

Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau en Côte d'Ivoire

B. KOUAME, E. SERVAT

Antenne Hydrologique Orstom, 06 BP 1203 Cidex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire

A. DEZETTER

Centre Orstom, 01 BP 182, Ougadougou 01, Burkina Faso

Résumé L'économie de la Côte d'Ivoire, pays en développement, est principalement liée à l'agriculture. La connaissance, avec précision, de la disponibilité des ressources en eau revêt donc une importance considérable. Le programme Erreau (Evaluation Régionale des Ressources en Eau), mené en Côte d'Ivoire, avait pour objectif de contribuer à la connaissance de cette ressource grâce à l'utilisation des techniques de modélisation pluie-débit. Cette étude a porté sur plusieurs dizaines de bassins versants de superficie comprise entre 100 et 7000 km². Nous avons cherché à représenter la relation pluie-débit à trois pas de temps: annuel, mensuel et journalier. Au pas de temps annuel, si les différentes formulations testées se montrent assez approximatives, elles permettent cependant d'estimer globalement la lame annuelle écoulée. Le modèle élaboré au pas de temps mensuel se révèle tout à fait satisfaisant en matière de restitution des hydrogrammes. Son utilisation a pu être validée sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire. Les modèles au pas de temps journalier se sont montrés très performants en zone de savane permettant donc de reconstituer les apports à des pas de temps assez fins. Les valeurs des paramètres des modèles journaliers, après calages, ont été caractérisées afin de pouvoir utiliser ces algorithmes dans un cadre régional, en simulation, sur des bassins non jaugés ou mal connus. Les équations de prédétermination obtenues, dans certains cas et pour certaines zones géographiques, font intervenir des variables caractéristiques de l'occupation des sols d'une part, et des indices pluviométriques de répartition des pluies dans l'année d'autre part. Ces équations se révèlent d'une qualité acceptable en ce qui concerne le modèle GR3. Cependant, dans une optique réellement opérationnelle, il faudrait encore accroître leur fiabilité.

Rainfall-runoff modelling and the estimation of water resources in the Ivory Coast

Abstract The economy of Ivory Coast, a developing country, is mainly based on agriculture. Precise knowledge of the availability of water resources is therefore important. The research programme named Erreau (Evaluation Régionale des Ressources en Eau) was designed to contribute to this knowledge using rainfall-runoff modelling. This study focused on a large number of catchments with areas between 100 and 7000 km². The

rainfall-runoff relationship was studied at three time steps: the year, the month and the day. For the yearly time step, the various formulae tested give only approximate results. Nevertheless, they allow an overall estimation of the annual flow. The monthly model is quite satisfactory for the reconstitution of hydrographs. Its use could be validated for the whole Ivory Coast. The daily models were very impressive in the savannah area, allowing the calculation of water resources for small time steps. After model calibrations, the parameters were characterized so that these algorithms could be used in a regional framework with ungauged or unknown catchments. Some of the predetermination equations produced use such variables as land use or rainfall index for rainfall distribution during the year. These equations have an acceptable quality as regards the GR3 model, however it would be necessary to improve their reliability from an operational point of view.

INTRODUCTION

Les différents projets d'aide au développement élaborés et réalisés en Côte d'Ivoire (périmètres d'irrigation, alimentation en eau potable, lutte contre l'onchocercose, etc.) visent, entre autres, à freiner le départ des populations rurales vers les grands centres urbains du centre (Bouaké) et du sud 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'inscrivent les travaux de modélisation de la relation pluie-débit entrepris en Côte d'Ivoire.

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 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.

DONNEES ET METHODES

Données

Sur l'ensemble des trois zones climatiques étudiées, à savoir, les zones de forêt, de savane et de transition, nous avons retenu 43 bassins versants et 55 postes pluviométriques. La superficie des bassins est comprise entre 100 et 7000 km². Les données hydrométriques à notre disposition sur ces bassins couvrent une période d'observations qui varie de 3 à 27 ans. Pour les postes pluviométriques les durées d'observations vont de 9 à 69 ans. Le taux de lacunes est très élevé sur l'ensemble des ces données hydro-pluviométriques. On note en effet que sur les 419 stations-années observées en hydrométrie 195 sont incomplètes, soit 45%. En pluviométrie sur un total de 1615 stations-années observées, 395 sont incomplètes, soit 25%.

