

Validation des modèles hydrologiques GR2M et GR4J sur le bassin versant de l'oued Lakhdar (Tafna, Nord-Ouest algérien)

■ R. GHERISSI¹, K. BABA-HAMED¹, A. BOUANANI¹

Mots-clés : modélisation pluie-débit, oued Lakhdar (ex-oued Chouly), bassin versant, GR2M, GR4J

Keywords: rainfall-runoff modeling, wadi Lakhdar (wadi Chouly), basin, GR2M, GR4J

Introduction

En Algérie, le climat de ces trois dernières décennies (1976-2002) a probablement eu un impact négatif sur les ressources en eaux superficielles et souterraines [MEDDI *et al.*, 2009 ; LABORDE, 1993]. Caractériser et prévoir la disponibilité des ressources dans l'espace et dans le temps deviennent alors indispensables pour la proposition des solutions adaptées aux projets de développement [SIGHOMNOU, 2004].

Parmi les outils disponibles pour tenter d'utiliser au mieux cette ressource et suivre son évolution dans le temps et l'espace, on a les modèles pluie-débit qui ont pour objectif de reproduire, à l'échelle du bassin versant, les débits des fleuves et rivières à partir de la mesure ou de la simulation des pluies.

Un modèle pluie-débit s'avère intéressant puisqu'il peut permettre d'estimer la ressource disponible en vue d'un aménagement, mais aussi de prévoir l'évolution de cette ressource dans les années ou décennies à venir en le combinant avec des scénarios climatiques.

Vu l'importance de la modélisation hydrologique et face à la multiplicité des modèles pluie-débit, il se pose aussi le problème du choix du modèle idéal pour simuler efficacement les écoulements d'un bassin spécifique. Dans ce contexte, la recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipita-

tions, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études : RIAD [2003 et 2004], ADEAGA et coll. [2012], TRAORE et coll. [2014], ABDI et coll. [2015], MCMILLAN et coll. [2010], DILIP et BHATTACHARJYA [2011], XU et coll. [2002], HARLAN et coll. [2010], ZOLFA-GHARI et coll. [2013], HUARD et MAILHOT [2008], LOUMAGNE et coll. [1999], NASH et BARSİ [1983], WALLING et WEBB [1981], DEMMAK [1982], MEGNOUNIF et coll. [2000, 2003], KATTAN et coll. [1987], PROBST et AMIOTTESUCHET [1992], TERFOUS et coll. [1999, 2001, 2002, 2003], BOUANANI [2004]... L'objectif de ces auteurs était d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions et à des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes.

Dans cet article, nous avons opté pour la classe des modèles hydrologiques conceptuels globaux tels que les modèles empiriques du génie rural « GR » mis au point par le Cemagref au pas de temps mensuel (GR2M : proposés successivement par KABOUYA [1990], KABOUYA et MICHEL [1991], MAKHLOUF [1994], MAKHLOUF et MICHEL [1994], MOUELHI [2003] et MOUELHI et coll. [2006]) et journalier (GR4J : proposés successivement par EDIJATNO et MICHEL [1989], EDIJATNO [1991], NASCIMENTO [1995], EDIJATNO et coll. [1999], PERRIN [2000], PERRIN [2002] et PERRIN et coll. [2003]) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle afin qu'ils simulent plus efficacement les

¹Laboratoire n° 25 - Université de Tlemcen - BP 119 - Tlemcen 13000 - Algérie. Courriels : hydro_rad@yahoo.fr, kambabahamed@yahoo.fr et a_bouananiidzi@yahoo.fr

écoulements mensuels et journaliers. Ces modèles ne nécessitent pas une description fine du bassin versant. Les variables d'entrée sont limitées aux séries de pluies, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des débits pour le calage. Le nombre de paramètres à optimiser est limité à deux pour le GR2M et à quatre pour le GR4J.

L'objectif du présent travail est d'évaluer les paramètres et l'efficacité des modèles GR2M et GR4J à simuler les écoulements sur le bassin versant de l'oued Lakhdar afin d'identifier leur performance selon la période (sèche ou humide).

1. Présentation du bassin versant

1.1. Caractéristiques physiques

Le bassin versant de l'oued Lakhdar est un sous-bassin de la Tafna (affluent rive droite), situé à l'extrémité nord-occidentale de l'Algérie (figure 1). Il occupe une superficie de 289 km² dont 170 km² contrôlés par une station hydrométrique de coordonnées (34°51' nord 1°8' ouest). Il a une forme allongée, son altitude moyenne est de 1 130 m. Le relief est assez fort avec un indice de pente global (I_g) de 0,027 et une pente moyenne égale à 0,76 % (tableau I).

1.2. Géologie du site

Le bassin versant de l'oued Lakhdar est occupé principalement par des formations carbonatées calcaires, dolomies et marnes du jurassique, au nord du bassin, surmontées par des argiles, des grès et des calcaires crétacés. La série se termine par des alluvions plio-quadernaires occupant le fond de la vallée de l'oued Lakhdar (figure 2) [COLLIGNON, 1986].

2. Paramètres hydrologiques

Pour cette étude, nous avons utilisé les valeurs mensuelles et journalières des précipitations et des débits

Paramètres	Unité	Symbole	Oued Lakhdar
Superficie	km ²	A	170
Périmètre	km	P	60
Indice de compacité	—	K _c	1,28
Indice de pente de Roche	—	I _p	0,19
Indice de pente global	—	I _g	0,027
Longueur du thalweg principal	km	L _p	30
Densité de drainage	km/km ²	D _d	0,072
Altitude la plus fréquente	m	—	1 350
Altitude minimale	m	H _{min}	725
Altitude maximale	m	H _{max}	1 579

