

AMADOU LAMINE MAR
PHILIPPE GINESTE
MOHAMED HAMATAN
UMR Hydrosociences Montpellier / Ecole Inter-
Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural, 03
BP 7023 Ouagadougou 03, Burkina Faso
amadou.lamine.mar@eier.org

GIL MAHE
UMR Hydrosociences Montpellier / IRD 01 BP
182 Ouagadougou 01, Burkina Faso

Modélisation Débit-durée- Fréquence appliquée à des bas- sins versants de grande taille du Burkina Faso

Flow - duration - frequency model applied to large basins of Burkina Faso

RESUME

Les modèles débit-durée-fréquence (QdF), développés au Cemagref de Lyon, donnent une synthèse du régime hydrologique et constituent un outil bien adapté à la gestion des ressources en eau. Nous avons tenté de vérifier leur applicabilité aux grands bassins versants du Burkina Faso. Dix huit stations hydrométriques dont les superficies de bassin versant sont supérieures à 800 km² ont été choisies dans ce cadre ; ces stations comportant les plus longues séries de débits journaliers avec malgré tout des taux de lacunes élevés pour les besoins de la modélisation. Les hypothèses du modèle que sont l'invariance d'échelle et la forme hyperbolique des quantiles en fonction de la durée ont été bien vérifiées pour 8 stations où la dynamique des crues semble être directement liée aux précipitations et sans influence d'aucun ouvrage. La taille du bassin versant n'a pas été un facteur discriminant sauf pour le choix des durées significativement différentes.

Mots clefs : courbes débit-durée-fréquence (QdF) ; échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil ; crues ; bassin versant ; Burkina Faso.

ABSTRACT

Runoff-duration-frequency models (QdF), developed at the Cemagref of Lyon, give a synthesis of a hydrological regime and are a tool well adapted to the management of water resources (flooding, recession agriculture). We tested the applicability of such a model to large size catchments of Burkina Faso. Eighteen gauging stations have been chosen for this purpose, with areas greater than 800 km². These stations have been thoroughly selected, mainly according to the length of their daily discharge time series, but present sometimes high levels of missing data. The model hypothesis are the scale invariability and the hyperbolic shape of the quantiles for each duration. They have been verified for all gauging stations for which the flood dynamic seems to be directly related to the precipitations, without any influence due to human works. The size of the basins is not a discriminate factor for the basins studied, but only for the choice of the significantly different durations and the distribution law.

Key words: flow-duration-frequency curves; over a threshold; watershed; Burkina Faso

supérieures à 800 km² avec les séries de données les plus longues possibles. Sur les 54 stations hydrométriques que compte le Burkina Faso (Figure. 1), 18 semblaient satisfaire ces critères avec malgré tout un taux de lacunes très élevé (Tableau 1). La visualisation des chroniques de débits journaliers a permis d'identifier certaines lacunes localisées dans les parties monotones de l'hydrogramme qui ont été comblées par la méthode d'interpolation de Lagrange, le comblement des lacunes n'ayant d'autre effet que de permettre de sélectionner des épisodes supérieurs à un seuil que le logiciel de traitement aurait autrement ignorés. L'ajustement du modèle sur des périodes de retour de l'ordre d'une dizaine d'années requiert de longues chroniques. C'est ainsi que les stations les

mieux renseignées depuis les années 80 au moins ont été choisies.

METHODE

Un échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil de débits moyens caractéristiques sur une durée d_i donnée ($VCXd_i$) est effectué sur les moyennes mobiles pour l'ajustement de la loi exponentielle. Il s'agit donc d'extraire le maximum de chaque épisode supérieur à un seuil fixé et non le maximum de chaque année (cas de la loi de Gumbel). Des fréquences expérimentales, suivant l'expression de Chegodayev corrigée par la théorie du renouvellement (Lang et al. 1997), sont associées aux observations notées $VCXd_i(T_j)$ où T_j est la période de retour expérimentale.

