

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

Jihane AHATTAB¹, Najat SERHIR², El Khadir LAKHAL¹

¹ Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc.- e-mail : jihaneahattab@gmail.com

² Département HEC, Ecole Hassania des Travaux Publics, Maroc - e-mail: najatserhir@gmail.com

RÉSUMÉ. – Le Maroc de part sa situation géographique connaît beaucoup d'épisodes de crues, qui se sont amplifiées ces dernières décennies à cause des effets de changements climatiques, induisant beaucoup de dégâts humains et matériels. Ainsi le but du présent travail est la réadaptation des méthodes d'estimation des débits max des crues utilisés pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques à la lumière des nouvelles données hydro pluviométriques extrêmes observées. Cela en vue de la création d'un Système d'Aide à la Décision (SAD) pouvant aider les ingénieurs à choisir la méthode d'estimation des débits max des crues la mieux adaptée selon l'ouvrage hydraulique à dimensionner et les données disponibles.

L'article décrit la méthodologie de réadaptation des méthodes sur l'exemple du bassin de Tensift.

Il s'agit en premier lieu de caractériser le bassin et de calculer ses paramètres structurels et morphologiques. La deuxième étape est l'identification des groupes homogènes avec un comportement climatique similaire pour lesquels un même modèle d'estimation des crues peut être utilisé. Ainsi l'analyse en composantes principales sur les précipitations mensuelles a permis de retenir quatre groupes homogènes.

La troisième étape consiste à fiabiliser et régionaliser les méthodes usuelles d'estimation des débits max des crues à savoir les méthodes statistiques et hydrométéorologiques, dont la méthode du Gradex et méthodes empiriques.

Un schéma d'un système d'aide à la décision (SAD), sous forme d'une plateforme informatique est proposé.

Mots-clés : Crues, estimation des débits, réadaptation des formules, dimensionnement des ouvrages hydrauliques, SAD, Tensift.

Towards elaboration of a Decision Support System for selection of methods to evaluate flood peaks in Morocco: Readaptation of classic methods to recent hydrological data

ABSTRACT. – Located in North West of Africa, Morocco suffers from floods that became more frequent and amplified during last decades due to climate changes. This has caused a lot of human and materiel losses. So, the main goal of this study is to revise and readapt to recent and extreme hydro-pluviometric data, the methods employed to evaluate flood peaks used to design hydraulic structures. Final aim is to elaborate an interactive DSS to help engineers select the method of the peak discharge assessment best adapted to a given structure and to the available data.

The paper describes the methodology of the selection on the example of Tensift basin in Morocco.

In first place the characteristic parameters of the basin were selected its structural and morphological parameters (slope, topography and flow parameters) calculated using Arcgis' extension Arhydro on SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) digital terrain model with a resolution of 90m of the selected area.

In second step principal component analysis of the series of monthly precipitation recorded at the 23 rainfall stations (with a common observation period of 15 years) spread across the Tensift watershed was carried out in order to identify homogeneous groups that can be considered to behave in a hydrologically similar fashion and for which we can use the same models for estimating flood peaks. This led to define four homogeneous groups.

The third step was to regionalize and revise in order to make them more reliable the usual methods used to estimate flood peaks aiming at more secure design of hydraulic structures: statistical methods and hydro meteorological methods including the Gradex method and empirical methods.

Finally a schematic concept of a decision making system (DSS) as an interactive informatics platform is proposed.

Key-words: Floods, readaptation, design of hydraulic structures, DSS, Tensift,

I. INTRODUCTION

Situé au Nord Ouest de l'Afrique, le Maroc se caractérise par un régime pluviométrique très variable qui fait qu'il y a beaucoup d'épisodes de crues et de sécheresse.

