

Prédétermination des Crues de L'oued Inaouène à L'Aide des Méthodes Statistiques, Maroc Septentrional

Hamouch Chakir
Chaaouan Jamal

Laboratoire Espace, Histoire, Dynamiques et Développement Durable
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n33p202](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n33p202)

Submitted: 11 August 2023
Accepted: 23 November 2023
Published: 30 November 2023

Copyright 2023 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Chakir H. & Jamal C. (2023). *Prédétermination des Crues de L'oued Inaouène à L'Aide des Méthodes Statistiques, Maroc Septentrional*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (33), 202. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n33p202>

Résumé

À l'instar des cours d'eau de la rive du Sud de la Méditerranée, l'oued Inaouène est soumis aux épisodes exceptionnels de pluies qui engendrent des crues plus ou moins dévastatrices. La séparation des crues des hautes eaux ordinaires est loin d'être évidente pour un régime méditerranéen en raison de la difficulté de tracer un seuillage pour des débits extrêmement variant dans le temps et dans l'espace. Le recours aux méthodes statistiques probabilistes a permis de pallier ce problème et d'estimer en conséquence les crues d'Inaouène pour différentes périodes de retour. La méthode statistique de GUMBEL a donné de meilleures estimations des crues fréquentes et habituelles, alors que la méthode GRADEX a bien permis de prédire les crues de fréquence rare à très rare dont l'effet est inestimable pour l'environnement et l'économie.

Mots-clés: Oued inaouène, crue, Gumbel, GRADEX, climat, Statistique

Prediction of Floods in the Inaouène River Using Statistical Methods in Northern Morocco

Hamouch Chakir
Chaaouan Jamal

Laboratoire Espace, Histoire, Dynamiques et Développement Durable
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc

Abstract

Like the rivers on the southern Mediterranean shore, the Oued Inaouène experiences exceptional rainfall episodes that lead to more or less devastating floods. Distinguishing between flood peaks and regular high-water levels is far from straightforward for a Mediterranean regime due to the challenge of establishing thresholds for flow rates that vary significantly in time and space. Using probabilistic statistical methods has helped overcome this issue, enabling the estimation of Inaouène's floods for different return periods. The statistical method of Gumbel provided better estimates for frequent and common floods, while the GRADEX method accurately predicted rare to very rare floods, which have immeasurable effects on the environment and the economy.

Keywords: Inaouene valley, flood, Gumbel, GRADEX, Climate, Statistic

1. Introduction

D'une superficie de 3710 km², au nord du Maroc, le bassin de l'oued Inaouène constitue l'un des principaux bassins-versants formant la haute vallée du Sebou. L'emplacement du bassin d'Inaouène est assez typique car son relief est formé à la fois par les affleurements de la chaîne rifaine et du Moyen-atlas. Le climat est de type méditerranéen semi-aride à subhumide. Les précipitations montrent une répartition temporelle avec une succession d'années sèches et d'années humides El Garouani et Tribak (2006). En réponse aux caractéristiques du climat semi-aride, le régime de l'oued Inaouène montre des variations saisonnières avec une période de crues et une période d'étiages El Garouani et Tribak (2006). Ce type de climat régnant sur le bassin est caractérisé par une grande variabilité pluviométrique rendant imprévisible les périodes de crues. Les cumuls pluviométriques exceptionnels que reçoit le bassin d'Inaouène pendant certaines périodes de l'année, accroissent les volumes d'eau en transit de manière extraordinaire et favorisent l'apparition des crues susceptibles de submerger, dans certains cas, le lit majeur de la plaine alluviale.

