

ÉSSAI DE CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES DES MODÈLES PLUIE-DÉBIT DANS LE CENTRE ET LE SUD DE LA CÔTE D'IVOIRE

B. KOUAMÉ, É. SERVAT

INTRODUCTION

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme ERREAU (Évaluation Régionale des Ressources en Eau), initié par l'Antenne Hydrologique de l'Orstom à Abidjan en Côte d'Ivoire.

Il a pour objectif essentiel les possibilités de caractérisation et d'évaluation, à différents pas de temps, des ressources en eau dans une région donnée afin de pouvoir fournir la meilleure approximation possible des apports à l'exutoire de bassins versants jaugés ou non et dont les superficies varient de 100 à 7 000 km².

Afin de réaliser cette étude dans les conditions véritablement opérationnelles d'une conception d'aménagement, les données utilisées sont celles des réseaux de mesure nationaux de Côte d'Ivoire. Ces données de pluviométrie et d'hydro-métrie sont disponibles au pas de temps journalier.

Notre étude de modélisation au pas de temps mensuel a été menée plus particulièrement sur les zones de forêt et de transition.

CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES

Il existe deux zones climatiques principales : la savane et la forêt claire au Nord et la forêt dense au Sud. À ces deux types de paysages sont associés respectivement le climat tropical et le climat équatorial.

Le climat tropical type est caractérisé essentiellement par deux saisons bien marquées : la saison sèche en hiver boréal et la saison des pluies en été.

Quant au climat équatorial on y distingue deux saisons des pluies : d'avril à juin et de septembre à novembre, et deux saisons sèches : les mois de juillet et d'août pour la petite saison sèche et de décembre à mars pour la grande.

Les saisons sèches et humides sont conditionnées par la position du Front Intertropical (F.I.T.) qui est une zone de convergence entre deux masses d'air : l'Harmattan qui est un alizé continental soufflant du Nord vers le Sud et la Mousson qui est un alizé océanique se déplaçant dans la direction opposée.

La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1 050 mm et 2 500 mm du Nord au Sud.

Le réseau hydrographique est composé de quatre fleuves principaux : le Cavally, le Sassandra, le Bandama et la Comoé. Ce réseau est orienté vers l'Océan Atlantique au Sud. Le régime de ces fleuves est généralement caractérisé par une crue unique en août ou en septembre dans la zone de savane et par deux pointes de crue en juin et en septembre ou octobre en zone de forêt.

MODÉLISATION AU PAS DE TEMPS MENSUEL

Sur les zones de forêt et de transition nous avons utilisé deux types de modèle pluie-débit : les modèles au pas de temps journalier CREC (GUILBOT, 1986), MODGLO (SERVAT, 1986) et GR3 (EDIJATNO et MICHEL, 1989) et un modèle au pas de temps mensuel (SNYDER, 1963). Les modèles au pas de temps journalier n'ont pas donné beaucoup de satisfaction dans ces deux zones. Par contre en zone de savane les résultats sont acceptables (DEZETTER, 1991). Le test d'un modèle au pas de temps mensuel nous a paru intéressant dans la mesure où cet algorithme peut limiter les inconvénients liés au pas de temps journalier.

L'algorithme que nous avons choisi pour la reconstitution des hydrogrammes annuels au pas de temps mensuel est fortement inspiré des équations du bilan hydrologique. C'est un modèle initialement élaboré par SNYDER dans le cadre de la prévision des apports mensuels en eau de la Tennessee Valley Authority aux Etats Unis et décrit par SINGH (1990).

Le modèle de SNYDER dans sa version initiale comporte 9 paramètres. La lame d'eau écoulee V_q est la résultante de deux composantes : un écoulement immédiat V_{qa} et un écoulement retardé V_{qd} :

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

CALCUL DE L'ÉCOULEMENT IMMÉDIAT VQA

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

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

avec

i : indice du mois considéré,

Vpi : volume précipité (en mm) durant le mois i,

AA : paramètre (0 AA 1)

Svi : valeur du seuil pour le mois i,

Svi = Seuil [1 + sin(xi)], 0 Seuil 150

CALCUL DE L'ÉCOULEMENT RETARDÉ VQD

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

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

avec :

i = 1 : mois considéré

i = 2, 3, 4 et 5 mois précédent de rang 1, 2, 3 et 4.

BBi = paramètres (BBa, BBb, BBc, BBd, BBe) exprimant la proportion d'eau provenant du mois considéré et des quatre mois antérieurs (0 ≤ BBi ≤ 1).