Tableau I. Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Lakhdar

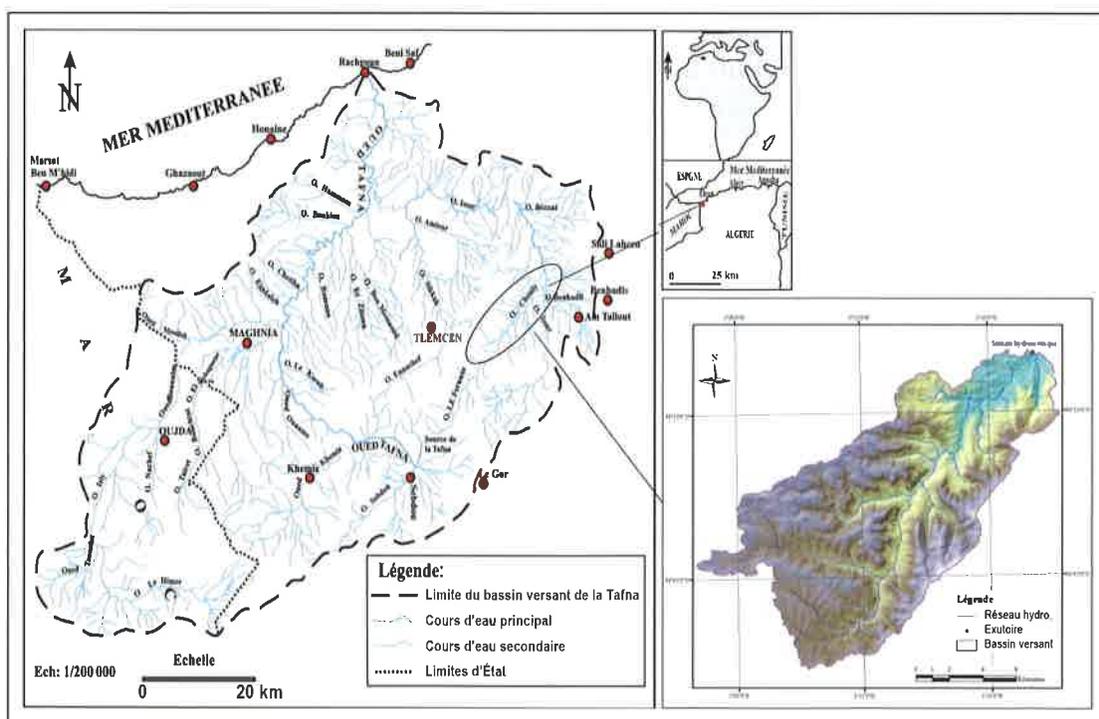


Figure 1. Situation du bassin versant de l'oued Lakhdar

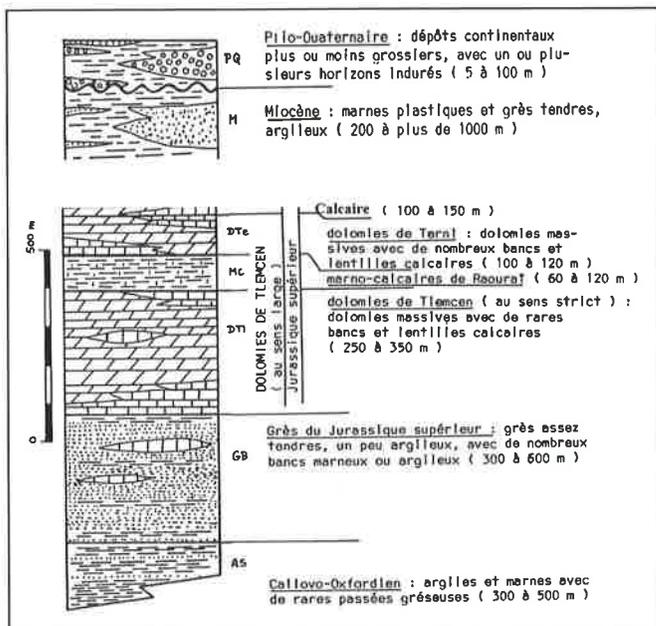


Figure 2. Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les monts de Tlemcen (jusqu'au callovo-oxfordien) [COLLIGNON, 1986]

mesurés par l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) au niveau de la station de l'oued Lakhdar pour la période 1970-2010.

Le bassin jouit d'un climat semi-aride caractérisé par une saison pluvieuse et un été chaud et sec. La pluviométrie moyenne annuelle est évaluée à 427 mm/an (1956-2010). Le régime d'écoulement est irrégulier avec une lame d'eau annuelle moyenne écoulée de 55 mm, soit un coefficient d'écoulement de 13 %.

2.1. Les précipitations

La répartition des précipitations moyennes mensuelles pour la période 1956-2010 (figure 3) montre que le minimum des précipitations s'observe aux mois de juillet et d'août (4 mm) (mois les plus secs), et le maximum au mois de mars avec 60 mm (mois le plus pluvieux).

Le cumul des pluies journalières moyen relatif à la période 1995-2005 (figure 4) montre une rupture de pente de la courbe des cumuls confirmant la variation des précipitations au cours des mois hivernaux et printaniers et la presque stationnarité de ces dernières au cours des mois d'été, due à la diminution des pluies durant ces mois. Quatre phases distinctes ont été obtenues : la première s'étale de septembre à novembre (début de la saison hydrologique), la courbe tend vers la hausse due aux premières gouttes

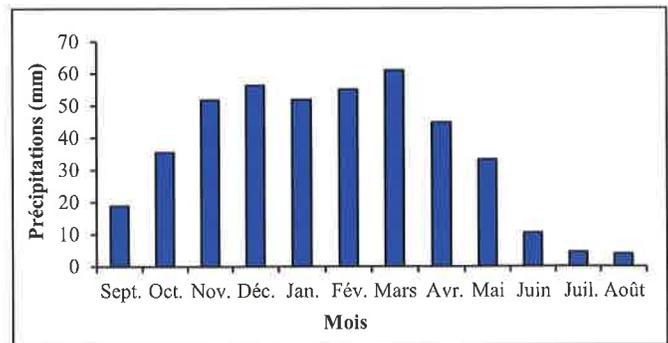


Figure 3. Variation des précipitations, moyennes mensuelles (1956-2010)

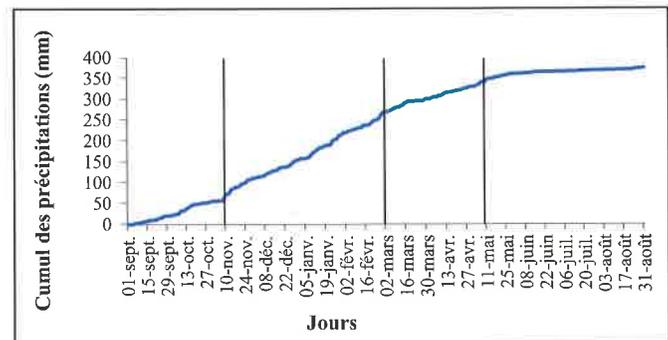


Figure 4. Cumul des précipitations, moyennes journalières (1995-2005)

de pluie avec un taux cumulé de 50 mm, suivie d'une deuxième phase avec une augmentation avérée de la pente indiquant une hausse du régime pluvial jusqu'au mois de mars avec un pic de 280 mm, soit 61 % du pourcentage pluviométrique annuel (tableau II). Au-delà, on enregistre une faible décroissance de la pente de la courbe indiquant une diminution des précipitations (saison printanière) avec un cumul de 350 mm. Vers la fin et à partir du mois de juin, la queue de la courbe tend directement vers l'horizontale indiquant le début de la saison sèche de l'année avec un cumul de 375 mm.

2.2. Lames d'eau écoulées

L'écoulement dans le bassin versant de l'oued Lakhdar à l'instar des bassins méditerranéens présente une irrégularité inter et intra-annuelle assez prononcée. En effet, la variation mensuelle des lames d'eau écoulées (figure 5) suit celle des précipitations, où l'on observe un minimum en août de 1 mm, et évolue vers des valeurs plus importantes avec un maximum de 15 mm. À partir de septembre, on observe un léger relèvement (en liaison avec la

diminution de l'évapotranspiration potentielle) et surtout des premières pluies de l'automne. Les écoulements moyens mensuels montrent une période d'écoulement relativement importante, s'étalant entre les mois de janvier et de mai de chaque année.

Le cumul des lames d'eau écoulées journalières relatif à la période 1995-2005 (figure 6) montre une rupture de pente de la courbe des cumuls confirmant la variation de l'écoulement journalier qui est très irrégulier. En effet, on peut avoir un faible débit un jour, il peut doubler le lendemain et diminuer fortement le surlendemain. La première phase représente les premières lames d'eau écoulées qui sont liées directement aux averses d'automne avec un maximum enregistré de 5 mm. La deuxième phase illustre

un accroissement de la lame d'eau écoulée qui commence vers la fin novembre jusqu'à la fin janvier avec un maximum de 13 mm, soit 11 % de l'écoulement annuel. À partir de la fin janvier à mars, l'écoulement dans le cours d'eau est à son maximum, il correspond aux précipitations qui sont à leurs maximums durant cette période. Pour la quatrième phase, l'écoulement est assuré uniquement par les débits des sources qui alimentent le bassin versant.

