



**ANALYSE DE LA SENSIBILITE D'UN MODELE  
HYDROLOGIQUE GLOBAL AUX ESTIMATIONS DE LA PLUIE  
MOYENNE ET DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE:  
APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUE EN  
COTE D'IVOIRE**

**SENSITIVITY ANALYSIS OF A GLOBAL HYDROLOGICAL MODEL  
TO THE ESTIMATES OF AVERAGE RAINFALL AND POTENTIAL  
EVAPOTRANSPIRATION: APPLICATION TO THE MARAHOUE  
BASIN IN COTE D'IVOIRE**

*SORO G. E.<sup>1</sup>, NOUFE D.<sup>1</sup>, GOULA BI T. A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire Géosciences et Environnement, Université NANGUI ABROGOUA  
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

*ge\_soro@yahoo.fr*

**RESUME**

Dans un monde où la gestion des ressources naturelles notamment les ressources hydriques devient problématique, il est nécessaire de mettre en place des outils de gestion rationnelle de l'eau. Dans cette perspective, la modélisation hydrologique apparait comme un outil pour une meilleure gestion de la ressource en eau notamment dans les bassins comme celui de la Marahoué où les besoins en eau pour divers usages se font de plus en plus croissants. L'objectif de la présente étude est d'analyser la sensibilité du modèle hydrologique GR2M aux données d'entrée pluie-ETP estimées par diverses approches. Pour ce faire, après l'analyse comparative des méthodes d'estimation de la pluie et de l'ETP, la sensibilité du modèle a été évaluée à l'aide de 9 combinaisons (3 ETP x 3 pluies). L'analyse des méthodes d'estimation de l'ETP montre que l'approche de Blaney surestime les valeurs comparativement à celles de Penman et Thornwaithe. Quant à l'estimation de la pluie moyenne sur le bassin versant, les approches utilisées présentent des variations quasiment identiques. Les meilleures performances du modèle en

calage et en validation sont obtenues avec le couple de données estimées par l'approche Inverse-Blaney.

**Mots-clés** : Modèle hydrologique, relation pluie-débit, évapotranspiration potentielle, Côte d'Ivoire, bassin de la Marahoué

## **ABSTRACT**

In a world where natural resources management including water resources becomes a problem, it is necessary to establish rational water management tools. In this perspective, hydrological modeling appears as a tool for better management of water resources especially in basins like the Marahoué where water requirements for various uses are increasingly growing. The aim of this study is to analyze the sensitivity of the hydrological model GR2M the rain-ETP inputs estimated by different approaches. To do this, after the comparative analysis of methods for estimating rain and ETP, the sensitivity of the model was evaluated using 9 combinations (3 ETP x 3 rain). The analysis of estimation methods of ETP shows that the approach to Blaney overestimates the values compared with those of Penman and Thornwaithe. As for the estimation of the average rainfall in the catchment area, the approaches used have almost identical variations. The best performance of the model calibration and validation are obtained with the torque data estimated by the inverse-Blaney approach.

**Key words:** Model GR2M, rainfall-runoff relationship, rainfall, ETP, Côte d'Ivoire, Marahoué basin

## **INTRODUCTION**

L'eau constitue l'élément fondamental de tout organisme vivant sur Terre. La très grande partie de cette eau est stockée dans les océans sous forme d'eau salée. Le reste constitue les réserves d'eau douce, stockées en majorité dans les glaciers et les réservoirs souterrains. Seule une petite fraction de cette eau transite entre les différents réservoirs que sont l'atmosphère, les surfaces continentales et les océans. Le cycle de l'eau, ou cycle hydrologique, désigne l'ensemble des transferts d'eau ayant lieu de manière continue entre ces compartiments (Vergnes, 2012). Ce cycle hydrologique est de plus en plus perturbé avec l'augmentation de la concentration de gaz tels que le dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui induisent un réchauffement global de la terre.

Selon IPCC (2007), ce réchauffement observé pendant plusieurs décennies a été relié aux changements survenus dans le cycle hydrologique à grande échelle notamment : l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, la modification de la configuration, de l'intensité et des extrêmes des précipitations, la diminution de la couverture neigeuse et la fonte des glaces accrue, ainsi que la modification de l'humidité du sol et du ruissellement.

