



ÉTUDE COMPARATIVES DU MODELE SEMI-DISTRIBUE HEC HMS AVEC LE MODELE GLOBAL GR4J APPLIQUEE AU BASSIN VERSANT D'INNAOUENE (MAROC)

COMPARATIVE STUDY OF THE SEMI-DISTRIBUTED MODEL HEC HMS WITH THE GLOBAL GR4J MODEL APPLIED IN THE INNAOUENE BASIN (MOROCCO)

| Moumen ZINEB ¹ | Abdessamad JALOUNI ¹ | Farah EL HASSANI ² | Abderrahim LAHRACH ¹ | et | Abdel-Ali CHAOUNI ¹ |

¹. Laboratoire Géoressources et Environnement | Université Sidi Mohamed Ben Abdellah | Fès | Maroc |

². Inspection Régionale de l'Urbanisme | de l'Architecture et de l'Aménagement du Territoire | Fès-Meknès | Maroc |

[Received | 24 September 2017]

[Accepted | 04 October 2017]

[Published 17 October 2017]

RESUME

Introduction : Le développement économique et l'extension urbaine sont autant des facteurs qui ont contribué à susciter une forte demande autour de la gestion des risques naturels, notamment dans le domaine des crues et inondations. La modélisation hydrologique est l'une des plus rationnelles alternatives qui peuvent pallier ces risques. **Objectif :** Sur cette optique, cette étude est portée sur l'évaluation de la performance des deux modèles hydrologiques appliquées au niveau du bassin versant d'Innaouène. Le premier est le modèle hydrologique semi-distribué HEC HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), le deuxième est le GR4j (Génie Rural à 4 paramètres journalier). **Méthode :** La méthodologie suivie consiste à conceptualiser les caractéristiques physiques du bassin étudié, c'est-à-dire les transformer en une structure de données hydrologiques, à l'aide de l'extension HEC-GEO HMS pour les exporter vers HEC-HMS. Ce dernier permet dans un premier temps d'introduire les données hydro-climatiques requises, et ensuite, simuler le comportement hydrologique du bassin versant en effectuant le transfert pluie-débit. Pour GR4j le modèle est représenté par la moyenne journalière des débits, de précipitation et d'évapotranspiration. **Résultats :** Les résultats de cette étude ont permis de conclure que le modèle global permet mieux reproduire les débits observés, mais pour une période limitée, ainsi la représentativité des caractéristiques physiques du bassin sont négligées. **Conclusion :** Contrairement à HEC HMS, les résultats ne sont pas aussi bonnes que celles obtenues par GR4j, à cause de la complexité du modèle et du nombre fastidieux des paramètres à calibrés, les résultats peuvent être amélioré avec la qualité de la base de données.

Mots clés : Modélisation hydrologique, hydrologie, prévision des crues, SIG.

ABSTRACT

Background: Economic development and urban extension have all contributed to generating strong demand for the management of natural hazards, particularly in the field of flood and inundation. Among the various methods of flood forecast, hydrological modeling is one of the most rational alternatives that can mitigate these risks. **Objectives:** against this background, this study is based on the evaluation of the performance of the two hydrological models applied on Innaouene watershed. The first is the Hydrological Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC HMS), the second is the GR4j (4-parameter rural engineering). **Methodology:** The methodology consists in conceptualizing the physical characteristics of the basin under study, by transforming them into a hydrological data structure, using the HEC-GEO HMS extension to export them to HEC-HMS. The latter allows initially introducing the required hydro-climatic data, and then simulating the hydrological behavior of the watershed by carrying out the rain-flow transfer. For GR4j the model is represented by the daily average of the flows, precipitation and evapotranspiration. **Results:** The results of this study led to the conclusion that the global model makes it possible to reproduce the observed flows better, but for a limited period, so that the representativeness of the physical characteristics of the basin is neglected. **Conclusion:** contrary to HEC HMS, the results are not as good as those obtained by GR4j, due to the complexity of the model and the tedious number of parameters to calibrate, the results can be improved with the quality of the database.s

Key words: Hydrological modeling, hydrology, forecast, GIS.

1. INTRODUCTION

La région de Taza a connu des inondations catastrophiques notamment celle de 1987, et à partir de l'année 2000, leurs fréquences s'amplifient pour devenir presque annuelle. En effet, les inondations survenues au niveau de la province de Taza, résultent des pluies torrentielles dans le bassin versant de l'Oued Innaouène. A citer, la crue de 31/01/1987 où le débit de crue enregistré à El Kouchat a atteint $1280 \text{ m}^3/\text{s}$ [1], 27/09/2000 qui s'est propagée sur une étendue de 30 km, causant non seulement des dégâts matériels, mais des pertes en vies humaines et d'importants dégâts au niveau des infrastructures de base, des équipements et des biens publics et privés [1], Celle de 2002 qui a causé l'arrêt de la station d'El Kouchat. L'année 2010 a connu aussi des précipitations intenses (le débit à l'entrée du barrage Idriss premier a atteint une valeur de $1400 \text{ m}^3/\text{s}$).

Pour faire face à ces problèmes, la modélisation hydrologique reste l'une des importantes alternatives qui peuvent pallier ces risques. Elle vise à comprendre la formation des crues à partir des caractéristiques du bassin versant et de la pluviométrie pour quantifier les volumes des écoulements.

Sur cette optique, cette étude porte sur l'évaluation de la performance de deux modèles hydrologiques HEC HMS, GR4j qui consiste dans un premier temps, à comprendre les processus physiques susceptibles d'être responsables sur la genèse et de la propagation des crues (topographie, hydrographie des cours d'eau, géologie, géographie, occupation du sol, végétation hydrologie, l'analyse fréquentielle des séries des débits ...). et dans un deuxième temps à tester la capacité de ces deux modèles hydrologiques de reproduire les débits sur une période temps continue dans un contexte climatique semi-aride. Cette étude va s'appuyer sur les données pluviométriques des 4 stations ; Bab Marzouka, Bab Chhoub, Bni Haitem et Zrarda.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude :

La présente étude concerne le bassin versant d'Innaouène, situé géographiquement entre les villes de Fès et de Taza (région géographiquement connue le nom du couloir Fès –Taza) et géologiquement entre les chaînes du Prérif et du Moyen Atlas. Il s'étend sur une superficie de 3640 Km^2 et un périmètre de 268 Km. Il rencontre le barrage Idriss premier situé à l'aval, [2] Son altitude moyenne est de 1013.5 m, la pente moyenne est 12.09 m/Km. Il est limité à l'Est par le bassin versant de la moyenne Moulouya au Nord-ouest par l'Ouergha et au Sud-ouest par le haut Sebou. Le bassin d'Innaouène se situe dans une zone montagnarde (entre Prérif et Moyen Atlas) avec une altitude max de 1970m à l'extrémité Nord-est et Sud-est et 57 m vers son exutoire à l'Ouest (fig. 1). Cette situation géographique le soumet à l'influence d'un climat méditerranéen à semi-aride, marqué par des fortes contrastes saisonnières et des irrégularités très remarquable de précipitation [3]. L'hypsométrie du bassin versant décroît de l'amont vers l'aval. De 1997 m à 1200 m la surface varie faiblement, elle diminue progressivement de 1000 m à 57 m. Il renferme une pente forte vers les plus hautes altitudes, (fig. 2).

Innaouène est alimenté sur sa rive droite par plusieurs affluents, parmi lesquels, les Oueds : Larbaa, Lahdar. Ces affluents recueillent le ruissellement des collines prérfaines. Sur la rive gauche, il est alimenté en partie par le massif primaire de Tazzeke et par les calcaires du Moyen-Atlas souvent karstiques.