3. Méthode

3.1. Structure et fonctionnement des modèles GR2M et GR4J

3.1.1. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle du génie rural à deux paramètres mensuel (GR2M) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres optimisables : X1, capacité du réservoir de production (mm) ; X2, coefficient d'échanges souterrains. Il a connu plusieurs versions, proposées successivement par KABOUYA [1990], KABOUYA et MICHEL [1991], MAKHLOUF [1994], MAKHLOUF et MICHEL [1994], MOUELHI [2003] et MOUELHI et coll. [2006b], qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. Il fonctionne autour de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage, sur lesquels les ajustements et interceptions se font différemment sur les entrées. Le modèle utilise en entrée la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit. Un schéma de la structure est donné à la figure 7. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. La version présentée ici est celle de MOUELHI et coll. [2006b] qui paraît la plus performante.

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau III.

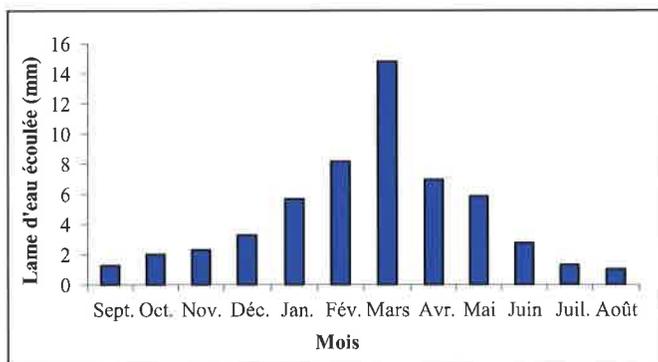


Figure 5. Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1966-2007)

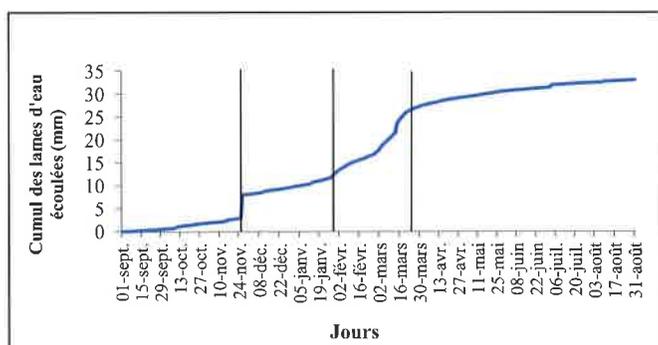


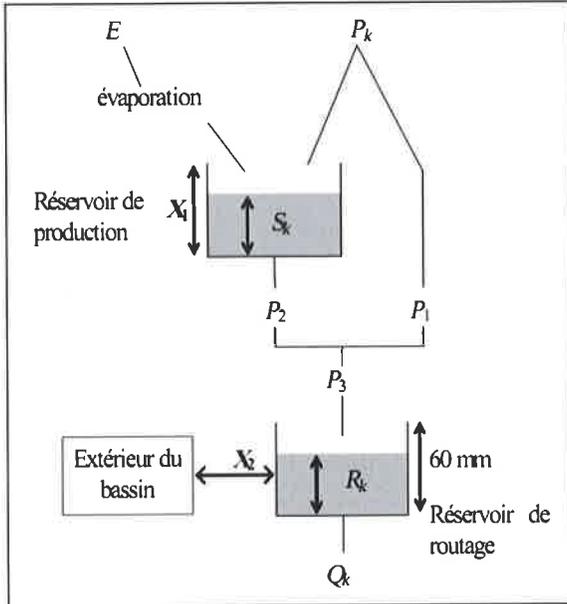
Figure 6. Variation des lames d'eau écoulées, moyennes journalières (1995-2005)

Phases	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	% du cumul annuel
% du cumul annuel des précipitations	15	61	19	5	100
% du cumul annuel des lames d'eau écoulées	8	11	45	36	100

Tableau II. Pourcentage des précipitations et des lames d'eau écoulées par rapport au volume total annuel

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 90 %
X1	380	140 - 2 640
X2(-)	0,92	0,21 - 1,31

Tableau III. Valeurs des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants [ANDREASSIAN et al., 2007]



P1 : pluie en excès : écoulement de surface ; P2 : percolation du réservoir de production : saturation du réservoir ; Sk : contenu du réservoir au début du mois K ; Qk : débit de l'année K.

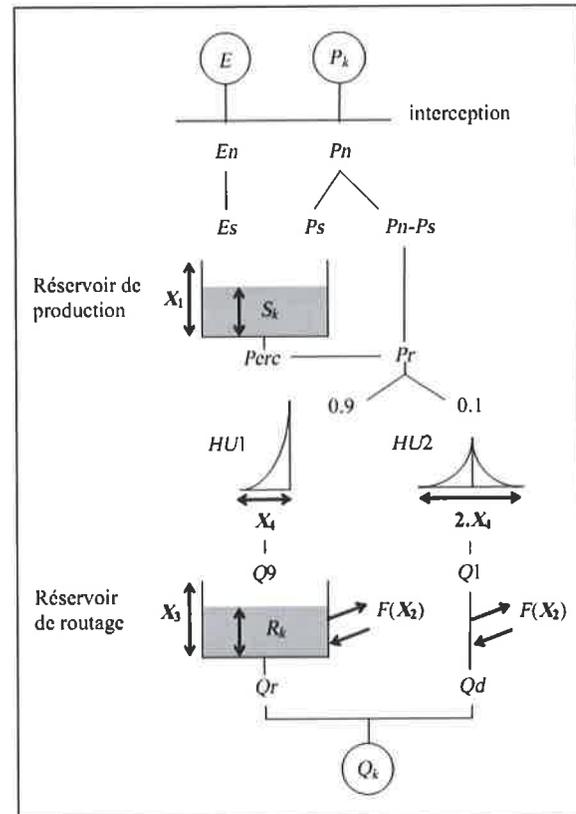
Figure 7. Structure du modèle GR2M [PERRIN et al., 2007]

3.1.2. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été entrepris au Cemagref au début des années 1980. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par EDIJATNO et MICHEL [1989], EDIJATNO [1991], NASCIMENTO [1995], EDIJATNO et coll. [1999], PERRIN [2000], PERRIN [2002] et PERRIN et coll. [2003] qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de PERRIN et coll. [2003] qui est présentée dans cet article. Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler : X1, capacité du réservoir de production (mm) ; X2, coefficient d'échanges souterrains (mm) ; X3, capacité à un jour du réservoir de routage (mm) et X4, temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j). Le modèle utilise en entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration poten-

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 80 %
X1 (mm)	350	100 - 1 200
X2 (mm)	0	-5 à 3
X3 (mm)	90	20 à 300
X4 (jours)	1,7	1,1 à 2,9

Tableau IV. Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants



Pn : pluie nette ; Sk : contenu du réservoir au début du mois K ; Es : quantité d'eau évaporée à partir du 1^{er} réservoir (réservoir de production) ; Q9 : débit de sortie du réservoir de production ; Q1 : débit de sortie issu de l'écoulement de surface ; Qd : composante d'écoulement ; Rk : réservoir de routage, la quantité d'eau infiltrée du réservoir de production.

Figure 8. Schéma de la structure du modèle GR4J

tielle E (mm). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel. Un schéma de la structure est donné à la figure 8. Ces modèles ne nécessitent pas une description fine du bassin versant. Les variables d'entrée sont limitées aux séries de pluies, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des débits pour le calage.

Sur un large échantillon de bassins versants, ANDREASSIAN et coll. [2007] ont obtenu les valeurs données dans le tableau IV.

