

Revue HoPE

Estimation d'un seuil d'alerte de risque d'inondation hydrologique en Commune IV du District de Bamako

Dabéré DEMBELE ^{a †}, Fatogoma BAMBA ^b, Djibrilla MOUSSA ^c

a. Doctorant à l'Institut de Pédagogie Universitaire (IPU), Bamako, Mali.

b. Ecole Nationale d'Ingénieur (ENI-ABT) 410, Ave Al Quads, Bamako, Mali.

c. Centre de formation professionnelle de Sénou, Bamako, Mali

Résumé

Les populations de la Commune IV du District de Bamako sont exposées aux risques d'inondation hydrologiques qui causent des pertes en vies humaines, matérielles et financières. L'estimation des seuils des risques d'inondation a toujours été un objectif des politiques et stratégies nationales pour renforcer la résilience des populations face aux catastrophes d'origine naturelle. Il s'avère qu'au Mali, la méthode de la moyenne des maxima annuels est utilisée pour estimer le seuil d'alerte de risque d'inondation hydrologique. La méthode d'estimation de seuil d'alerte, à partir des données excédant un seuil déterminé, par la théorie des valeurs extrêmes, la plus utilisée dans le monde, n'est pas utilisée au Mali bien qu'efficace. En utilisant cette dernière méthode appliquée aux données hydrologiques observées au cours de la période 1980 - 2015, pour estimer le seuil d'alerte de risque d'inondation hydrologique en Commune IV, nous avons trouvé 372,3cm différent de 380 cm précédemment utilisé qui est aussi différent de la valeur estimée (323.6cm) en utilisant la méthode de la moyenne de maxima annuels. Nous avons trouvé que pour le même seuil, 372,3cm, les valeurs des estimations du maximum de vraisemblance des paramètres de forme et d'échelle de la Distribution Généralisée de Pareto (DGP) varient suivant l'indépendance ou la dépendance dans le temps des valeurs observées au-dessus de ce seuil. Le test d'indépendance a montré que la meilleure méthode d'estimation du seuil d'alerte est celle qui considère que les données observées de ce seuil sont dépendantes dans le temps. Nous avons retenu 372,3cm comme seuil d'alerte d'inondation de crue en commune IV.

© Revue HOPE, tous droits réservés

Mots clés : Seuil d'alerte d'inondation, Théorie des valeurs extrêmes, Indice Extrémal.

Abstract

The populations of Commune IV of the Bamako District are exposed to the risks of hydrological flooding which causes human life, material and financial-related losses. Estimating flood risk thresholds has always been an objective of national policies and strategies to strengthen the resilience of populations in the face of natural disasters. It turns out that in Mali, the method of the average of annual maxima is used to estimate the hydrological flood risk alert threshold. The method of estimating the alert threshold, from data exceeding a threshold determined by the theory of extreme values, the most used in the world, is not used in Mali although effective. Using this last method applied to hydrological data observed during the period 1980 - 2015, to estimate the hydrological flood risk alert threshold in Commune IV, we found 372.3cm different from 380cm previously used, which is also different from the estimated value (323.6cm) in using the method of the average of annual maxima. We found that for the same threshold, 372.3cm, the values of the maximum likelihood estimate of the shape and scale parameters of the Generalized Pareto Distribution (DGP) vary depending on the independence or dependence over time of the values observed above this threshold. The independence test showed that the best method for estimating the alert threshold is the one which considers that the observed data of this threshold are dependent over time. We have retained 372.3cm as the flood warning threshold in commune IV.

© Revue HOPE, all right reserved

Keywords: Flood Alert Threshold, Extreme value theory, Extremal index.

† Auteur correspondant : Mr Dabéré Dembélé, dabere.dembele@gmail.com

Article reçu le : 17/09/2023, Version corrigée reçue le 20/06/2023, Accepté le 25/12/2023.