Par ailleurs, des études ont montré que le changement climatique a des conséquences notables sur la disponibilité des ressources en eau. Dès lors, connaître le comportement hydrologique d'un bassin versant devient une priorité dans la gestion des ressources en eau. De nombreux travaux de recherche se sont attachés à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement hydrologique du bassin versant (Oudin, 2005). Parce qu'une très grande complexité caractérise les processus impliqués dans le cycle de l'eau, les représentations de ces processus, c'est-à-dire les modèles, sont nécessairement simplificatrices, réductrices de la complexité naturelle, et donc grossièrement inexacts. Ainsi, divers modèles hydrologiques (statistiques, stochastiques, conceptuels, globaux ou distribués) sont utilisés pour décrire le fonctionnement du cycle de l'eau sur le bassin versant. Pour bien décrire les processus hydrologiques des bassins versants, les modèles ont besoin de données hydrométéorologiques de qualité et en quantité suffisante (Lebecherel, 2015). Les données de débit sont par exemple essentielles pour caler et valider les modèles hydrologiques. Elles informent sur les régimes et les extrêmes, les tendances passées, et sur le comportement hydrologique du bassin versant. Les séries météorologiques (pluie, température, rayonnement, ...) permettent d'alimenter les modèles hydrologiques et de comprendre la genèse des écoulements. Elles sont également indispensables pour le calcul du bilan hydrique.

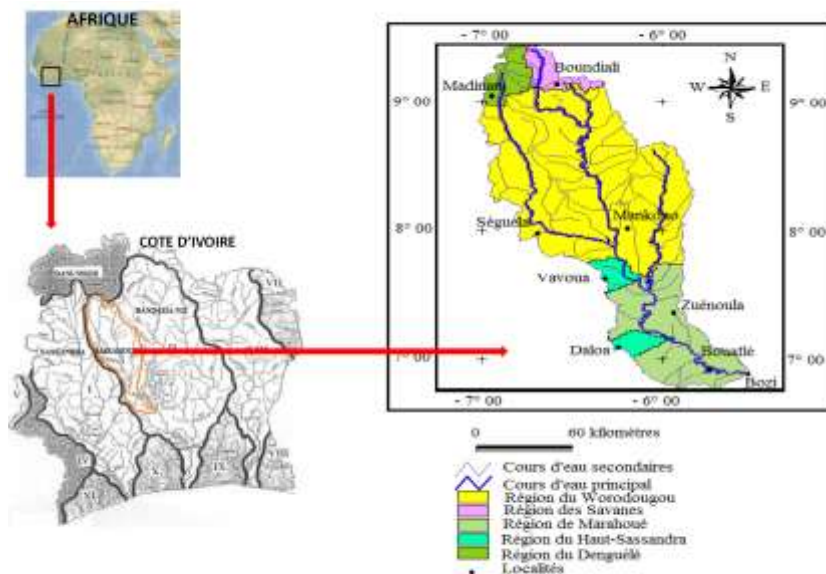
Ainsi, on peut facilement admettre que la qualité et la quantité des données météorologiques peuvent avoir un impact non négligeable sur l'exactitude des calculs hydrologiques. D'où la nécessité de disposer d'approches d'estimation des données des pluies et de l'évapotranspiration adéquate pour une bonne simulation des écoulements sur le bassin versant. En effet, les paramètres climatiques étant des phénomènes variables temporellement et spatialement, les erreurs d'estimation liées à leur échantillonnage peuvent être non négligeables (Krajewski *et al.* 2003).

C'est dans un tel contexte que cette étude a été initiée en Côte d'Ivoire sur le bassin versant de la Marahoué, zone soumise à une activité agricole intense et qui voit son développement socio-économique perturbé par les aléas

climatiques et ses effets sur les ressources en eau. Il faut donc continuellement estimer cette ressource, connaître ses variations dans le temps et dans l'espace et suivre ses interactions avec les milieux environnants pour être capable de prévoir des inondations ou sécheresses. Ainsi, l'étude vise à analyser la sensibilité du modèle GR2M à l'entrée de la pluie et de l'évapotranspiration estimées par diverses approches.