S'ajoutent à cela les effets des changements climatiques ces dernières décennies qui ont fait que le nombre et variété de ces épisodes se sont accrus, montrant la fragilité et souvent l'incapacité des ouvrages hydrauliques dimensionnés sur des événements passés. On arrive ainsi à la nécessité d'une

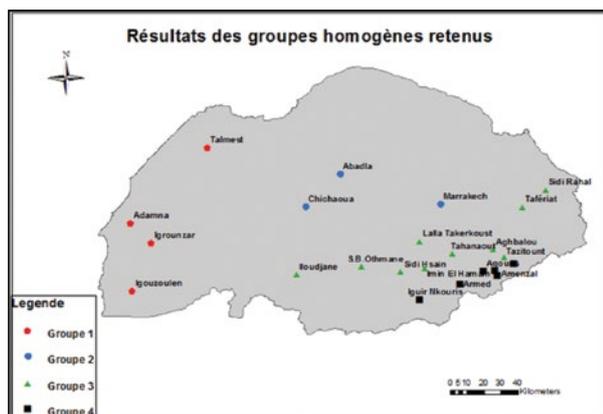


Figure 2 : Résultats des groupes homogènes retenus.

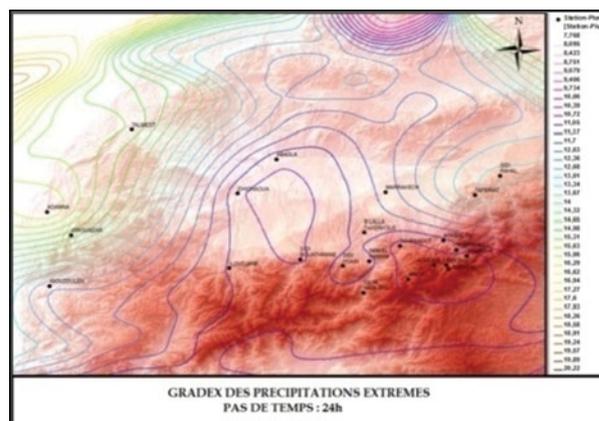


Figure 3 : Carte de modélisation du Gradex de pluie de 24 h.

dont l'altitude varie entre 250m et 600m. Le 3^{ème} groupe est dans la zone pré-Atlas avec des altitudes entre 600m et 1700m et le 4^{ème} groupe est dans la partie de haute montagne dont l'altitude dépasse 1700m caractérisée par ses pentes aigues et ses fortes précipitations.

IV. REVISION DES METHODES USUELLES D'ESTIMATION DES DEBITS MAX DES CRUES :

IV.1. Le Gradex

La méthode du Gradex consiste à calculer le ruissellement à partir de la pluie de même période de retour. C'est une méthode d'estimation des débits max des crues qui mesure l'augmentation du risque de fortes précipitations en fonction de la période de retour. Elle permet de déduire le comportement probabiliste de la série de débits à partir de l'information apportée par la loi de probabilité de la série temporelle de pluies pour les fortes valeurs observées. Or l'information de pluie observée se présente sous forme de valeurs ponctuelles qui permettent de calculer le Gradex au niveau des postes de mesure. La description de la méthode peut être trouvée dans [Guillot et Duband 1967] et dans (Comité Français des grands Barrages 1994)

Les stations pluviométriques étant plus nombreuses et avec des séries souvent plus longues mais pas forcément au même emplacement, nous avons utilisé la méthode de modélisation spatialisée qui est le krigeage, décrite dans [Baillargeon 2005] et dans [Hennequi 2010]. Nous l'avons appliqué sur les données ponctuelles de précipitations afin d'élaborer la cartographie du Gradex des pluies pour pouvoir extraire les valeurs de ce paramètre en tout point du bassin de Tensift. Ceci nous permet par la suite d'extrapoler la distribution de fréquence des débits max en tout point du bassin.

Ainsi nous avons élaboré la cartographie des valeurs du Gradex pour un pas de 24h (Figure 3), et une carte des erreurs standards de prédiction associées aux valeurs prédites du Gradex en chaque point du bassin de Tensift.

