

Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie–débit en milieu semi-aride africain

Sandra Ardoin*, Alain Dezetter, Éric Servat, Claude Bocquillon

UMR Hydrosociétés, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France

Reçu le 18 décembre 2000 ; accepté le 17 septembre 2001

Présenté par Georges Pédro

Abstract – Definition of new loss functions for lumped rainfall-runoff models in semiarid African environment. In semiarid western African regions, potential evapotranspiration (ETP) data are often difficult to collect, preventing from using conceptual rainfall-runoff model. The use of loss functions based on the amount of available water in soil and not on ETP allows to sort out this difficulty. The results underline the interest of this approach in numerous southern countries which have got the same climate. © 2001 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

West Africa / rainfall-runoff modeling / potential evapotranspiration / actual evapotranspiration

Résumé – Dans les zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest, les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont souvent difficiles à acquérir, ce qui interdit alors l'utilisation adéquate des modèles conceptuels de relation pluie–débit. L'utilisation de fonctions de production reposant sur la quantité d'eau disponible dans le sol et non sur l'ETP permet de résoudre cette difficulté. Les résultats obtenus soulignent l'intérêt de cette démarche dans de nombreux pays du Sud soumis au même climat. © 2001 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Afrique de l'Ouest / modélisation pluie–débit / évapotranspiration potentielle / évapotranspiration réelle

Abridged version

Assessment of water resources is very important in semi-arid areas of West Africa. The use of lumped rainfall-runoff modelling to deal with this question often encounters many difficulties due to frequent lacks of data. Among the variables requested by this kind of modelling, the potential evapotranspiration (ETP) is one of the most difficult to get, as it needs measurement of many parameters, something often unaffordable in these regions. Furthermore, in lumped models, real evapotranspiration (ETR), which can

count for 80–90 % of the water balance, is generally calculated from ETP.

It would then be essential to be able to calculate a value of ETR without taking into account ETP. In these semi-arid regions, submitted to very long dry seasons, it is easy to understand that, anyway, the limiting factor for evapotranspiration will be water available in the soil more than any reference to a potential climatic demand expressed by ETP. The aim of this study is then to elaborate and test loss functions with no reference to ETP, but only depending of this available water.

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : sandra.ardoin@msem.univ-montp2.fr
(S. Ardoin).

Thus three new loss functions for the calculation of ETP are tested and compared with the initial formulation, including a reference to ETP. All of these functions show a main reference to the soil available water, but they also include links with the annual changes of the vegetation (*figure 1*) and with the temporal distribution of daily precipitations.

The structure of the GR3J lumped model developed by CEMAGREF [2] (*figure 2*) is used to carry out all the tests of these loss functions. Automatic calibrations performed with the Nash objective function have been performed for 13 catchments in the North of Ivory Coast, a region of savannah. Located on the high basins of Niger, Bandama and Sassandra, these catchments ranging from 120 to 4 700 km² are submitted to a very long dry season (*table 1*).

The analysis of the results obtained from the simulations performed with the various loss functions with no reference

to ETP shows that their behaviour is really satisfactory: good level of the values of the Nash objective function (*table II*) and good reproducing of the dynamics of the hydrographs (*figure 3*). In a very large majority of cases, the use of these new loss functions leads to results that are at least as good as they are with traditional functions referring to ETP.

These results underline the interest of such an approach, which has still to be confirmed in other regions submitted to a similar climate. In agreement with the works performed by Linacre [4] and Eagleman [1] regarding the maximum evaporation, they would actually allow to use rainfall–runoff models in places where available water in the soil is the most important factor regarding ETR and where ETP is not reachable. This is the case for many southern countries in which assessing water resources is however essential for development.

