
Modélisation stochastique (par la théorie des valeurs extrêmes) des inondations dans les bassins versants des zones arides de l'Algérie : cas du bassin versant Zahrez

Stochastic Modeling of Flood in Watersheds of Arid Regions in Algeria Using Extreme Value Theory:

The Case of the Zahrez Watershed

FERHAT Yamina 1

HAMIDI Khaled

BOUDRISSA Naima

Laboratoire d'économie quantitative

Laboratoire d'économie quantitative

appliquée au développement (LEQAD),

appliquée au développement (LEQAD),

Statistique et économie appliquée- Algérie

Statistique et économie appliquée- Algérie

Yamina.ferhat016@gmail.com

Hamidi.khaled@enssea.edu.dz

Date de soumission: 24/04/2025

Date d'acceptation: 24/05/2025

Date de publication: 04/06/2025

Résumé :

Durant les deux dernières décennies, l'Algérie a connu plusieurs inondations majeures, touchant à la fois les zones urbaines du nord et les régions arides du sud. Ces dernières sont rares, souvent soudaines et violentes, causées par des précipitations intenses abattues en moins de 24 heures. Cette étude porte sur le bassin versant du Zahrez couvrant wilaya de Djelfa et M'sila, et vise à modéliser les épisodes extrêmes de précipitations journalières. La méthode utilisée repose sur l'approche Peak Over Threshold de la théorie des valeurs extrêmes. Les résultats montrent que pour des périodes de retour inférieures à 20 ans, les intensités sont similaires entre les deux wilayas, tandis que Djelfa présente un risque plus élevé pour des périodes supérieures à 50 ans. Sur la base de ces résultats que l'estimation la probabilité et l'intensité des crues est possible.

Mots clés : Théorie des valeurs extrêmes ; Approche d'au- delà de seuil ; Inondations ; Bassin versant Zahrez ; Période de retour.

Jel Classification Codes: C13.

Abstract:

Over the past two decades, Algeria has experienced several major flood events affecting both the northern urban areas and the arid southern regions. In these arid and semi-arid zones, although infrequent, floods are often sudden and intense, primarily caused by heavy rainfall occurring within less than 24 hours. This study focuses on the Zahrez watershed, located in the wilayas of Djelfa and M'sila, and aims to model extreme daily precipitation events. The methodology is based on Extreme Value Theory, specifically using the Peak Over Threshold (POT) approach. The results show that for return periods shorter than 20 years, the intensities are similar between the two wilayas, while Djelfa exhibits a higher flood risk for return periods exceeding 50 years. Based on these results, the estimation of flood probability and intensity appears to be feasible.

Keywords Extreme Value Theory; Peak Over Threshold Approach; Floods; Zahrez Watershed; Return Period.

Jel Classification Codes : C13.

Introduction :

¹ Correspondant author

Bien que caractérisée par un climat principalement aride à semi-aride, l'Algérie demeure fortement exposée au risque d'inondation, les dommages causés par ce risque, les pertes humaines et les dégâts matériels en témoignent. La fréquence croissante de ces événements extrêmes au cours des deux dernières décennies, ainsi que l'importance de leurs impacts socio-économiques, soulignent la nécessité d'une meilleure compréhension et d'une gestion appropriée de ce risque naturel. Les inondations les plus dévastatrices sont généralement liées au débordement des principaux cours d'eau traversant les zones agricoles des plaines, exacerbant ainsi la vulnérabilité des territoires concernés (Algérienne, Agence spatiale "ASAL").

Ces inondations ont particulièrement frappé le nord du pays ainsi qu'au niveau des zones arides, dont plusieurs ont été constatées dans le passé, ces dernières sont le résultat des orages et des averses intenses, survenues principalement en début d'automne et en hiver (D.BOUTOUTAOU, H. ZEGGANE, juin et décembre 2014).

C'est le cas de plusieurs villes du sud d'Algérie, ayant connu ce genre de catastrophes, à l'image de la wilaya de Ghardaïa qui, le 1er octobre 2008, a été concernée par de violentes averses ayant impacté neuf (09) communes (Algérienne, Agence spatiale "ASAL").

Moins de trois ans plus tard, au début du mois d'octobre 2011, la wilaya d'El Bayadh a également été touchée par des inondations d'une intensité destructrice. Ces dernières ont causé, rien que pour le secteur des ressources en eau, des dommages estimés à plus de 600 millions de dinars algériens, soulignant ainsi, l'ampleur des impacts économiques de ce type d'événements extrêmes dans ces zones (360°, 2011).

Deux ans plus tard, le 09 octobre 2013, la ville d'Aflou de la wilaya de Laghouat, a été également concernée par des inondations, ayant endommagé de manière notable, des terres agricoles s'élevant à une superficie de 11ha (Algérienne, Agence spatiale "ASAL").

Il est aussi important de noter, que les crues affectant les zones arides et semi arides restent peu documentées. Elles se caractérisent par leur brièveté et leur survenue soudaine, généralement provoquées par des averses orageuses intenses et très limitée dans le temps, variant de quelques minutes à quelques heures seulement.

L'étude analytique de ces aléas, requiert la connaissance hydrologique et morphométrique des sols soumis aux précipitations. Dans ce cadre, le bassin versant constitue l'unité d'étude la plus indiquée, ce dernier est défini comme l'ensemble de la surface abritant les eaux circulant naturellement vers un cours d'eau, appelé l'exutoire ou vers une même nappe d'eau souterraine.

Compte tenu des propriétés physiques du bassin versant dans la genèse et la propagation des crues, il devient essentiel de s'appuyer sur des outils de modélisation adaptés pour anticiper les phénomènes extrêmes.

Parmi ceux, la modélisation stochastique des précipitations journalières s'avère un outil fondamental pour la compréhension et la prévision des risques d'inondation en milieu aride et permet également d'estimer les niveaux de retour des événements extrêmes. Cette approche repose sur la théorie des valeurs extrêmes qui vise à déterminer la probabilité de survenance ainsi que l'intensité des précipitations extrêmes, c'est dernières sont fortement liées au risque d'inondations.

A ce titre, et dans un contexte de gestion des risques d'inondations, caractérisée par des épisodes de précipitations violents, soudains et fortement destructeurs, comment peut-on, à partir d'outils de modélisation stochastique fondés sur la théorie des valeurs extrêmes, estimer la probabilité et l'intensité des crues dans ces milieux, à partir des séries de données relatives aux précipitations journalières, et ainsi contribuer à améliorer la prévention et la gestion des risques liés aux inondations, notamment dans le bassin versant du Zahrez ?