Selon les données climatiques de l'agence du bassin hydraulique du Sebou, le bassin d'Inaouène reçoit des précipitations moyennes annuelles variant entre 360 mm et environ 1100 mm. La moyenne de la lame d'eau précipitée est de l'ordre de 584 mm/m², l'équivalent de 58,4 millions m³ d'eau en an. Néanmoins, les pluies ne tombent pas de façon proportionnelle dans l'ensemble du bassin en raison de l'hétérogénéité orographique. Dans les parties montagnardes élevées, les précipitations reçues sont importantes, le cas pour le massif de Tazekka et à Bab Boudir où le total annuel est supérieur à 700 mm, voire à 900 mm et dans les montagnes de Tainaste au Prérif, entre 800 et 900 mm. En revanche, dans la basse vallée d'Inaouène les précipitations sont très faibles, inférieures à 500 mm.

La topographie du bassin est caractérisée par la dominance d'un relief accidenté, généralement collinaire, au nord, et montagnard, au sud du bassin. D'après les indices de pente utilisés, le système de pente du bassin d'Inaouène paraît généralement raid. L'accidenté du relief et la brutalité du système de pentes favorisent la transmission des eaux vers l'embouchure en entraînant des crues synchroniques et conséquentes à cause de l'effet de chasse d'eau.

La végétation est un facteur variable selon les saisons climatiques. Trois interventions majeures du couvert végétal sur le plan hydrologique : l'infiltration, l'interception et la transpiration. Généralement, la végétation est considérée comme facteur régulateur de l'écoulement fluvial car elle contribue à retenir l'eau pendant la phase humide et donc à la reconstitution des réserves hydriques qui soutiennent les cours d'eau pendant la phase d'étiage. Selon les cartes végétales de Direction Régionale des Eaux et Forêts, le taux de recouvrement forestier est un peu faible pour le bassin d'Inaouène (16 %). Cette surface est répartie essentiellement sur le Moyen-atlas et certaines zones dans le Prérif (Tainaste, Bab Mrouj,...) et elle est composée par les quercus (chênes) et les landes et aussi par les forêts artificielles (reboisement).

Géologiquement, le bassin d'Inaouène se situe à la jonction de trois grands domaines structuraux qui, du nord au sud, sont : le complexe pré-rifain méridional, le sillon Sud-rifain et le Moyen Atlas septentrional. Plusieurs formations se rencontrent au sein du complexe pré-rifain, les plus anciennes sont les formations triasiques, des marnes rouges associées à d'importantes masses de gypse blanc à rougeâtre.

Plus loin à l'extrémité Nord-est du bassin à Tainaste, des affleurements calcaires et dolomitiques du lias et crétacé supérieurs forment un relief rocheux appelé les *Sofs*, et qui constituent le contact avec le Rif Méridional. Ensuite, il y a les marnes blanches à silex de l'Éocène qui affleurent sous forme de klippes visibles au NW de Taza. Finalement il y a l'Oligocène, peu représenté, qui est formé de grès en gros bancs brun-roux Robillard (1978). Le détroit Sud-rifain comporte essentiellement des marnes miocènes discordances sur les structures moyen-atlasiques, au sud, et surmonté par le

Complexe pré-rifain, au nord (Leblanc, 1971, *in* Bouchta,1983). Le sillon renferme aussi des formations quaternaires (dépôts fluviaux de l'Oued Inaouène), qui s'organisent dans des terrasses fluviales.