L'étude des corrélations entre postes pluviométriques de longue durée, d'une part sur les hauteurs de pluies annuelles, et, d'autre part sur les hauteurs pluviométriques mensuelles, a donné de faibles coefficients de corrélation. Ces coefficients sont révélateurs de la forte variabilité de la pluviométrie et soulignent la faible densité du réseau de mesure, qui ne peut que difficilement prendre en compte une telle dispersion.

L'étude critique des séries pluviométriques et hydrométriques nous a permis de compléter des lacunes, principalement au moyen de méthodes statistiques. Nous avons néanmoins considéré les données comme généralement utilisables compte tenu de la vocation « appliquée » de notre travail. Ainsi nous avons pu constituer 90 stations-années en zone de forêt, 54 en transition et 59 en savane. La période de concomitance des séries pluviométriques et hydrométriques s'étend de 1965 à 1986.

METHODES

Les modèles globaux pluie-débit que nous avons utilisés fonctionnent à différents pas de temps: du pas de temps annuel au pas de temps journalier en passant par le pas de temps mensuel.

Modélisation au pas de temps annuel

Cette approche empirique n'a été développée que dans les zones de forêt et de transition.

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.

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.

Modélisation au pas de temps mensuel

Le test d'un modèle au pas de temps mensuel nous a paru intéressant dans la mesure où un tel algorithme pluie-débit permet de limiter certains des inconvénients liés à la collecte des données au pas de temps journalier, cumuls notamment.

Notre choix s'est porté sur un algorithme élaboré par Snyder (1963) et décrit par Singh (1990). C'est un modèle fortement inspiré des équations du bilan hydrologique. Après avoir étudié ce modèle, 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.

Le modèle de Snyder dans sa version initiale comporte neuf paramètres. La lame d'eau écoulée V_q est la résultante de deux composantes: un écoulement immédiat V_{qa} et un écoulement retardé V_{qd} .

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

$$V_{qa} = AA(V_{pi} - S_{vi}) \quad (1)$$

avec: i : indice du mois considéré; V_{pi} : volume précipité (en mm) durant le mois i ; AA : paramètre ($0 \leq AA \leq 1$); et S_{vi} : valeur du seuil pour le mois i ; $S_{vi} = \text{Seuil} [1 + \sin(\pi i)]$, $0 \leq \text{Seuil} \leq 150$.

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

$$V_{qd} = \sum_{i=1}^5 BB_i(V_{pi} - G_i) \quad (2)$$

avec: $i = 1$: mois considéré, $i = 2, 3, 4$ et 5 mois précédent de rang 1, 2, 3 et 4; $BB_i = \text{paramètres } (BB_a, BB_b, BB_c, BB_d, BB_e)$ exprimant la proportion d'eau provenant du mois considéré et des quatre mois antérieurs ($0 \leq BB_i \leq 1$); G_i : paramètre de type seuil:

$$G_i = CC + DD * S_{vi} \quad (3)$$

Notons que les paramètres "Seuil" du modèle permettent de prendre en compte la variation de la capacité d'absorption du sol.

Le modèle initial comporte donc neuf paramètres: Seuil, AA , BB_a , BB_b , BB_c , BB_d , BB_e , CC et DD .

Le modèle à neuf paramètres a été calé sur 60 stations-années en zone de forêt et 34 en zone de transition pour les calages station-année par station-année et sur des séries chronologiques de plusieurs années. Les résultats enregistrés lors de ces différents calages sont satisfaisants dans l'ensemble. Par contre les validations sont de moins bonne qualité. La surparamétrisation du modèle peut expliquer en partie ce phénomène. Il a donc semblé nécessaire de restructurer le modèle.

Après une étude de sensibilité (Kouamé, 1992) il est ressorti que certains paramètres tels que Seuil et CC sont peu sensibles. Ils ont donc été fixés à des valeurs constantes. Pour les paramètres BB_i , très sensibles et qui caractérisent les prélèvements d'eau sur les précipitations du mois en cours (BB_a) et des quatre mois précédents (BB_b, \dots, BB_e), une loi de décroissance linéaire simple a été retenue:

$$BB_i = BB_a(1 - Xi/4) \quad (4)$$

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

On obtient alors un modèle à trois paramètres (AA , BB_a et DD), appelé modèle AB2.

