

DEUX EXEMPLES D'HYDROLOGIE REGIONALE EN AFRIQUE DE L'OUEST : LES PROGRAMMES ERREAU ET ECOULEES

E. SERVAT

RESUME

Les différents projets de développement élaborés et réalisés en Afrique de l'Ouest nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources en eau. C'est dans cette optique que le programme ERREAU a été lancé dans le Nord Ouest de la Côte d'Ivoire où ont été effectués des travaux de modélisation de la relation pluie-débit sur 20 bassins versants (100 à 4500 km²). L'objectif était de définir et d'évaluer des outils d'estimation des apports en eau en zone de savane soudanaise. Après calage, les valeurs des paramètres des modèles de relation pluie-débit au pas de temps journalier, utilisés dans ERREAU, ont été caractérisées afin de pouvoir utiliser ces algorithmes en simulation sur des bassins versants non jaugés ou mal connus. Ces équations sont d'une qualité tout à fait acceptable en ce qui concerne le modèle GR3. Cependant, dans une optique opérationnelle, il faudrait encore accroître leur fiabilité. Par la suite, le programme a été étendu au reste de la Côte d'Ivoire dans le cadre d'une approche journalière et mensuelle. Le programme ECOULEES, en phase de lancement, a pour objectif la détermination des lames d'eau écoulées annuelles et mensuelles dans l'ensemble de la zone de savane ouest africaine. Il couvre donc plusieurs pays et nécessite une approche différente comprenant la réalisation d'une véritable base de données ou encore le recours à des outils intégrateurs type S.I.G.

1. LE PROGRAMME ERREAU, POURQUOI?

Dans le Nord de la Côte d'Ivoire comme dans le reste de la zone de savane ouest-africaine, les différents projets d'aide au développement élaborés et réalisés (périmètres d'irrigation, alimentation en eau potable, lutte contre l'onchocercose, etc.) visent, entre autres, à freiner le départ des populations rurales vers les grands centres urbains du Centre (Bouaké) et du Sud du pays (Abidjan), en développant l'agriculture et en améliorant les conditions de vie dans ces régions plus défavorisées.

Parmi ces projets, ceux qui touchent à la restructuration et à l'intensification des pratiques agricoles, si on ne considérait que ceux-ci, nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources naturelles en général, et des ressources en eau en particulier.

C'est dans cette optique que s'inscrit le programme ERREAU (Evaluation Régionale des Ressources en Eau), projet de modélisation de la relation pluie-débit réalisé en zone de savane soudanaise (Figure 1). Cette étude a porté sur 20 bassins versants du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, de superficie variant de 100 à 4500 km², et situés sur les hauts bassins du Niger, du Bandama et du Sassandra.

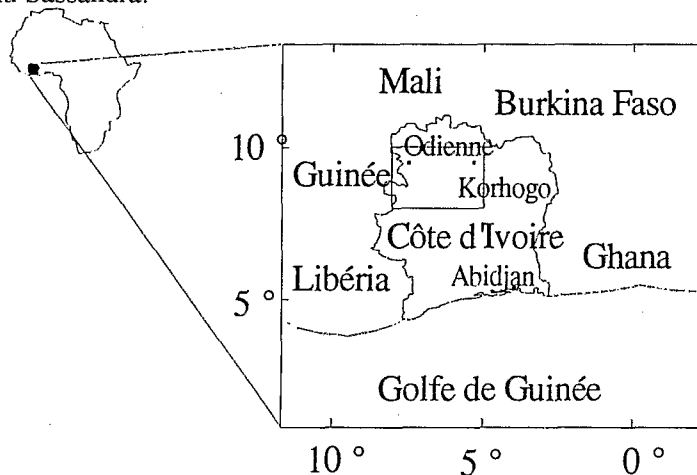


Figure n° 1
Carte de situation de la zone d'étude

Afin de se placer dans des conditions véritablement opérationnelles, les données utilisées, tant hydrométriques que pluviométriques, ont été celles fournies par les réseaux de mesure nationaux de Côte d'Ivoire. Ces données, disponibles au pas de temps journalier, sont en effet les seuls éléments véritablement accessibles aux aménageurs pour bâtir un projet et procéder à des simulations de fonctionnement sur de longues durées.

Le principal objectif visé par cette étude était donc de fournir des outils fiables de modélisation pluie-débit qui permettent d'estimer convenablement les apports en eau à l'exutoire d'un bassin versant. Ceci par le biais d'un hydrogramme représentatif au pas de temps décadaire ou mensuel. L'objectif secondaire était que ces outils soient utilisables sur des bassins versants non jaugés. Dans ce but, nous avons cherché à établir des équations de prédétermination des paramètres de ces modèles, à partir de différentes variables géomorphologiques, climatiques ou d'occupation des sols, qui sont autant de descripteurs potentiels des bassins versants considérés.

2. BASSINS VERSANTS, DONNEES ET MODELES UTILISES POUR ERREAU

2.1 Bassins versants et données

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 sur lesquelles nous avons pu travailler couvre la fin des années 1970 et les années 1980 jusqu'en 1985 ou 1986 selon les cas. Cette période est caractérisée par une forte variabilité des précipitations annuelles. L'année 1983 est caractérisée par une sécheresse très fortement marquée sur l'ensemble du territoire ivoirien (la période de retour de cet événement a été évaluée à environ cinquante ans).

Sur l'ensemble de ces bassins les coefficients d'écoulement restent très faibles. Ils ne dépassent qu'exceptionnellement 12 à 15%, sont très souvent inférieurs à 10%, et présentent parfois des valeurs inférieures à 5%.

Les caractéristiques propres à chacun de ces vingt bassins versants (Dezetter, 1991) ont été regroupées dans le Tableau 1, ainsi que les pourcentages relatifs aux différents types d'occupation des sols.

Tableau n° 1
Caractéristiques des bassins versants étudiés. ((i): période d'observation incomplète;
S: Savane; F: Forêt claire; C: Cultures; H: Habitat).

