Afrique SCIENCE *13(3) (2017) 308 - 316*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info

Réadaptation des formules empiriques utilisées pour le calcul des débits de crues de projet pour les sous bassins non jaugés du bassin de Tensift, Maroc

Jihane AHATTAB[1*], Najat SERHIR[2] et El Khadir LAKHAL[1]

[1] Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Département de physique, BP 2390, Marrakech, Maroc
[2] Ecole Hassania des Travaux Publics, Département Hydraulique, Environnement et Climat, Km7 Route El Jadida, Casablanca, Maroc

* Correspondance, courriel : *jihaneahattab@gmail.com*

Résumé

Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques se base sur un paramètre clé qui est la crue de projet. Selon les données disponibles dans le bassin, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Le but de ce travail est la réadaptation des méthodes empiriques employées pour estimer les débits des crues de projet pour les bassins non jaugés, dans le but d'avoir un dimensionnement plus sécurisé des ouvrages hydrauliques dans le bassin de Tensift.

Mots-clés : *réadaptation dimensionnement, crue de projet, ouvrage hydraulique, formule empirique, basin de Tensift.*

Abstract

Readaptation of the empirical methods used for estimating floods peaks for ungauged basin in the Tensift basin, Morocco

Sizing hydraulic structures is based on a key parameter which is flood peak. Depending on the available data, a variety of methods can be used for estimating this parameter. The purpose of this work is the readaptation of empirical methods used for estimating flood peaks for ungauged basin of the Tensift basin. The aim is to have a more secure design of hydraulic structures.

Keywords : *readaptation, sizing, flood peaks, hydraulic structure, empirical method, Tensift basin.*

1. Introduction

Le Maroc présente un contexte hydrologique sévère et connait beaucoup d'épisodes de crues qui se sont amplifiés ces dernières décennies à cause des changements climatiques [1]. Les événements extrêmes récents ont eu des répercussions catastrophiques sur les structures comme la rupture des ouvrages hydrauliques (dalots, ponts, buses), la dégradation des chaussées et routes et le dépassement des capacités des ouvrages d'assainissement [2]. Parmi les épisodes les plus désastreux, on cite la crue de la vallée

d'Ourika dans le bassin versant du Haut Atlas de Marrakech le 17 août 1995 qui a causé plus de 230 morts et 500 disparus. Ou encore les crues de 2010 sur la ville de Casablanca et ses régions qui ont causées des dommages matériels s'élevant à 1.386 million de Dirham. On cite aussi les crues de Novembre 2014 qui se sont abattues sur les régions de Sud du Maroc et qui ont causées beaucoup de dégâts humains et matériels [3, 4]. Tous ces événements ont montré la fragilité et l'incapacité des ouvrages hydrauliques dimensionnés avec des méthodes non adaptées [2]. L'objectif dans ce travail est de rendre le calcul du débit de crue de projet plus précis à travers la réadaptation des méthodes de calcul aux événements récents vécus au cours des deux dernières décennies. L'article met l'accent sur les méthodes empiriques utilisées pour les bassins non jaugés pour lesquels les données hydro-pluviométriques sont non disponibles.

2. Méthodologie

2-1. Caractérisation du bassin de Tensift et détermination des zones homogènes

2-1-1. Présentation du bassin de Tensift

Le bassin versant du Tensift est situé au centre Ouest du Maroc entourant la région de Marrakech. Ce large domaine continental est situé entre la latitude 32°10' et 30°50' Nord et les longitudes 9°25' et 7°12' Ouest. Le bassin a une surface d'environ 19750 km^2 et est drainé par l'oued de Tensift qui s'écoule de l'Est vers l'Ouest sur une longueur de 260 km. Le climat est aride à semi aride en général et humide dans l'Atlas et le littoral. La pluie moyenne annuel est de l'ordre de 200 mm dans les plaines et dépasse 800 mm dans les hautes altitudes de l'Atlas [2].