Modélisation au pas de temps journalier

Deux modèles globaux conceptuels et déterministes ont été utilisés pour mener à bien cette étude: CREC (Guilbot, 1986) et GR3 (Edijatno & Michel, 1989).

Le modèle CREC est basé sur un schéma à réservoirs relativement classique qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert. La version de CREC présentée en Fig. 1 est la version complète, à dix paramètres. La fonction de production comprend trois 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. 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:

$$Q_j^H = [X1 * H_j]^2 \tag{5}$$

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:

$$Q_j^G = X2 * Q_{j-1}^G + (1 - X2) * \Delta G_j \tag{6}$$

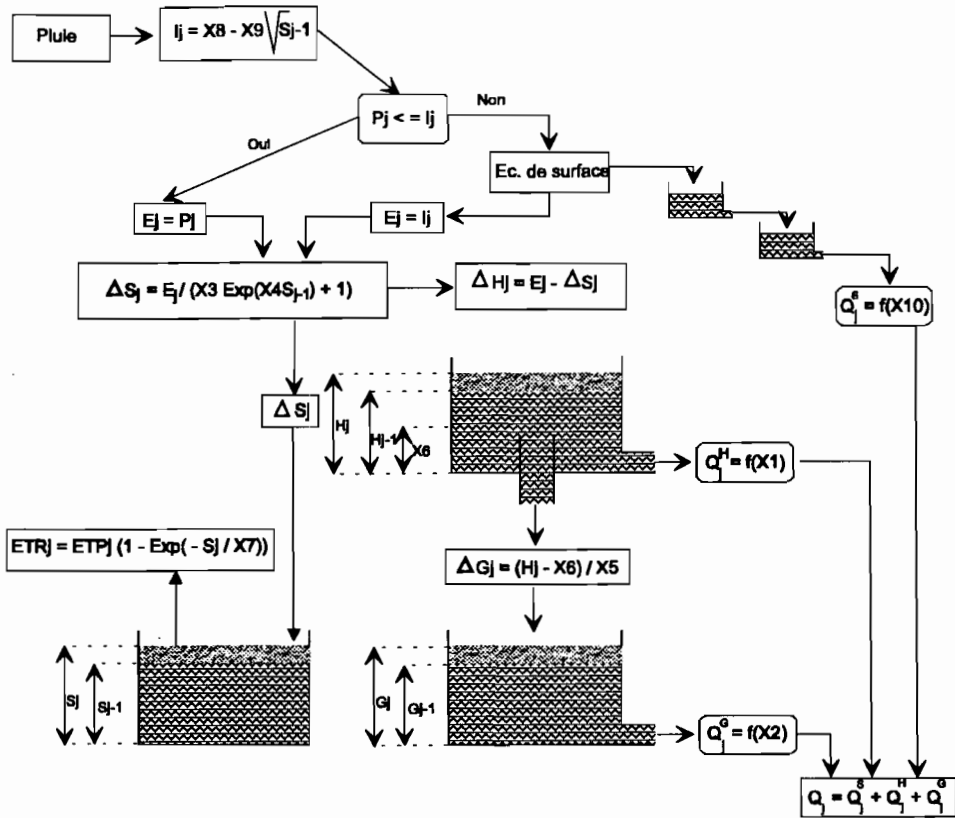


Fig. 1 Schéma conceptuel du modèle CREC.

Le modèle GR3 qui est également un modèle à réservoirs (Fig. 2), a été utilisé à de nombreuses reprises en zone tempérée (Loumagne, 1988; Edijatno & 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:

- (a) 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;
- (b) 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;
- (c) le réservoir eau-gravitaire, dont le paramètre B caractérise la « rétention maximale à un jour »: 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:

$$Q = \frac{R^2}{R + B} \tag{7}$$

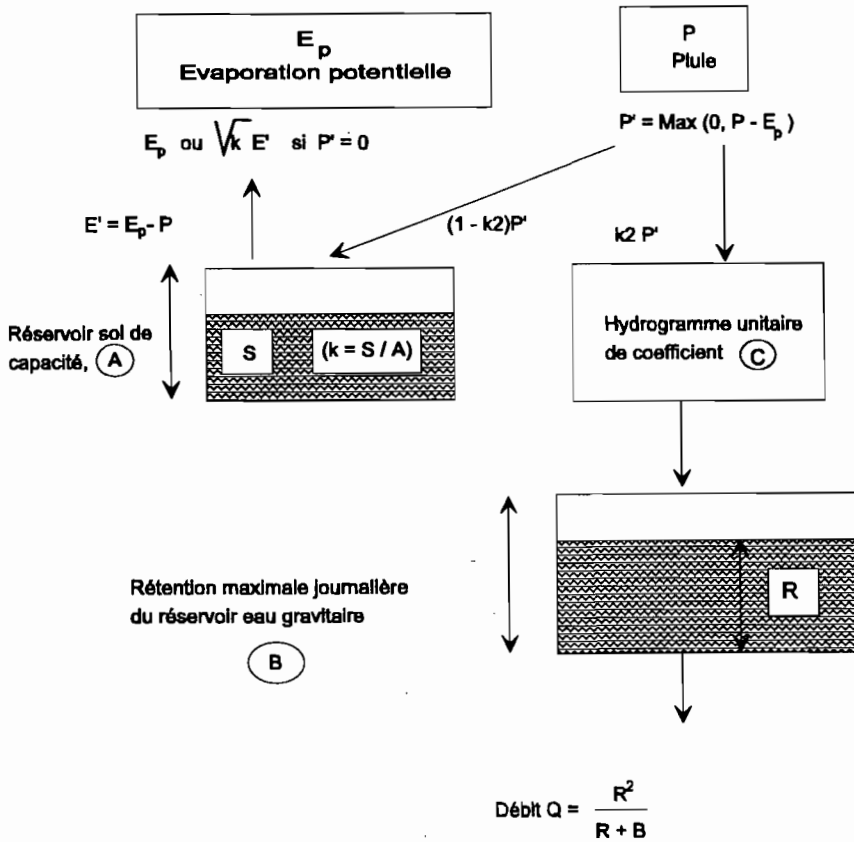


Fig. 2 Schéma conceptuel du modèle GR3.

RESULTATS

Modélisation empirique (pas de temps annuel)

Les équations obtenues en fonction de la pluie annuelle *P* sont reportées dans le Tableau 1. Dans l'ensemble la valeur du critère, écart quadratique moyen, reste élevée. La formule de type Medinger apparaît, cependant, légèrement plus satisfaisante que les autres. Le fait de retirer de l'échantillon les années exceptionnelles, tant déficitaires qu'excédentaires, n'améliore que faiblement les résultats (cf. Tableau 2).

Le second type d'estimation de la lame annuelle écoulée a été effectué à partir des données relatives à la pluviométrie de l'année, de l'année antérieure et saisonnière, et en utilisant des techniques de régression multiple. Les résultats sont de qualité moyenne en zone de forêt (coefficients de détermination R^2 variant de 0,57 à 0,82).

En zone de transition par contre, les équations de régression obtenues ne sont que de faible qualité, les coefficients de détermination R^2 obtenus étant relativement faibles tant sur l'échantillon complet que sur l'échantillon réduit (de 0,33 à 0,63).

Tableau 1 Valeurs, après calage, des paramètres et du critère sur l'échantillon complet.

Forêt (90 éléments)		Transition (54 éléments)	
Modèle	Critère	Modèle	Critère
Type Medinger (1948): $L = 0,5846*(P - 968,8)$	164,2	Type Medinger: $L = 0,1177*(P - 692)$	33,7
Type Coutagne (1949): $L = 0,0289*(P - 700)^{1,382}$	164,9	Type Coutagne: $L = 0,00077*(P - 300,5)^{1,651}$	34,4
Type Deri (1977): $L = 0,00089*(P)^{1,751}$	179,1	Type 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
$L = \exp(4,2732 + 0,00095*P)$	191,0	$L = \exp(1,5821 + 0,00197*P)$	35,3

Tableau 2 Comparaison des valeurs de l'Ecart Quadratique Moyen dans les différents cas.

Modèle	Echantillon complet		Echantillon sans les valeurs « exceptionnelles »	
	Forêt	Transition	Forêt	Transition
Coutagne	164,9	34,4	91,6	24,8
Medinger	164,2	33,7	95,7	25,7
Régression multiple	111,4	26,7	-	-

Modélisation conceptuelle (pas de temps mensuel et journalier)

Dans les deux cas (pas de temps mensuel et journalier), le critère de calage utilisé est le critère de Nash modifié (Servat & Dezetter, 1993), qui s'exprime:

$$\text{Nash} = \frac{\sum_{i=1}^N (L_o - L_c)^2}{\sum_{i=1}^N (L_o - \bar{L})^2} \quad (8)$$

avec: L_c = lame calculée en mm; L_o = lame observée en mm; et \bar{L} = lame observée moyenne en mm.