Gi : paramètre de type seuil,

Gi = CC + DD*Svi

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

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

L'optimisation automatique des différents paramètres a fait appel à une technique de convergence vers une solution optimale. Le critère numérique de référence qui a été utilisé parmi d'autres est le critère de Nash modifié (NASH et SUTCLIFE, 1970) :

$$Nash = \frac{\sum_{i=1}^N (Lo - Le)^2}{\sum_{i=1}^N (Lo - \bar{L})^2}$$

avec :

L_c = Lame calculée en mm

L_o = Lame observée en mm

\bar{L} = Lame observée moyenne en mm.

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

Le modèle à 9 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.

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

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

Les figures 1 et 2 sont deux exemples de tracés des hydrogrammes observés et calculés. Sur ces figures on remarque la bonne reconstitution des étiages et des crues.

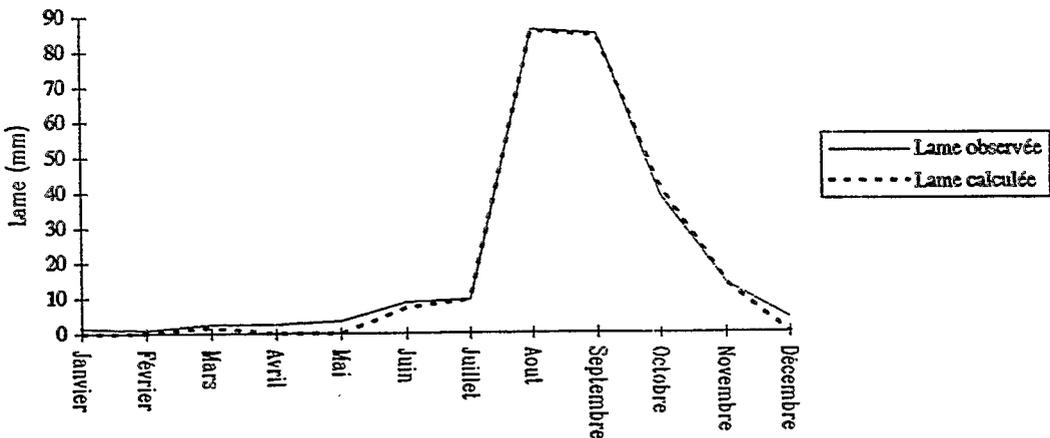


Figure 1
Ko à Logoulé en 1982 (Calage di)

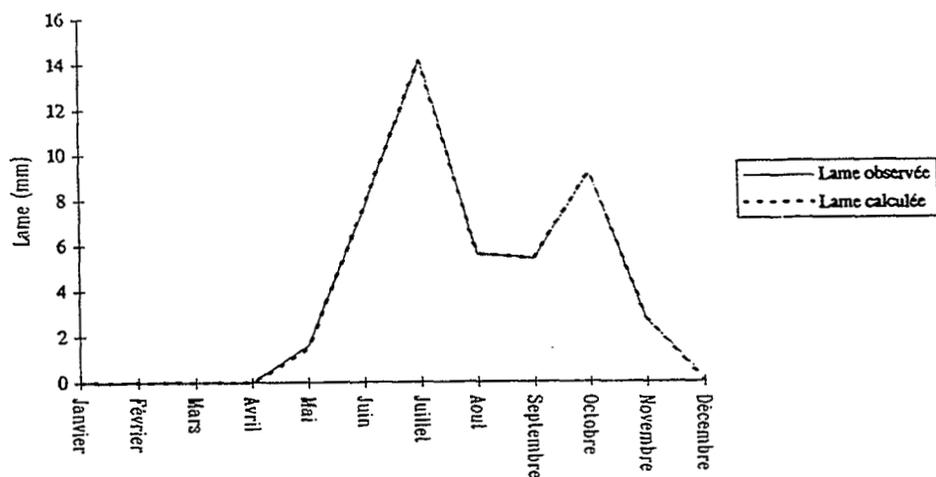


Figure 2

Kan à Dimbokro en 1975 (Calage di)

Les calages sur des séries de plusieurs années donnent des critères acceptables (tableaux 1 et 2) : 0.038 à 0.480. Par contre les validations sont de moins bonne qualité (0.14 à 1.21).

