



L'Institut
français de recherche
scientifique pour le
développement
en coopération.



Antenne Hydrologique ORSTOM

EVALUATION REGIONALE DES RESSOURCES EN EAU

APPLICATION A LA COTE D'IVOIRE

(Programme ERREAU)

RAPPORT DE SYNTHESE

Antenne Hydrologique
06 BP 1203 CIBEX 1
06 ABIDJAN COTE D'IVOIRE
Tel: (225) 41 64 75
Fax: (225) 41 64 70

Juin 1993

RAPPORT DE SYNTHÈSE DU PROGRAMME ERREAU

ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en EAU) est un programme de l'UR 2E réalisé par les hydrologues de l'Antenne Hydrologique de l'ORSTOM en Côte d'Ivoire. Ce projet a bénéficié du soutien constant du Professeur C. BOCQUILLON, Directeur du Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation de l'Université de Montpellier II.

Les débuts de ce programme remontent à Avril 1988, et sa clôture est intervenue en Juin 1993, date à laquelle s'est tenu, à Abidjan, un séminaire de présentation des résultats.

L'objet de ce rapport est de faire une synthèse de ce programme, non seulement en ce qui concerne les objectifs qui étaient les nôtres ou les résultats obtenus, mais également pour ce qui est du personnel qui y a participé, des crédits alloués, ou encore des publications réalisées et des thèses soutenues.

SOMMAIRE

Objectifs et articulation du programme ERREAU	3
Personnel ayant pris part au programme ERREAU	7
Crédits alloués	9
Résultats	11
Publications, communications, thèses et rapports	128
Valorisation	133
Conclusions et perspectives	139
Références bibliographiques	144
Table des matières	151

Objectifs et articulation du programme ERREAU

OBJECTIFS

L'évaluation des ressources en eau est un problème qui constitue la finalité de l'ensemble des recherches développées par les hydrologues sur les différents aspects du cycle de l'eau.

Dans le cadre du programme ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en Eau), nos objectifs concernaient l'évaluation des ressources en eau d'une région donnée par la mise au point et l'élaboration d'outils de modélisation, de façon à fournir la meilleure approximation des apports à l'exutoire de bassins versants jaugés ou non, et ce, en se plaçant du point de vue des gestionnaires et des aménageurs. Dans cette optique nous avons fait le choix de ne travailler qu'à l'aide de données dites de "réseau" tant en pluviométrie qu'en hydrométrie. Ce choix a eu pour conséquences immédiates d'imposer, d'une part, un pas de temps de calcul qui ne pouvait être inférieur à la journée et, d'autre part, de travailler sur des bassins versants de taille moyenne (100 à 7000 km²).

La prise en compte de ces contraintes (données de réseau, bassins versants d'assez grande taille) nous a semblé nécessaire pour pouvoir envisager des retombées pratiques rapides de ces travaux en matière d'aménagement et de gestion, bien qu'elle conduise à utiliser des données dont la qualité est parfois difficilement appréciable.

La zone d'application initiale du programme ERREAU était constituée par le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, c'est-à-dire le secteur délimité par les hauts bassins du Bandama, du Niger et du Sassandra. Cette zone a finalement pu être étendue à l'ensemble de la Côte d'Ivoire, incluant ainsi les zones de transition et de forêt.

Les résultats attendus à l'issue de ce programme étaient de différentes natures. Sur un plan pratique on peut citer tout d'abord l'analyse de chacun des modèles utilisés, ainsi que la réalisation d'un logiciel convivial et intégré de modélisation pluie-débit. Ce projet devait également permettre la mise à jour de fichiers opérationnels de données pluviométriques et débitométriques. Ce qui sous-entend une analyse des séries chronologiques disponibles.

L'un des objectifs du programme ERREAU était de pouvoir juger de l'utilisation en mode "opérationnel" des modèles conceptuels globaux de relation pluie-débit, une fois ceux-ci sortis du contexte climatique de la zone géographique pour laquelle ils avaient été initialement conçus. Des essais d'utilisation de ces modèles sur des bassins versants non jaugés ont également été réalisés du fait de la mise au point d'équations de prédétermination de leurs paramètres.

Sur un plan plus général ce programme devait être, en outre, l'occasion de s'interroger sur plusieurs points, en s'appuyant, en particulier, sur un module d'évaluation des performances des modèles préalablement élaboré: influence des fonctions critères sur les résultats, "transposabilité" des modèles (dans quelles conditions ? et pour quels résultats ?), fiabilité et robustesse des algorithmes, homogénéité des comportements à différentes échelles d'espace, niveau de performance des modèles en fonction des objectifs visés, etc.

ARTICULATION

La réalisation de ce projet s'est articulée en plusieurs phases dont la première fut, bien entendu, l'analyse des différents modèles que nous souhaitions utiliser. Compte tenu des contraintes imposées par le mode opérationnel (cf. les objectifs énoncés plus haut), nous avons délibérément éliminé toute modélisation distribuée de la relation pluie-débit. En effet, la nature de l'information pluviométrique retenue (seules les données du réseau sont utilisées dans le programme ERREAU), tant du point de vue de sa répartition que de sa qualité, est à l'origine de sérieuses difficultés en ce qui concerne l'utilisation des modèles distribués dans des conditions optimales. La densité des postes pluviométriques est en effet assez faible et leur répartition est très irrégulière. La qualité des données est elle-même très variable. Autant de points négatifs qui rendent un peu illusoire la spatialisation indispensable de l'information pluviométrique, et donc l'utilisation de modèles aussi sophistiqués que peuvent l'être les modèles distribués. Il y avait donc nécessité à mettre l'accent en priorité sur l'utilisation des modèles conceptuels globaux, moins exigeants dans la mesure où ils se satisfont du calcul d'une pluie moyenne sur le bassin versant. Ce choix se justifie pleinement dans le cadre défini pour le programme ERREAU, l'utilisation de modèles globaux étant plus accessible à un aménageur ou un gestionnaire de projet que celle des modèles distribués.

Nous avons donc finalement retenu trois algorithmes pluie-débit: CREC, élaboré par le Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation de l'Université de Montpellier II, GR3 élaboré par l'équipe de C. MICHEL au CEMAGREF, et MODGLO élaboré par G. GIRARD à l'ORSTOM. Ces trois modèles ont été analysés et adaptés sur micro-ordinateur en Turbo-Pascal.

Par la suite l'enchaînement des opérations fut le suivant:

- ⇒ **Mars 1989:** établissement des fichiers opérationnels en zone de savane et de la banque de modèles.
- ⇒ **Décembre 1989:** mise au point de l'ensemble des outils informatiques; études et interprétations concernant les critères numériques de calage.
- ⇒ **Février 1990:** phase de calculs et de simulations à l'aide des modèles globaux en zone de savane.
- ⇒ **Août 1990:** phase d'interprétation des résultats des calages obtenus avec les modèles globaux en zone de savane; établissement des fichiers opérationnels en zone de transition et de forêt.
- ⇒ **Mars/Avril 1991:** interprétation, exploitation et rédaction des résultats obtenus en zone de savane.
- ⇒ **Novembre 1991:** phase d'interprétation des résultats obtenus en zones de transition et de forêt.
- ⇒ **Juin 1992:** élaboration d'un modèle pluie-débit mensuel validé en zones de forêt, de transition et de savane.
- ⇒ **Septembre 1992:** interprétation, exploitation et rédaction des résultats obtenus en zones de transition et de forêt.

- ⇒ **Janvier 1993**: synthèse et valorisation des outils informatiques développés: élaboration d'un système modélisateur pluie-débit global et convivial, le logiciel EMILE (Ensemble Modélisateur Intégré pour le calcul des Lames d'Eau). Une première version de ce logiciel a été présentée aux Journées Hydrologiques de l'ORSTOM en Septembre 1992.
- ⇒ **Juin 1993**: calculs et simulations au pas de temps mensuel selon une approche de type globale conceptuelle.

Le programme ERREAU était initialement prévu pour être appliqué uniquement dans la zone Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire (zone de savane soudanaise). Il a, par la suite, été étendu à la zone de transition et à la zone de forêt. Cette extension s'est réalisée en suivant la même méthodologie, mais elle est décalée dans le temps, ayant démarré plus tardivement.

L'étude réalisée au pas de temps journalier s'est vue complétée par une approche en modélisation au pas de temps mensuel validée sur l'ensemble du territoire ivoirien.

En Juin 1993, s'est tenu à Abidjan un séminaire de fin de programme, organisé conjointement avec le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire, destiné à présenter les résultats obtenus à nos différents partenaires et aux utilisateurs potentiels. **Le programme ERREAU est donc considéré comme définitivement terminé.**

Personnel ayant pris part au programme ERREAU

PERSONNEL ORSTOM

<i>Chargé de recherches:</i>	E. SERVAT, Chef du Projet.
<i>Technicien de recherches:</i>	J.M. LAPETITE
<i>Allocataire et VSN:</i>	A. DEZETTER (Thèse)
<i>Stagiaires:</i>	G. ANDRE, A. BERTRAND, C. LEVINET, J.L. LOUBET, O. VIGAND

PERSONNEL IVOIRIEN

<i>Attaché de recherches:</i>	KOUAME B. (Thèse, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique)
<i>Ingénieur:</i>	SAKHO M. (Thèse, Direction de l'Eau)
<i>Stagiaire:</i>	AKA AKPA A. O.

Crédits alloués

Les crédits alloués au programme ERREAU durant sa réalisation ont été reportés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Crédits alloués au programme ERREAU

Année	Fonctionnement (en Kf)	Personnel temporaire (en Kf)
1988	262	9
1989	200	20
1990	230	20
1991	174.6	19
1992	138	15
1993	30.5	----

Plusieurs remarques doivent être faites concernant ces crédits:

- Les crédits plus importants des premières années ont permis l'achat des équipements, notamment informatiques, nécessaires à la réalisation du programme.
- Les crédits attribués en 1993 étaient principalement dévolus à l'organisation du séminaire de clôture du programme et aux frais de reproduction du rapport de synthèse.
- La dotation moyenne annuelle de fonctionnement par intervenant a été évaluée à 34.5 Kf, mais, depuis l'année 1992, une part non négligeable de ces crédits de fonctionnement a dû être utilisée "hors programme" dans le cadre du fonctionnement de la structure "Antenne Hydrologique".

Résultats

MILIEU PHYSIQUE

SITUATION GEOGRAPHIQUE.

La Côte d'Ivoire, d'une superficie de 322 000 km² est située en Afrique de l'Ouest entre les latitudes 5°30' et 10°30' Nord et les longitudes 2°30' et 8°30' Ouest [fig.1]. Elle est limitée au Sud par l'Océan Atlantique, au Nord par le Mali et le Burkina Faso, à l'Est par le Ghana et à l'Ouest par le Libéria et la Guinée.

MORPHOLOGIE.

Le relief de la Côte d'Ivoire [fig.2] est peu contrasté, à l'image de l'Afrique de l'Ouest. Seules les régions Ouest et Nord-Ouest présentent des altitudes supérieures à 1000 m avec, en particulier, le mont Nimba (1752 m) qui constitue le point culminant.

Avenard (1971) distingue dans cette relative monotonie les cinq zones suivantes :

- La retombée orientale de la Dorsale Guinéenne qui est une chaîne montagneuse formant la frontière naturelle entre la Côte d'Ivoire, la Guinée et le Libéria.
- Le Nord qui présente une zone de collines dont les altitudes varient de 200 à 500 m
- La zone de transition centrale, entrecoupée de collines orientées Nord-Est, Sud-Ouest. (Les collines Baoulé et les collines de Bongouanou).
- La zone Sud dont les altitudes varient de 0 à 200 m composée de collines en pente douce d'une hauteur moyenne de 20 à 30 m.
- La zone littorale qui se compose de petites baies et plages de sable et des principales lagunes (Ebrié, Lahou et Aby).

APERÇU GEOLOGIQUE

Le socle de la Côte d'Ivoire est principalement composé de roches granitiques et métamorphiques précambriennes. Il fait partie du bouclier d'Afrique occidentale. Le tableau suivant présente une classification stratigraphique de la Côte d'Ivoire illustrée par la figure 3.

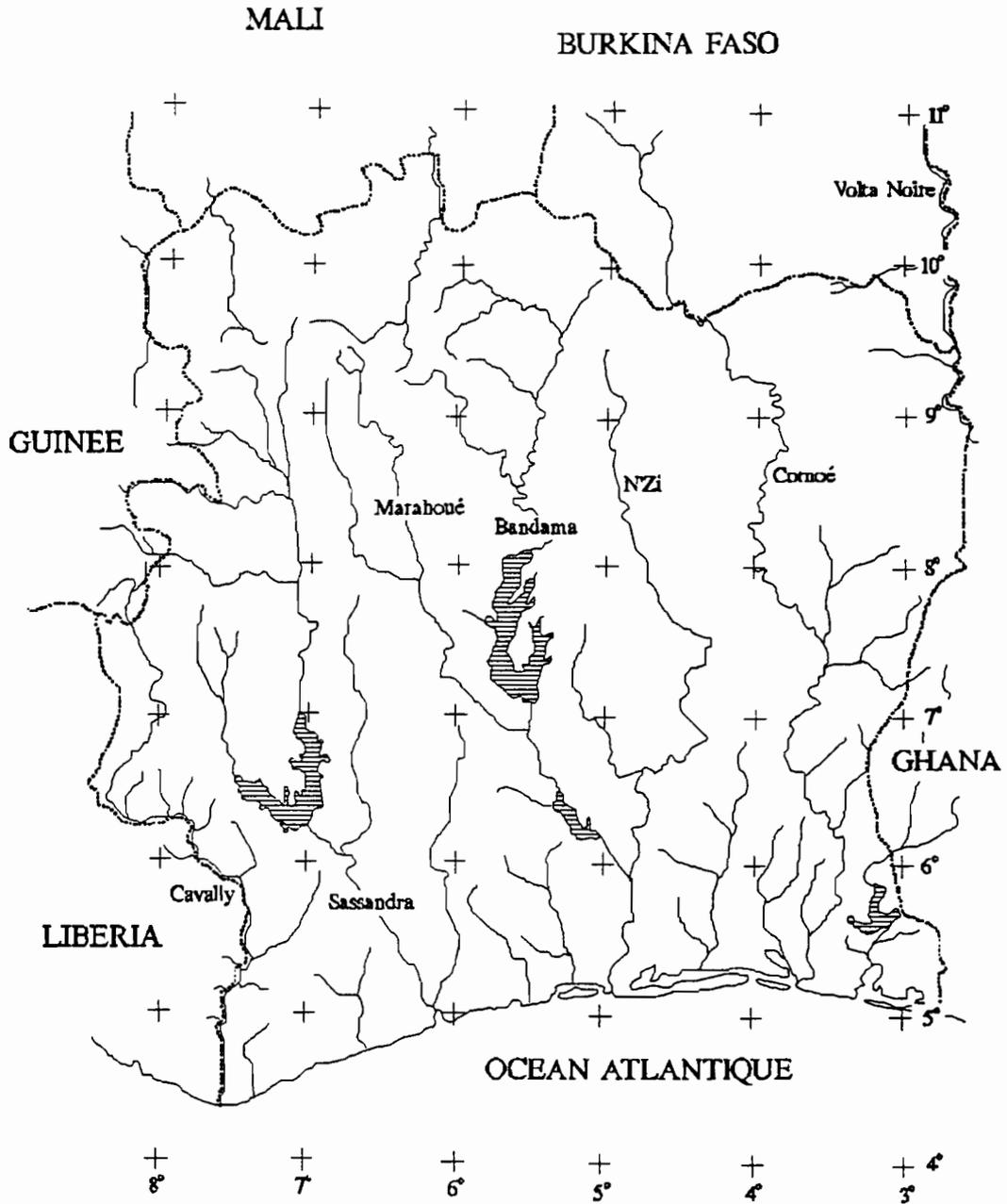


Figure 1 : La Côte d'Ivoire

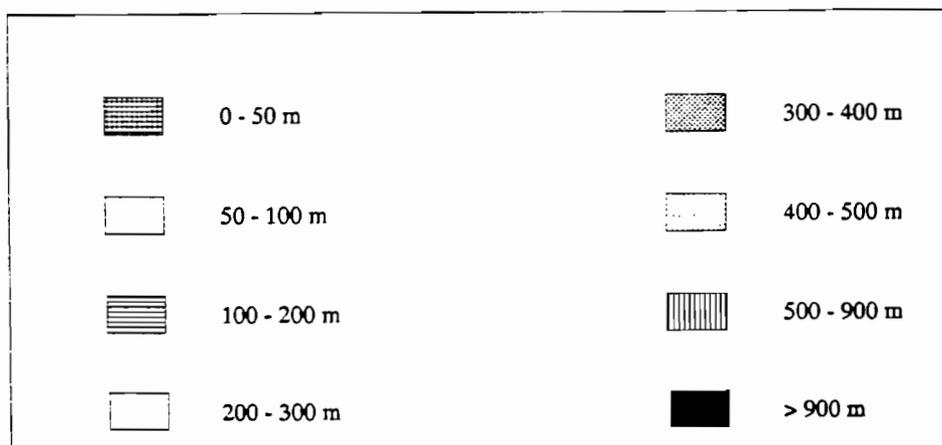
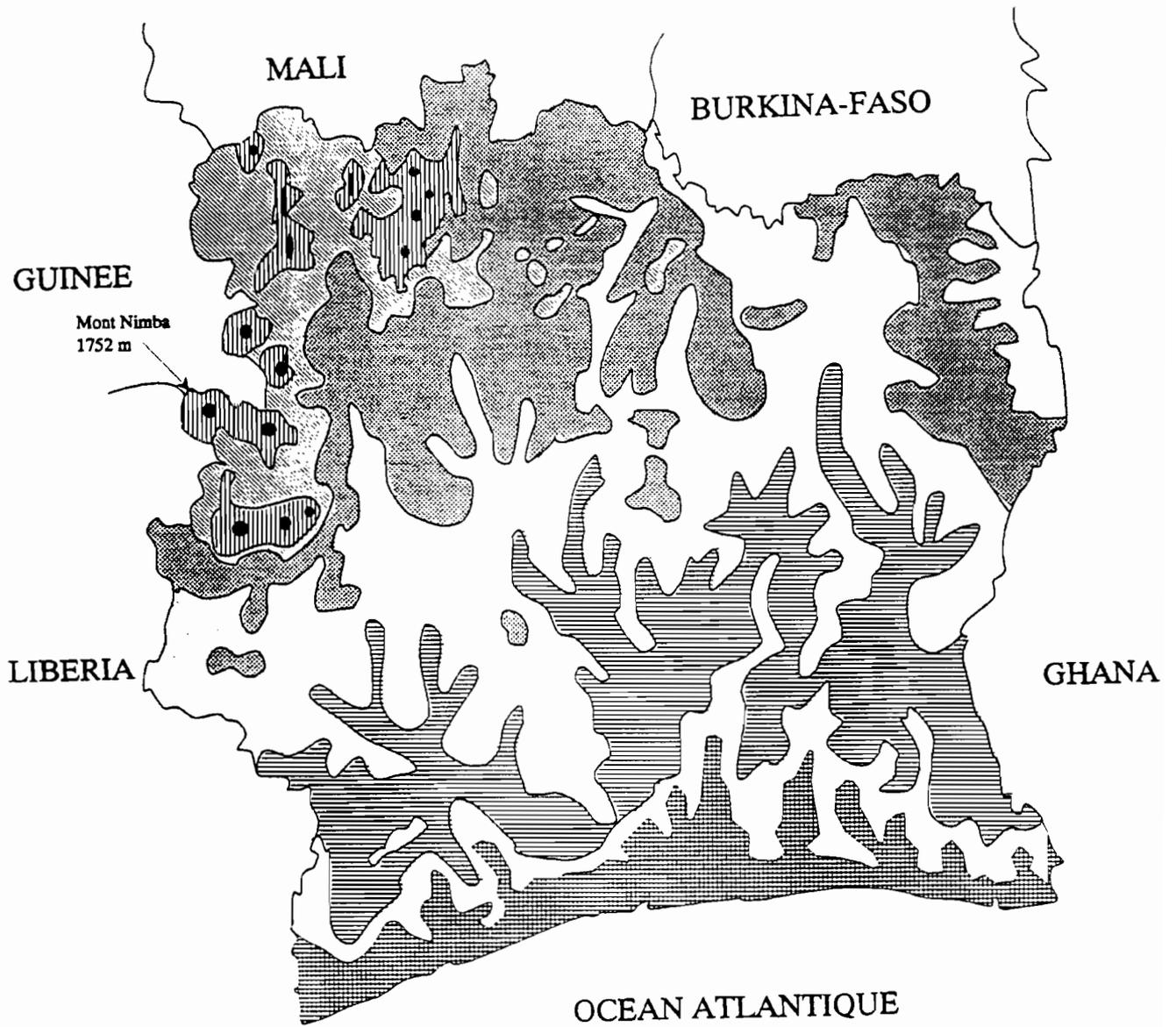


Figure 2: Carte hypsométrique de la Côte d'Ivoire

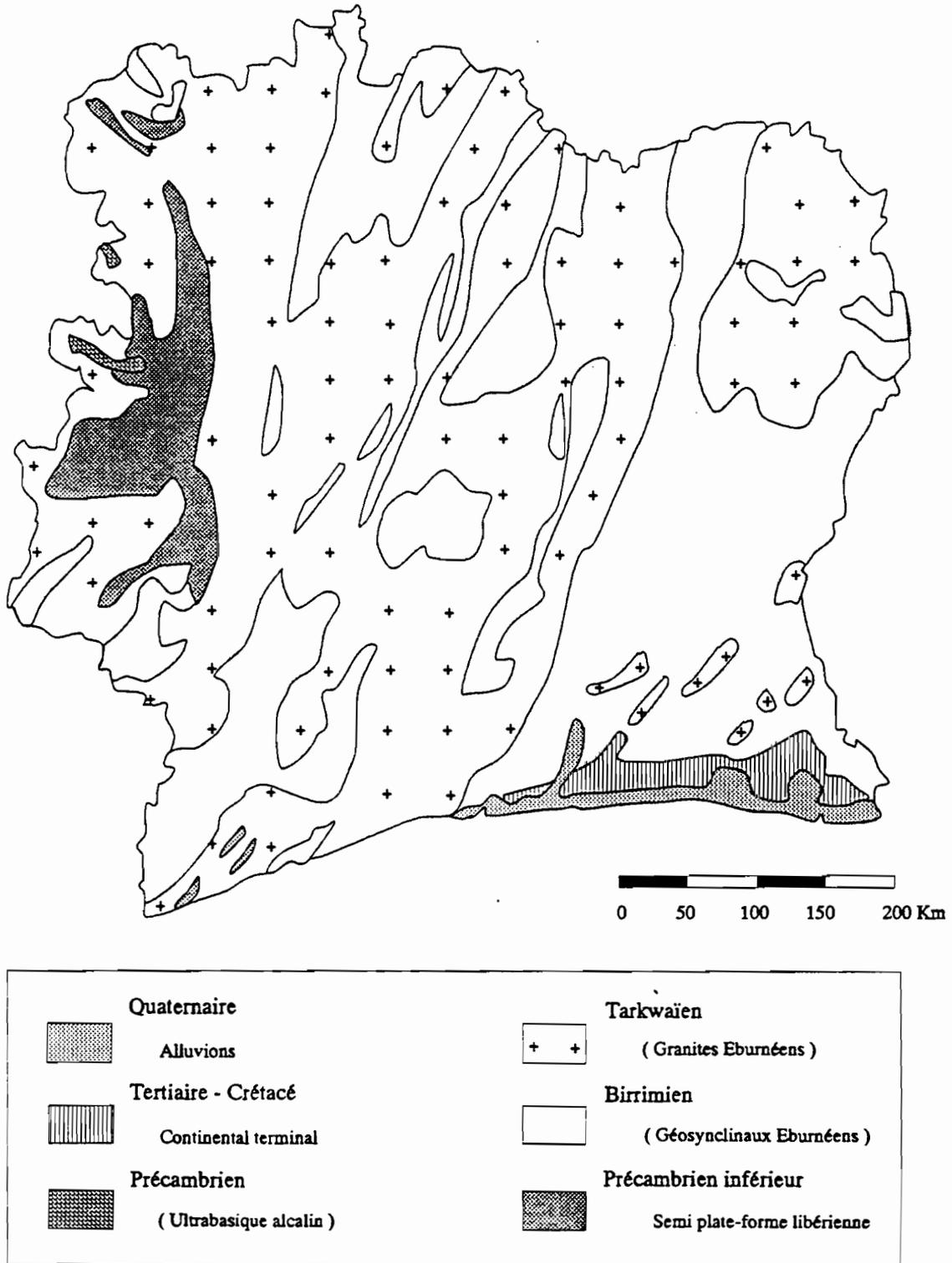


Figure 3 : Carte Géologique de la Côte d'Ivoire

VEGETATION

Trois grands types de paysage occupent la Côte d'Ivoire. Le tiers Sud est recouvert par la forêt tropicale du domaine Guinéen. La partie centrale, qui forme un V au dessus de Dimbokro, est occupée par une suite de forêts claires. Quant au reste du pays, au Nord, il est occupé par la savane du domaine Soudanais : savane de type arborée et herbeuse.

Guillaumet et Adjanooun (in Avenard et al, 1971) ont défini et localisé les différents types de végétation de la Côte d'Ivoire comme décrit dans le tableau 2 et représenté en figure 4.

Tableau 2 : Classification de la végétation (d'après Guillaumet et Adjanooun, in Avenard et al, 1971).

Divisions Phytogéographiques	Formations végétales dominantes	Observations
DOMAINE GUINEEN		
Secteur Ombrophiles	Forêt dense humide sempervirente	Saison sèche nulle ou inférieure à 5 mois
Secteur Mésophile	Forêt dense humide semi-décidue et savane guinéenne	Saison sèche 4 à 6 mois
Secteur Littoral	Mosaïque de climax édaphiques	Nature des sols et proximité de la mer
Secteur Montagnard	Forêt dense humide de montagne	Pluviosité et humidité dues à l'altitude
DOMAINE SOUDANAIS		
Secteur Sub- Soudanais	Savane, forêt claire et îlot de forêt dense	Saison sèche supérieure à 8 mois
Secteur Soudanais	Savane et forêt claire	Saison sèche supérieure à 8 mois

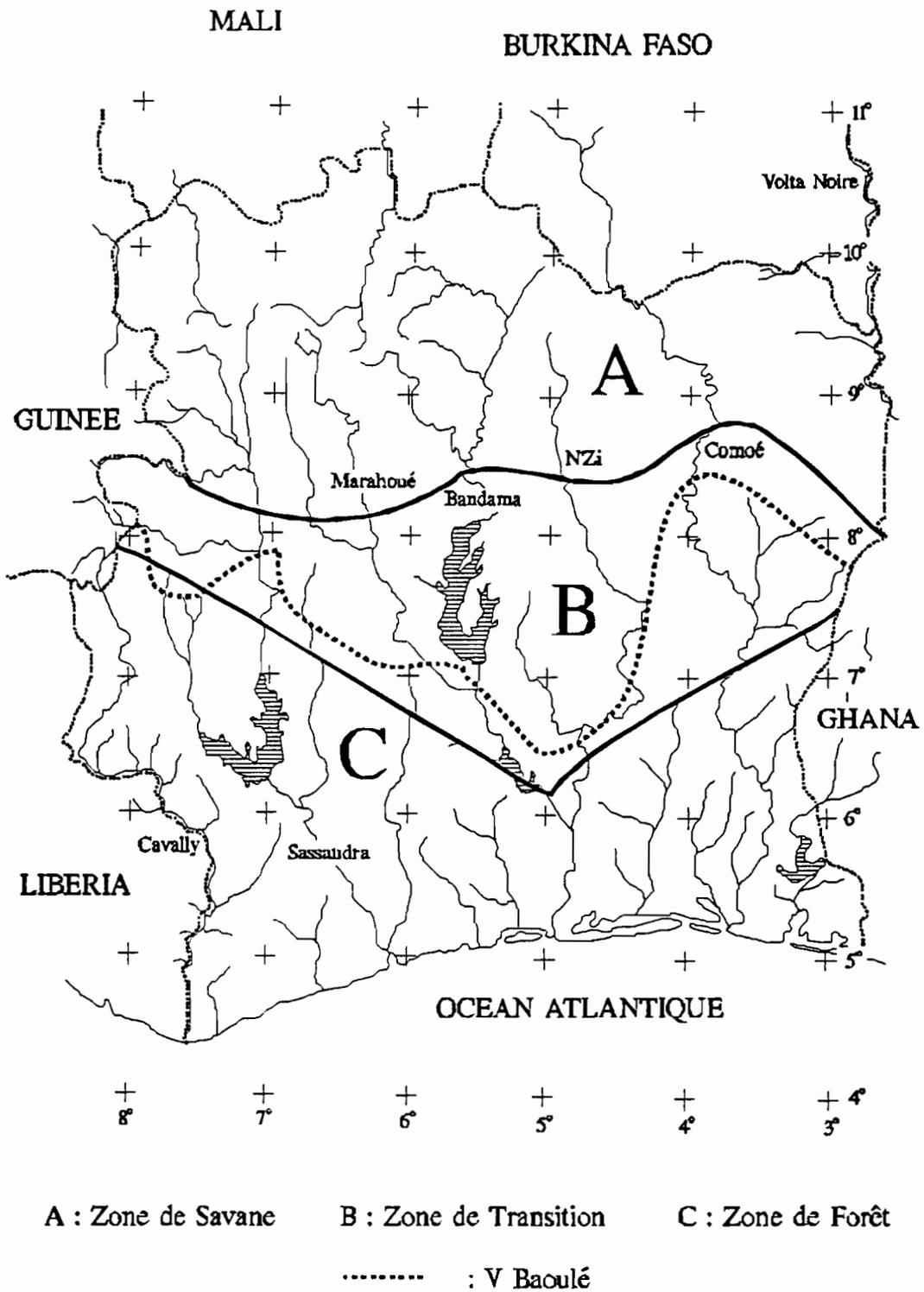


Figure 4 : Carte de la Végétation de la Côte d'Ivoire

LE CLIMAT

Le climat de la Côte d'Ivoire est déterminé par la confluence appelée Front Inter Tropical (F.I.T) de deux masses d'air de natures différentes. Au Nord du F.I.T. une masse d'air continentale d'origine Saharienne (zone A) caractérisée par un vent chaud et sec de secteur Nord-Est : l'Harmattan. Au Sud du FIT, une masse d'air humide d'origine océanique, caractérisée par des vents de secteur Sud-Ouest, la Mousson.

A l'échelle macroscopique, on distingue 3 zones principales à partir du F.I.T. et vers le Sud :

- Une zone (B), d'environ 300–350 km de large correspondant au climat de grande saison sèche : beau temps, brouillards matinaux.
- Une zone (C/D) de 800 à 1000 km de large correspondant au climat de la saison des pluies : averses orageuses, vent et pluies abondantes.
- Une zone (E) correspondant au climat de petite saison sèche : ciel gris, homogène, faibles insulations et pluies rares.

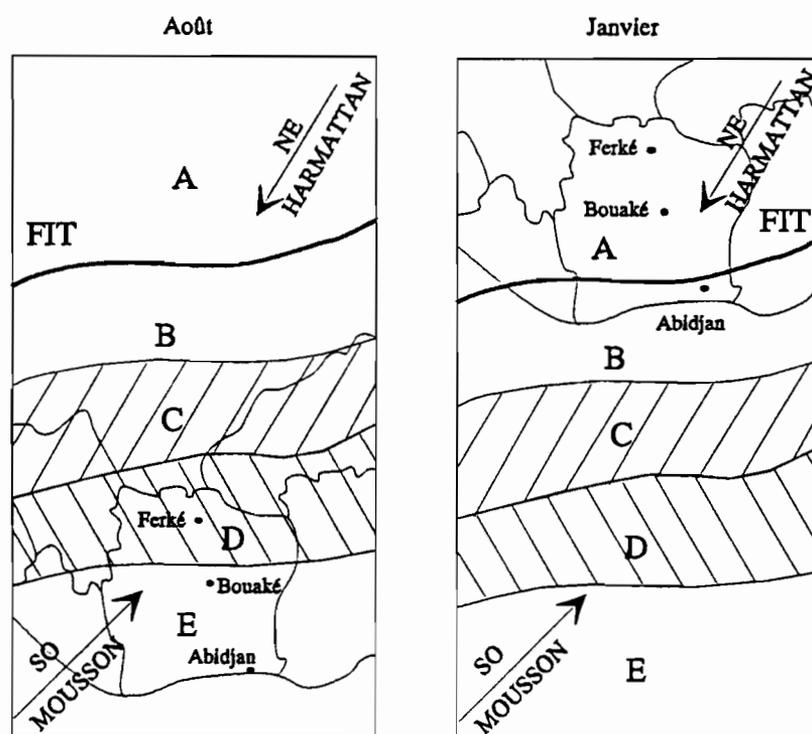


Figure 5 : Positions extrêmes du F.I.T. (d'après Atlas de Côte d'Ivoire, 1979)

Le F.I.T. présente des ondulations d'Est en Ouest et se déplace en oscillant dans une direction Nord-Sud entraînant avec lui les cinq zones précédemment décrites [fig.5 et tab.3]. Le Sud est soumis à un régime de deux saisons sèches et deux saisons des pluies, le Nord est soumis à une seule saison des pluies.