Le Gradex des débits, $G_d(T_c)$, pour le temps de concentration (Temps que met le ruissellement d'une averse pour parvenir à l'exutoire depuis le point du bassin pour lequel la durée de parcours est la plus longue.) est calculé à partir du Gradex des pluies jour, $G_p(24h)$, au niveau de chaque

section d'un cours d'eau par les équations (3) et (4). Ensuite le débit max est calculé par cette méthode pour différentes périodes de retour selon la démarche suivante:

$$Q_{max}(T) = G_d(T_c) \times (y(T) - y(T_s)) + Q(T_s), \quad (1)$$

Où $G_d(T_c)$: le Gradex du débit au temps de concentration T_c ,

$y(T)$: la variable réduite de Gumbel pour la période de retour T définie par [Gumbel 1956] :

$$y(T) = -\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - 1/T)), \quad (2)$$

$Q(T_s)$: le débit seuil de saturation considéré pour le bassin pour une période de retour T_s .

Par la suite pour pouvoir comparer les résultats trouvés par la méthode du Gradex avec les autres méthodes (statistiques et empiriques), nous avons calculé le Gradex des débits $G_d(T_c)$ au niveau de chaque station. Le débit de saturation a été calculé par la méthode statistique décrite dans le paragraphe IV.2 pour une période de retour de $T_s=10$ ans (comme recommandé par les auteurs de la méthode).

Le tableau suivant montre les valeurs trouvées respectivement pour :

T_c : le temps de concentration calculé par les formules empiriques les plus recommandées au Maroc : Giandotti, Turrazza, Ventura et espagnole. [Ouarda *et al.*, 2001]

$G_p(24h)$: Le Gradex des pluies de 24h qui est la pente de la droite d'ajustement de la loi Gumbel appliquée aux séries des pluies maximales jour observées.

On convertit le Gradex de pluie de durée 24h en un Gradex de pluie de n'importe quelle durée à partir de la formule régionale suivante [Comité Français des grands Barrages 1994].

$$P(T_c) = P(24h) * \left[\frac{T_c}{24h} \right]^k, \quad (3)$$

Une valeur de $k = 0.3$ est recommandée au Maroc.

Le Gradex de débit sur une durée égale à T_c représente la variation de l'écoulement obtenue à partir d'une variation de pluie de durée T_c au cours d'un écoulement intégral (au-delà des conditions de saturation du bassin).

Tableau 1 : Les valeurs des temps de concentration et des Gradex des débits correspondants au niveau des stations hydrométriques.

Station	Surface (Km ²)	Tc (h)	Gp (24h) (mm)	Gp (Tc) (mm)	Gd (Tc) (m ³ /s)
Taferiat	532	14	15.8	13.4	141.9
Aghbalou	503	11	10.3	8.2	103.5
Adamna	1612	38	20.55	23.6	277.9
Tahannaout	224	7	8.2	5.7	50.4
IguirNkouris	850	21	11.6	11.1	125.3
Imin El Hamam	1295	29	13.36	14.1	175.4
Sidi Hsain	103	6	12.7	8.4	40.0
Abadla	10309	185	9.33	17.2	266.5
Igrounzar	813	26	15.3	15.7	136.1
Sidi BouOthmane	516	12	10.3	8.4	99.9
Chichaoua	2127	43.4	9.42	11.3	153.2
Iloudjane	573	13	11.06	9.2	112.7
Sidi Rahhal	540	16	14.87	13.2	123.4
Talmest	19570	198.5	16.94	31.9	874.4

Ainsi le Gd(Tc) : Gradex des débits se calcule à partir de Gp(Tc) par [Comité Français des grands Barrages 1994] :

$$G_d(T_c) = G_p(T_c) * S_{\text{bassin}} / (T_c * 3.6), \quad (4)$$

Les valeurs trouvées du Gradex dépendent de la surface du bassin et du temps de concentration. Ce dernier est lié aux caractéristiques du bassin, en particulier la pente qui peut passer des valeurs faibles dans les zones de plaines aux valeurs assez élevées dans les zones de montagnes (moyen et haut Atlas).

IV.2. Les méthodes statistiques

L'analyse fréquentielle est un des outils privilégiés pour l'estimation des débits max des crues pour une période de retour donnée. Elle est utilisée lorsqu'on dispose de suffisamment de données hydrologiques en un site (bassin jaugé) et est basée sur des méthodes statistiques de prédétermination, consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus, afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

Cette prédétermination repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle probabiliste fréquentiel, qui est une loi de probabilité décrivant le comportement statistique d'un processus. Il s'agit d'un problème d'identification de modèle en se basant sur un principe d'optimisation. En fait, on essaie d'adapter un ou plusieurs modèles et de n'en retenir à

la fin que celui qui reproduit le plus fidèlement possible les données de l'échantillon.