Tableau 1

Critère de Nash des calages et validations du modèle di en zone de forêt

Calage	Validation	Calage	Validation
Kavi à M'Bessé (1195 km ²) 1977-1979	1980	0.1839	0.7090.
Ko à Man (207 km ²) 1971-1973	1981 1985-1986	0.1090.	0.2775 0.1991
Ko à Man (207 km ²) 1985-1986	1971-1973 1981	0.0765	0.3001 0.9400.
Ko à Logoualé (1518 km ²) 1984-1986	1981-1983 1981-1982	0.1124	0.5640. 0.6136
Néka à Nékouanié (344 km ²) 1980-1982	1986	0.3133	1.019
Néka à Nékouanié (344 km ²) 1980-1981	1982 1986	0.3429	0.4070. 1.206
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1970-1973	1977-1979	0.4799	0.3667
Davo à Dakpadou (6538 km ²) 1984-1986	1977-1979	0.2399	0.6303
N'Zo à Kahin (4379 km ²) 1984-1986	1982-1983	0.0381	0.1440.

Tableau 2
Critère de Nash des calages et validations du modèle di
en zone de transition

Calage	Validation	Calage	Validation
Lobo à Niébéhibé (6829 km ²) 1965-1967	1968	0.1647	0.4966
	1971-1973		0.8375
Lobo à Niébéhibé (6929 km ²) 1971-1973	1968	0.0853	0.2429
	1965-1967		0.3154

Le nombre élevé de paramètres optimisés (9) à partir d'un nombre réduit de valeurs (1 valeur par mois donc 12) fait que les calages ont plutôt tendance à prouver l'efficacité des méthodes d'optimisation non linéaire utilisées pour caler l'algorithme plus que l'adéquation proprement dite de ce dernier à résoudre le problème posé. On pourrait donc qualifier cette solution de « numérique » plutôt que de « hydrologique ». Ce sont donc des cas très particuliers, difficilement transposables, qui peuvent expliquer en partie les mauvais résultats rencontrés en validation. Il nous a donc paru nécessaire de restructurer le modèle par le biais d'une diminution des paramètres.

Après une étude de sensibilité et de statistique sur les différents paramètres (KOUAME, 1992) il est ressorti que certains d'entre eux comme Seuil et CC sont moins sensibles. On les a donc fixés à des constantes. Pour les paramètres BBi très sensibles, donc impossibles à fixer, nous avons essayé d'imposer une décroissance. En effet les paramètres BBi caractérisent les prélèvements d'eau sur les précipitations du mois en cours (BBa), et des quatre mois précédents (BB..., BBe). Il est donc raisonnable de penser que l'apport provenant du mois (i) est supérieur à celui du mois (i-1).

Parmi quatre lois de décroissance testées (KOUAME, 1992), c'est la loi de décroissance linéaire simple suivante qui a été retenue :

$$BBi = BBa(1 - Xi/4), X_{(i-1,2,3,4,5)} = (0,1,2,3,4).$$

Après restructuration on arrive donc à un modèle à 3 paramètres (AA, BBa et DD) que nous avons appelé **modèle AB2**. Ce modèle définitif à 3 paramètres a également été calé, année par année, sur les 94 stations-années disponibles. La qualité de ces calages semble satisfaisante. En effet on note que :

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

En moyenne, Nash moyen = 0.199 et 0.214 en forêt et en transition.

Sur plusieurs années nous remarquons que les calages avec le modèle initial à 9 paramètres (tableaux 3 et 4) donnent des résultats meilleurs que ceux du modèle définitif à 3 paramètres. Par contre, en validation, les valeurs du critère de Nash du modèle définitif sont nettement inférieures à celles du modèle de départ.

Tableau 3
Critère de Nash des calages et validations des modèles di et AB2
en zone de forêt