Tableau 3 : Caractéristiques de la zone intertropicale (d'après Eldin, in Avenard et al 1971).

Désignation et épaisseur de la Zone	Caractéristiques des masses d'air	Types de temps provoqués	Types de saison en Côte d'Ivoire
ZONE A	Forte subsidence des basses couches atmosphériques	Alizés boréaux maritimes ou continentaux. Air sec chaud le jour froid la nuit. Brume sèche	Intérieur de la grande saison sèche période d'harmattan.
FRONT INTERTROPICAL			
ZONE B 300/350 KM	Convergence très faible	Beau temps, bonne visibilité brouillards matinaux. Stabilité atmosphérique	Grande saison sèche
ZONE C 500/550 KM	Forte convergence	Averses orageuses Formation des lignes de grains. Coup de vent.	Intersaison
ZONE D 450/550 KM	Convergence modérée	Forte humidité ciel chargé de nuages bas et moyens. Pluies continuelles	Saison des pluies
ZONE E	Divergence faible	Ciel gris, homogène Pluies rares.	

LES PRECIPITATIONS

Pour l'ensemble du territoire, la saison des pluies est due au passage des zones C et D [fig.5] sur la zone considérée. Le maximum des précipitations se situe en Mai-Juin dans le Sud du pays et en Août-Septembre dans le Nord.

Cependant il existe des incidences régionales sur la pluviométrie dues aux facteurs orographiques que sont :

- L'orientation de la côte.
- Le relief.

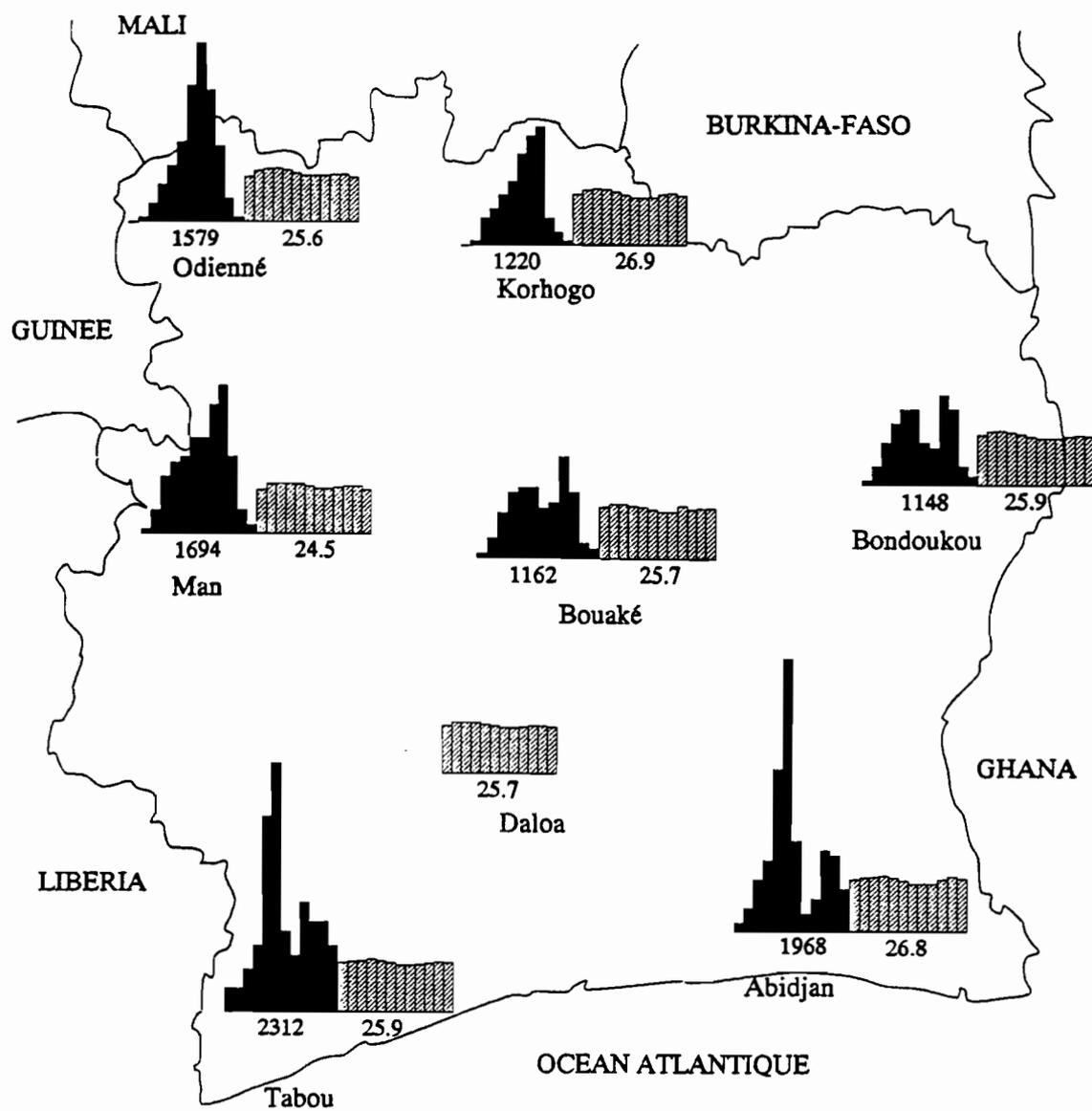


Figure 6 : Carte de la pluviométrie et de la température

La pluviométrie présente du fait du déplacement du F.I.T. une grande variabilité dans le temps et dans l'espace [fig.6].

TEMPERATURE

De 1981 à 1990, les températures moyennes mensuelles enregistrées montrent une certaine homogénéité qui autorise à dire que la température moyenne en Côte d'Ivoire est de 25.9°C avec un écart type de 1.5°C [fig.6]. On notera que pendant la saison sèche on assiste à des amplitudes thermiques entre le jour et la nuit qui peuvent atteindre environ 30°C.

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Sur toute la Côte d'Ivoire, une valeur d'ETP moyenne a été estimée de l'ordre de 1500 mm (Eldin et al in Avenard et al, 1971). Elle représente 80 à 90% des volumes d'eau du bilan hydrique.

La détermination des ETP mensuelles par la formule de Turc a été réalisée par Eldin (in Avenard et al, 1971) sur la base d'un découpage régional [fig.7, tab.4].

Tableau 4 : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm des différentes zones (d'après Eldin, in Avenard et al, 1971)

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Zone	1	148	154	164	154	125	95	97	100	98	132	145	133
Zone	2	145	146	159	156	135	105	108	114	121	147	148	143
Zone	3	132	144	162	153	128	100	109	108	117	137	151	144
Zone	4	122	129	142	141	124	93	94	93	95	118	128	120
Zone	5	126	131	139	131	106	81	82	85	83	112	123	113
Zone	6	130	131	148	148	136	107	99	93	112	125	130	123
Zone	7	142	144	153	149	148	115	113	95	107	130	143	135
Zone	8	133	141	152	150	136	109	105	95	102	127	133	139
Zone	9	145	153	163	162	148	126	117	98	109	135	138	139
Zone	10	130	140	153	147	138	108	92	87	109	128	125	121
Zone	11	144	144	149	138	132	107	89	87	115	138	129	130
Zone	12	149	159	169	153	136	123	123	128	139	142	141	137
Zone	13	138	146	159	153	145	119	102	96	115	136	134	129
Zone	14	146	153	165	157	147	127	109	98	117	142	143	138
Zone	15	152	156	170	164	160	142	121	113	127	152	153	143
Zone	16	161	167	176	166	161	143	122	103	121	153	162	155
Zone	17	160	162	176	170	167	153	131	122	133	160	162	151
Zone	18	152	167	179	161	139	132	141	149	151	144	147	141

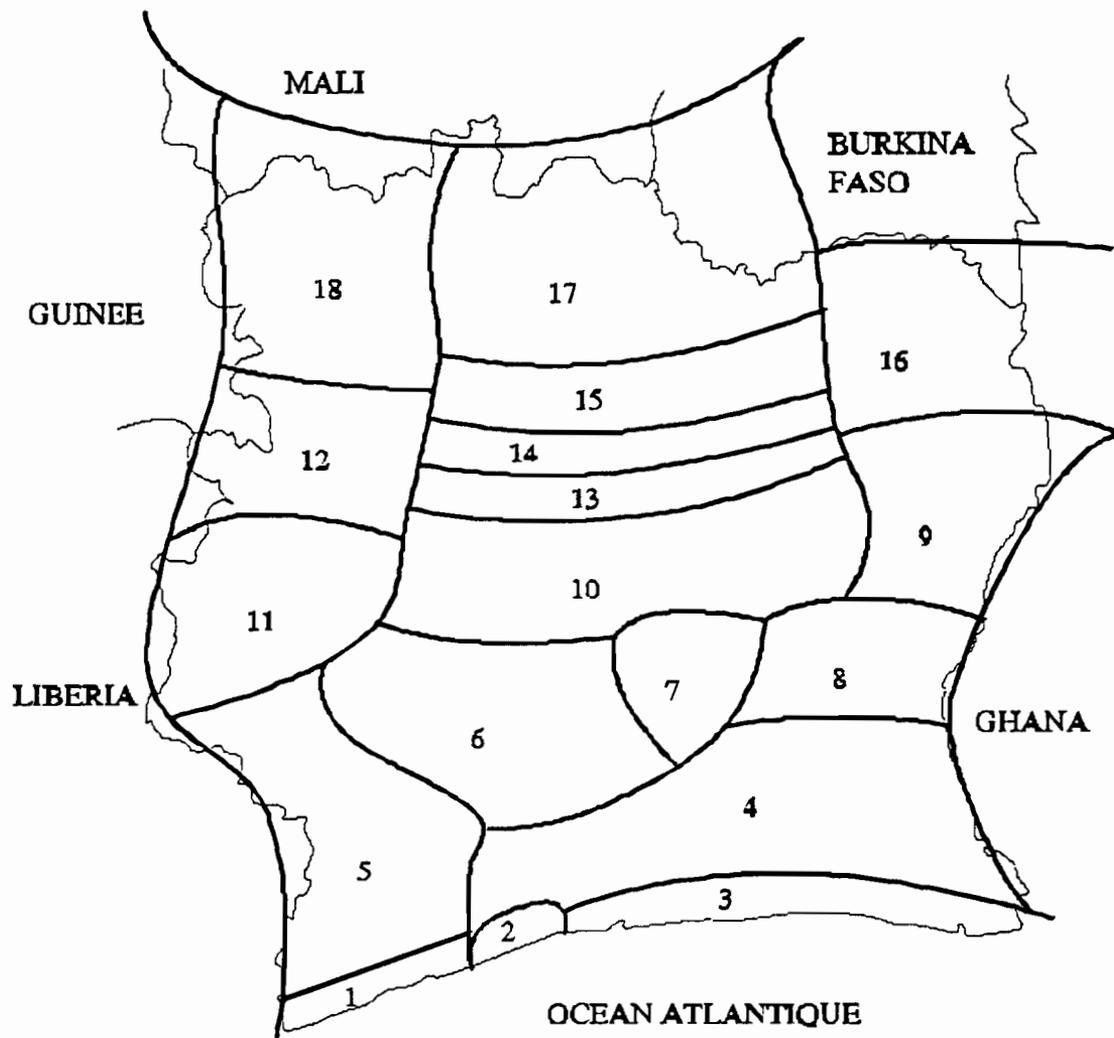


Figure 7 : Carte des Zones d'égaies ETP (d'après Eldin, in Avenard et al, 1971)

HYDROLOGIE

Le réseau hydrographique [fig.1] découpe la Côte d'Ivoire en quatre bassins versants principaux :

- Le Cavally : 15 000 km² au sein du territoire ivoirien. Le bassin versant s'étend sur la Côte d'Ivoire et le Libéria.
- Le Sassandra : 75 000 km² au sein du territoire ivoirien. Le bassin versant s'étend sur la Côte d'Ivoire et la Guinée.
- Le Bandama : bassin versant de 97 000 km² intégralement situé en territoire ivoirien.
- La Comoé : 78 000 km² au sein du territoire ivoirien. Le bassin versant s'étend sur la Côte d'Ivoire, le Burkina et le Ghana.

Les débits des cours d'eau s'ils dépendent de multiples facteurs tels que la végétation, la nature du sol et la structure du réseau hydrographique, restent essentiellement influencés par le régime des précipitations.

On distingue les quatre régimes hydroclimatiques suivants [fig.8];

– Régime tropical de transition

Il s'étend au Nord d'un axe Ferkessedougou–Touba sur la partie septentrionale de la Côte d'Ivoire dans une région de savane plus ou moins boisée.

Il comporte une seule saison des pluies allant de Mai à Septembre. Celle-ci correspond à la période de hautes eaux, avec quelques décalages selon l'importance des bassins versants. Elle est suivie d'un tarissement progressif en Novembre–Décembre, puis d'une longue période de basses eaux s'étalant jusqu'en Avril–Mai, au cours de laquelle les débits peuvent atteindre des valeurs très faibles, voire nulles fin Avril sur les petits bassins versants (<500 km²).

– Régime équatorial de transition :

Il s'étend sur la partie méridionale de la Côte d'Ivoire au Sud d'un axe Abengourou–Toumodi–Soubré (région de Sassandra, Abidjan...) dans une zone où la végétation est de type forestier.

Les variations thermiques restent faibles car elles sont fortement tamponnées par l'influence océanique; l'Harmattan n'a que très peu d'influence sur les moyennes annuelles.

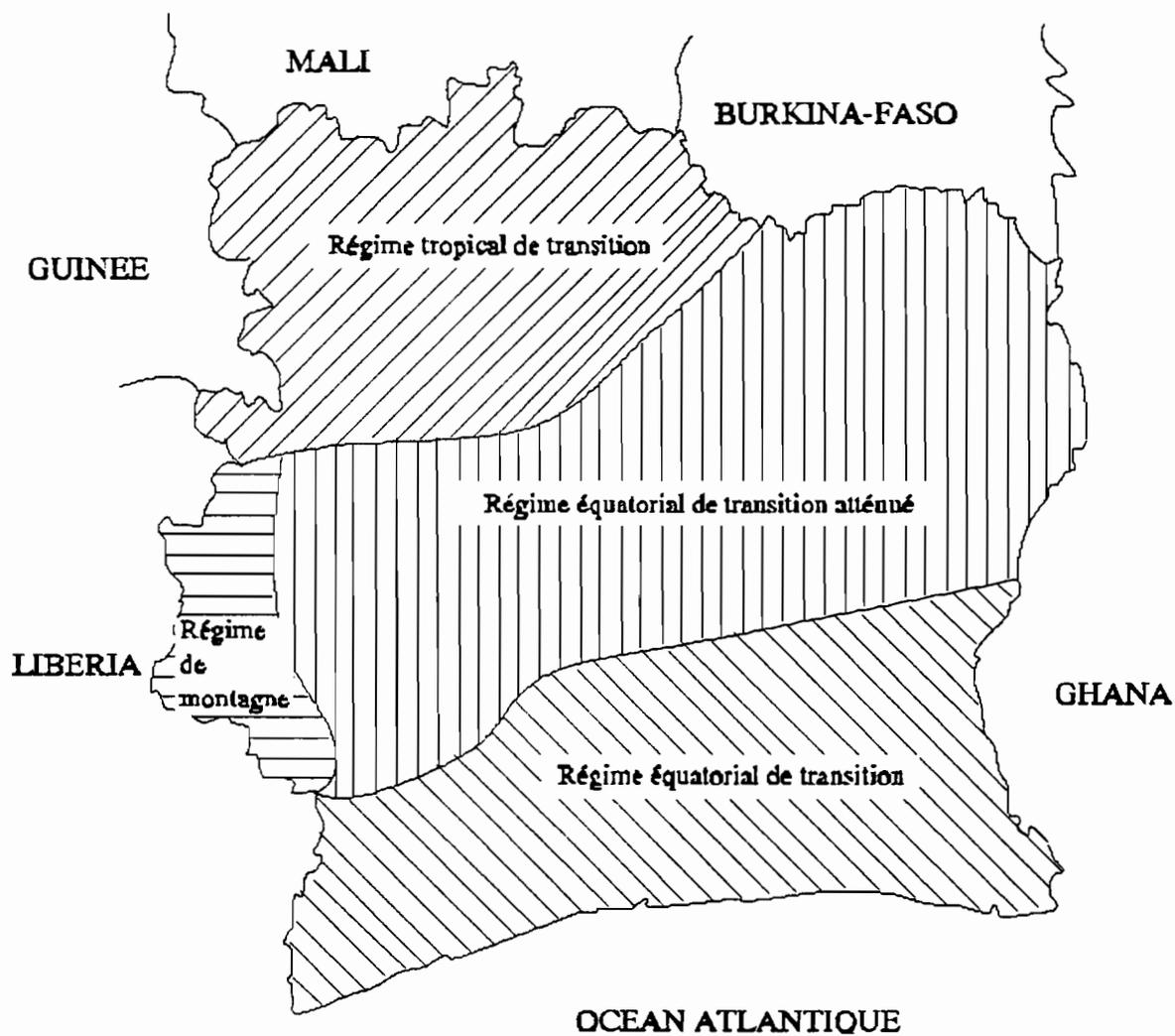


Figure 8 : Régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire (d'après l'Atlas de Côte d'Ivoire, 1979)

Cette région est soumise à un régime comportant deux saisons sèches et deux saisons humides. La première période de hautes eaux se situe de Juin à Juillet et la seconde d'Octobre à Novembre. Les périodes de basses-eaux s'observent quant à elles en Août-Septembre et une autre plus marquée de Décembre à Mars.

- Régime équatorial de transition atténué

Il couvre la partie centrale de la Côte d'Ivoire entre les deux axes précédents dans une région de savane boisée sauf sur ses extrémités Sud-Ouest et Sud-Est où la forêt est dominante.

Cette zone présente un régime intermédiaire entre les précédents et selon les années, on pourra se trouver dans l'un ou l'autre des cas.

- Régime de montagne

Il s'observe sur une petite zone à l'extrême Ouest dans la région de Man. La végétation de cette région est essentiellement forestière.

La saison des moyennes et hautes eaux se situe d'Avril à Octobre. Les crues sont maximales en Septembre et les étiages qui restent soutenus, ont lieu en Janvier-Février.

La plupart des grands cours d'eau de Côte d'Ivoire ont un régime mixte car, du fait de l'étendue de leur bassin versant de réception, ils subissent des influences diverses.

POPULATION ET ECONOMIE

La population de la Côte d'Ivoire au dernier recensement de 1988 fait état de 10.8 Millions d'habitants, ce qui correspond à une densité de 33,5 habitants au km².

Cette population est inégalement répartie sur l'ensemble du territoire, reflétant en cela le déséquilibre économique des régions [fig.9]. Les grands centres urbains tels que Abidjan, Bouaké et Korhogo voient leur population s'accroître régulièrement au détriment de certaines zones rurales.

L'économie de la Côte d'Ivoire est basée essentiellement sur l'agriculture d'exportation et en particulier sur le café et le cacao qui ont procuré au pays, pendant de nombreuses années, des ressources financières qui lui ont permis de réaliser une légère industrialisation. Son PIB est ainsi passé de 143 milliards de francs CFA en 1960 à 1700 milliards de francs CFA en 1978.

A partir de la fin des années 70, la chute des prix des produits d'exportation conjuguée à la charge de la dette a entraîné le pays dans une crise sans précédent.

Depuis 1981, suivant les conseils du FMI, la Côte d'Ivoire s'emploie par différents plans d'ajustements structurels à retrouver ses équilibres macro-économiques.



Figure 9 : Carte administrative de la Côte d'Ivoire, après le recensement de 1988

DONNEES, BASSINS VERSANTS, OCCUPATION DES SOLS.

DONNEES ET BASSINS VERSANTS

ZONE DE FORET.

Les cours d'eau des 15 bassins versants retenus dans le cadre de cette étude [tab.5], présentent généralement une double crue (la première est le plus souvent observée en Juin, et la seconde en Septembre–Octobre), suivant en cela la double saison des pluies qui caractérise le Sud forestier de la Côte d'Ivoire.

Mis à part quelques bassins suivis depuis plusieurs décennies, les données disponibles concernent principalement les années 1980. Durant cette période, la variabilité interannuelle est forte, tant en ce qui concerne la pluviométrie que l'hydrométrie. On notera que l'année 1983 fut une année extrêmement sèche (période de retour estimée à 50 ans) sur l'ensemble du territoire ivoirien, ce qui ne va pas sans poser quelques difficultés en matière de modélisation ainsi qu'on le verra. L'année 1984 qui, par voie de conséquence, a débuté avec un fort déficit hydrique a également un comportement très particulier.

ZONE DE TRANSITION.

Les bassins versants retenus dans le cadre de la zone de transition [tab.6] sont au nombre de 12. Dans ce secteur, le dédoublement de la crue n'est pas toujours observé, la saison des pluies pouvant être unique.

Les données disponibles concernaient également en majorité les années 1980. Pour plus de la moitié des bassins les observations sont inférieures ou égales à 3 ans, ce qui limite considérablement les possibilités d'interprétation des résultats.

ZONE DE SAVANE.

Les cours d'eau des 20 bassins versants retenus dans le cadre de cette étude présentent une crue unique, dont le maximum se situe généralement en Août ou Septembre, conséquence d'une seule saison des pluies qui débute habituellement en Juin pour s'arrêter en Octobre.

L'essentiel des données disponibles couvre la fin des années 1970 et les années 1980 jusqu'en 1985 ou 1986 selon les cas [tab.7].

Pluviométrie et lames écoulées présentent, comme dans les autres zones, une très forte irrégularité interannuelle. La période 1983–1984 est, là aussi, très fortement affectée par la sécheresse.

Nom du Bassin Versant	N°	Superficie (km ²)	Nb. années disponibles	Périodes disponibles	Sur la période disponible (valeur en mm)				% Savane	% Forêt	% Culture	% Habitat
					Minimum précipité	Maximum précipité	Minimum écoulé	Maximum écoulé				
AGNEBY à Agboville	1	4576	5	79-80/82-84	945	1423	12	53	NC	NC	NC	NC
DAVO à Dakpadou	2	6538	17	69-79/81-86	1033	1802	78	215	NC	NC	NC	NC
DODO à Wécoulo	3	646	2	82/85	1374	1784	471	481	NC	NC	NC	NC
GUERI à Diaboua	4	1257	3	84-86	1017	1787	55	179	0.0	28.9	67.9	3.2
GUERI à Gagnoa	5	638	3	82/85-86	1004	1562	37	71	0.0	33.8	64.6	1.6
KAVI à M'Bessé	6	1195	12	5-67/72/76-8 82/84-85	975	1488	23	187	NC	NC	NC	NC
KO à Lokoualé	7	1518	7	80-86	1207	1626	111	398	0.1	11.6	86.1	2.2
KO à Man	8	207	13	70-74/76-78 80-81/84-86	1150	1914	134	830	0.7	16.1	79.7	3.5
MANSAN à Lobo	9	456	3	83-84/86	707	1240	20	50	0.0	1.4	96.6	2.0
NEKA à Nékaounié	10	344	6	79-82/85-86	1807	3247	383	1008	NC	NC	NC	NC
NERO à Rte Grd Béréby	11	953	4	81-83/85	1098	1772	297	530	NC	NC	NC	NC
N'ZO à Kahin	12	4379	6	81-86	1218	1670	200	458	0.6	27.8	69.9	1.7
N'ZO à Zoba	13	1087	3	84-86	1332	1721	192	469	1.3	66.6	31.7	0.4
TABOU à Olodio	14	327	2	85-86	1841	1932	485	713	NC	NC	NC	NC
TABOU à Yaka	15	815	4	79-81/86	1772	2904	524	1400	NC	NC	NC	NC

NC : Non Cartographié

90

Tableau 5 : Caractéristiques des bassins versants du programme ERREAU – Zone de forêt

Nom du Bassin Versant	N°	Superficie (km2)	Nb. années disponibles	Périodes disponibles	Sur la période disponible (valcur en mm)				% Savane	% Forêt	% Culture	% Habitat
					Minimum précipité	Maximum précipité	Minimum écoulé	Maximum écoulé				
BAYA à Bouroukro	16	1394	2	84/85	1047	1711	188	189	NC	NC	NC	NC
BAYA à N'Dakro	17	6408	3	83-85	705	1441	3	50	NC	NC	NC	NC
BAYA à Yébouakro	18	2756	5	81-85	706	1415	4	137	NC	NC	NC	NC
BERE à Bérédrmane	19	1737	2	85-86	867	1601	20	68	NC	NC	NC	NC
DIORE à Karakro	20	4853	2	83/85	598	1248	1	36	NC	NC	NC	NC
FON à Mankono	21	109	2	85-86	976	1501	69	175	NC	NC	NC	NC
KAN à Bodokro	22	893	4	83-86	726	1423	0.5	136	44.6	22.2	32.1	1.1
KAN à Dimbokro	23	6300	7	71/74-75/83-8	338	1695	10	220	52.3	34.0	13.0	0.7
KAN à Zanoafla	24	182	5	81-82/84-86	899	1295	15	61	25.0	19.2	55.4	0.4
LOBO à Nibéhibé	25	6829	16	64-68/70-74 80-83/85-86	742	1765	4	146	3.8	30.2	65.4	0.6
NENGUIERE à Essikro	26	1283	3	83-85	677	1678	0.5	69	NC	NC	NC	NC
SOUNGOUROU à Rte de M'Bahiakro	27	785	3	83/85-86	726	1423	3	149	NC	NC	NC	NC

NC : Non Cartographié

54

Tableau 6 : Caractéristiques des bassins versants du programme ERREAU – Zone de transition

Nom du Bassin Versant	N°	Superficie (km2)	Nb. années disponibles	Périodes disponibles	Sur la période disponible (valeur en mm)				%	%	%	%
					Minimum précipité	Maximum précipité	Minimum écoulé	Maximum écoulé				
BADENOU à Rte M'Bengué	28	1800	3	83-85	680	1288	3	139	66.9	6.4	25.8	0.9
BAGO2 à Guingéréni	29	1042	3	81-83	1104	1454	52	299	70.3	24.3	5.2	0.2
BAGOE à Kouto	30	4700	13	68-71/73-7 81-85	971	1827	45	355	59.8	23.8	15.9	0.5
BANDAMA à Séguékiélé	31	368	5	81-85	896	1541	16	176	68.1	0.8	30.5	0.6
BANIFING à Ziémougoula	32	990	5	78-80/84-8	1104	1457	182	276	70.2	17.2	12.4	0.2
BOU à Boron	33	3710	5	81-85	853	1437	10	134	NC	NC	NC	NC
BOU à Sirasso	34	1030	3	83-85	1015	1506	25	155	NC	NC	NC	NC
DOUNDIAN à Wahiré	35	650	5	80-84	1092	1537	55	253	75.0	13.0	11.7	0.3
DOUNI à Pt 398	36	120	4	83-86	1011	1241	77	247	55.7	0.0	44.0	0.3
KOBANI à Nimbrini	37	342	3	77/83-84	994	1039	47	70	70.9	6.2	22.7	0.2
LAFIGUE à Rte Badikaha	38	443	4	81-84	836	1410	36	195	30.0	1.1	64.5	4.4
LOKPOHO à Namboukaha	39	772	4	83-85/87	553	1245	9	157	NC	NC	NC	NC
MAHANDIABANI à Wahiré	40	835	2	83-84	1092	1117	86	119	80.5	15.4	4.0	0.1
SIEN à Massoudougou	41	1325	6	81-86	1011	1611	40	193	55.9	8.7	35.0	0.4
SIEN à Nafana-Sienso	42	615	8	77-84	1038	1667	57	284	58.0	0.9	40.9	0.2
SOLOMOUGOU à Ziebatago	43	1510	4	83-86	877	1444	14	192	52.8	3.9	42.5	0.8
TIEMBA à Dioulatiédougou	44	2790	3	81/83-84	973	1520	59	298	91.3	3.7	4.4	0.6
TIEMBA à Lille	45	541	3	82-84	1177	1616	135	279	95.8	3.6	0.3	0.3
YANI à Madji	46	1013	4	80-81/83/86	879	1559	22	165	83.6	9.4	6.8	0.2
YORELORO à Katégué	47	338	4	82-84/86	915	1163	14	67	59.4	9.1	31.0	0.5

NC : Non Cartographié

OCCUPATION DES SOLS

Les cartes d'occupation du sol ont été établies à partir de documents fournis par la Direction et Contrôle des Grands Travaux de Côte d'Ivoire (DCGTx) : cartographie des jachères au 1 / 100 000^{ème} et cartes d'occupation des sols au 1 / 100 000^{ème} également. Ces cartes ont été dressées par la DCGTx à partir d'images SPOT ou LANDSAT.

Ces documents ont ensuite été repris à l'Antenne Hydrologique, découpés et assemblés afin de respecter le tracé des bassins versants du programme ERREAU.

Les bassins versants de la zone de savane sont les mieux définis en ce qui concerne l'occupation des sols du fait de la disponibilité, à l'époque, des documents de base auprès de la DCGTx.

En zone de savane, la forêt claire ne couvre qu'une faible partie des terrains (moins de 10% dans la grande majorité des cas).

Le pourcentage de sols cultivés est très variable selon les bassins, mais il est toujours inférieur à 45%, sauf dans un cas, celui du Lafigue à Rte de Badikaha.

L'importance des terrains cultivés sur ce bassin (64.5%) s'explique par la présence de l'agglomération de Korhogo, grande ville du Nord, qui suscite une importante activité dans cette région dont la vocation est demeurée essentiellement agro-pastorale. On note, bien entendu, un antagonisme important entre occupation des sols sous forme de cultures et sous forme de savanes.

Plus l'on descend vers le Sud du pays, plus le pourcentage de zones cultivées des B.V étudiés s'accroît, pour atteindre environ 70% en zone de forêt.

La pression anthropique est en effet plus importante dans ces régions du Sud d'où un défrichage qui peut être important, en vue d'une mise en culture, principalement dans les zones à proximité des cours d'eau.

Les cartes d'occupation du sol du Lafigue à route de Badikaha et de la Bagoé à Kouto sont présentées à titre d'exemple. [fig.10 et 11].

