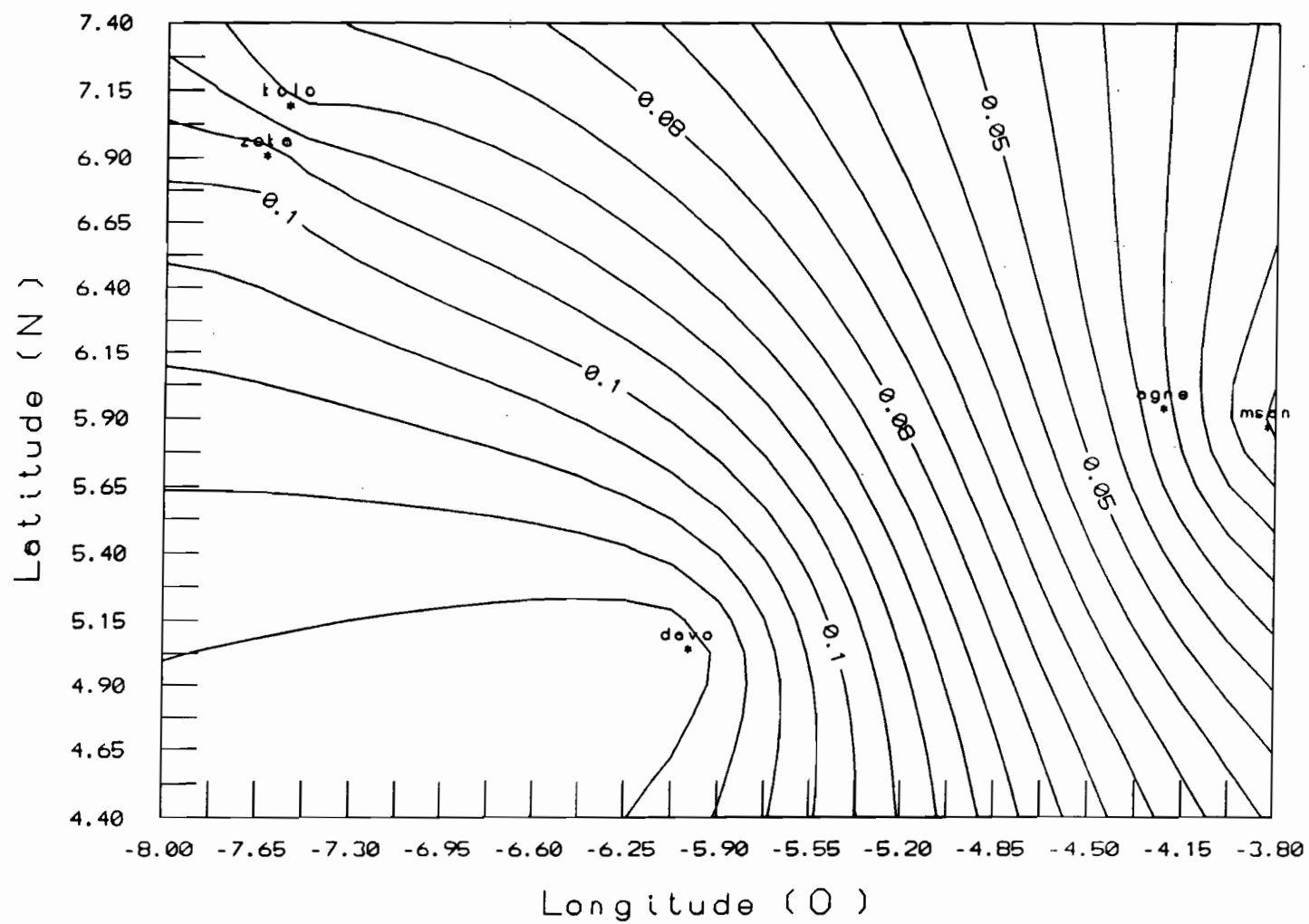
Isovaleurs de CC en foret en 1984



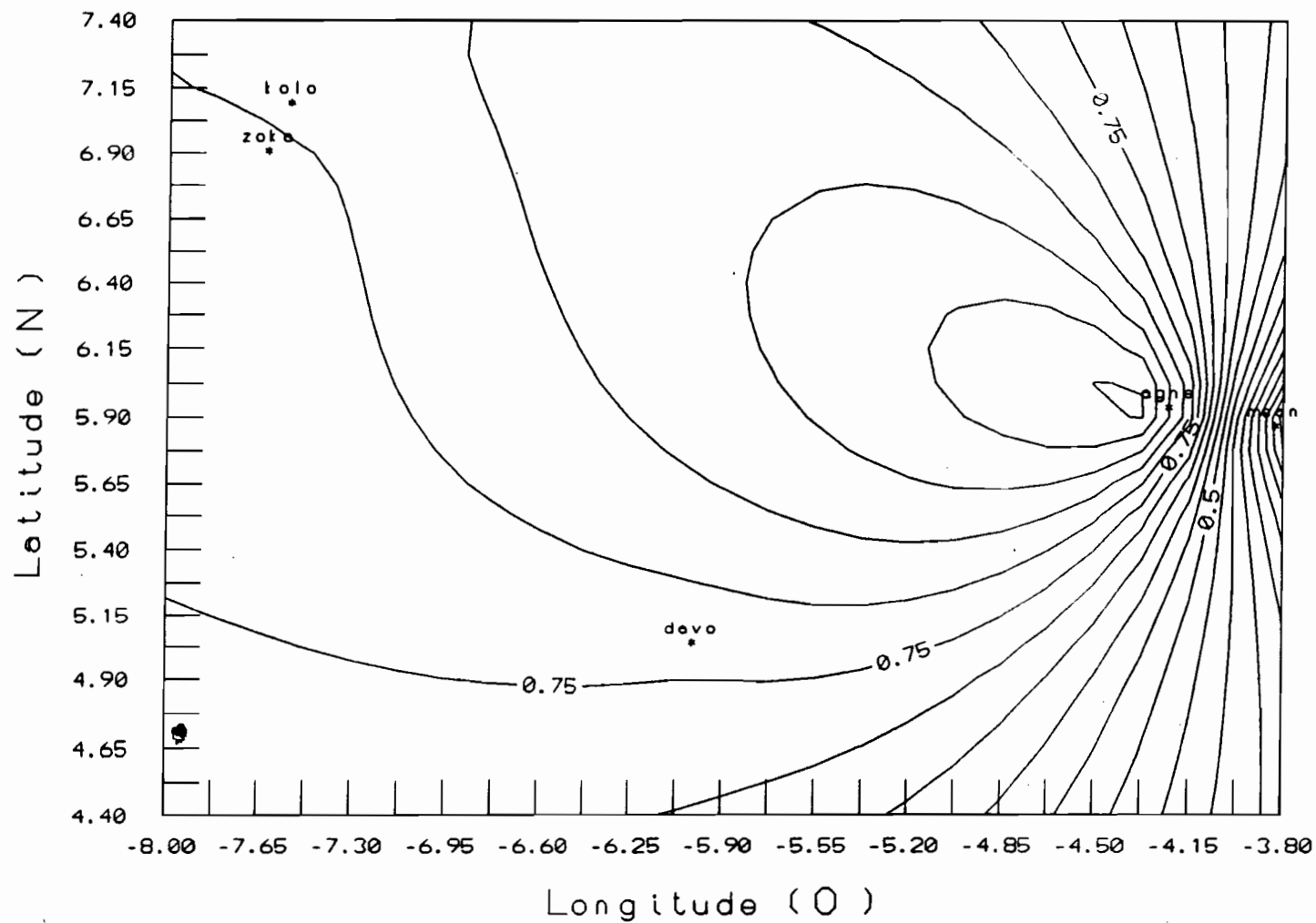
Isovaleurs de AA en foret en 1984 (modèle à 3 parametres)



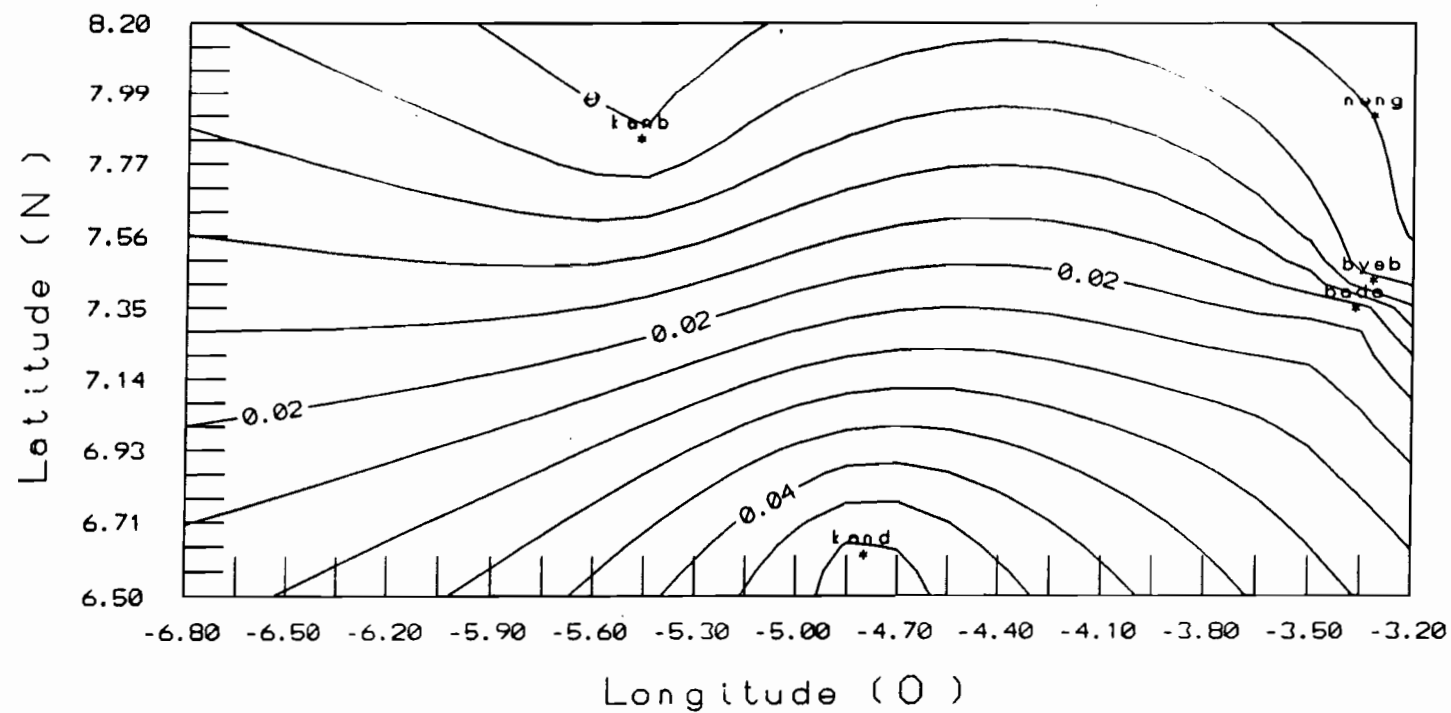
Isovaleurs de BBa en foret en 1984 (modèle à 3 paramètres)