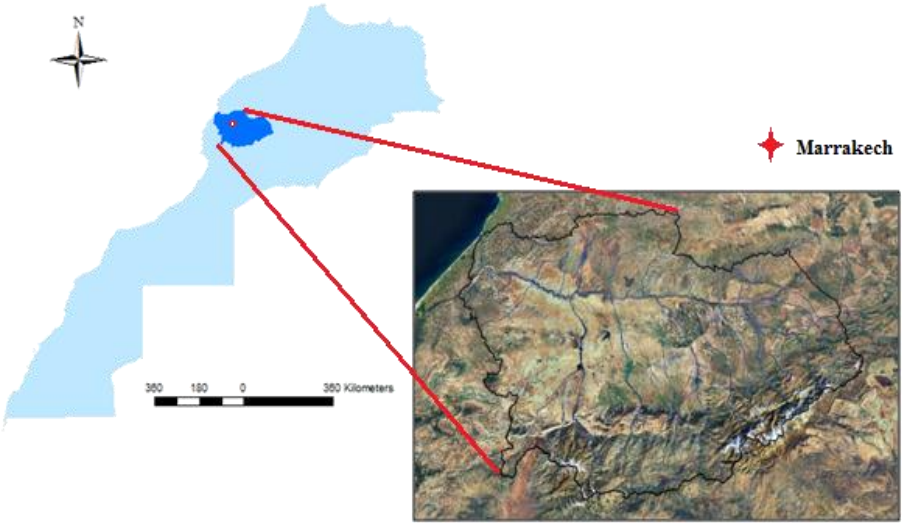

Figure 1 : *Emplacement du bassin de Tensift*

2-1-2. Calcul des paramètres des sous basins

La détermination des paramètres caractéristiques des sous bassins de Tensift et de son réseau d'écoulement est nécessaire pour de la compréhension de la réponse hydrologique de chaque sous bassin par rapport aux événements pluviométriques qu'il reçoit. Dans ce sens, le modèle numérique de terrain MNT issu de la mission SRTM [5], a été traité par l'extension ArcHydro du logiciel ArcGIS [6]. L'utilisation des systèmes d'information géographiques (SIG) a permis de délimiter 19 sous bassins et de calculer avec précision et d'une façon plus

fine les paramètres nécessaires pour la caractérisation à savoir : les surfaces, les périmètres, les altitudes caractéristiques (moyenne, médiane, max, min et le mode), les longueurs caractéristiques, les pentes moyennes de l'écoulement et les temps de concentration. Ce travail a montré une grande hétérogénéité du bassin et l'impossibilité d'utiliser les mêmes paramètres pour tout le bassin versant de Tensift.

2-1-3. Détermination des zones homogènes

La détection des zones homogènes constitue une étape préliminaire afin d'obtenir un découpage du bassin de Tensift en zones homogènes, à l'intérieur desquelles le comportement hydrologique est similaire et dans lesquelles on peut utiliser la même méthode de calcul des crues de projet avec les mêmes paramètres régionaux spécifiques. La régionalisation permet aussi de consolider les données d'un site dans lequel les données sont insuffisantes ou inexistante en utilisant les données d'autre site qui est hydrologiquement comparable. La méthodologie utilisée est décrite dans la référence [7]. Elle consiste à utiliser l'analyse en composantes principales ACP sur les séries des précipitations mensuelles enregistrées au niveau des 23 stations pluviométriques, à l'aide du logiciel SPSS (longueur des séries de 14 ans à 44 ans) et de la compléter par une analyse basée sur d'autres paramètres aussi importants hydrologiquement, à savoir : L'occupation du sol, la géologie, la pédologie, la végétation et les pentes des sous bassins. Ce travail a identifié quatre régions homogènes qui correspondent à trois groupes homogènes de stations pluviométriques ***(Figure 2)***.