3.2. Critère de qualité

La validité du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés et observés à travers le critère le plus utilisé pour les modèles conceptuels : le critère de Nash et Sutcliffe (1970) qui s'exprime par l'équation 1 :

$$Nash(Q) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_{i_{obs}} - Q_{i_{cal}})^2}{\sum_i (Q_{i_{obs}} - \overline{Q_{i_{obs}}})^2} \right]$$

Eq. 1 [NASH et SUTCLIFFE, 1970]

Avec $Q_{i_{obs}}$: débit observé, $Q_{i_{cal}}$: débit calculé, $\overline{Q_{i_{obs}}}$: moyenne des débits observés.

Pour tenir compte de certaines valeurs particulières des débits, ce critère a été calculé en utilisant la racine carrée des débits pour atténuer l'importance des débits de pointe, ou le logarithme pour les débits d'étiage. Les résultats seront d'autant meilleurs que le *Nash* se rapproche de 1.

Par comparaison avec d'autres critères, celui-ci a l'avantage d'être d'interprétation simple. En effet, s'il est positif, le modèle donne des résultats meilleurs qu'un modèle donnant à chaque pas de temps un débit constant égal à la moyenne des débits observés. S'il est négatif, c'est l'inverse qui se produit [GERARD, 2010]. En pratique, on estime que la simulation est

acceptable lorsque le *Nash* est supérieur à 70 % [PERRIN *et al.*, 2007].

3.3. Calage et validation des modèles GR2M et GR4J

Pour le calage du modèle, nous avons procédé manuellement aux changements des valeurs des paramètres X_1 et X_2 pour le modèle GR2M et X_1, X_2, X_3 et X_4 (paramètres à optimiser) pour le modèle GR4J plusieurs fois jusqu'à l'obtention des valeurs optimales du coefficient du critère de qualité de Nash-Sutcliffe et du coefficient de détermination R^2 de la corrélation entre les débits calculés et ceux observés. Cette opération est conduite entre les intervalles des valeurs trouvées sur un large échantillon par l'équipe du Cemagref (*tableaux III et IV*). La validation du modèle vise à vérifier si le modèle calé simule correctement des séries de données de référence, non utilisées lors du calage. La qualité du modèle se mesure autant à la valeur du critère d'ajustement, l'objectif est de chercher à améliorer les valeurs des critères d'ajustement, traduisant les performances des simulations. Pour cela, de nouvelles données de précipitations et d'évapotranspirations qui n'ont pas été utilisées lors du calage ont été introduites. Le calcul est lancé en prenant pour les

		Calage				Validation	
		Pas de temps	Paramètres	Nash (%)	Bilan (%)	R	R
Bassin versant de la Tafna	Oued Sikkak [BOUANANI, 2013]	GR2M	$X_1 = 897,95$ $X_2 = 1$	86,1		0,93	0,59
	Oued Boumessaoud [MEDANE, 2012]	GR2M	$X_1 = 148,41$ $X_2 = 0,54$	80,6	99,5	0,89	0,76
		GR4J	$X_1 = 109,95$ $X_2 = 1,03$ $X_3 = 22,20$ $X_4 = 2,86$	88	98,7	0,85	0,81
		GR2M	$X_1 = 262,34$ $X_2 = 1,03$	90,8	99,3	0,90	0,91
	Mekerra [OTMANE <i>et al.</i> , 2015]	GR4J	$X_1 = 324,57$ $X_2 = -3,30$ $X_3 = 37,46$ $X_4 = 1,10$	78	95,2	0,93	0,79

Tableau V. Résultats obtenus dans d'autres versants

paramètres du modèle les valeurs optimisées lors du calage. Les valeurs des débits issues du modèle sont alors comparées aux valeurs observées par corrélation linéaire simple.

4. Résultats et discussions

4.1. Exemples de quelques sous-bassins versants

La fiabilité des résultats obtenus lors de son application à un bon nombre de bassins versants méditerranéens (Tafna : bassin de l'oued Sikkak [BOUANANI *et al.*, 2013 ; BAKRITI, 2014], bassin versant de l'oued Boumessaoud [MEDANE, 2012]), oued Mekerra [BOUREK, 2010 ; OTMANE *et al.*, 2015], bassin versant de l'oued Sarno [BERREZOUG, 2013], bassin de l'oued Boughezzoul [AMIAR, 2014], bassin de la Macta [BAAHMED, 2015] et le bassin de l'oued Louza [DJELLOULI, 2015], et en Algérie septentrionale [KABOUYA, 1990] et [ABDI et MEDDI, 2015], nous a encouragés à appliquer ce modèle. Le *tableau V* cite à titre d'exemple quelques résultats obtenus.

4.2. Résultats du bassin versant de l'oued Lakhdar

Pour prédire le débit d'un mois ou d'un jour, nous avons utilisé à l'entrée du modèle les données de pluies observées (mm) et de débits (exprimés en lames d'eau écoulées (mm) mesurées au niveau de la station de l'oued Lakhdar. Pour l'évapotranspiration potentielle, nous avons pris celle calculée par la méthode de TURC [1995] pour le modèle GR2M et celle calculée par la méthode d'ODIN [2004] pour le GR4J à partir de séries de températures

moyennes mensuelles et journalières mesurées au niveau de la station du barrage Meffrouche en amont du bassin. Pour le calage et la validation du modèle, nous avons utilisé les données correspondantes aux périodes mentionnées au *tableau VI*.

	Mensuel	Journalier
Calage	1971-1990	2000-2002
Validation	1991-2001	2003

Tableau VI. Périodes de calage/validation pour les modèles

La procédure de calage a consisté à déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères de qualité. Nous avons retenu les paramètres pour lesquels les critères de qualité sont optimaux.

4.2.1. Le modèle mensuel GR2M

Les paramètres obtenus lors du calage, en utilisant l'ETP de TURC [1995] sont représentés sur le *tableau VII*.

Pour faciliter la comparaison entre les différents résultats, nous avons présenté l'évolution des paramètres et des critères de qualité en fonction des longueurs de phase de calage et validation ainsi que la méthode de calcul de l'ETP dans les *figures 9* et *10*. D'après les résultats du *tableau VII*, la valeur du paramètre X1 (capacité du réservoir de production) respecte les bornes de l'intervalle de confiance, de même pour la valeur du paramètre X2 (coefficient d'échanges souterrains) qui est positif, cela indique que le modèle simule un apport d'eau provenant des bassins voisins. En effet, on peut considérer qu'avec l'arrivée de la pluie au sol, les échanges avec les nappes profondes se déclenchent, d'où une

Période de calage (1971-1990)				
Paramètres		Critères de qualité et d'optimisation		
X1	X2	Nash (Q) %	Bilan %	Coefficient de corrélation R
287,34	0,82	87,9	83,5	0,91
Période de validation (1991-2001)				
Paramètres		Critère de qualité et d'optimisation		
X1	X2	Nash (Q) %	Bilan %	Coefficient de corrélation R
287,34	0,82	87,9	81,6	0,47

Tableau VII. Représentation des résultats du calage et validation obtenues par utilisation de GR2M sur le bassin versant de l'oued Lakhdar

infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout au long de l'oued, accentuée par le caractère karstique de notre bassin. La valeur du critère de Nash de 87,9 %, la valeur du coefficient de détermination $R = 0,91$ (figure 9a), le bilan assez équilibré de 83,5 % et la bonne superposition des deux courbes (figure 9b), celle des débits simulés et calculés permettent de dire que le modèle est bien calé.