Pour ce faire nous avons travaillé avec des débits max instantanés enregistrés au niveau de 15 stations hydrométriques en utilisant le logiciel « Hyfran Plus » [INRS-EAU, 1998] [El Adlouni et Ouarda 2008]. Cet outil permet de calculer les statistiques descriptives pour s'assurer de la stationnarité et de l'homogénéité de l'échantillon, définir la classe la plus probable à laquelle appartient la meilleure loi qui le représente, ajuster la loi aux données et s'assurer de la qualité de l'ajustement par l'application d'un test d'adéquation. (Tableau 2)

Les ajustements les plus adéquats retenus pour l'ensemble des stations de la zone d'étude permettent de conclure que les lois de probabilité qui représentent le mieux les échantillons des débits max instantanés aux différentes stations appartiennent aux classes C (distributions à variations régulières : Fréchet, Halphen B Inverse, Log- Pearson et Gamma Inverse.) ou E (loi exponentielle) [El Adlouni et Ouarda 2008]. Les lois Exponentielle et Log Pearson sont les plus représentatives à un seuil de confiance de 1 % à 5 %. Les résultats trouvés par zone homogène sont résumés dans le tableau suivant.

Contrairement à ce qui est souvent recommandé et qui consiste à utiliser la loi Gumbel pour ajuster les données hydrologiques maximales, nous avons obtenu par l'analyse fréquentielle faite à l'aide de Hyfran-Plus des lois différentes et des quantiles largement supérieurs à ceux calculés par la loi Gumbel.

Tableau 2 : Lois d'ajustement des débits max instantanés par groupe homogène.

Zone	Loi	Classe
Zone 1	Exponentielle	E
Zone 2	Exponentielle et Log Pearson	C et E
Zone 3	Log Pearson	C
Zone 4	Log Pearson	C

IV.3. 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. 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 fréquents à partir de certaines caractéristiques du bassin versant en les complétant parfois par certaines données météorologiques en particulier la pluviométrie.

Nous avons commencé à travailler avec deux des formules les plus utilisées au Maroc (formule de Myer et de Fuller) et nous avons essayé de trouver les valeurs de paramètres régionaux qui interviennent dans ces relations en fonction de différentes périodes de retour (10ans, 50ans et 100ans), en nous basant sur les débits des crues calculées par l'analyse fréquentielle appliquée aux débits max instantanés observées au niveau des stations hydrométriques.

IV.3.1. Formule de Myer :

La formule de Myer générale [Musy et Higy 1998] s'écrit de la forme suivante :

$$Q = A * S^n, \tag{5}$$

Où Q est le débit max de crue en m³/s et A et n sont des nombres en fonction des caractéristiques du bassin et S la surface du bassin en Km².

Le tableau suivant résume les relations trouvées pour trois périodes de retour (10 ans, 50 ans et 100 ans) et pour chaque groupe homogène défini précédemment (Figure 1)

D'après la littérature le coefficient de Myer varie entre 0.4 et 1 selon les régions marocaines et une valeur de 0.8 est souvent recommandée. Les résultats obtenus dans le bassin de Tensift montrent que ce coefficient varie entre 0.2 et 0.6 comme indiqué dans le Tableau 3.

Pour tester le degré d'ajustement du modèle, on se sert de la valeur de R² qui traduit la proportion de variance expliquée par le modèle :

$$R^2 = \frac{\text{Explication du modèle}}{\text{Variabilité totale}} = \frac{SC_M}{SC_T} \tag{6}$$

Où SCT : C'est la variance de la variable dépendante que nous cherchons à expliquer (Débit).

SCM : C'est la partie de la variance totale qui est expliquée par l'ajout d'un prédicteur, c'est-à-dire la variance des valeurs du débit prédites par le modèle. [Yergeau *et al.*, 2008].