Afin de formuler des recommandations susceptibles de contribuer à l'amélioration de l'aménagement du territoire avec la possibilité de réduire les dégâts potentiels liés aux inondations par une meilleure gestion de ce risque, il est idoine de supposer qu'il existe un seuil de précipitation (threshold), estimé à l'aide de la loi GPD (Generalized Pareto Distribution), au-delà duquel les valeurs excédentaires, peuvent être utilisées pour modéliser les crues.

Dans le même sillage, il est également pertinent de supposer que la prédiction des niveaux de retour des épisodes extrêmes de précipitations journalières, constituent une piste prometteuse pour réduire les pertes, notamment humaines.

Cette étude repose sur des techniques statistiques probabiliste, par le biais de la modélisation stochastique des épisodes extrêmes de précipitations journalières, en s'appuyant sur la distribution généralisée de Pareto (GPD), appliquée sur le bassin versant du Zahrez. L'objectif est de confirmer ou infirmer les hypothèses supposées et citées supra.

2. Choix et présentation de la zone d'étude

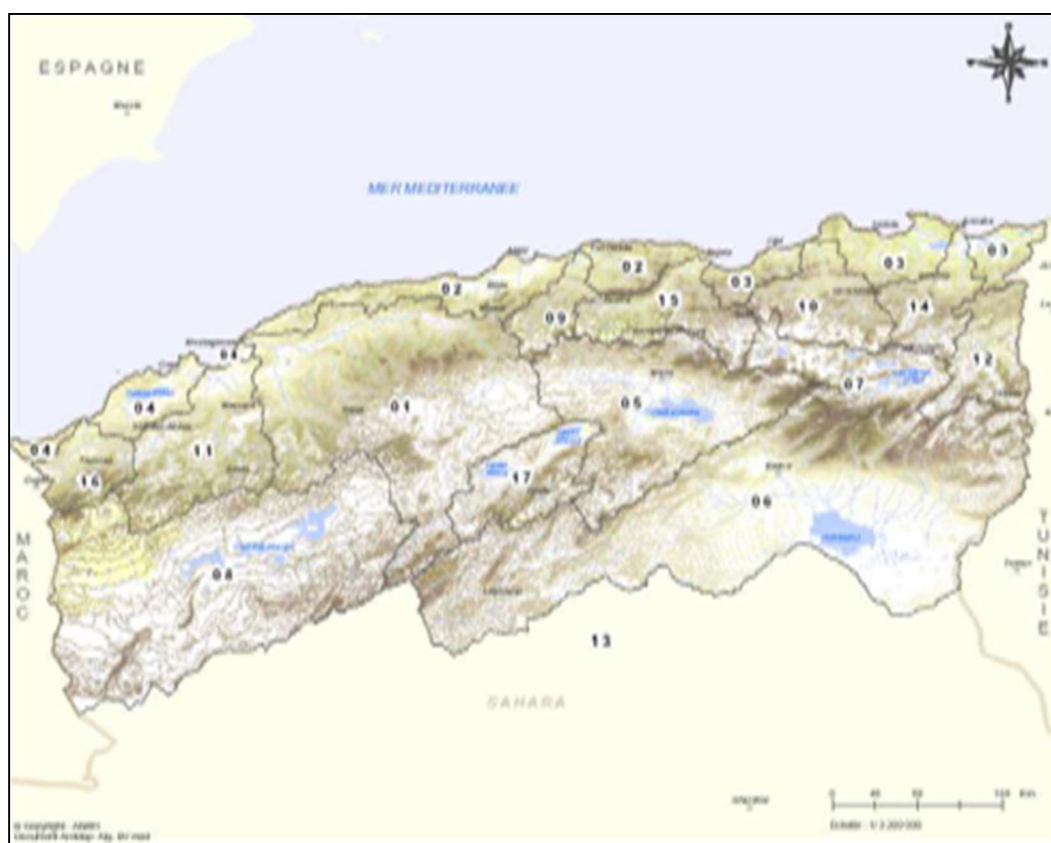
L'étude réalisée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Agence nationale des ressources hydriques, 2012) sur les inondations en Algérie, indique sa forte exposition aux crues et inondations, qualifiées de destructrices dans les régions arides et semi-arides. Ce constat a suscité le choix du bassin versant Zahrez comme zone d'étude.

2.1 Superficie et localisation

Le bassin versant des Zahrez (BV 17), se situe au centre-nord de l'Algérie, encadré par les bassins du Chéliff au nord et à l'ouest, par Hodna à l'est, et par Chott Melrhir au sud. Il s'étend sur la wilaya de Djelfa et M'Sila, entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud (Agence nationale des ressources hydriques, 2012).

Il se caractérise par un climat aride à semi-aride ainsi que par des formations géologiques particulières qui impactent fortement son régime hydrologique.

Figure N°1: Cartographie des bassins versants de l'Algérie



Source : Agence nationale des ressources hydriques (ANRH)

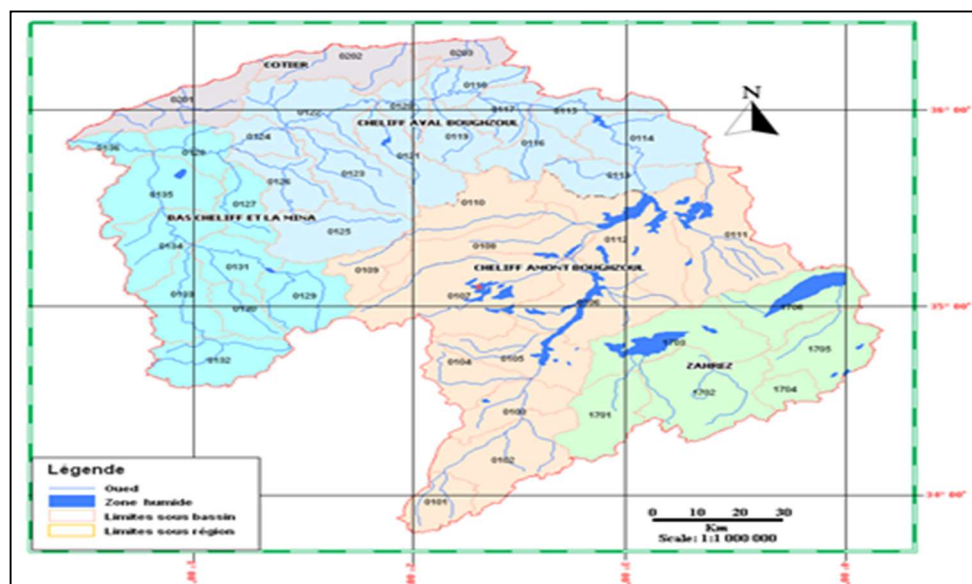
D'une superficie d'environ 9 102 km²(Agence nationale des ressources hydriques, 2012) ; le bassin versant du Zahrez présente une géomorphologie caractérisée par la présence dominante de deux grandes cuvettes

endoréiques : le Chott Gharbi et le Chott Chergui. Il est composé de six sous-bassins et est drainé par 03 principaux oueds, à savoir, Oued Mellah (1539.30 km), Oued Mesrane (1210.09 km) et Oued Medjdel (468 km), et par d'autres oueds intermittents qui n'apparaissent qu'en cas de fortes pluies.