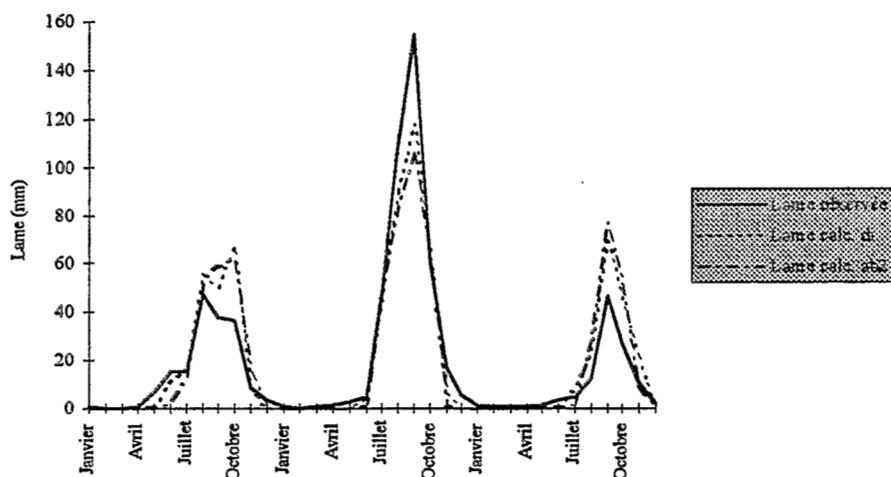
Calage	Validaton	Calage di	Validation di	Calage AB2	Validation AB2
Kavi à MBessé (1195 km ²) 1977-1979	1980	0.1839	0.7090.	0.1900.	0.4101
Ko à Man (207 km ²) 1971-1973	1981	0.1090.	0.2775	0.1412	0.2273
	1985-1986		0.1991		0.1946
Ko à Man (207 km ²)	1971-1973	0.0765	0.3001	0.1295	0.2390.
	1981		0.9400.		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 Nékouanié (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

Tableau 4
Critère de Nash des calages et validations des modèles di et AB2
en zone de transition

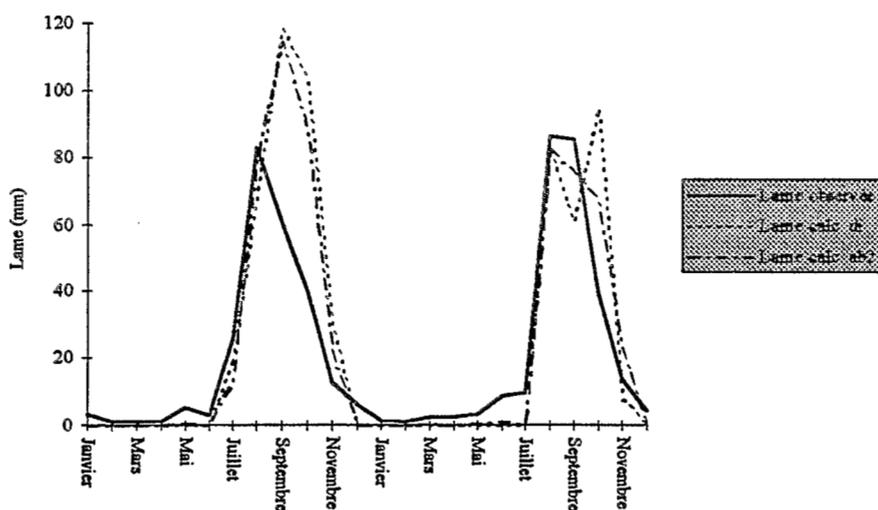
Calage	Validation	Calage di	Validation di	Calage AB2	Validation AB2
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1965-1967	1968	0.1647	0.4966	0.2128	0.0715
	1971-1973		0.8375		0.3464
Lobo à Nibéhibé (6829 km ²) 1971-1973	1968	0.0853	0.2429	0.1538	0.1874
	1965-1967		0.3154		0.3192

Le modèle définitif AB2 répond donc positivement à notre préoccupation majeure de robustesse, gage d'une utilisation efficace et généralisée d'un tel outil.

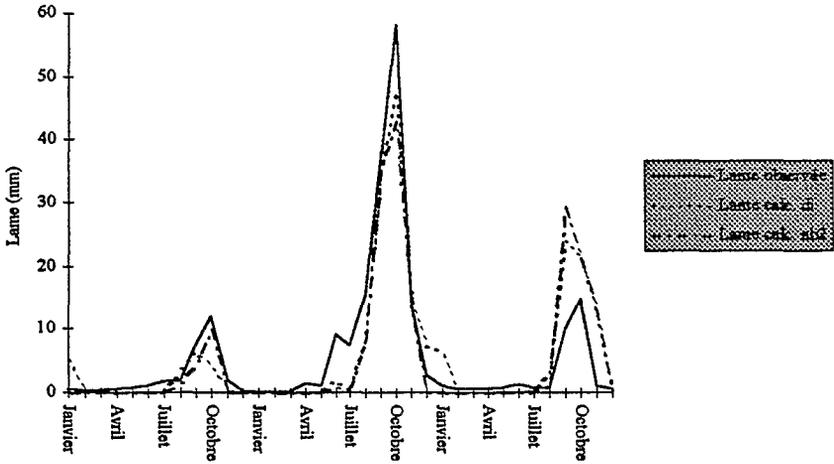
Sur les figures qui suivent on trouvera quelques représentations graphiques de calage et validation des modèles di et AB2.