Sa densité de drainage est 0.76 km^{-1} , ainsi que la constante de stabilité du cours d'eau (inverse de la densité de drainage) qui vaut 1.31 km, indique que le bassin présente dans son ensemble une ou des formations géologiques perméables, qui limitent l'écoulement.

Le total annuel de précipitation est de 598 mm, ainsi l'analyse des données pluviométriques recueillies au niveau de la station de Bab Marzouka, dévoile une alternance des années sèches et humides.

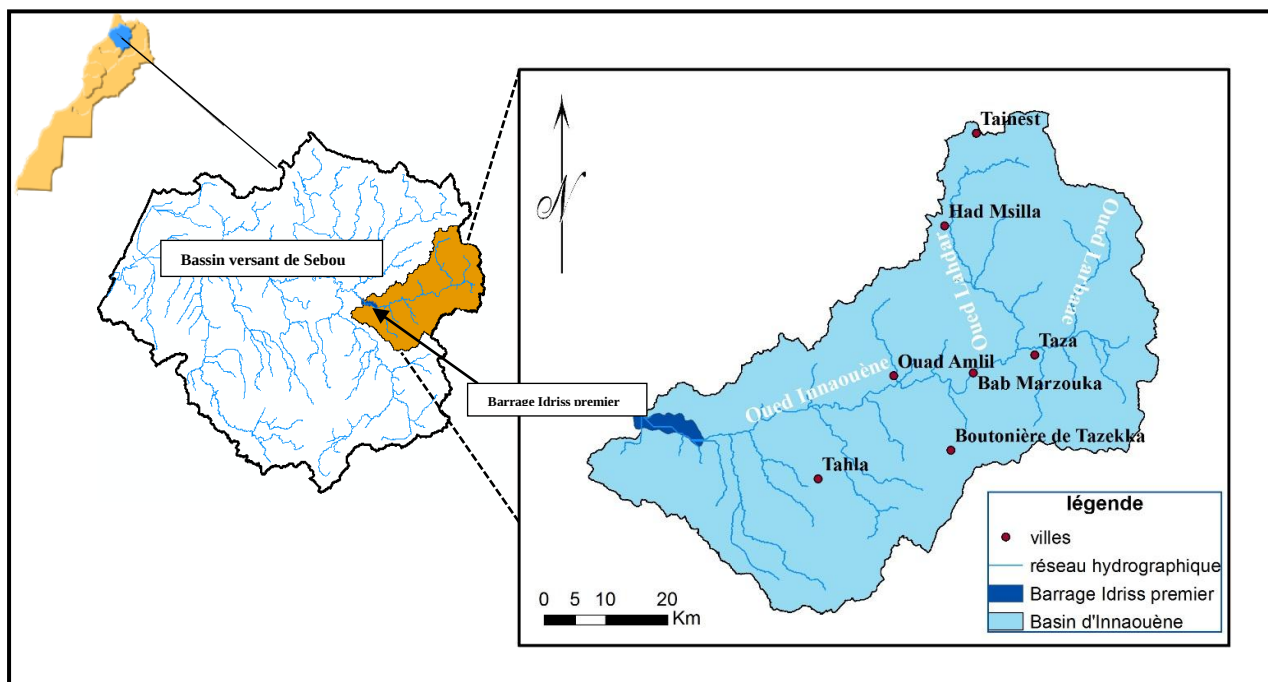


Figure 1 : la figure montre la Situation géographique du bassin versant d'Innaouène.

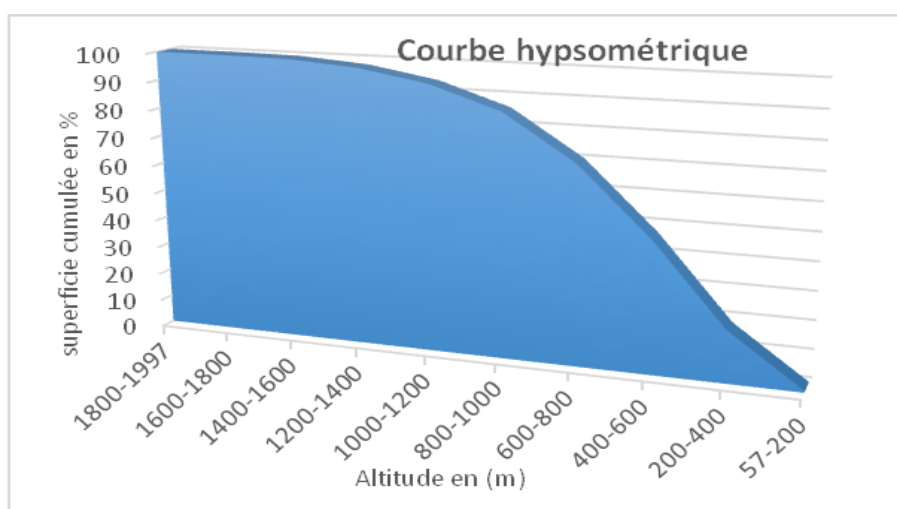
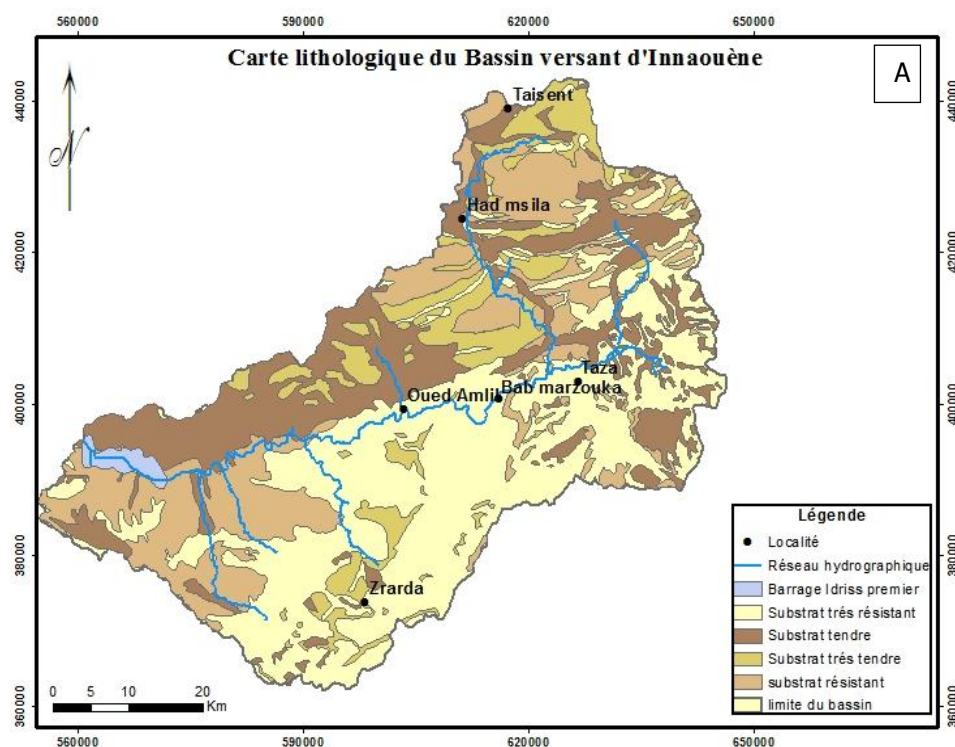


Figure2 : la figure montre la variation de la superficie cumulée du bassin versant en % en fonction des tranches d'altitude en (m).