Le bassin du Zahrez se caractérise également, par une disponibilité très limitée en eaux superficielles, du fait du climat peu propice aux précipitations fréquentes et marqué par un taux d'évaporation conséquent.

La pluviométrie annuelle moyenne de la région est comprise entre 200 et 400 mm/an et connaît une variabilité interannuelle très forte, où certaines années les précipitations sont abondantes et d'autres exceptionnellement rares moins de 200mm/an.

Figure N°2 : Répartition du bassin versant ZAHREZ en sous bassins



Source : Agence nationale des ressources hydriques (ANRH)

Toutefois, ces précipitations sont majoritairement sous forme d'averses intenses, de courte durée (quelques heures < à 24h), à caractère orageux et torrentiel, ce qui accroît le risque de crues soudaines et d'inondations dévastatrices (D.BOUTOUTAOU, H. ZEGGANE, juin et décembre 2014).

2.2 Méthodologie adoptée

La survenue des inondations dans ces régions demeure rare mais dévastatrice. Ce risque est principalement lié à l'intensité des précipitations, souvent concentrées sur de très courtes durées, généralement inférieures à 24 heures. Toutefois, l'estimation de la survenance de ce type de précipitations reste difficile, en raison de non disponibilité des données exhaustives et continues.

Ainsi, plusieurs méthodes ont été développées pour l'estimation des phénomènes rares et valeurs extrêmes, reposant sur des approches théoriques et statistiques souvent très distinctes les unes des autres (M.LANG et P. ARNAUD, juin 2017) et dépendant principalement de la disponibilité des données.

Parmi ceux, la théorie des valeurs extrêmes (COLES SPRINGER. G, 2001) qui offre un cadre méthodologique rigoureux pour l'estimation des probabilités de survenance et de l'intensité des valeurs extrêmes. Plus précisément, elle stipule que le comportement asymptotique des maxima ou des observations dépassant un certain seuil (selon l'approche Peak Over Threshold « POT ») converge en probabilité vers une distribution généralisée de Pareto (GPD).

Néanmoins, le résultat théorique repose sur l'hypothèse que les variables aléatoires de l'échantillon doivent être indépendantes et identiquement distribuées (iid) et que la taille de l'échantillon doit être suffisamment grande.

3. Statistiques d'ordre et méthodes d'estimation des valeurs extrêmes

3.1 La loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV – Generalized Extreme Value)

Reposant sur l'approche de blocs des maxima, la GEV est une distribution de probabilité appliquée pour estimer et modéliser les valeurs extrêmes d'un phénomène aléatoire. Elle trouve son application majeure en hydrologie, météorologie et en finance, notamment dans le domaine des assurances, ainsi que dans d'autres secteurs où la quantification et l'estimation de survenance des événements rares et extrêmes, tels que les crues exceptionnelles ou les pertes financières importantes, est essentielle.

Sa fonction de répartition prend la forme suivante :

$$H_{\mu,\sigma\xi}(y) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{y-\mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\} & \text{pour } 1 + \xi \left(\frac{y-\mu}{\sigma} \right) > 0 \\ \exp \left(- \exp \left(- \frac{y-\mu}{\sigma} \right) \right) & \text{pour } \xi = 0, y \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (1)$$

Avec $\mu \in \mathbb{R}$ et $\sigma > 0$

Elle devient, selon le paramètre de forme ξ caractérisant la lourdeur de la queue à :

- $\xi > 0$ la fonction de répartition de la loi de Fréchet (type II) (F. LONGIN, 1995) ayant comme caractéristique les queues non bornées et lourdes en raison de la grandeur des observations maximales de y avec une probabilité significative de survenance, elle s'écrit comme suit :

$$H_{\mu,\sigma\xi}(y) = \exp \left(- \left(\frac{y-\mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right), y > \mu, y \in \mathbb{R} \quad (2)$$

- $\xi < 0$ la fonction de répartition de la loi de Weibull (type III) marquée par des queues supérieures bornées par le fait que les observations maximales y afférentes ne peuvent dépasser un certain seuil, sa fonction s'écrit comme suit :

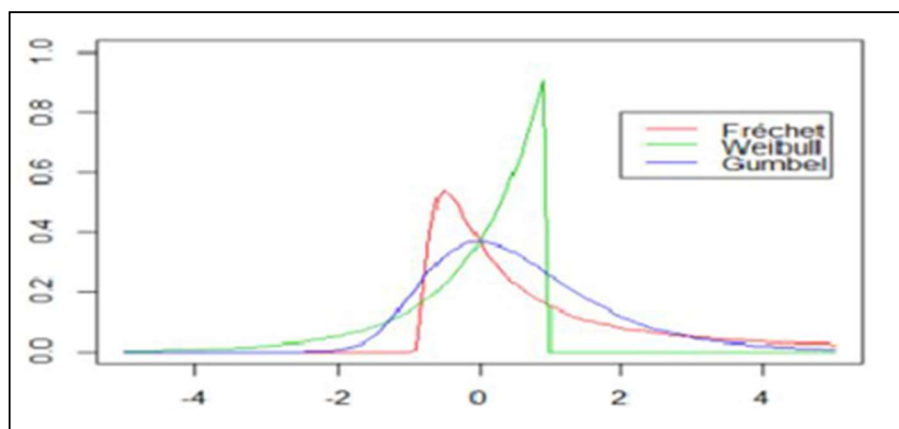
$$H_{\mu, \sigma \xi}(y) = \exp \left(- \left(\frac{\mu - y}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right), y < \mu, y \in \mathbb{R} \quad (3)$$

- $\xi = 0$ dans ce cas, la fonction de répartition prend la forme de celle de la loi de Gumbel (type I) avec des queues qui diminuent de façon exponentielle et sont moins lourdes.

$$H_{\mu, \sigma \xi}(y) = \exp \left(- \exp \left(- \frac{y - \mu}{\sigma} \right) \right), y \in \mathbb{R} \quad (4)$$

La figure ci-après illustre la densité des trois lois de la GEV.

