

**ÉVALUATION RÉGIONALE
DES RESSOURCES EN EAU :
LA RÉGIONALISATION DES PARAMÈTRES DES
MODÈLES PLUIE-DÉBIT.
EXEMPLE DE LA ZONE NORD-OUEST DE LA
CÔTE D'IVOIRE.**

A. DEZETTER¹ ET E. SERVAT²

RÉSUMÉ

Les différents projets d'aide au développement élaborés et réalisés dans le nord de la Côte d'Ivoire nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources naturelles en général, et des ressources en eau en particulier. C'est dans cette optique qu'ont été réalisés des travaux de modélisation de la relation pluie-débit sur 16 bassins versants (100 à 4 500 km²) des hauts bassins du Niger, du Bandama et du Sassandra. L'objectif était de caractériser les valeurs des paramètres après calage, afin de pouvoir utiliser ces algorithmes en simulation sur des bassins versants, non jaugés ou mal connus, dans le cadre de projets d'aménagement. Ces modèles pluie-débit ont été calés année par année sur les bassins versants retenus. On a ensuite, procédé, sur les jeux de paramètres calés, à une analyse de données (ACP, régression linéaire multiple) destinée à mettre en évidence les relations entre les valeurs prises par les paramètres des modèles et différentes variables climatiques, physiques ou caractéristiques de l'occupation des sols. Ces relations ont été validées et testées. Elles présentent un niveau d'adéquation tout à fait satisfaisant entre hydrogrammes annuels observés et calculés, ce qui autorise leur utilisation dans le cadre de projets d'aménagements, à vocation agronomique en particulier.

¹ Centre Orstom Guadeloupe, BP 1020, 97178 Pointe-à-Pitre cedex.

² Antenne Hydrologique, 06 BP 1203 cidex 1, Abidjan 06, Côte D'Ivoire.

INTRODUCTION

Les différents projets d'aide au développement élaborés et réalisés dans le nord de la Côte d'Ivoire (périmètres d'irrigation, alimentation en eau potable, lutte contre l'onchocercose, etc.) visent, entre autres, à freiner le départ des populations rurales vers les grands centres urbains du centre (Bouaké) et du sud (Abidjan), en développant l'agriculture et en améliorant les conditions de vie dans ces régions plus défavorisées.

Les projets de restructuration et d'intensification des pratiques agricoles, si on ne considérait que ceux-ci, nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources naturelles en général, et des ressources en eau en particulier.

Les cours d'eau des 16 bassins versants retenus dans le cadre de cette étude présentent une crue unique, dont le maximum se situe généralement en août ou septembre, conséquence d'une seule saison des pluies qui débute habituellement en juin pour s'arrêter en octobre.

L'essentiel des données sur lesquelles nous avons pu travailler couvre la fin des années 1970 et les années 1980 jusqu'en 1985 ou 1986 selon les cas. Cette période est caractérisée par une forte variabilité des précipitations annuelles. L'année 1983, caractérisée par une sécheresse très marquée sur l'ensemble du territoire ivoirien, a vu, par exemple, un total précipité de 879 millimètres sur le bassin du Yani à Madji (1 013 km²), alors qu'en 1981 la pluviométrie annuelle était de 1 559 millimètres. En conséquence, les lames écoulées présentent, également, une très importante dispersion. On notera, sur ce même bassin du Yani, 21,8 millimètres écoulés en 1983 pour 164,9 millimètres en 1981.

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

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

On note, sur la zone étudiée, une densité d'habitat très faible, avec un maximum de 4,4 % observé sur le bassin du Lafigue, et qui correspond à la présence de la ville de Korhogo. L'existence de cette agglomération importante explique également la forte couverture du bassin en cultures (64,5 %). Ce bassin mis à part, les pourcentages de savane varient de 55,7 à 95,9 %, ceux de forêt claire de 0,0 à 24,3 %, et ceux de cultures de 0,3 à 44,0 % (les pourcentages relatifs à l'habitat sont peu significatifs).