De point de vue lithologique, le bassin versant d'Innaouène s'étale sur deux domaines structuraux du Maroc (fig. 3) ; d'une part, il parcourt la partie sud du domaine rifain, d'autre part, il jalonne la partie septentrionale du domaine meseto-atlasique. Ces deux domaines sont séparés par le sillon sud rifain, qui se présente sous forme d'un couloir allongé suivant la direction (Est - Ouest) pour se refermer au niveau du col de Touahar et qui s'étend de l'atlantique à la méditerranée entre la chaîne du rif au nord et les moles hercyniens de la meseta et du moyenne atlas au Sud [4]. Ces affleurements peuvent être regroupés en deux catégories selon leurs degrés de perméabilité : les affleurements qui ont une perméabilité importante sont localisés dans le domaine moyen atlasique, caractérisé par des formations essentiellement carbonatées qui constituent un système karstique développé. La deuxième catégorie se trouve dans la partie pré-rifaine qui prend la forme d'un flanc à substratum marneux donc imperméable. C'est deux types de formations perméable et imperméable vont largement influencer le comportement hydrologique et la réponse du bassin versant face à une crue [2].



Surface lithologique	Nature lithologique	surface en %
substratum tendre	Marno-schistes	26.0
substratum résistant	Schiste ; marno-calcaire ; grés et pélites	24.9
substratum très tendre	marnes	12.8
substratum très résistant	Calcaire ; grés ; granite ; limon, michaschiste	36.3

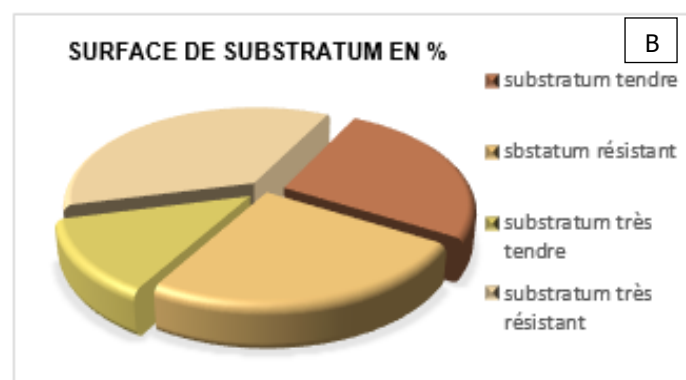


Figure3 : la figure est composé de trois partie ; **A** : La Carte montre la lithologie du bassin versant d'Innaouène, **B** : le tableau montre la surface en % correspondante à chaque substratum ainsi que sa composition lithologique ; **C** : la représentation en diagramme camembert du tableau **B**. La partie EST et SUD-EST est dominé par un substratum très résistant composé essentiellement de calcaire, il occupe 36% de la superficie totale du bassin. Les substratums tendres à très tendre jalonnent le NORD, et le NORD-OUEST du bassin.

3. MATERIELS ET METHODES

Dans l'ordre de construire les deux modèles hydrologiques, la méthodologie appliquée est basée sur une approche géomatique qui utilise le système d'information géographique en combinaison avec les outils de la modélisation hydrologique. Les données hydrométéorologiques sont fournies par l'agence du bassin hydraulique de Sebou de Fès.

2.1 Description des modèles hydrologique :

HEC HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) est un modèle hydrologique semi-distribué à base physique qui permet de simuler la réponse hydrologique d'un bassin, en transformant les précipitations en débit [5], HEC HMS a été conceptualisé par l'USACE [6] pour évoluer l'ancien version HEC-1. HEC HMS peut simuler aussi

bien les événements de crue que les précipitations en pas de temps continue [6] (depuis le pas de temps instantané jusqu'aux journalier).

Il a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde [7,8,9,10,11,12], et il a été déjà utilisé dans le contexte marocain dans plusieurs études qui ont démontré son adaptabilité au contexte climatique semi-aride et particulièrement pour la gestion des crues dans le cadre des expériences menées dans le bassin de Martil en 2005 et de Todgha en 2007 [13].

Le GR4j (modèle de Génie Rural à quatre paramètres journaliers), C'est un modèle hydrologique qui possède quatre paramètres et fonctionne au pas de temps journalier et nécessitant comme données d'entrées, l'évapotranspiration potentielle journalière, la précipitation moyenne journalière ainsi que le débit moyenne journalier[14], et afin de réduire l'écart entre le débit observé et le débit simulé, les paramètres à calés sont au nombre de quatre (4) :

X1 : capacité maximale du réservoir de production en (mm) : ce réservoir contrôle la production des pluies efficaces à partir des entrées de précipitations

X2 : coefficient d'échange souterraines en (mm) : il peut être soit positif dans le cas d'apport souterraines, soit négatifs s'il y a des pertes d'eau soit égal à zéro s'il n'y a pas d'échange.

X3 : capacité maximale du réservoir de transfert en (mm) : ce réservoir contrôle les phases de récession.

X4 : temps de base de l'hydrogramme en (j) : Ils répartissent dans le temps les précipitations efficaces, et simulent le délai passé entre les pluies et les pics des crues. Les deux hydrogrammes unitaires dépendent du même paramètre de temps X4, exprimé en jours.

Comme tous les modèles hydrologiques, le GR4j possède deux réservoirs, un pour le stockage et un autre pour la production.

2.2 Collection et réparation des données : Pour faire appliquer les deux modèles, un ensemble de bases données hydrométéorologique et satellitaire sont nécessaires.

2.2.1 Données satellitaire : Avant d'appliquer la simulation, il est nécessaire de disposer d'un ensemble de données sur les caractéristiques physiques du bassin à citer la pente, la topographie, la nature et la morphologie du réseau hydrographique la longueur du plus talweg... Ces informations ont été extraites à partir du modèle numérique du terrain.

Le modèle numérique du terrain utilisé dans cette étude était télécharger du site USGS (tab. 2), il a fait l'objet d'un traitement sur ARC HYDRO, et HEC GEO HMS.

Tableau 2 : Caractéristiques du modèle numérique du terrain utilisé.

Capteur	Résolution spatial	Résolution numérique	type
Aster Global DEM	30m	16bits	Geo-Tif

2.2.2 Données météorologique : La base des données utilisée pour la construction du modèle était fournie par l'agence du bassin hydraulique de Sebou, Le bassin versant de Sebou à 49 stations pour mesurer les précipitations, la zone d'étude dispose de 5 stations (tab. 3).

Tableau 3 : le tableau montre les stations de la zone d'étude.

Station	X (m)	Y (m)	Z (m)	Série
Beni Haitem	631900	412500	790	1992-2015
Idriss 1er	559700	396200	200	2004-2014
Zrarda	598330	373400	1210	1998-2014
Bab Marzouka	615850	400850	312	1971-2013
Bab Chhoub	406250	406250	563	1993-2013

Les données manquantes dans la série des données ont été interpolées par la méthode de régression linéaire, la station de Bab Marzouka était considérée comme station de base puisqu'elle dispose d'une longue et complète série de données [15].

L'évapotranspiration utilisée en entrées des deux modèles était calculée par la méthode du bilan de Thornthwaite à partir de la température journalière fournie par la station de Bab Marzouka.

2.3 Méthodologie :

Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC HMS) : Sur la plateforme ArcGIS en combinaison avec l'outil ARC HYDRO les étapes de prétraitement du modèle numérique du terrain ont été réalisées, tel que le remplissage des évièrs, la direction et l'accumulation des flux, le traitement des courants d'écoulement, l'extraction du réseau hydrographique et la délimitation du bassin versant.

HEC GEO HMS était utilisé pour extraire les informations physiques nécessaires pour HEC HMS, en effet, ce dernier consiste à conceptualiser les caractéristiques physiques et les transformer en structure de données hydrologiques, HEC HMS peut après facilement importer les données de configuration du modèle et construire le schéma du projet (fig. 6).

Le modèle hydrologique du bassin d'Innaouène est représenté dans HEC HMS par quatre sous-bassins nommés respectivement « Bni Haitem », « Bab Marzouka », « Bab Chhoub », « Zrarda ». L'exutoire correspond à l'entrée du barrage Idriss Premier, cette station va être utilisée pour le calage du modèle (fig. 7).