1. Introduction

Dans les pays en voie de développement, dont l'économie repose, généralement, très largement sur le secteur agricole, l'estimation des ressources en eau disponibles se révèle un problème crucial. Les zones semi-arides ne font pas exception, mais elles comportent des spécificités qui rendent cette tâche difficile. Elles sont, pour la plupart, situées dans des pays à faible revenu, où les mesures sont rares et difficiles à acquérir. Le développement de la modélisation pourrait être l'une des réponses apportées à cette question. Elle se heurte pourtant souvent à des difficultés inhérentes au manque de séries de données de longueur suffisante pour la mise au point des modèles. Parmi ces données, l'évapotranspiration potentielle (ETP), généralement utilisée pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETR), qui peut représenter jusqu'à 90 % du bilan hydrologique, est l'une des plus difficiles à obtenir pour ces régions, puisqu'elle nécessite la mesure de nombreux paramètres nécessaires à son calcul. L'objectif de ce travail est donc de tester et de valider une approche modélisatrice permettant de s'affranchir de l'ETP dans le calcul de l'ETR en privilégiant la réserve en eau du sol, facteur limitant de l'évapotranspiration dans les zones semi-arides.

2. Données et méthodes

2.1 Données

Sur l'ensemble de la zone étudiée, qui couvre le secteur nord-ouest de la Côte d'Ivoire, treize bassins versants ont été choisis au regard des séries de données pluviométriques et hydrologiques disponibles.

Situés sur les hauts bassins du Niger, du Sassandra et du Bandama, ils occupent des superficies comprises entre 120 et 4 700 km². Cette zone est soumise à un régime climatique tropical de transition ou climat soudanais, caractérisé par l'alternance d'une seule saison des pluies et d'une longue saison sèche. L'essentiel des données utilisées couvre la période 1968–1986 au pas de temps journalier, les années 1983 et 1984 étant particulièrement sèches sur l'ensemble du territoire ivoirien. La période étudiée se caractérise par une forte variabilité des précipitations annuelles et, en conséquence, par une forte dispersion des lames écoulées. Sur l'ensemble des bassins versants, les coefficients d'écoulement restent très faibles, souvent inférieurs à 10 % (*tableau 1*).

2.2 Fonctions de calcul de l'ETR

Les mesures d'ETR sont complexes, particulièrement lorsqu'il s'agit de distinguer l'évaporation du sol et la transpiration des plantes, car elles nécessitent des techniques de mesure spécifiques [3].

Trois fonctions de calcul de l'ETR, faisant abstraction d'une référence à l'ETP, mais directement liées à la réserve en eau du sol, sont donc testées ici, à travers d'une modélisation, et comparées à la formulation initiale, fonction de l'ETP. C'est cette notion de réserve en eau qui constitue le facteur limitant, bien que l'ETR soit la résultante de facteurs liés au sol, à la végétation et au climat. Cette quantité d'eau disponible est estimée à partir du taux de remplissage du réservoir sol, taux défini par le rapport entre le niveau du réservoir et sa capacité maximale de remplissage, première variable calée dans le modèle.

Tableau I Coefficients d'écoulement (t période d'observation incomplete)
 Table I Runoff coefficients (t incomplete observation period)

Nom du bassin	Surface (km ²)	Periode etudiee	Coefficient d'écoulement minimum (%)	Coefficient d'écoulement minimum (%)	Coefficient d'écoulement minimum (%)
Bou a Boron	3 710	1981–1985	1,1 (1983)	9,3 (1985)	5,3
Bandama a Seguekrele	368	1981–1985	1,8 (1983)	11,4 (1985)	6,1
Banfing a Ziemougoula	990	1978–1985 (t)	13,0 (1980)	22,2 (1979)	17,8
Bagoé a Kouto	4 700	1968–1985 (t)	4,6(1983)	21,8 (1969)	12,5
Doundian a Wahire	650	1980–1984	4,9 (1984)	16,4 (1981)	10,8
Douni a Pt. 398	120	1983–1986	7,6 (1986)	22,5 (1985)	13,0
Lafigue a Rte Badikaha	443	1981–1984	4,2 (1983)	16,3 (1981)	10,5
Lokpoho a Namboukaha	772	1983–1985	1,3 (1984)	16,2 (1987)	7,5
Sien a Massadougou	1 510	1981–1986	3,9 (1983)	15,4 (1985)	8,8
Sien a Nafana	1 325	1977–1984	5,4 (1983)	17,0 (1979)	6,7
Solomougou a Ziebatago	615	1983–1986	1,6 (1983)	13,3 (1985)	7,2
Yani a Madji	1 013	1980–1981	2,4 (1983)	10,5 (1981)	7,2
Yoreloro a Kategue	338	1982–1984	1,5 (1983)	5,7 (1986)	3,3