D'un bassin à l'autre, la nature de l'occupation des sols varie donc très sensiblement. Des cartes ont été dressées à partir des photos satellite (SERVAT et LAPETITE, 1990), et nous présentons à titre d'exemple celles du Lafigue route de Badikaha (figure 2) et de la Bagoé à Kouto (figure 3).

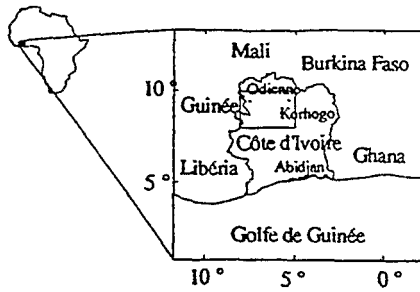


Figure 1
Carte de situation de la zone d'étude

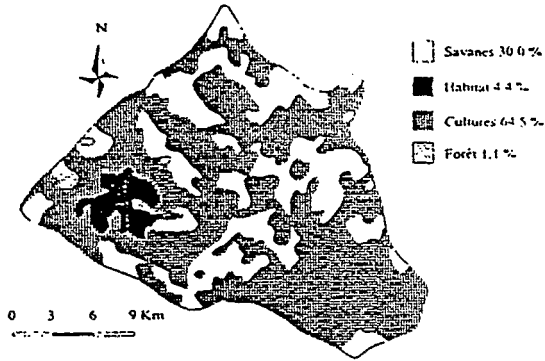


Figure 2
Le Lafigue à route de Badikaha - Occupation du sol

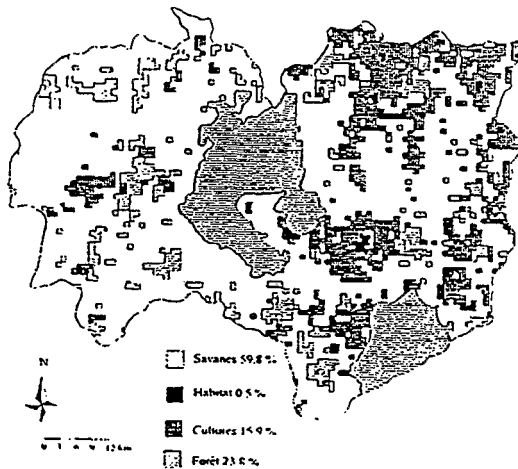


Figure 3
La Bagoé à Kouto - Occupation du sol

Tableau 1

Caractéristiques des bassins versants étudiés. ((i) : période d'observation incomplète; S : savane; F : forêt claire; C : cultures; H : habitat)

Nom du Bassin	Sup (km ²)	Périod étudié	Pluie ann. (mm)	Lame écou (mm)	Coef. écou (%)	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
Banfing à Ziemougou	990	1978 à 1985 (i)	1103 à 1457	182 à 276	13,0 à 22,2	70,3	17,1	12,4	0,2
Bandama à Segueckiele	368	1981 à 1985	895 à 1540	16 à 176	1,8 à 11,4	68,1	0,8	30,5	0,6
Bagoé à Kouto	4700	1968 à 1985 (i)	970 à 1827	45 à 355	4,6 à 21,8	59,8	23,8	5,9	0,5
Bagoé à Guingérini	1042	1981 à 1983	1103 à 1454	52 à 299	4,7 à 21,2	70,2	24,3	5,3	0,2
Lafigue à Rte Badik	443	1981 à 1984	835 à 1410	35 à 195	4,2 à 16,3	30,0	1,1	64,5	4,4
Badenou à M'Bengue	1800	1983 à 1985	680 à 1288	3 à 138	0,5 à 10,8	66,9	6,4	25,8	0,9
Yoreloro à Kategue	338	1982 à 1986 (i)	914 à 1163	14 à 66	1,5 à 5,7	59,4	9,1	31,0	0,5
Yani à Madji	1013	1980 à 1986 (i)	879 à 1559	21 à 164	2,4 à 10,5	83,6	9,4	6,8	0,2
Doumi à Pt. 398	120	1983 à 1986 (i)	1011 à 1240	77 à 247	7,6 à 22,5	55,7	0,0	44,0	0,3
Kobani à Nimbrini	342	1977 à 1984 (i)	994 à 1038	47 à 70	4,7 à 6,7	70,9	6,2	22,7	0,2
Mahandiab à Wahire	835	1983 à 1984	1092 à 1117	86 à 119	7,7 à 10,9	80,5	15,4	4,0	0,1
Sien à Nafana	615	1977 à 1984	1038 à 1667	57 à 284	5,4 à 17,0	58,0	0,9	40,9	0,2
Sien à Massadou	1325	1981 à 1986	1011 à 1610	40 à 193	3,8 à 15,4	55,9	8,7	35,0	0,4
Tiemba à Lille	541	1982 à 1984	1177 à 1616	135 à 279	11,5 à 17,3	95,9	3,5	0,3	0,3
Tiemba à Dioulatic.	2790	1981 à 1984 (i)	973 à 1520	59 à 298	6,1 à 19,5	91,3	3,7	4,4	0,6