Nom du Bassin	Superficie (km ²)	Période étudiée	Pluie annuelle min-max (mm)	Lame écoulée min-max (mm)	Coefficient d'écoulement min-max (%)	S (%)	F (%)	C (%)	H (%)
Doundian à Wahire	650	1980 à 1984	1091 à 1537	55 à 252	4.9 à 16.4	75.0	13.0	11.7	0.3
Banifing à Ziemougoula	990	1978 à 1985 (i)	1103 à 1457	182 à 276	13.0 22.2	70.3	17.1	12.4	0.2
Bandama à Seguekiele	368	1981 à 1985	895 à 1540	16 à 176	1.8 à 11.4	68.1	0.8	30.5	0.6
Bagoé à Kouto	4700	1968 à 1985 (i)	970 à 1827	45 à 355	4.6 à 21.8	59.8	23.8	5.9	0.5
Bagoé à Guingérini	1042	1981 à 1983	1103 à 1454	52 à 299	4.7 à 21.2	70.2	24.3	5.3	0.2
Lafigue à Rte de Badikaha	443	1981 à 1984	835 à 1410	35 à 195	4.2 à 16.3	30.0	1.1	64.5	4.4
Badenou à M'Bengue	1800	1983 à 1985	680 à 1288	3 à 138	0.5 à 10.8	66.9	6.4	25.8	0.9
Yoreloro à Kategue	338	1982 à 1986 (i)	914 à 1163	14 à 66	1.5 à 5.7	59.4	9.1	31.0	0.5
Yani à Madji	1013	1980 à 1986 (i)	879 à 1559	21 à 164	2.4 à 10.5	83.6	9.4	6.8	0.2
Douni à Pt. 398	120	1983 à 1986 (i)	1011 à 1240	77 à 247	7.6 à 22.5	55.7	0.0	44.0	0.3
Kobani à Nimbrini	342	1977 à 1984 (i)	994 à 1038	47 à 70	4.7 à 6.7	70.9	6.2	22.7	0.2
Mahandiabani à Wahire	835	1983 à 1984	1092 à 1117	86 à 119	7.7 à 10.9	80.5	15.4	4.0	0.1
Sien à Nafana-Sienso	615	1977 à 1984	1038 à 1667	57 à 284	5.4 à 17.0	58.0	0.9	40.9	0.2
Sien à Massadougou	1325	1981 à 1986	1011 à 1610	40 à 193	3.8 à 15.4	55.9	8.7	35.0	0.4
Tiemba à Lille	541	1982 à 1984	1177 à 1616	135 à 279	11.5 17.3	95.9	3.5	0.3	0.3
Tiemba à Dioulatiedougou	2790	1981 à 1984 (i)	973 à 1520	59 à 298	6.1 à 19.5	91.3	3.7	4.4	0.6
Bou à Boron	3710	1981 à 1985	853 à 1438	10 à 134	1.1 à 9.3	NC	NC	NC	NC
Bou à Sirasso	1030	1983 à 1985	1014 à 1506	25 à 155	2.5 à 10.3	NC	NC	NC	NC
Lokpoho à Namboukaha	772	1983 à 1987 (i)	553 à 1245	9 à 157	1.3 à 16.2	NC	NC	NC	NC
Solomougou à Ziebatago	1510	1983 à 1986	877 à 1444	14 à 192	1.6 à 13.3	NC	NC	NC	NC

NC. : Non Cartographié

On note, sur la zone étudiée, une densité d'habitat très faible avec un maximum de 4.4% seulement, observé sur le bassin du Lafigue, et qui correspond à la présence de la ville de

Korhogo. L'existence de cette agglomération importante explique également la forte couverture du bassin en cultures (64.5%). Ce bassin mis à part, les pourcentages de savane varient de 55.7 à 95.9%, ceux de forêt claire de 0.0 à 24.3%, et ceux de cultures de 0.3 à 44.0% (les pourcentages relatifs à l'habitat sont peu significatifs).

D'un bassin à l'autre, la nature de l'occupation des sols varie donc très sensiblement. Des cartes ont été dressées à partir des images satellite pour chacun des bassins étudiés (Servat et Lapetite, 1990), à quatre exceptions près pour lesquelles les données de base n'ont pu être collectées, et nous présentons à titre d'exemple la carte d'occupation des sols du Lafigue à Route de Badikaha (Figure 2).

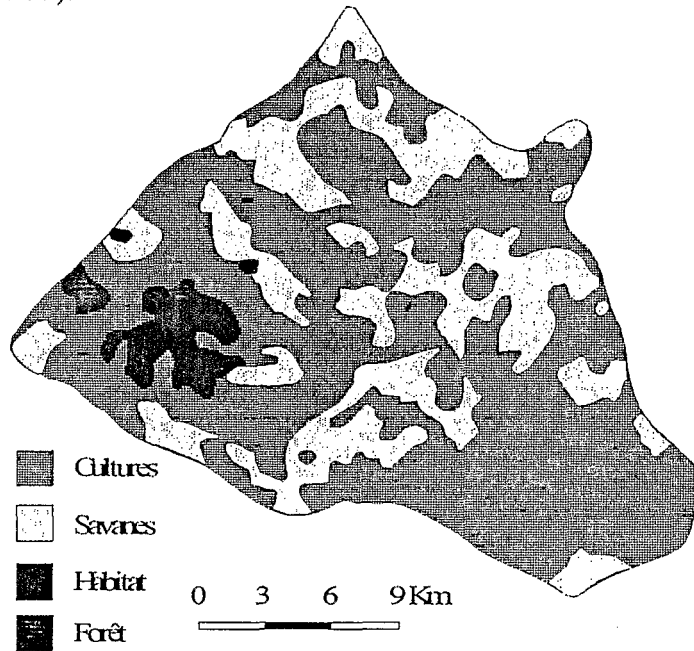


Figure n° 2

Carte d'occupation des sols du bassin du Lafigue Route de Badikaha

2.2 Modèles pluie-débit

Deux modèles globaux conceptuels et déterministes ont été utilisés pour mener à bien cette étude: CREC (Guilbot, 1986) et GR3 (Edijatno et Michel, 1989). Ces deux algorithmes sont fréquemment employés en France dans le cadre d'études de gestion et d'aménagement des ressources en eau. Le problème de leur spécificité et de leur souplesse d'adaptation à des conditions climatiques différentes de celles qui ont prévalu à leur conception a pu être envisagé dans le cadre de ce programme. Ces deux algorithmes présentent, cependant, de par leur architecture les garanties de généralité et de robustesse qui permettent de les employer a priori dans une optique de détermination d'apports.

2.2.1 Le modèle CREC

CREC est basé sur un schéma à réservoirs relativement classique qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert. Cet algorithme a été appliqué de nombreuses fois à des bassins versants de natures très différentes (mais en zone climatique tempérée) et il a montré une grande capacité d'adaptation.

La version de CREC présentée en figure 3 est la version complète, à 10 paramètres. Nous avons utilisé, en pratique, la version simplifiée la plus utilisée comptant 7 paramètres. Dans cette version il n'y a pas de module "ruissellement de surface". Cette simplification correspond aux résultats acquis lors d'essais préalables.

La fonction de production comprend 3 paramètres: X3, X4 et X7. Son fonctionnement est basé sur le taux de remplissage du réservoir en "cul de sac", S, qui simule l'état d'humidité du sol

et alimente l'évapotranspiration. Ce réservoir contrôle la fraction de la pluie devant participer à l'écoulement après avoir été régulée par la partie "transfert" du modèle.