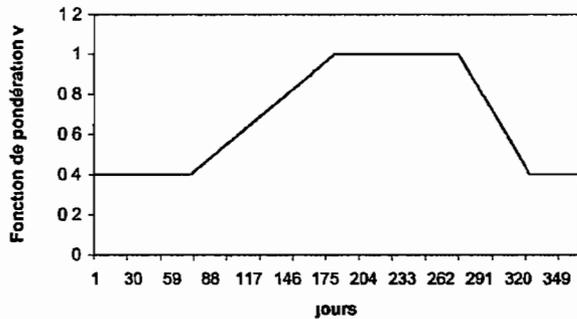


Figure 1 La fonction de pondération v en fonction du temps
 Figure 1 The weighting function v as a function of time

La fonction de production de reference, nommée *GR3prod*, derive de celle du modele de base GR3J [2] Elle est definie comme suit

- si $P' = 0$, alors $ETR = ETP BV \times \sqrt{taux S}$
- si $P' \neq 0$, alors $ETR = ETP BV$

ou P' represente la pluie neutralisee par l'ETP (mm) et ou *taux S* correspond au taux de remplissage du reservoir sol

La premiere fonction de production testee tient directement compte de l'etat de la reserve en eau du sol, telle que calculee par le modele. Nommee *grprod2*, elle est definie par

$$ETR = taux S \times Evap lim$$

ou *Evap lim* est le taux d'evaporation maximum (mm), seconde variable calée dans le modele. Cette notion d'*Evap lim* est issue des travaux d'Eagleman [1] et de Linacre [4], etablissant une relation entre le flux relatif d'evapotranspiration et l'humidite des sols

La seconde fonction de production testee est une forme ponderee de la precedente. Cette pondération est fonction de la repartition des precipitations P entre le jour et la nuit, telle qu'elle a ete observee a partir

des donnees disponibles, en considerant schematiquement que l'evapotranspiration est essentiellement un phenomene diurne. Nommee *grprodw*, elle est definie par

$$ETR = w \times Evap lim \times taux S$$

ou, si $P = 0$, $w = 1$ et, si $P \neq 0$, $w = 0,4$

La troisieme et derniere fonction de production fait egalement intervenir une pondération, qui a ete choisie, cette fois, comme fonction de la variation de la couverture vegetale. Cette fonction s'appuie sur les considerations de Riou [5], qui distingue plusieurs phases du developpement de la vegetation au cours de la saison des pluies. Nommee *grprodv*, elle se definit comme

$$ETR = v \times Evap lim \times taux S$$

ou v varie entre 0,4 (en saison seche) et 1 (en saison humide), selon une fonction asymetrique (figure 1) liee a la croissance de la vegetation de savane arbustive dans le Nord-Ouest de la Côte-d'Ivoire

2.3 Méthodes

Ces fonctions de production ont ete testees a travers l'algorithme «pluie-debit» GR3J du Cemagref [2], qui repose sur deux reservoirs (sol et gravitaire) et un hydrogramme unitaire (figure 2)

De maniere classique, les fonctions de production et de transfert sont relativement independantes dans les modeles de type GR. Comme les fonctions de calcul de l'ETR interviennent au niveau de la production, les calages porteront uniquement sur la partie production du modele. Ces calages consistent a determiner les jeux de parametres, en l'occurrence la capacite en eau du sol et le taux d'evaporation maximal, permettant de reproduire le plus fidelement possible les debits observes