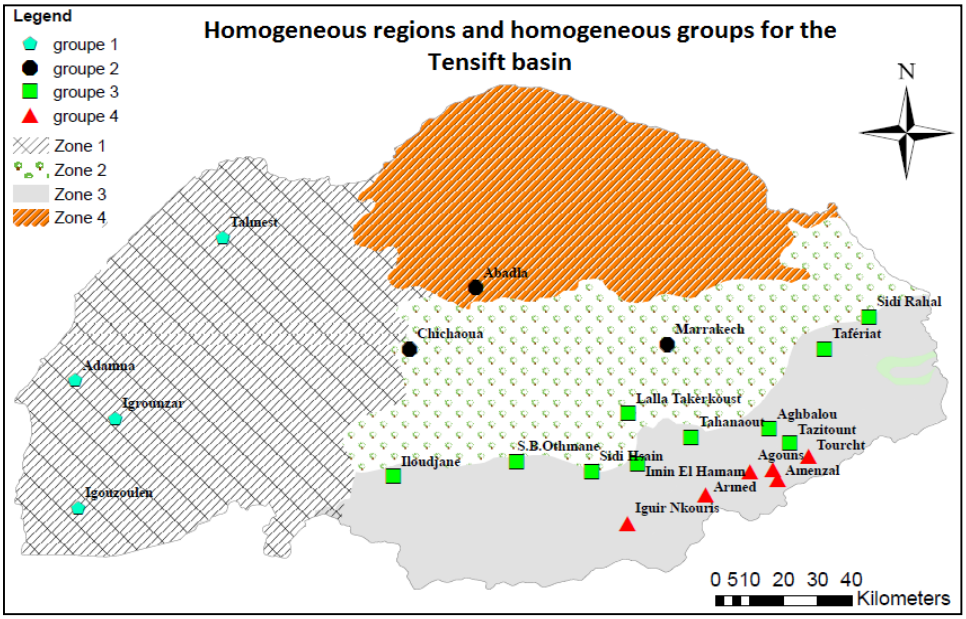

Figure 2 : *Cartes des régions et des groupes homogènes du bassin de Tensift* [7]

2-2. Réadaptation des méthodes de calcul des crues de projet pour le bassin de Tensift

Une multitude de méthodes d'estimation des crues de projets existent et sont utilisées dans le but de dimensionnement des ouvrages hydrauliques en génie civil (barrages, ponts, ouvrages de franchissement routier, réseaux d'assainissement, etc.). Ces différentes méthodes peuvent être classées en trois grandes familles à savoir : les méthodes statistiques, les méthodes hydrométéorologiques et les méthodes empiriques. Les méthodes empiriques sont utilisées lorsqu'on ne possède que peu ou pas de données sur les débits des crues dans une région (bassin non jaugé). Des formules sont établies pour de nombreux cours d'eau et dans divers pays, permettant d'estimer soit des débits maximums de crues soit des débits fréquentiels à partir de certaines caractéristiques du bassin versant en les complétant parfois par certaines données

météorologiques en particulier la pluviométrie. Toutes ces formules contiennent des paramètres régionaux qui ne peuvent être utilisés que pour le bassin ou le contexte pour lesquels ils étaient établis. L'utilisation de ces formules pour le calcul des débits des crues de projet doit respecter les conditions d'utilisation pour éviter une mauvaise estimation pouvant entraîner des répercussions de sur ou sous dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Pour ces raisons on a réadapté les formules les plus utilisées au Maroc. Les paramètres de ces formules ont été calculés pour les différentes zones homogènes du bassin de Tensift ***(Figure 2)***. La réadaptation s'est basée sur les débits de crue de projet issus de l'étude statistique réalisée sur les débits max jour observés car ils sont de ce fait, considérés comme les plus fiables. Les données utilisées sont les séries des débits max instantanés dont la taille varie de 17 ans à 43 ans et qui s'étalent jusqu'à 2011. Les résultats des lois retenues par l'analyse statistique sur les séries des débits max instantanés enregistré au niveau de 15 stations hydrométriques sont résumés dans le ***Tableau 1*** [2].

Tableau 1 : *Récapitulatif des lois d'ajustement retenues par l'étude statistique* [2]

Station hydrométrique	Taille	Loi d'ajustement retenue	Test de Khi-deux *
Tafériat	43 ans	Log Normal 2 paramètres	Positif à 5 %
Aghbalou	35 ans	Log Normal 2 paramètres	Positif à 5 %
Adamna	35 ans	Log Pearson type III	Positif à 5 %
Tahanaout	43 ans	Log Normal 2 paramètres	Positif à 5 %
IguirNkouris	31 ans	Gamma / Log Pearson type III	Positif à 5 %
Imin El Hamam	39 ans	Gamma	Positif à 5 %
Sidi Hsain	17 ans	Gamma	Positif à 5 %
Abadla	34 ans	Weibull	Positif à 5 %
Igrounzar	30 ans	Gamma	Positif à 5 %
Sidi Bou Othmane	21 ans	Gamma	Positif à 5 %
Chichaoua	34 ans	Pearson type III	Positif à 5 %
Iloudjane	30 ans	Pearson type III	Positif à 5 %
Sidi Rahal	40 ans	Exponentielle	Positif à 5 %
Talmest	34 ans	Exponentielle	Positif à 5 %
Zelten	30 ans	Exponentielle	Positif à 5 %