1. Introduction

Les dix dernières années, les populations de la Commune IV du District de Bamako ont été exposées aux inondations qui ont entraîné d'énormes pertes en vies humaines, biens matériels et en habitations. Les années d'inondation pertinentes répertoriées d'après les observations hydrologiques sont celles de 1967, 1969, 1994, 2001, et 2003 (C. Cissé et al., 2007). D'après Ballo (2013), la Commune IV a connu plusieurs inondations notamment en 1992, 1999, 2002, 2012 et 2013. Mwinguè et Bonnet. (2020) rappellent que jusqu'à présent, Bamako porte encore les stigmates de certaines inondations majeures notamment celles de 2009, 2013 et 2018. Chahinian et al. (2023) rappellent que les inondations du 19 Mai 2019 à Bamako ont causé 16 morts et détruits 124 maisons. Bamba, (2017), a fait l'analyse du risque d'inondation sur la rive nord du fleuve Niger à Bamako, Mali et a pu identifier les différentes zones sensibles à l'inondation et celles vulnérables à l'inondation. Ses analyses ont montré que les communes I, II, et IV sont plus exposées à l'extension du risque d'inondation et la commune III est moins exposée. Selon Bamba, (2017), la plupart des quartiers spontanés de la rive nord particulièrement la commune I et la commune IV, qui par leur précarité d'aménagements et le matériau de construction (banco) utilisé sont beaucoup affectées par les inondations chaque année. Les conséquences du sinistre lié aux inondations du 28 août 2013 ont été désastreuses avec 3 décès, 789 familles sinistrées regroupant 7 077 âmes, 168 maisons détruites, des biens emportés (Ballo, 2013). Compte tenu de la récurrence et de l'ampleur des dégâts causés par les inondations en zones urbaines, renforcés par les effets du changement climatique, il nous a semblé plus opportun et réaliste d'estimer le seuil d'alerte d'inondation hydrologique, pour mieux prévenir ou atténuer les effets néfastes des inondations.

Il ressort qu'au Mali, il n'y a pas encore eu d'estimation scientifique de seuil d'alerte efficace de risque de catastrophes liées aux inondations hydrologiques pouvant servir à une prévention de ces aléas dans la Commune IV du District de Bamako. L'objet de cette étude est de faire une comparaison d'efficacité entre le seuil d'alerte de crue de la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH) et le seuil estimé par notre méthode. Pour cela, nous avons répondu à la question suivante : est-ce que la cote moyenne annuelle de référence 380cm est efficace comme seuil d'alerte aux risques d'inondation de crues en Commune IV du District de Bamako ? Selon Cissé et al. (2007), la connaissance de la cote d'alerte passe par l'analyse fréquentielle des hauteurs maximales ou des débits maximaux suivant la disponibilité des données de la station hydrologique donnée. Le but de notre étude est de contribuer à mieux cerner l'estimation du seuil d'alerte de risque d'inondation hydrologique en utilisant la méthode de la théorie des valeurs extrêmes et de tester l'efficacité du seuil estimé par la DNH à partir de la moyenne annuelle des maximas.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

La commune IV (Figure 1) est limitée à l'est par la commune III, au nord et à l'ouest par le cercle de Kati et au sud par le fleuve Niger. Située sur la rive gauche du fleuve Niger et à l'extrême ouest du District de Bamako, la commune IV s'étend sur une superficie de 3 768 ha soit 14,11% de la superficie du district de Bamako avec une population estimée à 550 712 habitants (DRSIAP, 2019). La commune IV repose sur le socle granitique et schisteux du précambrien, recouvert par une couverture sédimentaire de grès. Elle est entièrement située dans un vaste ensemble morphologique du plateau Mandingue. Le relief est dominé par quelques collines qui se situent dans sa partie Ouest et Nord, notamment le *Lassa koulou*, le *koulouni yèlèko* et le *koko koulou* qui sont des formations gréseuses constituant les dernières marches des Mandingues, et la vallée du Niger (Sibiribougou, Kalabambougou, Sébénikoro). Ces collines constituent des contraintes naturelles pour l'accessibilité de certains quartiers comme Lassa. Le

climat est de type soudanien marqué par l'alternance d'une saison pluvieuse appelée hivernage avec une pluviométrie comprise entre 800 et 1200mm/an, et saison sèche. La saison des pluies s'étend sur 5 mois de juin à octobre. La saison sèche repartie en deux périodes, une période froide (de Novembre à Janvier) et celle chaude (de février à mai). La commune IV est traversée au sud par le fleuve Niger, au centre par la rivière « *Woyowayanko* » source de nombreuses inondations. La rivière de *Farako* ou *Diafaranako* tire sa source des collines de Lassa pour aboutir au fleuve Niger. Il y a également le *Souroutoumba* de *Sibiribougou*.