Les quantiles déterminés par le modèle continu convergent sont notés

$VCX(d,T)$ qui est une fonction à 2 variables, différente de $VCXd_i(T)$ (1) qui représente une fonction de la variable temps de retour (T) pour la durée étudiée d_i et qui est obtenu par ajustement de la loi exponentielle sur les valeurs échantillonnées $VCXd_i(T_j)$. C'est l'approche classique des modèles QdF.

$$VCX d_i(T) = A_{d_i} u(T) + B_{d_i} \quad (1)$$

L'ajustement du modèle continu QdF lui-même va consister en :

a) une vérification de la même loi statistique pour différentes durées qui dans notre étude est une loi à 2 paramètres ;

$$VCX(d,T) = A(d)u(T) + B(d) \quad (2)$$

avec $u(T)=\log(T)$ pour la loi simplement exponentielle, et $u(T)=-\ln(-\ln(1-1/T))$ pour la loi de

Bassin versant	Station	Superficie (km ²)	Période chronique	Durée totale observations (an)	Durée totale lacunes (an)
Mouhoun	Guéna	800	1962-1988	7.45	19.50
	Banzo	2816	1959-1993	28.20	6.40
	Samandéni	4575	1955-1999	40.40	4.10
	Batié	5630	1971-1993	15.10	7.10
	Dan	6345	1970-1993	18.90	4.90
	Diébougou	12200	1955-1992	19.40	18.0
	Nwokuy	14800	1955-1999	35.60	9.30
	Boromo	58000	1955-1999	35.60	8.90
Comoé	Fourkoura	2550	1969-1999	20.60	10.20
	Diarabakoko	2350	1955-1999	20.50	23.70
	Yendéré	5930	1955-1965	8.90	0.70
	Folonzo	9480	1969-1999	20.60	10.20
Nazinon	Dakaye	4500	1982-1999	6.20	11.40
	Nobéré	7600	1975-1999	7.40	17.00
Nakambé	Wayen	20800	1965-1999	18.00	16.50
Sirba (Niger)	Bosségal	9920	1973-1997	5.70	18.80
Fa (Niger)	Manni	5000	1973-1997	7.50	16.80
Fa (Niger)	Liptougou	15700	1973-1998	8.40	17.00

Tableau 1 Stations hydrométriques étudiées et qualité des données

Gumbel avec un échantillonnage par maximum annuel.

b) une vérification d'une propriété observée par ailleurs (Javelle et al. 1999), posée comme hypothèse stipulant que, pour un temps de retour T fixé, les quantiles VCX(d,T) sont décrits en fonction de la durée d par une forme hyperbolique :

$$VCX(d,T) = C + E/(1 + Fd) \quad (3)$$

c) une vérification de l'invariance d'échelle qui conduit aux équations (4) et (5) pour 2 durées d₁ et d₂ et 2 durées de retour T₁ et T₂ quelconques. Ces équations expriment que les courbes VCXd_i(T) tendent à se recouper au même point P et se déduisent les unes des autres par une transformation affine orthogonale quelle que soit la loi statistique de l'alinéa a).

$$\frac{VCX(d_1, T_1) - P}{VCX(d_2, T_1) - P} = \frac{VCX(d_1, T_2) - P}{VCX(d_2, T_2) - P} \quad (4)$$

$$\frac{VCX(d_1, T_1) - P}{VCX(d_1, T_2) - P} = \frac{VCX(d_2, T_1) - P}{VCX(d_2, T_2) - P} \quad (5)$$

La combinaison des équations (2) et (3), et la propriété observée que les quantiles VCX(d,T) convergent vers la valeur commune P lorsque la durée d tend vers l'infini, conduisent à un modèle à quatre paramètres :

$$VCX(d,T) = \frac{A(0)u(T) + B(0) - P}{1 + \frac{d}{\Delta}} + P \quad (6)$$

Meunier (2001) a étudié ce point de convergence P sur de petits bassins versants de superficie inférieure à 60 Km² en Martinique et a trouvé des valeurs proches de zéro mais nous prendrons pour les grands

bassins qui nous concernent le débit moyen interannuel \overline{QA} .

L'échantillonnage et le calage des paramètres du modèle sont réalisés par le logiciel XSD développé par Lang et Javelle (2000) en deux étapes appelées ajustement consolidé (en fonction de T) et ajustement multidurées (en fonction de d).

Le paramètre \overline{QA} est obtenu en faisant la moyenne de la chronique des débits journaliers observés. Les autres paramètres A(0), B(0) et Δ sont calés par la technique d'un ajustement consolidé et d'un ajustement multidurées successifs.

Ajustement consolidé

Les débits échantillonnés sont transformés en s'inspirant de la relation (5) :

$$V_{d_i}^*(T_j) = \frac{VCX d_i(T_j) - P}{VCX d_i(T = T_{ref}) - P} \quad (7)$$

où T_{ref} est un temps de retour de référence pris égal à 1 an par le logiciel.