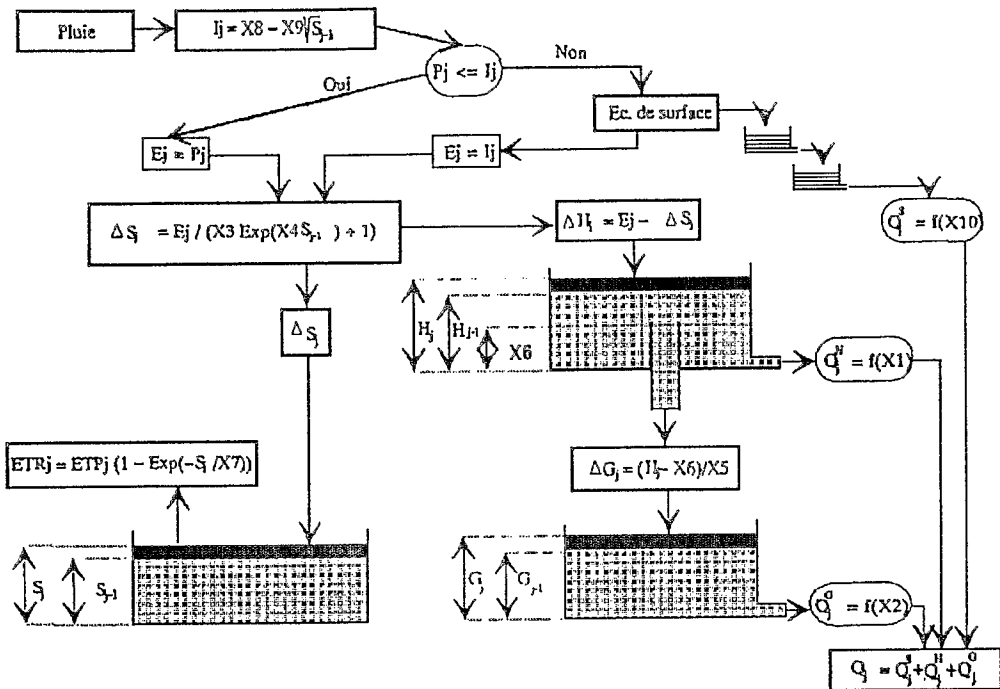


Figure n° 3

Schéma conceptuel du modèle CREC. (Dezetter, 1991).

La fonction de transfert de CREC comprend deux réservoirs: le réservoir H (dit "superficiel" par opposition au réservoir G dit "profond"), contrôlé par trois paramètres X1, X5 et X6, et le réservoir G, contrôlé par X2.

H possède deux sorties. La première est contrôlée par X1 sous la forme:

$$Q_j^H = [X1 \cdot H_j]^2 \quad (1)$$

La seconde sortie du réservoir H permet d'alimenter le réservoir G. Elle présente un seuil X6, en deçà duquel rien ne coule par cet orifice.

G fournit l'écoulement de base sous la forme:

$$Q_j^G = X2 \cdot Q_{j-1}^G + (1 - X2) \cdot \Delta G_j \quad (2)$$

2.2.2 Le modèle GR3

Le modèle GR3, qui est également un modèle à réservoirs (Figure 4), a été utilisé à de nombreuses reprises en zone tempérée (Loumagne, 1988; Edijatno et Michel, 1989, Edijatno, 1991) mais ne l'avait jamais été en zone tropicale.

L'architecture de cet algorithme repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire:

(i) le réservoir-sol, dont le paramètre A représente la capacité maximale, qui n'a comme seule sortie que le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et la partie "transfert" du modèle;

(ii) un hydrogramme unitaire (paramètre C), 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 crues.

(iii) le réservoir eau-gravitaire, dont le paramètre B caractérise la "rétention maximale à un jour", c'est à dire que le niveau du réservoir à la fin du pas de temps sera au plus égal à B. Ce réservoir reçoit à chaque pas de temps le débit délivré par l'hydrogramme unitaire. Le niveau R du réservoir règle la lame écoulee Q qu'il relâche selon l'expression:

$$Q = \frac{R^2}{R + B} \quad (3)$$

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

$$-\frac{dR}{dt} = k R^2 \quad (4)$$

L'intégration de cette loi de vidange quadratique montre aisément que la condition $R_{\text{fin de pas de temps}} \ll B$ est vérifiée.

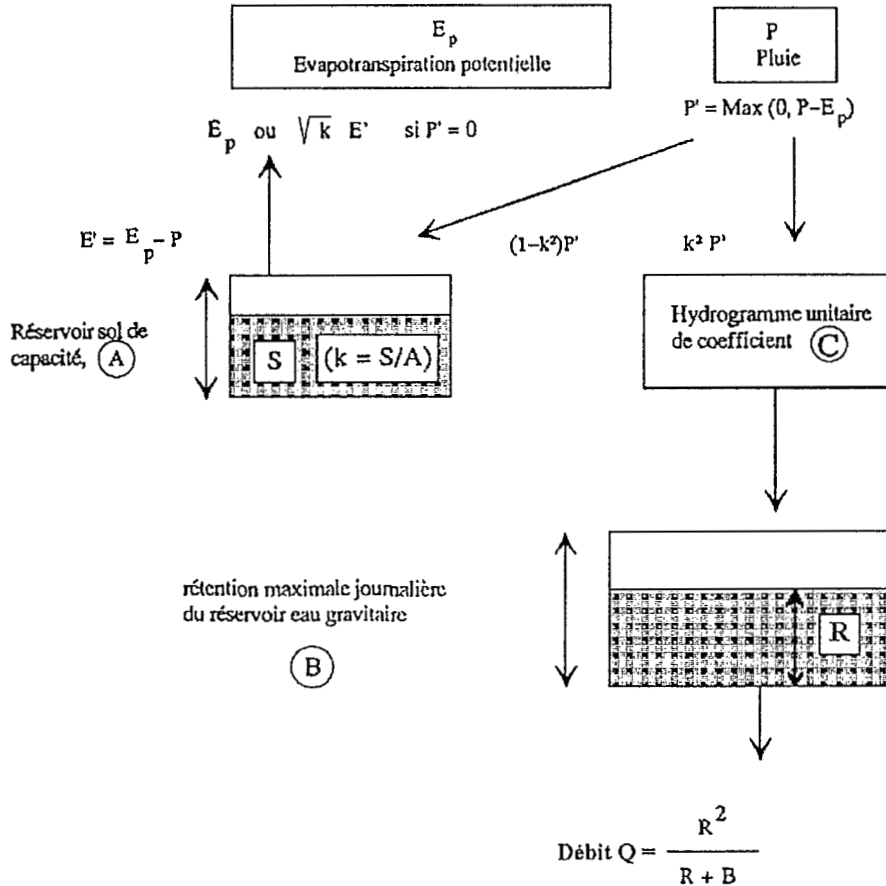


Figure n° 4

Schéma conceptuel du modèle GR3. (Dezetter, 1991)

3. METHODOLOGIE

Une première étude (Servat et Dezetter, 1991) nous a conduit à sélectionner une fonction critère à utiliser dans le cadre des procédures de calages automatiques. C'est une forme modifiée de la fonction de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) qui a finalement été retenue, à savoir :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (Lc - Lo)^2}{\sum_{i=1}^n (Lo - \bar{L})^2} \quad (5)$$

où

n = nombre d'observations, Lc = lame écoulee calculée, Lo = lame écoulee observée et $\bar{L}$ = lame moyenne écoulee observée

C'est à cette fonction modifiée que nous ferons référence lorsque nous parlerons ici de critère de Nash.

A l'aide des méthodes de Rosenbrock (1960) et de Nelder et Mead (1964), les modèles CREC et GR3 ont été calés année par année au pas de temps journalier pour chacune des 91 stations-années dont nous disposons au total (Dezetter, 1991). Nous avons procédé ainsi de manière à multiplier le nombre de jeux de paramètres calés sur lesquels faire porter l'analyse par la suite. Cette démarche revient à considérer les années successives comme indépendantes les unes des autres, ce qui peut être admis dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire où les étiages sont très généralement longs et prononcés (on y observe fréquemment des arrêts de l'écoulement durant la saison sèche). L'initialisation des réservoirs se fait à l'aide des valeurs de débit des pas de temps précédents.