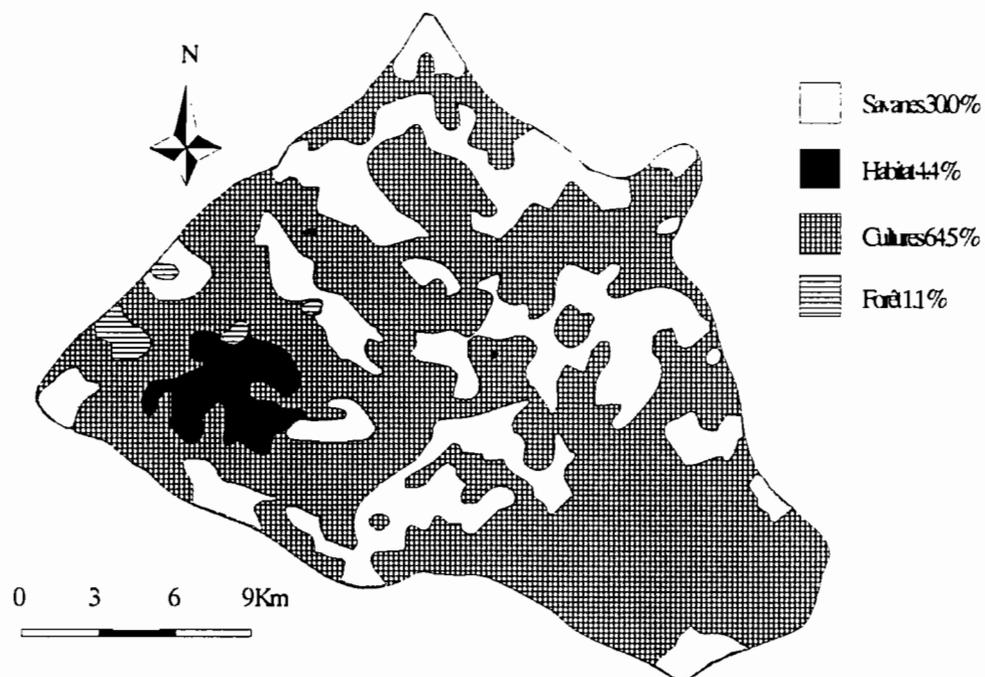


Figure 10 : Le Lafigue à Rte de Badikaha – Occupation du sol

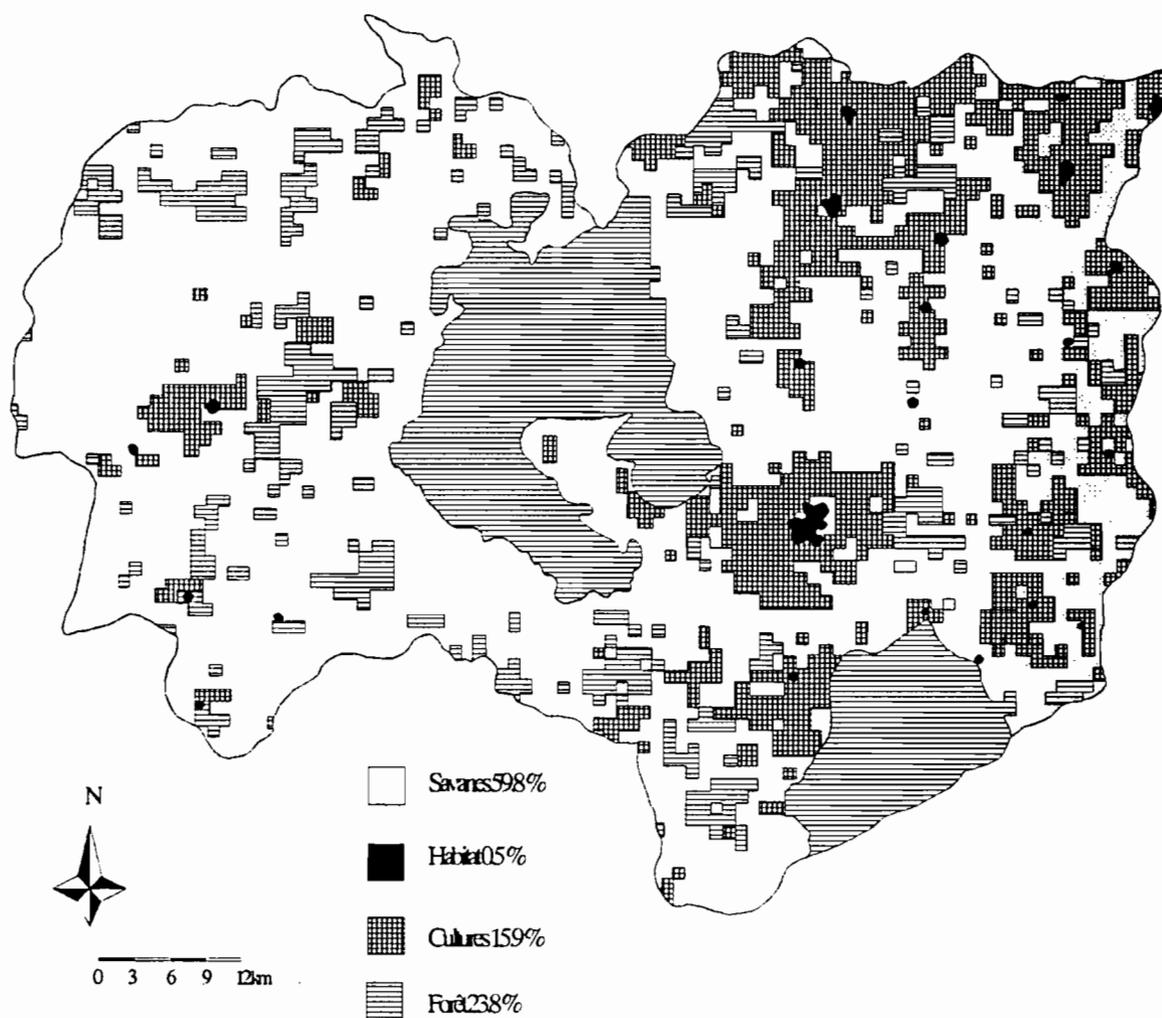


Figure 11 : La Bagoé à Kouto – Occupation du sol

TECHNIQUES DE CALAGE AUTOMATIQUE UTILISEES DANS LE PROGRAMME ERREAU

METHODOLOGIE DE CALAGE.

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

LES METHODES D'OPTIMISATION.

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

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

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

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

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

- Dès que le nombre de variables considérées est un tant soit peu important, il devient extrêmement difficile d'écrire les dérivées du premier ou du deuxième ordre sous une forme analytique. Le recours éventuel à des schémas aux différences finies introduit généralement une erreur numérique qui ne plaide pas en faveur de telles substitutions, notamment au voisinage de l'extremum.
- Les techniques d'optimisation basées sur l'évaluation des dérivées premières et éventuellement secondes nécessitent de la part de l'utilisateur, un travail préparatoire beaucoup plus important que dans le cas des méthodes de recherche directe.

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

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

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

Prenons, par exemple, le cas d'une fonction critère pour un modèle à deux paramètres. On se place dans un espace à deux dimensions, un plan donc. Dans ce plan, on peut tracer les courbes d'isovaleurs de la fonction critère, celle-ci n'étant pas autre chose qu'une fonction de l'écart "Débit observé-Débit calculé" qu'il convient donc de minimiser. On obtient ainsi une surface "topographique" représentant le critère utilisé. Le but des méthodes d'optimisation est de se déplacer sur cette surface topographique pour atteindre le plus rapidement possible le point le plus bas (celui où la valeur de la fonction critère est la plus faible).

Un modèle à trois paramètres conduirait à faire évoluer la méthode dans un espace à trois dimensions. Il est alors facile d'imaginer qu'il puisse exister des creux (des minima locaux) desquels il faut pouvoir sortir pour atteindre le vrai minimum. A fortiori lorsque le nombre de paramètres est encore plus important.

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

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

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

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

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

avec

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

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

t : distance entre deux sommets

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

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

La fonction critère peut être évaluée en chacun des sommets du simplexe. On peut alors faire une projection du point présentant la valeur la plus élevée passant par le barycentre des autres sommets. Ce point est alors supprimé, et un nouveau simplexe, obtenu par "réflexion", peut être constitué à partir des anciens points restants et du nouveau point projeté.

L'utilisation de cette procédure, à savoir l'élimination systématique du sommet présentant la valeur la plus élevée de la fonction critère, et de quelques règles permettant de réduire la taille du simplexe et de l'empêcher de se boucler sur lui même au voisinage de l'extremum, permettent une recherche directe à pas fixe mais à direction variable.

La figure 12 présente les simplexes successifs formés dans un espace à 2 dimensions dans le cas d'une fonction critère simple.

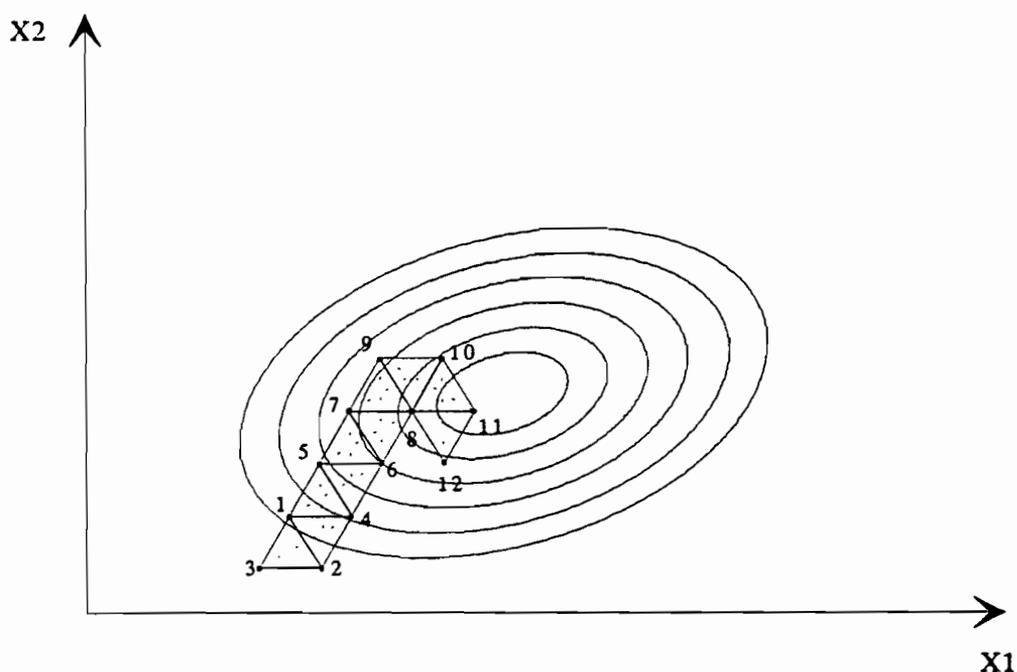


Figure 12 : Séquence de simplex réguliers obtenus en minimisant $f(x)$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Partant d'un point donné, la recherche débute en introduisant une modification d'un pas Dx_1 dans la première direction correspondant à l'axe du premier paramètre. Si la valeur de la fonction critère à ce nouveau point est égale ou inférieure à la valeur au point précédent (qui diffère du nouveau par sa seule coordonnée sur le premier axe), on a affaire à un succès et ce nouveau point remplace le précédent. Le pas Dx_1 est alors multiplié par un facteur a positif et on passe à la direction $n^{\circ}2$. Si la valeur du critère n'est pas inférieure ou égale à celle au point précédent, on a affaire à un échec, le premier point n'est pas remplacé et le pas de recherche Dx_1 est multiplié par un facteur b négatif. On passe ensuite à la direction $n^{\circ}2$ avec son pas Dx_2 . De manière générale, Rosenbrock recommande l'utilisation de $a = 3$ et $b = -0.5$. Cela signifie que lorsque l'on se déplace dans la bonne direction sur un axe (succès), le pas de recherche est multiplié par 3 dans la même direction ($a > 0$) et lorsque l'on se déplace dans la mauvaise direction (échec), le pas de recherche est divisé par deux dans la direction opposée ($b < 0$).

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

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

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

C'est une version modifiée de cette méthode que nous avons utilisée. La modification est la suivante (Servat et Dezetter, 1988) : lorsque le nombre d'échecs successifs enregistrés est

trop important (fixé arbitrairement ici à $5 \times$ (nombre de paramètres)) on se replace alors au début de l'algorithme. Cela a pour conséquence de reprendre un système d'axes qui correspond à celui des paramètres mais cela permet aussi de retrouver les pas de recherche Dx initiaux. Une succession d'échecs entraîne en effet une forte réduction du pas de recherche qui gêne les possibilités de progression de la méthode.

On dispose ainsi de deux méthodes d'optimisation non linéaire procédant par recherche directe. Ces deux méthodes sont bien adaptées au cas particulier de l'optimisation des paramètres des modèles pluie débit, elles ont d'ailleurs été couramment utilisées dans ce domaine. Nous pouvons maintenant aborder l'application pratique de ces méthodes dans le cadre de notre étude.

APPLICATION PRATIQUE

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

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

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

- Utilisation de la méthode Rosenbrock
- Utilisation de la méthode de Nelder et Mead
- Répétition de la séquence a+b

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

En pratique, l'arrêt de l'optimisation se fait soit lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint soit lorsque les variations de la fonction critère deviennent insignifiantes. Pour l'utilisation de sa méthode, Rosenbrock recommande un nombre de 50 itérations par paramètre à optimiser. Nous avons repris ce nombre d'itérations pour notre méthodologie de calage. Par exemple, pour l'optimisation d'un modèle à 5 paramètres on aura successivement : 250 itérations au plus par la méthode de Rosenbrock, 250 itérations au plus par la méthode de Nelder et Mead, et à nouveau la succession Rosenbrock, Nelder et Mead avec 250 itérations au plus chacune. Il va de soi que si le critère ne varie plus, la méthode d'optimisation s'arrête d'elle-même.

En résumé, la méthodologie de calage employée ici comprenait deux étapes :

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

ETUDE ET SELECTION DES CRITERES NUMERIQUES DE CALAGE.

Utilisateur de techniques d'optimisation des paramètres de modèles, ERREAU a permis de développer une étude sur les critères numériques dans le but d'en sélectionner un dont les performances cadreraient avec les objectifs du programme. Cette sélection s'est effectuée dans le cadre de la seule zone de savane.

LES CRITERES UTILISES.

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

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

Pour un modèle donné à n paramètres, on conçoit facilement que la représentation de chaque fonction critère dans l'hyperespace à n dimensions (car n paramètres) conduise à autant d'hypersurfaces différentes. L'optimisation des paramètres se traduit par un déplacement sur l'hypersurface, déplacement qui conduit, idéalement, au minimum de la fonction critère. En pratique, ces hypersurfaces ont généralement des aspects très irréguliers et le processus d'optimisation conduit, avec une convergence variable, à des minima qui sont la plupart du temps différents d'un cas sur l'autre. Pour une application donnée, chaque fonction critère a donc un cheminement spécifique conduisant à des solutions différentes.

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

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

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

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

Les cinq fonctions critères testées sont les suivantes :

- critère CREC.
- critère CREC*Bi*.
- critère de Fortin.
- critère de Nash.
- critère SExpER (Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs).

Le critère CREC.

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

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

où

N : nombre d'observations

Qc : débit calculé

Qo : débit observé.

Qmo : débit moyen observé

Cette expression tend vers 0 lorsque Qc tend vers Qo.

Le critère CRECBI.

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

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

Cette expression tend vers 0 lorsque Qc tend vers Qo.

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

Le critère de Fortin.

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

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

Cette expression tend vers 0 lorsque Qc tend vers Qo.

Le critère de Nash.

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

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

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o .

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

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

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

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

Le critère SExpER.

SExpER : Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs.

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

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

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

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

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

LE MODULE D'EVALUATION COMPARATIVE.

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

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

- **Coefficient de corrélation lames observées-lames calculées.**

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

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

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

- **Deux coefficients d'appréciation du Bilan volumique.**

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

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

où

L_o : lame écoulee observée (mm).

L_c : lame écoulee calculée (mm).

N : Nombre de lames observées.

Bilan1 et Bilan2 tendent vers 0 lorsque L_c tend vers L_o .

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

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

Ces deux critères sont donc complémentaires.

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

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

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

Le tableau 8 donne pour les 91 stations-années retenues les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum de la lame écoulee annuelle, de la lame écoulee entre les décades 19 et 30 et du pourcentage correspondant écoulee entre ces décades.

Tableau 8 : Définition de la lame de crue.

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

Le tableau 8 montre que le volume qui s'écoule entre les décades 19 et 30 incluses représente en moyenne 91% du volume annuel.

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

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

L'IRVC est la somme de ces écart pondérés.

Pour une série de n années, on aura :

$$IRVC = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Crue\ année_i^{Obs}}{\sum_{i=1}^N Crue\ année_i^{Obs}} * 100 * \left| \frac{Crue\ année_i^{Calc}}{Crue\ année_i^{Obs}} - 1 \right| \right)$$

C'est-à-dire

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

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

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

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

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

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

METHODOLOGIE ET RESULTATS

METHODOLOGIE.

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

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

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

La démarche a donc été la suivante :

- Calage des trois modèles à l'aide des cinq critères de calage pour les cinq séries retenues (soit 75 calages au total).
- Calcul pour chacun des 75 hydrogrammes calés des valeurs des critères numériques du module d'évaluation comparative.

- Pour une série et un modèle donné :
 - Pour chaque terme du module d'évaluation (IRVC, Bilan, ...), on établit un classement des performances des critères auxquels on attribue un rang (rang 1 pour le meilleur, rang 5 pour le plus mauvais).
 - Pour chaque critère, on somme les différents rangs obtenus, et l'on obtient ainsi une "note" comprise entre 5 et 25 (5 dans le meilleur des cas, 25 dans le pire).

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

RESULTATS

On procède conformément à la méthodologie présentée précédemment.

On trouvera ici, à titre d'exemple, le double tableau 9 présentant les valeurs des termes du module d'évaluation ainsi que les rangs de chaque critère relatifs à chaque terme du module d'évaluation, pour la Bagoé à Kouto 1981-1985-Modèle CREC.

Tableau 9 : La Bagoé à Kouto 1981–1985. Modèle CREC.

Critères de calage					
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	0.939	0.946	0.942	0.945	0.674
DAC2	0.03229	0.02598	0.02141	0.00630	0.19372
Bilan1	44.7	84.2	1.1	86.1	635.4
Bilan2	232.7	267	248.3	309.7	635.4
IRVC	22.1	25.7	27.8	15.7	87.2
Critères de calage (rangs)					
	CREC	Fortin	CREC <i>Bi</i>	Nash	SExpER
Corr	4	1	3	2	5
DAC2	4	3	2	1	5
Bilan1	2	3	1	4	5
Bilan2	1	3	2	4	5
IRVC	2	3	4	1	5
Somme	13	13	12	12	25

On obtient ainsi, pour les cinq périodes étudiées et les trois modèles retenus, 15 doubles tableaux de ce type. A ces 15 tableaux correspondent 15 notes attribuées à chaque critère de calage. Le tableau 10 présente les fréquences absolues des classements des critères.

Tableau 10 : Fréquences absolues des classements des critères.

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

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

Le critère de Nash s'impose nettement au vu du tableau 10. Il est, en effet, classé 12 fois sur 15 premier et il est au pire classé troisième. Derrière lui, les critères Crec*Bi* et Fortin, respectivement 12 et 10 fois dans les trois premiers semblent avoir les meilleurs comportements.

SERVAT et DEZETTER (1990) et DEZETTER (1991) présentent les résultats complets de cette étude dont on peut tirer les conclusions suivantes :

Les critères que nous avons utilisés peuvent être classés en trois catégories :

- la première regroupe les critères Crec, Fortin et SExpER. Ils sont bâtis autour de l'écart relatif entre lame observée et lame calculée, et pondérés par des coefficients qui diffèrent ;
- la seconde concerne le critère Crec*Bi*. Celui-ci n'est autre que le critère Crec auquel nous avons ajouté un terme de bilan ;
- la troisième est représentée par le critère de Nash dont la formulation est liée à une approche statistique classique.

On peut alors noter plusieurs points :

- Les critères Crec, Fortin et SExpER ont un comportement très voisin que nous qualifierons de "réducteur" dans la mesure où l'hydrogramme calculé a souvent des valeurs inférieures à celles de l'hydrogramme observé.
- Dans Crec*Bi*, la prise en compte d'un terme de bilan s'est montrée relativement inadaptée puisqu'elle conduit souvent à des compensations numériques par rapport à l'hydrogramme observé.
- Le critère de Nash présente un bon comportement d'ensemble bien qu'il montre quelques faiblesses en étiage.

Une étude systématique à l'aide d'un module d'évaluation des performances des critères a confirmé ces premières conclusions.

Le tableau 10 montre clairement que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage. Ce qui est confirmé lorsque l'on considère chaque élément du module pris séparément :

- Coefficient de corrélation : le critère de Nash est très supérieur aux autres. Son utilisation n'introduit que peu de décalages entre hydrogrammes observés et calculés.
- Coefficient d'autocorrélation : les critères CrecBi, Nash et SExpER sont les plus performants, avec, néanmoins, un avantage au critère de Nash qui présente les écarts les plus faibles avec le coefficient observé. Il respecte donc bien la dynamique des hydrogrammes.
- Bilan1 : si le critère CrecBi apparaît comme largement supérieur aux autres, le critère de Nash est plus régulier, ce qui traduit son intervalle de variation plus réduit.
- Bilan2 : on confirme, ici, ce que l'on observe avec le Bilan1. Le critère de Nash a le meilleur comportement. Il présente moins de compensations numériques par rapport à l'hydrogramme observé que ne le fait CrecBi.
- IRVC : la prise en compte de cet indice est importante au regard de l'objectif affiché en matière de détermination d'apports. On note là, une très nette supériorité du critère de Nash pour lequel on a toujours $IRVC < 50$, ce qui est loin d'être le cas avec les autres critères. Il permet donc une meilleure prise en compte de la lame de crue.

Au regard des objectifs visés (reconstitution la plus précise possible des volumes de crue en saison des pluies, restitution de la dynamique des hydrogrammes, absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés) et de la nature des données disponibles, quelque soit l'algorithme utilisé, c'est son association avec le critère de Nash qui permet d'accéder au meilleur niveau de résultats.

MODELISATION AU PAS DE TEMPS ANNUEL

Cette approche modélisatrice n'a été développée que dans le cadre "forêt et transition" du programme ERREAU.

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, deux types de relations pluie-débit ont été testées. Le premier type est une relation de la lame annuelle écoulée en fonction de la seule connaissance de la pluie annuelle alors que le second type prend en compte, en plus de la pluie annuelle, d'autres variables telles que les pluies cumulées sur une certaine période, les pluies annuelles et cumulées de l'année antérieure, etc.

Pour le premier type de relation, lame annuelle = f(Pluie annuelle), les cinq formulations testées 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).

avec :

L : lame annuelle écoulée (en mm),
 P : pluie annuelle précipitée (en mm),
 A, B et C : paramètres à déterminer.

L'appréciation de la qualité des essais a été faite à l'aide d'un critère qui est l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) qui minimise l'écart entre lame observée et lame calculée. Son expression est la suivante:

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{lame observée}_i - \text{lame calculée}_i)^2}{N}}$$

EQM tend vers 0 quand lame calculée tend vers lame observée.

Les équations obtenues après optimisation des paramètres A, B et C ont été reportées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Valeurs des paramètres et du critère sur l'échantillon complet

Forêt (90 éléments)		Transition (54 éléments)	
Modèle	Critère	Modèle	Critère
MEDINGER: $L = 0.5846*(P - 968.8)$	164.2	MEDINGER: $L = 0.1177*(P - 692)$	33.7
COUTAGNE: $L = 0.0289*(P - 700)^{1.382}$	164.9	COUTAGNE: $L = 0.00077*(P - 300.5)^{1.651}$	34.4
DERI: $L = 0.00089*(P)^{1.751}$	179.1	DERI: $L = 0.000049*(P)^{1.974}$	35.2
$L = (P - 1005.3)^{0.929}$	165.4	$L = (P - 656.3)^{0.658}$	36.3
$L = \text{Exp}(4.2732 + 0.00095*P)$	191.0	$L = \text{Exp}(1.5821 + 0.00197*P)$	35.3

Dans l'ensemble la valeur du critère, écart quadratique moyen, est élevée [tab.11]. C'est la formule de type MEDINGER qui paraît légèrement plus satisfaisante que les autres au sens du critère retenu.

Sur les graphiques des lames annuelles observées et calculées en fonction des pluies annuelles correspondantes on observe un certain nombre de points relativement éloignés de la courbe d'estimation. Ces points correspondent généralement à des années exceptionnelles (années excédentaires ou déficitaires).

Malgré l'élimination de ces observations à caractère exceptionnel la qualité des calages reste insuffisante [tab.12].

Tableau 12 : Valeurs des paramètres et du critère sur l'échantillon réduit

Forêt (76 éléments)		Transition (44 éléments)	
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

Notons qu'en zone de transition 80% des stations-années exceptionnelles correspondent à l'année 1983. En effet 1983 a été caractérisée par une sécheresse extrêmement sévère observée sur toute l'étendue de la Côte d'Ivoire. La période de retour de cet événement peut être estimée comme étant de l'ordre de 50 ans.

Bien que les résultats ne soient pas suffisamment satisfaisants, les modèles de type COUTAGNE ou MEDINGER permettent déjà une première approximation de la lame annuelle écoulée à partir de la seule connaissance de la pluie annuelle précipitée.

Le second type d'estimation de la lame annuelle écoulée a été effectué à partir des données relatives à la pluviométrie, et en utilisant des techniques de régression multiple. Les résultats sont acceptables en zone de forêt, surtout dans le cas de l'échantillon réduit et lorsque l'on considère les pluies de l'année antérieure [tab.13].

Tableau 13 : Coefficients de détermination R^2 des régressions multiples calculées en zone de forêt

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	P, P1, P2, 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

avec:

- 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.

La relation suivante permet d'expliquer 81.6% de la variabilité de la lame annuelle écoulée :

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

En zone de transition par contre, les équations de régression obtenues ne sont que de qualité moyenne [tab.14].

Tableau 14 : Coefficients de détermination R^2 régressions multiples calculées en zone de transition

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, Pm	P	0.465	P, P' Pm, P'm	P,	0.550
P1, P2, Pm	P1, Pm	0.382	P, P1, P2, P', Pm, P'm, P'1, P'2	P, P'm, P2	0.593
P, ((Pm) ²)/P	P	0.467	P1, P2, Pm, P'm, P'1, P'2	P1, Pm, P'm	0.403
P, ((P1) ²)/P	P	0.467	P1, P2, P'1, P'2, Pm	P1, Pm	0.367
P, P1	P	0.469	P, P1, P2, P'1, P'2	P	0.562
P1, P2	P1, P2	0.328	P, Pm, 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

On note, en effet que les coefficients de détermination R^2 obtenus sont relativement faibles tant sur l'échantillon complet que sur l'échantillon réduit.

La comparaison des deux approches de calcul de la lame annuelle écoulée [tab.15 et 16] révèle que sur l'échantillon complet l'équation issue de la régression multiple apparaît comme permettant d'atteindre une meilleure correspondance lame calculée – lame observée. En cas de non disponibilité des données de l'année antérieure, l'expression de type COUTAGNE calée sur un échantillon sans valeurs "exceptionnelles" est conseillée.

Tableau 15 : Valeurs comparatives de l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) en zone de forêt

	Echantillon complet	Echantillon sans les valeurs "exceptionnelles"
COUTAGNE	164.9	91.6
MEDINGER	164.2	95.7
Régression multiple (60 valeurs)	111.4	–

Tableau 16 : Valeurs comparatives de l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) en zone de transition

	Echantillon complet	Echantillon sans les valeurs "exceptionnelles"
COUTAGNE	34.4	24.8
MEDINGER	33.7	25.7
Régression multiple (34 valeurs)	26.7	–

Cette étude au pas de temps annuel permet d'estimer de manière globale la lame écoulée.

Ce travail sera très rapidement complété par une approche identique en zone de savane. Cependant, on peut d'ores et déjà affirmer que les résultats seront du même ordre, et qu'en cas de nécessité l'utilisation d'une même méthodologie sur un bassin versant doit conduire à une première approximation satisfaisante de la lame annuelle écoulée.

MODELISATION AU PAS DE TEMPS MENSUEL

Le test d'un modèle au pas de temps mensuel a paru intéressant dans la mesure où un tel algorithme pluie-débit permet de limiter certains inconvénients liés en particulier aux données collectées au pas de temps journalier. En outre le pas de temps mensuel est très intéressant dans l'optique de la faisabilité de projets de développement.

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) et restructuré pour accroître sa robustesse afin de pouvoir généraliser son utilisation.

PRESENTATION DU MODELE INITIAL

Dans l'algorithme au pas de temps mensuel de SNYDER, la lame d'eau écoulee 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 écoulee n'expriment pas nécessairement des quantités réellement 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 avons étudié et restructuré est un modèle au pas de temps mensuel, comportant neuf paramètres. La lame écoulee V_q est la résultante de deux composantes, un écoulement immédiat V_{qa} et un écoulement retardé V_{qd} :

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

Calcul de l'écoulement immédiat Vqa:

Vqa peut être exprimé comme une portion du volume précipité Vp au cours du mois i considéré, Vpi. Pour qu'un écoulement immédiat se produise, il faut que le volume précipité soit supérieur à un certain seuil Sv.

$$Vqa = AA(Vpi - Svi)$$

avec :

- i : indice du mois considéré,
- Vpi : volume précipité (en mm) durant le mois i,
- AA : paramètre ($0 \leq AA \leq 1$)
- Svi : valeur du seuil pour le mois i,

$$Svi = \text{Seuil} * [1 + \sin(xi)]; 0 \leq \text{Seuil} \leq 150$$

Calcul de l'écoulement retardé Vqd:

L'écoulement retardé Vqd 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.

$$Vqd = \sum_{i=1}^5 BBi(Vpi - Gi)$$

avec :

- i = 1 : mois considéré
- i = 2, 3, 4 et 5 mois précédent de rang 1, 2, 3 et 4.
- BBi = paramètres (BBa, BBb, BBc, BBd, BBe) exprimant la proportion d'eau provenant du mois considéré et des quatre mois antérieurs ($0 \leq BBi \leq 1$).
- Gi : paramètre de type seuil,
- Gi = CC + DD*Svi

Notons que les paramètres "Seuil" du modèle qui font intervenir une fonction de type sinusoïde, permettent de prendre en compte la variation de la capacité d'absorption du sol.

Le modèle initial que nous avons appelé modèle di comporte donc 9 paramètres: Seuil, AA, BBa, BBb, BBc, BBd, BBe, CC et DD.

L'optimisation automatique des différents paramètres a fait appel à une technique de convergence vers une solution optimale. Le critère numérique de référence utilisé est le critère de Nash modifié (Servat et Dezetter, 1991).

$$\text{Nash} = \frac{\sum_{i=1}^N (L_o - L_c)^2}{\sum_{i=1}^N (L_o - \overline{L_o})^2}$$

avec :

- L_c = lame calculée en mm
- L_o = lame observée en mm
- $\overline{L_o}$ = lame observée moyenne en mm.

Ce critère est assimilable à un pourcentage de variance résiduelle et donc non expliquée par le modèle étudié.

L'algorithme a été calé station-année par station-année sur l'ensemble des données disponibles en zone 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, une fois calé.

Le modèle à 9 paramètres a été calé sur 60 stations-années en zone de forêt et 34 stations-années en zone de transition.

Les résultats enregistrés lors de ces différents calages sont satisfaisants à en juger par la bonne qualité des valeurs du critère de Nash. En effet les valeurs moyennes du critère sont :

- Forêt : Nash moyen = 0.084
- Transition : Nash moyen = 0.120

Les figures 13 et 14 sont deux exemples de tracés des hydrogrammes observés et calculés. Sur ces figures on remarque la bonne reconstitution des étiages et des crues.

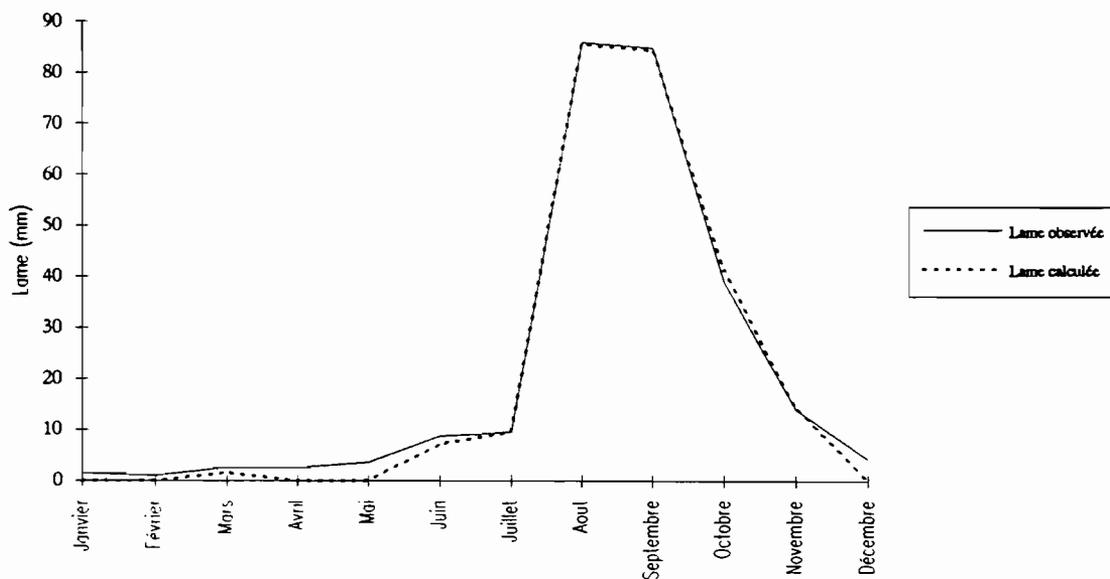


Figure 13 : Ko à Logoualé en 1982 (Calage di)

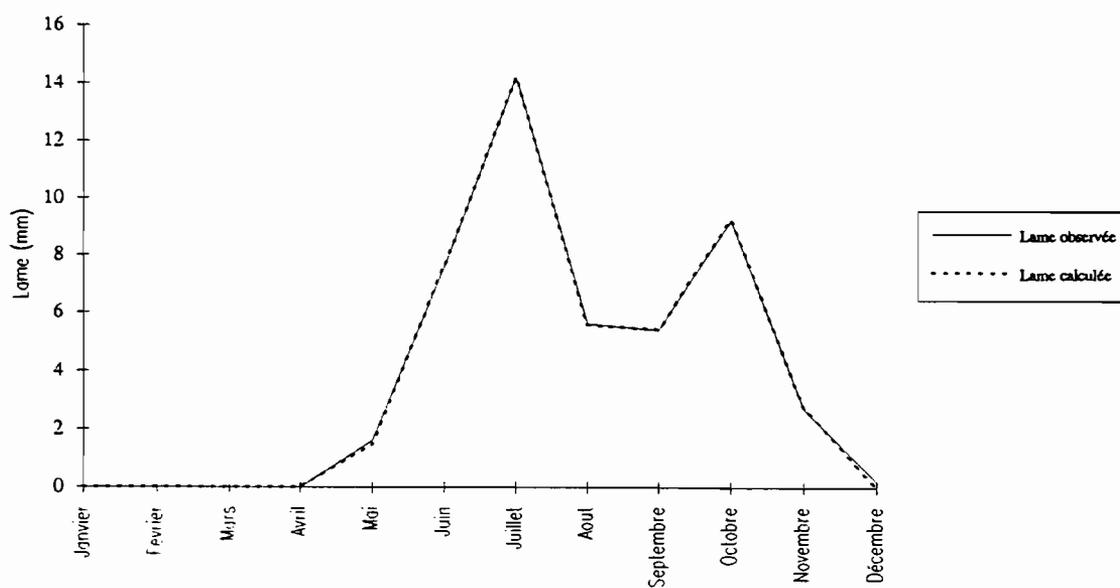


Figure 14 : Kan à Dimbokro en 1975 (Calage di)

Le tableau 17 montre que les calages obtenus sur des séries de plusieurs années donnent des critères acceptables : 0.038 à 0.480. Par contre les validations sont de moins bonne qualité (0.14 à 1.21).