Si ces débits adimensionalisés (7) se confondent quelle que soit la durée d_i à laquelle ils se réfèrent, l'hypothèse d'affinité est validée (Javelle et al., 1999), et il est alors possible d'ajuster la loi à 2 paramètres sur toutes les valeurs pour avoir l'équation (8) :

$$V^*(T) = A^*u(T) + B^* \quad (8)$$

La transformation inverse de l'équation (5) donnera des ajustements définis par la relation (1), parfaitement convergents pour les durées d_i et qui auront les paramètres suivants :

$$A_{d_i}^c = A^*(VCX d_i(T = T_{ref}) - P) \quad (9)$$

$$B_{d_i}^c = B^*(VCX d_i(T = T_{ref}) - P) + P \quad (10)$$

AJUSTEMENT MULTIDURÉES

La transformation, cette fois-ci, est faite en fonction de la durée d en s'inspirant de la relation (4) et fait référence à l'ajustement consolidé relatif à une durée d_{ref} choisie arbitrairement (1 jour) :

$$V_{d_i}^{**}(j) = \frac{VCX d_i(T_j) - P}{V_{d_{ref}}^*(T) - P} \quad (11)$$

L'évolution de cette dernière variable en fonction de d est modélisée par une fonction du type y(d)=a/(1+βd) où les paramètres a et β sont calés par la méthode des moindres carrés. Les quantiles VCX(d,T) sont obtenus en dénormalisant la relation (11) :

$$VCX(d,T) = \frac{\alpha}{1 + \beta d} (V_{d_{ref}}^*(T) - P) + P \quad (12)$$

En comparant les équations (6) et (12), on obtient les paramètres du modèle continu de Javelle et al. (1999) :

$$A(0) = \alpha A_{d_{ref}}^c,$$

$$B(0) = \alpha (B_{d_{ref}}^c - P) + P \quad (13)$$

et Δ = 1/β

RESULTATS

Pour chaque station, 3 durées ont été étudiées mais les différentes étapes du modèle ne sont présentées, à titre d'exemple, que pour la station de Guéna qui est l'une des stations où les résultats ont été satisfaisants du point de vue de l'ajustement du modèle continu. La figure 2 montre l'ajustement de l'équation (1) qui

confirme que la loi exponentielle est bien vérifiée pour les durées étudiées. La consolidation montre que l'hypothèse d'affinité est bien vérifiée et que la relation (8) peut être ajustée (Figure 3).

Une fois dénormés pour chaque durée, les quantiles sont parfaitement convergents et s'ajustent aux observations (Figure 4). L'ajustement multidurée, avec un étalement vertical des points dû à la

dispersion expérimentale des valeurs $VCXd_i(j)$ autour des ajustements consolidés (Javelle et al. 1999), est illustré sur la figure 5 et permet de déterminer les paramètres du modèle. Le critère de Nash entre $VCXd_i(T)$ et $VCX(d,T)$, qui peut être assimilé à un pourcentage de variance expliqué par le modèle, est évalué à 65 %.

Sur les 18 stations étudiées, huit présentent un comportement aussi satisfaisant que la station de Guéna du point de vue des figures 2 à 5 pour des superficies de bassins versants comprises entre 800 et 20800 km². Les résultats obtenus pour ces 8 stations sont comparés sur le même graphique (Figure 6) pour des temps de retour de 1 et 10 ans. L'extrapolation des résultats au delà du temps de retour de 10 ans serait hasardeuse compte tenu de la qualité des données initiales. Les paramètres du modèle sont donnés au tableau 2 avec des durées caractéristiques allant de 2 à 76 jours. On peut y constater que pour l'ensemble des 3 stations étudiées dans le bassin versant du Nakambé-Nazinon, le modèle continu s'ajuste bien. Le critère de Nash qui demeure une valeur statistique, est beaucoup plus faible pour Fourkoura et Diarabakoko mais la visualisation graphique permet de les valider. Ceci est dû au fait que le critère a été calculé sur l'ensemble de la distribution (d_i et T_j) du modèle continu et peut donc être influencé par une seule valeur très discordante. La dynamique des crues dans ces stations semble répondre directement à la pluviosité et n'est pas influencée par des ouvrages importants à leur aval. Sur le Mouhoun, à part une petite station située tout en amont (Guéna), aucune autre ne donne des résultats satisfaisants.