## ZONE D'ETUDE

La Marahoué (Bandama rouge) prend sa source au Sud-Ouest de la ville de Boundiali, à la latitude 9°30' Nord dans la plaine de Kanyéné et dans le mont Syakoro, culminant à environ 720 m d'altitude. Le bassin versant de la Marahoué est situé entre la longitude 5°5' et 7°1' Ouest et la latitude 6°7' et 9°5' Nord. Elle a une superficie de 24300 km<sup>2</sup>. La longueur du cours d'eau principal est de 550 km (figure 1). Le bassin versant de la Marahoué est un sous bassin versant du fleuve Bandama qui a une superficie de 97000 km<sup>2</sup>, soit environ 30% de la superficie de la Côte d'Ivoire (Avenard, 1971). Le cours d'eau principal, la Marahoué est encadré par deux affluents : le Béré à l'Est et le Yani ou Bahoroni à l'Ouest, il se jette dans le Bandama blanc à l'endroit où se trouve le village de Bozi, peu après la ville de Bouaflé.



## DONNEES D'ETUDE

Les données hydrométriques collectées proviennent de la Direction des Normes, de l'Hydrologie, de la Réglementation et de la Qualité (DNHRQ), structure sous tutelle de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH). Les caractéristiques de la station hydrométrique utilisées sont consignées dans le Tableau 1. Les données climatologiques ont été mises à disposition par le complexe sucrier de Zuénoula et par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) (Tableau 1). Les données de températures, d'évapotranspiration, d'humidité proviennent de la station météorologique du complexe sucrier de Zuénoula située dans le bassin versant de la Marahoué. Ces données couvrent la période 1980-2010. Quant aux données pluviométriques, elles proviennent de la SODEXAM. Elles couvrent la période de 1980 à 2002. Il convient de noter que la collecte des données pluviométriques a été interrompue suite à la crise socio-politique débutée en septembre 2002.

**Tableau 1 : Caractéristiques des stations climatologiques utilisées**

Station	Type de données	Latitude	Longitude	Période	Source
Zuénoula	Température Evapotranspiration potentielle Humidité	7°27' N	6°20'O	1980-2010	Complexe sucrier Zuénoula
Béoumi	Pluie	8°30' N	6°11'O	1980-2000	SODEXAM
Borotou	Pluie	5°57'O	7°67' O	1984-2000	SODEXAM
Boundiali	Pluie	7°50'O	8°74'O	1984-2000	SODEXAM
Dianra	Pluie	6°87'O	9°52'O	1984-2000	SODEXAM
Mankono	Pluie	6°25'O	8°75'O	1984-2000	SODEXAM
Séguéla	Pluie	6°18'O	8°05'O	1984-2000	SODEXAM
Vavoua	Pluie	6°67'O	7°95'O	1984-2000	SODEXAM
Bouaflé	Débit	6°98' N	5°75'O	1964-2004	DNHRQ

## METHODES

### Estimation de la pluie moyenne sur le bassin versant

#### *Méthode de Thiessen*

Cette méthode consiste à définir des zones pour lesquelles chacun de ses points à l'intérieur soit plus proche en distance horizontale du pluviomètre considéré. A chaque poste est attribué un poids (pourcentage) proportionnel à la surface de

sa zone. Les zones représentatives sont ainsi des polygones obtenus en traçant, entre les stations prises deux à deux, les médiatrices, lieux géométriques des points situés à égale distance des extrémités d'un segment de droite.

### ***Méthode de l'inverse de la distance***

Elle consiste à estimer la valeur en un point de la zone d'étude à l'aide de la moyenne pondérée des valeurs des points les plus proches du point considéré. Au début, on mesure donc la distance entre le point recherché et les points connus aux alentours. Dans la suite, le calcul du point recherché se fait grâce à la moyenne des valeurs des points environnants. Ainsi, plus le point à interpoler est proche d'un point dont on connaît la valeur, plus la valeur du point à interpoler sera proche de la valeur connue (Fadika, 2012).

### ***Méthode de krigeage***

Le krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale permettant, à partir de données dispersées, d'obtenir une représentation homogène des informations étudiées. Le krigeage a l'avantage de prendre en compte les distances entre les données (c'est à dire les stations de mesure), les distances entre les données et la cible (c'est à dire le point pour lequel on veut estimer la mesure) et la structure spatiale (grâce à l'analyse variographique) (Hennequi, 2010). Pour appliquer ce type d'interpolation par krigeage, il est nécessaire d'explorer la structure spatiale des données afin de vérifier si celles-ci sont bien autocorrélées.

## **Estimation de l'évapotranspiration potentielle**

### ***Méthode de Thornthwaite***

La méthode de Thornthwaite a pour but de comptabiliser les apports et les pertes en eau sur un bassin versant ou au niveau d'une région sur des périodes plus ou moins grandes. L'intérêt de cette étude réside dans le fait qu'elle ne demande que la température comme seule donnée climatique (Thornthwaite, 1948).