L'allure générale des courbes des débits mensuels simulés semble proche de celles des débits observés sur le bassin (figure 9b). La distinction se fait particulièrement au niveau des périodes de crue (mars 1973 et avril 1975) où le modèle enregistre une légère surestimation des débits simulés par rapport aux débits observés. Cette constatation n'est pas stable sur toute la période étudiée, il arrive parfois que certains débits simulés soient très importants, correspondant même à des crues, alors que sur les débits observés aucune crue n'a été notée, cela étant dû probablement à l'état du sol (saturation et occupation) et à sa capacité d'infiltration, les conditions géologiques et la présence des nappes aquifères sous-jacentes qui jouent le rôle de réservoirs renvoyant une réponse hydrologique tardive, ainsi qu'à la forte hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations. Le débit d'un cours d'eau n'est pas toujours en relation directe avec les précipitations tombant sur son bassin versant, le plus souvent le débit d'une rivière est en quelque sorte un résidu aléatoire des précipitations et non un pourcentage quasi constant de

celles-ci ; par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'un cours d'eau ne draine pas forcément toutes les eaux précipitées sur son bassin.

En ce qui concerne la figure 9a, la corrélation entre les débits observés et ceux simulés donne de bons résultats avec un $R = 0,91$. La majorité des points s'alignent autour de la droite à l'exception de quelques points qui se trouvent soit au-dessus ou au-dessous de la droite, ces débits sont donc surestimés ou sous-estimés. Ces écarts sont dus principalement aux périodes sèches ou humides. Généralement en période sèche les pluies sont rares, le sol est à l'état sec et l'alimentation du cours d'eau se fait uniquement par la vidange des nappes ou par les échanges avec les autres bassins, ce qui rend le débit observé supérieur au débit simulé.

Pour la validation (tableau VII et figure 10), les résultats se dégradent de façon assez significative. L'allure des hydrogrammes simulés suit l'intensité des événements. Le modèle simule mieux les débits observés pour les périodes humides (figure 10) et à un degré moindre les périodes d'étiage. L'hydrogramme simulé semble sous-estimer les débits observés pour certaines périodes. Cette situation est similaire avec les corrélations entre les débits observés et ceux simulés, elle donne un coefficient de corrélation faible ($R = 0,47$). Cette dégradation est probablement due à la sécheresse qui a affecté la région durant la fin des années 1980 et qui a considérablement affecté les écoulements de surface et l'apport des sources, les

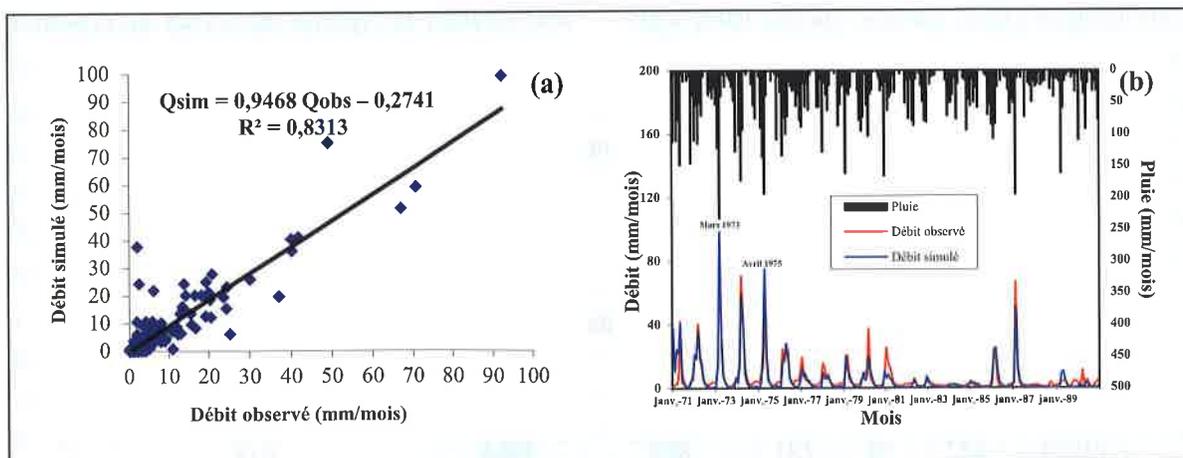


Figure 9. Résultats du calage obtenus par le modèle GR2M. (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (Q_{sim} : débit simulé et Q_{obs} : débit observé) ; (b) : Visualisation de la qualité du calage

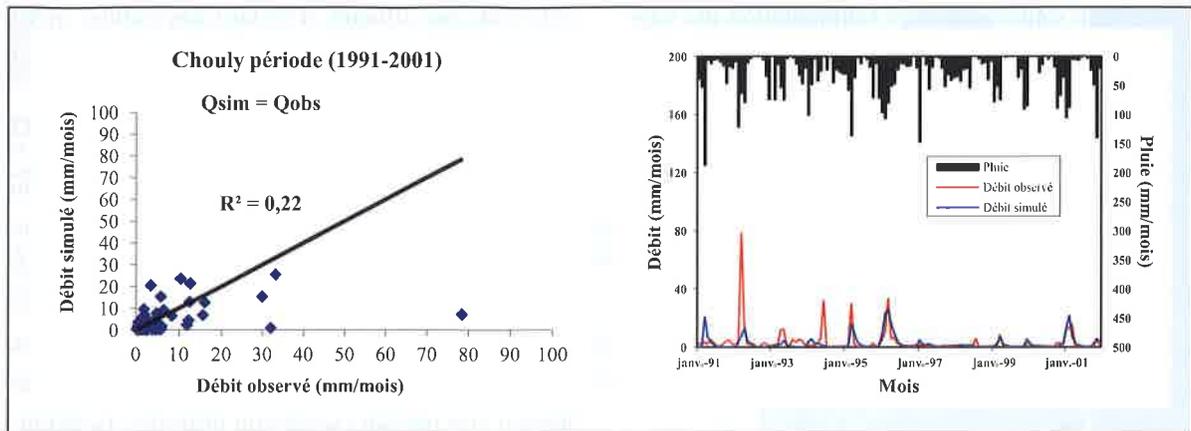


Figure 10. Résultats de la validation du modèle GR2M sur les données mensuelles

soutirages excessifs des nappes à travers des forages pour l'alimentation des agglomérations en eau potable, des puits ou directement depuis le cours d'eau pour l'irrigation, d'une part, et d'autre part la présence du nombre important de faibles valeurs de débits et/ou de précipitations influent sur la qualité de la validation, le modèle réagit mal aux valeurs faibles des précipitations et des débits.

À partir des valeurs du paramètre X1 et X2, du critère de Nash et de la validation, la modélisation par l'utilisation du modèle GR2M paraît correcte.

4.2.2. Le modèle journalier GR4J

Les résultats obtenus par le modèle GR4J (tableau VIII) reflètent la faculté du modèle à représenter les débits observés dans des conditions meilleures. Avec une valeur de Nash égale à 88,2 %, un coefficient de détermination $R = 0,86$ (figure 11a), un bilan assez équilibré égal à 105,4 % et une bonne coïncidence des deux courbes, celle des débits simu-

lés et calculés (figure 11b), nous pouvons dire que le modèle est assez bien calé.

Pour les paramètres du modèle, les valeurs X1, X3 et X4 respectent les bornes de l'intervalle de confiance. Dès l'arrivée de la pluie au sol, l'eau ruisselle ou s'infiltre, pour être stockée au niveau du réservoir de production. La valeur du paramètre d'échange (X2) est négative, le modèle simule donc une perte d'eau.