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

Modèle au pas de temps mensuel

Le modèle AB2 à 3 paramètres a été calé, année par année, sur les 94 stations-années disponibles en zone de forêt et de transition. La qualité de ces calages est satisfaisante:

- en forêt 43% et 72% des valeurs du critère de Nash modifié sont respectivement inférieures à 0,1 et 0,2;
- en transition 50% et 71% des valeurs du critère de Nash modifié sont respectivement inférieures à 0,1 et 0,2.

Les valeurs moyennes du critère de Nash modifié sont, respectivement, 0,199 et 0,214 en forêt et en transition. Sur des séries de plusieurs années, les calages avec le modèle initial à neuf paramètres (cf. Tableau 3) donnent des résultats meilleurs que ceux du modèle définitif à trois paramètres. Par contre, en validation, les valeurs du critère obtenues pour le modèle restructuré sont nettement inférieures à celles du modèle initial. Le modèle AB2 se révèle donc robuste, ce qui est indispensable dans le cadre de l'utilisation d'un tel outil en mode opérationnel.

Testé en zone de savane, cet algorithme a également donné de bons résultats, confirmant sa robustesse. Le Tableau 4 récapitule la valeur moyenne du critère de Nash modifié dans les trois zones testées.

Modèle au pas de temps journalier

Les résultats obtenus avec les modèles journaliers utilisés ne sont réellement satisfaisants qu'en zone de savane. Divers problèmes, liés très vraisemblablement à des insuffisances de conception portant sur la représentation des phénomènes d'évapotranspiration en zone de forêt ou sur la mauvaise prise en compte de la litière, peuvent expliquer ces faiblesses. La mauvaise qualité des données parfois collectée en forêt (cumuls fréquents) peut aussi contribuer à expliquer ces déficiences.

En zone de savane, par contre, les résultats sont satisfaisants (Dezetter, 1991 ; Servat & Dezetter, 1993). Les modèles CREC et GR3 ont été calés sur l'ensemble des 91 stations années dont nous disposons. En ce qui concerne CREC, dans 34% des cas le critère de Nash modifié est inférieur à 0,1, ce qui dénote un excellent calage. Pour GR3, 27,5% des cas présentent des valeurs de critère de Nash modifié inférieures à 0,1. Dans les deux cas, les fortes valeurs du critère de Nash sont essentiellement dues aux années 1983 et 1984, qui furent 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 3 Valeurs du critère de Nash modifié pour les calages et validations des modèles mensuels initiaux et restructurés.

Années calage	Années validation	Calage « initial »	Validation « initial »	Calage AB2	Validation AB2
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977-1979	1980	0,1839	0,7090	0,1900	0,4101
Ko à Man (207 km ²) 1971-1973	1981	0,1090	0,2775	0,1412	0,2273
	1985-1986		0,1991		0,1946
Ko à Man (207 km ²) 1985-1986	1971-1973	0,0765	0,3001	0,1295	0,2390
	1981		0,9400		0,6659
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984-1986	1981-1983	0,1124	0,5640	0,1721	0,3229
	1981-1982		0,6136		0,3442
Néka à Nékaounié (344 km ²) 1980-1982	1986	0,3133	1,019	0,3553	1,065
Néka à Nékouanié (344 km ²) 1980-1981	1982	0,3429	0,4070	0,4555	0,3105
	1986		1,206		1,019
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1970-1973	1977-1979	0,4799	0,3667	0,5922	0,3565
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1984-1986	1977-1979	0,2399	0,6303	0,3245	0,7658
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984-1986	1982-1983	0,0381	0,1440	0,0571	0,1167
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

La première colonne indique le bassin versant et les années sur lesquels ont été effectués les calages, la seconde les années sur lesquelles portent les validations, puis de la troisième à la sixième colonne les valeurs correspondantes des modèles initiaux et restructurés.

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 cette validation croisée 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 caractéris-

Tableau 4 Valeurs moyennes du critère de Nash modifié, pour chaque zone test.

Zone	Nash modèle initial	Nash modèle restructuré
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

tiques 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.