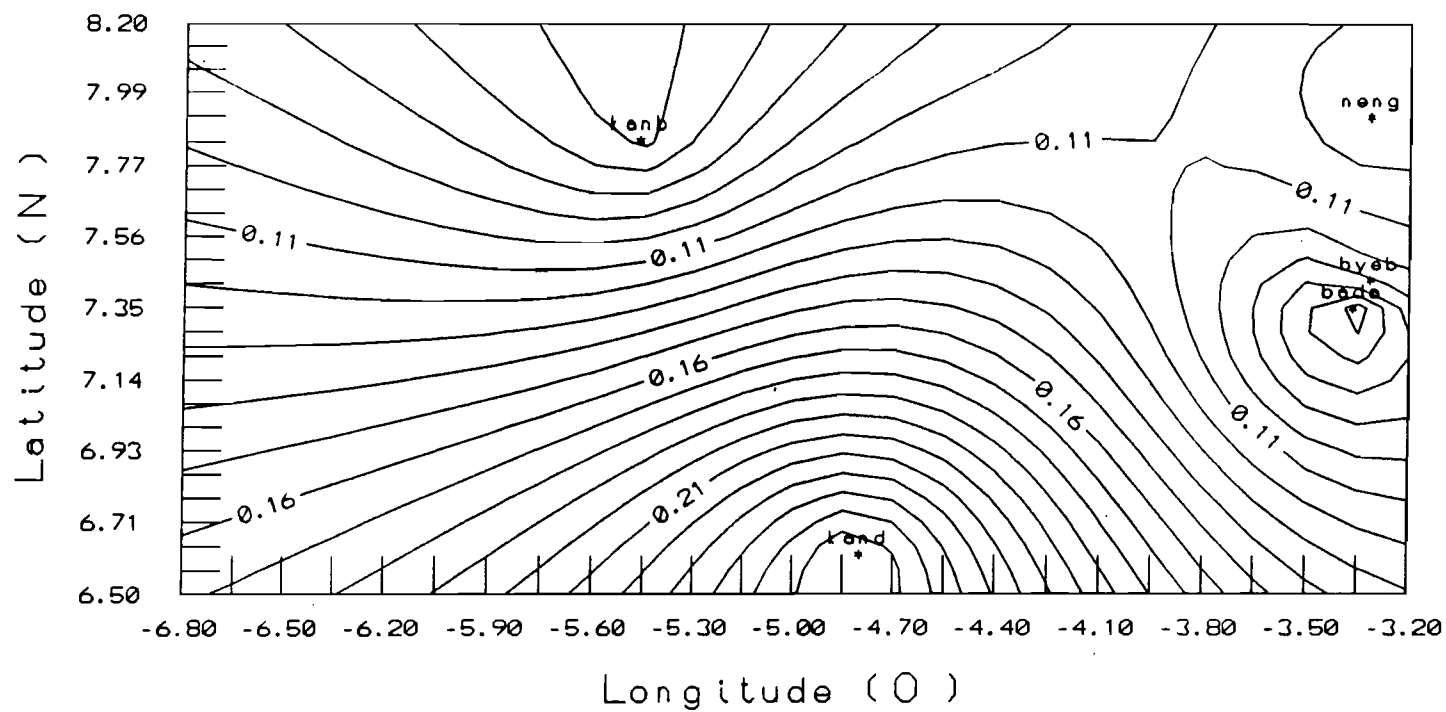
Isovaleurs de DD en foret en 1984 (modèle à 3 parametres)



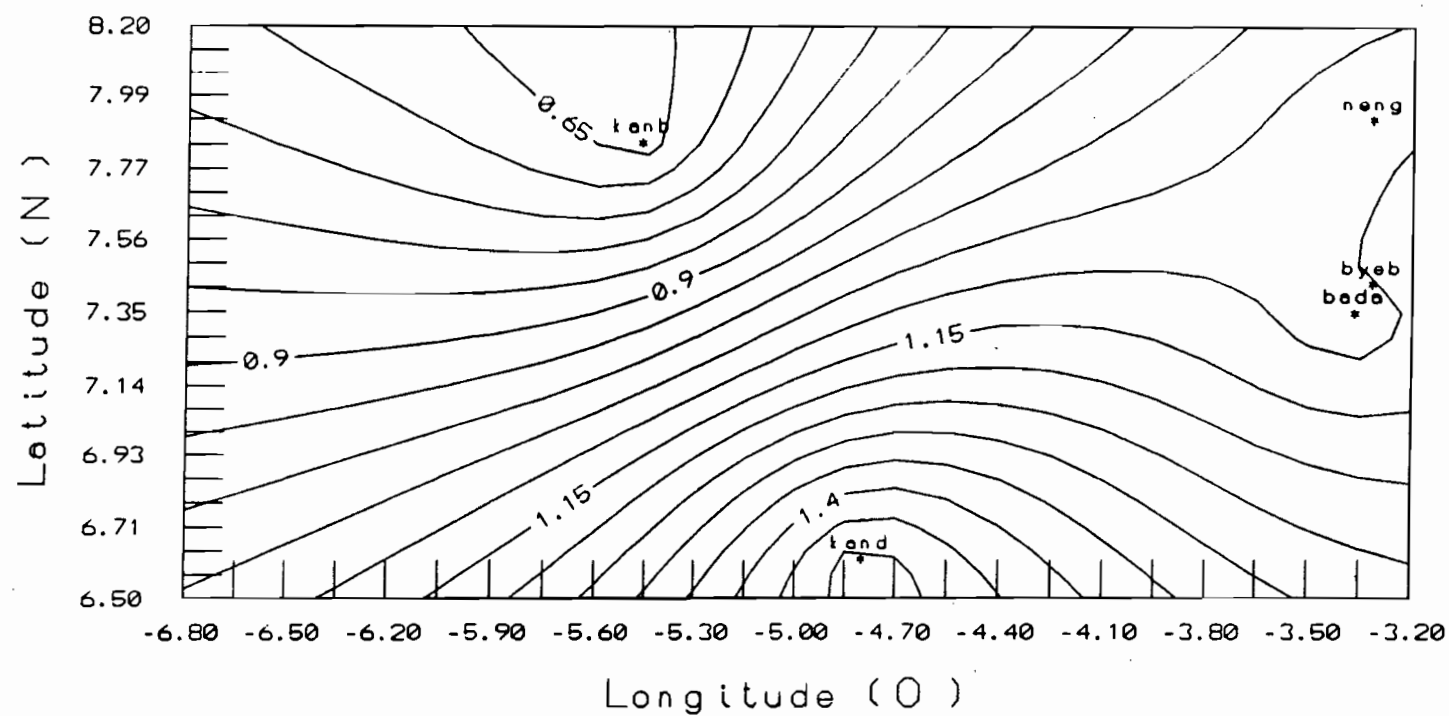
Isovaleurs de AA en transition en 1984 (modèle à 3 paramètres)



Isovaleurs de BBa en transition en 1984 (modèle à 3 paramètres)



Isovaleurs de DD en transition en 1984 (modèle à 3 paramètres)



ANNEXE IV

Etude des modèles BBi

Valeurs initiales des paramètres Seuil, AA et CC

Valeurs des paramètres BBi dans les modèles di, si, ci et ai

Valeurs des paramètres BBi dans les modèles ai, B0.0, B0.1, B0.2 et B0.3

Valeurs initiales des paramètres Seuil, AA, et CC

	Valeurs initiales de Seuil	Valeurs initiales de CC	Valeurs initiales de AA
Kolo81	117.6	63.55	0.006
Kolo82	117.6	52.88	0.09
Kolo84	117.6	52.94	0.0666
kolo85	117.7	77.65	0
kolo86	117.6	52.86	0.0407
davo72	82.4	80.9	0
davo74	82.4	100	0
davo75	82.4	60.37	0
davo76	82.4	66.21	0.178
davo77	82.3	66.21	0.00254
davo85	82.3	76.06	0.00778
davo86	82.3	76.06	0.0519
byeb84	104.07	72.74	0.0092
byeb85	82.31	50	0.0092
kand75	90.44	54.55	0.068
kand84	92.66	56.01	0.066
kand85	91.46	83.58	0.0372
lobo71	88.2	50.63	0.0204
lobo73	100.73	52.66	0.01366
lobo74	100.73	50	0.0202

Les paramètres : Seuil, CC, et AA ont été fixés :

En forêt :

$\text{Seuil} = \overline{\text{Seuil}} = 83.81$

$\text{CC} = \overline{\text{CC}} = 73.42$

$\text{AA} = \overline{\text{AA}} = 0.01$

En transition :

$\text{Seuil} = \overline{\text{Seuil}} = 93.12$

$\text{CC} = \overline{\text{CC}} = 56.68$

$\text{AA} = \overline{\text{AA}} = 0.0208$

KOLO81	di	si	ci	ai
BBa	0.3121	0.3093	0.3193	0.3135
BBb	0.0000	0.0084	0.0087	0.0087
BBc	0.0000	0.0000	0.0062	0.0062
BBd	0.1660	0.1676	0.1857	0.1836
BBe	0.0001	0.0307	0.0000	0.0000
Nash	0.0134	0.0152	0.0123	0.0122

KOLO82	di	si	ci	ai
BBa	0.0643	0.1923	0.1925	0.2850
BBb	0.1686	0.1810	0.2028	0.2151
BBc	0.0075	0.0100	0.0081	0.0211
BBd	0.0099	0.0184	0.0401	0.0555
BBe	0.0049	0.0049	0.1350	0.1096
Nash	0.0043	0.0038	0.0038	0.0163

KOLO84	di	si	ci	ai
BBa	0.1154	0.0693	0.1116	0.1730
BBb	0.0654	0.0303	0.0809	0.0958
BBc	0.0311	0.0083	0.0399	0.0481
BBd	0.0059	0.0369	0.0098	0.0142
BBe	0.0157	0.0449	0.0233	0.0307
Nash	0.0235	0.0090	0.0253	0.0267

KOLO85	di	si	ci	ai
BBa	0.4345	0.4292	0.4162	0.4041
BBb	0.0236	0.0318	0.0376	0.0403
BBc	0.3100	0.3878	0.3691	0.3626
BBd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BBe	0.0192	0.0006	0.0006	0.0035
Nash	0.0036	0.0031	0.0038	0.0042