Figure N° 3: Fonction de Densité de Probabilité des Lois de la GEV



3.2 La méthode de GPD (distribution de Pareto généralisée)

Basée sur l'approche Peaks Over Threshold (POT), cette méthode s'appuie sur l'analyse des excès au-delà d'un seuil élevé u en ne prenant que les observations qui le dépassent. L'objectif est d'étudier leur comportement asymptotique, lequel converge vers une distribution généralisée de Pareto (GPD).

$X_1, X_2, X_3 \dots X_n$, n Variables aléatoires (iid) de fonction de répartition F ; on définit les excès par

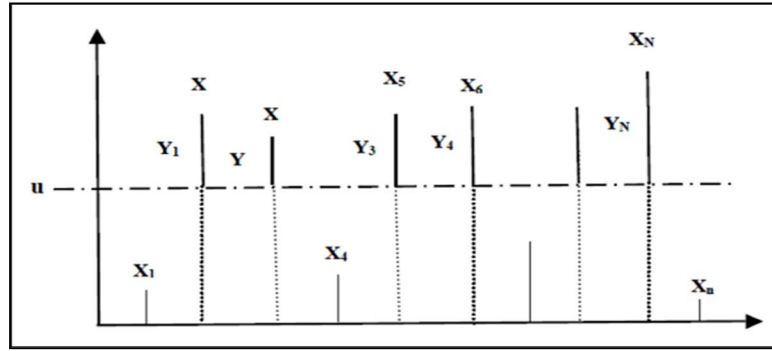
$y_i = x_j - u$ (u appelé le seuil). La formule de la fonction de répartition est :

$$\begin{aligned} F_u(y) &= \Pr(X - u \leq y / X > u) \\ &= \frac{F(u+y) - F(u)}{1 - F(u)} \end{aligned} \quad (5)$$

Pour $0 < y < x_F - u$ c'est équivalent à :

$$F_u(x) = \Pr(X \leq x / X > u) = \frac{F(x) - F(u)}{1 - F(u)}, \text{ pour } x \geq u \quad (6)$$

Figure N°4: Fonction de Répartition et Découpage de la Série en Fonction du Seuil u



Selon le théorème de Pickands- Belkema- de Hann, la modélisation des excès suit une loi de (GPD) (Generalized Pareto Distribution), ayant pour fonction de distribution ce qui suit :

$$H_{\xi, \varphi}^{GPD}(y) = \begin{cases} 1 - \left(1 - \xi \frac{y}{\varphi}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{y}{\varphi}\right) & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \text{ avec } (y \geq 0) \quad (7)$$

L'estimation du modèle POT soulève une question préoccupante, relative au choix du seuil u . Celui-ci doit, d'une part, être suffisamment élevé pour que l'hypothèse de convergence vers la distribution généralisée de Pareto (GPD) reste valide ; mais, d'autre part, il ne doit pas être trop élevé afin de conserver un nombre d'observations suffisant pour une estimation fiable.

Dans le cas particulier des débits maximaux, Dalrymple (1960) a suggéré que le seuil puisse être associé à une période de retour de 1,15 an. D'autres (D.ROSBJERG et H. MADESEN et P. RASMUSSEN, novembre 1992), ont proposé une méthode fondée sur la normalisation du seuil selon la formule :

$$u = \bar{x} + k\sigma_x \quad (8)$$

Où :

$\bar{x}$: est la moyenne

σ_x : est l'écart type des débits moyens journaliers (x_i)

k : est le facteur d'échelle fixé à 3

Pour l'estimation dudit seuil, (COLES SPRINGER. G, 2001) a suggéré plusieurs méthodes à suivre.

3.2.1 L'utilisation de la fonction moyenne des excès

Il s'agit d'une méthode qui repose sur l'estimateur de la moyenne des excès d'une variable aléatoire X qui suit la distribution généralisée de Pareto (GPD) notée $e(u)$, est donné par l'expression suivante :

$$e(u) = E(X - u | X > u) = \frac{\beta - \xi u}{1 - \xi} \quad (9)$$

Le choix du seuil repose notamment sur l'analyse graphique de la courbe de la moyenne des excès $e(u)$. Le comportement asymptotique supposé par le modèle POT est validé par la tendance linéaire présentée par ladite courbe. Le seuil optimal est généralement sélectionné à l'intérieur du domaine où cette linéarité est observée.

Il est également indiqué par (F. LONGIN, 1998), que le choix du seuil peut être fait de manière subjective, sans pour autant respecter la condition de l'équilibre entre variance et biais, et ce, en vue d'assurer la convergence de l'estimateur vers la GPD.

3.2.2 L'estimateur de Hill

L'une des méthodes les plus utilisées pour estimer l'indice de queue ξ . Il est appliqué sur les précipitations journalières ordonnées en décroissance (de la grande valeur à la petite) l'estimateur de Hill est donné comme suit :

$X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ un échantillon d'observations indépendantes et identiquement distribuées (iid) ordonnées par ordre décroissant :

$$X_{(1)} \geq X_{(2)} \geq \dots \geq X_{(n)}$$

L'estimateur de Hill repose sur les k plus grandes valeurs, il s'écrit comme suit :

$$\hat{\xi}_{\text{Hill}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\log X_{(i)} - \log X_{(k+1)}] \quad (10)$$

Où :

k est le nombre de valeurs extrêmes ;

$X_{(k+1)}$ est la $(k + 1)$ -ième plus grande observation ;

$\hat{\xi}_{\text{Hill}}$ est l'estimateur du paramètre de forme.

Considéré comme un bon estimateur de l'indice de queue du fait que cet estimateur repose essentiellement sur la stabilité du paramètre de la forme sur divers seuils des différents percentiles, assurant ainsi une estimation efficace des queues de distribution (KORTZS et S.NADARAJAH, 2000).

Il est également à noter que cette méthode s'applique lorsque les queues sont épaisses $\xi > 0$.

3.3 Période et niveau de retour

La période de retour T associée à un niveau x_T d'une variable aléatoire X correspond au temps moyen écoulé, séparant deux dépassements successifs de ce niveau.

Quant au niveau de retour, ce dernier désigne le quantile correspondant à une période de retour donnée T autrement dit, c'est le seuil dont la probabilité moyenne de dépassement est d'une fois tous les T ans (Z. BERGAOUI et A. CHEBCHOUB, 2014).