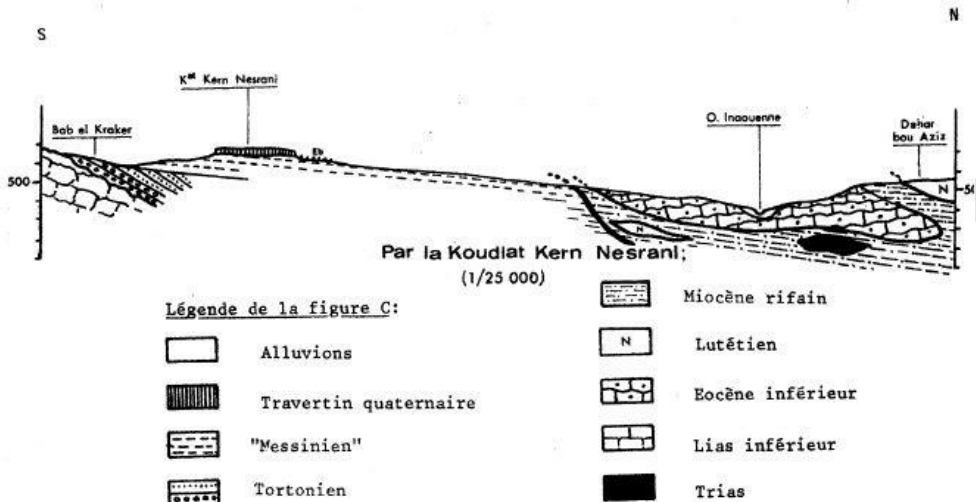


Figura 1. Coupe géologique dans le sillon sud-rifain (d'après Robillard, 1978)

Le Moyen-atlas est caractérisé par une structure diversifiée rassemblant à la fois les reliefs plissés, les structures sub-tabulaires et enfin par le massif primaire de Tazekka formé essentiellement par des schistes, des quartzites et des grès. Dans le côté du Moyen-atlas où l'ensemble structural plissé s'affronte avec la cause moyen-atlasique subtabulaire Robillard (1978), les formations liasiques constituent la majorité du terrain. Elles sont composées de marno-calcaires du Lias supérieur et de calcaires et dolomies dans le Lias Moyen et inférieur.