La modélisation pluie-débit sur HEC HMS nécessite la prise en compte de plusieurs composantes de l'écoulement ; le débit de base, les pertes et le transfert de l'écoulement vers l'exutoire.

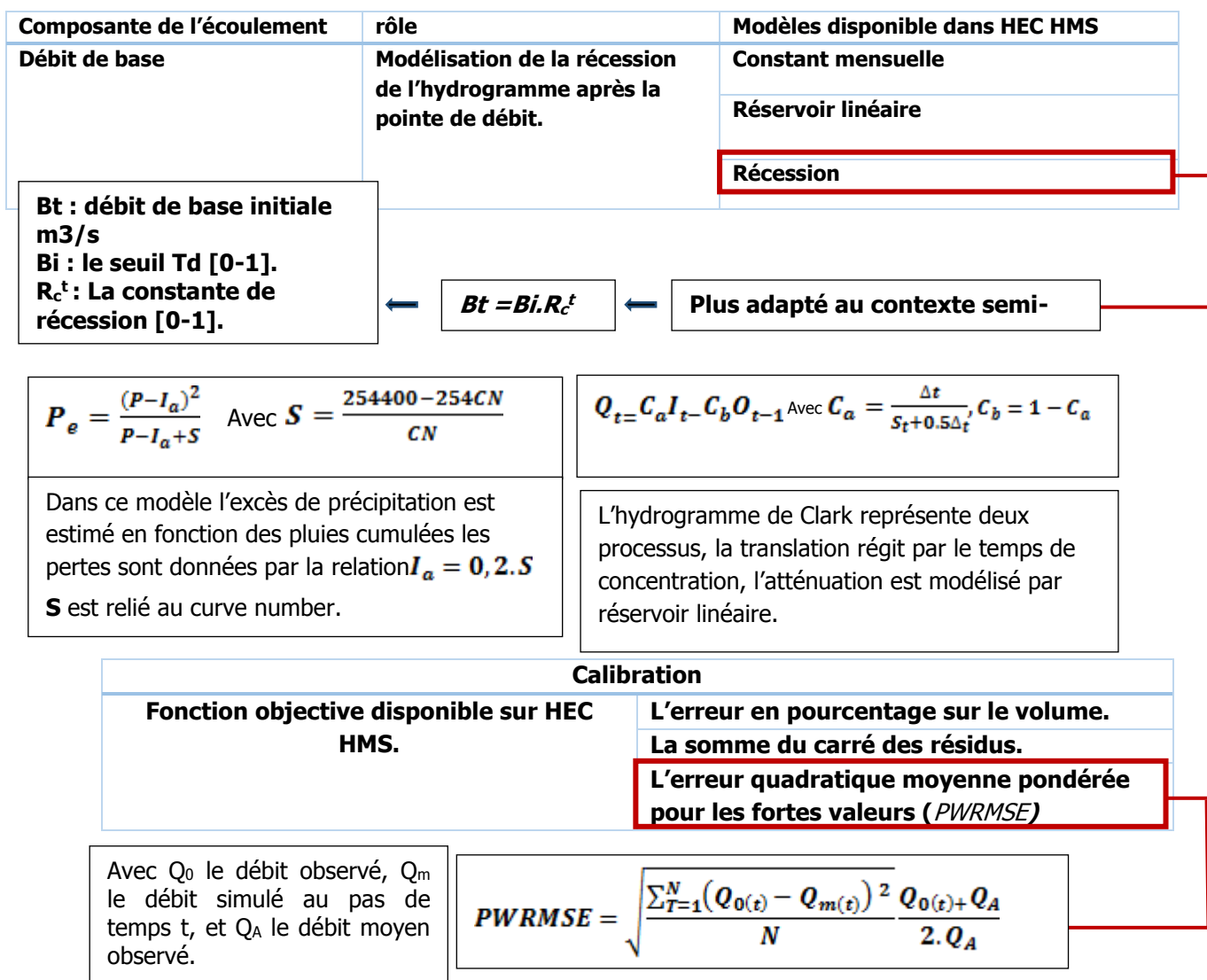


Figure 4 : la figure montre les différentes méthodes choisies pour simuler le débit à l'exutoire, la méthode de récession pour simuler l'écoulement de base, la méthode de SCS curve number pour l'estimation des pertes, pour l'analyse de sensibilité on a choisi la méthode quadratique moyenne pondérée.

L'évapotranspiration était calculée par la méthode du bilan du thornthwaite et intégré dans le modèle par la méthode de la moyenne mensuelle. L'analyse de sensibilité sera portée sur les paramètres non mesurables sur terrain de la fonction de production, de transfert et de débit de base, à citer : Le Curve Number, le temps de Lag, l'abstraction initiale et Impervious, sachant qu'il faut définir une marge de variation pour obtenir des valeurs compatible avec les caractéristiques du bassin versant.

GR4j : Le modèle hydrologique sera représenté à GR4j par la moyenne des précipitations journalières des stations « Bni haitem », « Bab marzouka », « Bab chhoub », « Zrarda », la moyenne des débits journaliers de la station « Idriss premier », et par l'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode du Turc à partir des températures moyennes journalières de la station de Bab marzouka.

2.4 Calibration : Le calage du modèle consiste à déterminer, sur une gamme de données précise, la valeur des paramètres optimaux qui permet de réduire le maximum possible la différence entre l'hydrogramme observé et celui simulé par le modèle.

HEC HMS : Pour y procéder, La simulation a été réalisée sur une période de quatre ans, en adoptant la méthode du gradient uni-varié qui permet d'ajuster, à la fois un paramètre en tenant compte des autres constante, en faisant varier, les paramètres jusqu'à l'obtention de la marge d'erreur optimale et une valeur rationnelle du paramètre à calibrer (Tab. 4).

Tableau 4 : le tableau montre les différents paramètres utilisé pour le calage.

Fonction	Paramètres optimisés
Débit de base	La constante de récession Le seuil Td
Fonction de production	Numéro de la courbe de ruissèlement (CN).
Fonction de transfert	Temps de concentration Le coefficient de Storage

GR4j : Le calage consiste à faire varier les quatre paramètres journalier jusqu'à l'obtention de la bonne valeur du coefficient de Nash.

2.5 Evaluation de la qualité des modèles : Pour satisfaire les différents objectifs, plusieurs critères d'évaluation ont été développés, qui sont, soit des critères graphiques, soit des critères analytiques. Les plus utilisés en modélisation hydrologique sont [16] sont les erreurs quadratique moyenne, l'écart arithmétique moyenne. La comparaison entre la performance des deux modèles sera basé sur le coefficient de Nash, Ce critère, noté NTD, varie entre $-\infty$ et 1. Il tend vers 1 lorsque le débit calculé tend vers le débit observé. Une valeur du critère négative indique que le modèle donne des résultats moins bons que l'utilisation de la moyenne de l'échantillon [17], Il est donné par la formule suivante [18]

$$NES = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{mean})^2} \quad (1)$$

Avec, Q^{mean} est débit moyen observé, Q^{sim} est le débit calculé, Q^{obs} est le débit observé, n est le nombre d'observation. Cette formule traduit un certain rendement du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression. On considère, généralement, qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables, si la valeur du critère de Nash est supérieure à 0.5 [19] (Tab. 5).