L'allure des courbes des débits observés/simulés reproduit bien les impulsions des pluies qui produisent les débits écoulés (figure 11b). La simulation des débits en période de crue semble surestimer parfois les débits observés. Cette surestimation tient à l'écoulement qui n'a pas atteint rapidement son maximum du fait de la réponse tardive du bassin. En effet, la réponse lente est due aux formations karstiques et les pertes en profondeur par infiltration au niveau du réseau de failles caractérisant le bassin font retarder la réponse au niveau de la station

Période de calage (2000-2002)						
Paramètres				Critères de qualité et d'optimisation		
X1	X2	X3	X4	Nash (Q) %	Bilan %	Coefficient de corrélation R
215,24	-5,87	65	2,41	88,2	105,4	0,86
Période de validation (2003)						
Paramètres				Critère de qualité et d'optimisation		
X1	X2	X3	X4	Nash (Q) %	Bilan %	Coefficient de corrélation R
215,24	-5,87	65	2,41	88,2	105,4	0,75

Tableau VIII. Représentation des résultats obtenus du calage et validation par l'utilisation de GR4J sur le bassin versant de l'oued Lakhdar

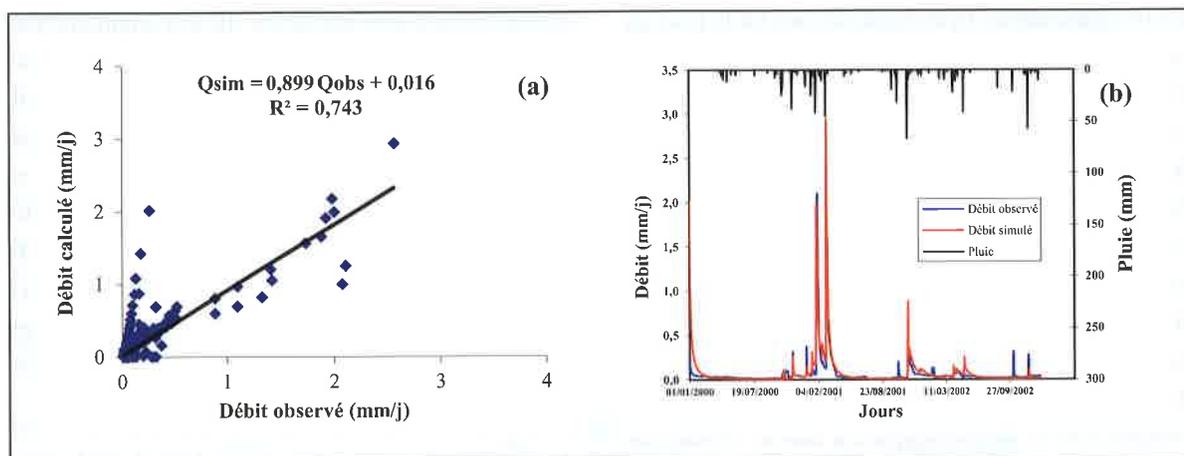


Figure 11. Résultats du calage obtenus par le modèle GR4J. (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (Q_{sim} : débit simulé et Q_{obs} : débit observé) ; (b) : Visualisation de la qualité du calage

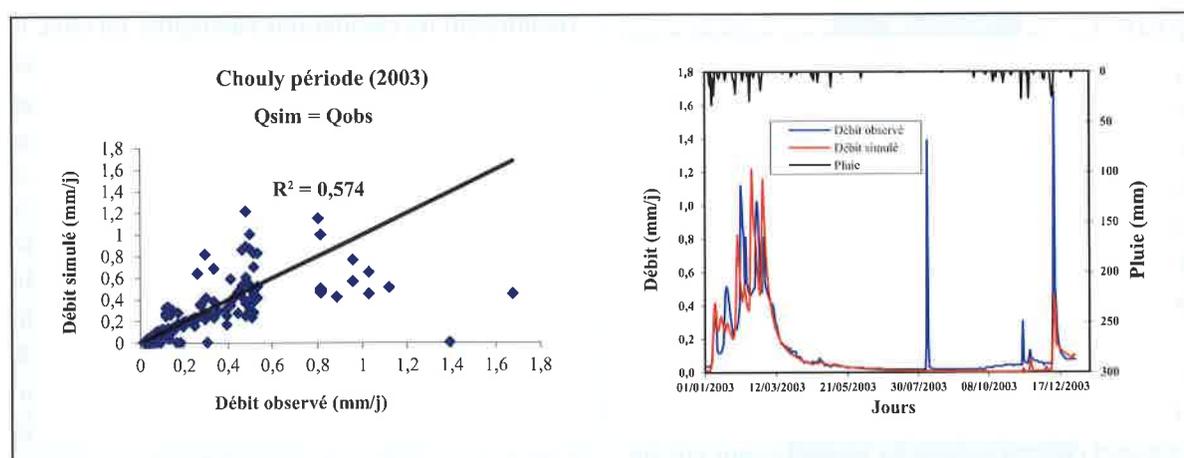


Figure 12. Résultats de la validation du modèle GR4J sur les données journalières

hydrométrique. L'écart observé entre les débits simulés et ceux observés pour une courte durée (3 jours) est très important. La corrélation sur l'ensemble des chroniques (2000-2002) donne de bons résultats avec $R = 0,86$ entre les débits simulés et débits observés (figure 11a).

Avec un coefficient de corrélation de 0,75 (tableau VIII et figure 12), le résultat de la validation est bon. L'hydrogramme simulé du modèle GR4J montre des fluctuations importantes entre les débits observés et ceux simulés (figure 12).

La corrélation définit bien une similitude entre les débits observés et simulés avec un $R = 0,75$, la majorité des points entourent la droite à l'exception de quelques points. Les points éloignés en dessous de la droite indiquent que le débit observé est supérieur au débit simulé, exemple pour le 8 août 2003 où le débit

observé est de 1,39 mm/j et le débit simulé est de 0,008 mm/j avec 0 mm précipité, le décalage est important, cela explique que les eaux dans le cours d'eau proviennent d'un autre bassin à la suite d'un orage d'été violent. Pour les points éloignés mais au-dessus de la droite, cela indique l'inverse, exemple le 16 février 2003, le débit simulé est de 1,22 mm/j, l'observé est de 0,481 mm/j et une pluie de 2,5 mm, ensuite le lendemain, 17 février 2003, le débit observé augmente à 1 mm/j. Dans ce cas, on peut dire que la réaction du réseau hydrographique était un peu lente, ce qui crée le déphasage dans l'hydrogramme.

Conclusion

La gestion des ressources d'eau, la prédétermination des crues et la prévision des catastrophes naturelles exigent des modèles pluie-débit bien définis. De

nombreux modèles hydrologiques ont vu le jour au cours de ces 20 dernières années, surtout ceux qui regardent la relation pluie-débit, offrant ainsi beaucoup de flexibilité dans la manipulation, beaucoup de gain en temps matériel, etc.

Parmi le nombre de modèles existants, les modèles conceptuels ou empiriques globaux sont les plus performants, ils présentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs et ils demandent peu de données.