KOLO86	di	si	ci	ai
BBa	0.1281	0.0912	0.1065	0.1424
BBb	0.0703	0.0682	0.0782	0.0812
BBc	0.0186	0.0164	0.0520	0.0664
BBd	0.0027	0.0119	0.0300	0.0339
BBe	0.1333	0.1195	0.0864	0.0753
Nash	0.0083	0.0014	0.0037	0.0128

DAVO72	di	si	ci	ai
BBa	0.1303	0.1310	0.1805	0.1693
BBb	0.2109	0.2110	0.2097	0.2071
BBc	0.1451	0.1454	0.1466	0.1435
BBd	0.1337	0.1338	0.1391	0.1359
BBe	0.0034	0.0034	0.0060	0.0060
Nash	0.0117	0.0120	0.0189	0.0194

DAVO74	di	si	ci	ai
BBa	0.1793	0.1747	0.0978	0.0833
BBb	0.1177	0.1110	0.0442	0.0432
BBc	0.1372	0.1344	0.0820	0.0788
BBd	0.1670	0.1653	0.0918	0.0853
BBe	0.0034	0.0000	0.0000	0.0000
Nash	0.0343	0.0325	0.2030	0.2278

DAVO75	di	si	ci	ai
BBa	0.0687	0.0652	0.0773	0.0685
BBb	0.0781	0.0763	0.0803	0.0796
BBc	0.0090	0.0084	0.0172	0.0137
BBd	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000
BBe	0.0060	0.0000	0.0061	0.0061
Nash	0.0581	0.0512	0.0614	0.0677

DAVO76	di	si	ci	ai
BBa	0.0500	0.1279	0.1354	0.2958
BBb	0.1378	0.2186	0.2287	0.2560
BBc	0.0153	0.0377	0.0388	0.0000
BBd	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000
BBe	0.0227	0.0336	0.0246	0.0000
Nash	0.0600	0.0156	0.0167	0.0392

DAVO77	di	si	ci	ai
BBa	0.0738	0.0740	0.0747	0.0669
BBb	0.1164	0.1165	0.1224	0.1225
BBc	0.0409	0.0408	0.0454	0.0441
BBd	0.0111	0.0112	0.0183	0.0175
BBe	0.0597	0.0597	0.0580	0.0540
Nash	0.0599	0.0599	0.0580	0.0593

DAVO85	di	si	ci	ai
BBa	0.1392	0.1392	0.1391	0.1368
BBb	0.1566	0.1566	0.1546	0.1544
BBc	0.0278	0.0278	0.0247	0.0243
BBd	0.0727	0.0727	0.0701	0.0695
BBe	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Nash	0.0438	0.0438	0.0438	0.0439

DAVO86	di	si	ci	ai
BBa	0.0649	0.0659	0.0659	0.1067
BBb	0.2178	0.2186	0.2186	0.2344
BBc	0.0090	0.0090	0.0090	0.0517
BBd	0.0863	0.0844	0.0844	0.0430
BBe	0.0008	0.0010	0.0010	0.0466
Nash	0.0584	0.0588	0.0588	0.0679

KAND75	di	si	ci	ai
BBa	0.0917	0.0831	0.0786	0.1314
BBb	0.1405	0.1385	0.1514	0.2894
BBc	0.0619	0.0596	0.0606	0.0833
BBd	0.0185	0.0158	0.0155	0.0208
BBe	0.0011	0.0011	0.0035	0.0035
Nash	0.0003	0.0005	0.0003	0.0655

KAND84	di	si	ci	ai
BBa	0.1392	0.1397	0.1421	0.2025
BBb	0.1220	0.1245	0.1290	0.1591
BBc	0.2461	0.2485	0.2548	0.2504
BBd	0.0336	0.0309	0.0283	0.0517
BBe	0.0059	0.0059	0.0105	0.0000
Nash	0.0002	0.0002	0.0002	0.0213

KAND85	di	si	ci	ai
BBa	0.0817	0.3889	0.1296	0.1552
BBb	0.3997	0.2886	0.3858	0.3828
BBc	0.1665	0.4881	0.2034	0.2123
BBd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BBe	0.0059	0.0061	0.0074	0.0074
Nash	0.0290	0.0002	0.0238	0.0242

BYEB84	di	si	ci	ai
BBa	0.1706	0.1617	0.2024	0.1950
BBb	0.1486	0.1292	0.0445	0.0363
BBc	0.0609	0.0635	0.0723	0.0715
BBd	0.0180	0.0266	0.0000	0.0000
BBe	0.0028	0.0080	0.0705	0.0754
Nash	0.0018	0.0021	0.0062	0.0152

BYEB85	di	si	ci	ai
BBa	0.0451	0.0343	0.0377	0.1132
BBb	0.0706	0.0632	0.0681	0.0893
BBc	0.0092	0.0098	0.0153	0.0377
BBd	0.0076	0.0076	0.0076	0.0076
BBe	0.0121	0.0327	0.0285	0.0000
Nash	0.0331	0.0252	0.0252	0.0597

LOBO71	di	si	ci	ai
BBa	0.0512	0.0537	0.0587	0.0583
BBb	0.0874	0.0880	0.0894	0.0894
BBc	0.0086	0.0093	0.0125	0.0124
BBd	0.0021	0.0022	0.0022	0.0024
BBe	0.0566	0.0557	0.0528	0.0529
Nash	0.0147	0.0151	0.0151	0.0151

LOBO73	di	si	ci	ai
BBa	0.0751	0.0735	0.0725	0.0614
BBb	0.0910	0.0957	0.0950	0.0961
BBc	0.0100	0.0100	0.0134	0.0100
BBd	0.0068	0.0087	0.0087	0.0091
BBe	0.0414	0.0481	0.0462	0.0459
Nash	0.0007	0.0006	0.0006	0.0041

LOBO74	di	si	ci	ai
BBa	0.0486	0.0547	0.0572	0.0567
BBb	0.0793	0.0760	0.0793	0.0792
BBc	0.0100	0.0100	0.0144	0.0143
BBd	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068
BBe	0.0732	0.0710	0.0682	0.0686
Nash	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021

Valeurs des différents paramètres BB dans les modèles A1, B0.0, B0.1, B0.2 et B0.3

	BBa	BBb	BBc	BBd	BBe
Kolo81A1	0.3135	0.0087	0.0061	0.1836	0
Kolo81B0.0	0.2486	0.0421	0.0421	0.0421	0
Kolo81B0.1	0.2486	0.0421	0.0421	0.0421	0
Kolo81B0.2	0.2116	0.0833	0.0164	0	0
Kolo81B0.3	0.2043	0.0992	0	0	0
Kolo82A1	0.285	0.2151	0.0211	0.0555	0.1096
Kolo82B0.0	0.2322	0.2043	0.0329	0.0288	0.0098
Kolo82B0.1	0.2324	0.2047	0.0314	0.0314	0
Kolo82B0.2	0.2235	0.212	0.0371	0	0
Kolo82B0.3	0.2236	0.219	0	0	0
Kolo84A1	0.1729	0.0958	0.0481	0.0141	0.0307
Kolo84B0.0	0.1815	0.0898	0.0349	0.0316	0.024
Kolo84B0.1	0.1705	0.1038	0.0637	0.0115	0
Kolo84B0.2	0.1646	0.1133	0.0715	0	0
Kolo84B0.3	0.2349	0.1001	0	0	0
Kolo85A1	0.4041	0.0403	0.3626	0	0.0035
Kolo85B0.0	0.2806	0.2327	0.2327	0	0.0035
Kolo85B0.1	0.278	0.2334	0.2334	0	0
Kolo85B0.2	0.278	0.2334	0.2334	0	0
Kolo85B0.3	0.3197	0.3197	0	0	0
Kolo86A1	0.1424	0.0812	0.0663	0.0339	0.0753
Kolo86B0.0	0.1405	0.0799	0.0799	0.0335	0.0284
Kolo86B0.1	0.133	0.0939	0.0939	0.0052	0
Kolo86B0.2	0.1312	0.0951	0.0951	0	0
Kolo86B0.3	0.1378	0.1229	0	0	0
Davo72A1	0.1693	0.2071	0.1435	0.1358	0.006
Davo72B0.0	0.1864	0.1864	0.1434	0.1266	0.006
Davo72B0.1	0.1887	0.1887	0.1444	0.1273	0
Davo72B0.2	0.2167	0.2167	0.1789	0	0
Davo72B0.3	0.188	0.188	0	0	0
Davo74A1	0.0832	0.0431	0.0788	0.0853	0
Davo74B0.0	0.0824	0.0758	0.0703	0.0703	0
Davo74B0.1	0.0724	0.0724	0.0724	0.0724	0
Davo74B0.2	0.0683	0.0683	0.0683	0	0
Davo74B0.3	0.0723	0.0723	0	0	0
Davo75A1	0.0685	0.0796	0.0137	0	0.006
Davo75B0.0	0.0767	0.0686	0.0181	0.006	0
Davo75B0.1	0.0732	0.0732	0.0186	0	0
Davo75B0.2	0.0735	0.0728	0.0188	0	0
Davo75B0.3	0.0775	0.0767	0	0	0
Davo76A1	0.2958	0.256	0	0	0
Davo76B0.0	0.2958	0.256	0	0	0
Davo76B0.1	0.2958	0.256	0	0	0
Davo76B0.2	0.2958	0.256	0	0	0
Davo76B0.3	0.2958	0.256	0	0	0
Davo77A1	0.0668	0.1225	0.0441	0.0175	0.054
Davo77B0.0	0.102	0.102	0.0576	0.0264	0.0219
Davo77B0.1	0.1143	0.1143	0.0625	0	0
Davo77B0.2	0.1143	0.1143	0.0625	0	0
Davo77B0.3	0.1198	0.1198	0	0	0

Valeurs des différents paramètres BB dans les modèles A1, B0.0, B0.1, B0.2 et B0.3