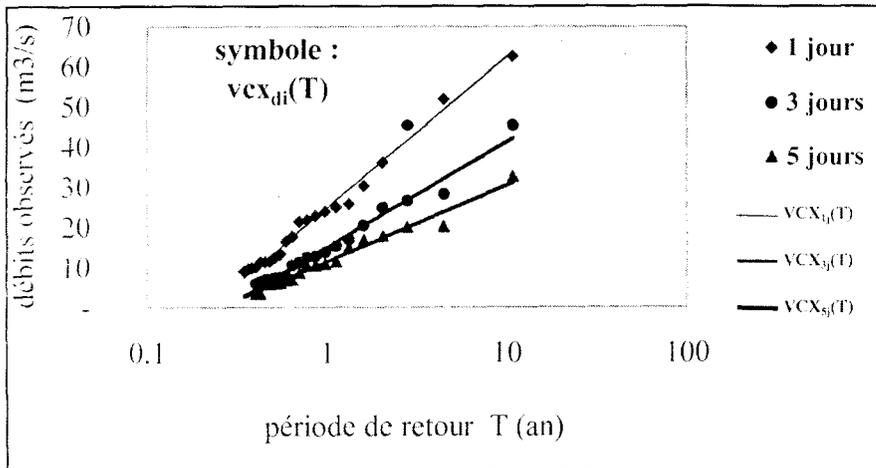


Figure 2. Ajustements de la loi exponentielle aux observations pour différentes durées à la station de Guéna.

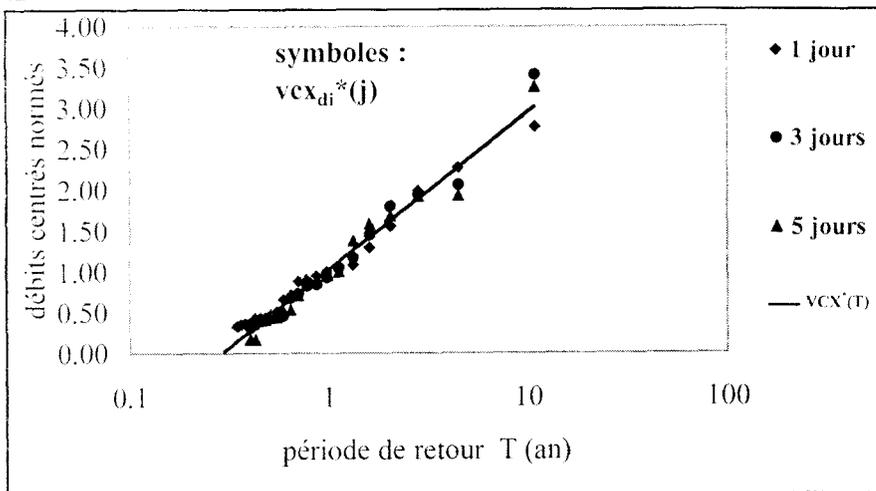


Figure 3. Consolidation avec les échantillons adimensionnalisés ($T_{ref} = 1$ an) à la station de Guéna.

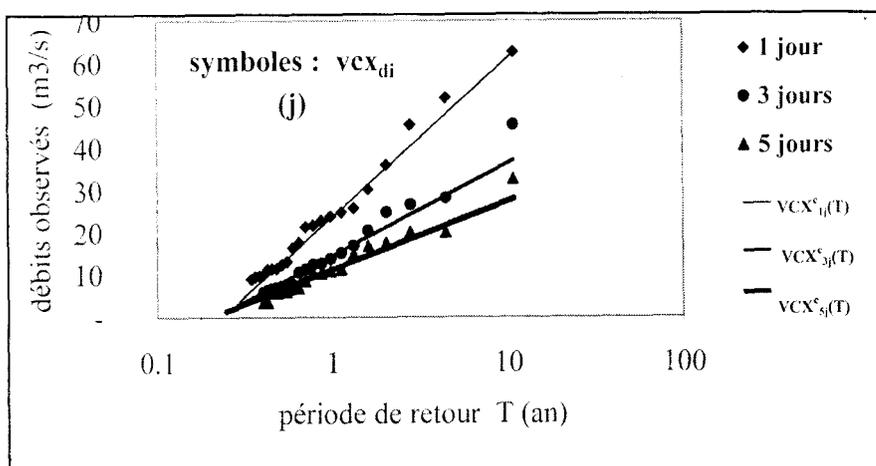


Figure 4. Ajustements consolidés parfaitement convergents à la station de Guéna.