### ***Méthode de Blaney-Criddle***

La méthode de Blaney-Criddle fait intervenir la température moyenne mensuelle et le pourcentage d'éclairement du mois considéré (Blaney et Criddle, 1950).

### **Méthode de Penman-Monteith**

La modélisation dite « Penman-Monteith » est très utilisée et considérée comme le modèle offrant « les meilleurs résultats et le minimum d'erreurs » selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et présentant des résultats « exacts et constants » pour les climats tempérés, humides et arides. La formule complexe de Penman et Monteith (1965) incorpore de nombreux paramètres, qui sont mesurables ou bien calculables à partir de données météorologiques et agronomiques.

### **Impacts de l'estimation de l'ETP et de la pluie moyenne sur la relation pluie-débit du modèle GR2M**

#### ***Description et fonctionnement du modèle hydrologique GR2M***

Le modèle GR2M (modèle du **G**énie **R**ural à **2** paramètres **M**ensuels) est un modèle conceptuel pluie-débit comportant deux réservoirs régulés par deux paramètres ajustables (Mouelhi, 2003). Ce modèle a été mis en place par le Cemagref Anthony (Makhlouf et *al.*, 1994 ; Lavabre et *al.*, 1993).

La structure du modèle, bien qu'empirique, l'apparente à un modèle conceptuel à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle.

#### ***Critère d'optimisation du modèle***

L'optimisation (ou calage) des paramètres du modèle nécessite la définition d'une fonction quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance entre les débits observés et ceux simulés. Le critère quantitatif utilisé pour mesurer la qualité des ajustements réalisés par le modèle est celui proposé par Nash et Sutcliffe (1970), appelé Nash dans l'usage courant en hydrologie, et défini de la manière suivante :

$$Nash(Q) = 100 \times \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_0^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_0^i - Q_m^i)^2} \right] \quad (1)$$

Avec :  $Q_0^i$  - débit mensuel observé ;  $Q_c^i$  - débit mensuel calculé ;  $Q_m^i$  - débit moyen mensuel observé sur l'ensemble de la période d'observation

La performance du modèle est jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash (Perrin, 2000) :

- Nash  $\geq$  90% : le modèle est excellent ;
- 80% < Nash < 90% : le modèle est très satisfaisant ;
- 60% < Nash < 80% : le modèle est satisfaisant ;
- Nash < 60% : le modèle est mauvais.

### ***Sensibilité du modèle global GR2M aux estimations de l'ETP et de la pluie moyenne sur le bassin versant***

Les données disponibles pour l'application du modèle, en plus de la capacité de rétention en eau du sol (WHC) et des débits, sont constituées par les trois grilles de pluies obtenues par les trois différentes méthodes d'interpolation (Krigage, Thiessen, Distance inverse), et par les trois grilles de l'évapotranspiration (Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman-Monteith). Afin de déterminer la meilleure combinaison de données d'entrée conduisant à l'efficacité du modèle, nous avons testé les 9 combinaisons (3 ETP x 3 pluies).

## **RESULTATS**

### **Analyse de la sensibilité au cours de la phase de calage**

En hautes eaux, les meilleures performances de critères de Nash en calage sont obtenues avec l'approche de Blaney, suivies de celles de Penman et de Thornthwaite. Au niveau des approches d'estimation de la pluie moyenne, les meilleures performances proviennent des données estimées par la méthode Inverse suivie de celle du Krigage (Tableau 2). En tenant compte du couple de données pluie-ETP, le critère de Nash le plus élevé est obtenu par le modèle Inverse-Blaney avec 72,8%. En moyennes eaux, les variations des débits présentent sensiblement les mêmes caractéristiques d'évolution quel que soit la méthode de pluie et d'ETP utilisée. Les meilleures performances du modèle sont obtenues par les méthodes Inverse\_Blaney et Krigage\_Blaney avec un critère de Nash de 75,3% et 74,9% (Tableau 3). En basses eaux, malgré les différences de variations mensuelles (Pluie ; ETP), les performances des simulations de débit sont obtenues au niveau des Nash maxi, notamment avec les modèles Inverse\_Blaney, Krigage\_Blaney et Thiessen\_Blaney avec plus de 80% qui traduisent un fort rapprochement entre les débits observés et ceux simulés (Tableau 4). Aussi la formule de Penman, couramment utilisée en modélisation pluie-débit, ne conduit-elle pas toujours à des simulations plus performantes que d'autres formules beaucoup plus simples. Enfin, le critère le plus sensible est le critère de Nash appliqué aux logarithmes des débits avec plus de 80%.