Modèles pluie-débit

Trois modèles globaux conceptuels et déterministes ont été utilisés pour mener à bien cette étude : Crec (GUILBOT, 1986), GR3 (EDIJATNO ET MICHEL, 1989) et Modglo (GIRARD, 1975).

Crec est basé sur un schéma à réservoirs relativement classique qui permet d'identifier une fonction de production et une fonction de transfert.

La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration, et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement. La fonction de transfert comprend, elle, un terme d'écoulement rapide et un terme d'écoulement lent.

Cette version de Crec utilise 7 paramètres que l'on peut répartir en 3 paramètres de production (X3, X4 et X7) et 4 paramètres de transfert (X1, X2, X5 et X6).

L'architecture de GR3 repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire :

- (a) le réservoir-sol (paramètre A), qui n'a comme seule sortie que le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage ;
- (b) un hydrogramme unitaire (paramètre C), qui décrit la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir, à savoir :
- (c) le réservoir-eau-gravitaire (paramètre B). Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est du type quadratique.

Modglo, basé également sur un schéma à réservoirs, utilise 14 paramètres que l'on peut répartir en 5 paramètres de transfert et 9 paramètres de production.

La fonction de production comprend un réservoir prenant en compte une capacité de rétention en eau du sol (CRT) ainsi que son hétérogénéité sur le bassin (DCRT). La fonction de transfert, quant à elle, comprend trois réservoirs pouvant avoir chacun un temps de transfert différent.

MÉTHODOLOGIE

Sur les bassins versants retenus, les débits observés au début du mois de janvier sont nuls ou très faibles. Il a donc été décidé de travailler en années civiles (1er janvier - 31 décembre), considérées comme hydrologiquement indépendantes.

Après avoir éliminé les années d'observation pour lesquelles les données étaient incomplètes ou douteuses, nous disposons d'un total de 59 années pour les 16 bassins versants.

Les modèles Crec, GR3 et Modglo ont été calés parallèlement pour chaque année prise individuellement, en utilisant la fonction critère de Nash (SERVAT ET DEZETTER, 1991). Pour chacun de ces algorithmes pluie-débit, nous disposons donc de 59 jeux de paramètres calés dans des contextes différents (bassins différents, conditions climatiques variant d'une année à l'autre).

Une première exploitation de ces résultats a été réalisée par validation croisée (DEZETTER, 1991). Nous ne rentrerons pas ici dans les détails, mais nous signalerons cependant qu'une des conclusions importantes de cette étude est que pour un bassin versant donné, le calage obtenu une année se révèle généralement inadéquat pour les autres années. Ce qui conduirait à penser que les calages seraient plus dépendants de facteurs externes (climat, végétation, etc.) variant chaque année, que de facteurs intrinsèques au bassin versant.