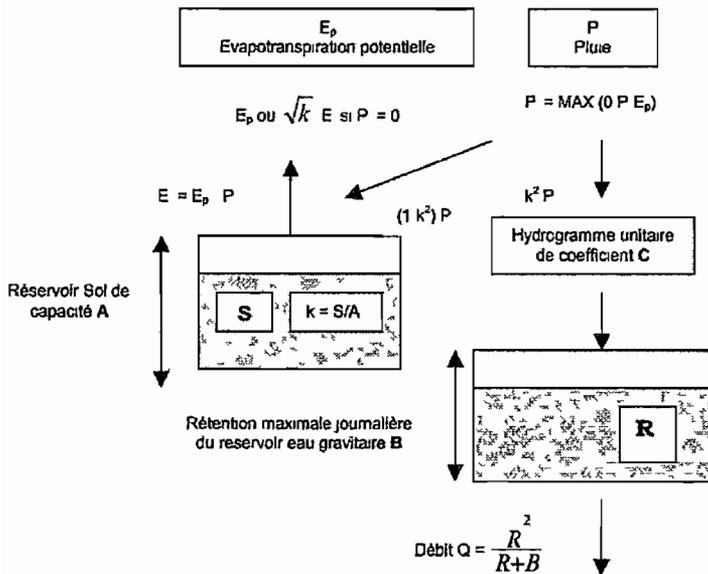


Figure 2 Schema conceptuel du modele GR3J du CEMA-GREF
 Figure 2 Conceptual diagram of GR3J CEMAGREF's model

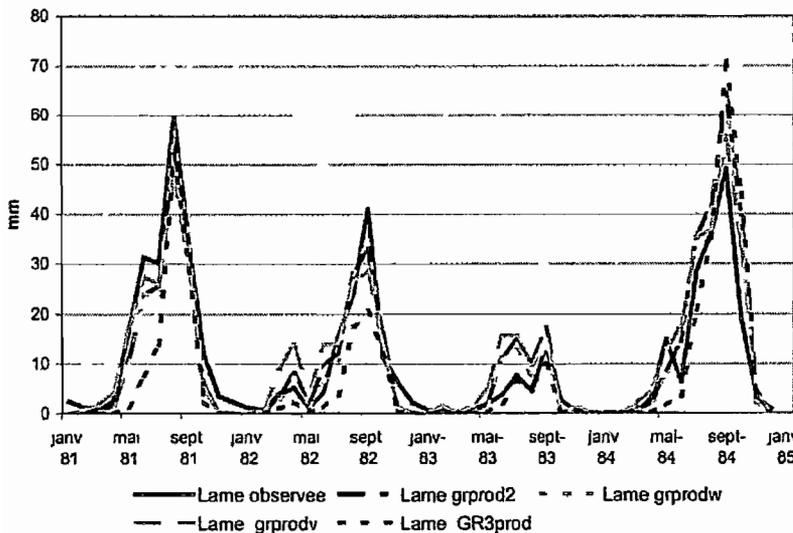


Figure 3 Comparaison des lames mensuelles écoulées et calculées
 Figure 3 Comparison of monthly observed and calculated runoff

Les calages ont été réalisés au pas de temps bimestriel, pas de temps établi après une étude des corrélations et auto-corrélations entre la lame mensuelle écoulée et la lame mensuelle précipitée. La qualité de reproduction des débits observés est mesurée par l'intermédiaire de la fonction critère de Nash

$$C_L = 1 - \frac{\sum(L_c - L_o)^2}{\sum(L_o - L_{mo})^2}$$

ou L_c = lame écoulée calculée (mm), L_o = lame écoulée observée (mm) et L_{mo} = lame écoulée moyenne observée (mm)

Les résultats sont abordés sous un angle analytique (valeur d'Evap lum, critère de Nash) et un angle graphique (traces des lames mensuelles écoulées, traces des ETR-ETP)