La période de retour d'un niveau x_T s'écrit de manière générale comme suit :

$$T = \frac{1}{P(X > x_T)} = \frac{1}{(1 - F_{x_T})} \quad (11)$$

Le niveau de retour associé à une période de retour ayant une probabilité de $1/T$ d'être dépassé, autrement dit, le niveau de retour associé à une période de retour T est le quantile $1 - 1/T$ tels que :

$$\begin{aligned} P(X > x_T) &= \frac{1}{T} \\ P(X \leq x_T) &= 1 - \frac{1}{T} \end{aligned} \quad (12)$$

Leur estimation dépend principalement de l'approche choisie à savoir :

3.3.1 Loi des valeurs extrêmes généralisées (GEV) blocs des maximas

Les quantiles calculés depuis la GEV s'écrivent comme suit :

$$x_T = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \left(-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} \right], & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log \left(-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right), & \xi = 0 \end{cases} \quad (13)$$

x_T est le niveau de retour associé au quantile $(1 - \frac{1}{T})$

3.3.2 Méthode des excès au-delà du seuil (POT)

Supposons qu'une distribution généralisée de Pareto ayant pour paramètre (φ d'échelle et $\xi \neq 0$ de forme) avec un seuil u et une distribution adéquate pour les excès $y = (x - u)$, n est le nombre d'observations de variable aléatoire et k est le nombre de dépassements au seuil.

T est la période de retour du niveau y_T tels que :

$$1 - F(y_T) = \left(1 + \xi \cdot \frac{y_T - \mu}{\varphi} \right)^{-1/\xi} \quad (14)$$

Quant au niveau de retour y_T , ce dernier s'écrit comme suit :

$$\text{Avec } \lambda = k/n \quad (15)$$

Donnant lieu au niveau de retour, dans le cas où :

$$\xi \neq 0 \text{ au niveau de retour } y_T = u + \frac{\varphi}{\xi} ((\lambda T)^\xi - 1) \quad (16)$$

$\xi = 0$ ou la variable suit une loi exponentielle, le niveau de retour y afférent est donnée par :

$$y_T = u + \varphi * \ln(T * \lambda) \quad (17)$$

4. Analyse des résultats :

4.1 Source et traitement des données

A travers ce papier, l'objectif visé est de déterminer pour le bassin versant en question les débits maxima probables correspondants, ainsi que les périodes de retour et les niveaux y afférents, pouvant provoquées dans le futur des inondations.

Les données sur lesquelles l'étude des inondations a portée concernent la quantité des précipitations (pluies, grêle, neige) abattues en moins de 24 h, entre 6 TU² et 6 TU du lendemain, sur les wilayas couvrant le bassin à savoir la wilaya de Djelfa et de M'sila ; elle est mesurée en mm d'eau.

Les données y afférentes ont été prélevées du site internet (Météociel- Climatologie)météociel.fr ayant pour code 60535.La série des données s'est étalée sur une période de 24 ans du 01 janvier 2001 au 31 décembre 2024, pour chacune desdites wilayas.

Les résultats de l'étude ont été obtenus à travers l'alimentation en données sus-citées, le logiciel R version 4.4.2, un outil informatique dédié aux études statistiques et économétriques.

4.2 Discussion des résultats

Le tableau ci-après présente les caractéristiques empiriques des séries relatives audites précipitations, enregistrées au niveau desstations implantées dans les wilayas couvrant le BV, à savoir les extrémités des séries de précipitations journalières de Djelfa et M'sila (maximum, minimum), leur moyenne, leur médiane, le 1er et le 3ème quantile desdites ainsi que l'écart type y- afférent.

Table N°1: Caractéristiques Empiriques des Précipitations Journalières Observées sur les Wilayas Couvrant le Bassin ZAHREZ

	n	Min	1 ^{er} quantile	Médiane	Moyenne	3ème quantile	Max	Ecart type
Djelfa	1686	0.00	0.60	2.00	3.99	5.00	109.90	6.00
M'sila	2204	0.00	2.00	5.30	12.09	23.30	86.00	12.191

Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

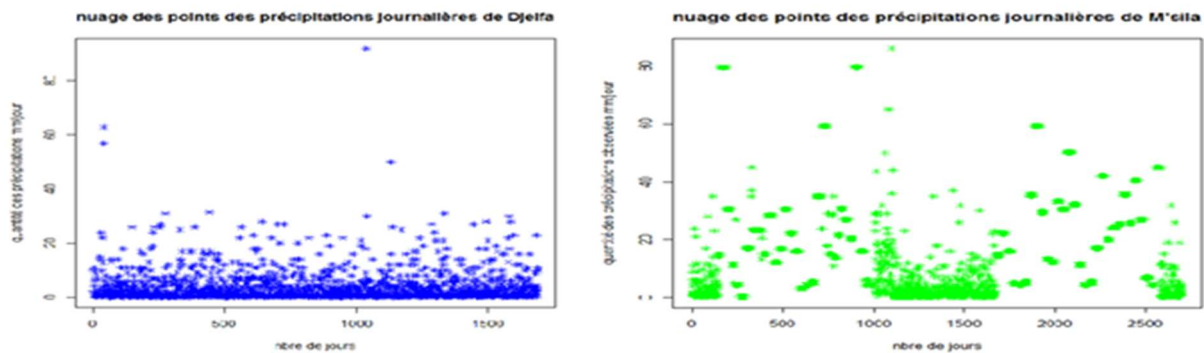
4.2.1 Nuage des points des précipitations journalières

La présentation graphique des observations journalières des précipitations enregistrées de moins de 24h dans chacune des wilayas permettra d'illustrer leur positionnement et voir la concentration.

Quantité de pluie/neige/grêle (en mm d'eau) qui est tombée entre 6h TU et 6h le lendemain²

Mettez les résultats obtenus ici, d'abord par résumé et analysé des données et résultats obtenus en relation de l'objet de recherche. Avec une explication de ces résultats surtout en ce qui concerne les hypothèses proposées et leur validité.

Figure N° 5: Présentation Graphiques des Précipitations Journalières Observées



Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

Il apparaît clairement que la majorité des observations de précipitations journalières sont concentrées autour de valeurs n'excédant pas 20 mm/jour pour Djelfa, et 40 mm/jour pour celle de M'sila. Cependant, des valeurs exceptionnelles, relativement élevées par rapport à la moyenne ont également été enregistrées dans les deux wilayas couvrant le bassin versant étudié. Par ailleurs, une analyse visuelle des figures N° 5 suggère une fréquence plus importante d'événements de forte intensité dans la wilaya de M'sila comparativement à celle de Djelfa, ce qui est confirmée par la comparaison des troisièmes quartiles des deux distributions.

En vue d'estimer les périodes de retour ainsi que les valeurs des précipitations y afférentes, il est nécessaire de faire un choix entre les différentes approches traitant les distributions des valeurs extrêmes à savoir l'approche des blocs maxima et la méthode des excès au-delà du seuil (POT) de la distribution GPD (Generalized Pareto Distribution).