L'étude de l'ensemble de ces résultats a été conduite, par analyse des calages et validations croisées, avec pour objectif de caractériser le fonctionnement des modèles et la qualité des hydrogrammes qu'ils restituent. Cette analyse a été menée à l'aide d'un module d'évaluation comprenant plusieurs critères hydrologiques (Servat et Dezetter, 1991) susceptibles de préciser et de compléter la seule comparaison graphique des hydrogrammes calculés et observés. C'est ainsi que ce module fait référence aux critères suivants :

$$\text{Bilan1} = \left| \sum (L_o - L_c) \right|$$

$$\text{Bilan2} = \sum |(L_o - L_c)|$$

avec : L_o = lame écoulée observée (mm)
 L_c = lame écoulée calculée (mm)

$$\text{IRVC} = \sum_{i=1 \text{ à } n} \left[\frac{C_{\text{rue année } i}}{\sum_{i=1 \text{ à } n} C_{\text{rues annuelles}}} * 100 \left| \frac{C_{\text{rue année } i \text{ Calculée}}}{C_{\text{rue année } i \text{ Observée}}} - 1 \right| \right]$$

Dans un second temps, et dans le but de permettre l'extension de ces résultats, en particulier aux bassins non jaugeés, nous avons cherché à mettre en évidence des relations entre les paramètres calés et certaines variables hydrologiques, physiographiques ou agronomiques, caractéristiques des bassins versants et des stations-années étudiés. Certaines relations ont pu être établies que nous avons ensuite tenté de valider.

4. RESULTATS

4.1 Calage des modèles

Les modèles CREC et GR3 ont été calés sur l'ensemble des 91 stations années dont nous disposons. Les résultats de ces calages ont été synthétisés dans les tableaux 2 et 3 qui présentent les caractéristiques statistiques des différentes composantes du module d'évaluation.

En ce qui concerne CREC, il apparaît que les calages obtenus sont de bonne qualité. L'IRVC moyen (Indice de Reconstitution des Volumes de Crue) est inférieur à 4 (soit un écart de moins de 4% entre les volumes de crue observés et calculés) et sa valeur maximale ne dépasse pas 20, gage d'une bonne restitution des volumes de crue. Les coefficients de corrélation sont élevés et confirment le fait que le modèle CREC s'adapte correctement, reproduisant assez fidèlement les hydrogrammes observés. Ceci est corroboré par le fait que dans 34% des cas le critère de Nash est inférieur à 0.1, ce qui dénote un excellent calage. Ce critère présente, cependant, dix valeurs supérieures à 0.4, soit 10.9% des cas, qui correspondent pratiquement toutes à des années 1983 ou 1984.

Le modèle GR3 a un IRVC moyen de 5.57, et des coefficients de corrélation journalière et décadaire élevés, preuve qu'en dépit d'un nombre restreint de paramètres cet algorithme permet de reproduire correctement les hydrogrammes observés. Ce que confirment les valeurs prises par le critère de Nash qui, dans 27.5% des cas, sont inférieures à 0.1. On remarque, comme pour CREC, que les fortes valeurs du critère de Nash (supérieur à 0.4 dans 13% des cas) sont essentiellement dues aux années 1983 et 1984, qui furent, rappelons le, exceptionnellement sèches sur l'ensemble du territoire ivoirien, et qui se révèlent donc être des situations pratiquement impossibles à simuler pour des algorithmes pluie-débit de ce type.

Tableau n°2
Caractéristiques des calages obtenus avec le modèle CREC

	Corrélation décadaire	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash journalier	Corrélation journalière
Moyenne	0.943	5.79	33.68	3.58	0.204	0.887
Ecart-type	0.059	7.06	25.01	3.78	0.163	0.103
Minimum	0.574	0.00	1.20	0.00	0.020	0.345
Maximum	0.996	52.00	131.60	19.44	0.936	0.991

Tableau n° 3
Caractéristiques des calages obtenus avec le modèle GR3

	Corrélation décadaire	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash journalier	Corrélation journalière
Moyenne	0.919	9.84	40.64	5.57	0.228	0.873
Ecart-type	0.089	8.47	25.82	6.51	0.172	0.114
Minimum	0.346	0.10	1.70	0.00	0.026	0.230
Maximum	0.994	39.90	110.70	41.52	1.002	0.988

Les jeux de paramètres obtenus après calage pour un bassin donné ont, ensuite, été systématiquement validés sur les autres années disponibles pour le bassin considéré. Nous en retiendrons que le nombre de situations où la validation conduit à de bons résultats est extrêmement faible, à savoir de l'ordre de 10 %. Il semble donc que les paramètres calés pour une station année particulière soient spécifiques et caractéristiques de celle-ci. Cette constatation 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 paramètres des algorithmes pluie-débit.

4.2 Analyse multivariée

Une première étape nous a amené à procéder à une sélection rigoureuse parmi les 91 stations-années disponibles de façon à disposer d'un échantillon relativement homogène quant à la qualité des données. Nous avons donc éliminé les informations issues des bassins versants pour lesquels nous n'avions pas pu établir les cartes d'occupation des sols (au nombre de quatre), ainsi que celles dont l'analyse laissait subsister un doute quant à la validité.

A l'issue de cette sélection, nous disposons d'un échantillon de 59 stations-années, et des jeux de paramètres des modèles CREC et GR3 leur correspondant, sur lesquelles nous avons fait porter une étude en analyse multivariée: étude de corrélations, Analyse en Composantes Principales (ACP) et Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

Les différentes variables retenues pour tenter d'expliquer les valeurs prises par les paramètres des modèles à l'issue des calages ont été les suivantes :

(a) Variables caractéristiques du bassin versant:

Superficie (km²), Indice de Compacité de Gravelius.

(b) Variables caractéristiques de l'année considérée:

(i) Pluie Annuelle en mm (PA)

(ii) Pluies cumulées, en mm, du 1er Janvier aux dates suivantes: 15 Juin (Pc6), 15 Juillet (Pc7), 15 Août (Pc8), 15 Septembre (Pc9), 15 Octobre (Pc10).

(iii) Pluies relatives (en %), définies par le rapport "Pluie cumulée du 1er Janvier à la date D/Pluie Annuelle", aux dates suivantes: 15 Juin (Pr6), 15 Juillet (Pr7), 15 Août (Pr8), 15 Septembre (Pr9), 15 Octobre (Pr10).

(c) Variables caractéristiques de l'occupation des sols : pourcentages respectifs de savane, de forêt claire, de cultures et d'habitat.

Les variables caractéristiques de l'année considérée ont pour objectif de permettre la prise en compte de la répartition temporelle de l'année qui influe tant sur les niveaux de saturation que sur la croissance de la végétation.

En dehors des relations évidentes dues à la définition des variables utilisées (Pc10 est, par exemple, très corrélée avec Pluie Annuelle), l'étude des matrices de corrélation ne permet pas de

mettre en évidence l'existence de relations linéaires fortement marquées entre les paramètres des modèles et certains des descripteurs retenus. Seul le paramètre B de GR3, la "rétention maximale à 1 jour", présente une liaison avec la variable Pluie Annuelle, caractérisée par un coefficient de corrélation R égal à 0.54.