Plus la proportion est proche de 1 (mais #1), plus le modèle est puissant.

On remarque ainsi que pour les zones 1 et 3, les relations trouvées expliquent une proportion de la variance qui varie de 27 % à 52.5 % selon les périodes de retour. Les valeurs de R² montrent que cette relation s'ajuste mieux pour les bassins du groupe 1 qui se caractérisent par des altitudes basses (moins de 300m), des pentes assez faibles, des formations perméables et une pluviométrie moyenne annuelle entre 100 et 150 mm.

En ce qui concerne les groupes 2 et 4 on ne peut conclure sur la validité de ces relations puisque 2 stations seulement ont été utilisées pour les établir (nombre de stations hydrométriques par groupe homogène insuffisant).

Nous pouvons par contre insister sur l'intérêt de :

— Travailler à l'échelle de sous bassins, le bassin global de Tensift étant très hétérogène, les corrélations obtenues y sont faibles.

— Travailler dans des bassins avec un nombre de stations hydrologiques plus élevé. De meilleurs résultats peuvent être obtenus avec un réseau hydrométrique plus dense et des séries de mesures plus longues.

Tableau 3 : Formule de Myer adaptée au contexte de Tensift pour différentes périodes de retour.

Groupes	Relation	Période de retour	Coefficient R²
Groupe 1	$Q = 68,37 * S^{0,246}$	10 ans	0,525
	$Q = 119,1 * S^{0,242}$	50 ans	0,521
	$Q = 134,82 * S^{0,241}$	100 ans	0,521
Groupe 2	$Q = 78,1 * S^{0,247}$	10 ans	1*
	$Q = 203,36 * S^{0,201}$	50 ans	1*
	$Q = 175,56 * S^{0,237}$	100 ans	1*
Groupe 3	$Q = 18,97 * S^{0,443}$	10 ans	0,271
	$Q = 13,957 * S^{0,612}$	50 ans	0,263
	$Q = 43,73 * S^{0,466}$	100 ans	0,481
Groupe 4	$Q = 0,403 * S^{1,068}$	10 ans	1*
	$Q = 2,927 * S^{0,868}$	50 ans	1*
	$Q = 5,55 * S^{0,797}$	100 ans	1*
Bassin entier	$Q = 65,95 * S^{0,266}$	10 ans	0,324
	$Q = 264,54 * S^{0,164}$	50 ans	0,210
	$Q = 226,33 * S^{0,209}$	100 ans	0,309

*La valeur de R² est égale à 1 puisqu'on ne dispose que de deux stations pour ce groupe.

IV.3.2. Formule de Fuller :

L'énoncé initial de la formule de Fuller [Fuller 1914] pour l'estimation des débits de crues de période de retour T est :

$$Q = q(1 + a \cdot \log T), \quad (7)$$

Où Q le débit max de crue en m³/s q la moyenne des débits maxima de chaque année en m³/s pour toutes les années de mesure disponibles et a un facteur régional et T la période de retour en année.

D'après la littérature [Ouarda *et al.*, 2001] le facteur régional a varié dans le cas du Maroc de 0,8 à 1,2 pour les oueds du Rif et de 3 à 3,5 pour les oueds sahariens.

Nous avons trouvé pour le bassin de Tensift des valeurs de ce coefficient qui varient entre 1.4 et 2.5 et nous notons que cet intervalle est inclus dans l'intervalle de référence. Il apporte par contre une précision plus fine par rapport aux groupes étudiés (Tableau 4).

En effet, les valeurs trouvées de R² montrent que les relations trouvées reproduisent mieux les débits observés pour le groupe 3 qui regroupe des bassins localisés dans la zone pré-Atlas avec des altitudes entre 600 m et 1700 m, des pentes moyennes, des formations peu perméables et une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 200 mm.

Les corrélations assez faibles peuvent être expliquées par les tailles grandes des sous bassins de Tensift en comparaison avec le nombre restreint des stations hydrométriques disponibles et par le caractère très simpliste de la relation empirique de Fuller qui ne tient pas en compte les vrais paramètres qui interviennent dans le processus complexe de génération de crues.