Ce choix doit s'appuyer sur plusieurs critères notamment le type des données utilisées, la taille de la série et la robustesse des estimateurs. La méthode POT (Peak Over Threshold) présente l'avantage de nécessiter un nombre réduit de paramètres à estimer, ce qui la rend particulièrement adaptée. Son mode de sélection, basé sur les dépassements d'un seuil fixé, permet de construire une série d'extrêmes plus représentative contrairement à celle retenue sur la base des blocs des maxima annuels. De ce fait, les estimateurs obtenus par l'approche POT sont généralement des estimateurs plus efficaces, notamment en termes de variance, en comparaison à ceux obtenus de la méthode des blocs (KORTZS et S.NADARAJAH, 2000) (COLES SPRINGER. G, 2001). Cette efficacité s'explique par le fait que la méthode POT cible exclusivement les valeurs réellement extrêmes, tandis

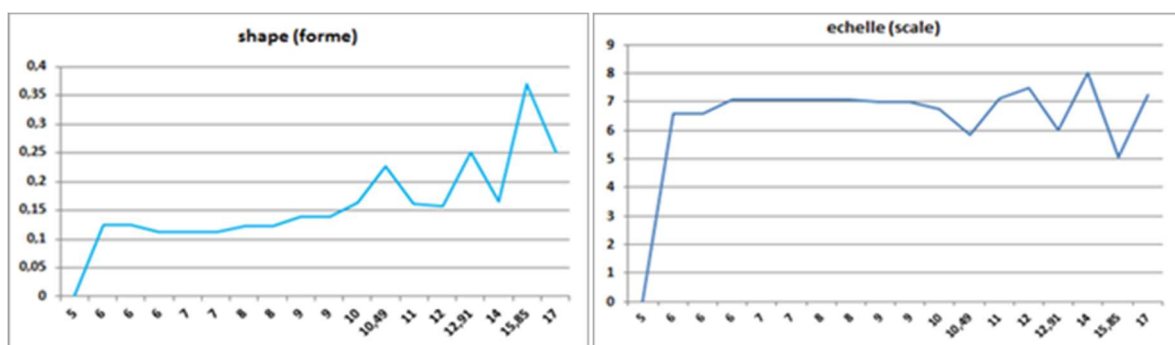
que la méthode des blocs maxima peut inclure des observations qui ne dépassent pas un seuil critique, mais qui sont simplement les plus élevées dans un bloc donné.

Pour le cas de cette étude, il a été procédé à l'ajustement des données en adoptant la distribution GPD et en utilisant la méthode POT (Peaks over threshold) (au-delà du seuil), ce choix est justifié par l'importance de la taille de série, $n_1 = 1686$ pour Djelfa et $n_2 = 2204$ pour M'sila, des observations journalières pour chacune des wilayas, également par le recours aux précipitations journalières, et non pas le blocs de maxima annuels des précipitations, où le risque d'exclure des valeurs pouvant être significativement extrêmes.

4.2.2 Recherche du seuil u

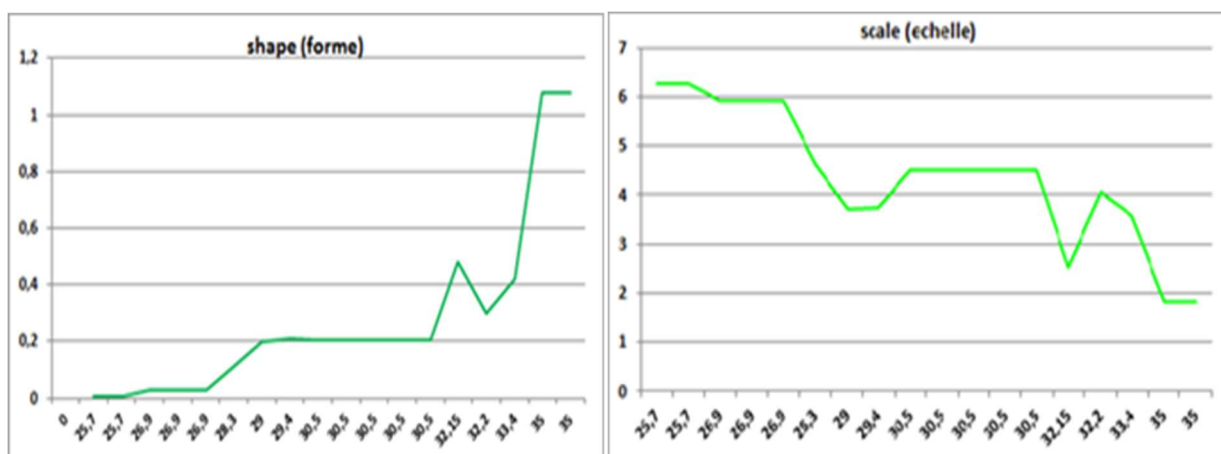
Concernant cette d'étude, et en appliquant la fonction moyenne des excès, le seuil sélectionné des précipitations journalières observées au niveau de Djelfa et M'ila est respectivement de 10.49 mm/jour et 30.5 mm/jour. Ils ont été vérifiés par les estimations des paramètres de forme et d'échelle des deux séries par la méthode de maximum vraisemblance (ML), à différents seuils (figure N°6 et 7).

Figure N°6: Analyse de la Stabilité des Paramètres d'Echelle et de Forme pour la Série des Excès de la Wilaya de Djelfa



Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

Figure N°7 : Analyse de la stabilité des paramètres d'échelle et de forme pour la série des excès de la wilaya de M'sila



Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

4.2.3 Estimation des paramètres

L'estimation des paramètres de la distribution GPD à savoir celui de forme ξ et d'échelle φ par la méthode de maximum de vraisemblance (ML) à 5% d'erreur, les erreurs standards liés aux paramètres estimés, ainsi que les intervalles de confiance à 95% se présentent dans les tableaux ci-après pour les deux wilayas :

Table N °2: Estimation des Paramètres des Excès de Précipitations Journalières de Djelfa par la ML

n=1686 précipitations journalières			
k=169 observations dépassant le seuil u= 10.49 soit 10% du total des observations			
Paramètre	Estimateur	Stderror	Intervalle de confiance (IC)
Forme ξ	0.173	0.084	[0.009 - 0.337]
Échelle φ	6.085	0.691	[4.731 - 7.435]

Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

Table N° 3: Estimation des Paramètres des Excès de Précipitations Journalières de M'sila par la ML

n=2204 précipitations journalières			
k=175 observations dépassant le seuil u= 30.5 soit 7.9% du total des observations			
Paramètre	Estimateur	Stderror	Intervalle de confiance (IC)
Forme ξ	0.207	0.073	[0.067- 0.347]
Échelle φ	4.503	0.47	[3.583- 5.42]

Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

L'échantillon des précipitations journalières abattues sur Djelfa et M'sila durant la période allant de 01-01-2001 au 31-12-2024, est composé respectivement de 1686 et 2204 observations, dont il comporte 169 valeurs dépassant le seuil $u_d=10.49$ mm/jour, ce qui représente environ 10 % du total des observations concernant Djelfa et 175 excès dépassant le seuil $u_m=30.5$ mm/jour représentant 7.9% du total de la série relative à M'sila.