Les axes issus de l'Analyse en Composantes Principales sont assez faiblement définis, les trois premiers cumulés n'expliquant que 69.7% de la variance totale du système. La première composante (34.3% de la variance) est bien corrélée avec les termes de pluie cumulée ($R = 0.96$ avec Pc7, $R = 0.93$ avec Pc8), la seconde (17.9% de la variance) est difficile à définir précisément, et la troisième (17.4% de la variance) reflète l'antagonisme observé entre le couple (Savane, Forêt) et le couple (Culture, Habitat).

Les paramètres de la fonction de production de CREC (X3, X4 et X7) apparaissent comme étant plutôt corrélés avec l'axe 2 tandis que les paramètres de transfert sont plutôt corrélés avec les axes 1 et 3. Ces relations ne sont toutefois que des tendances puisque la corrélation la plus forte est de 0.45 pour X3 et l'axe 2.

Dans le cas du modèle GR3 la corrélation la plus élevée ($R = 0.66$) concerne B et l'axe 1, ce qui est conforme à l'étude des corrélations; viennent ensuite A et l'axe 2 avec $R = -0.50$. Ces résultats, légèrement meilleurs que pour CREC, sont dus à la structure du modèle et à son nombre de paramètres réduit qui leur confèrent un rôle plus marqué et une indépendance plus grande.

L'Analyse Factorielle des Correspondances n'a fait que souligner les résultats de l'ACP.

4.3 Equations de régression multiple

Chercher à expliquer, à l'aide d'équations de régression multiple, les valeurs prises par les paramètres des modèles c'est se donner les moyens de pouvoir prédéterminer ces mêmes paramètres et donc d'utiliser les algorithmes pluie-débit sur des bassins versants non jaugés. Pour ce faire les 59 stations-années dont nous disposons ont été aléatoirement réparties en un échantillon de calage comprenant 39 individus et un échantillon de validation de 20 individus.

La recherche des équations s'est effectuée, sur l'échantillon de calage, en utilisant une méthode de régression progressive ascendante (Draper et Smith, 1981) qui permet de sélectionner une à une les variables qui apportent le plus d'information.

4.3.1 Modèle CREC

Pour CREC il est nécessaire de calculer sept équations de régression correspondant à chacun des sept paramètres du modèle. Après plusieurs essais il est apparu indispensable de travailler sur des variables transformées à l'aide des logarithmes népériens de manière à éviter, lors de l'utilisation des équations, l'obtention de valeurs négatives qui seraient inutilisables. Les résultats obtenus sont les suivants :

$\ln X1 = 29.17 - 5.320 \ln Pc8$	$R^2 = 0.194$ (8)
$\ln X2 = 0.56 + 0.787 Pr7$	$R^2 = 0.106$ (9)
$\ln X3 = -21.98 - 0.049 \text{ Forêt} + 2.553 \ln PA$	$R^2 = 0.233$ (10)
$\ln X4 = 7.76 - 2.556 \ln PA - 0.011 \text{ Cultures} + 1.029 \ln Pc8$	$R^2 = 0.479$ (11)
$\ln X5 = 9.75 - 0.018 \text{ Cultures} + 8.913 Pr7 - 1.838 \ln Pc8$	$R^2 = 0.448$ (12)
$X6 = 0.918 \text{ Cultures}$	$R^2 = 0.493$ (13)
$\ln X7 = 0.598 \ln Pc7$	$R^2 = 0.892$ (14)

Les valeurs des coefficients de détermination R^2 varient de 0.11 à 0.89, mais, à une exception près, ils concernent des équations établies à l'aide des logarithmes des variables et n'ont pas de signification statistique réelle pour les valeurs originales non transformées.

Au vu de ces équations de prédétermination des paramètres du modèle CREC, on constate que les variables caractéristiques des termes de pluie cumulée ou relative des premiers mois de saison des pluies sont fréquemment retenus ainsi que les paramètres d'occupation des sols tels que le % de cultures.

4.3.2 Modèle GR3

Les trois équations de régression correspondant aux paramètres A, B et C de GR3 sont les suivantes :

$\ln A = 7.75 + 0.001 \text{ Cultures} - 4.450 Pr6$	$R^2 = 0.323$ (15)
$\ln B = -16.31 + 0.031 \text{ Cultures} + 3.453 \ln Pc8$	$R^2 = 0.437$ (16)
$\ln C = 2.957 \text{ Compacité} - 0.114 \text{ Forêt} - 12.721 Pr7$	$R^2 = 0.870$ (17)

On constate également pour GR3 la présence au sein des équations de prédétermination des variables caractéristiques du début de la saison des pluies et de l'occupation des sols. Le terme de compacité, caractéristique morphologique des bassins versants, est logiquement pris en compte dans la définition de C, paramètre définissant l'hydrogramme unitaire de la fonction de transfert.

4.3.3 Discussion

Les descripteurs retenus, tant en ce qui concerne les bassins versants que la climatologie des années considérées, permettent de définir des équations de prédétermination des paramètres des modèles étudiés. C'est pour GR3 que la qualité de ces régressions apparaît comme étant la plus satisfaisante, conséquence de son nombre de paramètres réduit et de leur bonne définition, permettant ainsi d'éviter les compensations numériques internes de l'algorithme.

Une des principales caractéristiques de ces équations est l'importance des termes de pluie cumulée ou relative des premiers mois de saison des pluies. Une des hypothèses que l'on peut avancer à ce sujet est que ces variables caractérisent la reprise après la saison sèche, la croissance et l'importance de la couverture végétale, élément fondamental au vu de l'importance des phénomènes d'évapotranspiration dans les bilans hydriques en zone de savane soudanaise. Ces termes de pluie cumulée pourraient donc être des indicateurs indirects de l'indice foliaire, variable dont nous n'avons pu disposer pour réaliser notre étude.

L'importance relative des paramètres d'occupation des sols se fait également sentir. Pour CREC ils contribuent à définir X3 et X4, paramètres de production, ainsi que X5 et X6, paramètres de transfert. Pour GR3, on retrouve le pourcentage de cultures ou de forêt dans la définition de chacun des paramètres.

4.4 Validation des équations de prédétermination des paramètres

L'échantillon de validation, non utilisé jusqu'à lors, a permis de tester la validité des équations de prédétermination qui ont été établies. Pour ce faire, pour chaque station-année, il a été procédé, dans un premier temps, au calcul des paramètres de CREC et de GR3 à l'aide de ces équations, et, dans un second temps, à la simulation de l'hydrogramme de l'année considérée, à l'aide, bien entendu, de ces algorithmes prédéterminés. Les résultats ont été interprétés en utilisant le module d'évaluation défini précédemment et le tracé des hydrogrammes observés et calculés.

4.4.1 Modèle CREC

On compare entre elles, et deux à deux, les séries observées, calées et prédéterminées. On notera ces comparaisons :

- (i) comparaison calée-observée: C/O,
- (ii) comparaison prédéterminée-observée: P/O,
- (iii) comparaison prédéterminée-calée: P/C.