Des essais ont été effectués pour chercher à expliquer, à l'aide d'équations de régression multiple, les valeurs prises par les paramètres des modèles. Dans l'absolu, c'est se donner ainsi les moyens de pouvoir prédéterminer ces mêmes paramètres et donc d'utiliser les algorithmes pluie-débit sur des bassins versants non jaugés.

Sur l'ensemble des paramètres de CREC 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.

Pour GR3 les valeurs des coefficients de détermination des trois équations de régression correspondant aux paramètres A , B et C sont respectivement 0,32, 0,44 et 0,87.

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. Ils contribuent à définir pour les deux modèles certains paramètres de production comme de transfert.

Des essais de reconstitution d'hydrogrammes ont été entrepris à l'aide de ces différentes équations, pour CREC comme pour GR3.

Pour CREC, l'examen de divers critères numériques d'adéquation (Servat & Dezetter, 1993) indique une certaine dégradation de la qualité de l'hydrogramme reconstitué 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 résultats obtenus à l'aide des équations de GR3 sont généralement meilleurs que ceux acquis avec CREC. La qualité de la paramétrisation de GR3 qui permet l'indépendance des paramètres et l'absence de compensations numériques, autorise l'obtention d'équations de prédétermination d'assez bonne valeur. Cependant, dans un cas comme dans l'autre, si les voies explorées pour la prédétermination des paramètres se sont

révélées prometteuses, les conclusions ne permettent pas encore d'aboutir à une utilisation en mode opérationnel.

CONCLUSION

Les différentes approches et les différents pas de temps envisagés pour la modélisation de la relation pluie-débit conduisent à des résultats et à des conclusions qui diffèrent selon les cas.

La modélisation au pas de temps annuel repose sur une approche empirique dont la précision des résultats est loin d'être pleinement satisfaisante. Une telle approche ne permet pas de prendre en compte les diverses hétérogénéités qui caractérisent la relation pluie-débit quelle que soit la zone climatique considérée.

L'approche conceptuelle, menée au pas de temps mensuel en s'appuyant sur un algorithme initialement proposé par Snyder (1963), a conduit à d'excellents résultats. L'algorithme restructuré s'avère plus robuste que le modèle initial tout en conservant un niveau de fiabilité très satisfaisant, et ce pour toutes les zones climatiques. Il fait ainsi preuve de qualités qui autorisent son utilisation sur tout le territoire ivoirien pour reconstituer des séries d'apports.

Les travaux de modélisation menés au pas de temps journalier n'ont conduit à des résultats satisfaisants qu'en zone de savane. Dans ce contexte climatique précis, et 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. D'une manière générale, certaines améliorations pourraient cependant être suggérées pour permettre un meilleur fonctionnement de ces algorithmes 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, un pourcentage extrêmement important 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 malheureusement loin d'être toujours le cas. Les essais effectués dans le domaine de la prédétermination des paramètres conduisent à des résultats intéressants mais insuffisants, toutefois, pour pouvoir envisager une utilisation dans un contexte opérationnel. Néanmoins, les équations obtenues 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 tropicale.

Remerciements Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale pour l'Aviation Civile et la Météorologie (ANAM) et la Direction de l'Eau de Côte d'Ivoire pour la mise à disposition des données sans lesquelles cette étude n'aurait pu être réalisée.

REFERENCES

- Coutagne, A. (1949) Contribution à l'étude de l'écoulement en Algérie. *Annuaire hydrologique 1947-1948*. SCEGT.
- Deri, J. (1977) Etude générale de la ressource en eau en Algérie. Note manuscrite et annexes, ANRH.
- 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.
- Edijatno (1991) Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Edijatno & Michel, C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* no. 2, 113-121.
- Guilbot, A. (1986) Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. *Revue International des Sciences de l'eau* 2(1), 19-26.
- Kouamé, 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.
- 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.
- Medinger, G. (1948) *Tableau général de l'hydrologie algérienne dans Hydrologie Algérienne, recueil des observations de 1924 à 1946*. SCEGT.
- Servat, E. & Dezetter, A. (1993) Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *J. Hydrol.* 148, 231-248.
- Singh, V. P. (1990) *Hydrologic Systems*, vol. II: *Watershed Modeling*. Prentice Hall Inc.
- Snyder, W. M. (1963) A water yield model derived from monthly runoff data. In: *Symposium on Surface Waters* (General Assembly of Berkeley, August 1963), 18-30. IAHS Publ. no. 63.