Pour chacun des modèles, les 59 jeux de paramètres calés ont ensuite été étudiés à l'aide des techniques d'analyse en composantes principales et de régression multiple. Les variables explicatives retenues étaient les suivantes :

- (a) caractéristiques du bassin : superficie (km²), indice de compacité de Gravelius ;
- (b) caractéristiques climatiques annuelles :
 - (i) pluie annuelle (PA) en millimètres,
 - (ii) pluies cumulées, en millimètres, du 1er janvier aux dates suivantes : 15 juin (Pc6), 15 juillet (Pc7), 15 août (Pc8), 15 septembre (Pc9), 15 octobre (Pc10), (iii) pluies relatives (en %), définies par le rapport « pluie cumulée du 1er janvier à la date D/pluie annuelle », aux dates suivantes : 15 juin (Pr6), 15 juillet (Pr7), 15 août (Pr8), 15 septembre (Pr9), 15 octobre (Pr10) ;
- (c) caractéristiques d'occupation des sols : pourcentages respectifs de savane, de forêt claire, de cultures et d'habitat.

L'utilisation de la méthode de régression multiple dite du « Stepwise » (DRAPER ET SMITH, 1981) a permis d'obtenir, pour les modèles Crec et GR3, des équations de prédétermination des paramètres des modèles. Ces équations ont été obtenues sur un échantillon, tiré au hasard, de 39 jeux de calages annuels auxquels étaient associées les variables explicatives correspondantes. Ces relations ont ensuite été validées sur les 20 stations-années non utilisées pour établir les équations.

Pour le modèle Modglo, l'utilisation de la méthode de régression multiple ne permet pas d'expliquer les valeurs des paramètres à l'aide des variables explicatives choisies.

RÉSULTATS

La recherche de relations significatives entre un paramètre et l'une quelconque des variables explicatives s'est révélée totalement infructueuse.

L'analyse en composantes principales n'a pas non plus permis d'identifier de relations claires entre paramètres et variables. Les composantes principales sont assez faiblement définies, les trois premières cumulées n'expliquant que 69,7 % de la variance totale du système. La première composante (34,3 % de la variance) est bien corrélée avec les termes de pluie cumulée ($R=0,96$ avec Pc7, $R=0,93$ avec Pc8), la seconde (17,9 % de la variance) est difficile à définir précisément, et la troisième (17,4 % de la variance) reflète l'antagonisme observé entre le couple (savane, forêt) et le couple (culture, habitat).

Les corrélations entre les paramètres des modèles et ces composantes principales sont très faibles, à quelques nuances près cependant, pour le modèle GR3. En effet, sa structure, au nombre de paramètres réduit, leur garantit un rôle plus marqué et une indépendance plus grande.

Tableau 2

Équations de prédétermination des paramètres des modèles Crec et GR3

Modèle CREC	Modèle GR3
$\text{Ln X1} = 29,171 - 5,320 \text{ Ln Pc8}$	$\text{Ln A} = 7,752 + 0,0095 \text{ Cultures} - 4,450 \text{ Pr6}$
$\text{Ln X2} = -0,559 + 0,787 \text{ Pr7}$	$\text{Ln B} = -16,308 + 0,031 \text{ Cultures} + 3,453 \text{ Ln Pc8}$
$\text{Ln X3} = -21,977 - 0,049 \text{ Forêt} + 2,553 \text{ Ln PA}$	$\text{Ln C} = 2,957 \text{ Compacité} - 0,0114 \text{ Forêt} - 12,721 \text{ Pr7}$
$\text{Ln X4} = 7,765 - 2,556 \text{ Ln PA} - 0,011 \text{ Cultures} + 1,029 \text{ Ln Pc6}$	
$\text{Ln X5} = 9,753 + 0,018 \text{ Cultures} + 8,913 \text{ Pr7} - 1,838 \text{ Ln Pc8}$	
$\text{X6} = 0,918 \text{ Cultures}$	
$\text{Ln X7} = 0,598 \text{ Ln Pc7}$	

La recherche, par la méthode du Stepwise, d'équations de régression multiple a conduit aux relations qui figurent dans le tableau 2.

L'importance des paramètres d'occupation des sols apparaît clairement. Pour le modèle Crec ils contribuent à définir X3 et X4, paramètres de production, ainsi que X5 et X6, paramètres de transfert. Pour GR3, on retrouve le pourcentage de cultures ou le pourcentage de forêt dans la définition de chacun des paramètres.