	BEa	BBb	BBc	BBd	BBe
Davo85A1	0.1368	0.1543	0.0243	0.0694	0.0001
Davo85B0.0	0.1503	0.1488	0.047	0.0424	0.0002
Davo85B0.1	0.1495	0.1495	0.0447	0.0447	0
Davo85B0.2	0.1807	0.1807	0.0141	0	0
Davo85B0.3	0.1861	0.1861	0	0	0
Davo86A1	0.1067	0.2344	0.0517	0.043	0.0466
Davo86B0.0	0.2249	0.2249	0.1697	0.1643	0.0731
Davo86B0.1	0.1961	0.1961	0.1141	0.1141	0
Davo86B0.2	0.1501	0.1501	0.117	0	0
Davo86B0.3	0.1231	0.1231	0	0	0
Byeb84A1	0.195	0.0363	0.0715	0	0.0754
Byeb84B0.0	0.0965	0.0757	0.0438	0.028	0.0029
Byeb84B0.1	0.0931	0.0773	0.0427	0.0291	0
Byeb84B0.2	0.098	0.07	0.0488	0	0
Byeb84B0.3	0.0842	0.0764	0	0	0
Byeb85A1	0.1132	0.0893	0.0377	0.0076	0
Byeb85B0.0	0.1132	0.0893	0.0377	0.0076	0
Byeb85B0.1	0.1132	0.0893	0.0377	0.0076	0
Byeb85B0.2	0.1121	0.089	0.0368	0	0
Byeb85B0.3	0.1093	0.0869	0	0	0
Kand75A1	0.1314	0.2894	0.0833	0.0208	0.0035
Kand75B0.0	0.194	0.1856	0.0902	0.067	0.0015
Kand75B0.1	0.1978	0.1859	0.0908	0.0681	0
Kand75B0.2	0.0985	0.0985	0.0616	0	0
Kand75B0.3	0.0874	0.0874	0	0	0
Kand84A1	0.2025	0.1591	0.2504	0.0517	0
Kand84B0.0	0.2423	0.2053	0.1966	0.0631	0
Kand84B0.1	0.2396	0.2026	0.2026	0.0609	0
Kand84B0.2	0.2212	0.2045	0.2045	0	0
Kand84B0.3	0.2528	0.182	0	0	0
Kand85A1	0.1552	0.3828	0.2123	0	0.007
Kand85B0.0	0.2657	0.2657	0.2657	0	0
Kand85B0.1	0.2657	0.2657	0.2657	0	0
Kand85B0.2	0.2657	0.2657	0.2657	0	0
Kand85B0.3	0.3034	0.3034	0	0	0
Lobo71A1	0.0583	0.0894	0.0124	0.002	0.0529
Lobo71B0.0	0.0547	0.054	0.0036	0.0006	0
Lobo71B0.1	0.0547	0.054	0.0036	0.0006	0
Lobo71B0.2	0.0545	0.0537	0.0036	0	0
Lobo71B0.3	0.0543	0.0535	0	0	0
Lobo73A1	0.0614	0.096	0.009	0.009	0.0459
Lobo73B0.0	0.0631	0.0425	0.0354	0.0048	0.0008
Lobo73B0.1	0.0599	0.0504	0.0249	0.0048	0
Lobo73B0.2	0.058	0.0485	0.0278	0	0
Lobo73B0.3	0.0584	0.0489	0	0	0
Lobo74A1	0.0566	0.0792	0.0143	0.007	0.0685
Lobo74B0.0	0.0674	0.0591	0.0414	0.0327	0.0327
Lobo74B0.1	0.0495	0.0475	0.0187	0.0113	0
Lobo74B0.2	0.0466	0.0466	0.0148	0	0
Lobo74B0.3	0.0455	0.0455	0	0	0

ANNEXE V

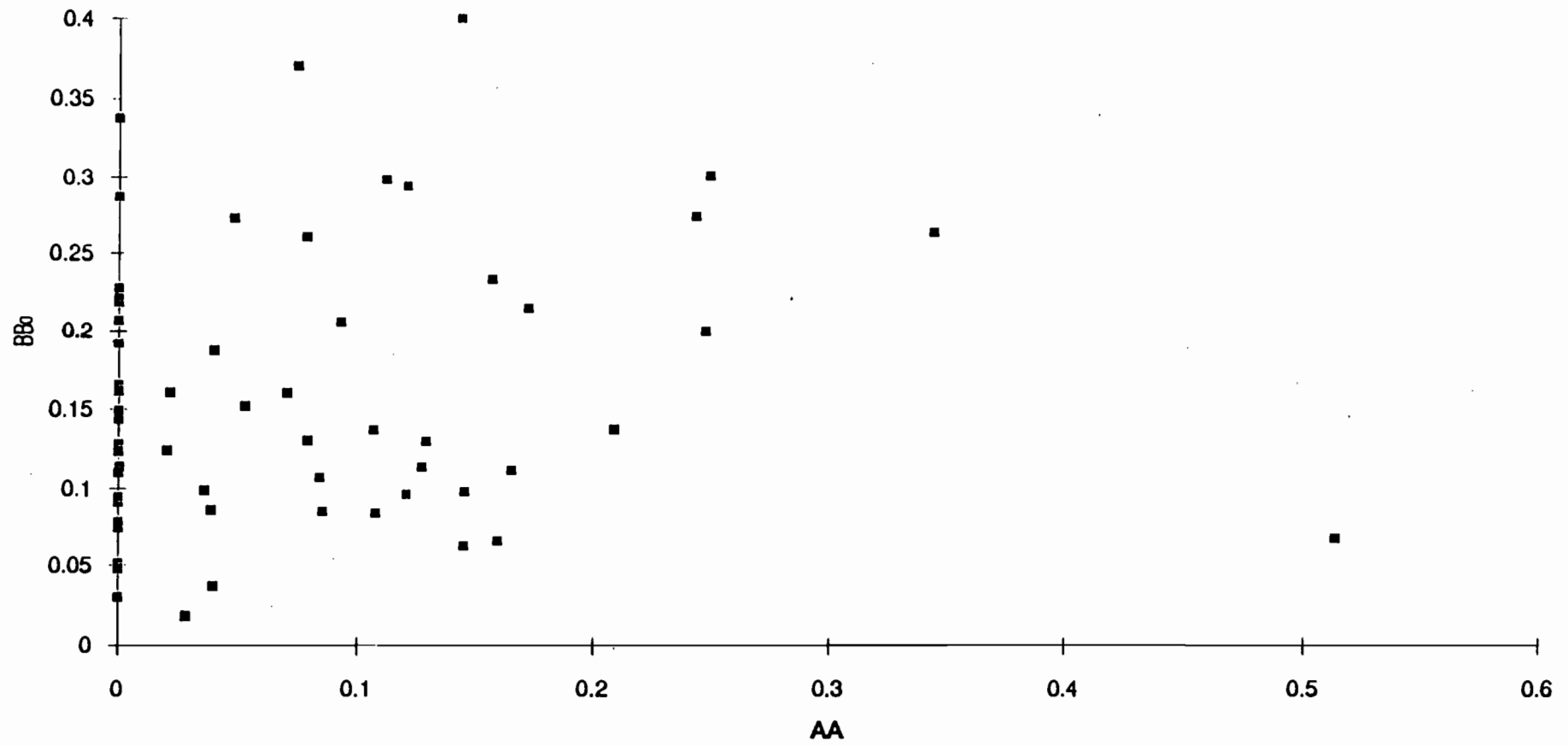
Corrélations des paramètres

Graphiques BBa = f(AA)

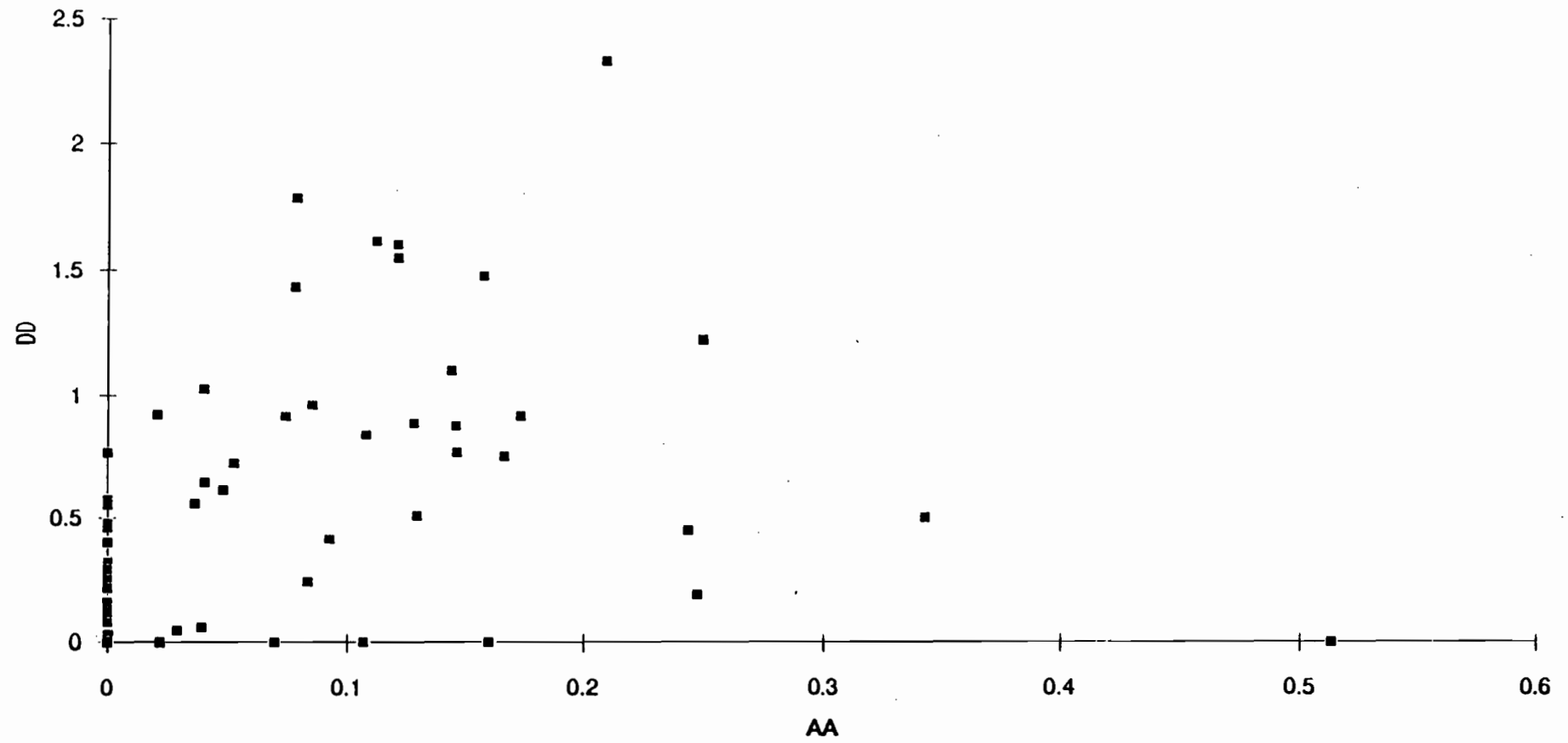
Graphiques DD = f(AA)

Graphiques DD = f(BBa)