Tableau 17 : Critères de Nash des calages et validations du modèle di

Années calage	Années 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 1985-1986	0.1090	0.2775 0.1991
Ko à Man (207 km ²) 1985-1986	1971-1973 1981	0.0765	0.3001 0.9400
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984-1986	1981-1983 1981-1982	0.1124	
Néka à Nékaounié (344 km ²) 1980-1982	1986	0.3133	1.019
Néka à Nékouanié (344 km ²) 1980-1981	1982 1986	0.3429	0.4070 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
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971-1973	1968 1965-1967	0.0853	0.2429 0.3154

La première colonne indique le bassin versant et les années sur lesquels ont été effectués les calages, la seconde les années sur lesquelles porte la validation, puis en troisième et quatrième colonnes les valeurs correspondantes.

Les résultats des calages année par année et sur des séries de plusieurs années ont montré que le modèle initial est assez performant. Le nombre important de paramètres (9) d'une part, et le pas de temps mensuel du modèle 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, difficilement transposables, qui peuvent expliquer en partie les mauvais résultats rencontrés en validation. Il nous a donc paru nécessaire de restructurer le modèle par le biais d'une diminution des paramètres.

La détermination rigoureuse des paramètres qui pourront être assimilés ensuite à des constantes a nécessité la réalisation de différentes études (étude de sensibilité, étude statistique, étude de corrélation, ...).

ETUDE DE SENSIBILITE

Chacun des neuf paramètres du modèle a été étudié séparément. On a considéré pour cela quatre stations-années et les jeux de paramètres calés correspondants.

Une première valeur, différente de la valeur obtenue par calage, est attribuée au paramètre considéré, puis on procède au calage du modèle par optimisation des huit autres. Si le paramètre est sensible, il supporte une part importante du calage, et si 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).

A l'issue de cette étude de sensibilité on a pu déterminer le niveau d'implication de chacun des paramètres :

- paramètres peu sensibles : Seuil et CC (faible variation de Nash quelque soit la valeur attribuée),
- paramètres moyennement sensibles : AA et DD,
- paramètres très sensibles : BBi (forte augmentation du critère d'une valeur attribuée à une autre).

ETUDE STATISTIQUE ET DE CORRELATION

Elle indique une faible dispersion des valeurs des paramètres Seuil et CC. Par contre la dispersion est forte sur AA.

L'étude de corrélation montre qu'il n'y a pas de relation linéaire significative entre les paramètres.

Ces différentes études montrent donc que dans un souci de restructuration du modèle initial, on peut, dans un premier temps, tenter de fixer les paramètres Seuil, CC, DD et AA qui sont peu sensibles à moyennement sensibles.

RESTRUCTURATION DU MODELE INITIAL

ETUDE DES PARAMETRES SEUIL, CC, DD ET AA

Le premier paramètre que nous avons fixé à une valeur constante égale à la moyenne observée sur la totalité des calages année par année est le paramètre Seuil (modèle si). Sur 20 stations-années choisies parmi les 94 que comptent les deux zones, le processus d'optimisation des huit autres paramètres a été relancé. Le second paramètre fixé à une valeur constante égale à sa moyenne est CC (modèle ci). Le tableau 18 présente les valeurs du critère de Nash des modèles à 9, 8 et 7 paramètres. On voit que le fait de fixer les paramètres Seuil et CC n'a guère modifié les valeurs du critère de Nash, les calages restant toujours bons.

Tableau 18 : Critères de Nash des calages di, si, et ci

	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

La première colonne contient les codes des bassins versants et des années retenues.

Le nombre de paramètres a donc pu être réduit de neuf à sept.

Le troisième paramètre testé est DD. Le fait de le fixer à une valeur constante a engendré une dégradation importante de la qualité des calages [tab.19]. La fixation de ce paramètre (modèle zi) n'est donc pas intéressante.

Tableau 19 : Critères de Nash des calages di, si, ci, et zi

	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

Quant au paramètre AA, bien qu'il présente une forte dispersion et paraisse assez sensible, nous avons tenté de le fixer (modèle ai). Dans ces conditions 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 20 des critères de Nash. On notera que la distribution des valeurs de AA étant dissymétrique positive (coefficient de dissymétrie de 2,2) il nous a semblé préférable de le fixer à sa valeur médiane, la moyenne donnant trop de poids aux valeurs élevées. Différents essais nous ont confortés dans ce choix.

Tableau 20 : Critères de Nash des calages di, si, ci, et ai

	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

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 avons alors testé les capacités d'adaptation et la robustesse de l'algorithme en procédant à des calages sur des séries chronologiques de plusieurs années. Les résultats de ces calages ont été comparés à ceux déjà réalisés avec le modèle initial di [tab.21].

Sur ce tableau, 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 on observe même deux cas de gain. Par contre, la qualité des validations est à l'avantage du modèle modifié.

Tableau 21 : Critères de Nash des calages et validations des modèles di et ai en zone de forêt

Années calage	Années 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		0.3001		0.2846
	1981	0.0765	0.9400	0.1047	0.7442
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984-1986	1981-1983		0.5640		0.4524
	1981-1982	0.1124	0.6136	0.1581	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
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965-1967	1968		0.4966		0.5984
	1971-1973	0.1647	0.8375	0.1622	0.8930
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971-1973	1968		0.2429		0.2707
	1965-1967	0.0853	0.3154	0.0891	0.3297

Cette première restructuration a conduit à un modèle à 6 paramètres (DD, BBa, BBb, BBc, BBd et BBe) dont les performances sont tout à fait acceptables.

ETUDE DES PARAMETRES BBI

Les paramètres BBi se sont révélés extrêmement sensibles. Il paraissait donc difficilement envisageable de réduire leur nombre en leur attribuant des valeurs constantes.

Nous avons donc cherché à leur imposer une loi de variation. Celle-ci a été choisie décroissante dans la mesure où les paramètres BBi marquent les contributions respectives des différents mois pris en compte dans le calcul de l'écoulement retardé. Il est raisonnable de penser, à ce sujet, que l'apport du mois i est supérieur à celui du mois $i-1$, mois précédent.

Quatre types de relations de décroissance ont été testés sur les paramètres BBi. Pour chaque type, plusieurs modèles ont été mis en oeuvre selon que les derniers mois d'antériorité étaient ou non pris en compte. Les quatre lois de décroissance sont :

- contrainte de décroissance simple: $BB_e \leq BB_d \leq BB_c \leq BB_b \leq BB_a$, modèle à six paramètres: $BB_a, BB_b, BB_c, BB_d, BB_e$ et DD .
- décroissance linéaire: $BB_i = BB_a(1 - \frac{X_i}{4})$, $x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$, modèle à deux paramètres: BB_a et DD .
- décroissance exponentielle: $BB_i = BB_a * \text{Exp}(-\alpha X_i)$, $x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$, modèle à trois paramètres: BB_a, DD et α .
- décroissance non linéaire: $BB_i = \alpha^{1/6} - \alpha^{1/(1+x_i)}$, $0 \leq \alpha \leq 1$, $x_{(i=1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4)$, modèle à deux paramètres: DD et α .

Le modèle de décroissance simple a permis d'obtenir des calages qui sont le plus souvent de bonne qualité. Cependant, ce modèle présente l'inconvénient de se trouver à l'issue du calage avec plusieurs des paramètres BBi ayant la même valeur (par exemple $BB_a = BB_b = BB_c$). Cette situation reviendrait donc à supposer que les prélèvements successifs effectués sur les volumes précipités seraient identiques plusieurs mois d'affilée, ce qui est difficilement concevable. Il paraît donc plus logique d'imposer aux paramètres BBi un modèle de décroissance stricte. C'est le cas des trois autres formulations testées.

Le tableau 22 regroupe les résultats obtenus avec les lois de décroissance stricte des BBi.

Tableau 22 : Critères de Nash relatifs aux calages ai et aux calages obtenus avec les lois de décroissance des paramètres BBi : linéaire, exponentielle, non linéaire.

	Calage ai	Calage linéaire	Calage exponentiel	Calage non linéaire
Kolo81	0.0122	0.215	0.0742	0.0695
Kolo82	0.0163	0.0956	0.0708	0.0892
Kolo84	0.0267	0.0474	0.0305	0.035
Kolo85	0.0042	0.0384	0.0379	0.07
Kolo86	0.0128	0.0384	0.0345	0.0959
Davo72	0.0194	0.1847	0.1727	0.5512
Davo74	0.2277	0.5655	0.2689	0.8608
Davo75	0.0677	0.1848	0.1727	0.2156
Davo76	0.0392	0.1504	0.2816	0.0618
Davo77	0.0593	0.1596	0.1682	0.3128
Davo85	0.0439	0.1102	0.1067	0.1987
Davo86	0.0679	0.2445	0.1577	0.6237
Byeb84	0.0152	0.0318	0.0397	0.1756
Byeb85	0.0596	0.071	0.0653	0.088
Kand75	0.0655	0.0762	0.1733	0.1987
Kand84	0.0213	0.0666	0.0558	0.2039
Kand85	0.0241	0.0906	0.1	0.2122
Lobo71	0.0151	0.1389	0.1213	0.1566
Lobo73	0.0041	0.0811	0.0815	0.1564
Lobo74	0.0022	0.2974	0.2947	0.4847

Le tableau 22 montre que les relations linéaire et exponentielle conduisent à des résultats de qualité comparable mais meilleurs que ceux du modèle non linéaire.

Il a paru intéressant d'étudier le comportement de ces deux formulations dans le cas de calages et validations sur des séries chronologiques de plusieurs années [tab.23].

Tableau 23 : Critères de Nash des calages et validations du modèle utilisant les formulations linéaire et exponentielle. Cas des séries de plusieurs années.

Années calage	Années validation	Calage linéaire	Validation linéaire	Calage exponentiel	Validation exponentielle
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
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

Comme les calages station-année par station-année, les essais comparatifs sur plusieurs années donnent sensiblement les mêmes résultats. La simplicité de l'expression et la qualité des résultats nous ont cependant entraînés à choisir la loi de décroissance linéaire des BBi avec BBe = 0, (ce qui signifie que le quatrième mois d'antériorité n'est pas pris en compte).

A la suite de cette seconde restructuration, on arrive à un modèle à deux paramètres à optimiser : BBa et DD. Lors des calages, le paramètre DD est fréquemment venu buter sur la borne supérieure de son intervalle de variation qui avait été fixée égale à 1.

Pour remédier à cela nous avons refait les calages en autorisant le calage de DD dans l'intervalle borné: $0 \leq DD \leq 3$.

Le modèle final ne comportant que deux paramètres (BBa et DD) nous nous sommes octroyés la possibilité d'optimiser un troisième paramètre, en l'occurrence le paramètre AA qui est un taux d'écoulement direct, sans risque de surparamétrisation. L'optimisation du paramètre AA se justifie dans la mesure où il présente une forte dispersion, comme nous l'avons déjà mentionné.

Le modèle définitif à trois paramètres (AA, BBa et DD), appelé modèle AB2 a été calé, année par année, sur les 94 stations-années disponibles. La qualité de ces calages est satisfaisante puisque l'on note que :

- En forêt 43% et 72% des valeurs du critère de Nash sont respectivement inférieures à 0.1 et 0.2.
- En transition 50% et 71% des valeurs du critère de Nash sont respectivement inférieures à 0.1 et 0.2.

Les valeurs moyennes du critère de Nash valent 0.199 et 0.214 respectivement en forêt et en transition.

Sur des séries de plusieurs années, nous remarquons que les calages avec le modèle initial à neuf paramètres [tab. 24] donnent de meilleurs résultats que le modèle définitif à trois paramètres. Par contre en validation les valeurs du critère de Nash du modèle définitif sont nettement inférieures à celles du modèle initial.

Tableau 24 : Critère de Nash des calages et validations des modèles initial (9 paramètres) et définitif (3 paramètres).

Années calage	Années validation	Calage mod. initial	Validation mod. initial	Calage mod. final	Validation mod. final
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
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

Le modèle définitif répond donc positivement à notre préoccupation majeure de robustesse, gage d'une utilisation efficace et généralisée d'un tel outil.

Sur les figures 15 et 16 on trouvera quelques représentations graphiques de calage et validation des modèles initial et final.

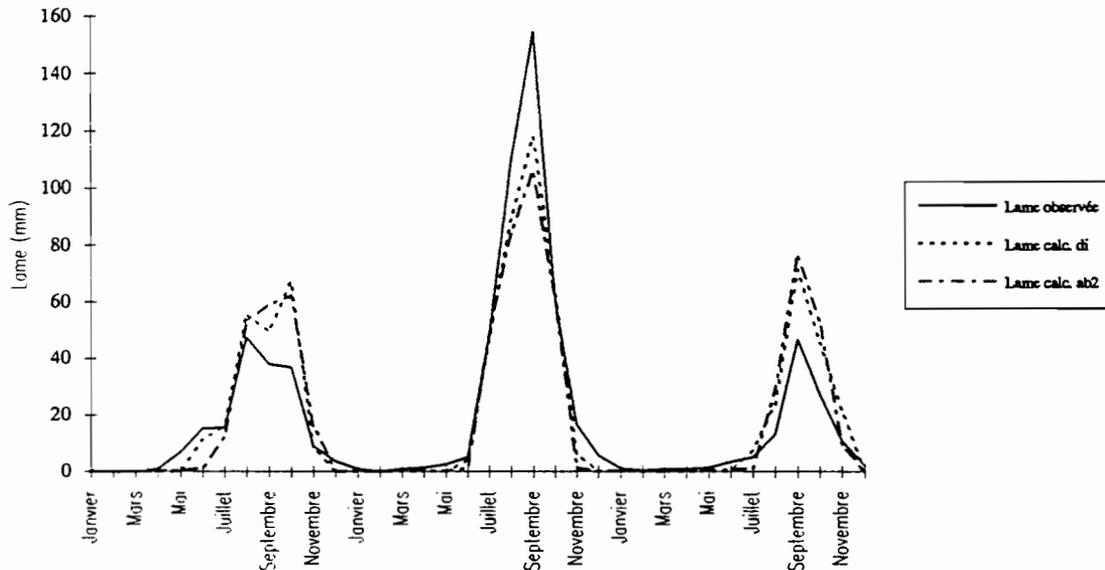


Figure 15 : Ko à Logoulé de 1984 à 1986 (Calages modèle initial et final)

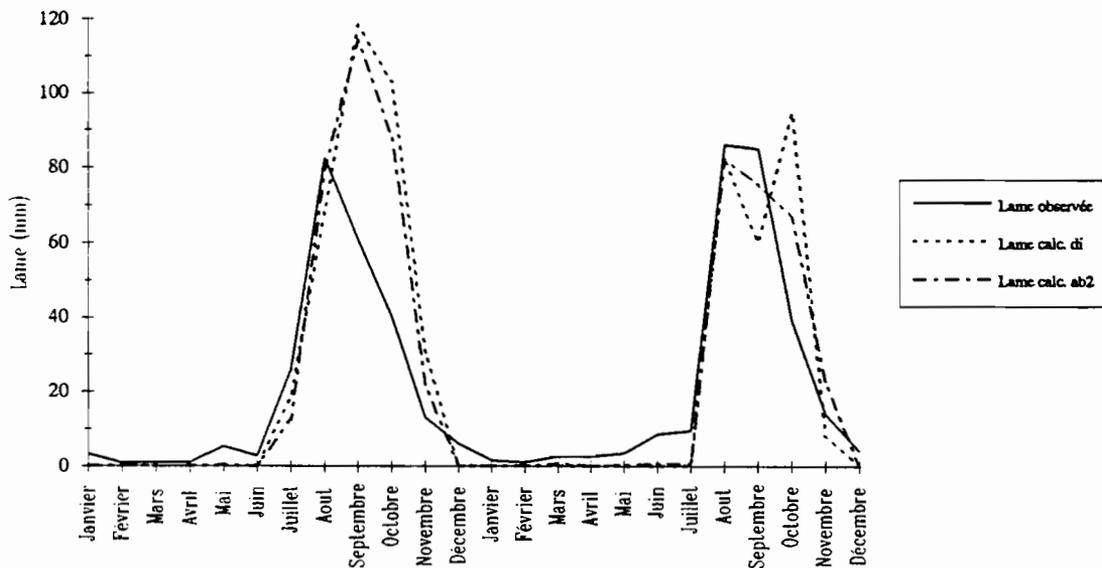


Figure 16 : Ko à Logoulé de 1981 à 1982 (Validation des calages initial et final réalisés de 1984 à 1986)

APPLICATION DU MODELE EN ZONE DE SAVANE

Disposant des données de base de pluies et de lames mensuelles dans la zone de savane, nous avons trouvé intéressant, dans une optique de généralisation de l'utilisation de cet algorithme, de tester le modèle restructuré dans cette zone du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Dans cette zone de savane nous avons retenu 34 stations-années sur les 59 jugées satisfaisantes et utilisées par Dezetter (1991).

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

Les résultats des différents calages, station-année par station-année, des modèles initial et final sont du même ordre de grandeur que ceux déjà obtenus en zones de forêt et de transition. Le tableau 25 récapitule la valeur moyenne du critère de Nash dans ces trois zones climatiques.

Tableau 25 : Valeurs moyennes du critère de Nash des modèles initial et final

	Nash modèle initial 9 paramètres	Nash modèle final 3 paramètres
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

Les résultats de ces calages apparaissent donc satisfaisants dans l'ensemble. Ils sont cependant légèrement moins bons avec le modèle final réduit à 3 paramètres.

Sur des séries chronologiques de plusieurs années les résultats obtenus sont du même type que ceux des zones de forêt et de transition, à savoir de bons calages avec le modèle initial et une dégradation considérable de la qualité des validations du modèle initial, comparativement aux résultats obtenus avec le modèle final. Le tableau 26 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.

Tableau 26 : Critères de Nash des calages et validations sur plusieurs années: pourcentage de dégradation du modèle initial au modèle final
a) En zone de forêt (les pourcentages > 0 traduisent une amélioration)

Bassins Versants des calages	Calage mod. initial	Validation mod. initial	% dégradation	Calage mod. final	Validation mod. final	% dégradation
Kavi à M'Bessé	0.1839	0.709	-285.5	0.19	0.4101	-115.8
Ko à Man	0.109	0.2775	-154.6	0.1412	0.2273	-61.0
Ko à Man	0.109	0.1991	-82.7	0.1412	0.1946	-37.8
Ko à Man	0.0765	0.3001	-292.3	0.1295	0.239	-84.6
Ko à Man	0.0765	0.94	-1128.8	0.1295	0.6659	-414.2
Ko à Logoualé	0.1124	0.564	-401.8	0.1721	0.3229	-87.6
Ko à Logoualé	0.1124	0.6136	-445.9	0.1721	0.3442	-100.0
Néka à Nékaounié	0.3133	1.019	-225.2	0.3553	1.065	-199.7
Néka à Nékaounié	0.3429	0.407	-18.7	0.4555	0.3105	31.8
Néka à Nékaounié	0.3429	1.206	-251.7	0.4555	1.019	-123.7
Davo à Dakpadou	0.4799	0.3667	23.6	0.5922	0.3565	39.8
Davo à Dakpadou	0.2399	0.6303	-162.7	0.3245	0.7658	-136.0
N'Zo à Kahin	0.0381	0.144	-278.0	0.0571	0.1167	-104.4

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

Bassins Versants des calages	Calage mod. initial	Validation mod. initial	% dégradation	Calage mod. final	Validation mod. final	% dégradation
Lobo à Nibéhibé	0.1647	0.4966	-201.5	0.2128	0.0715	66.4
Lobo à Nibéhibé	0.1647	0.8375	-408.5	0.2128	0.3464	-62.8
Lobo à Nibéhibé	0.0853	0.2429	-184.8	0.1538	0.1874	-21.8
Lobo à Nibéhibé	0.0853	0.3154	-269.7	0.1538	0.3192	-107.5

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

Bassins Versants des calages	Calage mod. initial	Validation mod. initial	% dégradation	Calage mod. final	Validation mod. final	% dégradation
Bagoé à Kouto	0.0488	0.3062	-527.5	0.1799	0.1485	17.5
Bandama à Siguékiélé	0.018	0.4411	-2350.6	0.2044	0.8453	-313.6
Doundian à Wahiré	0.0247	0.8532	-3354.3	0.1285	0.7322	-469.8
Lafigué à Rte Badikaha	0.1588	0.3092	-94.7	0.1696	0.3063	-80.6
Sien à Massadougou	0.3637	0.4825	-32.7	0.4129	0.3722	9.9
Sien à Nafana-Sienso	0.1323	1.218	-820.6	0.1566	1.44	-819.5
Sien à Nafana-Sienso	0.1323	0.7617	-475.7	0.1566	0.3965	-153.2
Sien à Nafana-Sienso	0.0964	0.2429	-152.0	0.1616	0.2608	-61.4
Sien à Nafana-Sienso	0.0964	1.288	-1236.1	0.1616	1.202	-643.8
Bagoé à Kouto	0.0172	0.1632	-848.8	0.0793	0.2132	-168.9
Bandama à Siguékiélé	0.2768	0.3592	-29.8	0.2944	0.4158	-41.2
Doundian à Wahiré	0.0009	0.1198	-13211.1	0.2424	0.2586	-6.7
Sien à Nafana-Sienso	0.144	0.7532	-423.1	0.2011	0.3347	-66.4

Sur le tableau 26, 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 :

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

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 qui a été restructuré 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.

MODELISATION AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Comme pour les autres approches précédemment décrites, les objectifs visés ici avaient pour but de fournir des éléments d'évaluation des ressources en eau aux projeteurs et aux aménageurs.

Les outils utilisés sont des modèles pluie-débit dont le pas de temps de calcul est journalier, mais dont les résultats ont été interprétés au pas de temps décadaire.

Trois algorithmes pluie-débit ont été adaptés sur micro-ordinateur : CREC mis au point au laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université de Montpellier II, GR3 élaboré par l'équipe de C. MICHEL au CEMAGREF et MODGLO conçu à l'ORSTOM par G. GIRARD.

Ces travaux de modélisation au pas de temps journalier ont été entrepris sur les trois zones qui sont savane, transition et forêt. Seule la zone de savane a permis d'obtenir des résultats satisfaisants.

En zone de forêt et de transition les résultats obtenus sont de qualité très insuffisante. Plusieurs raisons peuvent être invoquées à ce sujet :

- La faible qualité des données de réseau disponibles. Un tel problème, s'il contribue certainement à détériorer les résultats issus de la modélisation, ne saurait en aucun cas expliquer à lui seul les échecs observés. Il serait en effet très étonnant que les seules données enregistrées en zone de savane soient d'une qualité très supérieure aux autres.
- Les faibles coefficients d'écoulement observés en zone de transition (généralement inférieurs à ceux observés en zone de savane), et les longues périodes sèches qui conduisent à une forte désaturation des sols, ne sont guère favorables à des algorithmes conçus initialement pour des régions à écoulements continus et précipitations régulières.
- L'insuffisance de certains concepts au regard des conditions locales. L'évapotranspiration est représentée d'une manière très simplifiée alors qu'elle constitue l'élément le plus important du bilan hydrique. Les phénomènes liés à l'interception du couvert végétal et à la présence d'une importante litière en zone de forêt sont absents des algorithmes utilisés.

La méthodologie retenue pour les calages consistait à :

- Sélectionner pour chaque zone les stations-années disponibles (par exemple, il a été sélectionné 91 stations-années au total, sur tous les bassins versants, en zones de savane)
- Procéder aux calages des modèles sur chacune des stations-années retenues, de façon à multiplier le nombre de jeux de paramètres calés dans des contextes morphologiques et climatiques différents.

Les résultats que nous exposerons ici ont été obtenus à l'aide des procédures de calage automatique détaillées dans un chapitre précédent.

Le modèle MODGLO, dont le nombre de paramètres est élevé, s'est révélé relativement inopérant dans ces conditions d'utilisation. C'est la raison pour laquelle les parties suivantes concerneront principalement CREC et GR3.

MODELES PLUIE DEBIT JOURNALIERS UTILISES DANS ERREAU.

LE MODELE CREC.

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

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

La version de CREC utilisée et décrite est la version à 10 paramètres (X_1, X_2, \dots, X_{10}). Le module d'écoulement de surface s'est révélé inopérant (paramètres X_8, X_9 et X_{10}) et nous sommes revenus de fait à une version à 7 paramètres dans laquelle on a toujours $E_j = P_j$.

La figure 17 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

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

Fonction de production.

Cette fonction de production comprend 5 paramètres (cf figure 17) : X_8 et X_9 , X_3 et X_4 , et X_7 .

Son fonctionnement est basé sur le remplissage et la vidange du réservoir en "cul de sac".

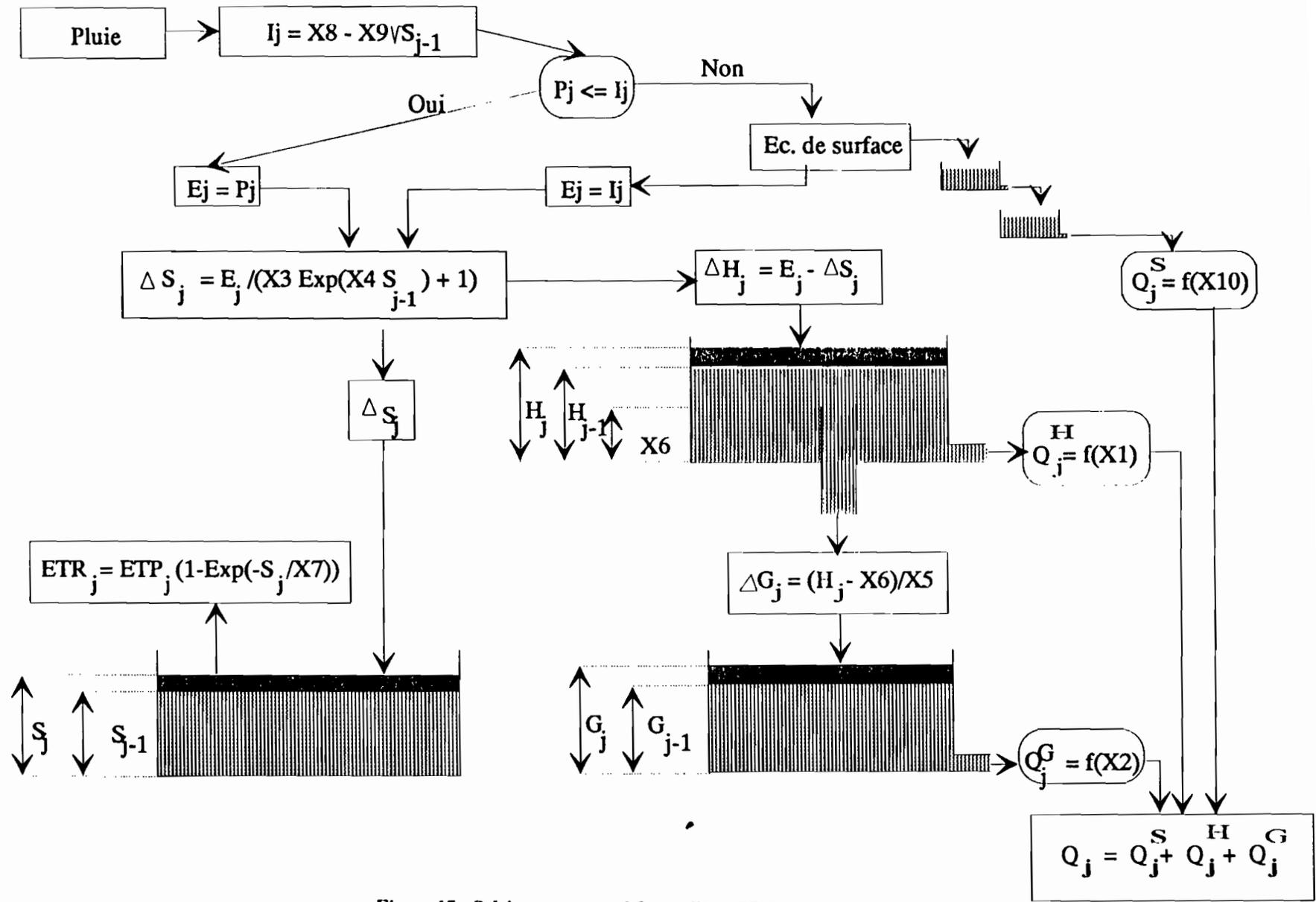


Figure 17 : Schéma conceptuel du modèle CREC

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

$$\Delta S_j = \frac{E_j}{X_3 \text{Exp}(X_4 S_{j-1}) + 1}$$

avec :

- E_j : pluie nette.
- ΔS_j : volume d'eau entrant dans le réservoir S au jour j.
- S_{j-1} : hauteur d'eau dans le réservoir S au jour j-1.

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

$$\text{ETR}_j = \text{ETP}_j (1 - \text{EXP}(\frac{-S_j}{X_7})).$$

Fonction de transfert.

La fonction de transfert du modèle CREC comprend deux réservoirs [fig.17], le réservoir H et le réservoir G. Le fonctionnement du réservoir H est contrôlé par trois paramètres X1, X5 et X6 ; le fonctionnement du réservoir G par le paramètre X2.

- Réservoir H.

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

- La première est contrôlée par le paramètre X1 sous la forme : $Q_j^H = (X_1 H_j)^2$
- La deuxième sortie présente un seuil, X6, en deçà duquel rien ne coule par cet orifice. Cette sortie alimente le réservoir G et ne sert pas directement à la constitution du débit à l'exutoire.

L'équation utilisée est :

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

- Réservoir G.

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

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

LE MODELE GR3.

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

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

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

- Le réservoir sol ayant comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évapotranspiration potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie entre lui-même et le sous modèle de routage.
- Un hydrogramme unitaire décrivant la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir qui est :
- Le réservoir eau-gravitaire. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est de type quadratique.

Le schéma conceptuel du modèle GR3 est présenté sur la figure 18.

Le réservoir sol.

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

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

Le réservoir eau gravitaire.

C'est le réservoir classique de type quadratique dont l'unique sortie est le débit journalier de la rivière. Il est caractérisé par sa "rétention maximale à un jour" B , deuxième paramètre du modèle GR3 [fig. 18] (Edijatno, Michel, 1989).