Le tableau 4 présente les caractéristiques statistiques de la validation de CREC. L'IRVC indique que l'on fait, en moyenne, une erreur de 41% sur la reconstitution du volume de crue annuelle (le mode de l'IRVC vaut 32.6%), ce qui est assez important dans l'absolu, mais peut permettre d'obtenir un premier ordre de grandeur. La faible qualité de ce résultat peut être liée à la présence dans l'échantillon de validation de certains cas extrêmes, tels que le Douni en 1983 pour lequel on a: IRVC = 91.3 et coefficient de corrélation des lames décadales = 0.01. De telles valeurs ont, bien entendu, une influence importante sur la moyenne et l'écart-type des indices d'appréciation de la qualité des hydrogrammes prédéterminés. Or, elles correspondent, généralement, à des années exceptionnelles, très sèches, comme les années 1983 et 1984 (présentes à 7 reprises dans le cadre de l'échantillon de validation).

L'examen de ces critères numériques d'adéquation indique donc une certaine dégradation de la qualité de l'hydrogramme prédéterminé par rapport à la qualité des calages obtenus. Cette dégradation est, néanmoins, souvent le fait d'années très particulières du point de vue climatologique. Les équations statistiques de prédétermination des paramètres de CREC ne permettent donc guère de s'éloigner d'une certaine "normalité climatique".

Les graphiques présentant les lames décadales observées, calées et prédéterminées ont été tracés pour l'ensemble de l'échantillon de validation. Ils confirment la présence de cas particuliers difficilement exploitables, comme le Douni en 1983. Les figures 5 et 6 sont deux exemples de tracés. Pour la Tiemba à Dioulatedougou en 1981, le critère de Nash passe de 0.08 lors du calage à 0.12 pour l'hydrogramme prédéterminé, alors que l'IRVC varie de 0.3 à 6.7. Dans le cas du

Sien à Nafana-Sienso en 1977, le critère de Nash passe de 0.16 à 0.33 et l'IRVC de 1.0 à 34.8 traduisant, là aussi, une dégradation certaine de la qualité des hydrogrammes restitués.

Tableau n° 4

Résultats des validations des équations de prédétermination du modèle CREC

	Corrélation décadaire	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash journalier	Corrélation journalière
Moyenne C/O	0.94	5.41	40.86	3.40	0.197	0.89
Moyenne P/O	0.70	59.98	80.78	40.85	0.627	0.67
Moyenne P/C	0.77	58.01	71.47	41.99	0.518	0.77
Ecart-type C/O	0.04	6.03	30.08	2.84	0.116	0.07
Ecart-type P/O	0.30	53.37	48.68	29.06	0.350	0.29
Ecart-type P/C	0.29	53.21	48.26	27.75	0.403	0.29
Mode C/O	0.93	1.20	26.60	2.24	0.164	0.89
Mode P/O	0.74	40.70	102.00	32.63	0.528	0.70
Mode P/C	0.85	40.90	47.40	30.74	0.310	0.85
Minimum C/O	0.87	0.30	1.30	0.33	0.020	0.74
Minimum P/O	0.01	0.90	4.70	4.73	0.122	0.01
Minimum P/C	0.09	0.60	4.50	5.30	0.031	0.08
Maximum C/O	0.99	26.10	120.70	8.93	0.449	0.99
Maximum P/O	0.98	179.50	181.70	91.28	1.315	0.97
Maximum P/C	0.99	176.60	176.60	91.66	1.328	0.99

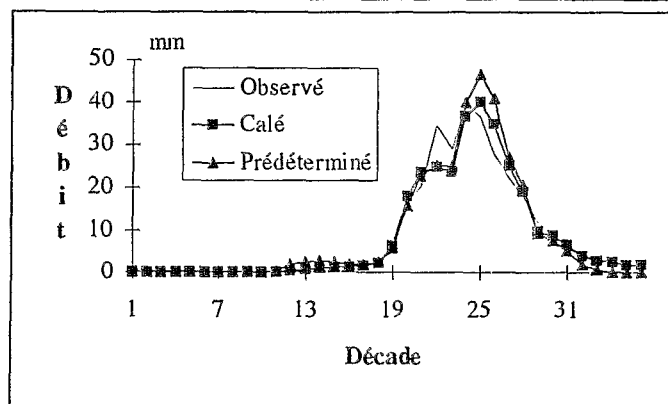


Figure n° 5

La Tiemba à Dioulatiédougou, 1981. Hydrogrammes observés, calés et prédéterminés. Modèle CREC.

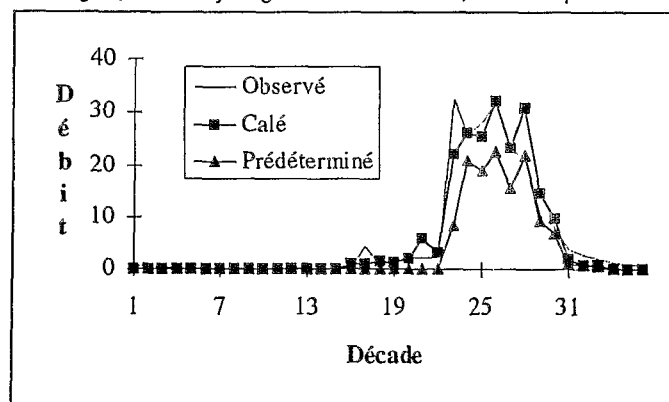


Figure n° 6

Le Sien à Nafana-Sienso, 1977. Hydrogrammes observés, calés et prédéterminés. Modèle CREC.

4.4.2 Modèle GR3

Le tableau 5 présente les caractéristiques statistiques de la validation de GR3. L'IRVC indique une erreur de 28%, en moyenne, sur la reconstitution du volume de crue annuelle (le mode de

l'IRVC vaut 9.2%), ce qui est bien meilleur que les résultats obtenus avec CREC, mais n'exclut pas, pour autant, l'existence de cas particuliers difficilement explicables comme le Yani à Madji en 1981 pour lequel l'IRVC atteint la valeur de 128. Si cette valeur n'était pas prise en compte, la moyenne serait de 22, l'écart-type de 26 et le maximum de 82.

Tableau n° 5
Résultats des validations des équations de prédétermination du modèle GR3

	Corrélation décadaire	Bilan1	Bilan2	IRVC	Nash journalier	Corrélation journalière
Moyenne C/O	0.92	10.45	45.43	6.67	0.244	0.87
Moyenne P/O	0.89	39.32	67.74	28.52	0.559	0.83
Moyenne P/C	0.98	38.61	52.00	27.92	0.447	0.96
Ecart-type C/O	0.06	8.95	28.97	7.89	0.145	0.09
Ecart-type P/O	0.06	60.89	57.62	35.18	0.514	0.10
Ecart-type P/C	0.02	61.22	58.63	34.88	0.715	0.04
Mode C/O	0.90	6.10	11.07	3.37	0.235	0.87
Mode P/O	0.89	12.60	59.40	9.16	0.389	0.80
Mode P/C	0.98	10.10	20.90	10.23	0.159	0.96
Minimum C/O	0.77	1.70	3.20	0.19	0.039	0.
Minimum P/O	0.75	0.60	4.60	0.11	0.069	62
Minimum P/C	0.93	0.60	2.80	0.41	0.004	0.60
						0.89
Maximum C/O	0.99	34.90	110.70	33.17	0.624	0.98
Maximum P/O	0.99	266.40	268.60	128.36	2.298	0.98
Maximum P/C	0.99	251.00	251.00	127.92	2.955	0.99

L'examen des autres critères numériques d'adéquation confirme la nette supériorité des équations de GR3 par rapport à celles de CREC et le bon niveau de restitution des hydrogrammes qu'elles autorisent. La qualité de la paramétrisation de GR3 qui permet l'indépendance des paramètres et l'absence de compensations numériques, autorise donc l'obtention d'équations de prédétermination d'assez bonne valeur.