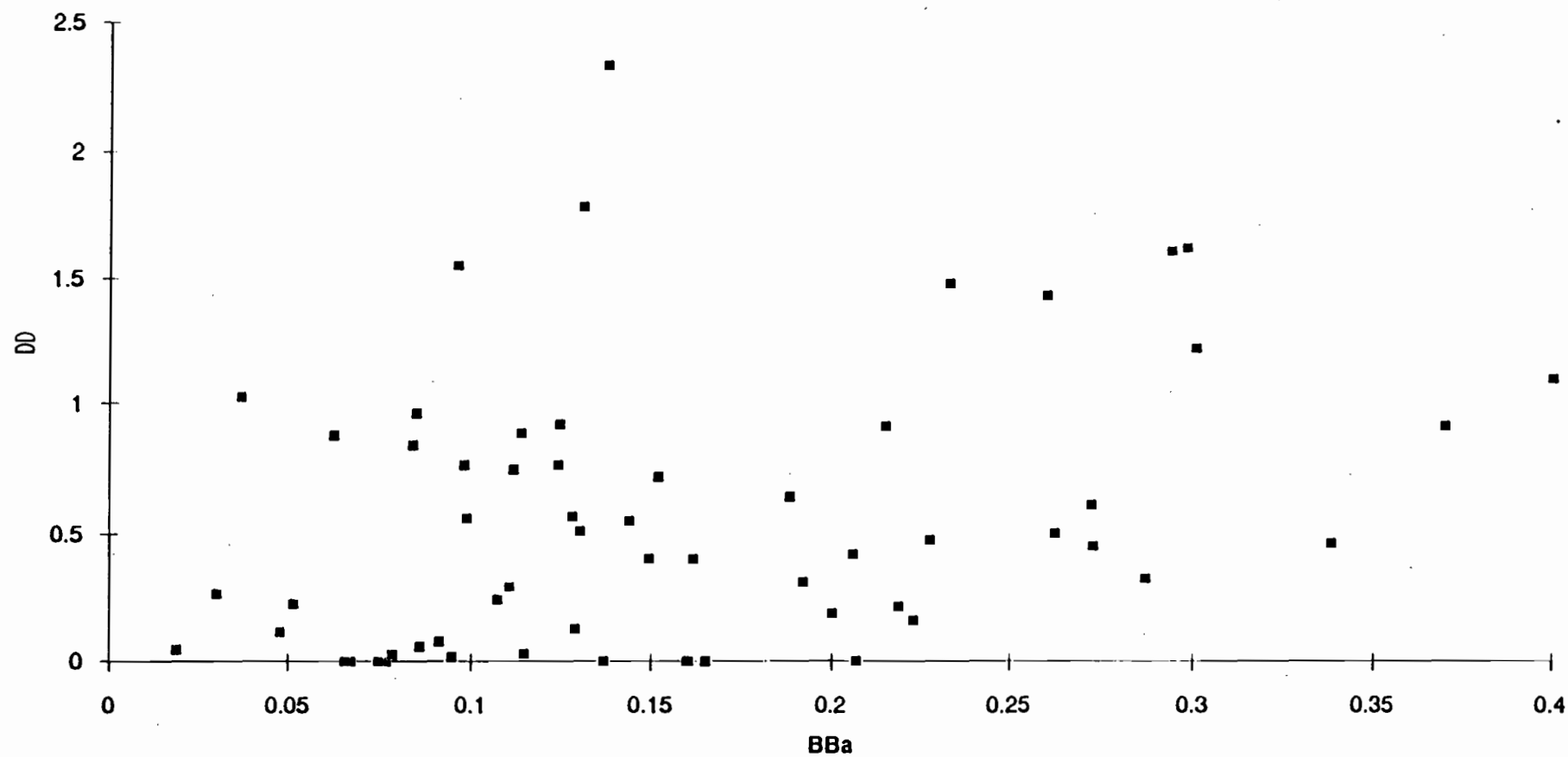
BBa=f(AA) en forêt (modèle à 3 paramètres)



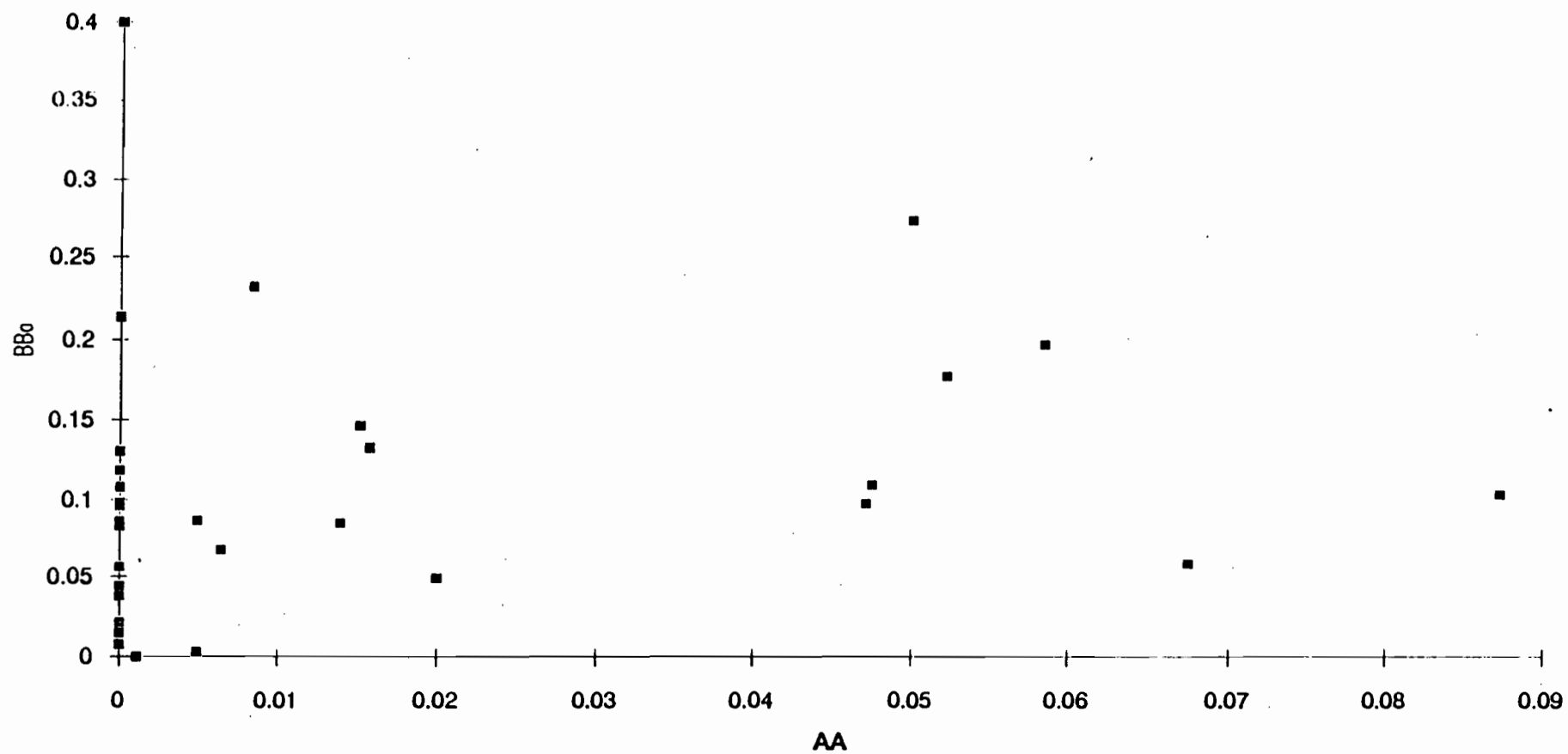
DD=f(AA) en forêt (modèle à 3 paramètres)



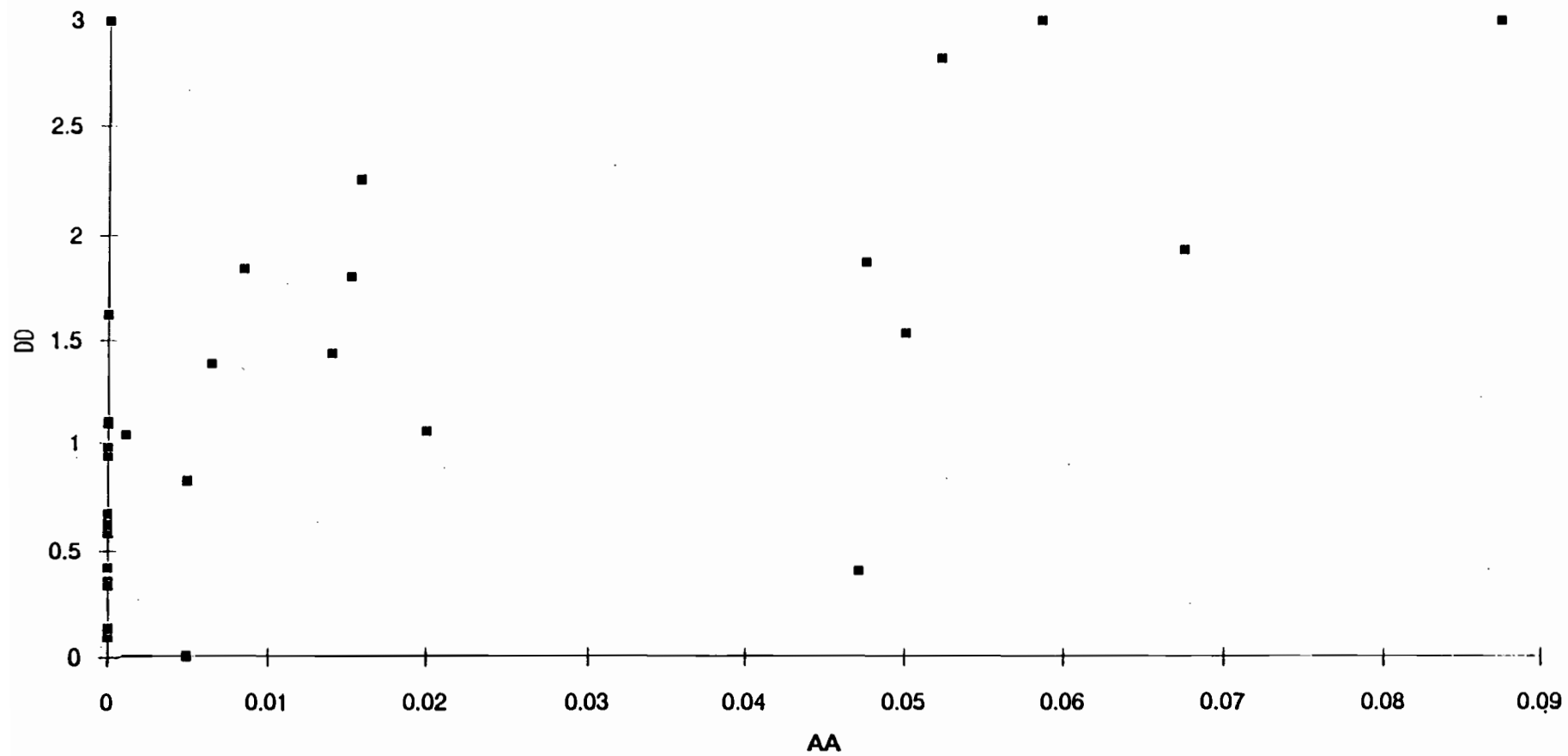
DD=f(BBa) en forêt (modèle à 3 paramètres)