** Le test de Khi-deux est proposé par Karl Pearson (1900). Il est utilisé pour mesurer le degré d'ajustement des séries aux lois de probabilité.*

3. Résultats

Cinq des formules les plus utilisées au Maroc ont été réadaptées :

3-1. Formule de Myer

La formule de Myer permet de calculer le débit de crue de projet pour un bassin urbain ou rural donné. Le débit de la crue de projet pour la période de retour T se calcule par la ***Formule*** suivante :

$$Q_{max}(T) = K \times A^{n} \quad (1)$$

Q_{max} (T) étant le débit de la crue de projet de période de retour T en m³/s, K la cote de Myer fonction des caractéristiques du bassin, A la surface du bassin versant en km² et n le paramètre régional compris entre 0,4 et 0,8 [9].

Pour pouvoir adapter cette formule on a utilisé le modèle général de la régression linéaire simple en introduisant une transformation logarithmique. Pour tester le degré d'ajustement du modèle, on a utilisé le coefficient de corrélation de Pearson R^2 (1896) qui traduit la proportion de variance expliquée par le modèle. Plus la proportion est élevée (proche de 1), plus le modèle est puissant. L'inverse est aussi vrai. On a trouvé que les meilleures valeurs calculées du coefficient de corrélation sont trouvées pour la zone 3 située dans le moyen et le haut Atlas au sud du bassin. Ce qui peut indiquer que la formule de Myer s'adapte mieux aux zones de moyennes et hautes altitudes (supérieures à 600 m). Pour le bassin de Tensift les valeurs des paramètres K et n de la formule de Myer varient pour le bassin de Tensift comme montré dans le ***Tableau 2***.

Tableau 2 : *Recommandations pour l'utilisation de la formule de Myer formula pour le bassin de Tensift*

Zone	K	Période de retour	R^2	Pluviométrie annuelle mm / an	Altitude
Zone 3	$Q_{max} = 75.1 * S^{0,253}$	10 ans	0,786	> 150	> 600
	$Q_{max} = 115.6 * S^{0,236}$	20 ans	0.700		
	$Q_{max} = 184.3 * S^{0,215}$	50 ans	0.649		
	$Q_{max} = 250.5 * S^{0,201}$	100 ans	0,600		

3-2. Formule de Francou-Rodier

[10] ont classé plusieurs centaines de crues dans le monde dans un diagramme log Q = f (log A). Ils ont constaté que dans des régions relativement homogènes, les points étaient plus ou moins alignés. Ils en ont déduit une ***Formule*** générale de la forme :

$$Q_{max}(T) = 10^6 \left(\frac{A}{10^8}\right)^{1-K/10} \quad (2)$$

$Q_{max}(T)$ étant le débit de la crue de projet de période de retour T en m^3/s, A la surface du bassin versant en Km^2 et K un paramètre régional qui peut être déterminé pour un bassin jaugé similaire régional et utilisé pour le bassin étudié.

La même démarche utilisée pour la formule de Myer peut être réappliquée pour le modèle linéarisé. Les valeurs calculées du coefficient de corrélation sont très proches pour les trois groupes. Ce qui peut indiquer que la ***Formule*** de Francou-Rodier s'adapte bien aux zones de faibles, moyennes et hautes altitudes. On retient que pour le bassin de Tensift, les valeurs du paramètre K de la ***Formule*** de Francou-Rodier varient pour les différentes zones homogènes du bassin de Tensift comme le montre le ***Tableau 3***.

Tableau 3 : *Recommandations pour l'utilisation de l'utilisation de la formule de Francou-Rodier*

Zone	Période de retour	K	R^2	$K_{moyenne}$
Bassin de Tensift	10 ans	1.8 à 2.2	71 % à 79 %	2
	20 ans	2.2 à 2.5	70 % à 72 %	2.4
	50 ans	2.6 à 2.7	70 %	2.7
	100 ans	2.8 à 2.9	65 % à 69 %	2.9

Une valeur moyenne de K peut être utilisée pour les différentes zones du bassin de Tensift.

3-3. Formule de Fuller

La formule de Fuller permet l'estimation des débits de crues de projet de période de retour T pour un bassin urbain ou rural donné, en utilisant la relation suivante [11] :

$$Q_{max}(T) = q(1 + a.\log T) \quad (3)$$

$Q_{max}(T)$ étant le débit de la crue de projet pour la période de retour T en m^3/s, q la moyenne des débits maximas de chaque année en m^3/s pour toutes les années de mesure disponibles, a un facteur régional et T la période de retour en années.