**Tableau 2 : Valeurs de Nash obtenues en phase de calage avec les différents modèles d'estimation de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle pour la simulation du débit moyen mensuel à la station de Bouaflé**

Pluie	ETP	Nash (%)		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Inverse	Blaney	66,5	62,7	72,8
	Penman	64,3	61,4	70,0
	Thornthwaite	63,0	58,9	69,2
Krigage	Blaney	65,4	60,1	71,0
	Penman	63,1	60,0	68,1
	Thornthwaite	61,1	57,1	67,6
Thiessen	Blaney	64,9	58,6	69,0
	Penman	62,8	58,7	66,2
	Thornthwaite	60,6	56,2	65,8

**Tableau 3 : Valeurs de Nash ( $\sqrt{Q}$ ) obtenues en phase de calage avec les différents modèles d'estimation de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle pour la simulation du débit minimum mensuel à la station de Bouaflé**

Pluie	ETP	Nash $\sqrt{Q}$ (%)		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Inverse	Blaney	71,5	68,9	75,3
	Penman	70,1	68,3	72,7
	Thornthwaite	67,9	66,1	71,1
Krigage	Blaney	71,1	67,8	74,9
	Penman	69,9	68,1	72,4
	Thornthwaite	67,9	65,6	71,5
Thiessen	Blaney	64,9	58,6	69,0
	Penman	62,8	58,7	66,2
	Thornthwaite	60,6	56,2	65,8

**Tableau 4 : Valeurs de Nash ( $\ln Q$ ) obtenues en phase de calage avec les différents modèles d'estimation de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle pour la simulation du débit maximum mensuel à la station de Bouaflé**

Pluie	ETP	Nash $\ln Q$ (%)		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Inverse	Blaney	79,2	76,3	80,8
	Penman	76,5	73,9	77,8
	Thornthwaite	76,2	73,1	77,2
Krigage	Blaney	79,2	76,0	81,1
	Penman	76,9	73,9	77,9
	Thornthwaite	76,5	73,1	77,7
Thiessen	Blaney	77,7	71,4	80,9
	Penman	76,9	73,8	77,8
	Thornthwaite	76,4	72,9	77,8

### Analyse de la sensibilité au cours de la phase de validation

Avec le modèle Blaney, le critère de Nash oscille entre 6 et 68% avec une valeur moyenne de 40 % quel que soit le modèle d'estimation de la pluie moyenne. Les modèles de Penman et Thornthwaite présentent sensiblement les mêmes variations du critère de Nash quel que soit l'estimation de la pluie utilisée avec une valeur moyenne de 32% (Tableau 5). Les valeurs du critère d'évaluation varient très peu entre les différents modèles d'entrée pluie-ETP. On observe cependant une légère dominance du modèle Inverse\_ Blaney avec un critère compris entre 12 et 70% et une moyenne de 43 % (Tableau 6). Pendant ces périodes, le modèle arrive à reproduire de façon satisfaisante le comportement hydrologique du bassin versant. La moyenne des Nash obtenus en validation est de 40% avec un maximum de 70% par les modèles pluie-ETP. En comparant les différents critères selon le mode de calcul, le critère le plus élevé correspond au critère calculé par le logarithme.

**Tableau 5 : Valeurs de Nash obtenues en phase de validation avec les différents modèles d'estimation de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle pour la simulation du débit moyen mensuel à la station de Bouaflé**

Pluie	ETP	Nash (%)		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Inverse	Blaney	40,3	9,5	66,3
	Penman	32,9	-2,6	62,8
	Thornthwaite	33,5	1,6	59,9
Krigage	Blaney	39,4	6,9	66,7
	Penman	31,9	-5,9	63,2
	Thornthwaite	32,5	-1,6	60,8
Thiessen	Blaney	41,1	9,3	67,8
	Penman	31,7	-5,8	64,2
	Thornthwaite	33,3	-1,1	61,7

**Tableau 6 : Valeurs de Nash ( $\sqrt{Q}$ ) obtenues en phase de validation avec les différents modèles d'estimation de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle pour la simulation du débit minimum mensuel à la station de Bouaflé**