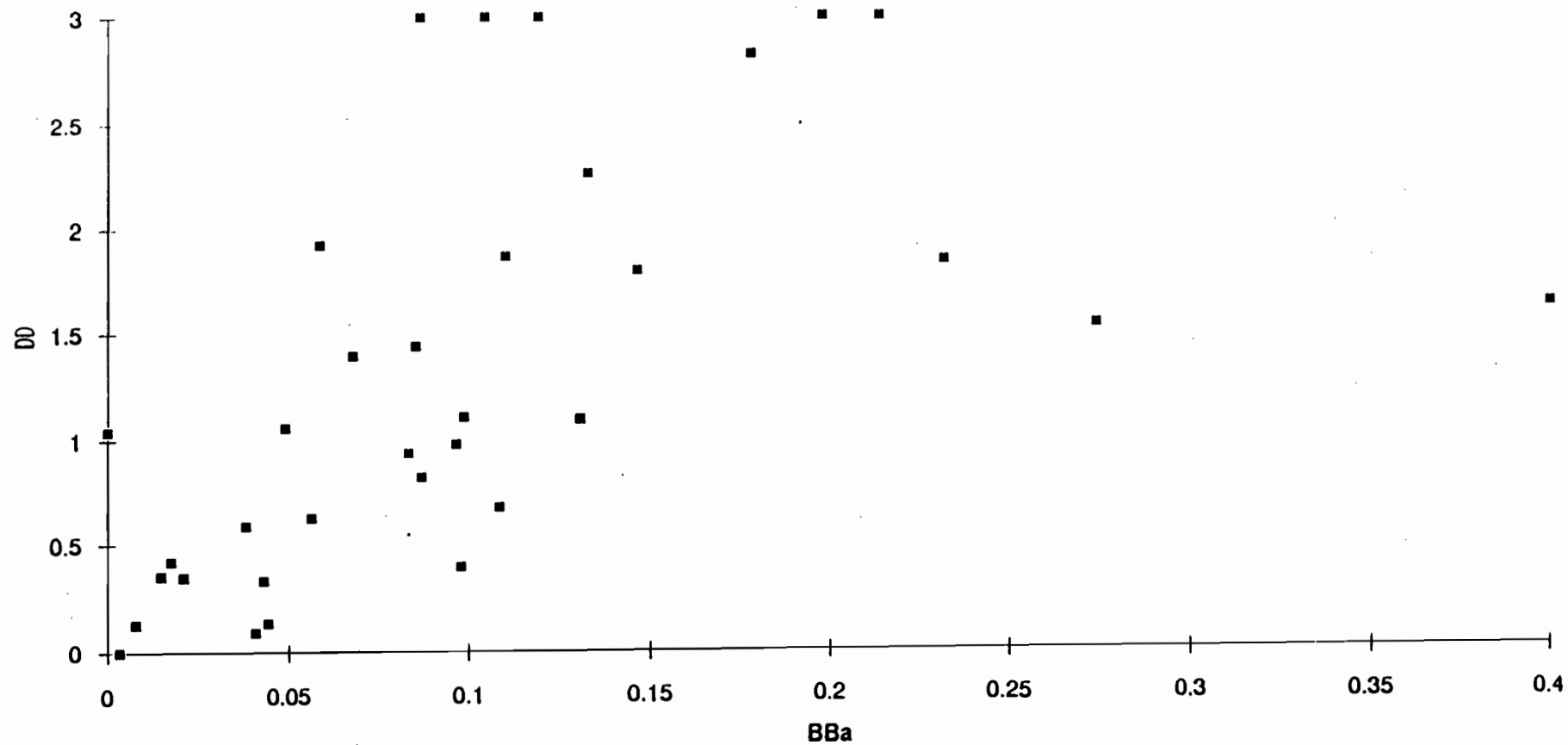
BBa=f(AA) en transition (modèle à 3 paramètres)



DD=f(AA) en transition (modèle à 3 paramètres)



DD=f(BBa) en transition (modèle à 3 paramètres)



ANNEXE VI

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Matrices de corrélations

Matrice de corrélation en forêt avec occupation des sols

	Superficie	Pluie an.	Compacité	Savane	Forêt	Culture	Habitat	Pc5	Pr5	Pc6	Pr6	Pc7
Superficie	1	-0.098	0.726	-0.0275	0.21	-0.1784	-0.551	-0.0162	0.0104	-0.1212	-0.0851	-0.1097
Pluie an.	-0.098	1	0.2418	0.3891	-0.062	0.0389	0.2225	0.5666	-0.2783	0.5681	-0.2899	0.8399
Compacité	0.726	0.2418	1	0.1258	0.0239	-0.0049	-0.3496	0.0101	-0.3023	-0.1494	-0.4743	0.0064
Savane	-0.0275	0.3891	0.1258	1	0.5953	-0.6268	-0.136	-0.0659	-0.4173	-0.0618	-0.4418	0.1671
Forêt	0.21	-0.062	0.0239	0.5953	1	-0.9981	-0.6383	-0.0248	0.0725	-0.0362	0.0602	0.0017
Culture	-0.1784	0.0389	-0.0049	-0.6268	-0.9981	1	0.592	0.0114	-0.0695	0.0184	-0.0598	-0.016
Habitat	-0.551	0.2225	-0.3496	-0.136	-0.6383	0.592	1	0.2393	0.0912	0.3087	0.145	0.1512
Pc5	-0.0162	0.5666	0.0101	-0.0659	-0.0248	0.0114	0.2393	1	0.617	0.7937	0.4329	0.5952
Pr5	0.0104	-0.2783	-0.3023	-0.4173	0.0725	-0.0695	0.0912	0.617	1	0.3935	0.8064	-0.0784
Pc6	-0.1212	0.5681	-0.1494	-0.0618	-0.0362	0.0184	0.3087	0.7937	0.3935	1	0.6049	0.6621
Pr6	-0.0851	-0.2899	-0.4743	-0.4418	0.0602	-0.0598	0.145	0.4329	0.8064	0.6049	1	-0.0096
Pc7	-0.1097	0.8399	0.0064	0.1671	0.0017	-0.016	0.1512	0.5952	-0.0784	0.6621	-0.0096	1
Pr7	-0.1022	-0.0352	-0.4517	-0.3275	0.0779	-0.0689	-0.038	0.2436	0.3596	0.3464	0.4893	0.5058
Pc8	-0.0044	0.8941	0.199	0.245	0.0236	-0.0326	0.0332	0.5858	-0.1464	0.5159	-0.2134	0.9392
Pr8	0.0887	0.3371	-0.0297	-0.111	0.1113	-0.0961	-0.2314	0.384	0.1561	0.2565	0.0568	0.6954
Pc9	-0.0362	0.9606	0.2417	0.3048	-0.0292	0.0144	0.1178	0.5726	-0.2274	0.5091	-0.2966	0.89
Pr9	0.0673	0.7289	0.2047	0.0961	-0.0089	0.0108	-0.0626	0.4693	-0.1298	0.3201	-0.2708	0.8293
Pc10	-0.0473	0.9891	0.3038	0.3919	-0.0454	0.0251	0.173	0.5148	-0.3241	0.4982	-0.3588	0.8194
Pr10	0.1935	0.7196	0.5601	0.3348	-0.0015	-0.0033	-0.0582	0.1499	-0.5072	0.07	-0.6197	0.5186
Pc11	-0.0841	0.9976	0.2587	0.3981	-0.0442	0.0219	0.2005	0.5521	-0.287	0.5457	-0.3084	0.8321
Pr11	0.1823	0.0449	0.2523	0.1704	0.276	-0.2689	-0.2783	-0.1236	-0.0972	-0.2449	-0.2477	-0.0443
AA	-0.2885	0.2876	-0.0324	0.2958	-0.2753	0.2411	0.5088	0.185	-0.0638	0.081	-0.2113	0.1437
BBa	0.1733	0.5258	0.3386	0.3616	0.2103	-0.2166	-0.1254	0.2532	-0.1618	0.3444	-0.1004	0.4531
DD	-0.0563	0.6121	0.312	0.2191	-0.108	0.097	0.1219	0.155	-0.3831	0.1244	-0.4274	0.4312

Matrice de corrélation en forêt avec occupation des sols

	Pr7	Pc8	Pr8	Pc9	Pr9	Pc10	Pr10	Pc11	Pr11	AA	BBa	DD
Superficie	-0.1022	-0.0044	0.0887	-0.0362	0.0673	-0.0473	0.1935	-0.0841	0.1823	-0.2885	0.1733	-0.0563
Pluie an.	-0.0352	0.8941	0.3371	0.9608	0.7289	0.9891	0.7196	0.9976	0.0449	0.2876	0.5258	0.6121
Compacité	-0.4517	0.199	-0.0297	0.2417	0.2047	0.3038	0.5601	0.2587	0.2523	-0.0324	0.3386	0.312
Savane	-0.3275	0.245	-0.111	0.3048	0.0961	0.3919	0.3348	0.3981	0.1704	0.2958	0.3616	0.2191
Forêt	0.0779	0.0236	0.1113	-0.0292	-0.0089	-0.0454	-0.0015	-0.0442	0.276	-0.2753	0.2103	-0.108
Culture	-0.0689	-0.0326	-0.0961	0.0144	0.0108	0.0251	-0.0033	0.0219	-0.2689	0.2411	-0.2166	0.097
Habitat	-0.038	0.0332	-0.2314	0.1178	-0.0626	0.173	-0.0582	0.2005	-0.2783	0.5088	-0.1254	0.1219
Pc5	0.2436	0.5858	0.384	0.5726	0.4693	0.5148	0.1499	0.5521	-0.1236	0.185	0.2532	0.155
Pr5	0.3596	-0.1464	0.1561	-0.2274	-0.1298	-0.3241	-0.5072	-0.287	-0.0972	-0.0638	-0.1618	-0.3831
Pc6	0.3464	0.5159	0.2565	0.5091	0.3201	0.4982	0.07	0.5457	-0.2449	0.081	0.3444	0.1244
Pr6	0.4893	-0.2134	0.0568	-0.2966	-0.2708	-0.3588	-0.6197	-0.3084	-0.2477	-0.2113	-0.1004	-0.4274
Pc7	0.5058	0.9392	0.6954	0.89	0.8293	0.8194	0.5186	0.8321	-0.0443	0.1437	0.4531	0.4312
Pr7	1	0.3113	0.7549	0.1168	0.3663	-0.0648	-0.2423	-0.0446	-0.1305	-0.1994	-0.0398	-0.2198
Pc8	0.3113	1	0.7187	0.9623	0.9095	0.8897	0.6419	0.8985	0.1264	0.1227	0.5522	0.5045
Pr8	0.7549	0.7187	1	0.5316	0.7703	0.3332	0.18	0.3479	0.173	-0.1794	0.3036	0.0723
Pc9	0.1168	0.9623	0.5316	1	0.8884	0.9689	0.7597	0.9663	0.1513	0.1887	0.5517	0.5913
Pr9	0.3663	0.9095	0.7703	0.8884	1	0.763	0.6842	0.7447	0.2674	0.0177	0.4684	0.4236
Pc10	-0.0648	0.8897	0.3332	0.9689	0.763	1	0.8109	0.9936	0.1418	0.2616	0.5396	0.6566
Pr10	-0.2423	0.6419	0.18	0.7597	0.6842	0.8109	1	0.7456	0.4213	0.1462	0.4492	0.6767
Pc11	-0.0446	0.8985	0.3479	0.9663	0.7447	0.9936	0.7456	1	0.1128	0.2641	0.5388	0.6138
Pr11	-0.1305	0.1264	0.173	0.1513	0.2674	0.1418	0.4213	0.1128	1	-0.3217	0.2147	0.0915
AA	-0.1994	0.1227	-0.1794	0.1887	0.0177	0.2616	0.1462	0.2641	-0.3217	1	0.1271	0.0714
BBa	-0.0398	0.5522	0.3036	0.5517	0.4684	0.5396	0.4492	0.5388	0.2147	0.1271	1	0.4543
DD	-0.2198	0.5045	0.0723	0.5913	0.4236	0.6566	0.6767	0.6138	0.0915	0.0714	0.4543	1