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

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

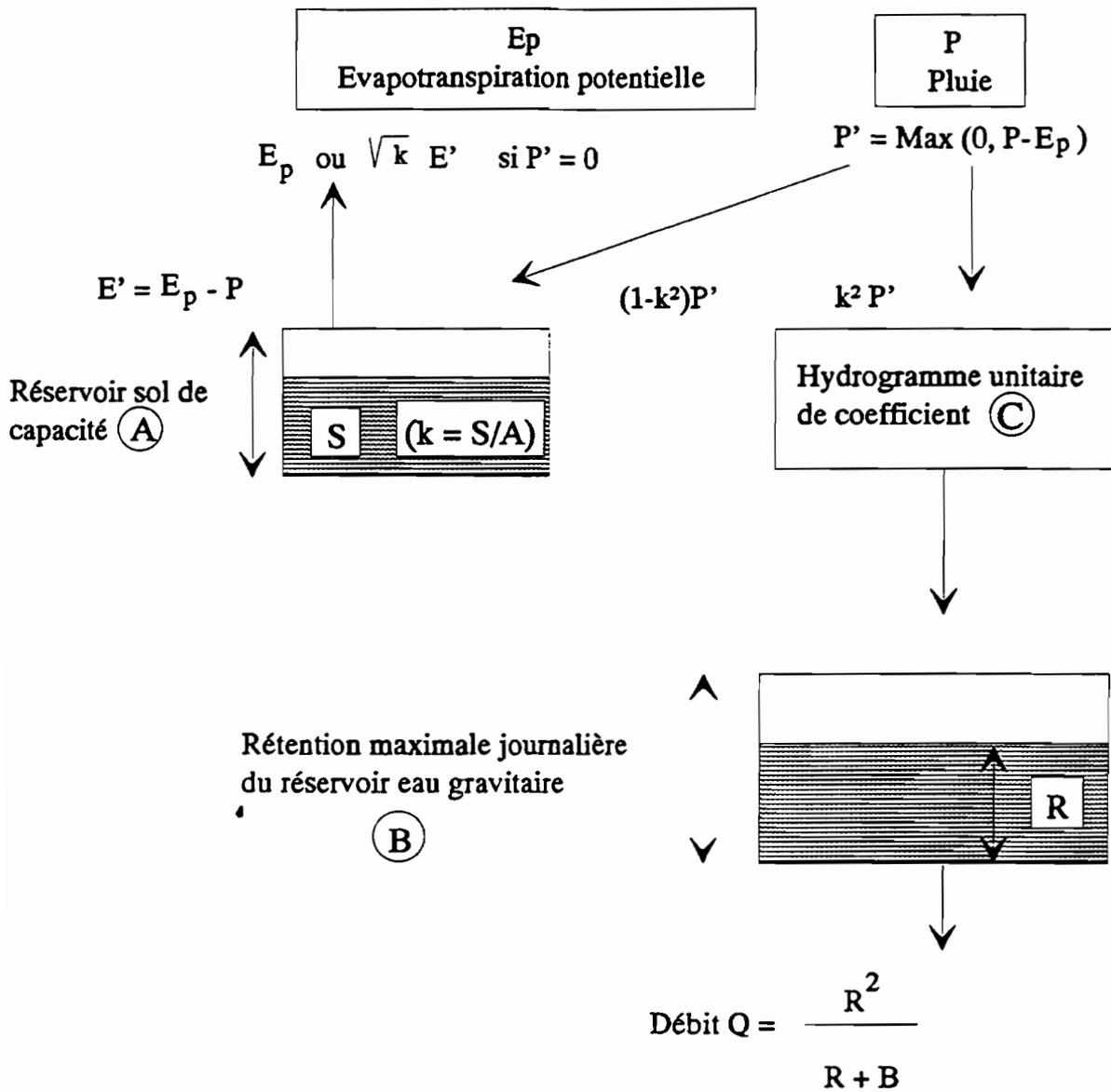


Figure 18 : Schéma conceptuel du modèle GR3

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

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

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

L'hydrogramme unitaire de paramètre C

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

La répartition contrôlée par le paramètre C, s'effectue de la manière suivante.

Un paramètre de décalage maximum est fixé dans le modèle, il est égal à 7 jours. On a ainsi 7 coefficients de partage journaliers $C_p[1..7]$. Chaque coefficient vaut :

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

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

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

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

LE MODELE MODGLO.

Ce modèle, mis au point à l'ORSTOM par G. GIRARD, est un modèle global au pas de temps journalier. La version présentée et utilisée ici a été mise au point en 1974.

C'est, comme CREC et GR3, un modèle basé sur un schéma à réservoirs, la figure 19 présente le schéma conceptuel de ce modèle. Classiquement, on peut distinguer dans ce modèle une partie production et une partie transfert.

Cet algorithme comporte une douzaine de paramètres ce qui le rend assez difficile à caler. Les résultats obtenus avec MODGLO dans le cadre des contraintes d'utilisation d'ERREAU se sont montrés décevants, raison pour laquelle nous n'en tiendrons pas compte dans la suite de cet exposé.

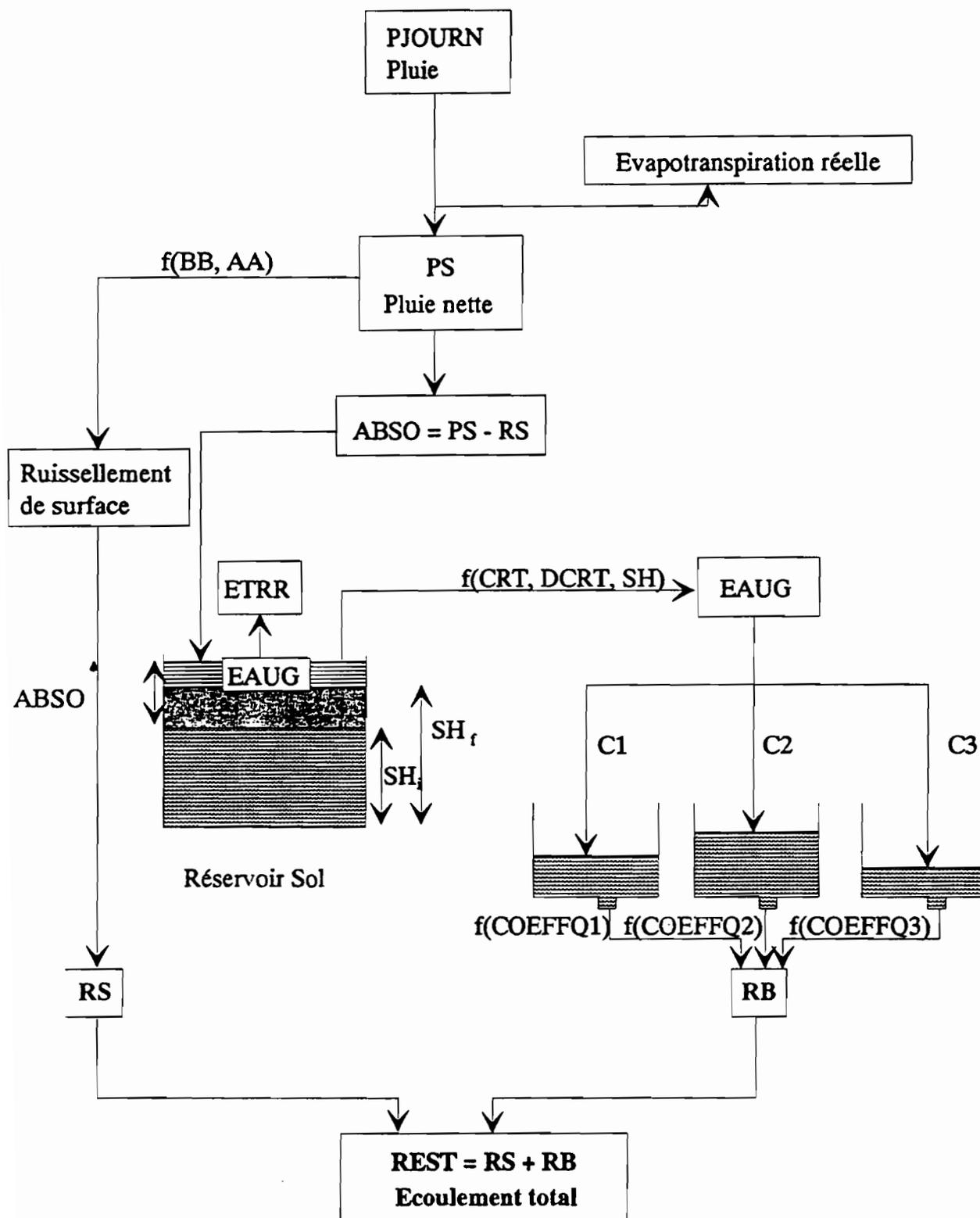


Figure 19 : Schéma conceptuel du modèle MODGLO

Nous renverrons le lecteur à la bibliographie pour un exposé plus complet sur ce modèle, en nous contentant d'indiquer qu'un calage manuel est certainement le plus adapté.

CALAGES ET VALIDATIONS DES MODELES

Rappelons que les calages présentés ici ne concernent que la zone de savane et les modèles CREC et GR3.

CALAGES DU MODELE CREC

On a procédé au calage automatique du modèle CREC sur l'ensemble des 91 stations-années disponibles. On ne peut pas donner ici l'ensemble des caractéristiques de chaque calage mais on a regroupé dans le tableau 27 les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum des principales caractéristiques des calages.

Tableau 27 : Caractéristiques des calages du modèle CREC

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

DAC1 : différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2 : différenced'autocorrélation d'ordre 2

Dans le tableau 27, les six premières caractéristiques (jusqu'à l'IRVC) sont calculées à partir des lames décadaires écoulées observées et calculées. Les deux dernières (Nash et Corrélation journalière) sont calculées à partir des débits journaliers observés et calculés. Le critère de Nash est le critère de calage qui doit idéalement tendre vers 0.

L'observation des valeurs du tableau permet de se rendre compte de la qualité des calages obtenus à l'aide du modèle CREC. D'une manière générale, ces calages sont de bonne qualité. L'IRVC moyen vaut 3.58 et la valeur maximale ne dépasse pas 20. De même, le coefficient de corrélation des lames décadaires vaut en moyenne 0.94 tandis que la corrélation moyenne des débits journaliers est de 0.89. Ces valeurs montrent la bonne qualité des calages effectués. Sur l'ensemble des 91 stations-années calées, on observe très peu "d'échecs de calage". En effet, le modèle CREC semble s'adapter dans toutes les circonstances et arriver à reproduire plus ou moins fidèlement les hydrogrammes observés. Par exemple, la valeur maximale du critère de Nash (0.94) est observée pour le Solomougou à Ziebatogo en 1983. Or pour cet individu la lame annuelle écoulée est de 14.3 mm et l'IRVC est de 4.23, soit une erreur de 4.23% sur la reproduction de la lame de crue, elle aussi très faible, ce qui relativise cet échec. Quand on détaille l'observation de ces mauvais calages (critère de Nash élevé), on s'aperçoit que

seulement 10 valeurs sur 91 sont supérieures à 0.4 soit 10.9% des cas. La grande majorité de ces cas correspond à des années 1983 ou 1984 qui furent exceptionnellement sèches dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. A l'observation détaillée de l'ensemble des résultats de calage, on peut noter également que pour 31 cas sur 91, soit 34 % des cas, la valeur du critère de Nash est inférieure à 0.1, ce qui dénote un très bon calage.

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

Les trois tracés présentés, figures 20, 21 et 22 concernent la valeur maximale du critère de Nash (le Solomougou à Ziebatago, 1983), une valeur moyenne (le Sien à Massadougou, 1981) et la valeur minimale (la Bagoé à Kouto, 1981).

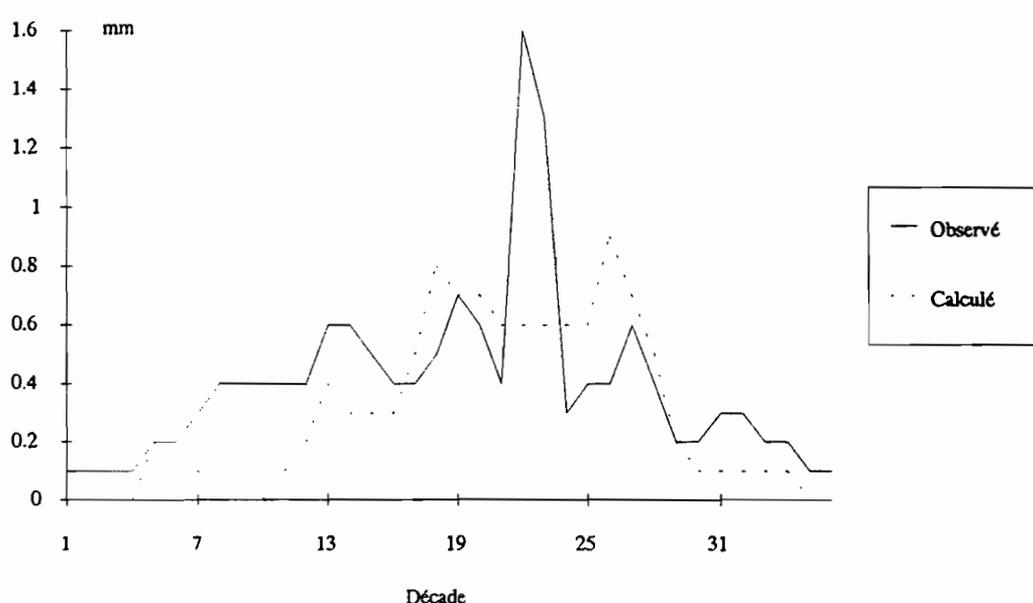


Figure 20 : Le Solomougou à Ziebatago, 1983

La figure 20 concerne le Solomougou à Ziebatago en 1983. Les caractéristiques de ce calage sont les suivantes :

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

Nous sommes ici en présence du plus mauvais calage automatique réalisé avec le modèle CREC. L'observation du tracé et des valeurs caractéristiques permet de relativiser l'importance, en terme de qualité du modèle, de ce calage. En effet, on s'aperçoit que la lame décadaire maximale observée est de 1.6 mm et le modèle prévoit 1 mm. Les erreurs concernent

des lames de hauteur insignifiante à rapprocher du caractère exceptionnellement sec de cette année 1983.

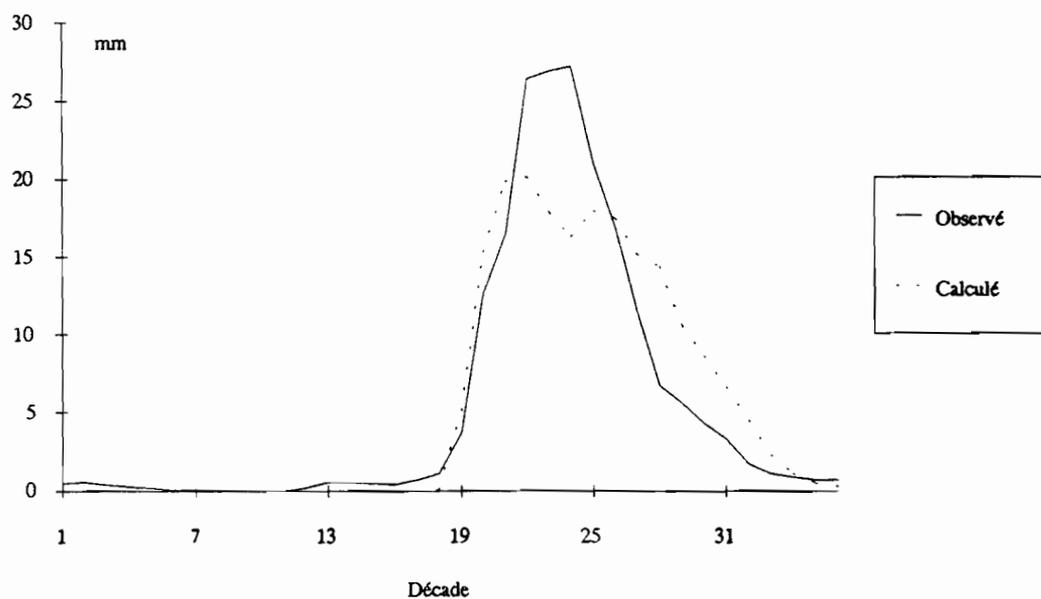


Figure 21 : Le Sien à Massadougou, 1981

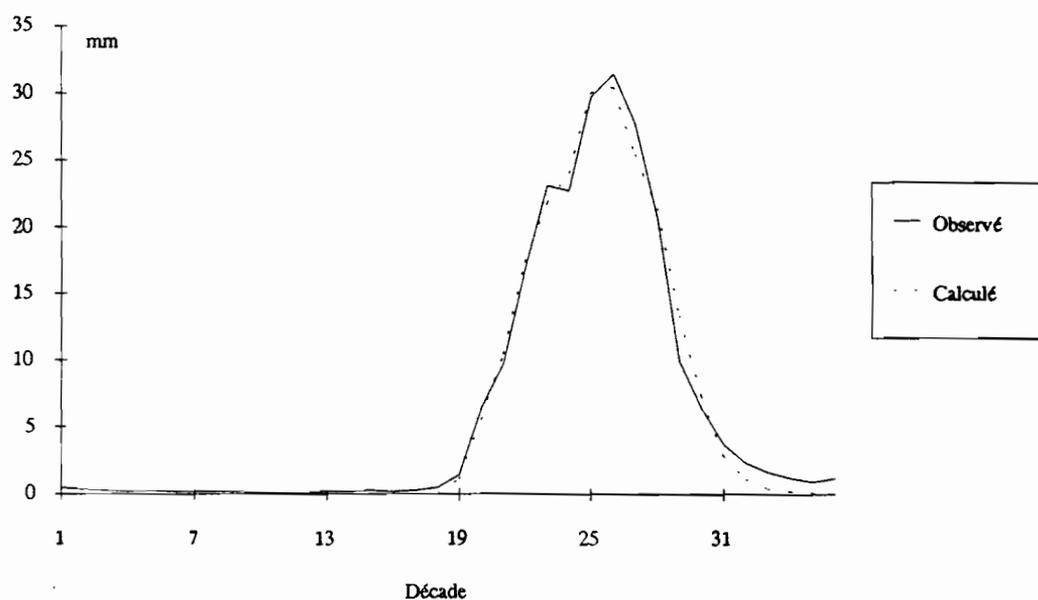


Figure 22 : La Bagoé à Kouto, 1981

La figure 21 concerne le Sien à Massadougou en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

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

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

La figure 22 concerne la Bagoé à Kouto en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

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

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

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

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

CALAGES DU MODELE GR3.

Le calage par optimisation à l'aide du critère de Nash a été réalisé pour les 91 stations-années disponibles. Le tableau 28 regroupe la valeur moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum des valeurs caractéristiques des calages effectués.

Tableau 28 : Caractéristiques des calages du modèle GR3.

	Corrélation décadaire	DAC1	DAC2	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash	Corrélation journalière
Moyenne	0.9194	0.0931	0.1347	9.84	40.64	5.57	0.2281	0.8729
Ecart-type	0.0887	0.1052	0.1283	8.47	25.82	6.51	0.1717	0.1139
Mini	0.3463	0.0003	0.0009	0.10	1.70	0.00	0.0263	0.2297
Maxi	0.9941	0.5596	0.5868	39.90	110.70	41.52	1.0018	0.9878

DAC1 : différence d'autocorrélation d'ordre 1

DAC2 : différence d'autocorrélation d'ordre 2

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

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

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

Les figures 23, 24 et 25 présentent trois exemples du tracé décadaire des calages du modèle GR3.

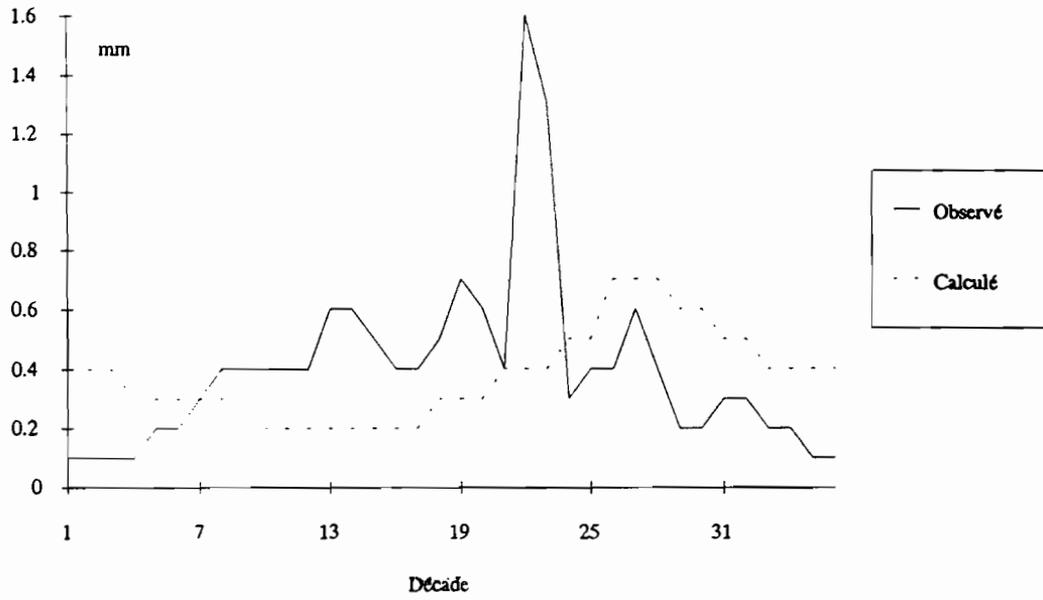


Figure 23 : Le Solomougou à Ziebatago, 1983

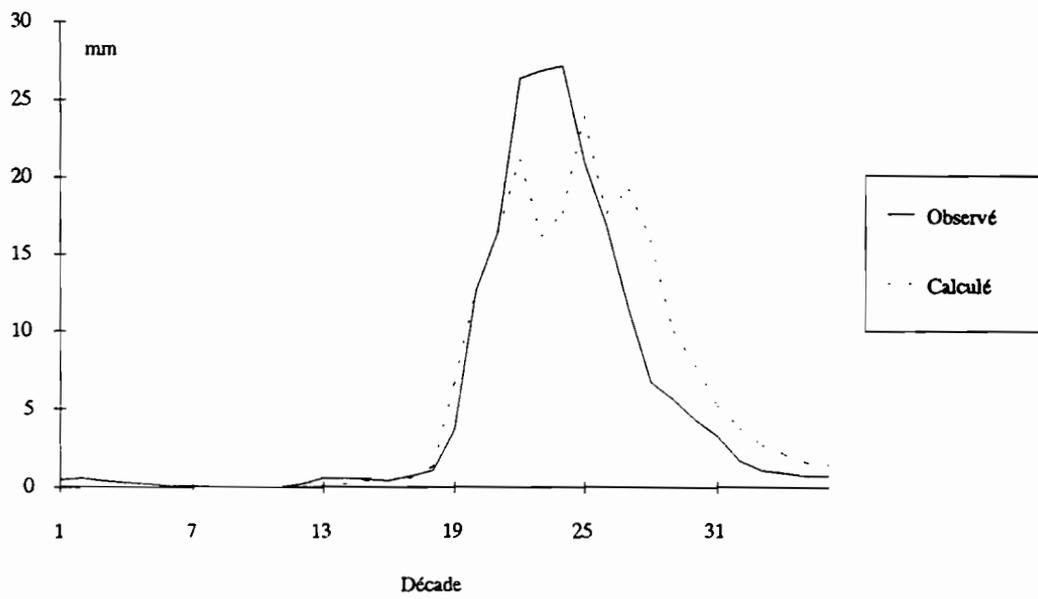


Figure 24 : Le Sien à Massadougou, 1981

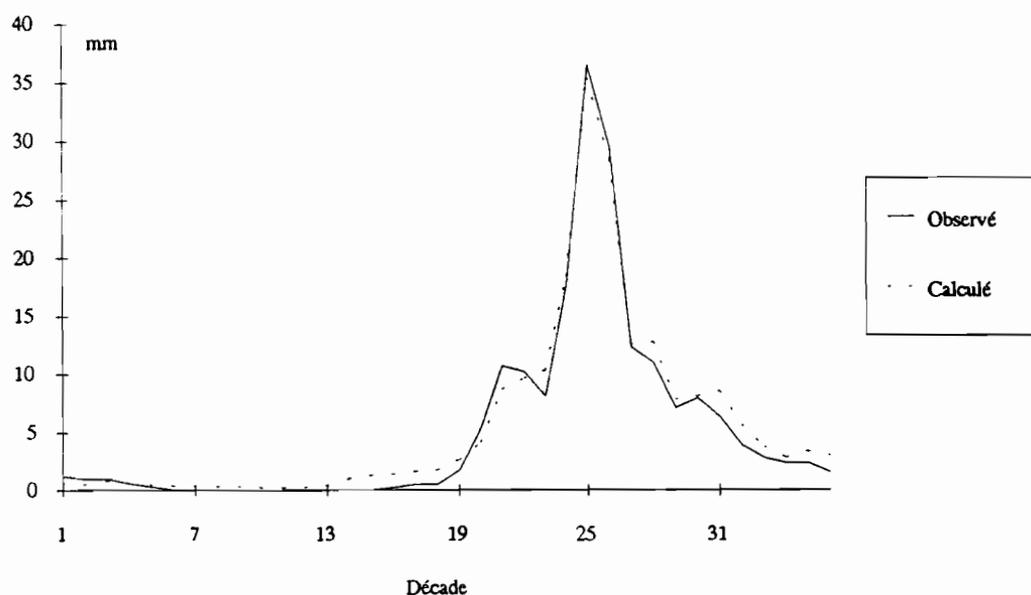


Figure 25 : Le Banifing à Ziemougoula, 1980

La figure 23 concerne le Solomougou à Ziébatago en 1983, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

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

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

La figure 24 concerne le Sien à Massadougou en 1981, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

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

Avec un critère de calage de 0.25, ce calage se situe dans la moyenne de la série de calages effectués. L'observation des valeurs caractéristiques du calage montre une bonne qualité de l'hydrogramme calculé, seule la valeur de Bilan2, assez forte, dénote un décalage entre les deux hydrogrammes.

L'IRVC de 0.67 indique que le volume écoulé entre les décades 19 et 30 est reproduit à 0.67% près. En observant le tracé décadaire, on saisit facilement la raison de la valeur élevée de Bilan2. La pointe de crue est sous-estimée (16 environ au lieu de 27) alors que la décrue est sur-estimée. En terme de bilan volumique sur l'ensemble de la saison des pluies, il y a compensation, mais le terme Bilan2, qui somme les écarts absolus décade par décade, repère correctement ce phénomène.

La figure 25 concerne le Banifing à Ziemougoula en 1980, les caractéristiques du calage sont les suivantes :

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

Avec un critère de Nash de 0.0263, ce calage est le meilleur de la série. L'ensemble des critères numériques viennent confirmer cette bonne qualité. L'IRVC vaut 0.70, il est du même ordre que pour la figure 25 mais la valeur de Bilan2 observée ici est beaucoup plus faible. L'observation du tracé décadaire montre une très bonne concordance des hydrogrammes observés et calculés. On note une légère surestimation des étiages dont la cause la plus probable est l'utilisation du critère de Nash.

Globalement, le modèle GR3 utilisé en calage automatique à l'aide du critère de Nash, permet de reproduire correctement la grande majorité des hydrogrammes observés.

VALIDATIONS DES CALAGES.

VALIDATIONS

Par définition, on appelle validation, le fait d'appliquer un jeu de paramètres calé à une série de données n'ayant pas servi au calage de ces paramètres. Cette validation a pour but de confirmer ou d'infirmier, la pertinence et la validité des paramètres issus du calage.

On a procédé à des validations systématiques pour chacun des bassins étudiés. La méthodologie est la suivante, avec l'exemple du Bou à Boron. La période disponible utilisée pour le calage s'étend de 1981 à 1985, soit cinq années de données. Pour ce bassin, on a effectué, pour un modèle donné, 5 calages annuels. On obtient donc 5 jeux de paramètres différents que l'on peut tester (valider) sur chacune des années disponibles. On a ainsi 5 jeux de paramètres à appliquer pour 5 années soit $5 \times 5 = 25$ exécutions du modèle concerné. On obtient

ainsi pour chaque série de débits observés, 5 séries de débits calculés correspondant chacune à un jeu de paramètres. Parmi ces cinq séries, une correspond au calage. Pour permettre la comparaison d'une série observée et d'une série calculée (issu de l'exécution d'un modèle donné utilisant un jeu de paramètres donné), on applique le module d'évaluation comparative. Au niveau de l'exploitation des validations croisées, nous n'avons retenu que trois valeurs caractéristiques, la corrélation décadaire, l'IRVC et le critère de Nash. Pour chacune de ces valeurs et pour un bassin et un modèle donné, on bâtit un tableau du même type que le tableau 29 qui reprend l'exemple du Bou à Boron pour le modèle CREC et le critère de Nash.

Tableau 29 : Bou à Boron, CREC, Critère de Nash.

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

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

Nous avons effectué les validations croisées de manière systématique pour l'ensemble des 91 stations-années disponibles représentant 20 bassins versants.

Cette procédure a montré que dans la grande majorité des cas, on n'obtient pas de gain lors de l'application d'un jeu de paramètres calé pour une année à une autre année. Les pertes enregistrées peuvent parfois être importantes.

On s'aperçoit généralement de ce que les gains les plus forts ont lieu les années pour lesquelles le calage était de mauvaise qualité (années 1983 ou 1984 en général). De plus, un gain observé sur un critère est rarement confirmé par un gain sur les autres critères du module d'évaluation.

Par ailleurs, si les gains enregistrés restent en général très faibles, les pertes, elles, peuvent être très importantes.

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

TECHNIQUES D'ANALYSE DE DONNEES APPLIQUEES AUX JEUX DE PARAMETRES.

Le but essentiel de l'analyse présentée ici était d'essayer de déterminer des relations entre les paramètres calés des modèles et des variables hydrologiques, physiographiques ou agronomiques, caractéristiques des bassins et des stations-années étudiées.

DEFINITIONS DES ECHANTILLONS.

Afin de travailler sur une population relativement homogène et en disposant du maximum d'informations, nous avons été amenés à réaliser une sélection parmi les 91 individus disponibles. Une fois cette sélection réalisée, une répartition aléatoire entre deux échantillons (calage et validation) a été entreprise.

Partant des 91 individus (station-année) décrits dans la première partie, nous sommes arrivés, en deux étapes successives, à sélectionner 59 individus.

. Première étape :

Nous avons écartés les individus pour lesquels nous ne disposions pas du maximum d'informations ou pour lesquels il subsistait des doutes quant à la qualité des données. En particulier, la disponibilité des variables d'occupation du sol a été un facteur décisif. La non disponibilité de ces valeurs nous a conduit à éliminer quatre bassins représentant 16 stations-années. Ces quatre bassins sont le Lokpoho à Namboukaha (4 individus), le Bou à Boron (5 individus), le Bou à Sirasso (3 individus) et le Solomougou à Ziebatago (4 individus).

Des doutes subsistaient quant à la validité des données pluviométriques utilisées pour la Bagoé à Kouto sur la période 1968 à 1976. Il semble que la station pluviométrique de Boundiali en particulier soit douteuse sur cette période (Brunet-Moret, 1974). Nous avons donc éliminé de l'échantillon ces 8 individus concernant la Bagoé à Kouto de 1968 à 1976. De plus, ces 8 individus représentent des années relativement anciennes comparativement au reste des individus, années qui appartiennent à une période à moyenne pluviométrique vraisemblablement différente.

Cette première étape entraîne ainsi l'élimination de 24 individus, ramenant la population disponible à 67 individus.

. Deuxième étape :

Dans le but d'éliminer les individus ayant un "comportement inexplicable", nous avons procédé à une deuxième étape dans la sélection. Cette deuxième étape s'est déroulée arbitrairement de la façon suivante :

Partant du principe que la finalité essentielle des modèles était de prévoir la lame écoulée à partir de la lame précipitée, nous avons calculé une régression linéaire $Lame\ Annuelle = f(Pluie\ annuelle)$. Cette régression bâtie, nous avons arbitrairement décidé d'éliminer les individus dont l'écart entre la valeur prédite et la valeur observée était supérieure à 1.5 fois l'écart type de l'échantillon observé.

La régression linéaire bâtie à partir des 67 individus issus de la sélection précédente est la suivante :

- $Lame\ Annuelle = - 223.724 + 0.292335 * Pluie\ Annuelle$
- Coefficient de corrélation : 0.7816
- Coefficient de détermination : 61.1%
- Ecart type : 52.6

Nous avons donc décidé d'écarter les individus dont l'erreur d'estimation de la lame annuelle était supérieure à 78.9 mm.

Par cette procédure, 8 individus supplémentaires ont été écartés.

Ces 59 individus sélectionnés ont été répartis aléatoirement en un échantillon de calage, pour le calage des équations de prédétermination des paramètres, et un échantillon de validation, pour la validation de ces équations.

Nous avons choisi de faire un échantillon de calage de 39 individus et un échantillon de validation de 20 individus, soit à peu près une répartition de 2/3, 1/3.

VARIABLES UTILISEES. ETUDE DES CORRELATIONS.

En ce qui concerne l'étude des corrélations, ainsi que l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP), nous avons considéré l'ensemble des 59 individus disponibles.

Variables utilisées.