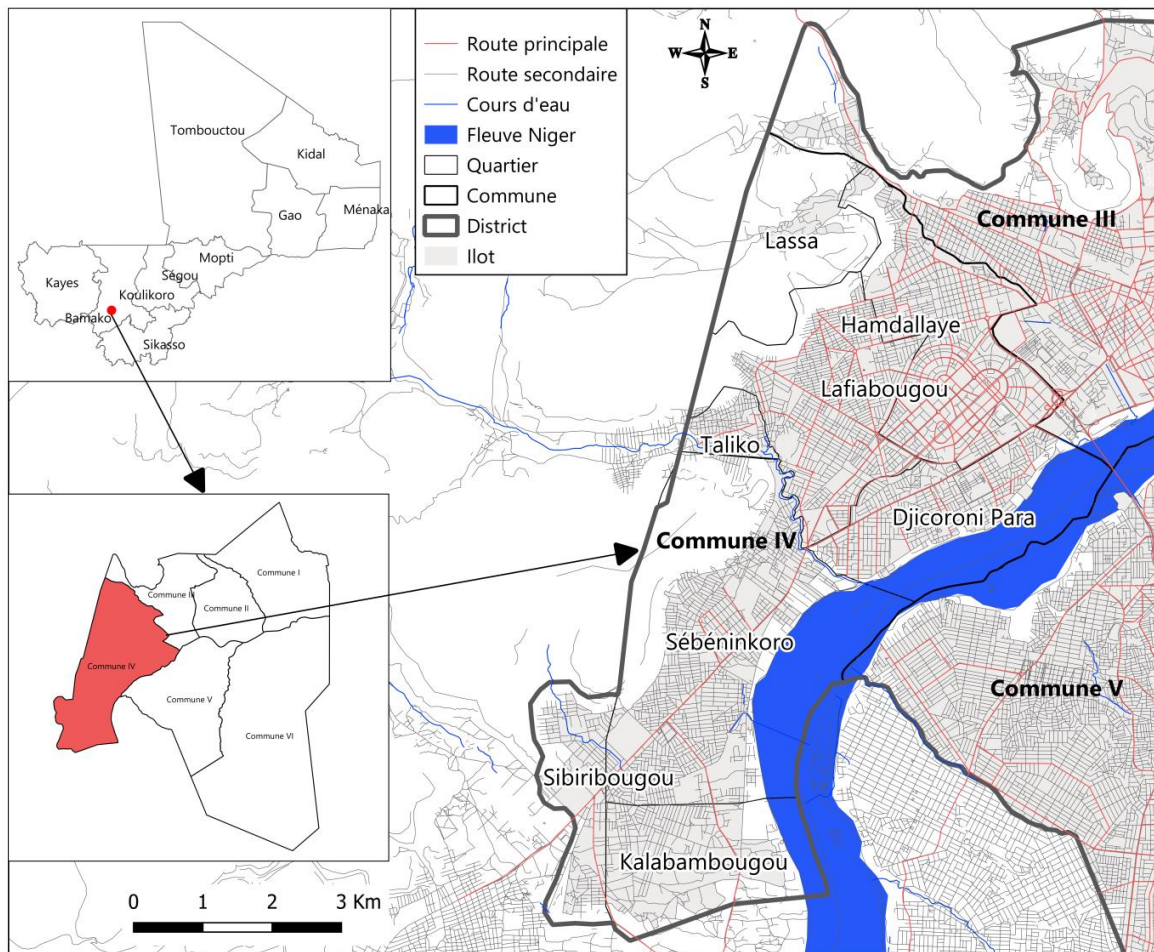


Figure 1 : Carte de localisation de la commune IV de Bamako

2.2. Méthode d'analyse

2.2.1. Collecte et traitement des données

Les données hydrologiques sont collectées auprès de la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH) sur la période de 1980 à 2015. Ces données sont issues des mesures des cotes au niveau de la station de Bamako dont les coordonnées sont : latitude ($12^{\circ}37'53''$), longitude ($7^{\circ}59'34''$) et altitude (316). Les données sont journalières et chaque année contient 366 données. Les quelques données manquantes sont remplacées par la moyenne des données des années $n-1$ et $n+1$. Nous avons utilisé le logiciel R (URL <https://R-project.org/>) pour les lire et les traiter par un programme que nous avons élaboré nous-mêmes. Nous avons ensuite analysé les données hydrologiques collectées pour estimer le seuil d'alerte par la méthode d'analyse des valeurs extrêmes des données suivant la distribution généralisée de Pareto (DGP).