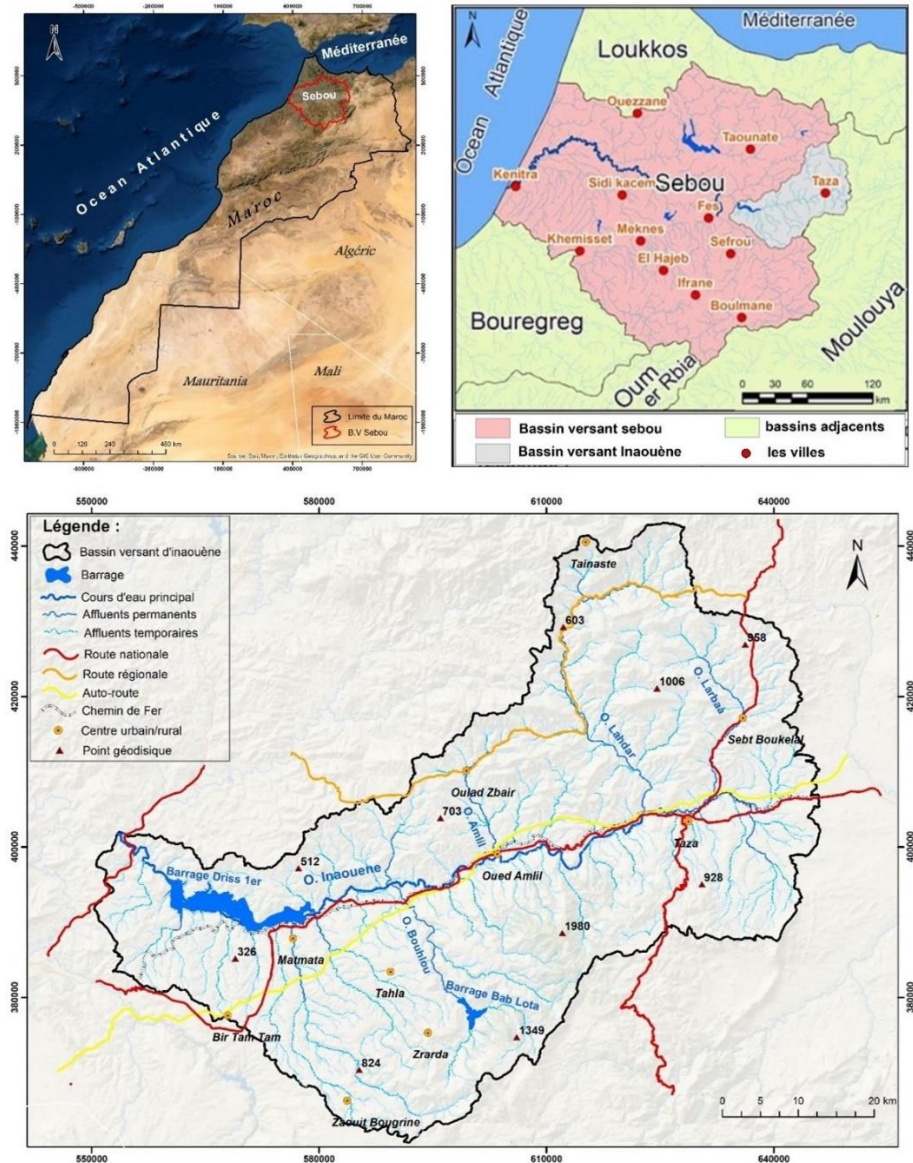


Figure 2. Localisation géographique du bassin-versant d’Inaouène

La crue se réfère à une élévation soudaine et transitoire du niveau d'eau dans un cours d'eau, résultant de précipitations abondantes, de la fonte des neiges ou d'autres facteurs hydrologiques, entraînant un débordement des berges du cours d'eau Goudie, A. (2013).

Les crues diffèrent des hautes eaux ordinaires par leur volume ainsi que par leur caractère bref et extrême. Toutefois, leur détermination effective reste loin d’être évidente en raison de la difficulté d’assigner des seuils hydrologiques plus adaptés qui permettent de séparer les crues des hautes eaux

ordinaires. Cependant, les méthodes statistiques probabilistes restent les approches les plus communément utilisées pour pallier ce problème de seuillage et définir des crues probables plus ou moins expressives de l'événement en soi-même.

2. Méthodologie

Afin d'estimer et de caractériser les crues de l'oued Inaouène, des méthodes statistiques prédictives sont convoquées, qui consistent à étudier les événements « hydrologiques » passés afin de déduire les probabilités d'apparition tout en mettant en œuvre un modèle fréquentiel sur leur comportement. Pour ce faire, deux méthodes ont été retenues, sachant que l'une complète l'autre, à savoir l'ajustement statistique par la loi de Gumbel et la méthode de GRADEX.

Tableau 1. Caractéristiques de la station hydrométrique de Bab Marzouka

Longitude	Latitude	Altitude (m ²)	Surface contrôlée (km ²)
400922	615490	350	1510

La loi de Gumbel, également connue sous le nom de distribution de type I de Gumbel, est une loi de probabilité utilisée pour modéliser les valeurs extrêmes. Elle a été formulée par Emil Julius Gumbel, un mathématicien allemand, dans les années 1950. Sa fonction de répartition $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp(-\exp(-\frac{x-a}{b})) \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec la variable réduite suivante : $u = \frac{x-a}{b}$

Avec a et b qui sont des paramètres du modèle de Gumbel. L'estimation des paramètres a et b de l'ajustement peut se faire graphiquement (ajustement à l'œil ou à l'aide d'une régression statistique), ou selon une approche mathématique comme la méthode des moments qui consiste à évaluer les moments des échantillons avec les moments théoriques de la loi. Par la méthode des moments, les paramètres a et b sont calculés d'après les formules:

Avec

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \hat{\sigma} \\ \hat{a} = \hat{\mu} - \hat{b}\gamma. \end{cases} \text{ avec } \gamma = 0.5772 \text{ (constante d'Euler).}$$

(Eq.2)

σ : écart-type des valeurs composant l'échantillon.

μ : moyenne de l'échantillon.

Dès lors, il est possible d'estimer les débits dont la représentation graphique est une droite d'équation :

$$\hat{Q} = \hat{a} + \hat{b} \cdot u \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec : u : variable réduite

(Gumbel).