Matrice de corrélation en forêt sans occupation des sols

	Superficie	Pluie an.	Compacité	Pc5	Pr5	Pc6	Pr6	Pc7	Pr7	Pc8
Superficie	1	-0.3389	0.7949	-0.1384	0.244	-0.1456	0.2308	-0.1963	0.2404	-0.3064
Pluie an.	-0.3389	1	-0.0959	0.8147	-0.0459	0.7763	-0.1154	0.8611	-0.1398	0.9441
Compacité	0.7949	-0.0959	1	-0.1019	-0.0109	-0.0367	0.0656	-0.0319	0.0892	-0.0695
Pc5	-0.1384	0.8147	-0.1019	1	0.5222	0.8475	0.2707	0.7866	0.0899	0.7716
Pr5	0.244	-0.0459	-0.0109	0.5222	1	0.3605	0.6924	0.1341	0.409	-0.0094
Pc6	-0.1456	0.7763	-0.0367	0.8475	0.3605	1	0.5274	0.9324	0.3969	0.8197
Pr6	0.2308	-0.1154	0.0656	0.2707	0.6924	0.5274	1	0.3146	0.8335	0.0407
Pc7	-0.1963	0.8611	-0.0319	0.7866	0.1341	0.9324	0.3146	1	0.3741	0.9405
Pr7	0.2404	-0.1398	0.0892	0.0899	0.409	0.3969	0.8335	0.3741	1	0.117
Pc8	-0.3064	0.9441	-0.0695	0.7716	-0.0094	0.8197	0.0407	0.9405	0.117	1
Pr8	0.0399	0.0397	0.0333	0.0853	0.1736	0.3136	0.4948	0.427	0.7889	0.3614
Pc9	-0.3706	0.9339	-0.0679	0.6631	-0.1696	0.6488	-0.2043	0.7983	-0.1329	0.9423
Pr9	-0.1542	0.0444	0.0375	-0.1926	-0.2986	-0.1466	-0.2202	0.0521	0.0606	0.2271
Pc10	-0.3689	0.9532	-0.0735	0.6741	-0.1977	0.6134	-0.2951	0.7485	-0.2661	0.9028
Pr10	-0.1237	-0.0777	0.0469	-0.3735	-0.4855	-0.4803	-0.614	-0.3126	-0.4405	-0.0748
Pc11	-0.3516	0.9915	-0.0983	0.7878	-0.0767	0.7209	-0.185	0.818	-0.2032	0.9313
Pr11	-0.1089	-0.0299	-0.0261	-0.1521	-0.1856	-0.3568	-0.4845	-0.2796	-0.4699	-0.0659
AA	-0.4204	0.3934	-0.1374	0.23	-0.1333	0.1649	-0.253	0.2243	-0.2611	0.3245
BBa	-0.0286	0.114	0.172	0.13	0.1378	0.2366	0.2759	0.2221	0.2624	0.2125
DD	-0.2	0.0896	0.0769	-0.1775	-0.384	-0.2286	-0.4238	-0.0936	-0.3137	0.0707

Matrice de corrélation en forêt sans occupation des sols

	Pr8	Pc9	Pr9	Pc10	Pr10	Pc11	Pr11	AA	BBa	DD
Superficie	0.0399	-0.3708	-0.1542	-0.3689	-0.1237	-0.3518	-0.1089	-0.4204	-0.0288	-0.2
Pluie an.	0.0397	0.9339	0.0444	0.9532	-0.0777	0.9915	-0.0299	0.3934	0.114	0.0896
Compacité	0.0333	-0.0879	0.0375	-0.0735	0.0469	-0.0983	-0.0261	-0.1374	0.172	0.0769
Pc5	0.0853	0.6631	-0.1926	0.6741	-0.3735	0.7878	-0.1521	0.23	0.13	-0.1775
Pr5	0.1736	-0.1696	-0.2986	-0.1977	-0.4855	-0.0767	-0.1856	-0.1333	0.1378	-0.384
Pc6	0.3136	0.6488	-0.1466	0.6134	-0.4803	0.7209	-0.3568	0.1649	0.2366	-0.2286
Pr6	0.4948	-0.2043	-0.2202	-0.2951	-0.614	-0.185	-0.4845	-0.253	0.2759	-0.4238
Pc7	0.427	0.7983	0.0521	0.7485	-0.3126	0.818	-0.2796	0.2243	0.2221	-0.0938
Pr7	0.7889	-0.1329	0.0606	-0.2661	-0.4405	-0.2032	-0.4699	-0.2611	0.2624	-0.3137
Pc8	0.3614	0.9423	0.2271	0.9028	-0.0748	0.9313	-0.0659	0.3245	0.2125	0.0807
Pr8	1	0.2099	0.5533	0.0406	-0.0198	0.0254	-0.1171	-0.1045	0.3257	-0.0119
Pc9	0.2099	1	0.3927	0.9784	0.1956	0.9502	0.1326	0.4251	0.1969	0.2823
Pr9	0.5533	0.3927	1	0.2787	0.7375	0.1132	0.4624	0.179	0.2584	0.5158
Pc10	0.0406	0.9784	0.2787	1	0.2213	0.9761	0.1894	0.4516	0.1177	0.2818
Pr10	-0.0198	0.1956	0.7375	0.2213	1	0.0312	0.7808	0.2231	-0.0271	0.5896
Pc11	0.0254	0.9502	0.1132	0.9761	0.0312	1	0.0975	0.4117	0.0976	0.137
Pr11	-0.1171	0.1326	0.4624	0.1894	0.7808	0.0975	1	0.1525	-0.1513	0.294
AA	-0.1045	0.4251	0.179	0.4516	0.2231	0.4117	0.1525	1	0.157	0.2878
BBa	0.3257	0.1969	0.2584	0.1177	-0.0271	0.0976	-0.1513	0.157	1	0.3131
DD	-0.0119	0.2823	0.5158	0.2818	0.5896	0.137	0.294	0.2878	0.3131	1

Matrice de corrélation en transition sans occupation des sols

	Superficie	Pluie an.	Compacité	Pc5	Pr5	Pc6	Pr6	Pc7	Pr7	Pc8
Superficie	1	0.1316	-0.159	0.2576	0.153	0.267	0.1145	0.1745	0.0659	-0.0138
Pluie an.	0.1316	1	-0.1205	0.4307	-0.3627	0.4783	-0.4668	0.6528	-0.457	0.8455
Compacité	-0.159	-0.1205	1	-0.0108	0.0908	0.821	0.2243	0.2089	0.3838	-0.0741
Pc5	0.2576	0.4307	-0.0108	1	0.6729	0.8407	0.3927	0.6671	0.2407	0.5266
Pr5	0.153	-0.3627	0.0908	0.6729	1	0.4843	0.801	0.168	0.6425	-0.1305
Pc6	0.267	0.4783	0.0821	0.8407	0.4843	1	0.5369	0.7694	0.3502	0.5433
Pr6	0.1145	-0.4668	0.2243	0.3927	0.801	0.5369	1	0.1613	0.8209	-0.2428
Pc7	0.1745	0.6528	0.2089	0.6671	0.168	0.7694	0.1613	1	0.3568	0.8024
Pr7	0.0659	-0.457	0.3838	0.2407	0.6425	0.3502	0.8209	0.3568	1	-0.1102
Pc8	-0.0138	0.8455	-0.0741	0.5266	-0.1305	0.5433	-0.2428	0.8024	-0.1102	1
Pr8	-0.2421	-0.3029	0.0906	0.1923	0.4836	0.1772	0.495	0.2661	0.6754	0.2439
Pc9	0.0442	0.9629	-0.1461	0.4634	-0.2884	0.5022	-0.3944	0.693	-0.3601	0.9273
Pr9	-0.2575	0.2004	-0.1129	0.3379	0.2148	0.3326	0.179	0.4251	0.2633	0.5897
Pc10	0.051	0.9848	-0.1066	0.4417	-0.3444	0.4714	-0.4652	0.6761	-0.4245	0.8628
Pr10	-0.3962	0.1729	0.054	0.2196	0.0606	0.1438	-0.0529	0.3199	0.1014	0.3303
Pc11	0.1202	0.9963	-0.1242	0.445	-0.347	0.4832	-0.466	0.658	-0.4542	0.8491
Pr11	-0.1002	0.2863	-0.0892	0.3191	0.0725	0.2005	-0.1601	0.2704	-0.1226	0.3436
AA	-0.1411	0.2852	0.2016	-0.1623	-0.3578	-0.0083	-0.2491	0.2158	-0.0883	0.2747
BBa	0.1444	0.2765	0.2019	0.0354	-0.2041	0.0517	-0.2319	0.2596	-0.0759	0.3723
DD	-0.0559	0.4251	0.2498	0.0131	-0.3438	0.0028	-0.4031	0.1261	-0.3818	0.244