Un changement de variable permet de faire correspondre la formule au modèle de régression linéaire simple. La même approche précédemment utilisée peut être appliquée. Les coefficients de corrélation calculés permettent de déduire que la formule de Fuller est plus à préconiser pour des périodes de retour T supérieures à 20 ans ($R2 > 90$ %). On retient que pour le bassin de Tensift, les valeurs du paramètre a de la formule de Fuller varient pour les différentes zones homogènes du bassin de Tensift comme l'indique le ***Tableau 4***.

Table 4 : *Recommandations pour l'utilisation de la formule de Fuller pour le bassin de Tensift*

Zone	Période de retour	a	R^2	Pluviométrie annuelle (mm / an)	Altitude (m)
Zone 1	10 ans	2.6	0.828	100 - 150	< 300
	20 ans	3.0	0.927		
Zone3	50 ans	5.6	0.636	> 150	> 600
	100 ans	5.8	0.708		

3-4. Formule de Mallet-Gauthier

La formule de Mallet-Gauthier permet l'estimation des débits de crues de période de retour T pour un bassin donné. Sa forme générale s'écrit par [9] :

$$Q_{max}(T) = 2.K.\log(1 + aH).\frac{A}{\sqrt{L}}.\sqrt{1 + 4.\log(T) - \log(A)} \quad (4)$$

$Q_{max}(T)$ étant le débit de la crue de projet pour la période de retour T en m^3/s, K un coefficient variant de 0,5 pour les grands bassins versants à faible pente à 5 pour les petits bassins versants à forte pente, a un coefficient géographique variable entre 20 et 30 (au Maroc est pris égal à 20), H le module pluviométrique annuel moyen dans le bassin versant en m calculé à partir des hauteurs de précipitations annuelles aux différents postes pluviométriques internes et externes du bassin versant (polygone de Thiessen ou moyenne arithmétique), A la superficie du bassin versant en Km^2, L la longueur du Talweg principal en Km et T la période de retour en années.

A noter que cette ***Formule*** n'est pas linéaire et ne peut être transformée en modèle linéaire simple. Pour cela, on a utilisé la régression non linéaire à l'aide du logiciel SPSS. Le calcul des valeurs des paramètres se fait par itérations successives. La solution est basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt, [12]. Le coefficient de corrélation R^2 ne peut être utilisé dans ce cas pour juger le degré d'ajustement du modèle [13]. Cependant les valeurs trouvées des paramètres a et K pour les trois zones ne s'éloignent pas des valeurs recommandées (K varie entre 0.5 et 5, et a varie entre 20 et 30 avec au Maroc on prend souvent $K = 2$ et $a = 20$). Elles apportent beaucoup plus de précision compte tenu de la connaissance fine acquise sur les sous bassins versants. Les ***Tableaux 5 et 6*** récapitulent les valeurs recommandées des paramètres K et a pour le bassin de Tensift.

Tableau 5 : *Recommandations pour l'utilisation du paramètre K de la formule de Mallet-Gauthier pour le bassin de Tensift*

Zone	K	Période de retour
Tensift basin	1.05	10 ans
	1.5	20 ans
	1.7	50 ans
	1.9	100 ans

Tableau 6 : *Recommandations pour l'utilisation du paramètre a de la formule de Mallet-Gauthier pour le bassin de Tensift*

Zone	a T = 10 ans	A T = 20 ans	a T = 50 ans	a T = 100 ans	Précipitation annuelle mm / an
Zone1	34	30.3	28	22	100-150
Zone 2	33.2	31.7	22.2	31.6	<100
Zone 3	36	31.6	22.9	20	>150

3-5. Formule de Mac-Math

Cette ***Formule*** a été élaborée à partir des observations faites sur la région sud de la Californie où les terres sont arides. Elle permet de calculer le débit de la crue de projet de période de retour T par la ***Formule*** :

$$Q_{max}(T) = K * P(24h, T) * A^{0,58} * I^{0,42} \quad (5)$$

$Q_{max}(T)$ étant le débit de la crue de projet pour la période de retour T en m^3/s, A la superficie du bassin versant en km^2, I la pente moyenne du bassin versant en m / m, P (24, T) la précipitation maximale moyenne de durée 24 h de période de retour T en mm. Elle est calculée par ajustement statistique sur la base des P_{maxj} aux différents postes de pluie disponibles et K un coefficient dépendant du couvert végétal et de la topographie [14].