Tableau 5 : Critères d'évaluation des simulations [20]

NASH	Evaluation de la performance
$0.75 < N \leq 1.00$	Très bonne
$0.65 < N \leq 0.75$	Bonne
$0.5 < N \leq 0.65$	Satisfaisante
$N \leq 0.50$	Non satisfaisante

2.6 Validation des modèles : La validation vise à tester la capacité du modèle à reproduire les événements hydrologiques en lançant une nouvelle simulation sur un nouvel échantillon de données, tout en gardant la valeur des paramètres obtenus lors de la calibration.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC HMS):

4.1.1. Calage :

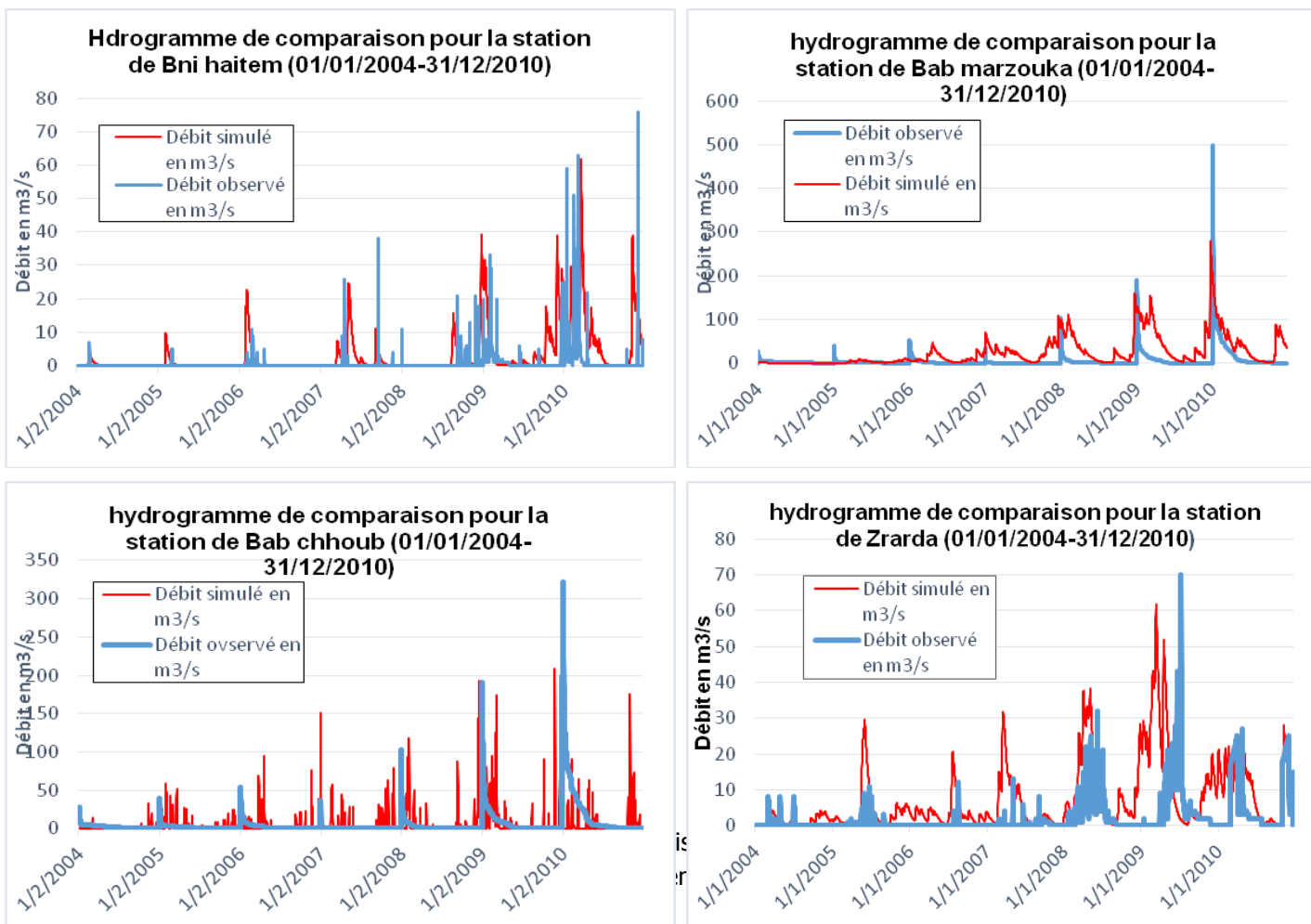


Tableau 6 : le tableau montre le Résultats du calage du modèle pour la période(2004-2010).

Station	Numéro de la courbe	Temps de concentration (h)	Coefficient de Storage (h)	Constante de récession
Bni haitem	60.09	8.09	6	0.09
Bab Marzouka	35.84	3.48	2	0.90
Bab chhoub	60.00	5.09	2	0.20
Zrarda	70.92	2.06	4	0.09

La constante de récession représente le taux de décroissance du débit de base, la valeur de 0.9 signifie qu'en absence de précipitation, le débit provenant de l'écoulement de base à un instant donné représente 90% de la valeur observée. Une valeur du seuil Td de 0,1 signifie que le ruissellement direct prend fin après que le débit ait diminué jusqu'à une valeur de 10 % du débit de pointe atteint auparavant.

La valeur du numéro de la courbe varie de 30 à 100, plus le numéro de la courbe est élevé plus le sol est imperméable par exemple la valeur de 60 signifie qu'après l'attient de l'abstraction initial le ruissèlement est important.

3.1.3. Validation : Pour valider le modèle, les paramètres retenus sont fixés lors du calage pour chaque station et la simulation est relancée, en mode continue, sur une période de deux ans 01/01/2011- 01/01/2013.