Pluie	ETP	Nash lnQ (%)		
		Moyenne	Moyenne	Moyenne
Inverse	Blaney	43,7	14,8	70,2
	Penman	37,5	3,5	68,0
	Thornthwaite	38,2	9,9	64,7
Krigage	Blaney	42,6	11,6	70,6
	Penman	36,4	0,9	68,4
	Thornthwaite	37,0	5,0	65,5
Thiessen	Blaney	43,0	12,8	70,3
	Penman	36,9	1,0	68,2
	Thornthwaite	37,1	6,2	65,2

**Tableau 7 : Valeurs de Nash (lnQ) obtenues en phase de validation avec les différents modèles d'estimation de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle pour la simulation du débit maximum mensuel à la station de Bouaflé**

Pluie	ETP	Nash lnQ (%)		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Inverse	Blaney	44,2	12,4	74,3
	Penman	39,0	3,5	71
	Thornthwaite	40,0	7,8	69,6
Krigeage	Blaney	42,8	9,7	74,4
	Penman	37,8	0,8	71,3
	Thornthwaite	38,6	5,2	70
Thiessen	Blaney	42,5	9,7	73,6
	Penman	36,0	0,1	70,7
	Thornthwaite	37,9	4,7	69,2

## DISCUSSION

Il ressort des analyses de cette étude que le modèle est très sensible à l'estimation de l'ETP que celle de la pluie. Ce résultat diffère de celui d'Oudin (2004) qui indique que les modèles pluie-débit sont peu sensibles à l'entrée d'ETP car des formules de conceptions fortement différentes conduisent à des performances équivalentes en termes de simulation de débit. Dans la présente étude, les trois critères (Nash Q, Nash ( $\sqrt{Q}$ ), Nash (ln (Q))) ont été très sensibles à l'entrée de l'ETP surtout en période de validation avec des écarts-types entre les critères très élevés. Les meilleures performances (Nash Q, Nash ( $\sqrt{Q}$ ), Nash (ln (Q))) en période de calage et en validation sont obtenues avec l'ETP issue de l'approche de Blaney bien que ce dernier surestime énormément les valeurs notamment en région humide comme le souligne (Xu et Singh, 2000). Quant à l'ETP estimée par Penman et Thornthwaite, elles donnent également des résultats satisfaisants mais en deçà de ceux de Blaney. Selon Vörösmarty *et al.* (1998), les formules complexes (avec facteurs dépendant du type d'occupation du sol) n'apportent pas forcément de meilleurs résultats que des formules simples basées sur la température. Oudin (2004) indique que le modèle de Penman qui, pris à l'échelle de la parcelle, semble avoir le meilleur fondement physique et qui est largement utilisé en modélisation pluie-débit, n'est pas celui qui conduit aux meilleures simulations de débits. Il est intéressant de constater que le nombre de variables climatiques exploitées par les formules d'ETP n'est pas une garantie de qualité des sorties des modèles pluie-débit.

Les critères de performance du modèle présentent peu de sensibilité à la pluie. Parmi les méthodes de la pluie on note une légère prédominance de la

méthode de l'inverse pondérée au carré. Cependant, Tabios et Salas (1985) ont montré que le krigeage est préférable à d'autres méthodes d'interpolation pour les précipitations, du moins quand un pas de temps mensuel est utilisé. Néanmoins, Chang *et al.* (2005) indiquent que lorsque la densité du réseau de pluviomètres est faible, à l'image de notre zone d'étude, les erreurs d'estimation peuvent être importantes avec le krigeage. Ainsi, ils ont souligné que l'interpolation par distance inverse pondérée au carré peut réduire considérablement les erreurs qui surviennent lorsque le nombre de stations est limité.

L'analyse des performances du modèle GR2M en calage et en validation montre que le modèle est performant. La moyenne du critère de Nash en calage est égale à 76% avec la plupart des valeurs supérieures à 60%. En phase de validation, on observe que le critère de Nash se dégrade. La moyenne du critère n'est plus que de 40% avec l'apparition de valeurs négatives du critère de Nash. Les résultats de performances obtenus sur le bassin de la Marahoué sont donc satisfaisants et s'inscrivent dans l'ordre des performances obtenues en général sur les bassins versants ouest africains (Ouédraogo, 2001). Par ailleurs, le modèle a des difficultés à reproduire fidèlement le comportement hydrologique du bassin versant à partir de 1988 notamment en phase de validation. Cela peut s'expliquer par le fait que l'état de surface n'est pas pris en compte par les différents algorithmes : pas de simulation possible de la litière, pas de prise en compte de l'interception due au couvert végétal, modélisation simple de l'ETR, etc. (Servat *et al.*, 1997). Ces résultats amènent à penser que le calage du modèle conceptuel utilisé dans notre étude doit tenir compte des caractéristiques climatiques et physiographiques des années et du bassin, qui ont assurément un rôle important et doivent être, nécessairement, prise en considération dans toute tentative d'explication des valeurs prises par les algorithmes pluie-débit (Servat *et al.*, 1997).