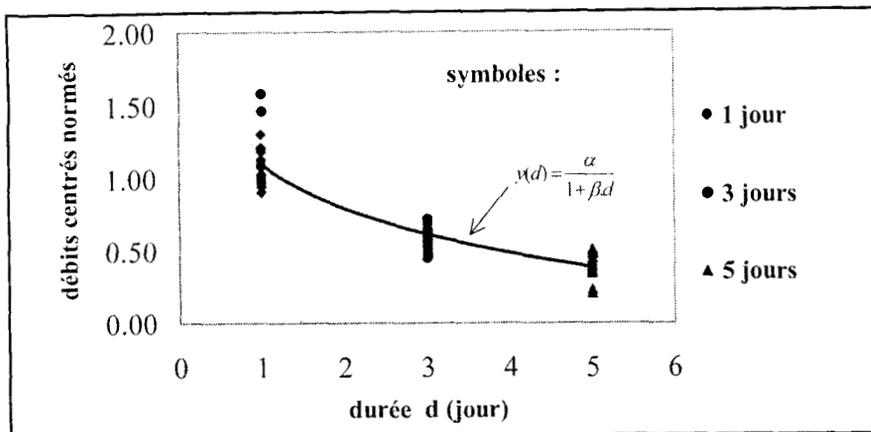


Figure 5. Ajustement multidurées avec échantillons adimensionnalisés ($d_{ref} = 1$ jour) à la station de Guéna.

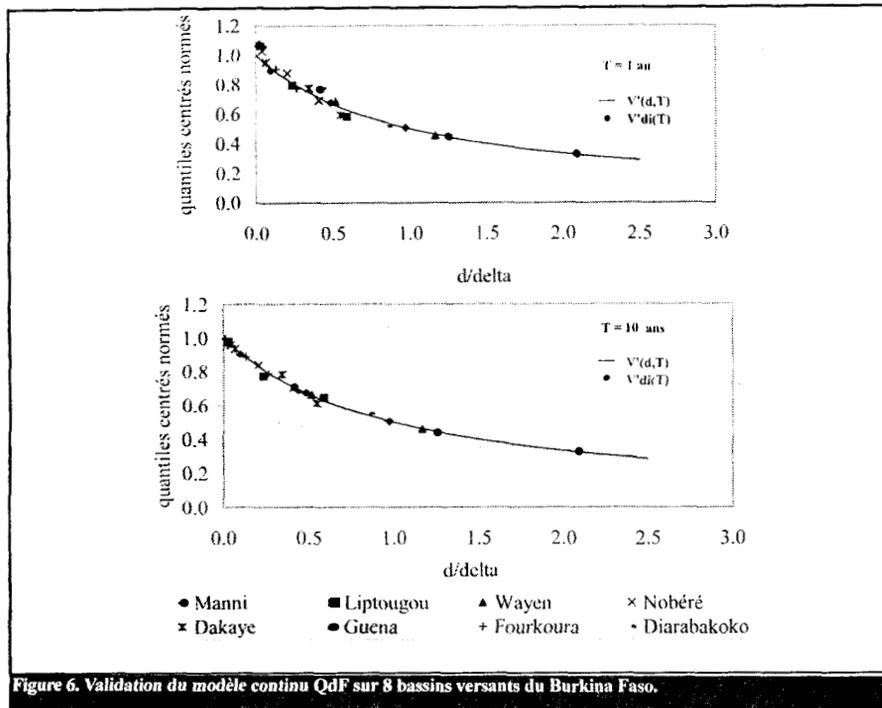


Figure 6. Validation du modèle continu QdF sur 8 bassins versants du Burkina Faso.

Bassin versant	Station	Superficie (km ²)	A(0) (m ³ /s)	B(0) (m ³ /s)	\bar{d} (jour)	\overline{QA} (m ³ /s)	Nash (%)
Mouhoun	Guéna	800	22	31	2	2	65
Comoé	Fourkoura	2550	21	62	76	13	46
	Diarabakoko	2350	23	21	23	5	36
Nazinon	Dakaye	4500	19	45	15	7	70
	Nobéré	7600	36	66	24	13	61
Nakambé	Wayen	20800	88	128	39	21	62
Fa (Niger)	Manni	5000	10	51	10	7	66
Fa (Niger)	Liptougou	15700	75	175	34	33	71

Tableau 2 Paramètres du modèle pour les stations validées et critères de Nash

La raison majeure du rejet des 10 autres stations réside dans la non-vérification de l'hypothèse d'invariance d'échelle pour les durées étudiées et dans une moindre mesure des difficultés d'ajustement de la loi exponentielle et du critère de Nash compris entre -68% et 60%. Le critère de Nash a été nettement amélioré en utilisant la loi de Gumbel préférentiellement à la loi exponentielle (Figure 7)