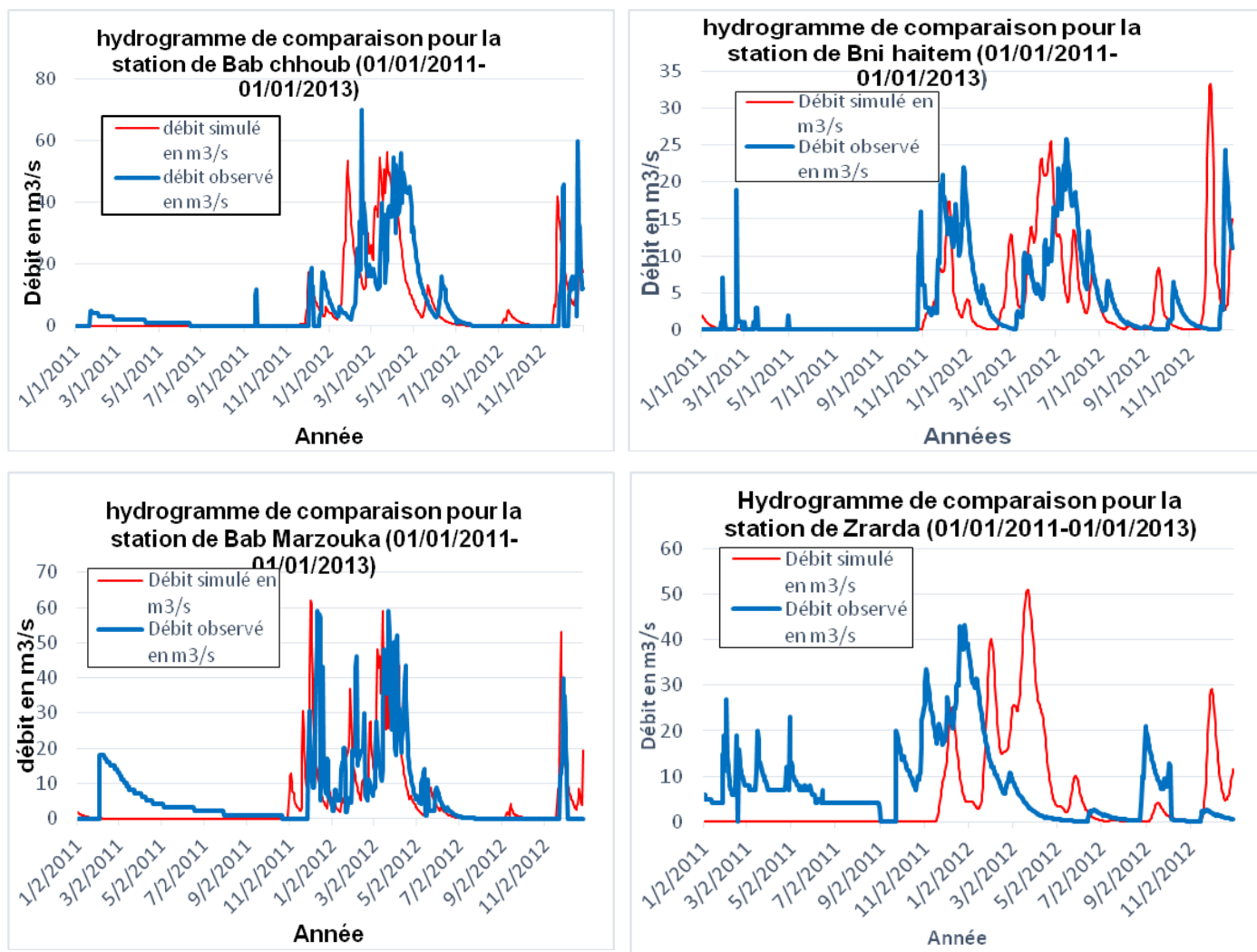


Figure 8 : les graphes montrent Hydrogramme de comparaison entre le débit observé dans les stations de contrôles et celui simulé par le modèle, pour les stations Bni Haitem, Bab Marzouka, Bab Chhoub, Zrarda (01/01/2011 à 31/12/2013).

La forme des deux courbes (Débits simulé et observé) au niveau des stations Bab Marzouka et Bab Chhoub est sensiblement la même, avec une coïncidence des temps de montée des crues aussi bien au niveau de la simulation que dans l'hydrogramme mesuré. Par contre, au niveau de la station Zrarda, le modèle sous-estime et décale les débits par rapport à la réalité, quant à la station de Bab Chhoub, le modèle reproduit presque les mêmes pointes mais avec un décalage dans le temps.

3.1.4. Caractéristiques de l'hydrogramme après la validation :

Tableau 7 : Le tableau montre les résultats relevés par le modèle après le calage.

Station	Observé		Simulé	
	Le débit de pointe	Le temps de pointe	Le débit de pointe	Le temps de pointe
Bni Haitem	25.9	21/04/2012	30	17/05/2012
Bab Chhoub	70	18/01/2012	62.2	17/02/2012
Bab arzouka	59	03/12/2012	62	01/12/2011
Zrarda	50	28/11/2012	43.2	21/03/2012

Le modèle a pu reproduire presque les mêmes pointes avec un léger décalage dans le temps. Sur la base de la simulation présentée, des conclusions peuvent être établies :

Grâce aux paramètres d'estimation des pertes (numéro de la courbe) et les paramètres de transfert (hydrogramme unitaire de Clark), le modèle peut simuler le transfert de pluie en débit. Le calage permet d'estimer certains paramètres non mesurables sur le terrain comme le numéro de la courbe, le coefficient de Storage et le temps de concentration. D'après les critères de performance, le modèle présente les caractéristiques suivantes :

- Surestimation et parfois sous-estimation des débits ;
- Décalage par rapport au temps d'apparition de la pointe ;
- Conservation de l'allure de l'hydrogramme (valeurs faibles dans le cas des étiages et valeurs élevées en période de crue).

3.2. GR4j :

3.2.1. Calage du modèle :

Tableau 8 : Le tableau montre les périodes de calage.

N° de la Période	Date de simulation	Fonction
1	01/01/2005-31/12/2006	Calage
2	01/01/2007-31/12/2008	Calage
3	01/01/2009-31/12/2010	Calage

Période2: 01/01/2007-31/12/2008

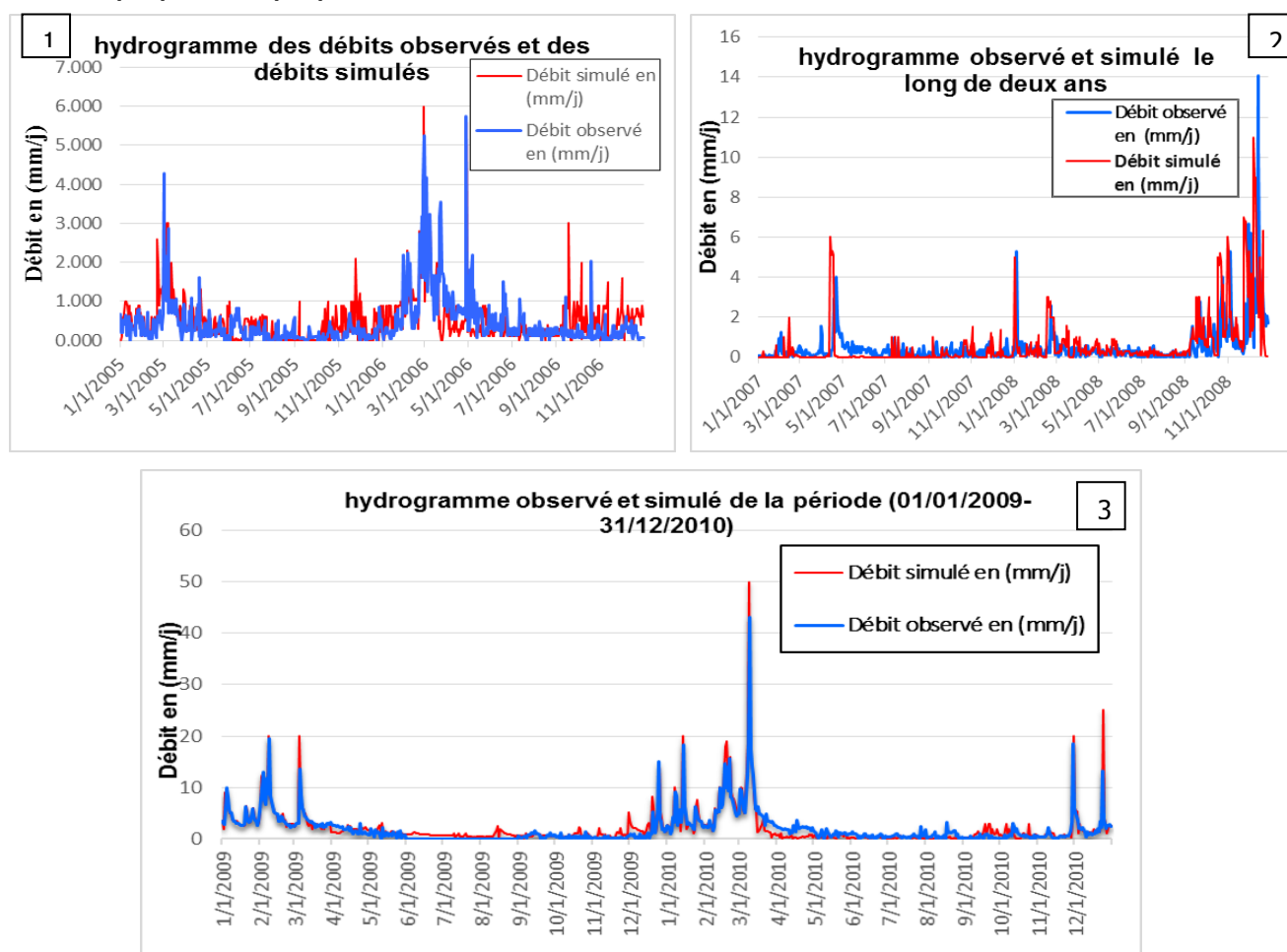


Figure 9 : les graphes montrent Hydrogramme de comparaison entre le débit observé pour les périodes 1, 2 et 3.