IV.3.3. Formules de Mallet-Gauthier :

Une autre formule empirique est aussi couramment utilisée au Maroc et va être par la suite révisée:

La formule de Mallet-Gauthier dont la forme générale s'écrit par : [Coutagne 1951] :

$$Q = 2.K.(\log(1 + aH)) \cdot \frac{S}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{1 + 4 \cdot \log(T) - \log(S)} \quad (8)$$

Où Q indique le débit maximal en m³/s pour la période de retour T, K le coefficient de 0,5 à 6 selon les caractéristiques du bassin versant (au Maroc est pris égal à 2), S la superficie du bassin en Km², L la longueur du Talweg principal en Km, T la période de retour en années, a un coefficient géographique variable entre 20 et 30 (au Maroc est pris égal à 20) et H le module pluviométrique annuel moyen en m.

IV.4. Comparaison entre les résultats des différentes méthodes

La Figure 4 montre les résultats du calcul des débits max de crues trouvés par les méthodes citées précédemment, pour différentes périodes de retour (10 ans, 50 ans et 100 ans) appliquées sur les 4 bassins versants qui appartiennent aux 4 groupes homogènes.

On constate alors que les deux méthodes empiriques de Fuller (Q^{fuller*} avec a = 0.8) et de Mallet-Gauthier (QMallet-Gauthier avec K = 2 et a = 20) sans révision, donnent les débits les plus faibles pour les 4 bassins.

Les autres méthodes (Fuller, Myer et statistique) révisées et basées sur les données hydrologiques récentes (de 1963 jusqu'à 2003) donnent des débits plus élevés, mettant en relief un gradient de variation bien marqué en fonction de la période de retour.

Nous soulignons alors l'intérêt de la réadaptation des formules empiriques sur la base des données récentes régionales.

V. SYSTEME D'AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX DE METHODES

Ce système d'aide à la décision se présentera sous la forme d'une plateforme informatique qui proposera et recommandera des méthodes d'estimation des crues extrêmes en fonction de :

- Caractéristiques générales de la région (bassin);
- Les données disponibles ;
- Type et structure de l'ouvrage hydraulique ;
- La période de retour préconisée ;
- Le risque hydrologique accepté

Le système se présentera sous forme d'une interface interactive dont les sorties sont en fonction des réponses de l'utilisateur. Ce dernier aura à choisir en premier lieu la taille du bassin entre 4 classes. Ensuite il doit choisir la nature du bassin (urbain ou rural), renseigner la disponibilité des séries de pluies et débits et leurs natures (maximales instantanées, maximales journalières ...) ainsi que leurs tailles (très courte < 5ans à longue >25ans).

La nature et type de l'ouvrage à dimensionner (barrage, ouvrage d'assainissement, pont...) et la période de retour de conception de la crue de projet ou du chantier (2 ans à 10000ans) représentent des inputs fondamentaux de ce SAD.

Le système pourra alors fournir aux ingénieurs une aide efficace, pour le choix des méthodes de dimensionnement des ouvrages hydrauliques, en leur recommandant la ou les méthodes à utiliser renforcées par des explications de la démarche à suivre si nécessaire (Figure 5).

Tableau 4 : Valeurs du paramètre régional a de la formule de Fuller

Groupe	a (T = 10 ans)	R ²	a (T = 20 ans)	R ²	a (T = 50 ans)	R ²	a (T = 100 ans)	R ²
Groupe 1	1.7	0.467	1.93	0.476	2.1	0.484	2.2	0.487
Groupe 2*	1.48	1	1.76	1	1.76	1	2.06	1
Groupe 3	1.4	0.840	1.8	0,835	2.2	0,714	2.5	0.571
Groupe 4*	1.67	1	2	1	2.2	1	2.46	1
Bassin entier	1.584	0.804	1.909	0.537	1.91	0.437	2.515	0.354

* La valeur de R² est égale à 1 puisqu'on ne dispose que de deux stations dans cette zone.