3. Résultats

3.1. Critères analytiques

Le paramètre *Evap lum* a une valeur moyenne de $17,2 \text{ mm j}^{-1}$, à l'issue des calages effectués pour les trois fonctions de productions testées. Cette valeur moyenne est du même ordre de grandeur que le taux d'évaporation maximal défini par Linacre [4], selon des conditions d'assèchement d'un sol par l'ETR dépendant des conditions d'humidité de ce même sol [1]

Les critères de Nash ont été calculés pour les lames bimestrielles à l'issue du calage des différents algorithmes. Les valeurs des critères sont données dans le tableau II

Tableau II. Valeurs des criteres de Nash bimestriels (en gras, le meilleur critere)

Table II. Values of bimonthly Nash objective function (in bold, the best criterion)

Bassin Versant	Periode	<i>GR3prod</i>	<i>grprod2</i>	<i>grprodw</i>	<i>grprodv</i>
Bou	1981–1985	0,768	0,810	0,822	0,769
Bandama	1981–1985	0,805	0,888	0,889	0,905
Banifing	1978–1980	0,708	0,709	0,352	0,572
	1984–1985	0,681	0,026	0,700	0,156
Bagoé	1968–1971	0,324	0,456	0,536	0,381
	1973–1976	0,601	0,581	0,618	0,616
	1981–1985	0,742	0,625	0,694	0,508
Doundian	1980–1984	0,656	0,668	0,714	0,578
Dount	1983–1986	0,523	0,635	0,639	0,605
Lafigue	1981–1984	0,638	0,864	0,894	0,877
Lokpoho	1983–1985	0,988	0,872	0,890	0,840
Sien (Mass)	1981–1986	0,925	0,657	0,931	0,886
Sien (Naf)	1977–1984	0,506	0,809	0,665	0,634
Solomougou	1983–1986	0,838	0,904	0,820	0,760
Yani	1980–1981	0,709	0,718	0,758	0,480
Yoreloro	1982–1984	0,302	0,109	0,265	0,079
Moyenne	–	0,688	0,646	0,699	0,603

L'ensemble des valeurs du critere de Nash montre, quelle que soit la fonction de production utilisee, des resultats satisfaisants, a quelques exceptions pres. Pour ces dernieres, il semble que les algorithmes utilises ne repondent pas du tout a la relation pluie–debit etudiee. Dans 13 cas sur 16, l'utilisation d'une fonction de production qui ne fait pas reference a l'ETP donne les meilleurs resultats. Parmi celles-ci, les fonctions *grprod2* et *grprodw* sont les plus performantes, et particulierement la seconde. La fonction *grprodv* necessite une reflexion supplementaire pour aboutir a une meilleure prise en compte du cycle de la vegetation.

3.2 Critères graphiques

Outre l'évaluation a l'aide d'un critere numerique, le trace des lames mensuelles ecoulees permet d'apprécier la qualite des calages réalisés et le fonctionnement du modele ainsi élaboré. L'allure du critere graphique pour chacun des bassins versants montre que les quatre modeles donnent des resultats sensiblement équivalents.

À titre d'exemple, la *figure 3* presente les resultats du Lafigue a Route-de-Badikaha. L'ensemble des modeles y donne un calage satisfaisant, ce qui traduit une dynamique des écoulements bien retranscrite. On note, cependant, une surestimation des lames écoulées calculées a l'amorce et au plus fort de la saison des pluies. On constate aussi une sous-estimation des lames écoulées calculées en fin de saison des pluies. Au vu de ces traces, on s'aperçoit mieux des fortes particularités de 1983 et, a un moindre degre, de 1984. Il est aise de mesurer le biais

important qu'introduisent ces années dans le calage des modeles. La prise en compte de fonctions de production ne faisant pas reference a l'ETP n'altere en rien la restitution des hydrogrammes fournis par les algorithmes, ce qui conforte les resultats obtenus en termes de criteres numeriques.