Nous décrivons ici l'ensemble des variables prises en compte tant au niveau de l'analyse des corrélations qu'au niveau de l'ACP et de l'AFC.

Les variables utilisées peuvent être réparties en deux catégories, les variables caractéristiques d'une station-année, indépendamment de la prise en compte d'un modèle, et les variables caractéristiques du calage d'un modèle pour l'individu considéré (station-année).

. Les variables caractéristiques d'une station ou d'une station année

La liste de ces variables est la suivante :

- Pluie annuelle.
- Pluie cumulée (Pc) au 15 Juin, 15 Juillet, 15 Août, 15 Septembre et 15 Octobre.
- Pluie relative (Pr) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.
- Lame annuelle.
- Lame cumulée (Lc) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.
- Lame relative (Lr) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.
- Superficie.
- Compacité :
 coefficient de Gravelius = $\frac{\text{Périmètre du bassin}}{\text{Périmètre d'un cercle de même surface}} = \frac{0.28 P}{\sqrt{S}}$
- Occupation du sol : pourcentage de savanes, de forêts, de cultures et d'habitat.
- Coefficient d'écoulement = $\frac{\text{Lame annuelle}}{\text{Pluie annuelle}}$

Les définitions pour les Pluies cumulées, Lames cumulées, Pluies relatives et Lame relatives sont les suivantes :

Pluies cumulées :

- Pc6 = Pluie cumulée du 1er janvier au 15 Juin.

Lames cumulées : idem.

Pluies relatives :

- $Pr6 = \frac{Pc6}{\text{Pluie annuelle}}$

Lames relatives :

- $Lr6 = \frac{Lc6}{\text{Lame annuelle}}$

. Les variables caractéristiques du calage d'un modèle.

- paramètres du modèle considéré.
- Eaug annuelle : sortie annuelle de la fonction de production.
- Eaug cumulée (Egc) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.
- Eaug relative (Egr) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10.
- Indices de restitution (Ir) au 15/6, 15/7, 15/8, 15/9 et 15/10, avec, par exemple :

$$Ir6 = \frac{Egc6}{Pc6}$$

Etude des corrélations.

Pour l'étude des corrélations, nous avons procédé au calcul des matrices de corrélations pour les trois modèles et pour l'ensemble des variables utilisables.

En dehors des corrélations évidentes dues à la définition des variables utilisées (Pc10 très corrélée avec Pluie annuelle par exemple) nous avons regroupé ici les corrélations "significatives" (>0.5) pour chaque modèle étudié.

. Modèle CREC.

- X1 : corrélation avec X5= 0.5988
- X3 : corrélation avec X4= -0.5735 ; avec X7= 0.5942
- X4 : corrélation avec X3= -0.5735 ; avec X7= -0.5751
- X5 : corrélation avec X1= 0.5988 ; avec X6= 0.7882
- X6 : corrélation avec X5= 0.7882
- X7 : corrélation avec X3= 0.5942 ; avec X4= -0.5751
- Superficie : corrélation avec % de Forêt= 0.6558

. Modèle GR3.

- B : corrélation avec Pluie annuelle = 0.5359
avec Lame annuelle = 0.6337
avec Coefficient d'écoulement = 0.6182
avec Eaugan = 0.7067
avec Pc7 = 0.6558
avec Pc8 = 0.6530

avec $Pc9 = 0.5859$

avec $Pc10 = 0.5374$

Comme on peut le constater les corrélations sont rares et souvent faibles (Maximum : 0.89).

En conclusion, l'étude des matrices des corrélations permet de mettre en évidence l'inexistence de relations linéaires fortes entre les paramètres des modèles et les autres variables utilisées.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES.

L'utilisation simultanée de l'Analyse en composantes Principales (ACP) et de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) s'est révélée assez décevante dans la mesure où les résultats obtenus ne font, en fait, que souligner quelques évidences. Nous n'entrerons donc pas, ici, dans les détails.

Signalons simplement que :

- L'ACP permet d'opposer, par le premier axe de l'analyse, les années pluvieuses aux années sèches et par le troisième axe les bassins fortement cultivés aux bassins faiblement cultivés. L'insertion dans l'analyse des paramètres des modèles ne permet que de remarquer la bonne corrélation du paramètre B de GR3 avec l'axe 1.
- Avec l'AFC, on souligne l'opposition entre le pourcentage de savanes et le pourcentage de cultures sur les bassins versants et on remarque la relation du paramètre B de GR3 avec les variables concernant la pluviométrie.

EQUATIONS DE PREDETERMINATION DES PARAMETRES DES MODELES.

En utilisant la répartition aléatoire en échantillon de calage et échantillon de validation, nous avons cherché à mettre au point des équations de régression multiple permettant de calculer les valeurs des paramètres des modèles pour des bassins versants non jaugés (SERVAT et DEZETTER, 1991).

Modèle CREC.

Après plusieurs essais réalisés pour les paramètres X1 à X7, il est apparu nécessaire de travailler sur des variables transformées $\ln(X1)$ à $\ln(X7)$ afin d'éviter, lors de l'utilisation des équations, l'obtention de valeurs négatives, inutilisables. Nous avons donc utilisé les variables transformées par le logarithme népérien. Afin de conserver une certaine homogénéité nous avons également transformé les variables explicatives Pluie Annuelle et Pluies cumulées. Les équations ont été calculées à l'aide d'une méthode de "Stepwise ascendant".

Au départ du processus, on peut choisir d'autoriser la présence d'une constante dans le modèle régressif final. L'usage de la constante a été systématique en vérifiant toutefois qu'elle

était significative (valeur du t de Student $> |1|$). Lorsque cette constante se révélait non significative, l'équation était recalculée sans constante.

Les résultats pour le modèle CREC sont les suivants :

- paramètre X1

Résultats pour Ln (X1).

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	29.170906	11.055552	2.6386
Ln (Pc8)	-5.319984	1.66801	-3.1894

$R^2 = 0.1944$

- paramètre X2

Résultats pour Ln (X2)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-0.558704	0.147494	-3.7880
Pr7	0.786557	0.335593	2.3438

$R^2 = 0.1057$

- paramètre X3

Résultats pour Ln (X3)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-21977214	5.883506	-3.7354
Ln (Pluie annuelle)	2.553142	0.8342	3.0606
Forêt	-0.049475	0.022298	-2.2188

$R^2 = 0.2326$

- paramètre X4

Résultats pour Ln (X4)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	7.765158	2.518633	3.0831
Ln (Pluie annuelle)	-2.556269	0.480193	-5.32344
Ln (Pc6)	1.028837	0.340051	3.0255
Cultures	-0.010677	0.00393	-2.7171

$R^2 = 0.4793$

- paramètre X5

Résultats pour Ln (X5)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	9.75271	3.904512	2.4978
Cultures	0.018165	0.006801	2.6710
Ln (Pc8)	-1.838488	0.584154	-3.1473
Pr7	8.912818	1.97594	4.5107

$R^2 = 0.4483$

- paramètre X6

Résultats pour Ln (X6)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Cultures	0.917767	0.151123	6.0730

$R^2 = 0.4925$

- paramètre X7

Résultats pour Ln (X7)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Ln (Pc7)	0.597932	0.033802	17.6895

$R^2 = 0.8917$

Au vu de ces équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC, on s'aperçoit que les variables caractéristiques du démarrage de la saison des pluies (Pc6, 7 et 8) entrent souvent dans les équations. De même, les paramètres d'occupation du sol tels que le pourcentage de Cultures sont également pris en compte.

Les variables pluviométriques Pc et Pr peuvent être considérées comme des indicateurs indirects du démarrage de la végétation qui joue un rôle important dans le bilan en eau du bassin versant dans ces régions.

Les valeurs des coefficients de détermination R^2 obtenues varient de 0.89 à 0.11 mais ces valeurs doivent être considérées comme des indicateurs de la qualité de la régression et pas comme une "mesure" comme dans le cas d'une simple régression linéaire. En effet, ces valeurs concernent les variables transformées par les logarithmes et n'ont pas de signification statistique pour les valeurs originales des variables non transformées.

Modèle GR3.

Pour ce modèle, trois équations de régression sont mises au point. Elles correspondent à chacun des trois paramètres A, B et C du modèle.

Les résultats sont les suivants :

- **paramètre A**

Résultats pour Ln (A)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	7.646236	0.380758	20.0816
Pr6	-4.083965	1.280119	-3.1903
Cultures	0.009406	0.003767	2.4970

$R^2 = 0.3234$

- **paramètre B**

Résultats pour Ln (B)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Constante	-15.309117	5.489357	-2.7889
Ln(Pc8)	3.302271	0.822618	4.0143
Cultures	-0.031639	0.009552	-3.3123

$R^2 = 0.4369$

- paramètre C

Résultats pour Ln (C)

Variable	Coefficient	Erreur standard	Valeur t
Compacité	2.937567	0.892158	3.2927
Pr7	-12.766351	2.604112	-4.9024
Forêt	-0.113657	0.02708	-4.1970

$R^2 = 0.8696$

Pour ce modèle, on constate à nouveau la présence des variables de pluies caractéristiques du début de la saison ainsi que l'utilisation des variables d'occupation du sol.

Les coefficients de détermination R^2 sont en moyenne plus élevés que pour le modèle CREC mais ils sont malgré tout à envisager avec beaucoup de prudence pour les raisons déjà exposées.

Conclusions.

Dans le cadre de la méthodologie initiale (calages stations-années par stations-années), l'utilisation de la méthode de régression multiple dite "Stepwise ascendant" a permis de mettre au point des équations de régression multiple de prédétermination des paramètres des modèles pour CREC et GR3.

Ces équations ont été mises au point sur un échantillon dit de calage de 39 individus. Elles permettent de prédire la valeur des paramètres des modèles CREC et GR3 pour des bassins versants non jaugés à partir de variables telles que la Pluie cumulée au 15 Juin, au 15 Juillet ou des variables d'occupation du sol (pourcentage de cultures notamment).

La validité et la pertinence de ces équations doivent maintenant être testées pour des individus extérieurs à cet échantillon de calage.

VALIDATION DES EQUATIONS DE PREDETERMINATION

MODELE CREC

Le tableau 30 regroupe les équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC.

Tableau 30 : Equations de prédétermination des paramètres du modèle CREC.

$$\begin{aligned} \text{Ln X1} &= 29.171 - 5.320 \text{ Ln Pc8} \\ \text{Ln X2} &= -0.559 + 0.787 \text{ Pr7} \\ \text{Ln X3} &= -21.977 - 0.049 \text{ Forêt} + 2.553 \text{ Ln PA} \\ \text{Ln X4} &= 7.765 - 2.556 \text{ Ln PA} - 0.011 \text{ Cultures} + 1.029 \text{ Ln Pc6} \\ \text{Ln X5} &= 9.753 + 0.018 \text{ Cultures} + 8.913 \text{ Pr7} - 1.838 \text{ Ln Pc8} \\ \text{X6} &= 0.918 \text{ Cultures} \\ \text{Ln X7} &= 0.598 \text{ Ln Pc7} \end{aligned}$$

L'échantillon de validation est constitué de 20 individus.

On distinguera pour chacun de ces 20 individus :

- L'hydrogramme observé.
- L'hydrogramme calé, obtenu par le calage de CREC.
- L'hydrogramme prédéterminé, résultat de l'utilisation du modèle CREC avec le jeu de paramètres prédéterminés à l'aide des équations obtenues précédemment.

La comparaison de ces trois hydrogrammes entre eux permet de déterminer la qualité de la méthode de prédétermination des paramètres.

Critères numériques.

Les critères numériques suivants ont été calculés pour chaque individu :

- Corrélation des lames décadales.
- Différence d'autocorrélation d'ordre 1 (DAC1).
- Différence d'autocorrélation d'ordre 2 (DAC2).
- Bilan1
- Bilan2.

- IRVC.
- Coefficient de corrélation des débits journaliers.
- Critère de Nash sur les débits journaliers.

On compare trois séries entre elles : série observée, série calée, série prédéterminée, avec la notation suivante :

- Comparaison calée/observée C/O.
- Comparaison prédéterminée/observée P/O.
- Comparaison prédéterminée/calée P/C.

Le tableau 31 donne pour chacune des trois comparaisons, les valeurs moyennes, l'écart type, le mode, le minimum et le maximum obtenus pour les individus de l'échantillon de validation.

*Tableau 31 : Modèle CREC. Echantillon de validation.
Critères numériques calculés sur les lames décadaires*

	Corrélation	DAC 1	DAC 2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O	0.94	0.094	0.106	5.41	40.86	3.40
Moyenne P/O	0.70	0.120	0.131	59.98	80.78	40.85
Moyenne P/C	0.77	0.054	0.098	58.01	71.47	41.99
Ecart type C/O	0.04	0.099	0.084	6.03	30.08	2.84
Ecart type P/O	0.30	0.125	0.154	53.37	48.68	29.06
Ecart type P/C	0.29	0.059	0.123	53.21	48.26	27.75
Mode C/O	0.93	0.044	0.069	1.20	26.60	2.24
Mode P/O	0.74	0.035	0.057	40.70	102.00	32.63
Mode P/C	0.85	0.021	0.046	0.90	47.40	30.74
Mini C/O	0.87	0.0001	0.005	0.30	1.30	0.33
Mini P/O	0.01	0.0004	0.008	0.90	4.70	4.73
Mini P/C	0.09	0.003	0.002	0.60	4.50	5.30
Maxi C/O	0.99	0.348	0.281	26.10	120.70	8.93
Maxi P/O	0.98	0.433	0.615	179.50	181.70	91.28
Maxi P/C	0.99	0.225	0.509	176.60	176.60	91.66

Le tableau 32 donne les valeurs, calculées à partir des débits journaliers, du critère de Nash et du coefficient de corrélation (moyenne, écart type, mode, minimum, maximum).

*Tableau 32 : Modèle CREC. Echantillon de validation.
Critères numériques calculés sur les débits journaliers*

	Nash	Corrélation des débits journaliers
Moyenne C/O	0.1973	0.8948
Moyenne P/O	0.6267	0.6695
Moyenne P/C	0.5176	0.7654
Ecart type C/O	0.1162	0.0660
Ecart type P/O	0.3496	0.2942
Ecart type P/C	0.4029	0.2864
Mode C/O	0.1635	0.8926
Mode P/O	0.5281	0.7030
Mode P/C	0.3102	0.8493
Mini C/O	0.0195	0.7424
Mini P/O	0.1220	0.0078
Mini P/C	0.0314	0.0766
Maxi C/O	0.4492	0.9906
Maxi P/O	1.3153	0.9737
Maxi P/C	1.3279	0.9919

De l'examen de ces tableaux, on peut tirer les constatations suivantes :

- L'IRVC moyen est de 41, on fait donc une erreur moyenne de 41% sur la reconstitution du volume de crue. On peut mettre en relation cette valeur de 41% avec la valeur obtenue pour l'échantillon de calage qui est de 37%. La baisse de performance des équations de prédétermination des paramètres peut alors être qualifiée de minime.
- L'écart type de l'IRVC des hydrogrammes prédéterminés (notés P/O) est également en légère augmentation (il passe de 27 à 29) lorsque l'on passe de l'échantillon de calage à l'échantillon de validation. Ce fait peut être le reflet de la présence, dans l'échantillon de validation, de certains cas extrêmes.
- De tels cas extrêmes ont une influence évidente sur la moyenne et l'écart type des indices d'appréciation de la qualité de l'hydrogramme. Or il correspondent, la plupart du temps, à des années exceptionnelles, très sèches, comme l'année 1983.

- La corrélation des lames décadaires est de 0.70, la valeur obtenue pour l'échantillon de calage était de 0.84. L'écart type passe de 0.21 à 0.30. Cette diminution, accompagnée de l'augmentation de l'écart type peut également être en partie expliquée par la présence de certains cas extrêmes. En effet, pour l'échantillon de validation, la valeur minimale de la corrélation décadaire est de 0.01 et la maximale de 0.98 alors que, pour l'échantillon de calage, on obtenait mini : 0.15 et maxi : 0.99.

L'examen de ces critères numériques d'adéquation indique donc une baisse de performance des équations de prédétermination lors du passage de l'échantillon de calage à l'échantillon de validation. Cette dégradation de la qualité de l'hydrogramme prédéterminé est assez sensible dans le cas de CREC.

Critères graphiques.

Pour tous les individus de l'échantillon de validation nous avons tracé les lames décadaires observées, calées et prédéterminées. A l'examen de ces graphiques, on constate la présence des cas extrêmes tels que le Douni en 1983.

Les figures 26, 27 et 28 présentent des exemples de tracés d'hydrogrammes sous forme de chronologies de lames décadaires.

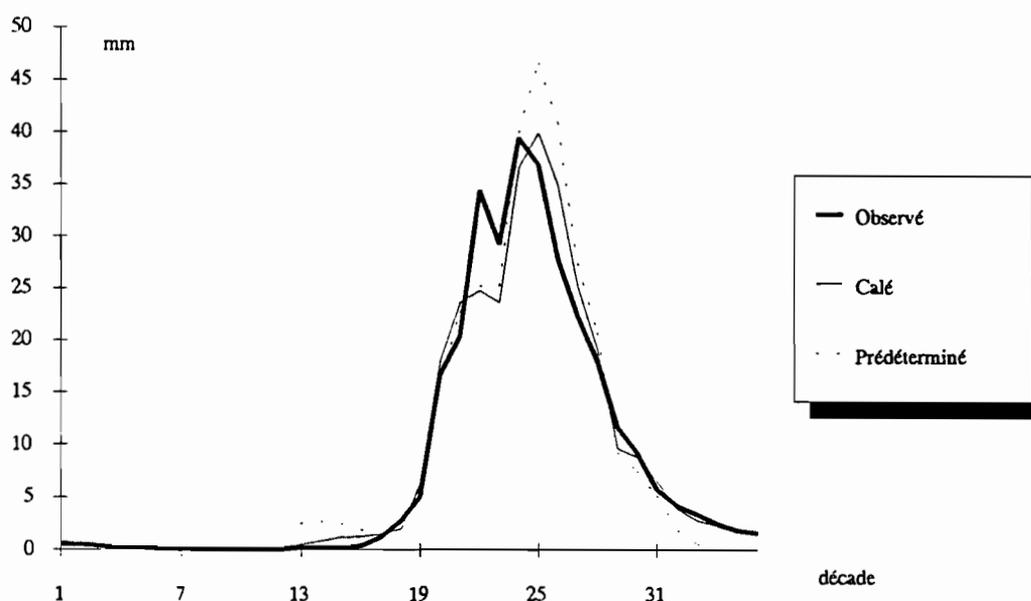


Figure 26 : La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981

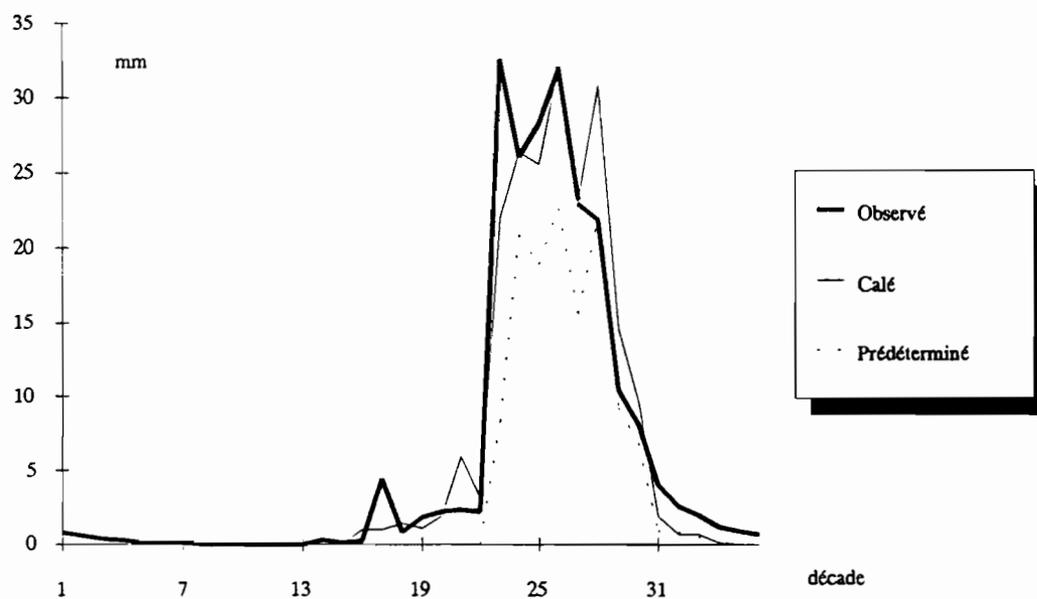


Figure 27 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1977

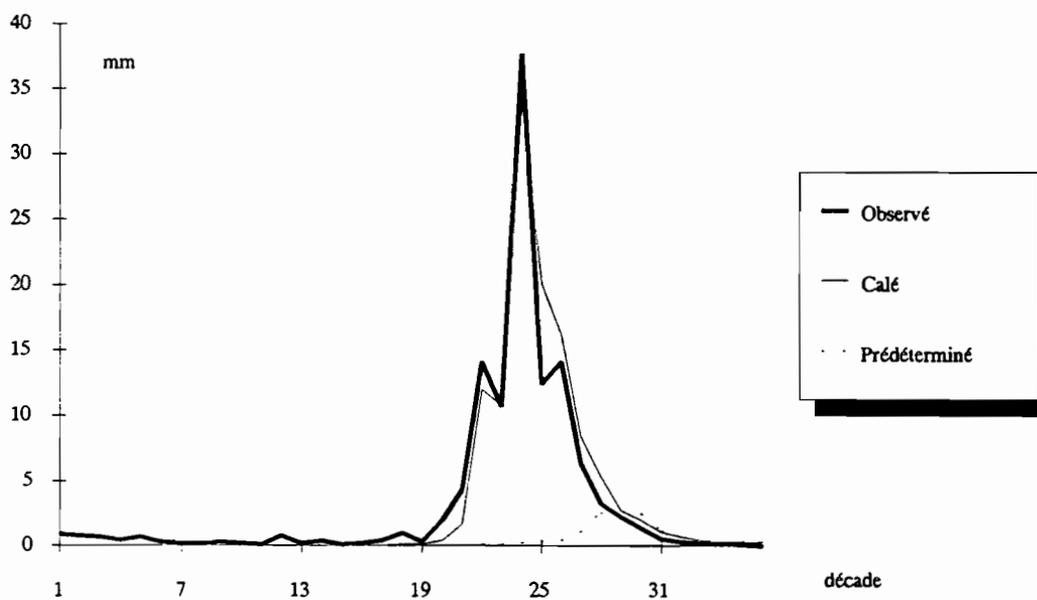


Figure 28 : La Douni à Pt 398, 1983

MODELE GR3

Le tableau 33 regroupe les équations de prédétermination des paramètres du modèle GR3.

Tableau 33 : Equations de prédétermination des paramètres du modèle GR3

$$\begin{aligned} \text{Ln A} &= 7.646 + 0.010 \text{ Cultures} - 4.084 \text{ Pr6} \\ \text{Ln B} &= -15.303 + 0.032 \text{ Cultures} + 3.302 \text{ Ln Pc8} \\ \text{Ln C} &= 2.937 \text{ Compacité} - 0.114 \text{ Forêt} - 12.766 \text{ Pr7} \end{aligned}$$

L'échantillon de validation est composé de 20 individus. La méthodologie retenue est identique à celle du modèle CREC.

Critères numériques.

Les mêmes critères numériques que précédemment ont été calculés sur les chronologies annuelles des lames décadaires.

Les trois séries sont comparées entre elles et on utilise la même notation que précédemment. Le tableau 34 donne, pour chacun des critères, la valeur moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum de l'échantillon de validation.

*Tableau 34 : Modèle GR3. Echantillon de validation.
Critères numériques calculés sur les lames décadaires*

	Corrélation	DAC 1	DAC 2	Bilan1	Bilan2	IRVC
Moyenne C/O	0.92	0.105	0.145	10.45	45.43	6.67
Moyenne P/O	0.89	0.114	0.149	39.32	67.74	28.52
Moyenne P/C	0.98	0.041	0.048	38.61	52.00	
Ecart-type C/O	0.06	0.107	0.142	8.95	28.97	7.89
Ecart-type P/O	0.06	0.123	0.146	60.89	57.62	35.18
Ecart-type P/C	0.02	0.048	0.059	61.22	58.63	34.88
Mode C/O	0.90	0.041	0.095	6.10	110.70	3.37
Mode P/O	0.89	0.042	0.080	12.60	59.40	9.16
Mode P/C	0.98	0.014	0.027	10.1	20.90	10.23
Mini C/O	0.77	0.004	0.001	1.70	3.20	0.19
Mini P/O	0.75	0.003	0.017	0.60	4.60	0.11
Mini P/C	0.93	0.002	0.005	0.60	2.80	0.41
Maxi C/O	0.99	0.337	0.526	34.90	110.70	33.17
Maxi P/O	0.99	0.353	0.580	266.40	268.60	128.36
Maxi P/C	0.99	0.187	0.252	251.00	251.00	127.92

Pour cet échantillon de validation, on a également procédé au calcul de critères numériques sur les séries de débits journaliers. Ces critères sont présentés dans le tableau 35.

**Tableau 35 : Modèle GR3. Echantillon de validation.
Critères numériques calculés sur les débits journaliers**

	Nash	Corrélation des débits journaliers.
Moyenne C/O	0.244	0.87
Moyenne P/O	0.559	0.83
Moyenne P/C	0.447	0.96
Ecart type C/O	0.145	0.09
Ecart type P/O	0.514	0.10
Ecart type P/C	0.715	0.04
Mode C/O	0.235	0.87
Mode P/O	0.389	0.80
Mode P/C	0.159	0.96
Mini C/O	0.039	0.62
Mini P/O	0.069	0.60
Mini P/C	0.004	0.89
Maxi C/O	0.624	0.98
Maxi P/O	2.298	0.98
Maxi P/C	2.955	0.99

A l'observation des tableaux 34 et 35, on peut noter :

- L'IRVC moyen passe de 7 à 29 et son écart type de 8 à 35. Cet IRVC moyen de 29 indique de bons résultats pour cet échantillon de validation. En effet, il signifie que lorsque l'on prédétermine les paramètres de GR3 pour ces 20 individus, l'erreur moyenne commise sur les lames décadaires calculées n'est que de 29%.
- Cette erreur de 29% est plus qu'acceptable si l'on prend en compte les éléments suivants :
 - L'imprécision de la connaissance de la pluie sur les bassins et, à un degré moindre, des débits.
 - Il s'agit, ici, d'un échantillon de validation qui représente donc des bassins versants non jaugés ; en effet, la méthode de prédétermination des paramètres n'utilise aucune mesure de débits.

- l'écart type de l'IRVC augmente et vaut 35 ; sa valeur maximale est assez élevée puisqu'elle est de 128. En examinant, de plus près, les valeurs de l'IRVC pour chaque individu on s'aperçoit que quatre de ces valeurs sur vingt, soit 20%, sont supérieures à 50 et 12 valeurs sur 20, soit 60% sont inférieures à 20. Si l'on exclut la valeur très forte de 128, la moyenne passe à 22, l'écart type à 26 et le maximum à 82.
- La corrélation des lames décadaires, ainsi calculées, avec les lames observées est bonne puisque la moyenne est de 0.89 avec un maximum à 0.99.
- En ce qui concerne les critères calculés sur les débits journaliers, le critère de Nash moyen vaut 0.56 et la corrélation moyenne des débits journaliers est de 0.83. Ces valeurs indiquent un comportement plus dégradé du modèle au pas de temps journalier.

Comme l'attestent les critères numériques utilisés ici, la méthode consistant à prédéterminer les paramètres du modèle GR3 par les équations du tableau 33 permet d'obtenir des séries de lames décadaires de bonne qualité, calculables sur des bassins versants non jaugés. La qualité de ces séries permet d'envisager leur utilisation dans le cadre de l'étude de projets d'aménagement.

Critères graphiques.

Les tracés des lames décadaires observées, calées et prédéterminées ont été effectués pour l'ensemble des individus de l'échantillon de validation.

L'étude de ces tracés révèle, ainsi, une bonne qualité générale des hydrogrammes décadaires prédéterminés. L'allure générale de l'hydrogramme est respectée, les tracés sont parfois au-dessus parfois au-dessous de l'hydrogramme observé sans qu'il soit possible de déterminer une tendance générale.

Les figures 29, 30 et 31 présentent des exemples de ces tracés de lames décadaires.

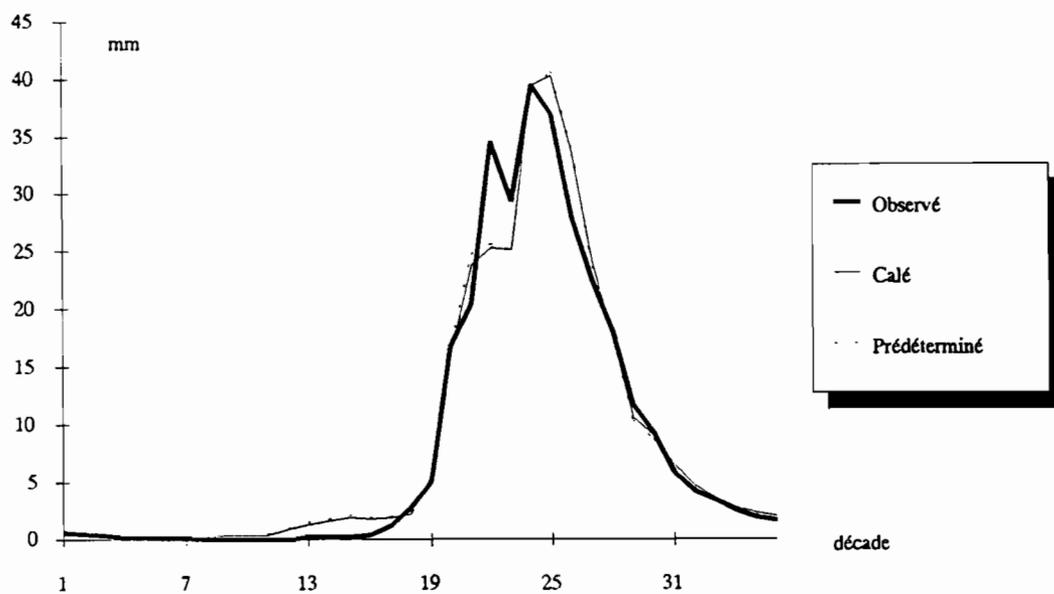


Figure 29 : La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981.

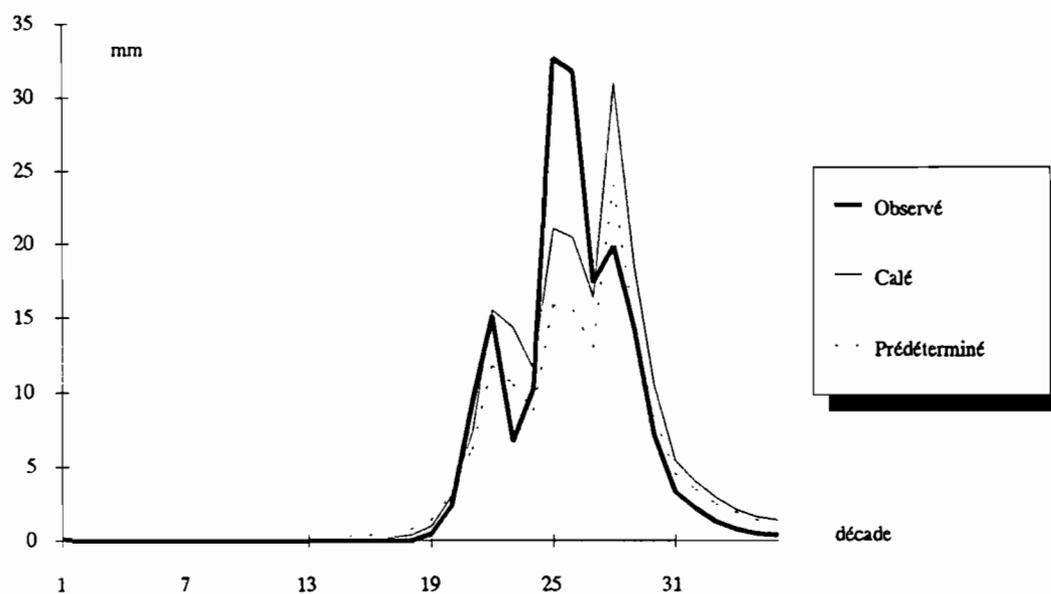


Figure 30 : La Tiemba à Lille, 1984.