## CONCLUSION

Cette étude a permis de comparer l'efficacité des approches d'estimation de la pluie et de l'ETP dans le processus de modélisation pluie-débit sur le bassin versant de la Marahoué dans une perspective de gestion durable de la ressource hydrique. Le modèle global GR2M a été utilisé pour la mise en œuvre de la présente étude sur la période 1984-2000. Trois approches d'estimations de la pluie moyenne et trois approches de l'ETP ont été évaluées. L'analyse des méthodes d'estimation de l'ETP montre que l'approche de Blaney surestime les valeurs comparativement à celles de Penman et Thornwaithe. Quant à

l'estimation de la pluie moyenne sur le bassin versant, les approches utilisées présentent des variations quasiment identiques. L'analyse de la sensibilité du modèle pluie-débit à l'entrée de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle estimées par diverses approches indique une sensibilité du modèle aux données d'ETP estimées par rapport à la pluie. Par ailleurs, les données issues du couple Inverse-Blaney donnent les meilleures performances du modèle GR2M sur le bassin versant pour la période 1984-2000.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AVENARD J. M. (1971). Aspect de la géomorphologie in : Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris, France, pp. 8-73.
- BLANEY H. F., CRIDDLE W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., 48 p.
- CHANG C. L., LO S. L., YU S. L. (2005). Applying fuzzy theory and genetic algorithm to interpolate precipitation. *Journal of Hydrology*, Vol. 314, pp. 92-104.
- FADIKA V. (2012). Variabilité hydroclimatique et modélisation hydrologique de quelques bassins versants côtiers du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 177 p.
- HENNEQUI M. (2010). Spatialisation des données de modélisation par krigeage. Master Statistique et Applications, ASPA. Thèse, Université de Strasbourg, France, pp. 6-11.
- IPCC. (2007). Climate change 2007. In SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K., TIGNOR M., MILLER H. (Eds.): The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press Cambridge, 996 p.
- KRAJEWSKI W. F., CIACH G. J., HABIB E. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, n°2, pp. 151-162.
- LAVABRE J., SEMPERE TORRES D., CERNESSON F. (1993). Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, vol. 142, pp. 273-299.
- LEBECHEREL L. (2015). Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique. Thèse de doctorat, IRSTEA, AgroParisTech (Paris), 280 p.
- MAKHLLOUF Z., MICHEL C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, vol. 162, pp. 199-318.

- MOUELHI S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 p.
- NASH J. E., SUTTCIFFE J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.
- LOUDIN L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, Cemagref, ENGREF, 495 p.
- LOUDIN L. (2005). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Centre de Paris, 496 p.
- OUEDRAOGO M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 257 p.
- PENMAN H. L., MONTEITH J. L. (1965). Evaporation and the Environment in the State and Movement of Water in Living Organisms, *Proceedings of the Society for Experimental Biology, Symposium n° 19*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 205-234.
- PERRIN C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Cemagref Antony, Grenoble, France, 530 p.
- SERVAT E., KOUAME B., DEZETTER A., PATUREL J. E. (1997). Modélisation pluie-débit et régionalisation : le programme ERREAU en Côte d'Ivoire. Edition CEMAGREF, FRIEND, troisième rapport 1994-1997, 431 p.
- TABIOS G. O., SALAS J. D. (1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources. Research.*, vol. 21, n°3, pp. 365-380.
- THORNTHWAITE C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, vol. 38, n°1, pp. 55-94.
- VERGNES J. P. (2012). Développement d'une modélisation hydrologique globale incluant la représentation des aquifères : application sur la France et à l'échelle globale. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 216 p.
- VÖRÖSMARTY C. J., FEDERER C. A., SCHLOSS A. L. (1998). Evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology*, vol. 207 n° 3-4, pp.147-169.
- XU C.-Y., SINGH V.P. (2000). Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, vol. 14, n°2, pp. 339-349.