À l'inverse de la méthode de Gumbel que l'on a appliquée uniquement sur les débits, le GRADEX (Gradient d'une Distribution Exponentielle) est une méthode assez complète car elle sert des données pluviométriques lors de l'estimation des crues, mais elle est spécifiquement conçue pour les crues de fréquence rare à très rare. Elle comprend un certain nombre d'étapes:

- ajustement des précipitations maximales journalières annuelles selon une distribution de Gumbel ;
- ajustement des débits moyens journaliers maximaux annuels selon une distribution de Gumbel. Ceci est après le fait d'avoir transformé les $[m^3/s]$ en $[mm/24h]$;
- déterminer les débits moyens maximaux de temps de retour T5 et 100 ans en appliquant la méthode du GRADEX et en utilisant le débit décennal comme point pivot.

3. Résultats et discussion

Les basses et les très basses eaux sont la particularité hydrologique la plus observée et constatée dans le régime d'Inaouène durant toute l'année. Néanmoins, les crues restent des phénomènes assez impressionnants dans le régime. Cependant, on peut observer un certain nombre de crues qui peuvent faire plus de 100 fois un module annuel.

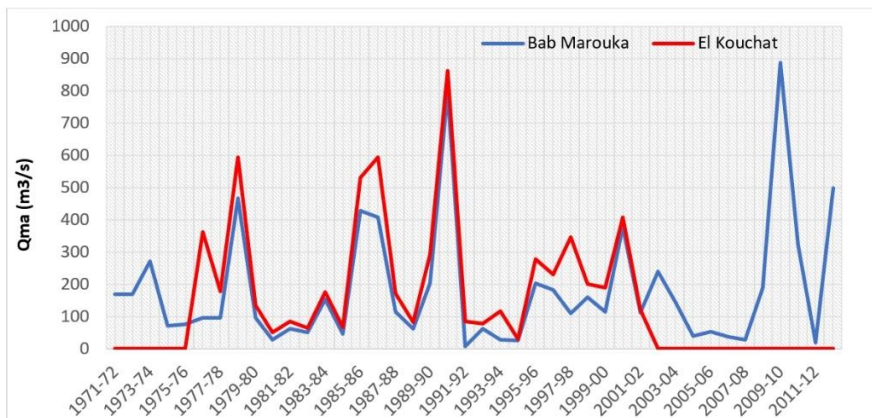


Figura 3. Variations interannuelles des débits maximums annuels de l’oued Inaouène

3.1. Estimation par la loi de Gumbel

À première vue du résultat d’ajustement de Gumbel, il apparaît que les débits maximums de crues des deux stations hydrologiques d’Inaouène s’ajustent adéquatement avec la droite de Gumbel, à l’exception de certaines valeurs extrêmes au niveau de Bab Marzouka où l’on observe un écartement des points pour les valeurs de plus de 800 m³/s ($u > 3$).