Les graphiques présentant les lames décennales observées, calées et prédéterminées ont été tracés pour l'ensemble de l'échantillon de validation. On relève, là aussi, la présence de quelques cas particuliers, difficilement exploitables, et généralement liés aux années de forte sécheresse. Néanmoins, les hydrogrammes décennaux prédéterminés sont généralement de bonne qualité, pouvant permettre de quantifier les apports à l'exutoire de bassins versants avec une marge d'erreur acceptable. Les figures 7 et 8 sont deux exemples de ces tracés. Pour la Tiemba à Diouladougou en 1981, le critère de Nash reste stable (0.07 lors du calage et 0.07 pour l'hydrogramme prédéterminé), alors que l'IRVC s'améliore de 0.5 à 0.1. Dans le cas de la Tiemba à Lille en 1984, année plutôt sèche, le critère de Nash passe de 0.24 à 0.29 et l'IRVC de 2 à 20 traduisant, dans ce cas précis, une certaine détérioration de la réponse du modèle utilisé en prédétermination, bien que l'hydrogramme prédéterminé soit assez proche de l'hydrogramme calé.

4.5 Extension du programme aux autres régions de Côte d'Ivoire

Le programme ERREAU a été étendu aux autres zones climatiques de la Côte d'Ivoire, à savoir la zone forestière au Sud et la zone dite de transition au Centre du pays.

L'approche à l'aide d'algorithmes au pas de temps journalier s'est montrée peu satisfaisante. Plusieurs raisons peuvent expliquer ceci, au moins partiellement :

- l'extrême faiblesse des coefficients de ruissellement observés en zone de transition,
- la non prise en compte, par ces algorithmes, des mécanismes complexes de fonctionnement d'une forêt tropicale tels que: interception par le couvert végétal, fonctionnement de la litière, évapotranspiration,
- la qualité parfois douteuse des données de réseaux (données erronées, cumuls, etc.).

Une approche au pas de temps mensuel a donc été tentée sur l'ensemble des trois zones climatiques. Travailler à pas de temps plus grand a permis de s'affranchir de quelques problèmes concernant les données journalières, certaines erreurs telles que les cumuls se trouvant ainsi intégrées. Ces garanties de fiabilité ne faisant pas perdre, pour autant, son intérêt au projet, puisque le pas de temps mensuel intéresse vivement les opérateurs du développement économique

et rural. Cette approche a conduit à de bons résultats tant avec le modèle GR3M (modèle mensuel dérivé de GR3) qu'avec le modèle AB2 issu d'une restructuration du modèle de Snyder (Servat, 1993). Néanmoins, comme dans le cas des algorithmes au pas de temps journalier, les problèmes de prédétermination des paramètres n'ont pu être résolus de manière satisfaisante.

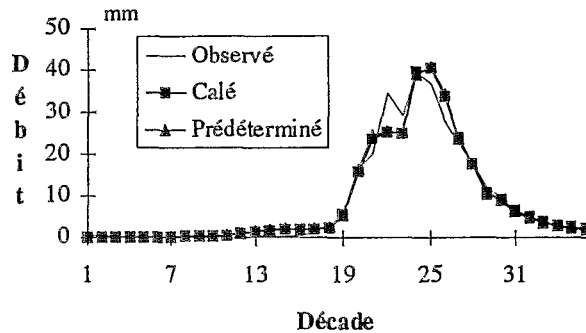


Figure n° 7
La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981. Hydrogrammes observés, calés et prédéterminés. Modèle GR3.

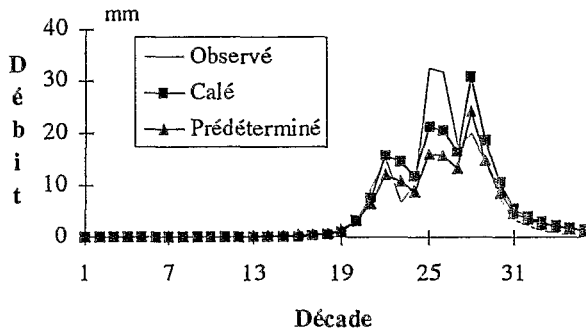


Figure n° 8
La Tiemba à Lille, 1984. Hydrogrammes observés, calés et prédéterminés. Modèle GR3.

5. LE PROGRAMME ECOULEES : UNE HYDROLOGIE A GRANDE ECHELLE DANS UNE OPTIQUE DE GESTION DES RESSOURCES

Forts de l'expérience et des résultats acquis lors du programme ERREAU, il nous a semblé nécessaire de nous intéresser à l'ensemble de la zone de savane de l'Ouest africain, mais toujours avec un souci d'utilisation possible des résultats dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Ce qui a prévalu lors de la mise en place du programme ECOULEES (Estimation et Caractérisation dans l'Ouest africain des Lames d'Eau Écoulées), qui s'inscrit, par ailleurs, dans la thématique de FRIEND-AOC.

La méthodologie du programme ERREAU, ainsi que celle développée par Le Barbe dans le cadre de la Monographie du Bénin (1990), ont été retenues pour mener à bien ce projet qui n'en est pour l'instant qu'à sa phase initiale. Il s'agit donc, d'une part, d'une méthodologie comparable à celle que nous venons d'exposer (mais qui intégrera des facteurs explicatifs supplémentaires liés à la plus grande hétérogénéité de la zone d'étude) et, d'autre part, d'une approche plus empirique. Cette dernière repose sur l'identification de zones pour lesquelles il est possible de définir une fonction de production unique (annuelle ou mensuelle selon le cas), qui permette une représentation correcte de la relation pluie-débit. Ce découpage en secteurs homogènes peut reposer, a priori, sur une différenciation liée au relief, à l'occupation des sols, à la nature des sols, etc.

Ce programme portera donc sur les régions de savane soudanaise et guinéenne (isohyètes 850 à 1400 mm environ) de la zone suivante: Bénin, Togo, Nord Côte d'Ivoire, Sud Burkina Faso,

Sud Mali, voire également Sud Sénégal. Guinée et Ghana pourraient compléter cette zone d'étude si la qualité et surtout la disponibilité des données qui y sont recueillies s'y prêtent.

L'objectif de ce programme est de fournir, pour ce secteur géographique, les éléments permettant le calcul des apports à l'exutoire de bassins versants de superficie allant de quelques centaines à quelques milliers de km², aux pas de temps annuel, mensuel, voire même décadaire si cela se révèle possible. En outre, on s'efforcera d'estimer la distribution des débits maximaux en tous points de la zone d'étude.