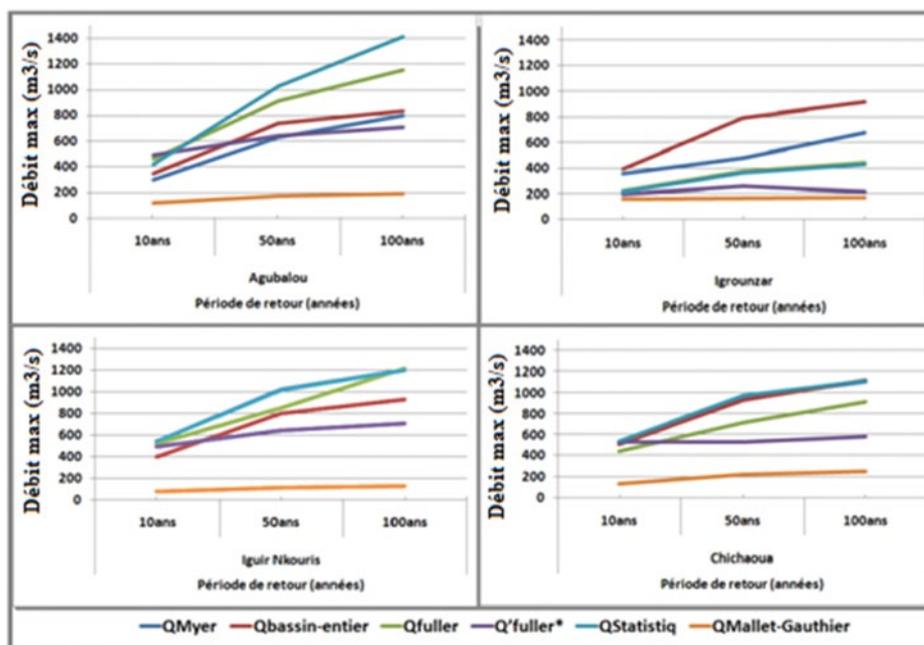


Figure 4 : Débits max calculés par différentes méthodes au niveau de 4 stations hydrométriques pour trois périodes de retour (10, 50 et 100 ans).

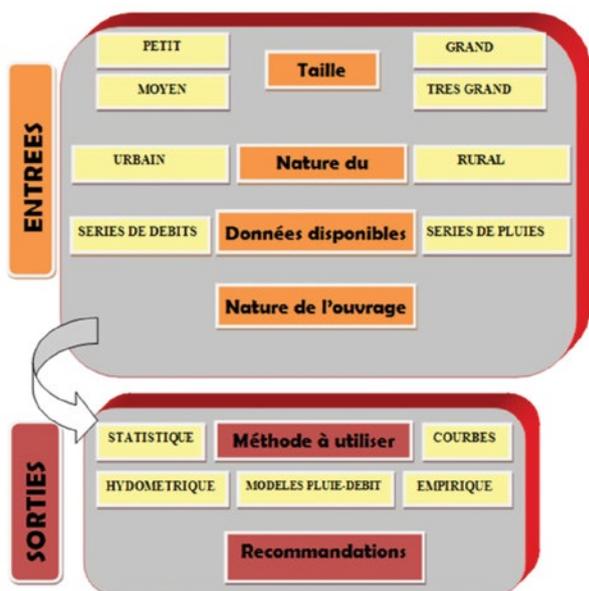


Figure 5 : Schéma de fonctionnement du SAD.

VI. CONCLUSION

Les épisodes de crues et les effets des changements climatiques ces dernières décennies ont montré la fragilité et souvent l'incapacité des ouvrages hydrauliques, donc une réadaptation des méthodes d'estimation des débits max des crues utilisés pour le dimensionnement de ces ouvrages s'impose.

L'estimation des débits max à l'aide des formules empiriques couramment utilisées au Maroc a donné des valeurs qui s'éloignent des valeurs calculées par la méthode statistique. Cette différence est due aux facteurs régionaux recommandés alors qu'ils sont calculés dans des contextes différents.