Dans cet article, nous avons tenté de modéliser le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Lakhdar par utilisation du modèle du génie rural (GR) développé par le Cemagref aux différents pas de temps, à savoir mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les critères que nous avons utilisés pour mesurer l'efficacité de notre travail sont : le coefficient de Nash (*Nash*), le rapport du Bilan (Bilan), la représentation graphique du débit de sortie et la corrélation entre le débit calculé et le débit observé. Les résultats obtenus s'avèrent intéressants et donnent des résultats appréciables, les paramètres du modèle à pas de temps mensuel ($X1 = 287,34$; $X2 = 0,82$; $Nash = 87,9$; $Bilan = 83,5 \%$; $R = 0,91$) et journalier ($X1 = 215,24$; $X2 = -5,87$; $X3 = 65$; $X4 = 2,41$; $Nash = 88,2$; $Bilan = 105,4 \%$; $R = 0,86$) (GR2M et GR4J) du Cemagref caractéristiques du bassin versant ont été déterminés. Leur optimisation a été obtenue pour des valeurs élevées des critères de qualité. La phase du calage a donné de très bons résultats, confirmant la performance du modèle quant à l'utilisation du modèle GR pour un bassin à climat semi-aride méditerranéen. En revanche, ce n'est pas le cas pour la validation du GR2M, cela peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations au cours des mois et surtout par l'état du sol (saturation et occupation) et des conditions géologiques. Après être passés au pas de temps journalier, nous avons constaté que les critères de performance

commencent à être meilleurs (ils ont augmenté par rapport aux valeurs mensuelles). En effet, plus le pas de temps est fin, mieux s'applique le modèle, cela peut être expliqué par le fait que les périodes de mise en route et les périodes de tests du modèle journalier sont plus longues et, de ce fait, on a une réponse plus précise des débits simulés. Par exemple, les débits observés des mois de mai sont en général plus faibles que ceux des mois d'avril, cette tendance est retrouvée sur les débits simulés du modèle journalier alors qu'on ne la voit pas sur le modèle mensuel.

Aussi nous avons pu mettre en évidence les échanges (paramètre X2) (apports et pertes d'eau) dans le bassin, nous avons suggéré que ces apports et pertes traduiraient les circulations karstiques. En effet, le caractère karstique de notre bassin nous laisse penser qu'il existe des échanges avec les nappes profondes d'où une infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout au long de l'oued.

Nous pouvons dire aussi que le modèle mensuel n'a pas pu bien modéliser la réponse hydrologique du bassin, dans certains cas les débits simulés dépassent les débits observés, cela est dû probablement à la présence des nappes aquifères sous-jacentes qui jouent le rôle de réservoirs renvoyant une réponse hydrologique tardive, ainsi qu'à la forte hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations, sans exclure la qualité de la donnée elle-même.

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par le modèle GR sont bons. Ce modèle présente de bonne aptitude à reproduire les débits à partir des données pluviométriques, il tient compte aussi bien du pas de temps choisi que d'autres paramètres d'échanges entre le bassin et l'atmosphère, d'une part, et entre les bassins voisins entre eux d'autre part.

Bibliographie

ABDI I., MEDDI M. (2015) : « Modélisation pluie-débit distribuée dans deux bassins versants de l'est de l'Algérie ». *Larhyss journal* ; 23 : 7-22.

ADEAGA O., MAHE G., DIEULIN C., ELBAZ-POULICHET F., ROUCHE N., SERVAT E., SEIDE J.L. (2012) : « Rainfall-Runoff simulation in part of lower Niger basin ». *Journal of Environmental Science and Engineering* ; B1 : 812-9.

ANDREASSIAN V., CHARLES P., CLAUDE M. (2007) : « Modèles hydrologiques du génie rural (GR) ». *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*. 16 p.

AMIAR S. (2014) : *Modélisation pluie-débit : outil de prévision des crues le mieux adapté par le modèle hydrologique GR*. Mémoire de magister, Université de Tlemcen (Algérie), 159 p.

- BAAHMED D. (2015) : *Bilan hydrique et évaluation des ressources en eau superficielle du bassin de la Macta* [thèse]. Université d'Oran. 195 p.
- BAKRITI A. (2014) : *Modélisation hydrologique du bassin de la Tafna* [thèse]. Université d'Oran (Algérie). 178 p.
- BERREZOUG T. (2013) : *Modélisation pluie-débit par le modèle GR du bassin versant de l'oued Sarno (Mekker, NW-Algérie)*. Mémoire de magister, Université de Tlemcen (Algérie). 154 p.
- BOUANANI A. (2004) : *Hydrologie, Transport solide et modélisation. Étude de quelques sous-bassins de la Tafna (NW algérien)* [thèse]. Université de Tlemcen (Algérie). 250 p.
- BOUANANI A., BABA-HAMED K., BOUANANI R. (2013) : « Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : Cas du bassin de l'oued Sikkak (Tafna – NW algérien) ». *Nature et Technologie* ; 9 : 61-6.
- BOUREK R. (2010) : *Modélisation pluie-débit. Application au bassin versant de la Macta (NW Algérien)*. Mémoire magister, Université de Tlemcen (Algérie). 118 p.
- COLLIGNON B. (1986) : *Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen* [thèse]. Université d'Avignon. Tome 1 et 2, 282 p., 13 annexes.
- DEMMAK A. (1982) : *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale* [thèse] ». Paris, Université Pierre et Marie Curie. p. 403-14.
- DJELLOULI F. (2015) : « Caractérisation hydrologique du bassin d'oued Louza à l'aide d'un modèle pluie-débit global ». *Larhyss journal* ; 23 : 275-86.
- DILIP K., BHATTACHARJYA R.K. (2011) : « Distributed rainfall runoff modeling ». *International Journal of Earth Sciences and Engineering* ; 4(6) : 270-5.
- EDIJATNO E., MICHEL C. (1989) : « Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres ». *Houille Blanche* n°2, 1989, p 113-122.
- EDIJATNO E. : (1991) *Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier* [thèse]. Strasbourg, Université de Louis Pasteur/ENGEES. 242 p.
- EDIJATNO E., NASCIMENTNO N.O., YANG X., MAKHLOUF Z., MICHEL C. (1999) : « GR3J a daily watershed model with three free parameters ». *Hydrological Sciences Journal* ; 44(2) : 263-77.
- GERARD L. (2010) : *Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage*. Mémoire de Master, Eau Environnement, INP Toulouse. 35 p.
- HARLAN D., WANGSADIPURA M., MUNAJAT C.M. (2010) : « Rainfall-runoff modeling of citarumhulu river basin by using GR4J ». *Proceedings of the World Congress on Engineering* ; Vol. II : 1-5.
- HUARD D., MAILHOT A. (2008) : « Calibration of hydrological model GR2M using Bayesian uncertainty analysis ». *Water Resources Research* ; Vol. 44, W02424, p. 1-19.
- KABOUYA M. (1990) : *Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale* [thèse]. Université de Paris Sud Orsay. 347 p.
- KABOUYA M., MICHEL C. (1991) : « Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride ». *Revue des Sciences de l'Eau* ; 4(4) : 569-87.
- KATTAN Z., GAC J.L., PROBST J.L. (1987) : « Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin – Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion ». *Journal of Hydrology* ; 92 : 59-76.
- LABORDE J.P. (1993) : *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle de 1/500 000*. Agence nationale des ressources hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021. Une carte avec notice explicative, 44 p.
- LOUMAGNE C., MICHEL C., PALAGOS B., BAUDEZ J.C., BARTOLI F. (1999) : « From a global to a semi-distributed approach in rainfall-runoff modeling ». *La Houille Blanche* ; 6 : 81-8.
- MAKHLLOUF Z. (1994) : *Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres* [thèse]. Université de Paris XI Orsay. 426 p.
- MAKHLLOUF Z., MICHEL C. (1994) : « A two-parameter monthly water balance model for French watersheds ». *Journal of Hydrology* ; 162 : 299-318.
- MEDANE K. (2012) : *Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tafna, NW Algérien)*. Mémoire de magister, Université de Tlemcen (Algérie), 121 p.
- MEDDI M., TALIA M., MARTIN C. (2009) : « Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie) ». *Physio-Géo.* ; 3 : 61-84.
- MEGNOUNIF A., BOUANANI A., TERFOUS A. (2000) : « Étude du transport solide dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest algérien) ». *Colloque méditerranéen Eau-Environnement*, Alger, p. 28-132.
- McMILLAN H., CLARK M., WOODS R., DUNCAN M., SRINIVASAN M.S., WESTERN A., GOODRICH D. (2010) : « Improving perceptual and conceptual hydrological models using data from small basins ». *IAHS Publ* ; 336 : 264-9.
- MOUELHI S. (2003) : *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier* [thèse]. ENGREF, Cemagref (Antony). 323 p.
- MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V. (2006) : « Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model ». *Journal of Hydrology* ; 318(1-4) : 200-14.
- NASCIMENTO N.O. (1995) : *Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant* [thèse]. Paris, CERGRENE/ENPC. 550 p.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. (1970) : « River flow forecasting through conceptual model ». Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* ; 10 : 282-90.
- NASH J.E., BARSİ B.I. (1983) : « A hybrid model for flow forecasting on large catchments ». *Journal of Hydrology* ; 65 : 125-37.
- LOUDIN L. (2004) : *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global* [thèse]. Cemagref, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, centre de Paris, 495 p.