L'approche méthodologique est basée sur une revue documentaire, la collecte des données, l'estimation du seuil d'alerte d'inondation hydrologique par la méthode de la théorie des valeurs extrêmes, et la comparaison du seuil estimé avec 380 cm, utilisé par la DNH. Pour l'estimation du seuil, nous avons utilisé la théorie de valeurs extrêmes basée sur une théorie asymptotique pour donner les modèles qui cartographient les données extrêmes (Coles, 2001) et précisément la méthode des excès au-dessus d'un seuil (Embrecht et al., 1997); (Reiss, Thomas, 2001) et (Coles, 2001). Cette méthode est appelée POT (peaks over the threshold : points au-dessus du seuil) qui utilise la distribution généralisée de Pareto. Selon la théorie des valeurs extrêmes, si $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ est une série de variables indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d), u un seuil élevé, la distribution des valeurs de x qui excèdent le seuil u est définie par :

$$F_u(y) = P\{X - u = Y \leq y \mid X > u\} = \frac{F(y+u) - F(u)}{1 - F(u)} \quad (1)$$

qui représente la probabilité que la valeur de x soit supérieure au seuil u d'une valeur y sachant que x dépasse le seuil u .

Les théorèmes de Balkema et de Haan (1974) et de Pickands (1975) montrent que, pour un seuil suffisamment élevé u , la fonction de distribution des excès en (2.1) peut s'ajuster à la DGP (Distribution Généralisée de Pareto) de telle sorte que, plus le seuil est élevé, plus la distribution des excès $F_u(y)$ converge vers la DGP, qui est définie par :

$$G(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \frac{x-u}{\beta}\right)^{-1/\xi} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x-u}{\beta}} & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

où ξ est le paramètre de forme et β est le paramètre d'échelle dépendant du seuil u et de la distribution $F(x)$ de la série des données x .

Supposons que $\{x_i; i = 1, 2, \dots\}$ est une série non stationnaire. Pour la rendre stationnaire, selon (Leadbetter, 1983), elle est transformée par une fonction. Le paramètre liant la fonction $F(x)$ de $\{x_i; i = 1, 2, \dots\}$ et celle des valeurs résultantes de la transformation, θ est appelé l'indice extrémal de la série $\{x_n\}$.

θ peut prendre toutes les valeurs dans l'intervalle $[0; 1]$ et θ^{-1} est interprété comme la taille moyenne des excès de cluster sur un certain seuil élevé. Lorsque $\theta = 0$, il correspond à une forte dépendance (des clusters de taille infinie), mais toutes les valeurs ne peuvent pas être les mêmes. Alors que, quand $\theta = 1$, ceci correspond à une indépendance asymptotique des extrêmes, mais cela ne signifie pas que la série est complètement indépendante. Dans le cas des séries non-stationnaires, il y a également un changement systématique de la tendance en fonction du temps en raison du cycle hydrologique. Dans ce cas, la série suit une distribution DGP en prenant $\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)$, où la fonction exponentielle est utilisée pour assurer que la positivité de β soit respectée pour toutes les valeurs de temps.

Les paramètres de forme des valeurs extrêmes sont difficiles à estimer avec précision, il est donc généralement irréaliste d'essayer de modéliser le paramètre de forme ξ comme une fonction du temps. Selon (Coles, 2001), pour un seuil élevé u , l'estimateur de la queue est donné par :

$$\hat{F}(x) = 1 - \frac{N_u}{n} \left(1 + \hat{\xi} \frac{x-u}{\hat{\beta}}\right)^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \quad (3)$$

où N_u est le nombre de dépassements et n est la taille de l'échantillon.

Pour une probabilité q donné, un quantile \hat{x}_q est estimé en inversant l'estimateur de la queue dans l'équation (2.5) :

$$\hat{x}_q = u + \frac{\hat{\beta}}{\hat{\xi}} \left(\left(\frac{n}{N_u} (1 - q) \right)^{-\hat{\xi}} - 1 \right) \quad (4)$$

Si les données ne sont pas i.i.d alors le quintile x_q dépendra de l'indice extrême θ et l'expression (4) sera :

$$\hat{x}_q = u + \frac{\hat{\beta}}{\xi} \left(\left(\frac{n\theta}{Nu} (1 - q) \right)^{-\xi} - 1 \right) \quad (5)$$

2.2.2. Outils d'analyse

Nous avons élaboré un programme susmentionné à la section 2.2.1, en utilisant le logiciel R, pour les analyser. Un des outils d'analyse des données du programme est la fonction de la moyenne des excès qui est définie par :

$$e_n(u) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - u)}{\sum_{i=1}^n I_{\{X_i > u\}}} \quad (6)$$

où $I = 1$ if $X_i > u$ et 0 sinon. Si le MEF (Mean Exces Function : fonction de la moyenne des excès) empirique a une pente positive au-dessus d'un certain seuil u , c'est une indication que les données suivent la DGP avec un paramètre de forme ξ positive.