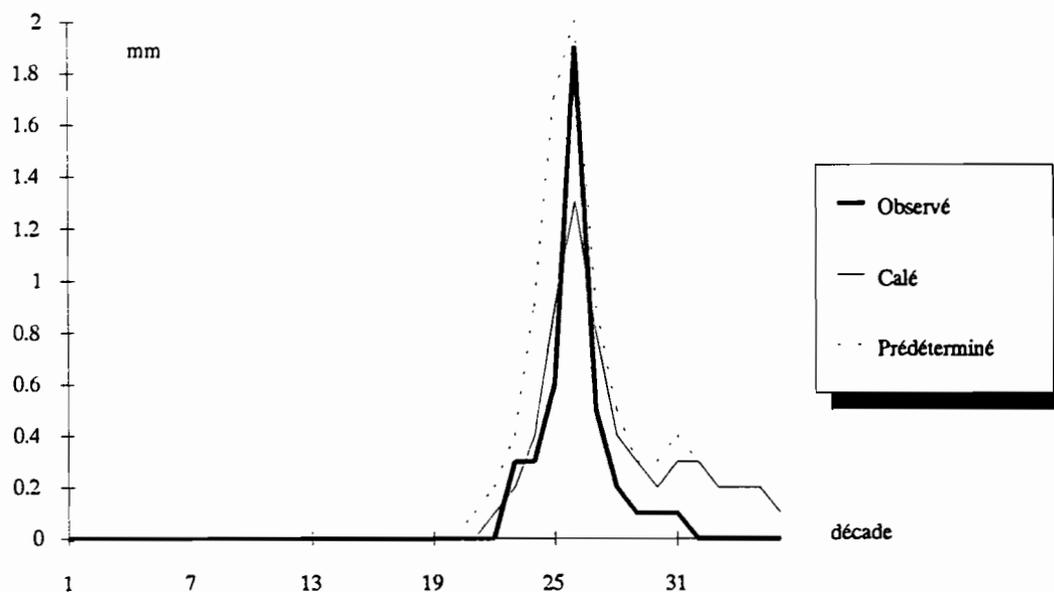


Figure 31 : Le Badenou à Rte de M'Bengue, 1983.

COMPARAISON CREC-GR3.

Nous avons regroupé dans le tableau 36 les valeurs moyennes, sur l'échantillon de validation, de quelques critères numériques concernant la comparaison des hydrogrammes prédéterminés et observés (notés P/O) pour les deux modèles.

Tableau 36 : Comparaison des hydrogrammes prédéterminés et observés
Valeurs moyennes des critères numériques

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	41	0.70	0.627	0.67
P/O GR3	29	0.89	0.559	0.83

La comparaison des critères numériques obtenus pour chaque modèle, et notamment la comparaison des valeurs moyennes obtenues pour l'échantillon telle qu'elle est présentée dans le tableau 36, permet de quantifier la différence entre les modèles CREC et GR3.

La valeur moyenne de l'IRVC est de 41 lorsque l'on utilise le modèle CREC, elle est de 29 lors de l'utilisation du modèle GR3. Cette différence de 12, qui correspond à une erreur de 12% sur le volume des crues, indique la supériorité du modèle GR3 au sens de ce critère numérique. L'examen des autres valeurs moyennes des critères numériques indique également un meilleur

comportement du modèle GR3 utilisé dans ces conditions. La corrélation sur les valeurs journalières et sur les valeurs décadaires est meilleure et le critère de Nash est plus faible (on cherche à le minimiser lors du calage d'un modèle).

L'observation plus détaillée des critères numériques conduit également à donner l'avantage au modèle GR3. Ainsi, par exemple, le nombre de valeurs du critère de Nash supérieures à 1 est de 5/20 pour le modèle CREC contre 2/20 pour le modèle GR3. On peut aussi noter la valeur de l'écart type des coefficients de corrélation décadaire qui vaut 0.06 pour le modèle GR3 contre 0.30 pour le modèle CREC.

Le nombre réduit de paramètres du modèle GR3 ainsi que leur réelle indépendance est à l'origine de la structure plus favorable des équations de régression multiple de prédétermination des paramètres. Cette structure plus fiable et de meilleure qualité conduit bien sûr à de meilleurs résultats lorsque l'on utilise ces équations sur l'échantillon de validation.

Pour tous les individus de cet échantillon, nous avons également tracé les lames décadaires observées, prédéterminées par CREC et prédéterminées par GR3. Les figures 32 et 33 présentent des exemples de ces tracés.

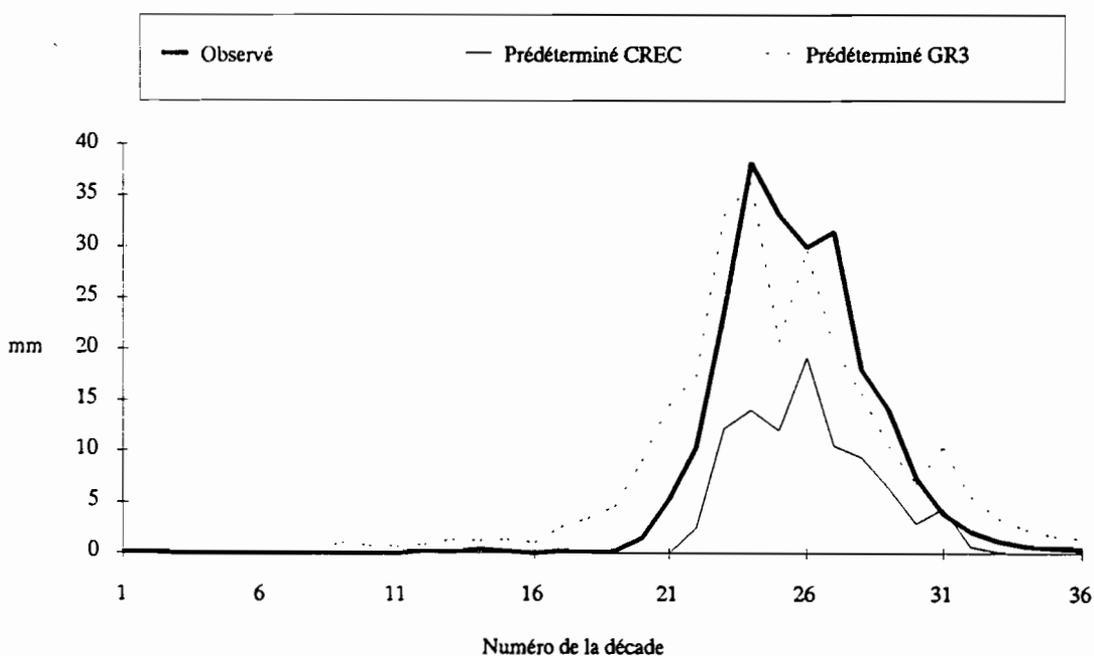


Figure 32 : La Bagoé à Kouto, 1985.

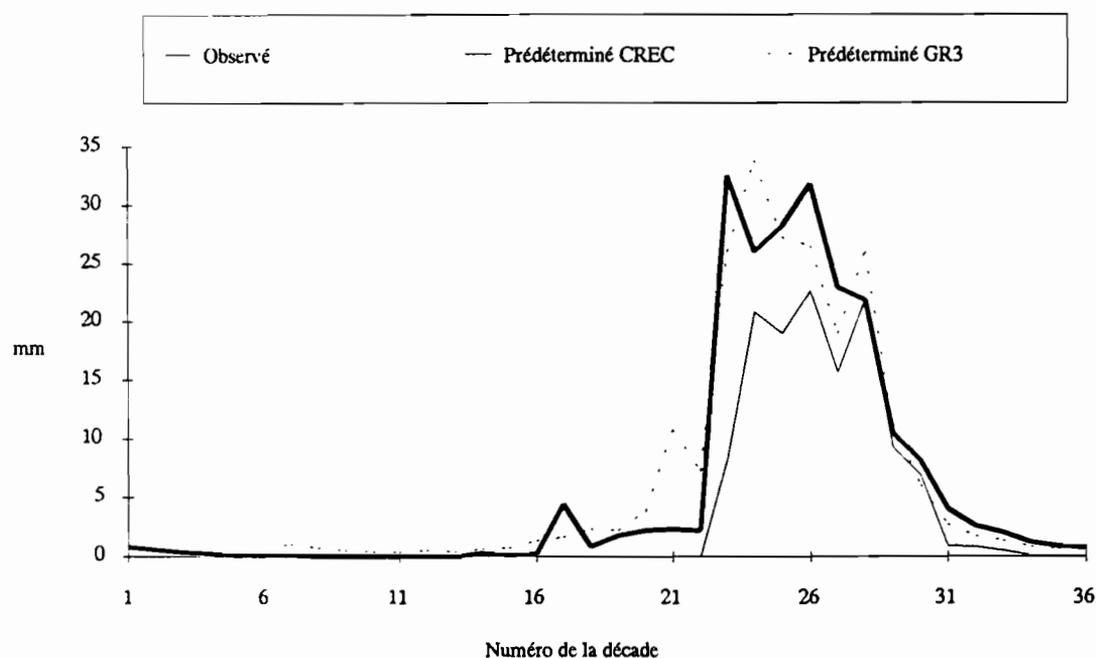


Figure 33 : Le Sien à Nafana-Sienso, 1977.

La figure 32 concerne la Bagoé à Kouto en 1985. Les critères numériques relatifs à ce tracé sont les suivants :

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	58.17	0.95	0.4712	0.91
P/O GR3	2.30	0.92	0.2194	0.89

Nous pouvons voir sur ce tracé que l'hydrogramme calculé par GR3 s'approche plus de l'observé que celui calculé par CREC ce qui est correctement reflété par les valeurs d'IRVC obtenues.

Les valeurs des coefficients de corrélation sont bonnes et très voisines. Si l'on met de côté l'aspect "volume de l'hydrogramme", cela traduit une assez bonne restitution de l'allure de la dynamique de l'hydrogramme : montées de crues et décrues en phase.

La figure 33 concerne le Sien à Nafana–Sienso en 1977. Les critères numériques concernant ce tracé sont les suivants :

	IRVC	Corrélation décadaire	Nash	Corrélation journalière
P/O CREC	34.75	0.92	0.3263	0.87
P/O GR3	4.94	0.96	0.2535	0.87

Pour ce tracé, la différence au niveau des critères numériques est un peu moins nette que pour le précédent. Nous pouvons cependant constater que l'hydrogramme calculé par le modèle GR3 est plus proche de l'observé que celui calculé par CREC qui sous estime les volumes écoulés.

En conclusion, comme l'attestent les critères graphiques et numériques utilisés, on note la supériorité du modèle GR3. Cette supériorité est vraisemblablement due au nombre restreint de paramètres du modèle GR3. Cette meilleure paramétrisation conduit à des paramètres indépendants et bien identifiés, favorisant à la fois le calage automatique du modèle et le calcul ultérieur des équations de prédétermination. Le modèle CREC, quant à lui, a des paramètres moins bien identifiés et ayant, entre eux, des coefficients de corrélation non nuls (exemple : corrélation X3–X4, -0.57 ; corrélation X3–X7, 0.59 ;...).

INSTABILITE DES RESSOURCES EN EAU ET GESTION D'UN SYSTEME D'EAU AMENAGE. CAS DU SASSANDRA.

Légèrement en marge du programme ERREAU en tant que tel, mais nécessitant une évaluation régionale des ressources en eau, il a été procédé à une étude de l'incidence d'une instabilité des ressources en eau sur la gestion d'un système d'eau aménagé. Cette étude a porté sur le cas du Sassandra en Côte d'Ivoire.

SCHEMA D'AMENAGEMENT RETENU POUR LE BASSIN DU SASSANDRA

Le bassin versant du Sassandra en amont de Buyo, importante retenue de quelques 9 milliards de m³ à vocation exclusivement hydro-électrique, couvre près de 45 000 km². C'est une zone qui, aujourd'hui encore, est très faiblement aménagée et dont les données hydrométriques disponibles peuvent être considérées comme représentatives de l'état naturel. A partir des reconnaissances de sites de retenues qui avaient été effectuées par EDF dans les années 1970, et des projets de développement envisageables à moyen terme, nous avons élaboré un schéma réaliste d'aménagement hydraulique de cette région.

Le Nord du bassin, situé en zone de savane et pour lequel on observe une saison des pluies unique est une zone à vocation agro-pastorale. Les trois ouvrages que nous y avons situés sont donc de capacité relativement réduite et à utilisation principalement agricole. Le Sud du bassin, quant à lui, est déjà en zone de forêt et présente deux saisons des pluies dans l'année. Les aménagements retenus pour cette zone sont d'une dimension beaucoup plus importante, et à vocation hydroélectrique en priorité.

Le tableau 37 présente les différentes caractéristiques et contraintes de gestion de ces ouvrages. Un premier essai avait été effectué avec un barrage supplémentaire portant le numéro 4, mais cette hypothèse, peu réaliste, a été abandonnée. Par contre, la numérotation des retenues n'a pas été modifiée par la suite. Les relations fonctionnelles des ouvrages, entre eux, ont été représentées en figure 34.

DONNEES GENEREES

Pour simuler le fonctionnement de ce système d'eau, nous avons été amenés à générer deux séries de deux cents ans de données décennales de pluies et de débits en différents points du bassin versant, correspondant à cinq postes pluviométriques du réseau ivoirien et aux stations hydrométriques contrôlant les sites potentiellement aménagés. La génération de ces données a été précédée d'une étude visant à confirmer l'instabilité des chroniques de précipitations et à fixer l'année de la "rupture" observée dans ces séries chronologiques. Nous étions alors en mesure de générer une série de deux cents ans ayant les caractéristiques observées avant cette date, et une autre série, de même longueur, représentative de ce qui est observé depuis.

Tableau 37 : Caractéristiques du système d'eau aménagé.

Retenue	Capacité (Mm3)	Module interann.	Objectif	Débit réservé	Besoins en irrigation	Production hydroélec.
1	62	5 m3/s	Agricole	0.32 m3/s	12000 ha soja en amont	—
2	32.5	35 m3/s	Agricole	2.3 m3/s	10000 ha de canne à sucre en amont	—
3	30	65 m3/s	Agri/Elec	3 m3/s	500 ha de riz 2 cultures/an 250 ha vivrier	2 turbines Q= 40 m3/s
5	5000	247 m3/s	Electricité	10 m3/s	—	2 turbines Q= 160 m3/s turbinage continu
6	1450	65 m3/s	Agri/Elec	3.5 m3/s	1000 ha de riz 200 ha vivrier	2 turbines Q= 50 m3/s

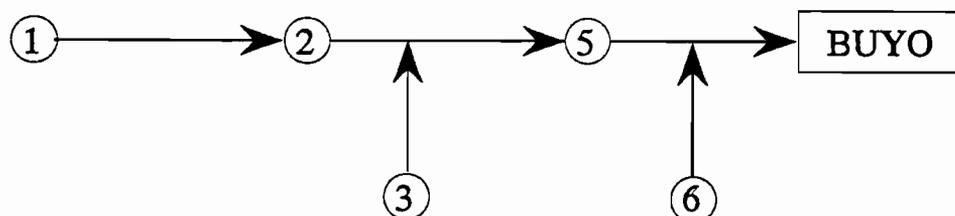


Figure 34 : Relations fonctionnelles des ouvrages entre eux.

ETUDE DE L'INSTABILITE DES SERIES PLUVIOMETRIQUES.

A l'issue de cette étude, nous avons distingué la période "avant 1969" et la période "après 1969", ce qui est en accord avec les résultats présentés par Sircoulon (1990) et Hubert et al (1989).

GENERATION DE LA PLUVIOMETRIE DECADEAIRE.

Nous avons opté pour une procédure simplifiée dont les résultats se sont montrés suffisamment représentatifs. Pour chacun des postes pluviométriques, une loi des fuites a été ajustée pour chaque décennie à partir des données observées. Puis, par tirage au hasard dans ces différentes lois ajustées, nous avons généré deux cents ans de pluviométrie décennale. En procédant ainsi, nous avons obtenu des séries générées dont les caractéristiques sont très voisines des séries observées tout en offrant un éventail de situations variées (Sakho, 1991).

GENERATION DES APPORTS NATURELS AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DE REFERENCE.

Disposant des séries pluviométriques générées, nous avons choisi de représenter la relation pluie-débit à l'aide de modèles autorégressifs et corrélatifs, fonctionnant au pas de temps décennal. Les coefficients de corrélation des différentes équations établies pour générer les chroniques de débits étaient tous supérieurs à 0.80, voire à 0.90 pour les stations aval du Sassandra, ce qui est satisfaisant au vu des objectifs visés par cette étude.

L'ensemble des hypothèses qui ont été faites, tant au niveau de la génération des pluies qu'au niveau des débits n'a pas eu pour effet de "dénaturer" le régime des eaux au point de lisser les écarts ou au contraire de créer des différences fictives. Elles ont permis, en fait, de reconstituer des chroniques "plausibles", qui sont compatibles avec ce que l'on connaît, et qui se résume à une information pluie-débit concomitante très réduite.

LE MODELE DE SIMULATION DE FONCTIONNEMENT

Le modèle de simulation de fonctionnement du système d'eau aménagé devait prendre en compte, essentiellement, deux types de besoins, tout en tenant compte d'un débit garanti aval :

- Irrigation: en amont de la retenue (le pompage est alors effectué directement dans la retenue), ou en aval de la retenue avec, cette fois, un pompage au fil de l'eau dans le bief aval.
- Hydro-électricité: certaines des retenues envisagées devant en effet être équipées de turbines.

En établissant un bilan complet sur chacune des retenues, le modèle doit être en mesure de fournir, à chaque pas de temps (donc à chaque décennie), l'état de chacun des ouvrages et les niveaux de satisfaction des différentes contraintes de gestion.

ANALYSE DES REPONSES DU SYSTEME D'EAU AMENAGE AUX SIMULATIONS DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement du système d'eau aménagé a été simulé au pas de temps décadaire durant deux cents années dans les conditions de type "avant 1969" et après "1969".

ANALYSE GLOBALE DES REACTIONS

Le modèle de simulation a permis de calculer les apports à chaque retenue en l'état aménagé du système d'eau pour chacune des situations. Les différences sont très marquées et, bien entendu, à l'avantage de la série "avant 1969". Elles s'accroissent en valeur absolue avec la superficie des bassins, et du Nord vers le Sud. Sur les barrages 5 et 6, ces écarts entre apports "avant 1969" et "après 1969" peuvent atteindre jusqu'à plusieurs centaines de millions de m³ par an. Les volumes annuels de déversement s'inscrivent également dans la logique de la diminution de la ressource "après 1969", puisque les débordements constatés pour cette simulation sont systématiquement les plus faibles. Dans le cas du barrage 6, par exemple, on n'y observe pratiquement jamais de déversement alors qu'ils oscillaient régulièrement autour de 150 millions de m³ par an "avant 1969". L'algorithme utilisé permet d'estimer, par une méthode simplifiée (Sakho, 1991), des volumes de pertes dans le bief situé en aval de la retenue. Elles apparaissent plus importantes pour la série "après 1969" que pour la série "avant 1969", et ce pour les barrages à faible capacité (barrages 1 et 2), indiquant par là que la diminution des ressources induit une baisse du niveau des lâchures au sens large; ce qui entraîne une diminution des volumes qui transitent dans les biefs situés en aval des retenues à faible capacité. Ces pertes restent cependant relativement faibles en valeur absolue.

ANALYSE DES DEFAILLANCES AU REGARD DES CONTRAINTES

Satisfaction de la demande agricole.

L'évaluation des performances du système par rapport à cette contrainte est faite à partir des moyennes décadaires des 200 années de simulation et exprimée en pourcentage de satisfaction. Les ouvrages du Nord du bassin (1, 2 et 3), dont la vocation est hydro-agricole, présentent des défaillances vers fin Mars/début Avril. Ces défaillances prennent beaucoup d'ampleur pour la série des apports "après 1969".

Débit garanti.

La satisfaction de la contrainte débit garanti est liée à celle des besoins agricoles. Cependant, le niveau de défaillance est moindre (seuls les barrages 1 et 2 montrent des défaillances) dans la mesure où, dans le modèle de simulation, une priorité a été affectée au débit garanti par rapport aux besoins hydro-agricoles. La gestion de la pénurie se fait donc au détriment de l'agriculture, mais plus sévèrement "après 1969" qu'"avant 1969".

Production hydro-électrique.

La production d'hydro-électricité est grande consommatrice des ressources en eau. Par comparaison avec l'agriculture, on pouvait donc s'attendre à une plus grande sensibilité du système face à la diminution des ressources. Sur les trois barrages équipés de turbines (3, 5 et 6), des déficits de production hydro-électrique apparaissent de façon beaucoup plus accentués dans la période "après 1969". Le barrage 3 a la production la plus stable et la plus proche de son niveau nominal tout au long de l'année. En effet, c'est de Janvier à fin Mars, que l'on assiste aux défaillances de cet ouvrage qui peuvent atteindre 25% sur la période "après 1969" au plus fort de la saison sèche, alors qu'elles dépassent à peine 10% "avant 1969". Le barrage 5 présente une baisse de performance systématique, de l'ordre de 5% en moyenne par décennie sur toute l'année, de la série "après 1969" par rapport à la série "avant 1969". Le barrage 6 illustre, quant à lui, le cas le plus criant de contre-performance due à la diminution de la ressource. "Avant 1969", la production est plus ou moins constante et se situe autour de 90% de satisfaction de la contrainte hydro-électrique. "Après 1969", à la fin de la saison sèche, on se trouve, en moyenne, à peine à 55% de satisfaction de la production décennale nominale, ce qui représente un déficit de l'ordre de 30% par rapport à la série d'"avant 1969". En outre, la courbe de production hydro-électrique de la série "après 1969" ne dépasse que très rarement les 80% de la production nominale. On observe également, et toujours pour cette série, aux alentours de la 21ème décennie, une légère diminution de la production, conséquence de la petite saison sèche qui s'observe dans le Sud du pays. De plus, la production montre une grande variabilité tout au long de l'année, pouvant atteindre une amplitude de 25% entre les valeurs les plus basses et les valeurs les plus élevées, alors qu'elle n'est que de 10% "avant 1969".

ETUDE DE QUELQUES DEFAILLANCES PARTICULIERES

Nous nous sommes particulièrement intéressés à certaines années des séries chronologiques générées afin de tenter de mieux appréhender les situations pouvant conduire à des défaillances du système. Elles ont été choisies parmi celles qui présentent le plus grand nombre de décades défaillantes consécutives, ce qui a pour effet d'augmenter leur sévérité. Cette étude était possible dans la mesure où le système que nous avons mis en place offre "avant 1969" et "après 1969" les mêmes successions d'années sèches et humides du fait de la génération des données à partir des mêmes séries de nombres au hasard. Cette analyse a montré que pour les barrages à faible capacité la différence est très minime qui fait passer d'une situation satisfaisante à une défaillance. Généralement la chute est brutale, les retenues ne pouvant jouer un véritable rôle de tampon. En cas d'apports déficitaires prolongés, la situation persiste, occasionnant principalement de sérieuses difficultés à l'agriculture irriguée. Pour les barrages à capacité plus importante, la progressivité des défaillances est plus accentuée, les retenues pouvant compenser quelques temps la faiblesse des apports. Cependant, aucun seuil d'apports minimum sur une période donnée, en dessous duquel se produisent rupture et défaillance, n'a pu réellement être mis en évidence.

IMPACT DE L'AMENAGEMENT AMONT SUR BUYO

La réalisation d'un aménagement du type de celui que nous venons de décrire pourrait avoir un sérieux impact sur le fonctionnement du barrage de Buyo (9 milliards de m³ et un productible garanti de 610 GWh). Les apports de cette retenue avaient été évalués à partir des données des stations du N'Zo à Guiglo et du Sassandra à Guessabo sur la période 1955-1974, c'est à dire avant la période de sécheresse. Dans le cadre du système d'eau aménagé, les sorties

des barrages 5 et 6 correspondent respectivement à ces deux stations. Ne disposant pas des consignes de turbinage propres à Buyo, nous n'avons pas pu évaluer l'impact de l'aménagement à partir de la production électrique correspondant aux différents cas envisagés: pas d'aménagement amont, aménagement amont et apports type "avant 1969", aménagement amont et apports type "après 1969". Nous avons donc fait porter la comparaison sur les apports, cherchant à évaluer et à chiffrer l'impact de l'aménagement sur la régularité et l'abondance des ressources disponibles pour Buyo dans les différents cas de figure.

Les apports au barrage de Buyo, issus des aménagements, ont été calculés pour les années décennales sèches et humides [tab.38]. Ils ont ensuite été comparés aux conditions moyennes de fonctionnement de Buyo. L'aménagement du bassin versant du Sassandra en amont de Buyo entraînerait d'une manière générale une forte diminution de la variabilité des apports annuels. La série de type "avant 1969" entraîne, en effet, une nette régularisation des apports mensuels, en particulier en saison sèche, pour un niveau de performance global comparable, voire légèrement supérieur, à celui de l'état naturel. La série de type "après 1969" conduit, quant à elle, à un déficit d'apports de près d'un milliard de m³ en année moyenne, ce qui ne serait pas sans conséquences sur le fonctionnement de l'ouvrage. Cette analyse de l'impact sur Buyo montre l'incidence que pourrait avoir, sur des aménagements déjà existants, une sécheresse qui irait en se prolongeant.

Tableau 38 : Apports annuels à Buyo, en millions de m³, pour différents cas de figure.

	Apports moyens annuels (Mm ³)	Année décennale humide (Mm ³)	Année décennale sèche (Mm ³)
Situation naturelle	9681	14037	6100
Situation aménagée "avant 1969"	9858	11528	8468
Situation aménagée "après 1969"	8790	9732	7594

CONCLUSION

Cette étude menée à partir d'une situation réelle, s'est appuyée sur la nette diminution des ressources en eau constatée depuis la fin des années 1960 dans toute la zone intertropicale africaine. L'exemple choisi pour en mesurer l'impact a le mérite de figurer au nombre des futurs projets d'équipement de la Côte d'Ivoire, ce qui lui confère une forte connotation d'utilité dans le cadre de la gestion des ressources naturelles ivoiriennes.

Certes, pour pallier l'absence de données, des moyens qui ont pu paraître audacieux ont été utilisés (génération de la pluviométrie, modélisation pluie-débit); leur pertinence est peut-être discutable, mais en l'occurrence, la rigueur la plus absolue a dû laisser la place à la nécessité.

On a alors pu montrer que la diminution des ressources, comme on l'observe depuis la fin des années 1960, entraîne des défaillances plus sévères et plus longues au regard de contraintes qui, par contre, sont satisfaites lorsque les chroniques d'apports ont les caractéristiques des séries observées avant 1969. Ainsi, bien que la pluviométrie reste plus abondante et mieux répartie que plus au Nord en région sahélienne, la zone forestière humide présente, elle aussi, des situations critiques vis-à-vis de ressources en baisse, reflet de la tendance climatique générale observée aujourd'hui dans toute la région. Si la situation actuelle devait se prolonger en Afrique de l'Ouest, les ressources en eau de surface ne seraient plus en correspondance avec des besoins déterminés et planifiés à partir de chroniques de données présentant des caractéristiques différentes de celles observées aujourd'hui. Les fréquences de défaillances seraient alors beaucoup plus élevées provoquant d'importantes chutes de production des aménagements réalisés.

Au vu de ces fluctuations et des difficultés d'adaptation présentées par les ouvrages, il faudrait pouvoir développer une réflexion allant dans le sens d'une conception dynamique des systèmes d'eau qui intégrerait, en partie, cette instabilité. On s'orienterait, ainsi, vers une reformulation de la notion de "normes hydrologiques" dont le caractère figé apparaît aujourd'hui comme un sérieux handicap à la réalisation de nouveaux aménagements.

Publications, communications, thèses et rapports

PUBLICATIONS

SERVAT E., DEZETTER A., 1988

"Modélisation globale de la relation pluie-débit: des outils au service de l'évaluation des ressources en eau". Hydrologie Continentale, vol. 3, n°2, 1988: 117-129.

SERVAT E., DEZETTER A., 1990

"Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise". Hydrologie Continentale, vol.5, n°2, 1990: 147-165.

SERVAT E., DEZETTER A., 1991

"Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area". Hydrological Sciences Journal, 36,4,8/1991.

SERVAT E., DEZETTER A., 1993

"Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Essai d'extension aux bassins versants non jaugés." Accepté pour publication à Hydrologie Continentale 1993.

SERVAT E., DEZETTER A., 1993

"Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in north western Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments." Accepté pour publication à Journal of Hydrology 1993.

SERVAT E., SAKHO M., 1993

"The effects of the instability of water resources upon the management of a planned water system in regions other than Sahelian. The case of the Sassandra catchment basin in Ivory Coast." Soumis pour publication à Hydrological Sciences Journal.

SERVAT E., KOUAME B.,

"Modélisation conceptuelle de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau à différents pas de temps en Côte d'Ivoire". En préparation pour soumission à Hydrological Sciences Journal.

SERVAT E., KOUAME B.,

"Analyse et élaboration d'un modèle conceptuel global de relation pluie-débit au pas de temps mensuel. Application et validation en Côte d'Ivoire." En préparation pour soumission à Journal of Hydrology.

COMMUNICATIONS

SERVAT E., DEZETTER A., 1988.

"Modélisation globale de la relation pluie-débit: des outils au service de l'évaluation des ressources en eau". Séminaire International sur l'Etat de l'Art en Hydrologie et en Hydrogéologie dans les zones arides et semi-arides d'Afrique, UNESCO/CIEH/IWRA, Ouagadougou, Burkina Faso, Novembre 1988.

SERVAT E., DEZETTER A., 1988

"Modélisation conceptuelle globale de la relation pluie -débit". 2^{ème} Séminaire Informatique ORSTOM (SEMINFOR). Montpellier 26-28 Septembre 1988.

SERVAT E., DEZETTER A., 1990

"Modèles conceptuels globaux et critères numériques de calages". ORSTOM, 3^e Journées ULM, Juin 1990.

SERVAT E., KOUAME B., 1991

"Modélisation pluie débit en zone de forêt tropicale. Apports et adéquation pour la gestion des ressources en eau". VII^{ème} Congrès Mondial des Ressources en Eau, IWRA, Rabat, Maroc. Mai 1991.

SERVAT E., DEZETTER A., 1991

"Prise en compte du type d'occupation des sols dans une modélisation pluie-débit en savane soudanaise". Symposium "Hydrological Interactions Between Atmosphere, Soil and Vegetation". Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991. IAHS Publ. n°204.

SERVAT E., SAKHO M., 1992

"Instabilité des ressources en eau de surface et gestion d'un système d'eau aménagé. Cas du Sassandra en Côte d'Ivoire." 22^{èmes} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris, Septembre 1992.

SERVAT E., DEZETTER A., 1992

"Evaluation des ressources en eau dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Extension aux bassins versants non jaugés." 22^{èmes} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris, Septembre 1992.

DEZETTER A., SERVAT E., 1992

"La régionalisation des paramètres des modèles pluie-débit. Exemple de la zone Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire". VIII^e Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, France, 22-23 Septembre 1992.

SERVAT E., KOUAME B., 1992

"Essai de caractérisation des paramètres des modèles pluie-débit dans le Centre et le Sud de la Côte d'Ivoire". VIII^e Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, France, 22-23 Septembre 1992.

SERVAT E., SAKHO M., 1992

"Fonctionnement d'un système d'eau sous différentes hypothèses de ressources en eau. Cas du bassin du Sassandra en Côte d'Ivoire". VIII^e Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, France, 22-23 Septembre 1992.

SERVAT E., SAKHO M., 1993

"Incidences de l'instabilité des ressources en eau sur la gestion d'un système d'eau aménagé. Cas du Sassandra en Côte d'Ivoire". Fourth Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences, Yokohama, Japan, 11-23 July 1993.

THESES**DEZETTER A., 1991**

"Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savane soudanaise (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)". Thèse soutenue le 16 Septembre 1991 (Université Montpellier II).

SAKHO M., 1991

"Incidences de l'instabilité des ressources en eau de surface sur les performances simulées d'un système d'eau. Exemple du Sassandra en Côte d'Ivoire". Thèse soutenue le 29 Novembre 1991 (Université Montpellier II).

KOUAME B., 1992

"Adéquation de différents modèles globaux pluie-débit pour déterminer les apports en eau dans les zones de transition et de forêt de la Côte d'Ivoire. Essai de régionalisation des paramètres". Thèse soutenue le 27 Novembre 1992 (Université Montpellier II).

RAPPORTS

SERVAT E., 1987

"Programme ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en EAU). Application à la région Nord Ouest de la Côte d'Ivoire". ORSTOM UR F4 Janvier 1987.

SERVAT E., DEZETTER A., 1988

SIMPLE et ROSEN: deux méthodes d'optimisation non linéaire. Théorie et pratique. (1 rapport et 1 logiciel). Notice OVNIh du Laboratoire d'Hydrologie n°1. Juin 1988

SERVAT E., DEZETTER A., 1988

Etude pluviométrique de la zone géographique couverte par ERREAU. (40 pages et 150 pages d'annexes). ORSTOM Centre d'Adiopodoumé. Novembre 1988.