Ainsi nous avons recalculé ces facteurs régionaux pour différentes périodes de retour en nous basant sur les débits calculés à l'aide de l'analyse fréquentielle appliquée sur 15 stations hydrométriques dont les périodes d'observation varient de 16ans à 41ans. Ceci a permis de définir de nouveaux intervalles de variation pour ces facteurs (entre 0.2 et 0.6 pour le coefficient de Myer et entre 1.4 et 2.5 pour le coefficient de la formule de Fuller).

D'après les résultats des corrélations obtenues dans ce 1^{er} travail de révision, la méthode de Myer semble être à recommander plus pour les bassins perméables avec de faibles altitudes alors que la méthode de Fuller est à recommander pour des altitudes assez élevées et des terrains peu perméables. D'autres formules telles Mallet-Gauthier et autres vont être réadaptées au contexte du bassin étudié. On testera, validera et comparera les résultats sur des bassins similaires non jaugés.

La cartographie du Gradex des pluies max de 24h, que nous avons établie nous permet d'extraire les valeurs de ce paramètre en tout point du bassin de Tensift et par conséquent d'estimer le débit maximal de projet pour une probabilité de dépassement inférieure à 10^{-2} et ceux en toute section du cours d'eau du bassin étudié.

Cependant nous nous sommes confrontés au problème du nombre de stations hydrométriques insuffisant pour établir des corrélations statistiques de qualité. Nous pensons qu'une base de données hydro pluviométriques disponible et actualisée sur un réseau de mesure plus dense et avec une échéance de temps plus courte (moins que 24h) permettrait d'obtenir de meilleurs résultats.

VII. REFERENCES

ABHT (2007) — Atlas des zones inondables. Marrakech: Agence du Bassin Hydraulique de Tensift

- BAILLARGEON SOPHIE (2005) — Le krigeage : revue de la théorie et application de l'interpolation spatiale de données de précipitations. *Mémoire, Université Laval, Québec: Faculté des sciences et de génie*
- BOUDHAR A., ET AL. (2007) — Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION. *Sécheresse. octobre-novembre-décembre*
- COMITE FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES (1994) — Les crues de projet des barrages : méthode de Gradex. *Barrages et réservoirs. Novembre*
- COUTAGNE A. (1951) — 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. 687-711*
- EL ADLOUNI, SALAHEDDINE, AND TAHA OUARDA (2008) — Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire. *Journal of Water Science. 21(1) : 35-50*
- FULLER W. E. (1914) — Flood flows. *Trans. Soc. Civ. Eng. LXXVII : 1914*
- GUILLOT P., AND DUBAND D. (1967) — La méthode du Gradex
- GUIOT JOËL (1986) — Sur la détermination des régions climatiques quasi-homogènes. *Revue de la statistique appliquée. 15-34*
- GUMBEL E. J. (1956) — Méthode graphique pour l'analyse des débits de crue. *La Houille Blanche. 5 : 709-717*
- HENIA L., AND MEDJERAB A. (2005) — Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale. *Revue Géographique de l'Est. 45 (2)*
- HENNEQUI MARIE (2010) — *Spatialisation des données de modélisation par Krigeage. Mémoire, Université de Strasbourg*
- JARVIS, A, H I REUTER, A NELSON, AND E GUEVARA (2008) — "Hole-filled seamless SRTM." <http://srtm.csi.cgiar.org>. *International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)*
- JICA (2007) — Etude de plan de gestion intégrée des ressources en eau dans la plaine du Haouz. *Agence japonaise de coopération internationale, Japon: JICA, MATEE, ABHT*
- MAHERAS P., AND AL. (1991) — Analyse en composantes principales des précipitations en Albanie. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*
- MUSY ANDRE, AND CHRISTOPHE HIGY (1998) — *Hydrologie Appliquée. Bucarest: HGA*
- OUARDA T.B.M., GINGRAS H., BOBEE B., AND LEMONIER M. (2001) — Synthèse des méthodes simples de régionalisation. *Rapport de recherche, Québec: INRS-Eau*
- YERGEAU ERIC, POIRIER MARTINE, COUTURE MARC, AND POULIN YVES (2008) — *SPSS à l'UdeS* <http://pages.usherbrooke.ca/spss/> (accessed Août 2013)