Ce dépassement milite, pour le recours à la distribution généralisée de Pareto (GPD) pour modéliser les épisodes extrêmes pouvant provoquer des inondations au niveau de Djelfa et M'sila.

L'estimateur du paramètre de forme $\xi= 0.1703 > 0$ de la série de Djelfa, ayant pour IC à 95 % de [0.009 - 0.337], signifie que la distribution est à queue légèrement lourde, ceci, permet de déduire que des événements extrêmes (des épisodes de précipitations extrêmes< 24h) sont moins fréquents au niveau de Djelfa avec une

probabilité significative de se produire intensément. De cela, il est possible de conclure que la distribution des précipitations journalières < 24h abattues sur Djelfa suit une loi de Pareto de (type II) et de rejeter l'hypothèse que la série suit une loi exponentielle ($\xi=0$).

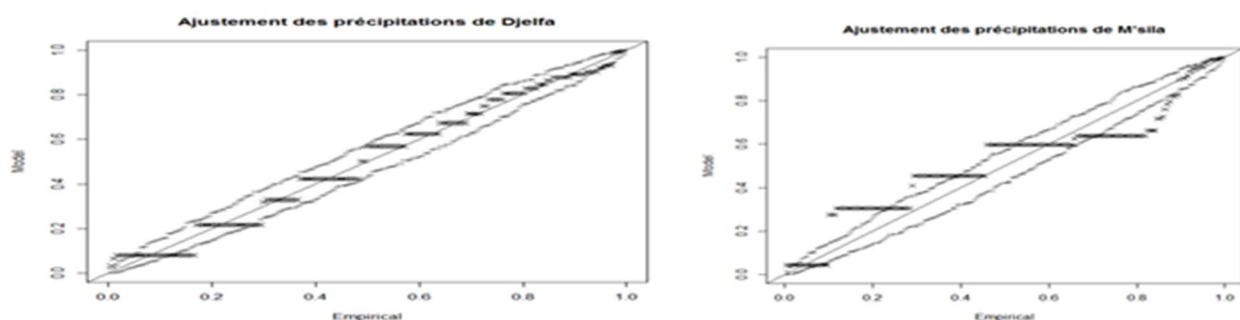
Quant au cas de M'sila, L'ajustement des excédents à une distribution généralisée de Pareto (GPD) donne un paramètre de forme estimé à $\xi=0.207 > 0$, avec une erreur standard de 0.073 et un intervalle de confiance à 95 % compris entre [0.067 - 0.347].

La positivité du paramètre de forme ξ , combinée à son intervalle de confiance excluant la valeur nulle et indique que les excédents suivent une loi de Pareto généralisée de type II. Ce résultat signifie que la queue est plus au moins lourde que celle de la distribution concernant Djelfa. La distribution des excès des précipitations journalières de M'sila est caractérisée par une probabilité d'occurrence d'événements extrêmes, non négligeable et plus importante que celle de Djelfa. Ainsi, l'hypothèse d'une distribution exponentielle est rejetée, au profit d'une modélisation plus appropriée des événements rares mais potentiellement très intenses.

4.2.4 Validation du modèle

La qualité de l'ajustement de la distribution généralisée de Pareto (GPD) aux excédents de précipitations journalières abattues sur Djelfa et M'sila ont été évaluées à l'aide d'un Q-Q plot. Ces graphiques comparent les probabilités empiriques des données observées avec celles issues du modèle ajusté.

Figure N°8: QQ Plot des ajustements



Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

Concernant Djelfa, la forte concordance des points avec la diagonale indique que l'ajustement par la distribution GPD de type II est satisfaisant au seuil de 10.49 mm/jour. De plus, l'ensemble des points se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance, ce qui confirme la validité statistique de l'ajustement de la série de Djelfa.

En ce qui concerne M'sila, les points se répartissent globalement autour de la droite théorique, en restant majoritairement à l'intérieur des bandes de confiance. Cette disposition suggère un ajustement satisfaisant du

modèle GPD aux excès de précipitations au-delà du seuil de 30,5 mm/jour. Quelques écarts sont néanmoins observés aux extrémités, ce qui est fréquent dans les données extrêmes.

Au final, la loi de Pareto généralisée de type II est appropriée pour modéliser les excès de précipitations au-delà des seuils retenus pour Djelfa et M'sila, ces dernières sont les plus concernées par les évènements d'inondations observées dans le BV de Zahrez.

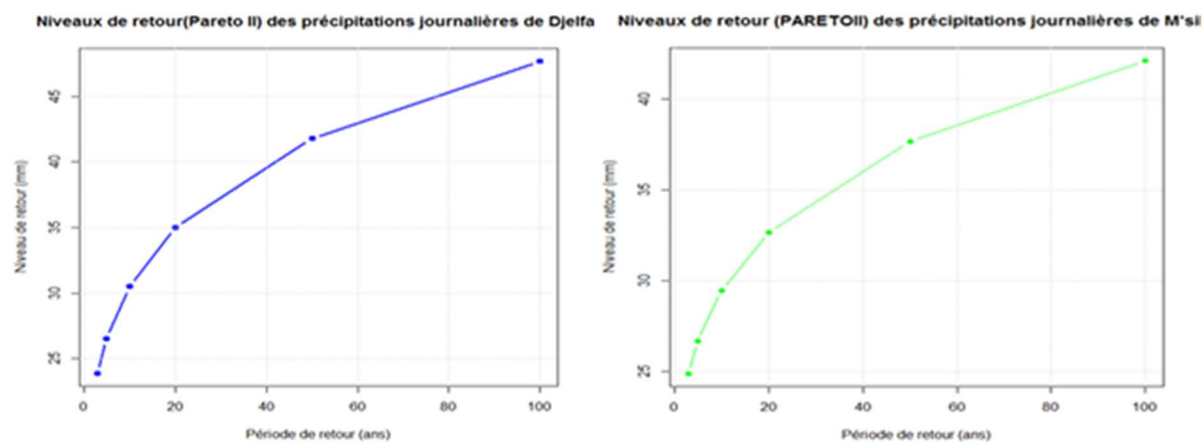
4.2.5 Périodes de retour et les niveaux de précipitations associés