Une autre caractéristique de ces équations, qui peut être indirectement reliée à la nature de l'occupation des sols, est l'importance des termes de pluie cumulée ou relative des premiers mois de saison des pluies. Une des hypothèses que l'on peut avancer à ce sujet est que ces variables caractérisent le démarrage après la saison sèche, la croissance et l'importance de la couverture végétale, élément fondamental au vu de l'importance des phénomènes d'évapotranspiration dans les bilans hydriques en zone de savane soudanaise.

Ces relations ont ensuite été validées sur les 20 stations-années qui n'avaient pas été utilisées pour leur calage. Le tableau 3 présente les valeurs moyennes de critères de comparaison entre hydrogrammes observés et hydrogrammes reconstitués à l'aide des équations de prédétermination des paramètres : coefficients de corrélation entre lames observées et calculées, écarts entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1, et écart en pourcentage entre les volumes écoulés observés et calculés du 1er juillet au 31 octobre (période considérée comme primordiale en ce qui concerne la détermination des apports en eau). Ces critères de comparaison mettent en évidence la bonne qualité des lames prédéterminées. Les mauvais coefficients de corrélation et les fortes valeurs d'écarts sur les volumes sont observés pour les hydrogrammes prédéterminés dans le cas des années exceptionnellement sèches (1983 et à un degré moindre 1984). L'erreur réalisée se voit, dans ce cas, tout à fait relativisée, au vu des faibles valeurs des lames écoulées observées ces années là (lame décadaire maximale de l'ordre de 5 millimètres).

Le modèle GR3 présente de meilleurs résultats que Crec. Ceci est lié à la qualité de la définition et à l'indépendance de ses paramètres. À l'inverse, les nombreux paramètres de Crec, mal définis, sont relativement interdépendants les uns des autres. Ceci entraîne, dans le processus de calage du modèle, des phénomènes de compensation qui nuisent à la qualité des équations de prédétermination établies par la suite.

Tableau 3

Critères de comparaison entre hydrogrammes observés et prédéterminés

	Modèle CREC	Modèle GR3
Coefficient de corrélation entre lames observées et lames calculées	moyenne : 0,70 maximum : 0,98 minimum : 0,009	moyenne : 0,89 maximum : 0,99 minimum : 0,81
Ecart sur le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 observé et calculé	moyenne : 0,12 maximum : 0,43 minimum : 0,0004	moyenne : 0,11 maximum : 0,35 minimum : 0,003
Ecart entre volumes écoulés observés et calculés (1/07 au 31/10) en %	moyenne : 40,85 maximum : 91,28 minimum : 4,73	moyenne : 28,52 maximum : 128,4 minimum : 0,11

Les figures 4, 5 et 6 présentent, à titre d'exemple, trois hydrogrammes annuels reconstitués par prédétermination des paramètres de Crec et GR3.

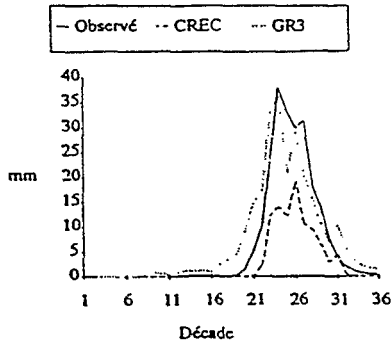


Figure 4

La Bagoé à Kouto, 1985. Hydrogrammes observés et prédéterminés (Crec et GR3)

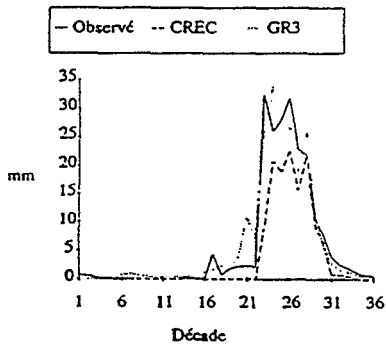


Figure 5

Le Sien à Nafana-Sienso, 1977. Hydrogrammes observés et prédéterminés (Crec et GR3)