L'ensemble de ces résultats (paramètres de lois de distribution, paramètres de modèles, etc.) sera cartographié à l'échelle régionale et informatisé, constituant ainsi le volet hydrologique d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) concernant cette zone de savane soudanaise et guinéenne. Ces résultats informatisés et facilement accessibles seront d'une grande importance pour l'ensemble des services techniques (Directions de l'Eau ou de l'Hydraulique, Directions des Aménagements agricoles, Directions de l'Energie, etc.), et pour les différents projeteurs et aménageurs, privés ou non, devant intervenir dans cette zone dans le cadre d'opérations de développement.

Cependant, dans un premier temps, l'étude ne concernera que la zone de savane du Centre et du Nord de la Côte d'Ivoire. Cette restriction permettra la mise au point de la méthodologie et des outils (notamment informatiques) qui seront ensuite utilisés dans le cadre de la généralisation de cette étude. Plusieurs étapes sont, en effet, prévues pour mener à bien ce programme. La première est, bien entendu, l'importante phase de collecte des données. Elle nécessite de nombreux contacts et démarches pour obtenir une information souvent considérée comme patrimoine national, et donc empreinte de confidentialité ou de potentialités commerciales. Une telle masse d'informations ne peut se gérer efficacement en dehors d'une vraie base de données. C'est la raison pour laquelle l'Antenne Hydrologique développe actuellement une base de données sous Paradox Windows. Ce produit devrait être très complet car il permettra, au sein de la base, la réalisation de nombreux traitements statistiques de différents niveaux de complexité. Cette première étape terminée, il conviendra de passer à la modélisation proprement dite, conceptuelle et empirique, dont les résultats seront interprétés en s'appuyant sur les possibilités offertes par les S.I.G. Parallèlement à cette phase d'analyse sera élaboré le produit logiciel permettant d'intégrer ces résultats dans une base de connaissance (cartographie et données) qui sera remise aux différents services et laboratoires nationaux.

6. CONCLUSION

L'un des objectifs du programme ERREAU était de pouvoir fournir des outils fiables de modélisation pluie-débit, permettant d'estimer convenablement les apports en eau à l'exutoire de bassins versants de zone de savane soudanaise dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Malgré des conditions de fonctionnement assez difficiles dues à une forte variabilité des données (coefficients d'écoulement variant de 0.5% à 20%), et à une sécheresse très prononcée en 1983 et 1984, les modèles CREC et GR3, conçus en zone de climat tempéré, présentent de bons résultats puisque le critère de Nash moyen de l'ensemble des calages effectués est de l'ordre de 0.2. Certaines améliorations pourraient cependant être suggérées pour permettre un meilleur fonctionnement en zone tropicale. Une modélisation plus adaptée des phénomènes d'évapotranspiration pourrait, par exemple, être envisagée dans la mesure où ce phénomène représente, dans ces régions, de l'ordre de 80% à 90% du bilan hydrique, alors que les modèles globaux utilisés ne le traitent que d'une manière très simplifiée. Il faudrait pour cela pouvoir disposer des données nécessaires à une modélisation plus fine, ce qui est loin d'être toujours le cas. Une extension du programme à l'ensemble de la Côte d'Ivoire a mis en avant de sérieuses difficultés avec les modèles journaliers, conduisant à l'élaboration d'outils au pas de temps mensuel dont l'utilisation peut être admise dans les différents secteurs climatiques du pays.

Par ailleurs, nous avons cherché, en zone de savane principalement, à pouvoir utiliser ces algorithmes au pas de temps journalier en prédétermination de façon à envisager leur utilisation sur des bassins versants non jaugés. Pour cela, nous avons tenté d'établir des équations de régression multiple permettant de prédéterminer les valeurs des paramètres des modèles. Elles font intervenir, principalement, des variables caractéristiques de l'occupation des sols et des indices pluviométriques 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. Ce qui permettrait d'améliorer sensiblement la représentation des phénomènes d'évapotranspiration, primordiaux dans le bilan hydrique en zone de savane soudanaise.

Dans une optique opérationnelle, il faudrait, cependant, pouvoir accroître le coefficient de fiabilité de ces différentes équations pour pouvoir les utiliser valablement. La prise en compte d'éléments supplémentaires pourrait permettre d'améliorer la définition des équations en utilisant la même méthodologie (regroupement en "stations-années", calages annuels systématiques, caractérisation des jeux de paramètres calés et recherche d'équations de prédétermination des paramètres au moyen des techniques de régression multiple). Parmi ces directions de recherche supplémentaires qui devraient être explorées, on peut citer en particulier:

- la prise en compte pour les bassins versants de descripteurs supplémentaires tels que des caractéristiques pédologiques ou géologiques, des indices de végétation ou de croissance de végétation, des indices d'humectation des horizons supérieurs du sol, etc. Autant de caractéristiques plus précises que le simple découpage en cultures, savane, forêt et habitat.

- la prise en compte de bassins versants situés dans d'autres régions d'Afrique de l'Ouest qui permettrait d'atteindre une certaine hétérogénéité susceptible de faire apparaître de nouveaux facteurs explicatifs liés à leurs caractéristiques intrinsèques. Dans le cas que nous avons traité, celles-ci étaient d'un poids relativement faible par rapport aux caractéristiques externes du fait de la forte homogénéité de la région considérée, et nous n'avons sans doute pas pu en tirer toute l'information possible.

Ces orientations ont été reprises au sein du programme ECOULEES qui s'intéresse, cette fois, à l'ensemble de la zone de savane ouest africaine, et qui allie une démarche conceptuelle et une démarche empirique. Ce programme, au sein de la thématique "Modélisation hydrologique et régionalisation des paramètres hydrologiques. Application aux bassins non jaugés" du projet FRIEND-AOC, associe analyse de données à l'échelle régionale et modélisation, sans perdre de vue la nécessité d'intégrer, dans cette approche scientifique, l'élaboration de produits utilisables ensuite par les structures nationales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Dezetter A., 1991 - Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savane soudanaise (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. Septembre 1991.
- Draper N.R. et Smith H., 1981 - Applied regression analysis. John Wiley et sons Ed.
- Edijatno, 1991 - Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat. Université de Strasbourg. Janvier 1991.
- Edijatno et Michel C., 1989 - Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n°2/1989: 113-121.
- Guilbot A., 1986 - Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. *Revue Internationale des Sciences de l'Eau*, Vol 2-1: 19-26.
- Le Barbé L., 1990 - Le service de l'hydrologie du Bénin. Situation actuelle et perspectives. Projet FAC n° 269/CD/88.
- Loumagne C., 1988 - Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Thèse de Doctorat. Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay. Octobre 1988.
- Nash J. E. et Sutcliffe J. V., 1970 - River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principle. *Journal of Hydrology*, 10:282-290.
- Nelder J. A. et Mead R., 1964 - A simple method for function minimization. *Computer Journal*, 7:308-313.
- Rosenbrock H. H., 1960 - An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer Journal*, 3:175.
- Servat E., 1993 - Evaluation régionale des ressources en eau. Application à la Côte d'Ivoire. Rapport de synthèse. ORSTOM. Abidjan. Côte d'Ivoire.
- Servat E. et Dezetter A., 1991 - Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 36, Number 4, August 1991.
- Servat E. et Lapetite J.M., 1990 - Occupation des sols des bassins versants du Programme ERREAU. Programme ERREAU. Rapport ORSTOM. Abidjan. Côte d'Ivoire.