Comme pour la fonction de reference, qui prend en compte l'ETP, l'utilisation des formules de calcul de l'ETR donne parfois des oscillations rapides au pas de temps journalier, en particulier dans le cas d'une fonction conditionnelle de type *grprodw*. Le trace au pas de temps mensuel, plus lisible parce que plus integrateur, permet de souligner la coherence des fonctions utilisees avec la realite du phenomene, en particulier avec la saison des pluies, le cycle vegetatif et la teneur en eau du sol (voir l'exemple de la *figure 4*).

4. Conclusion

Dans les regions a climat semi-aride, l'ETR est une composante majeure du bilan hydrique. Son calcul dans les modeles pluie–debit se fait souvent par reference a l'ETP, donnée généralement difficile a obtenir. Partant du principe que, dans ces regions, le facteur limitant était principalement l'eau disponible dans le sol, il était legitime de bâtir et de tester, au sein des modeles conceptuels, des fonctions de production calculant une ETR sans reference a l'ETP. Dans une large majorite des cas, pour les bassins africains etudies, ces fonctions ont permis d'aboutir a des resultats équivalents, voire même meilleurs en termes d'hydrogrammes reconstitués. Elles presentent, en outre,

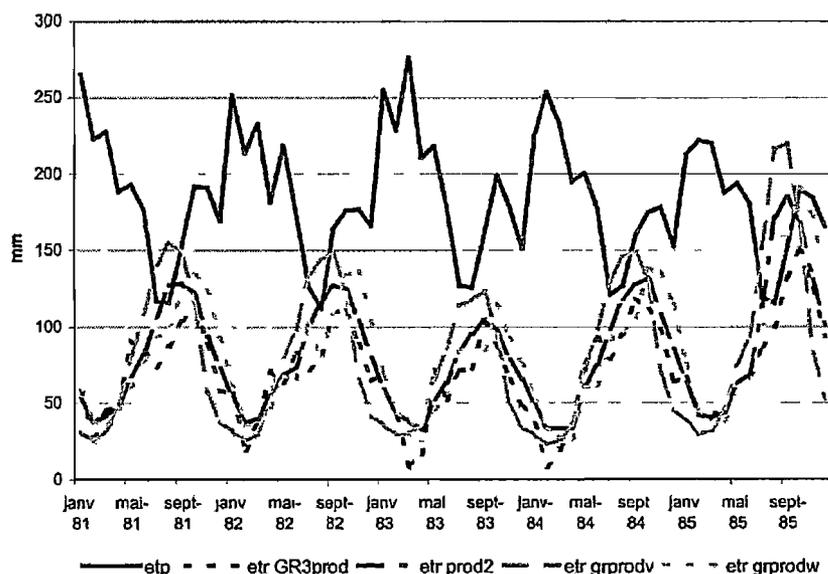


Figure 4 Tracé des ETR mensuelles calculées comparées à l'ETP

Figure 4 Monthly ETR calculated compared to ETP

une qualité de restitution du binôme ETR/ETP tout à fait comparable avec ce qu'elle est classiquement. Ce type d'approche semble donc convenir sous de tels climats. Il convient, cependant, de généraliser ce résultat en procédant à des essais complémentaires sur

d'autres bassins versants. Mais les perspectives ainsi ouvertes sont prometteuses au regard de l'utilisation de tels algorithmes dans les régions (particulièrement nombreuses dans le Sud) où l'ETP est rarement disponible.

Références

[1] Eagleman J.R., An experimentally derived model for actual evapotranspiration, *Agr Meteorol* 8 (1971) 385–394
 [2] Edijatno X., Michel C., Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, *La Houille Blanche* 2 (1989) 113–121

[3] Kite G., Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation, *J Hydrol* 229 (2000) 59–69
 [4] Lunacre E.T., A simpler empirical expression for actual evapotranspiration rates, *Agr Meteorol* 11 (1973) 451–452
 [5] Riou C., Experimental study of potential evapotranspiration (PET) in Central Africa, *J Hydrol* 72 (1984) 275–288