On suit la même démarche pour la ***Formule*** Mallet-Gauthier que celle adoptée pour la formule de Mac-Math. Les valeurs trouvées du coefficient K pour différentes périodes de retour et pour les trois zones homogènes sont résumés dans le ***Tableau 7***.

Tableau 7 : *Recommandations pour la formule de Mac-Math pour le bassin de Tensift*

K	Période de retour	Contexte du bassin
0.31 0.35 0.38 0.41	10 ans 20 ans 50 ans 100 ans	• Terre cultivé et terrain vague avec des pentes et des altitudes faibles inférieures à 300 m. • Bassin versant caractérisé par des pentes moyennes et des altitudes modérées inférieures à 600 m.
0.37 0.43 0.49 0.53	10 ans 20 ans 50 ans 100 ans	• Bassin versant de grande dimension avec grande hétérogénéité. • Bassin versant caractérisé par des pentes aigues et des altitudes élevées supérieures à 600 m.

4. Discussion

Les corrélations établies ont permis de conclure sur les formules à recommander pour chaque zone homogène du bassin de Tensift et les périodes de retour préconisées pour chacune. En effet, nous avons obtenu les résultats suivants :

- La formule de Myer est plus adaptée dans le cas de région de moyennes et hautes altitudes (supérieures à 600 m), de pluviométrie annuelle supérieure à 150 mm ;
- La formule de Francou-Rodier s'adapte bien aux zones de faibles, moyennes et hautes altitudes et peut être utilisée dans un bassin dont le relief est hétérogène ;
- La formule de Fuller s'adapte mieux aux zones de faibles altitudes (inférieures à 300 m) pour des périodes de retour supérieures ou égales à 50 ans ;
- La formule de Mallet Gauthier peut être utilisée pour les altitudes qui varient de faibles à très hautes ;
- La formule de Mac-Math peut être utilisée pour des périodes de retour allant de 2 ans jusqu'à 100 ans. Son coefficient K augmente avec la période de retour mais aussi avec la pente et la nature du terrain.

Pour juger les résultats obtenus par les formules réadaptées, on a calculé les débits des crues de projet pour différentes périodes de retour et on les a comparés à ceux calculés par les formules non réadaptées. La ***Figure 3*** montre les résultats trouvés pour la période de retour de 10ans pour 6 sous bassins versants. On remarque que les formules réadaptées donnent des débits plus importants. Ceci peut être expliqué par le fait que les formules réadaptées se basent sur des événements extrêmes récents vécus enregistrés au niveau des stations hydrométriques. On conclue alors que l'utilisation de ces dernières pour le calcul des débits de projet donnera un dimensionnement plus sécurisé des ouvrages hydrauliques.