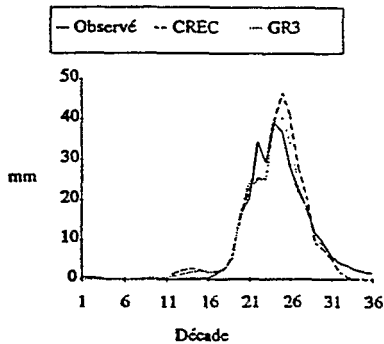


Figure 6

La Tiemba à Dioulatiedougou, 1981. Hydrogrammes observés et prédéterminés (Crec et GR3)

Afin d'évaluer la qualité des hydrogrammes « prédéterminés », nous avons effectué la comparaison de ces hydrogrammes avec des hydrogrammes calculés par des modèles autorégressifs.

Ces modèles autorégressifs décadaires, utilisant comme variables les pluies décadaires observées aux pas de temps t , $t-1$ et $t-2$ ainsi que les lames calculées aux pas de temps t , $t-1$ et $t-2$, ont été calés sur les 39 individus de l'échantillon de calage et utilisés en validation sur les 20 individus de l'échantillon de validation.

En phase de calage, les résultats obtenus par les modèles Crec et GR3 et les résultats obtenus par les modèles autorégressifs sont de qualité équivalente. Par contre, en validation (ce qui correspond à l'utilisation pour des bassins versants non jaugés) les résultats obtenus par la prédétermination des paramètres des modèles Crec et GR3 sont de meilleure qualité.

CONCLUSION

La méthodologie appliquée dans le cadre de cette étude (regroupement en « stations-années », calages annuels systématiques, caractérisation des jeux de paramètres calés et recherche d'équations de prédétermination des paramètres au moyen des techniques de régression multiple) a permis d'obtenir des résultats qui, sous certaines conditions (pluviométrie annuelle proche de la moyenne et répartie dans le temps suivant une chronologie « normale », occupation des sols caractéristique de la zone de savane soudanaise, etc.), pourraient être utilisés pour estimer les apports sur des bassins non jaugés d'une superficie de quelques milliers de kilomètres carrés en zone de savane soudanaise.

Les relations auxquelles nous avons abouti mettent en évidence l'importance du type d'occupation des sols sur la réponse du bassin versant en termes d'écoulement. Elles mettent également l'accent, de manière indirecte, sur la nécessité de pouvoir prendre en compte des variables caractéristiques de la couverture végétale proprement dite. Ce qui permettrait d'améliorer sensiblement la représentation des phénomènes d'évapotranspiration, primordiaux dans le bilan hydrique en zone de savane soudanaise.

On remarquera, par ailleurs, que c'est un modèle au nombre de paramètres réduit, GR3, qui conduit aux meilleurs résultats. Ce qui pose, une fois encore, le problème de la juste paramétrisation des modèles, et de la nécessité de l'indépendance des paramètres.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction de l'eau du ministère des travaux publics de Côte d'Ivoire et l'agence nationale pour les aéroports et la météorologie pour la consultation et l'utilisation des banques de données.

Les auteurs remercient Jean-Marc La petite (Orstom) pour sa contribution dans le cadre du traitement des données d'évapotranspiration potentielle.

BIBLIOGRAPHIE

- 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 de Montpellier II, 422 p.
- DRAPER N.R. ET SMITH H., 1981. Applied regression analysis. John Wiley et sons Ed.
- EDIJATNO ET MICHEL C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n°2/1989 : 113-121.
- GIRARD G., 1975. Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulées en zone sahélienne et leurs contraintes. Cahiers de l'Orstom, série *Hydrologie*, Vol. XXII, n°3.
- GUILBOT A., 1986. Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. *Revue Internationale des Sciences de l'Eau*, Vol 2-1 : 19-26.
- SERVAT E. ET DEZETTER A., 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. *Hydrological Science Journal*, 36, 4, 8/1991.
- SERVAT E. ET LAPETITE J.M., 1990. Occupation des sols des bassins versants du programme Erreau. Programme Erreau. Orstom. Abidjan. Côte d'Ivoire.