Les données hydrologiques ont été collectées sur la période de 1980 à 2015, soit sur une durée de 36 ans. Nous avons utilisé le logiciel R pour les analyser.

Le modèle de traitement utilisé est la DGP définie par l'équation (2. 2). Pour rendre stationnaire, les données ont été standardisées par une transformation des paramètres de la moyenne arithmétique et de l'écart-type.

En cas de non-stationnarité de la série standardisée, cela peut indiquer qu'il y a un changement systématique de la tendance en fonction du temps en raison du cycle hydrologique. Dans ce cas, la série standardisée est transformée par la fonction $\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)$, où la fonction exponentielle est utilisée pour assurer que la positivité de β soit respectée pour toutes les valeurs temporaires.

2.2.3. Plan d'analyse des données

Nous avons ensuite analysé les données hydrologiques collectées pour estimer le seuil d'alerte par la méthode d'analyse des valeurs extrêmes des données suivant la DGP. Le plan d'analyse consiste à i) sélectionner le seuil par la méthode de la moyenne des excès définie par l'équation (6) ; ii) estimer la queue de la distribution de probabilité des données par l'équation (3) ; iii) estimer le quintile \hat{x}_q pour une probabilité q donné dans l'équation (4) en inversant l'estimateur de la queue dans l'équation (1) ; iv) estimer l'indice extrême dont dépend le quintile \hat{x}_q par l'expression (2.5), si les données ne sont pas i.i.d.

3. Résultats et Discussion

3.1. Analyse des données hydrologiques stationnaires

Supposons que la série de la distribution des valeurs extrêmes est stationnaire, c'est-à-dire que le débit de demain ne dépend pas du débit d'aujourd'hui. Pour déterminer la distribution des données, l'approche la plus efficace est de modéliser le comportement des valeurs extrêmes des données hydrologiques au-dessus d'un seuil élevé en utilisant la distribution DGP définie en (eq2). Considérons que la série originale x_1, x_2, \dots, x_n , des données hydrologiques est normalisée pour réduire l'effet de volatilité dans les séries en utilisant la moyenne et l'écart type de cette série.

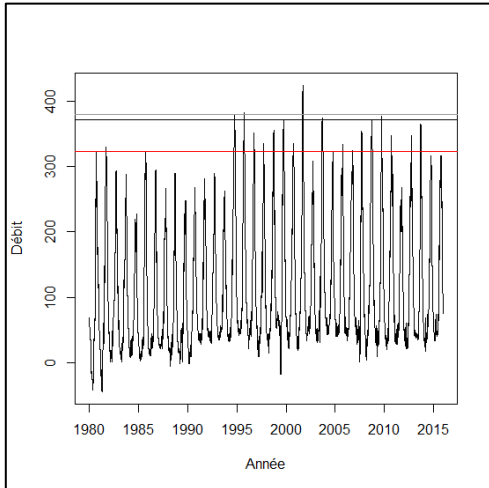


Figure 2: Evolution des cotes maximales du fleuve Niger à Bamako de 1980 à 2015

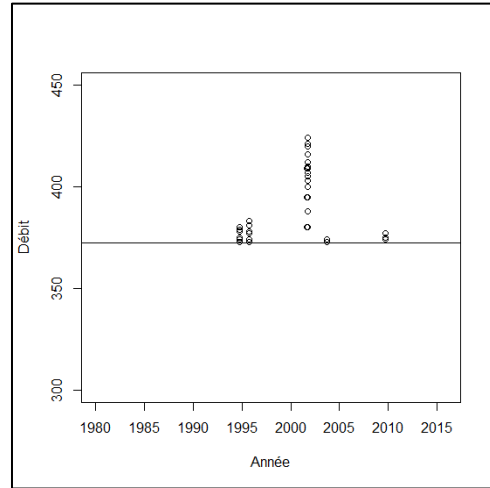


Figure 3: Dépendance de la série dans le temps des données hydrologiques

La fonction de la moyenne résiduelle des excès de la série normalisée est indiquée sur la figure 4 ci-dessous. La courbe est initialement linéaire, mais présente une courbure importante dans l'intervalle $2,6 \leq u \leq 3$, où u correspond au seuil probable u_0 . Pour $u < 2,75$, le graphique est raisonnablement linéaire lorsqu'il est jugé par rapport à l'intervalle de confiance. Donc, nous proposons que u soit fixé à 2,75 et correspond à $u_0 = 372,3$. Ce choix conduit à 41 excès au seuil u_0 dans la série des données hydrologiques de longueur 13176 (nombre de données hydrologiques) (figure 2 et 3 ci-dessus). Ainsi, nous aurons : 41 sur 13 176.