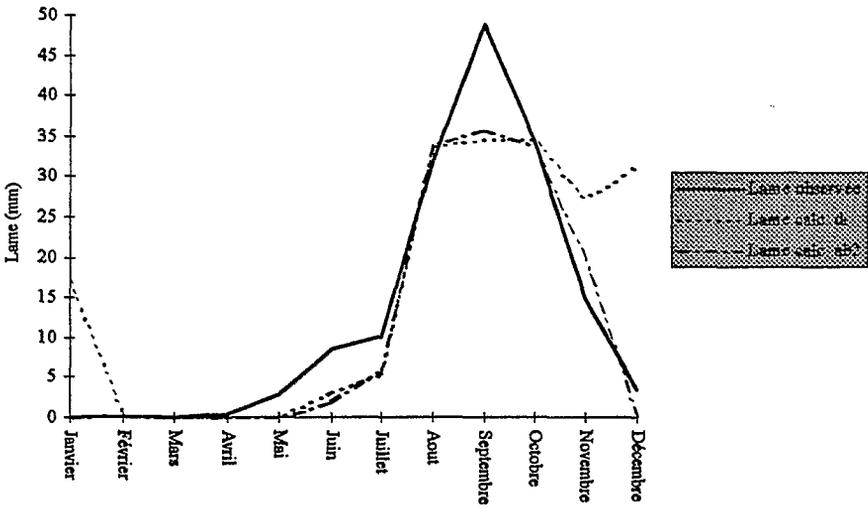
Ko à Logoualé de 1984 à 1986 (Calages di et AB2)



Ko à Logoualé de 1982 à 1983 (Validation des calages di et AB2 réalisés de 1984 à 1986)



Lobo à Nibéhibé de 1965 à 1967 (Calages di et AB2)



Lobo à Nibéhibé en 1968 (Validation des calages di et AB2 réalisés de 1965 à 1967)

CONCLUSIONS

Si le programme ERREAU (Évaluation Régionale des Ressources en Eau) s'intéresse à l'ensemble de la Côte d'Ivoire, nous avons, quant à nous, fait porter nos efforts essentiellement sur les zones de forêt et de transition.

Face aux résultats plus ou moins satisfaisants des modèles au pas de temps journalier dans les zones de transition et de forêt nous avons jugé bon de tester un modèle au pas de temps mensuel : le modèle de Snyder.

Initialement cet algorithme à neuf paramètres a montré des qualités de robustesse (utilisation des jeux de paramètres calés sur d'autres années) particulièrement faibles. Nous avons donc procédé à une analyse et à une restructuration qui ont abouti à un modèle au pas de temps mensuel à trois paramètres. Les performances de cet algorithme final sont tout à fait satisfaisantes. Il se montre d'une utilisation robuste dans la plus grande partie des cas où nous l'avons utilisé. Ce travail a permis, encore une fois, de poser avec acuité le problème de la juste paramétrisation des modèles pluie-débit. Nombreux sont les algorithmes qui présentent des paramètres en surnombre, et dont l'utilisation en simulation pour l'évaluation de ressources pourrait être envisagée de manière plus fiable, après une analyse et une restructuration du type de celles que nous avons conduites ici.

En Afrique de l'Ouest en général, et dans l'ensemble de la sous-région en particulier, il est important de multiplier ces travaux de modélisation. De la confrontation de ces multiples expériences et de leurs résultats, acquis dans une grande diversité de situation, il devrait être possible de tirer les conclusions qui permettront d'élaborer un ou plusieurs algorithmes mieux adaptés au contexte climatique particulier des régions tropicales que ne le sont les algorithmes utilisés aujourd'hui.

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 Montpellier II.
- EDIJATNO, MICHEL C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2 : 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.
- KOUAME B, 1992. Adéquation de différents modèles globaux pluie-débit pour déterminer les apports en eau dans les zones de transition et de forêt de la Côte d'Ivoire. Essai de régionalisation des paramètres. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II.
- NASH J.E., SUTCLIGE J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. J. Hydrol, 10 : 282-290.
- SERVAT E., 1986. Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes. CREC5, MODGLO et MODIBI. Orstom Montpellier, multigr.
- SINGH V.P., 1990. Hydrologic Systems, Volume II, Watershed Modeling. Edited by Prentice Hall Inc.
- SNYDER W.M., 1963. A water yield model derived from monthly runoff data. International Association of Scientific Hydrology Publication n° 63, 18-30.