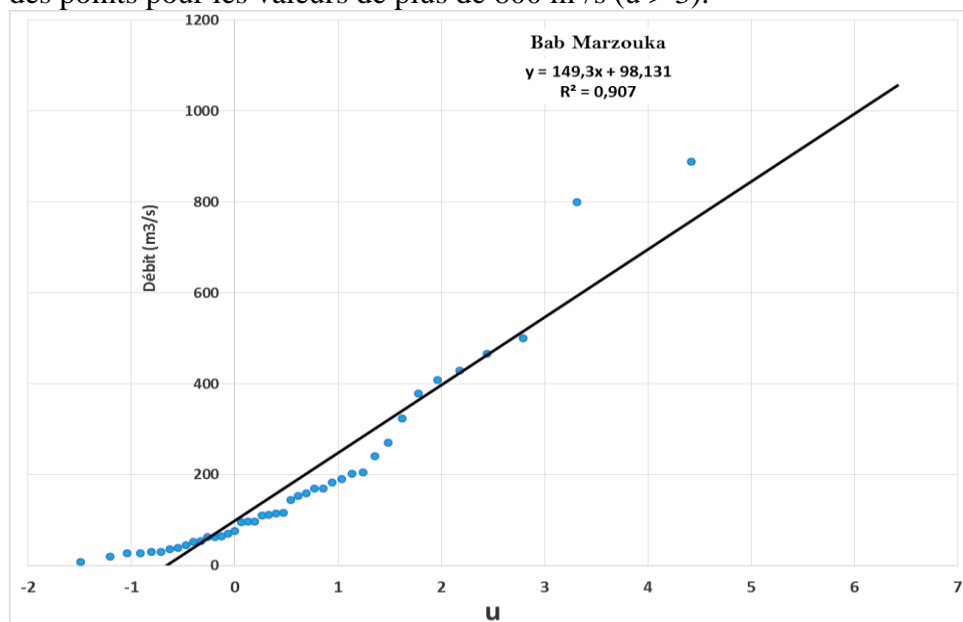


Figura 4. Droite d’ajustement des débits maximums à la loi de Gumbel

Cette droite de Gumbel permet ensuite d’estimer les valeurs des crues pour différentes phases de retour (Tableau 2). Une crue de fréquence de retour T a pour fréquence d’apparition $F = 1-1/T$. Ainsi, les crues estimées varient entre 322 et 785 m³/s pour des fréquences allant de 5 à 100 ans.

Tableau 2. Crues probables de l’oued Inaouène estimées par la méthode de Gumbel

Quantiles	Période de retour	Probabilité au non-dépassement	Variable u de Gumbel	Débit (m ³ /s)
Crue quinquennale	5	0,8	1,5	322
Crue décennale	10	0,9	2,3	434
Crue cinquantenaire	50	0,98	3,9	680
Crue centennale	100	0,99	4,6	785

3.2 Estimation par la méthode de GRADEX

Comme pour les débits, les précipitations maximales annuelles ont été directement ajustées à la loi de Gumbel, loi des valeurs extrêmes. La station pluviométrique utilisée est celle de Taza avec

Une durée d’observation de 42 ans. L’ajustement des précipitations maximales journalières (série de 43 ans) selon la loi de Gumbel semble très pertinent, d’où l’on observe une distribution très proche des pluies observées autour de la droite d’ajustement. Grâce à la pente (b) de cette droite, on peut tracer ultérieurement la droite de GRADEX afin d’extraire les débits de pointe des crues rares.

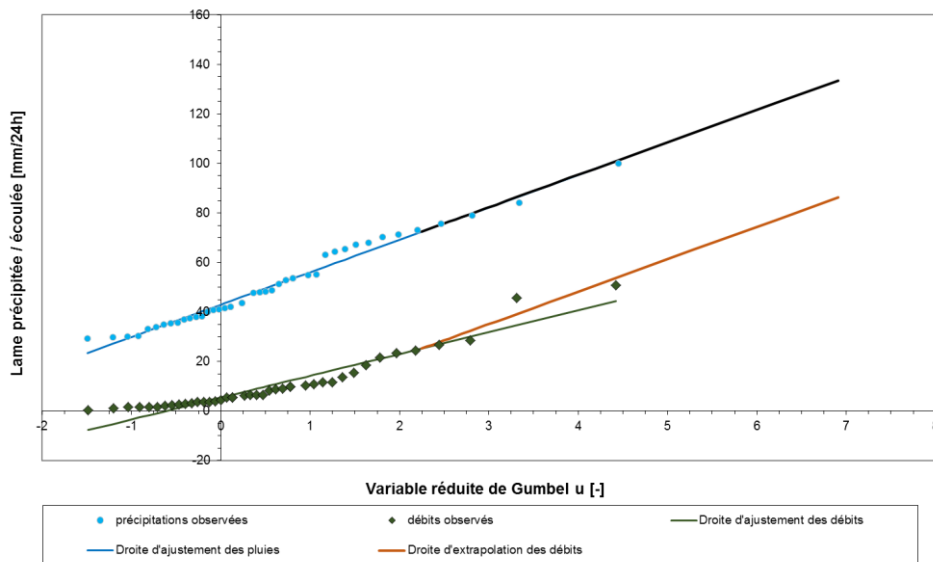


Figura 5. Droites d’ajustement des débits et d’extrapolation des débits de la station de Bab Marzouka