La validité du seuil $u_0 = 372,3cm$ peut être justifiée plus en détail en vérifiant la stabilité des estimations des paramètres d'échelle et de forme de DGP dans la figure 5 ci-dessous. Cela demande une estimation de ces paramètres pour u variant dans l'intervalle $[2,0 ; 3,2]$ partagé en 100 parties.

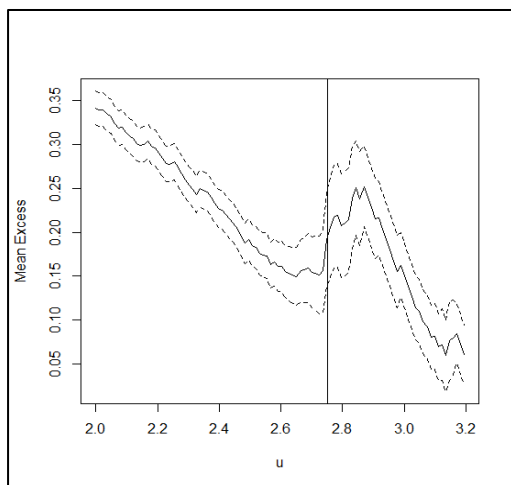


Figure 4 : La courbe de la moyenne résiduelle des excès de la série des données hydrologiques

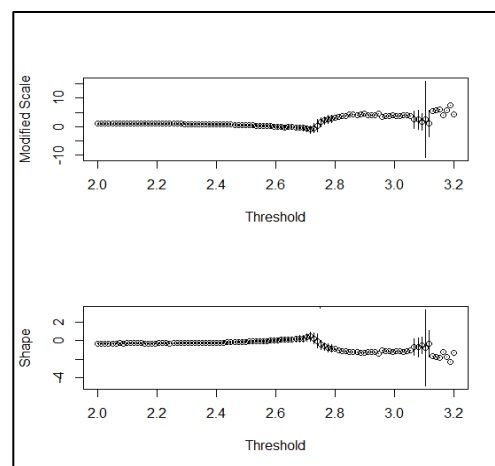


Figure 4 : Estimations des paramètres de la DGP contre le seuil des données hydrologiques

La figure 5 ci-dessus montre la représentation graphique des paramètres mentionnés en fonction du seuil u . Alors qu'en considérant que le seuil est 380cm, la probabilité de dépassement est de $22/13176 = 0,0017$. Donc il y a un risque résiduel de : $0,0031 - 0,0017 = 0,0014$. Ce qui est visible sur la figure 2 ci-

dessus 1a où la ligne horizontale en noir est notre seuil $u_0 = 372,3$ cm et celle en gris est le seuil officiel égal à 380 cm. Les estimations des paramètres de la DGP sont $(\hat{\sigma}, \hat{\xi}) = (28,3; -0,48)$ avec des erreurs-types de 7.92 et 0.24 respectivement. Les paramètres estimés sont, respectivement, dans un intervalle de confiance de 95% : $28,3 \pm 1,96 * 7,92 = [12,78 ; 43,82]$ pour σ et $-0,48 \pm 1,96 * 0,24 = [-0,95, -0,01]$ pour ξ .