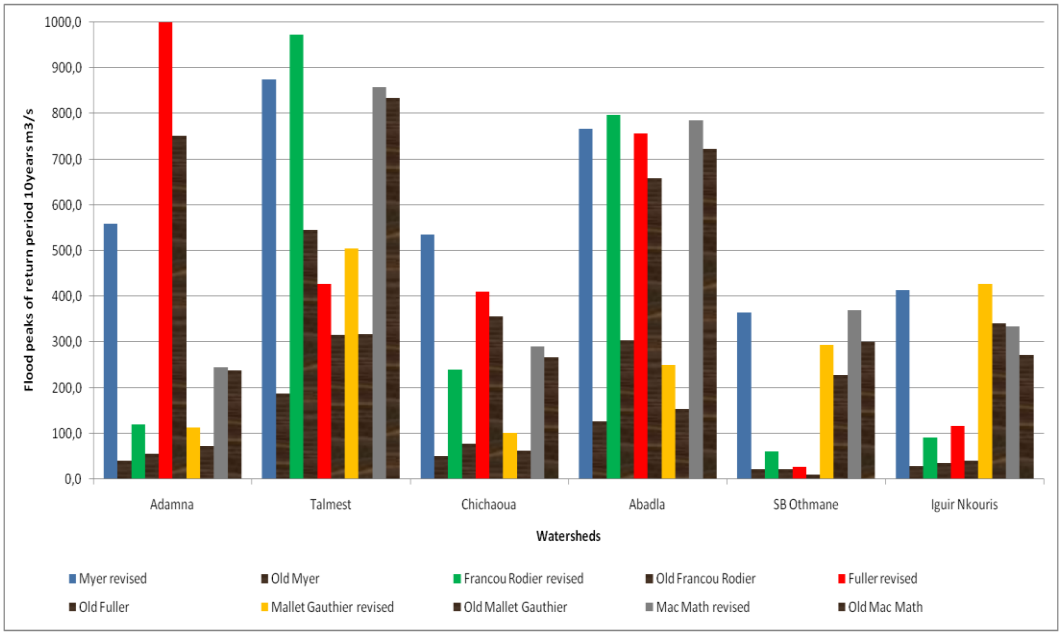

Figure 3 : *Comparaison des débits de crues de projet calculés pour la période de retour de 10 ans par les formules révisés et non révisés pour six sous basin versants de Tensift*

5. Conclusion

Ce travail a permis de réadapter cinq des formules empiriques les plus utilisées au Maroc pour le calcul de la crue de projet pour les bassins non jaugés à savoir : la formule de Fuller, la formule de Myer, la formule de Francou Rodier, la formule de Mac-Math et la formule de Mallet- Gauthier. Les paramètres régionaux qui interviennent dans ces formules ont été recalculés sur la base des données récentes enregistrées. Les corrélations établies ont permis de déduire des recommandations pour leurs utilisations selon la période de retour, les zones homogènes et la nature du sol. Une comparaison entre les résultats des formules réadaptées et celles non réadaptées a permis de conclure que l'utilisation de celles réadaptées permettra un dimensionnement plus sécurisé des ouvrages hydrauliques. Le travail effectué pour le bassin de Tensift fourni une méthodologie à adopter pour d'autres bassins du Maroc ou ailleurs afin d'avoir un dimensionnement plus sécurisé des ouvrages hydrauliques.

Références

[1] - R. BOUAICHA & A. BENABDELFADEL, Variabilité et gestion des eaux de surface. Secheresse en ligne. - Maroc, Vol. 21, N° 1 (2010)

[2] - J. AHATTAB, N. SERHIR & E. K. LAKHAL, Vers l'élaboration d'un système d'aide à la décision pour le choix des méthodes d'estimation des débits max des crues : réadaptation aux données hydrologiques récentes. *La Houille Blanche,* (2015) 63 - 70

[3] - SEEE Secrétariat d'état chargé de l'Eau et de l'Environnement Etude de la stratégie nationale de l'eau [Report]. - Rabat : *SEEE*, (2009)

[4] - LEMAG, (Décembre2010). *Lemmag.ma : le quotidien maghrébin*. sur http://www.lemag.ma / (Consulté en Septembre 2012)

[5] - A. JARVIS, H. I. REUTER, A. NELSON & E. GUEVARA, *Hole-filled seamless SRTM*. Récupéré sur http://srtm.csi.cgiar.org, (2008)

[6] - ESRI, *Arc Hydro Geoprocessing Tools.* New York : ESRI, (2011)

[7] - J. AHATTAB, E. K. LAKHAL & N. SERHIR, Determination of homogenous regions in the Tensift basin (Morocco). *Int. Journal of Engineering Research and Applications,* 5 (6) (2015b) 17 - 21

[8] - J. AHATTAB, N. SERHIR & E. K. LAKHAL, Vers l'élaboration d'un système d'aide à la décision pour le choix des méthodes d'estimation des débits max des crues : réadaptation aux données hydrologiques récentes. *La Houille Blanche*, (2015) 63 - 70

[9] - A. COUTAGNE, Méthodes pour déterminer le débit de crue maximum qu'il est possible de prévoir pour un barrage et pour lequel le barrage doit être établi. *Quatrième congrès des grands barrages,* New Delhi, (1951) 687 - 711

[10] - J. FRANCOU & J. A. RODIER, Essai de classification des crues maximales. Dans Les crues et leur évaluation (Vol. I). AIHS, (1969)

[11] - W. E. FULLER, Flood flows. Dans *Trans.Soc.Civ.Eng*, Vol. LXXVII, (1914)

[12] - K. LEVENBERG, A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, (1944) 164 - 168

[13] - SPIESS, A. NIKOLAI & N. NEUMEYER, An evaluation of R2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research : a Monte Carlo approach, (2010)

[14] - T. M. OUARDA, H. GINGRAS, B. BOBEE & M. LEMONIER, Synthèse des méthodes simples de régionalisation. Québec : INRS-Eau, (2001)