CONCLUSIONS

Une première tentative d'application de l'approche QdF dans la région Ouest Africaine pour la synthèse des régimes hydrologiques des bassins versants donne des résultats assez encourageants. Malgré un taux de lacunes élevé dans les chroniques disponibles, le modèle semble validé sur 8 des 18 stations étudiées ayant des superficies de bassin versant comprises entre 800 et 20800 km². Les difficultés rencontrées sont surtout liées au manque de chroniques longues et sans lacunes pour des stations hydrométriques dont la taille du bassin versant est de l'ordre de quelques milliers de km². Nous espérons surmonter cet obstacle grâce à la base de données du programme FRIEND-AOC de l'UNESCO et analyser par la suite avec ce modèle, la variabilité des écoulements compte tenu de la sécheresse qui persiste depuis une trentaine d'années en Afrique Occidentale ■

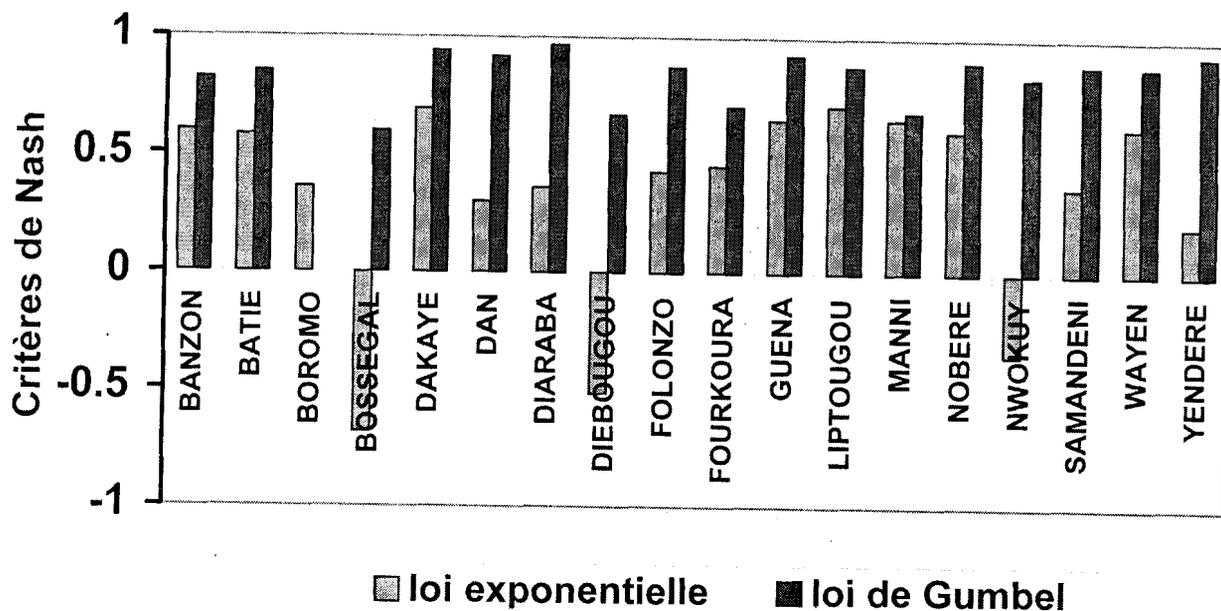


Figure 7. Comparaison des critères de NASH pour les 2 lois testées : exponentielle et Gumbel.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la DGIRH du ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques et l'IRD de Ouagadougou pour avoir mis à leur disposition les données de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

Galéa, G. & Prudhomme, C. (1997a) Synthèses régionales des régimes hydrologiques : approche QdF et régionalisation, FRIEND Third report : 1994-1997, Cemagref éditions, 99-108.

Galéa, G. & Prudhomme, C. (1997b) Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF, Rev. Sci. Eau 1(1997), 83-101.

Lang, M., Rasmunssen, P., Oberlin, G. & Bobee, B. (1997) Echantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement, Rev. Sci. Eau 3(1997), 279-320.

Javelle, P., Grésillon, J.M., & Galéa G. (1999) Modélisation des courbes débit - durée - fréquence en crues et invariance d'échelle, C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes, 329, 39-44.

Lang, M. & Javelle, P. (2000) Echantillonnage Sup-Seuil, version janv. 2000, Cemagref, Lyon

Javelle, P. (2001) Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 267p.

Meunier, M. (2001) Regional flow-duration-frequency model for the tropical island of Martinique, journal of hydrology, 247, 31-53.