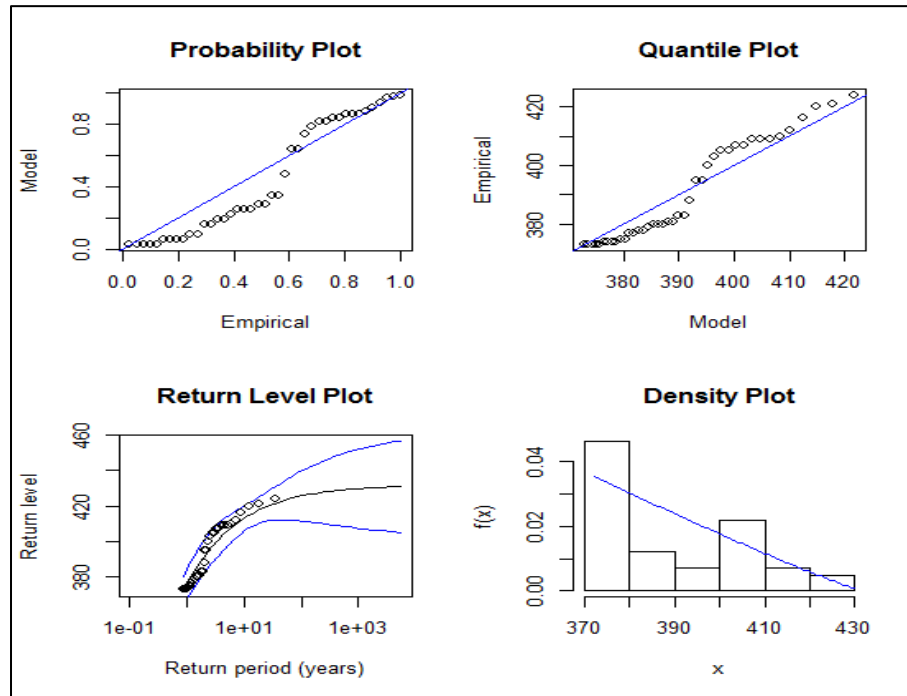


Figure 5: Test de la fonction de DGP estimée

Dans la figure 6 ci-dessus, l'ajustement de la courbe de la fonction des quantiles et de la courbe de la fonction de probabilité semble peu convaincant en raison de l'écart par rapport à la droite et la fonction de densité n'est pas ajustée à l'histogramme. La courbe de la fonction du « niveau de retour » montre une grande incertitude qui s'accroît pour les niveaux élevés. Quelques valeurs extrêmes sont au bord de l'intervalle de confiance montrant ainsi une incertitude dans l'estimation des paramètres. Rappelons que la courbe de la fonction du « niveau de retour » prend en compte non seulement la distribution des extrêmes à travers DGP mais aussi la dépendance à l'extrême dans la série à travers l'estimation de l'indice extrême.

La valeur estimée de vraisemblance négative du paramètre de forme tracée en fonction du paramètre de forme estimé dans la figure 7 ci-dessous, montre que le paramètre de forme est entre -0.72 et -0.23. La figure 7 montre aussi que l'incertitude de la distribution estimée est reflétée dans l'intervalle de confiance par une asymétrie considérable dans la surface du profil de ressemblance. Cette incertitude dans l'estimation de la distribution est due à la non stationnarité des données.