L’application de la méthode de GRADEX sur les débits maximaux journaliers annuels a permis d’estimer les débits de pointe des crues rares et très rares de l’oued Inaouène. Quatre périodes de retour ont été retenues afin d’en déduire les crues, respectivement les crues de T50, T100, T500 et T1000. Pour ces périodes de retour, les crues d’Inaouène à Bab Marzouka jouent entre 819 et 1508 m³/s.

Tableau 3. Crues probables de l'oued Inaouène estimées par la méthode de GRADEX

<i>T [ans]</i>	<i>F(x) Hazen [-]</i>	<i>Variable u de Gumbel [-]</i>	<i>QT estimés ([mm/24]</i>	<i>QT estimés [m³/s]</i>
50	0,980	3,90	46,9	819
100	0,99	4,60	56,0	979
500	0,998	6,21	77,2	1349
1000	0,999	6,91	86,3	1508

Les seules limites que l'on peut signaler sur l'utilisation de la méthode de GRADEX restent dans les données pluviométriques. En effet, faute de manque des données pluviométriques journalières sur l'ensemble du bassin, on s'est contenté de l'utilisation des seules observations de la station de Taza (560 m), alors que les zones montagnardes très élevées pourraient recevoir des quantités beaucoup supérieures.

Conclusion

L'utilisation de la méthode statistique et l'ajustement par la loi de Gumbel a permis de déterminer des crues de périodes retour allant de cinq ans jusqu'aux crues de fréquence centennale. Pourtant, la fiabilité de cette méthode s'arrête à des crues de temps de retour égal ou inférieur à la période totale d'observation. Au-delà de cette marge, l'utilisation de la méthode de GRADEX est fortement recommandée, en raison de sa capacité de prédéterminer des crues de fréquence très rare, allant jusqu'à 1000 ans, parce qu'elle permet de pallier le problème de l'extrapolation des débits au-delà du domaine d'observation en s'appuyant sur des données pluviométriques et hydrologiques. En effet, les crues rares estimées par la méthode statistique sont médiocres, et en réalité, on les voit se reproduire chaque année, à l'inverse de la méthode de GRADEX dont les débits estimés sont véritablement exceptionnels.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Aoulmi, Y. (2022). Modélisation pluie-débit et débits de crues en milieu semi-aride par différentes méthodes statistiques et modèles