Matrice de corrélation en transition sans occupation des sols

	Pr8	Pc9	Pr9	Pc10	Pr10	Pc11	Pr11	AA	BBa	DD
Superficie	-0.2421	0.0442	-0.2575	0.051	-0.3962	0.1202	-0.1002	-0.1411	0.1444	-0.0559
Pluie an.	-0.3029	0.9629	0.2004	0.9848	0.1729	0.9963	0.2863	0.2852	0.2765	0.4251
Compacité	0.0906	-0.1461	-0.1129	-0.1066	0.054	-0.1242	-0.0892	0.2016	0.2019	0.2498
Pc5	0.1923	0.4634	0.3379	0.4417	0.2196	0.445	0.3191	-0.1623	0.0354	0.0131
Pr5	0.4636	-0.2884	0.2148	-0.3444	0.0606	-0.347	0.0725	-0.3578	-0.2041	-0.3438
Pc6	0.1772	0.5022	0.3326	0.4714	0.1438	0.4832	0.2005	-0.0083	0.0517	0.0028
Pr6	0.495	-0.3944	0.179	-0.4652	-0.0529	-0.466	-0.1601	-0.2491	-0.2319	-0.4031
Pc7	0.2661	0.693	0.4251	0.6761	0.3199	0.658	0.2704	0.2158	0.2596	0.1261
Pr7	0.6754	-0.3601	0.2633	-0.4245	0.1014	-0.4542	-0.1226	-0.0883	-0.0759	-0.3818
Pc8	0.2439	0.9273	0.5897	0.8628	0.3303	0.8491	0.3436	0.2747	0.3723	0.244
Pr8	1	-0.0931	0.7004	-0.2485	0.2743	-0.2884	0.105	-0.0331	0.1255	-0.3334
Pc9	-0.0931	1	0.4502	0.9642	0.2639	0.9613	0.3191	0.3324	0.3191	0.3565
Pr9	0.7004	0.4502	1	0.2706	0.4986	0.2196	0.3551	0.2217	0.2544	-0.0808
Pc10	-0.2485	0.9642	0.2706	1	0.3374	0.9893	0.378	0.3123	0.3188	0.4812
Pr10	0.2743	0.2639	0.4986	0.3374	1	0.2267	0.6891	0.1559	0.303	0.3785
Pc11	-0.2884	0.9613	0.2196	0.9893	0.2267	1	0.366	0.2751	0.2815	0.4341
Pr11	0.105	0.3191	0.3551	0.378	0.6891	0.366	1	0.0122	0.1845	0.2501
AA	-0.0331	0.3324	0.2217	0.3123	0.1559	0.2751	0.0122	1	0.236	0.484
BBa	0.1255	0.3191	0.2544	0.3188	0.303	0.2815	0.1845	0.236	1	0.5456
DD	-0.3334	0.3565	-0.0808	0.4812	0.3785	0.4341	0.2501	0.484	0.5456	1

Matrice de corrélation en transition avec occupation des sols

	Superficie	Pluie an.	Compacité	Savane	Forêt	Culture	Habitat	Pc5	Pr5	Pc6	Pr6	Pc7
Superficie	1	0.0057	-0.1025	-0.4546	0.9312	0.2302	-0.2349	0.1762	0.1208	0.2053	0.1672	0.0984
Pluie an.	0.0057	1	-0.1275	-0.0599	-0.0206	0.0635	0.0792	0.3474	-0.6088	0.5218	-0.5249	0.6673
Compacité	-0.1025	-0.1275	1	0.0265	-0.0842	0.0018	-0.8363	0.0428	0.1489	0.0578	0.1951	0.0819
Savane	-0.4546	-0.0599	0.0265	1	-0.0992	-0.9714	0.5192	-0.1897	-0.1051	-0.1361	-0.0468	0.1396
Forêt	0.9312	-0.0206	-0.0842	-0.0992	1	-0.1397	-0.0669	0.1205	0.0951	0.1752	0.1718	0.1689
Culture	0.2302	0.0635	0.0018	-0.9714	-0.1397	1	-0.5076	0.1605	0.0832	0.0942	0.0073	-0.1784
Habitat	-0.2349	0.0792	-0.8363	0.5192	-0.0669	-0.5076	1	-0.1483	-0.192	-0.1373	-0.2071	-0.0104
Pc5	0.1762	0.3474	0.0428	-0.1897	0.1205	0.1605	-0.1483	1	0.5202	0.8189	0.4376	0.5125
Pr5	0.1208	-0.6088	0.1489	-0.1051	0.0951	0.0832	-0.192	0.5202	1	0.219	0.8537	-0.1765
Pc6	0.2053	0.5218	0.0578	-0.1361	0.1752	0.0942	-0.1373	0.8189	0.219	1	0.4444	0.7868
Pr6	0.1672	-0.5249	0.1951	-0.0468	0.1718	0.0073	-0.2071	0.4376	0.8537	0.4444	1	0.095
Pc7	0.0984	0.6673	0.0819	0.1396	0.1689	-0.1784	-0.0104	0.5125	-0.1765	0.7868	0.095	1
Pr7	0.1163	-0.6176	0.2257	0.208	0.2197	-0.2575	-0.1016	0.0613	0.6119	0.1333	0.8005	0.1623
Pc8	-0.1209	0.8338	-0.0696	0.3509	0.0068	-0.3514	0.2463	0.3941	-0.4031	0.5548	-0.2906	0.8126
Pr8	-0.1894	-0.3314	0.1117	0.6615	0.0609	-0.6719	0.2517	0.1075	0.4197	0.0864	0.4816	0.2406
Pc9	-0.0962	0.9581	-0.1222	0.1075	-0.0661	-0.0923	0.1678	0.354	-0.5533	0.5178	-0.4645	0.7201
Pr9	-0.3172	0.194	0.003	0.5289	-0.1386	-0.4934	0.2915	0.2387	0.0572	0.2691	0.1302	0.4825
Pc10	-0.0667	0.9872	-0.1532	-0.0209	-0.0863	0.0401	0.1277	0.3709	-0.5825	0.5235	-0.5109	0.6889
Pr10	-0.3973	0.1434	-0.1454	0.1872	-0.3709	-0.0993	0.2565	0.2942	0.095	0.2098	0.0638	0.3377
Pc11	-0.0017	0.9969	-0.1237	-0.0574	-0.0278	0.0627	0.0779	0.3698	-0.587	0.5462	-0.4964	0.6873
Pr11	-0.134	0.1824	0.0357	0.0781	-0.1174	-0.0495	0.0211	0.382	0.1537	0.429	0.2549	0.4251
AA	-0.3029	0.3257	0.0714	0.3526	-0.1933	-0.3044	0.1435	-0.2545	-0.4885	-0.0314	-0.3422	0.3032
BBa	0.2389	0.2304	0.1654	0.305	0.3955	-0.3963	-0.0133	0.0795	-0.1613	0.0849	-0.1693	0.3071
DD	-0.081	0.4947	0.0626	-0.014	-0.0952	0.0371	-0.053	0.1472	-0.3488	0.0519	-0.4808	0.1161

	Pr7	Pc8	Pr8	Pc9	Pr9	Pc10	Pr10	Pc11	Pr11	AA	BBa	DD
Superficie	0.1163	-0.1209	-0.1894	-0.0962	-0.3172	-0.0667	-0.3973	-0.0017	-0.134	-0.3029	0.2389	-0.081
Pluie an.	-0.6176	0.8338	-0.3314	0.9581	0.194	0.9872	0.1434	0.9969	0.1824	0.3257	0.2304	0.4947
Compacité	0.2257	-0.0696	0.1117	-0.1222	0.003	-0.1532	-0.1454	-0.1237	0.0357	0.0714	0.1654	0.0626
Savane	0.208	0.3509	0.6615	0.1075	0.5289	-0.0209	0.1872	-0.0574	0.0781	0.3526	0.305	-0.014
Forêt	0.2197	0.0068	0.0609	-0.0661	-0.1386	-0.0863	-0.3709	-0.0278	-0.1174	-0.1933	0.3955	-0.0952
Culture	-0.2575	-0.3514	-0.6719	-0.0923	-0.4934	0.0401	-0.0993	0.0627	-0.0495	-0.3044	-0.3963	0.0371
Habitat	-0.1016	0.2463	0.2517	0.1678	0.2915	0.1277	0.2565	0.0779	0.0211	0.1435	-0.0133	-0.053
Pc5	0.0613	0.3941	0.1075	0.354	0.2367	0.3709	0.2942	0.3698	0.382	-0.2545	0.0795	0.1472
Pr5	0.6119	-0.4031	0.4197	-0.5533	0.0572	-0.5825	0.095	-0.587	0.1537	-0.4885	-0.1613	-0.3488
Pc6	0.1333	0.5548	0.0864	0.5178	0.2691	0.5235	0.2098	0.5462	0.429	-0.0314	0.0849	0.0519
Pr6	0.8005	-0.2906	0.4816	-0.4645	0.1302	-0.5109	0.0638	-0.4964	0.2549	-0.3422	-0.1693	-0.4808
Pc7	0.1623	0.8126	0.2406	0.7201	0.4825	0.6889	0.3377	0.6873	0.4251	0.3032	0.3071	0.1181
Pr7	1	-0.2411	0.709	-0.4996	0.2735	-0.5857	0.1377	-0.593	0.2037	-0.1133	-0.0152	-0.5636
Pc8	-0.2411	1	0.2372	0.9285	0.6132	0.8525	0.325	0.8395	0.3045	0.3992	0.4448	0.3557
Pr8	0.709	0.2372	1	-0.106	0.701	-0.2775	0.3232	-0.3102	0.2748	0.091	0.3162	-0.2558
Pc9	-0.4996	0.9285	-0.106	1	0.4588	0.9659	0.2677	0.9575	0.2397	0.416	0.313	0.4425
Pr9	0.2735	0.6132	0.701	0.4588	1	0.2757	0.5981	0.2164	0.4451	0.368	0.3705	0.0221
Pc10	-0.5857	0.8525	-0.2775	0.9659	0.2757	1	0.2944	0.9907	0.276	0.3452	0.2547	0.5336
Pr10	0.1377	0.325	0.3232	0.2677	0.5981	0.2944	1	0.1943	0.7569	0.0779	0.1974	0.2806
Pc11	-0.593	0.8395	-0.3102	0.9575	0.2164	0.9907	0.1943	1	0.2575	0.3086	0.2285	0.5003
Pr11	0.2037	0.3045	0.2748	0.2397	0.4451	0.276	0.7569	0.2575	1	-0.0995	0.0897	0.2135
AA	-0.1133	0.3992	0.091	0.416	0.368	0.3452	0.0779	0.3086	-0.0995	1	0.1241	0.3775
BBa	-0.0152	0.4448	0.3162	0.313	0.3705	0.2547	0.1974	0.2285	0.0897	0.1241	1	0.3814
DD	-0.5636	0.3557	-0.2558	0.4425	0.0221	0.5336	0.2806	0.5003	0.2135	0.3775	0.3814	1