- OTMANE A., BABA-HAMED K., SAFA A. (2015) : *Prédétermination des valeurs de pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Mekerra*. Mémoire de magister, Université d'Oran 2 (Algérie). 187 p.
- PERRIN C. (2000) : *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative* [thèse]. INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony). 530 p.
- PERRIN C. (2002) : « Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative ». *La Houille Blanche* ; 6/7 : 84-91.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V. (2003) : « Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation ». *Journal of Hydrology* ; 279 (1-4) : 275-89.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V. (2007) : « Modèles hydrologiques du génie rural (GR) ». *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés* [consultable sur <http://www.cemagref.fr/webgr/>]. 16 p.
- PROBST J.L., AMIOTTESUCHET P. (1992) : « Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa) ». *Hydrological Sciences Journal* ; 37 : 621-37.
- RIAD S. (2003) : *Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc* [thèse]. Université de Lille. 154 p.
- RIAD S., MANIA J. (2004) : « Rainfall-Runoff model using an artificial neural network approach ». *Mathematical and Computer Modelling* ; 40 (7-8) : 839-46.
- SIGHOMNOU D. (2004) : *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : Perspectives d'évolution des ressources en eaux* [thèse]. Université de Yaoundé 1 (Cameroun). 291 p.
- TERFOUS A., BOUANANI A., MEGNOUNIF A. (1999) : « Évaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser (N-O Algérien) ». *2^e séminaire maghrébin sur l'eau*. Tizi-Ouzou, 1999, 28-29 juin.
- TERFOUS A., MEGNOUNIF A., BOUANANI A. (2001) : « Étude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest algérien) ». *Revue des Sciences de l'Eau* ; 14 : 175-85.
- TERFOUS A., GHENIM A., BOUANANI A., MEGNOUNIF A., BABA HAMED K. (2002) : « Rôle des crues dans la genèse des sédiments transportés en suspension par trois cours d'eau des zones semi-arides méditerranéennes. Int. Workshop on Water in the Mediterranean basin ». *Resources and sustainable development (WATMED)*. Monastir Tunisia, 10-13 Oct. 2002. p. 888-93.
- TERFOUS A., MEGNOUNIF A., BOUANANI A. (2003) : « Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes ». *IAHS Publication* ; 278 : 366-72.
- TURC L. (1955) : « Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement ». *Ann. Agro.* ; 6 : 5-131.
- TRAORE V.B., SAMBOU S., TAMBA S., DIAW A.T., CISSE M.T., FALL S. (2014) : « Calibrating the rainfall-runoff model GR4J and GR2M on the Koulountou river basin, a tributary of the Gambia river ». *American Journal of Environmental Protection* ; 3(1) : 36-44.
- WALLING D.E., WEBB B.W. (1981) : « The reliability of suspended sediment load data ». *AHS Publications* ; 133 : 177-94.
- XU Z.X., TAKEUCHI K., ISHIDAIRA H. (2002) : « A conceptually based-distributed rainfall-runoff model applied in arid regions ». *International conference on urban hydrology for the 21st century*. p. 45-60.
- ZOLFAGHARI M., MAHDAVI M., REZAEI A., SALAJEGHEH A. (2013) : « Evaluating GR2M model in some small watersheds of Iran (Case study Gilan and Mazandaran Provinces) ». *Journal of Basic and Applied Scientific Research* ; 3(2) : 463-72.

Résumé

R. GHERISSI, K. BABA-HAMED, A. BOUANANI

Validation des modèles hydrologiques GR2M et GR4J sur le bassin versant de l'oued Lakhdar (Tafna, Nord-Ouest algérien)

Les modèles hydrologiques sont devenus aujourd'hui des outils indispensables à toutes les études et recherches dans le domaine de l'estimation, de la prédétermination et de la gestion des ressources en eau. Ils sont nombreux à voir le jour au cours des vingt dernières années, surtout en regard de la relation pluie-débit. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail ayant pour application le bassin versant de l'oued Lakhdar. Notre objectif principal est d'apprécier le fonctionnement d'un modèle de simulation des débits, celui du génie rural (GR2M et GR4J). Cette étude de la relation pluie-débit à l'échelle mensuelle et journalière est basée sur une série de données hydropluviométriques, mesurées au niveau de la

station de l'oued Lakhdar. Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit indiquent que les modèles à réservoirs sont plus satisfaisants qu'un modèle de type boîte noire, ils présentent de bonnes aptitudes à reproduire les débits à partir des données pluviométriques. En effet, le modèle GR prend en compte la succession chronologique des phénomènes, d'une part, et l'influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celles physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes), d'autre part. Aussi, leur utilisation peut être encouragée pour la prévision des débits à partir de données issues de modèles climatiques.

Abstract

R. GHERISSI, K. BABA-HAMED, A. BOUANANI

Validation of the hydrological models gr2m and gr4j on the basin of wadi Lakhdar (Tafna, nw algerian)

The hydrological models are now essential tools to every study and research in the field of estimation, predetermination and management of water resources. They are many to be shown during the last twenty years, comparing mainly to the relation rainfall-runoff. In this context, that joins the present work having for application the basin of wadi Lakhdar. Our main objective is to appreciate the operation of a flow simulation model that of the Rural Genius (GR2M and GR4J). This monthly and daily scale study of the rainfall-runoff relation is based on a series of hydropluviometric data, measured at the wadi Lakhdar station. The results

obtained by the simulation of the transformation of the rainfall into flow indicate that the models with typical reservoir are more satisfactory than a black box model ; they present good capacities to reproduce the flows from the pluviometric data. Indeed the GR model takes into account the chronological succession of the phenomena and the influence of the parameters as well as climatic (evapotranspiration) of those physical and hydrological of the basin (humidity of the ground and external exchanges). Also, their use can be encouraged to flow the forecasting based on data coming from climate models.

Toujours la solution
appropriée



Spécialiste de la valorisation en agriculture

Création de stockage | Transport | Curage
Hydrocurage | Épandage liquides et solides






53200 Coudray
Tél : 02.43.06.93.91
www.manceau-environnement.fr

Zone d'intervention :
Région Grand Ouest
de la France

Organisation d'un espace de bon fonctionnement du fleuve :
Un plan d'action sur le territoire
de la Garonne débordante

Carte du territoire
de Garonne débordante

- 70 km de Garonne
- 26 communes riveraines
- 4 Etablissements
Publics de Coopération
Intercommunale (EPCI)



www.smeag.fr
www.lagaronne.com