3.2.2. Validation :

N° de Période	Date de simulation	Fonction
1	01/01/2011-31/12/2012.	Validation
2	01/01/2013-31/12/2014.	Validation

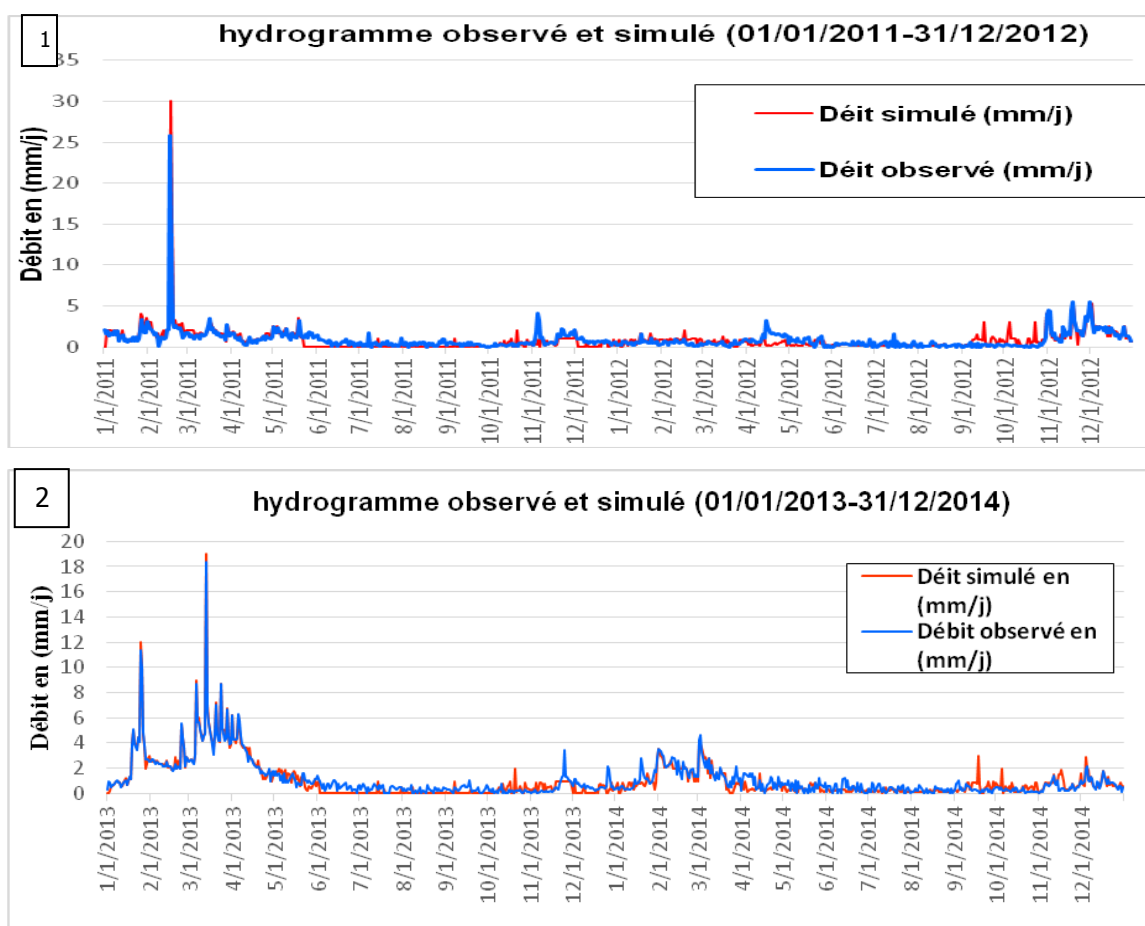


Figure 10 : les graphes montrent Hydrogramme de comparaison entre le débit observé pour les périodes 1 et 2.

Lors du calage, les paramètres les plus sensibles représentent la capacité maximale du réservoir de production (X1) et la capacité du réservoir du transfert (X3).

Les valeurs assez élevées de X1 veulent dire que le modèle force le bassin à avoir une importante capacité de production, alors que les valeurs de X2 qui varient entre 0.009m et 4.2m traduit la variabilité de l'écoulement entres les différents épisodes de simulation, La valeur de X3 reflète la relation entre la nature de l'évènement hydrologique et la capacité de simulation du modèle. Le X4 traduit le délai de temps entre l'apparition des précipitations et l'arrivée de l'eau à l'exutoire.

Tableau 10 : Paramètres retenus lors de la simulation pour les périodes de calage et de validation.

	Critères						
	Période de simulation	X1	X2	X3	X4	Nash%	R ²
Calage	01/01/2005-31/12/2006	-7.3	-4.6	5.5	2.01	53.6	0.5
	01/01/2007-31/12/2008	-8.25	-3.96	6.23	2.20	71.3	0.66
	01/01/2009-31/12/2010	-9.08	-4.2	6.40	2.05	79.2	0.89
validation	01/01/2011-31/12/2012	-10.10	-4.56	6.50	2.31	87.5	0.83
	01/01/2013-31/12/2014	-10.36	-4.70	6.66	2.40	85.1	0.91

Pour comparer les deux modèles, le critère de Nash sera la base pour la prise en compte.

N.B : le coefficient de Nash pour HEC HMS correspond à la moyenne obtenue pour les quatre stations (Bni Haitem, Bab Marzouka Bab Chhoub, Zrarda.

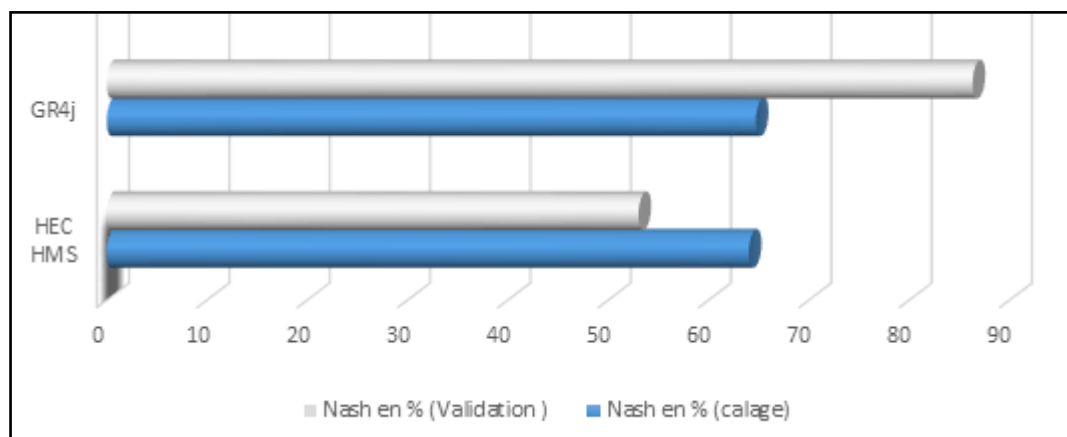


Figure 11 : Graphe de comparaison de coefficient de Nash pour les trois modèles.

La comparaison est basée sur les résultats du coefficient de Nash, (2005-2009) pour le calage et (2012-2013) pour la validation.

Le graphe montre que le modèle distribué HEC HMS est moins performant par rapport aux modèles globaux GR4j. Après plusieurs essais du calage, les trois modèles hydrologiques ont été obtenus, HEC HMS est un modèle distribué qui comporte un nombre important de paramètres à calibrer, ainsi les résultats obtenus pourraient être améliorés avec la qualité des données.