Table N° 4: Périodes et Niveaux de Retour des Précipitations Journalières

Périodes de retour (ans)	Djelfa		M'sila	
	Niveau de retour (mm/jour)	IC	Niveau de retour (mm/jour)	IC
03	23.88	[22.4 - 25.6]	24.89	[23.1 - 26.9]
05	26.52	[24.9 - 28.5].	26.69	[24.6 - 29.2]
10	30.5	[28.3 - 33.2].	29.46	[26.6 - 32.8]
20	34.98	[32.0 - 38.4].	32.66	[28.5 - 37.6]
50	41.78	[37.1 - 47].	37.65	[31.4 - 45.5]
100	47.69	[41.8 - 54.9].	42.12	[34.3 - 52.8]

Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

Figure N° 9:Évolution des niveaux de retour



Source : réalisé par mes soins, par l'application du logiciel R

De ce qui précède, il est clair que les résultats indiquent une relation croissante entre la période de retour et l'intensité des précipitations extrêmes pour Djelfa et Ms'ila, également, il est remarquable que les quantités probables pouvant être abattues sur Djelfa et M'sila sont voisines pour les périodes de retour inférieur à 20 ans.

Pour les périodes de retour de 50 et 100 ans (précipitations centennales), c'est plutôt le contraire, où un écart moyen est relevé entre les niveaux de retour y afférents s'élevant à plus de 5mm/jour, avec une intensité des épisodes de retour de Djelfa plus importante que ceux de M'sila.

La forme des courbes dénote l'augmentation de l'intensité des précipitations devenant plus modérée pour des périodes de retour plus longues (dépassant 50 ans). Ce comportement traduit une certaine lourdeur des queues, reflétant la faible possibilité d'occurrence d'événements extrêmement rares mais à des niveaux très intenses.

5. Conclusion :

A travers ce papier, il a été modélisé par le biais de la théorie des valeurs extrêmes (TVE) les précipitations journalières collectées par les stations pluviométriques installées au niveau de Djelfa et M'sila, et ce, en vue de déterminer le risque des inondations probables frappant le bassin versant Zahrez. Cependant il a été nécessaire de recourir à des observations journalières, s'étalant sur 24 ans, de 01-01-2001 au 31-12-2024. Dans ce sillage, l'approche adoptée pour ajuster les quantiles et prévoir les niveaux de retour, est l'approche des excès, basée sur la détermination du seuil.

Les paramètres de la distribution (de forme ξ et d'échelle ϕ) ont été estimés par la méthode de maximum vraisemblance (ML).

Il en ressort que le bassin versant connaît deux seuils sur lesquels les excès des précipitations journalières peuvent provoquer des crues intenses, à savoir pour Djelfa, il est de 10.49 mm/jour et pour M'sila, il est estimé à 30.5 mm/jour. Le BV enregistrées des niveaux de retour voisins pour celles inférieures à 20 ans, or pour Djelfa, ces niveaux connaîtront une intensité plus importante que M'sila, ce qui permet de déduire que des épisodes d'inondations associés à une probabilité de survenance de 0.02 et moins, sont plus importantes pour Djelfa que M'sila.

5. Liste des références :

1. Agence Spatiale Algérienne (s.d.), *Article sur les inondations*, site web : http://asal.dz/?page_id=1215 (consulté le 11/04/2025) ;
2. Algérie 360° (s.d.), *Journal numérique*, site web : <https://www.algerie360.com/> (consulté le 11/04/2025) ;
3. Bensaada, H. & Arab, M., Ann-Rech-Fo Algérie, "Le risque inondation dans le bassin versant d'Oued Koreich et les limites territoriales : cas des inondations de Bab el Oued, Alger", 2021, 11(02) ;
4. Bergaoui, Z. & Chebchoub, A., Revue des sciences hydrologiques, "Étude de la sensibilité d'estimation de la période de retour d'une crue connue seulement par la cote atteinte", 2014, N°5 ;
5. Betteka, S., Les valeurs extrêmes bivariées, Département de Mathématiques, Université Mohammed Khider, (Biskra, 2017) ;

6. Boukhari, G. & Benabdesselam, T., Rev. Sci. Technol. Synthèse, "Caractérisation de la pluviométrie du Nord-est Algérien : établissement des courbes intensité—durée—fréquence des pluies extrêmes", 2020, N°1 ;
7. Boukhari, G., Évaluation de l'intensité des pluies selon la période de retour et la durée, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Badji Mokhtar, (Annaba, Algérie, 2021) ;
8. Boutoutaou, D. & Zeggane, H., Revue scientifique et technique, "Méthode de calcul des crues des oueds en Algérie", 2014, N°24 et 25 ;
9. Boutoutaou, D. (2011), Relation entre intensité pluviale, la durée et la fréquence. Courbe IDF en zone aride : cas de Ouargla, Séminaire international sur les ressources en eau, 22–23 février 2011, ENSH Alger, Algérie ;
10. Chraitia, H., Revue d'économie et de statistique appliquée, "Modeling maximum of monthly average temperature using the generalized Pareto distribution at Jijel weather station from 1988 to 2018", 2021, N°01 ;
11. Coles, Stuart, An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer Series in Statistics, Springer-Verlag, (London, 2001) ;
12. Defossez, S., Évaluation des mesures de gestion du risque inondation. Application au cas des basses plaines de l'Aude, Université Montpellier II Paul-Valéry, (2009) ;
13. Kotz, Samuel & Nadarajah, Saralees, Extreme Value Distributions, Imperial College Press, (London, 2000) ;
14. Lang, M et Arnaud, P. "La modélisation des valeurs extrêmes de pluie et de crue en France", HAL Open Science, 13 juin 2017 ;
15. Longin, F., Annales d'économie et de statistiques, "Value at Risk : une nouvelle approche fondée sur les valeurs extrêmes", 1998, 52 ;
16. Longin, F., Journal de la société statistique de Paris, "La théorie des valeurs extrêmes : présentation et premières applications en finance", 1995, 136(01) ;
17. Mehaiguene, M., Étude des étiages et des débits de base au nord-ouest de l'Algérie, Université de Khemis Miliana, (2017) ;
18. Rancalli, Thierry, Théorie des valeurs extrêmes ou Modélisation des événements rares pour la gestion des risques, DESS 203, Université Paris IX Dauphine, Groupe de recherche opérationnelle – Crédit Lyonnais, (Paris, 2002) ;
19. Rosbjerg, D., Madsen, H. & Rasmussen, P. F., Water Resources Research, "Prédiction dans les séries de durée partielle avec les dépassements généralisés distribués par Pareto", 1992, N°11 ;
20. Météociel.fr (s.d.), *Données climatiques*, site web : https://www.meteociel.net/climatologie/obs_villes.php/ (consulté le 11/04/2025).