- hydrologiques. Étude de cas. Thèse de doctorat. Université Larbi Ben M'Hidi. Oum-El-Bouaghi. 163p.
2. Assani, A.A. (2004). Comparaison de la variabilité inter-annuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière Saint-Maurice (Québec, Canada). Bulletin de la société géographique de Liège, n°44, pp. 87-96.
 3. Assani, A.A. & Tardif, A. (2004). Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada), Approche éco-géographique. Revue des sciences de l'eau, pp. 247-266.
 4. Aznarul, I. & Biplab, S. (2020). Analysing flood history and simulating the nature of future floods using Gumbel method and Log-Pearson Type III: the case of the Mayurakshi River Basin, India. Aliah University, Kolkata, West Bengal, India. Bulletin of Geography. Physical Geography Series, No. 19 (2020): 43–69 <http://dx.doi.org/10.2478/bgeo-2020-0009>
 5. Laayan, B. (2013). Détermination des crues de projet, modélisation hydraulique et gestion du risque d'inondation dans le bassin versant de l'oued larbaâ. Cas de la ville de taza (maroc), thèse de doctorat, universite sidi mohamed ben abdallah, faculte des sciences dhar el mahrez, fes 197p.
 6. Baiddah, A. et al. (2012). Typologie des crues en zone montagneuse, océanique et semi-aride, le cas du bassin versant du Ksob (Haut Atlas occidental, Maroc). Larhyss Journal, n°11, pp. 79-96.
 7. Dubreuil, P. (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Édit MASSON, 214p.
 8. El Bardai, R., Targuisti, K. & Aluni, K. (2014). Caractérisation hydrodynamique des sources karstiques : cas de la source de Ras El Maa (Rif Septentrional, Maroc). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 27 (2), 139–153. <https://doi.org/10.7202/1025564ar>
 9. El garouani, A. & Tribak, A. (2006). Relation entre hydrologie et climat dans le bassin versant de l'oued Inaouène, IAHS Publ. 308 : 436-441.\
 10. Fevzi, O. & Tamer, B. (2017). Prediction of Flood Frequency Factor for Gumbel Distribution Using Regression and GEP Model. King Fahd University of Petroleum & Minerals. Arab J Sci Eng (2017) 42:3895–3906. DOI 10.1007/s13369-017-2507-1.
 11. Gartet, A. (1994). Morphogenèse et Hydrologie dans le bassin versant de l'Oued Lebène : Rif méridional et Préfif central et oriental, Maroc. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I, 337 p.

12. Gischer, L., Hallot, E. et al. (2012). Analyse des debits en période de tarissement : essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de la Meuse (Belgique). *BSGLg*, 59,2012,59-80, pp. 22.
13. Goudie, A. (2013). *The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future (7th Edition)*. Wiley-Blackwell.
14. Gumbel, E.J. (1954). "Statistical theory of extreme values and some practical applications: A series of lectures". National Bureau of Standards Applied Mathematics Series, 33.
15. Lambert, R. (1975). Été, étiage et tarissement des cours d'eau dans le bassin garonnais. In: *Revue Géographique de l'Est*, tome 15, n°1-2, Janvier-juin 1975. Modalités de l'écoulement et étiages fluviaux en milieux tempérés. doi : <https://doi.org/10.3406/rgest.1975.1315>
16. Lang, C. (2007). *Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français*. Thèse Doctorat, Université de Metz, 287p.
17. Leblanc, M. (1971). Le bassin versant de l'Inaouène (Haut Atlas central et Moyen Atlas, Maroc). *Étude géologique et morphologique*. Bulletin de l'Association de géographes français, 403, 73-84.
18. Msatef, K. (2015). *Étude hydrologique du bassin versant de l'Oued Ouergha, Nord du Maroc*. Mémoire MASTER, Faculté des sciences et techniques Fès, 100 p.
19. Obda, K. (2007). *Etiages : indigences extrêmes menaçant la pérennité et les écosystèmes des oueds méditerranéens*. Support d'UE Risques Hydrologiques. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs, pp. 190-247.
20. Picouet, C., Hingray, B. & Musy, A. *Hydrothèque : Recueil d'exercices en Hydrologie*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. <http://hydrologie-2.org/>
21. Uni, A. & Machrani, A.P. S. (2023). Frequency Analysis Of Deli River Flood Distribution Plan Using The Gumbel Probability Distribution Method. *Universitas Islam Negeri Sumatera Utara*. Volume 8, Number 3, July 2023 DOI : <https://doi.org/10.33395/sinkron.v8i3.12543>
22. Robillard, D. (1978). *Etude structural du Moyen-Atlas Septentrional (région de Taza)*. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Techniques de Lille. 178p.
23. Tony, R et al. (2017). *Leçons tirées du cyclone Pam au Vanuatu (Mélanésie) : aléas côtiers, crues éclairs et Dommages*. Paul Valéry University, Montpellier 3 & LAGAM Laboratory. *Géomorphologie : relief, processus, env ronnement* vol. 23 -n° 4 | 2017. DOI : [10.4000/geomorphologie.11842](https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11842)