On peut résumer les avantages et les inconvénients de ces modèles comme suit :

Le GR4j est un modèle global qui a abouti à de bons résultats, l'allure de l'hydrogramme simulé suit parfaitement celle observée, mais il ne prend pas en compte la variabilité physico-chimique du bassin.

On peut résumer les avantages et les inconvénients de ces modèles comme suit :

HEC HMS :

- Prise en considération des caractéristiques physiques du bassin ;
- Collecte et préparation de la base de données fastidieuse ;
- Nombreuses difficultés rencontrées lors de la préparation du bassin par HEC GEO HMS ;
- Sur-paramétrage et donc difficulté lors du calage.

GR4j :

- Modèle global qui ne prend pas en compte les caractéristiques physiques du bassin.
- Faible nombre de paramètres donc facilité du calage
- Permet de reproduire parfaitement le débit observé
- Nombre limité des périodes de simulation en deux ans.

4. CONCLUSION

Le modèle continu à pas de temps journalier qui a été développé sur HEC HMS, a permis de reproduire les fluctuations des débits sur une période de 5 ans (2004-2009), le calage du modèle a permis d'estimer les valeurs de certaines paramètres non mesurables sur terrain comme le numéro de la courbe, l'abstraction initiale, le débit de base...etc. La validation du modèle à porter sur la période de (2010-2013), d'après le coefficient de Nash, les résultats de la simulation ont été satisfaisants pour certains sous bassins, mais ils pouvaient être améliorés avec la qualité et la disponibilité des données.

Le deuxième modèle hydrologique a été représenté sur GR4j par la moyenne des débits, des précipitations et d'évapotranspirations journalières, des stations « Bab Marzouka », « Bni Haitem », « Bab Chhoub », « Zrarda », la simulation a porté sur une période de 5 ans (2005-2009), la validation sur 4 ans (2010-2014).

L'examen de la performance de ces deux modèles a permis de tirer les conclusions suivantes :

HEC HMS est un modèle semi-distribué qui permet de simuler les débits à l'exutoire du bassin, en prenant en compte ces caractéristiques physiques et morphométriques, en effet grâce à l'extension HEC GEO HMS, le bassin est subdivisé en sous bassin, et chacun d'eux est considéré comme homogène. HEC-HMS nécessite de nombreuses données pour un calage optimal du fait de la quantité de paramètres à régler.

Le modèle GR4J avec lequel il est associé, est un modèle empirique global qui ne fait pas appel aux équations physiques. Il simule le bassin en résolvant des équations souvent différentielles ordinaires qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale des processus, des conditions aux limites, des entrées et des caractéristiques géométriques du système, donc ces modèles empiriques cherchent à reproduire le comportement global du bassin à partir d'une étude systémique de la relation pluie/débit à l'échelle du bassin, sans intégrer les processus du cycle hydrologique.

Cette étude peut faire suivre à d'autre étude sur les changements climatiques et de l'impact de l'urbanisation sur le régime hydrologique du bassin versant.

Sur le plan d'aménagement, il est recommandé d'intégrer plus de station de contrôle de débit à différent endroit du bassin versant vue le caractère hétérogène de la topographie et adopter une approche rationnelle pour la gestion des risques des inondations et l'exploitation des eaux du barrage Idriss premier.

5. REFERENCES

- 1 : Sibari H., Haida S., and Ait fora A. Etude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant méditerranéen exemple du bassin versant d'Innaouène Maroc. *Revue marocaine de génie civil*. 2001 ;09-10. Available: <https://iahs.info/uploads/dms/13702.82-447-453-54-308-ElGarouani.pdf>
- 2 : Société d'étude technique et d'ingénierie, haute commissariat aux eaux et forêt de la lutte contre la désertification, direction régional des eaux et forêt du nord EST-Taza. Rapport d'aménagement anti érosif du bassin de l'Oued Innaouène, partie méthodologie (2011), page 3 et 5.
- 3 : Naoura J. Caractérisation hydrologique et qualitative des eaux de surface du bassin versant du haut Innaouène, Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Fès. 2011.
- 4 : El Garouani. A. Variabilité climatiques et ressources en eau dans le bassin versant de l'oued Innaouène (Nord du Maroc), *revue scientifique et techniques*. 2014 LJEE N° 24&25. Available: <https://iahs.info/uploads/dms/13702.82-447-453-54-308-ElGarouani.pdf>
- 5 : Colo G. Contribution à l'étude du jurassique du Moyen Atlas septentrional. *Notes et Mém. Serv.Géol.Maroc*. 1961. (139) :226. Available: <https://nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/1340e635-c2a7-47bc-b786-6d32cd0913bb>
- 6 : Scharffenber, W., Ely, P., Daly, S., Fleming, M., and Plak, J. 2010 Hydrologic modeling system (HEC HMS): physically based simulation component, 2nd joint Federal Interagency conf., Las Vegas, NV, Available: https://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/4F_Scharffenberg_02_24_10.pdf
- 7 : USER'S Manuel HEC, (2002). Guide de HEC HMS, detailed description of each of major modeling compents, and how to view graphical and tabular output. Available: <https://fr.scribd.com/doc/58118664/Guide-Hecras-V31>
- 8 : Abood, M. T. Impact of Infiltration Methods on the Accuracy of Rainfall-Runoff Simulation. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology* . 2010 4(12): 1708-1713, ISSN: 2040-7467.
- 9 : Arcelus A. Coupling two hydrological models to compute runoff in ungauged basins. Rincón 575 2do Piso. C.P. 11000 Montevideo, Uruguay . 2013 Available: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/encuen/arcelus.pdf>
- 10 : Jeníček, M. (2007). Effects of land cover on runoff process using SCS CN method in the upperChomutovka catchment. In Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation 24-26 September. Remote Sensing Department. University of Trier, Trier. s. 42-46. Available: http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/doc/publ_004.pdf
- 11 : Motevalli, S. H. Assessing the Effects of Land use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2012 6(8): 510-519.. ISSN 1991-8178.
- 12 : Taha A. E., (2003). La prédiction du comportement hydrologique du bassin Awage en utilisant le modèle WMS (Watershed Modelling System). Publi. N° 278, 2003.
- 13 : Trambly Y. (2012). Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine. Rapport interne de l'ABH de Loukous. Maroc. 34p. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-11/010057516.pdf
- 14 : Andreressian et al. 2006. modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, UR Hydro- systèmes et Bioprocédés, 9 https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Modeles_GR_Resume.pdf
- 15 : Boudahraa, H. Modélisation pluie - débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisie: Association d'approches directe et inverse. Thèse de Doctorat, Université 7 novembre Carthage (Tunisie). 2007.
- 16 : Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, données pluviométriques des stations Bab Marzouka, Tissa, Bni Haitem, Bab Chhoub, Zrarda (1967-2014).
- 17 : Chlouchi, H. Modélisation événementielle pluie-débit du bassin versant d'Ain-Aicha (Au milieu de la chaîne rifaine du Maroc) par le logiciel HEC-HMS, Mémoire de master en sciences de technologies et d'espace. 2017.

- 18: NASH, J. S. (1970). River flow forecasting through conceptuel models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 1970 (10):282-290. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>
- 19: Gaume, E. (2009). Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation pluie-débit. Master2 Sciences et Génie de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 86 p.
- 20: Moriasi, D. N. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *Trans. ASABE*, 50(3), 885, 900. <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>

Citer cet article : Zineb MOUMEN, Abdessamad JALOUNI, Farah EL HASSANI, Abderrahim LAHRACH et Abdel-Ali CHAOUNI. ÉTUDE COMPARATIVES DU MODELE SEMI-DISTRIBUE HEC HMS AVEC LE MODELE GLOBAL GR4J APPLIQUEE AU BASSIN VERSANT D'INNAOUENE (MAROC). *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2017; 5(4): 260-273.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>