SERVAT E., 1989

SIMPLE et ROSEN, deux méthodes d'optimisation non linéaire. Diffusé dans la Gazette Informatique du Laboratoire d'Hydrologie, n°5, Février 1989.

SERVAT E., KOUAME B., 1989

Modélisation conceptuelle globale de la relation pluie débit en Côte d'Ivoire. Etude pluviométrique. ORSTOM Centre d'Adiopodoumé. Février 1989.

SERVAT E., KOUAME B., 1989

Modélisation conceptuelle globale de la relation pluie débit en Côte d'Ivoire. Etude hydrométrique. ORSTOM Centre d'Adiopodoumé. Mai 1989.

SERVAT E., DEZETTER A., LAPETITE J.M., 1990

Modélisation pluie-débit. Etude et sélection des critères de calage des modèles pluie-débit. Programme ERREAU Note 2.

SERVAT E., LAPETITE J.M., 1990

Occupation des sols et réseaux hydrographiques. Cartographie. Programme ERREAU. Note 3.

Valorisation

La valorisation du programme ERREAU et de ses résultats a pris différentes formes :

- La publication d'articles dans des revues de haut niveau et la participation à de nombreux congrès et colloques. La liste en a été donnée précédemment et nous n'y reviendrons pas ici.
- L'édition d'un rapport de synthèse qui regroupe tous les éléments et résultats relatifs au programme.
- L'organisation des VIII^e Journées Hydrologiques de l'ORSTOM sur le thème "Régionalisation en Hydrologie. Application au Développement". Co-organisées par L. LE BARBE et E. SERVAT, ces Journées ont accordé une large place au programme ERREAU et à ses résultats.
- La tenue à Abidjan le 15 Juin 1993 d'un Séminaire de clôture du programme ERREAU ayant pour but la présentation des résultats à l'ensemble des structures ivoiriennes concernées par les problèmes de gestion des ressources en eau.
- La réalisation du logiciel EMILE, valorisation de l'important travail informatique réalisé dans le cadre d'ERREAU et initié, en particulier, par A. DEZETTER. EMILE est un logiciel convivial, qui intègre plusieurs modèles pluie-débit, et qui offre à l'utilisateur de nombreuses possibilités tant au niveau de la préparation des données que de l'exploitation des résultats. Nous avons consacré ci-dessous un chapitre particulier à EMILE.

EMILE (Ensemble Modélisateur Intégré pour le calcul des Lames d'Eau).

POURQUOI EMILE?

Les modèles hydrologiques pluie-débit sont généralement difficiles à utiliser pour un non hydrologue comme pour un non informaticien, ils demandent des manipulations de fichiers souvent longues et fastidieuses. De plus les résultats obtenus sont rarement directement exploitables ; il faut souvent traiter ces résultats à l'aide de tableurs grapheurs ou de logiciels de traitements statistiques. Pour remédier à ces problèmes, il fallait un logiciel qui gère les données des stations hydrométriques et des postes pluviométriques de façon transparente, qui offre les différentes possibilités d'utilisation d'un ou plusieurs algorithmes pluie-débit, et qui permette une première exploitation des résultats. C'est pour remédier à ces problèmes que le logiciel EMILE a été créé.

LES MODELES HYDROLOGIQUES.

EMILE intègre 3 modèles globaux de la relation pluie-débit :

- CREC mis au point au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université de Montpellier II.
- GR3 mis au point par la Division Hydrologie du CEMAGREF à Antony.
- MODGLO mis au point à l'ORSTOM.

Tous ces modèles sont utilisés au pas de temps journalier.

LES STATIONS HYDROMETRIQUES ET LES POSTES PLUVIOMETRIQUES.

EMILE gère les stations hydrométriques (assimilées aux bassins versants qu'elles contrôlent) et les postes pluviométriques. Cette gestion permet de classer les données par bassin ou par poste. De plus un lien dynamique entre les bassins (stations hydrométriques) et les poste pluviométriques est possible. Ce lien permet le calcul des pluies moyennes d'un bassin. Créé par l'utilisateur, ce lien dynamique permet d'utiliser l'information d'un poste pluviométrique sur plusieurs bassins.

LES DONNEES TRAITÉES.

Les modèles hydrologiques globaux traitent plusieurs types de données : pluies moyennes sur un bassin, débits et évapotranspiration (ETP). EMILE permet de gérer facilement ces trois types de données à l'aide d'une série de menus de préparation des données qui servent à leur mise en forme pour les modèles hydrologiques. De nombreuses possibilités sont offertes à l'utilisateur pour acquérir ces données.

Acquisition des débits :

- Importation selon plusieurs formats de fichiers dont les fichiers Hydrom.
- Saisie des débits journaliers.

Acquisition des pluies moyennes :

- Importation selon plusieurs formats de fichiers dont les fichiers Pluviom.
- Saisie des pluie moyennes journalières.
- Calcul des pluies moyennes à l'aide des différents postes pluviométriques et de leurs coefficients de pondération. Les pluies journalières de chaque poste pluviométrique peuvent être saisies ou importées de la même façon que les pluies moyennes journalières.

Acquisition des ETP :

- Importation des ETP journalières, décadaires ou mensuelles, ces dernières étant ensuite transformées en données journalières.
- Saisie des ETP journalières, décadaires ou mensuelles.
- Calcul des ETP selon la formule de Penman, les paramètres de cette formule peuvent être saisis ou importés au pas de temps journalier ou mensuel.
- Calcul des ETP selon la formule de Thornthwaite, les paramètres de cette formule peuvent être saisis au pas de temps mensuel.

En outre, plusieurs outils de visualisation et d'étude des concomitances permettent de tester la présence et la cohérence des données. On peut, par exemple, visualiser les pluies et les débits sur un graphique et demander la grille de saisie pour très simplement modifier une ou plusieurs valeurs de pluies ou de débits.

LES DIFFERENTS TYPES DE SESSIONS.

EMILE autorise plusieurs types de sessions : calages manuels, calages automatiques, simulations et générations de débits. Un calage manuel comme un calage automatique sert à générer des valeurs optimales de paramètres de modèles pour un bassin donné.

Avec le calage manuel, l'utilisateur change lui même les valeurs des paramètres du modèle pour minimiser les écarts entre l'hydrogramme des débits calculés et celui des débits observés. Durant le calage il est possible de visualiser à tout moment les hydrogrammes de comparaison des débits calculés et observés ainsi que la valeur d'une fonction critère. Ces éléments permettent de suivre avec précision l'évolution du calage, et ainsi, de progresser pas à pas vers une solution optimale.

Le calage automatique est, pour l'utilisateur, plus simple d'utilisation que le calage manuel. En effet pour faire évoluer l'hydrogramme des débits calculés comme il le souhaite, l'utilisateur doit bien connaître le modèle et l'influence de chaque paramètre sur le calcul. Le calage automatique, par contre, est une recherche automatisée des valeurs optimales des paramètres du modèle pour le bassin considéré et sur la période étudiée. Cette recherche est basée sur la méthode itérative de Rosenbrock. Pour effectuer un calage automatique, il suffit donc de donner les valeurs de départ des paramètres et un nombre d'itérations pour effectuer le calage.

La simulation est une validation de calage, elle sert à en vérifier les résultats. Par exemple si un calage a été effectué sur l'année 1981, il peut être intéressant de faire une simulation, c'est à dire exécuter le modèle sur une période plus longue, par exemple de 1982 à 1986, avec les paramètres obtenus lors de ce calage. On peut ainsi vérifier si les paramètres optimisés pour l'année 1981 sont satisfaisants pour toute la période 1981-1986.

La génération de débit permet comme son nom l'indique de générer des débits calculés. Pour cette opération, il n'est pas nécessaire de disposer des débits observés. Une fois que les paramètres du modèle sont considérés comme satisfaisants pour un bassin donné, on peut générer des débits calculés pour ce même bassin sur une période ou l'on ne possède que la

pluie comme données. Si les paramètres ont été auparavant validés avec succès, les débits calculés seront alors voisins des débits réels qui auraient pu être observés.

LES TRAITEMENTS PAR LOTS.

Les traitements par lots permettent d'effectuer plusieurs sessions les unes à la suite des autres. C'est particulièrement intéressant pour les calages automatiques qui peuvent prendre facilement une demi heure. Un calage sur 5 ans ou l'on demande 500 itérations demande environ 20 minutes sur un PC de type 386 sx 20. Le traitement par lot se décompose en deux phases : préparation et lancement. La phase de préparation consiste à donner tous les paramètres nécessaires à l'exécution de la session. Il suffit ensuite de lancer les traitements (durant la nuit par exemple). Les traitements s'effectuent alors les uns à la suite des autres, les résultats étant sauvegardés pour chaque session exécutée avec succès.

L'EXPLOITATION DES RESULTATS.

La phase d'exploitation des résultats vient en complément des sessions d'utilisation des modèles proprement dites. Durant l'exécution d'un calage, on peut connaître la valeur de la fonction critère et visualiser les hydrogrammes des débits calculés et des débits observés. Ces éléments sont pratiques pour se faire une idée quant à la qualité d'un calage ou d'une simulation, mais il s'avèrent parfois insuffisants. L'exploitation des résultats fournit plusieurs types de graphiques (hydrogrammes, valeurs des niveaux de réservoirs de modèles,...) ainsi que divers calculs statistiques (coefficients d'IRVC, écarts type, coefficients de corrélation, coefficients d'autocorrélation,...) qui permettent une évaluation plus précise de la qualité d'une session de calage ou de simulation.

LES UTILITAIRES.

EMILE dispose également d'une série d'utilitaires qui permettent une gestion efficace des données et des sessions ainsi que des communications avec d'autres logiciels.

Des utilitaires de sauvegarde, suppression et restauration des données :

- Sauvegarde d'une zone. Une zone est un regroupement de plusieurs bassins versants, la zone du fleuve Niger par exemple comprend tous les bassins versants situés sur le bassin hydrographique du Niger.
- Restauration d'une zone.
- Suppression d'une zone.
- Sauvegarde d'un bassin, cette opération sauve toutes les données du bassin (pluie, débit observé et ETP), y compris les résultats de sessions (Débits calculés, paramètres du modèle,...).
- Restauration d'un bassin.
- Suppression d'un bassin.

- Sauvegarde d'un poste pluviométrique. Sauve les pluies journalières relevées pour un poste.
- Restauration d'un poste pluviométrique.
- Suppression d'un poste pluviométrique.
- Purge d'une session. Permet de supprimer les résultats d'une session.

Des utilitaires d'exportation de données :

- Pluies par poste.
- Pluies moyennes.
- Débits journaliers.
- ETP journalières.
- Paramètres de calage.
- ETP et ETR.
- Niveau des réservoirs.
- Pluies et débits.
- Résultats d'exploitation.

Conclusions et perspectives

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Arrivés au terme du programme ERREAU, il convient d'en tirer les principaux enseignements et d'esquisser certaines perspectives dans le domaine de l'évaluation et de la gestion des ressources en eau.

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, soucieux 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. Un tel choix, parfois peu "confortable", peut être considéré comme une forme de prix à payer pour mener une recherche en hydrologie que l'on pourrait qualifier de "stratégique" et orientée vers des objectifs de développement et de gestion. Dans le même ordre d'idée, c'est à dire pour des objectifs qui sont ceux que nous venons d'afficher, il est évident qu'en Afrique, au moins, les modèles globaux sont plus intéressants que les modèles distribués de relation pluie-débit, et qu'ils le resteront encore longtemps. Ils offrent, en effet, généralement, une simplicité de manipulation très supérieure à celle des modèles distribués. En outre, ceux-ci nécessitent très souvent la connaissance de nombreuses variables dont la détermination est parfois complexe. Sans compter, bien entendu, que dans ces régions la faible densité des réseaux de mesure plaide, à l'évidence, contre une distribution de l'information (pluviométrique en particulier) qui n'aurait que peu de sens.

D'un point de vue pratique, le programme ERREAU a permis la constitution de fichiers pluie-débit opérationnels. Ils couvrent l'ensemble du territoire ivoirien et ont été regroupés au sein d'une base de données. Facilement accessibles ils constituent donc aujourd'hui une intéressante série de jeux-tests pour les zones de forêt, de transition et de savane.

L'important travail informatique réalisé dans le cadre d'ERREAU a permis l'élaboration du logiciel EMILE. Ce produit devrait permettre de démystifier les modèles globaux pluie-débit et leur utilisation, en ce sens qu'il présente, en dehors de ses aspects hydrologiquement opérationnels, d'indiscutables propriétés didactiques. Sa large diffusion devrait autoriser la multiplication des expériences de modélisation pluie-débit, clé des adaptations et des améliorations qu'il conviendra d'apporter aux algorithmes décrits jusqu'à lors.

Un des préalables nécessaires à l'utilisation des modèles proprement dits, consistait à se doter des outils indispensables à leur emploi et à leur évaluation. C'est en cela qu'une attention particulière a été portée aux méthodes de calage des paramètres. La méthode de Rosenbrock, notamment, a été légèrement modifiée de manière à la rendre plus efficace et plus rapide. Ces méthodes d'optimisation non linéaires ont été diffusées sous forme d'outils au sein de la communauté hydrologique de l'ORSTOM.

Qui dit calage automatique des algorithmes dit critère numérique de calage. ERREAU a donc été l'occasion de se livrer à une étude approfondie du comportement et de l'influence de certaines fonctions critères. Cette étude, bien que non exhaustive, a montré que le critère de Nash est celui qui correspondait le mieux à la problématique de détermination des apports à

pas de temps importants (tout en se révélant un peu faible en ce qui concerne l'estimation des étiages).

L'étude réalisée sur les critères a permis de définir un module d'évaluation comparative. Celui-ci est un moyen objectif de comparaison entre hydrogrammes observés et calculés, basé sur la prise en compte de critères hydrologiquement intéressants. On trouve parmi ceux-ci l'IRVC (Indice de Reconstitution du Volume de Crue) qui caractérise la capacité des modèles à restituer les hydrogrammes observés du point de vue des volumes d'apports. Ce module a ensuite été utilisé dans toutes les phases de comparaison des différents algorithmes pluie-débit entre eux.

Concernant l'évaluation des ressources en eau et les outils qui lui sont nécessaires, différentes modélisations des apports ont été envisagées.

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, 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 révèle d'une utilisation robuste dans la majeure 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 zone 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, seuls les résultats obtenus en zone de savane se sont révélés probants. Les causes d'un tel échec en zone de forêt en particulier sont vraisemblablement très diverses mais on peut cependant en avancer certaines :

- 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.

En zone de savane, par contre, les résultats obtenus sont assez bons puisque le critère de Nash moyen obtenu pour l'ensemble des calages station-année par station-année est de 0.2. Par ailleurs, l'ensemble des essais réalisés ici en "calage-validation" amène à penser que le calage des modèles conceptuels utilisés ici est loin de n'être fonction que des seules caractéristiques physiques et géomorphologiques intrinsèques des bassins versants. Les caractéristiques climatiques et physiographiques des années et des bassins considérés ont assurément un rôle important et doivent être, nécessairement, prises en considération dans toute tentative d'explication des valeurs prises par les algorithmes pluie-débit.

La modélisation au pas de temps journalier fait également apparaître, et ce plus nettement qu'aux autres pas de temps, les modifications liées aux facteurs de l'écoulement intervenues depuis le début de la sécheresse à la fin des années 1960. Il est, en effet, pratiquement impossible de valider correctement des calages effectués avant cette date sur des années de sécheresse (post 1970) et réciproquement. Les années 1983-1984, paroxysme de la sécheresse, semblent jouer un rôle identique : calage puis validation de part et d'autre de ces deux années extrêmes du point de vue hydrologique sont généralement peu satisfaisants.

Plusieurs essais de prédétermination des paramètres ont été effectués. Seuls ceux réalisés en zone de savane pour les algorithmes au pas de temps journalier se sont révélés positifs. Les équations obtenues font intervenir, principalement, des variables caractéristiques de l'occupation des sols et des indices de répartition des pluies dans l'année. Elles mettent ainsi l'accent, de manière indirecte, sur la nécessité de pouvoir prendre en compte des variables caractéristiques de la couverture végétale proprement dite. Ceci permettrait d'améliorer sensiblement la représentation des phénomènes d'évapotranspiration, primordiaux dans le bilan hydrique.

Les résultats obtenus à l'aide de ces équations sont d'une qualité relativement acceptable en ce qui concerne GR3. Le comportement de CREC est moins satisfaisant (essentiellement du fait d'une paramétrisation moins précise). Cependant ces équations statistiques de prédétermination des paramètres ne permettent guère, actuellement, de s'éloigner d'une certaine "normalité climatique".

A l'issue de ce programme et des réflexions auxquelles nous nous sommes livrés, plusieurs perspectives s'offrent désormais :

- 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. Il serait donc intéressant de comparer l'approche qui fut la nôtre 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 à un tel pas de temps, à l'aide d'algorithmes de type bilan ou de type conceptuel.
- Parvenir à une modélisation plus fine et plus satisfaisante des phénomènes d'évapotranspiration. Celle-ci représente, en effet, dans ces régions, une fraction très importante des volumes entrant en jeu dans le bilan hydrologique. Une meilleure prise en compte de ce phénomène apporterait un plus au fonctionnement de ces modèles.
- La prise en compte d'autres variables descriptives des bassins versants au niveau de la définition des équations de prédétermination des paramètres. On peut penser à des caractéristiques de sol, à des indices de végétation ou de croissance de la végétation (à partir d'images satellites par exemple), plus précis que le simple partage en pourcentages de cultures, de savanes, de forêts et d'habitat.

D'une manière plus générale, en Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement dans l'ensemble de la sous-région, 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 mieux appréhender les problèmes de la modélisation de la relation pluie-débit, préalable indispensable à toute opération d'évaluation et de gestion des ressources en eau.

C'est, entre autres, l'objectif du programme ECOULEES (Estimation et Caractérisation dans l'Ouest africain des Lames d'Eau Ecoulées) qui concernera l'ensemble de la zone de savane ouest africaine. Ce projet, qui prévoit de mener en parallèle une démarche empirique et une démarche relevant de la modélisation conceptuelle, devra permettre de fournir une estimation de la lame annuelle (voire mensuelle) en tous points de la zone étudiée. L'ensemble des données, des résultats et des interprétations seront regroupées au sein de ce qui pourrait être le volet hydrologique d'un Système d'Information Géographique relatif à la zone de savane.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ATLAS de Côte d'Ivoire 1979 – Ministère du Plan. Rép. Côte d'Ivoire.
- 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.
- BERAN M.A., RODIER J.A., 1985. Hydrological aspects of drought. UNESCO/WMO, Studies and reports in Hydrology, n°39.
- BERNIER J., 1965. Sur les probabilités d'occurrence des sécheresses et des étiages. Bull. Cent. Rech. Essai de Chatou, 11: 3–12.
- BEVEN K., 1987. Towards a New Paradigm in Hydrology. AISH Publication 164.
- BRUNET-MORET Y., 1976. Etablissement d'un fichier opérationnel et étude des averses exceptionnelles. Application à la Côte d'Ivoire. ORSTOM, CIEH.
- CAMUS H., CHAPERON P., GIRARD G., MOLONIER M., 1976. Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en cultures. Côte d'Ivoire, Korhogo 1962–1972. Travaux et Documents de l'ORSTOM n°52, 77 p.
- CHEVALLIER & al, 1984. Données climatologiques de Booro Borotou. ORSTOM Adipodoumé.
- COMBES V., 1985. Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC. Thèse 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.
- DELHOMME J.P., 1976. Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur. Ecole des Mines de Paris.
- DERI J., 1977. Etude générale de la ressource en eau en Algérie. note manuscrite + annexes A.N.R.H.
- DEZETTER A., 1986. Contribution à l'étude et à la refonte de deux modèles hydropluviométriques au pas de temps journalier. Modèle Girard, Modèle Ibiza. ORSTOM Juillet–Août 1986.

- DEZETTER A., 1987. Modèle global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. DEA National d'Hydrologie. 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.
- DRAPER N.R., SMITH H., 1981. Applied regression analysis. John Wiley & sons Ed.
- DUBIEF J., 1953. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara, in Dir. Serv. Col. Hydraul. Alger, 457p.
- DUBIEF J., 1963. Le climat au Sahara. Mem. Univ. Alger, Institut Recherches Sahariennes. Tome I et II.
- DUBREUIL P., 1985. Review of field observations of runoff generation in the tropics, in *Journal of Hydrology*, n° 80, p 237-264.
- 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.
- FOURNEAU Capt., 1906. Navigation sur le Niger entre Forcados et Tombouctou. Henri Charles Lavaurelle, Ed. Militaire, Paris.
- GIRARD G., 1975a. Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin de l'Oued Ghorfa (Mauritanie) Cah. de l'ORSTOM, série Hydrologie, Vol. XII, n°3.
- GIRARD G., 1975b. Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahéenne et leurs contraintes. Cah. de l'ORSTOM, série Hydrologie, Vol. XII, n°3.
- 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.

- HUBERT P., CARBONNEL J.P., CHAUCHE A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest, in *Journal of Hydrology*, n° 110, p 349–367.
- JAIME G., 1894. De Koulikoro à Tombouctou. Les libraires Associés, Paris, 456 p., 4 cartes.
- JARVIS C.S., 1936. Flood-stage records of the River Nile in transactions of the American Society of Civil Engineers. Paper n° 1944, Vol 101, pp. 1012, 1030 + discussions pp. 1031, 1071.
- KLEMES V., 1986. Dilettantism in Hydrology, Transition or Destiny. *Water Resources Research* 22, supplement 9, Août 1986.
- KOTTEGODA N.T., 1980. *Stochastic Water Resources Technology*, The MacMillan Press Ltd, 384p.
- KOUAME B., 1987. Forme des averses, variabilité spatiale et temporelle au nord-ouest de la Côte d'Ivoire. DEA, Université MONTPELLIER II.
- KOUAME B., 1992. Adéquation de différents modèles globaux pluie-débit pour déterminer les apports en eau dans les zones de transition et de forêt de la Côte d'Ivoire. Essai de régionalisation des paramètres. Thèse de Doctorat. Université MONTPELLIER II.
- KUNDERZEWICZ Z., 1986. The Hydrology of Tomorrow. *Hydrol. Sciences Journal* 31, 2, 6/1986.
- LEBEL T., 1984. Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Thèse de Docteur-Ingénieur. USMG, INPG, Grenoble.
- 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.
- LEMOALLE J., 1989. Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973–1989), in *Rapport Orstom*, Montpellier 89–03, 27 p, multigr.
- LEROUX M., 1984. La mousson. *Bulletin de l'IFAN T. XXXVI, série A. n°3*.
- LEVIANDIER T., MA Z.C., 1987. Influence du pas de temps sur les performances des modèles pluie débit. Critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques, Rapport final EDF, CEMAGREF.
- MALEY J., 1981. Etudes palinologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique Nord tropicale de 30000 ans à l'époque actuelle, in *Trav. et. Doc ORSTOM*, n°129.
- MATHERON G., 1972. Théorie des variables régionalisées in "Traité d'informatique géologique". P. Lafitte. Masson Editeur.
- MEDINGER G., 1948. Tableau général de l'hydrologie algérienne dans *Hydrologie Algérienne*, recueil des observations de 1924 à 1946 S.C.E.G.T.

- MICHEL C., 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre. *La Houille Blanche*, n°1-1983.
- NASH J.E., 1969. A course of lectures on parametric or analytical hydrology. Great Lakes Institute. University of Toronto Pr 38: Lecture 12.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol*, 10: 282-290.
- NELDER J.A., MEAD R., 1964. A simple method for function minimization. *Computer Journal*, 7: 308-313.
- NICHOLSON S.E., 1980. Saharan Climates in historic times. In *the Sahara and the Nile* (Ed. Williams et Faure) 173 - 200, Bilkema, Rotterdam.
- OLIVRY J.C., 1987. Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la Basse-Casamance in *Colloque AISH*, n°168, Vancouver, pp. 501-512.
- OLIVRY J.C., CHASTENET M., 1986. Evolution du climat dans le bassin du fleuve Sénégal (Bakel) depuis le milieu du 19^{ème} siècle. in *changements globaux en Afrique durant le quaternaire*. pp 337-343, Coll. Trav. et Doc. ORSTOM, n° 197
- PNOE/UNESCO, 1987. Evaluation environnementale intégrée du développement des ressources en eau. Directives méthodologiques. UNESCO, Paris.
- POUGET J.C., 1987. Spatialisation de données en hydrologie. Mise au point d'une chaîne de traitement et application à des données pluviométriques sur la Guadeloupe. DEA, USTL, Montpellier.
- POUYAUD B., COLOMBANI J., 1989. Les variations extrêmes du lac Tchad - L'assèchement est-il possible ? in *Annales de géographie*, n°545, 98^{ème} an. p 1-23.
- 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.
- RIBSTEIN P., 1983. Loi des fuites, in *Orstom cahiers série hydrologie vol XX n°2* p 117-145.
- RODIER J., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo. Thèse de Docteur-Ingénieur. Faculté des Sciences de Toulouse.
- ROGNON P., 1989. Biographie d'un désert, in *Collection scientifique Synthèse*, Edit. PLON Paris.
- ROSENBROCK H.H., 1960. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer Journal*, 3, 175.
- ROSET J.P., 1987. Néolithisation, Néolithique et post-néolithique au Niger-oriental, in *Congrès de l'INQUA à Ottawa*, p 203-214.

- SCHNEIDER J.L., 1989. Géologie et hydrogéologie de la rep. du Tchad. Thèse, Univ. d'Avignon.
- SERVANT M., 1973. Séquences continentales et variations climatiques. Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur in Trav. et Doc. de l'ORSTOM, Paris, 368p.
- SERVANT M., 1974 – Les variations climatiques des régions intertropicales du continent africain depuis la fin du Pléistocène in SHF, 13^{ème} journées de l'Hydraulique, question I, rapport 8.
- SERVANT-VILDARY S., 1978. Etude des diatomées et paléolimnologie du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur in Trav. et Doc. ORSTOM, n° 84.
- SERVAT E., 1986. Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes. CREC5, MODGLO et MODIBI. ORSTOM Montpellier, multigr.
- SERVAT E., DEZETTER A., 1988a. Etude pluviométrique de la zone géographique couverte par ERREAU. Programme ERREAU, note 1.
- 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., 1988c. SIMPLE et ROSEN: deux méthodes d'optimisation non linéaire. Théorie et pratique. Notice OVNIh 1. ORSTOM Montpellier.
- SERVAT E., DEZETTER A., 1990. 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., DEZETTER A., 1991a. Sélection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. Journal des Sciences Hydrologiques, 36, 4, 8/1991 : 307-330.
- SERVAT E., DEZETTER A., 1991b. Prise en compte du type d'occupation des sols dans une modélisation pluie débit en zone de savanes soudanaises. "AISH Symposium on Hydrological interactions between Atmosphere, Soil and Vegetation" – XX General Assembly of I.U.G.G. – 11-24 August 1991.
- SERVAT E., 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.
- SERVAT E., LAPETITE J.M., 1990. Occupation des sols des bassins versants du Programme ERREAU. Programme ERREAU. ORSTOM. Abidjan. Côte d'Ivoire.

- 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.
- SIRCOULON J., 1986. La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973, in Cahier Orstom, série hydrologie, vol. XXI n° 4, 1984-1985, p 75-86.
- SIRCOULON J., 1987 - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20^{ème} siècle, in Proceedings of the Vancouver Symposium, IAHS. Publ. n°168, p 13-25.
- SIRCOULON J., 1990 - Impact possible des changements climatiques sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO/TD- n°380.
- SIRCOULON J., OLIVRY J.C., 1986. Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale. coll. CIEH sur les normes hydrologiques. Ouagadougou, 1986.
- SLUTZKY E., 1937. The summation of random cause as the source of cyclic processes. *Econometrica*, 5: 75-174.
- 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.
- STREET F.A., GROVE A.T., 1979. Global maps of lake level fluctuations since 30000 BP, in quaternary, Research 12, pp. 83 - 118.
- TILHO J., 1910. Documents scientifiques de la mission Tilho 1906-1909. Imp. Nat. Paris, 2 vol., 2038p. photos, graph.
- UNESCO, 1989. Evaluation of national guides on methods of hydrological computations. IHP-III, Project 2.1 (c) J.W. Van der Made. (Ed.).
- VALENTIN C., 1985. Organisation pelliculaire superficielle de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez - Rep. du Niger). Coll. Etudes et Thèses. Ed. de l'ORSTOM, 260p, 11 pl photos.
- VEN TE CHOW, 1964. Handbook of Applied Hydrology.

Table des matières

TABLE DES MATIERES

OBJECTIFS ET ARTICULATION	3
OBJECTIFS	4
ARTICULATION	5
PERSONNEL AYANT PRIS PART AU PROGRAMME ERREAU	7
PERSONNEL ORSTOM	8
PERSONNEL IVOIRIEN	8
CREDITS ALLOUES	9
RESULTATS	11
SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	12
MORPHOLOGIE.....	12
APERÇU GEOLOGIQUE.....	12
VEGETATION.....	16
LE CLIMAT	18
Les Precipitations	20
Température.....	22
Evapotranspiration Potentielle	22
HYDROLOGIE	24
POPULATION ET ECONOMIE	26
DONNEES ET BASSINS VERSANTS.....	28
Zone de forêt.....	28
Zone de transition.....	28
Zone de savane.....	28
OCCUPATION DES SOLS.....	32
METHODOLOGIE DE CALAGE.....	34
Les méthodes d'optimisation	34
Application pratique	39
ETUDE ET SELECTION DES CRITERES NUMERIQUES DE CALAGE.....	40
Les critères utilisés.....	40
LE MODULE D'EVALUATION COMPARATIVE	44

METHODOLOGIE ET RESULTATS.....	47
Méthodologie.....	47
Résultats.....	48
Présentation du modèle initial	58
Etude de sensibilité	63
Etude statistique et de corrélation	63
RESTRUCTURATION DU MODELE INITIAL	64
Etude des paramètres Seuil, CC, DD et AA	64
Etude des paramètres BBi.....	68
APPLICATION DU MODELE EN ZONE DE SAVANE	74
MODELES PLUIE DEBIT JOURNALIERS UTILISES DANS ERREAU.....	80
Le modèle CREC.....	80
Le modèle GR3.....	83
Le modèle MODGLO.....	85
CALAGES ET VALIDATIONS DES MODELES.....	87
Calages du modèle CREC	87
Calages du modèle GR3.....	90
VALIDATIONS DES CALAGES.....	94
Validations.....	94
TECHNIQUES D'ANALYSE DE DONNEES APPLIQUEES AUX JEUX DE PARAMETRES.....	96
Définitions des échantillons.....	96
Variables utilisées. Etude des corrélations.....	97
Analyse en Composantes Principales Analyse Factorielle des Correspondances.....	100
Equations de prédétermination des paramètres des modèles.....	100
VALIDATION DES EQUATIONS DE PREDETERMINATION	106
Modèle CREC	106
Modèle GR3	112
Comparaison CREC-GR3.....	117
INSTABILITE DES RESSOURCES EN EAU ET GESTION D'UN SYSTEME D'EAU AMENAGE. CAS DU SASSANDRA.....	121
SCHEMA D'AMENAGEMENT RETENU POUR LE BASSIN DU SASSANDRA	121
DONNEES GENEREES.....	121
Etude de l'instabilité des séries pluviométriques.....	123
Génération de la pluviométrie décadaire.....	123
Génération des apports naturels aux stations hydrométriques de référence.....	123
LE MODELE DE SIMULATION DE FONCTIONNEMENT	123

ANALYSE DES REPONSES DU SYSTEME D'EAU AMENAGE AUX SIMULATIONS DE FONCTIONNEMENT	124
Analyse globale des réactions	124
Analyse des défaillances au regard des contraintes.....	124
Etude de quelques défaillances particulières	125
Impact de l'aménagement amont sur Buyo.....	125
CONCLUSION	127
PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS, THESES ET RAPPORTS	128
PUBLICATIONS	129
COMMUNICATIONS	130
THESES	131
RAPPORTS	132
VALORISATION	133
EMILE (ENSEMBLE MODELISATEUR INTEGRE POUR LE CALCUL DES LAMES D'EAU).	134
Pourquoi EMILE?	134
Les modèles hydrologiques.	135
Les stations hydrométriques et les postes pluviométriques.	135
Les données traitées.	135
Les différents types de sessions.....	136
Les traitements par lots.	137
L'exploitation des résultats.	137
Les utilitaires.	137
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	139
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	140
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	144
TABLE DES MATIERES	151