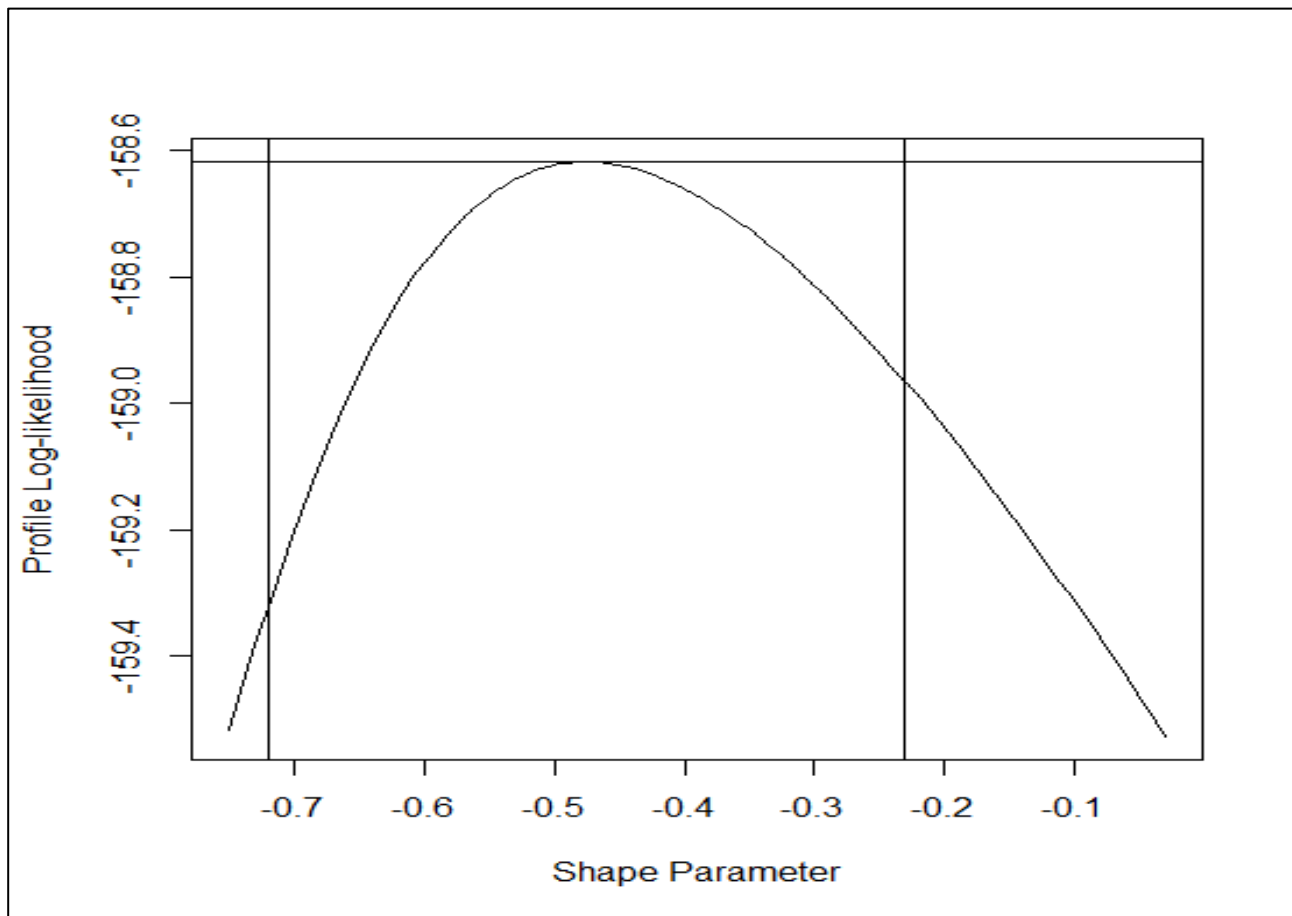


Figure 6 : Test du paramètre de forme

3.2. Analyse des données hydrologiques non stationnaires

La figure 7 ci-dessus, montre un intervalle de confiance asymétrique de l'estimation de vraisemblance du paramètre de forme parce que la distribution de la série des données hydrologique n'est pas stationnaire. Ce qui se justifie par les périodes de pic et de tendance dans le temps de la série des données hydrologiques observées au niveau des figures 1 et 2. Pour rendre cette distribution stationnaire, la série des données est transformée par la fonction $\beta(t) = \exp(\beta_1 + \beta_2 t)$, où t est le nombre de jours. L'estimation de la fonction β est $\beta(t) = \exp(-1,695 + 0,001t)$ pendant que $\hat{\xi}(t) = -1,093$. Le test de stationnarité donne $D = 19,9214$ correspondant à la valeur $\chi^2(2)$ montrant ainsi une différence entre les deux distributions.

3.3. Analyse des données hydrologiques dépendantes dans le temps

La différence trouvée entre les deux distributions de la série non stationnaire et de la série stationnaire est aussi due à la dépendance dans le temps de la série des données, mais ne montre pas que la série transformée est indépendante et identiquement distribuée. En effet, les données tracées sur la figure 2 montrent des clusters des données dans le temps. Nous avons procédé à une déclustérisation de la série des données hydrologiques pour obtenir un ensemble d'excédents au seuil qui sont approximativement indépendants. L'indice extrémal de la série est estimé par $\hat{\theta} = \frac{5}{41} = 0,122$; montrant ainsi une forte dépendance dans les excédents au-dessus du seuil 372,3cm. L'évaluation du seuil de risque d'inondation hydrologique est résumée dans le tableau 1 pour les cas de données statistiques

stationnaires, non stationnaires et dépendantes dans le temps. Le tableau 1 montre aussi que pour le même seuil (le même nombre d'excès), les valeurs des estimations du maximum de vraisemblance des paramètres de forme et d'échelle de la DGP varient suivant les cas de données stationnaires, non stationnaires et dépendantes dans le temps. Le meilleur choix de la DGP est donc le cas des séries dépendantes dans le temps. En utilisant la méthode des excédants au-dessus du seuil, nous avons réalisé l'estimation de la cote d'inondation à Bamako et avons trouvé 372,3cm différent de 380cm actuellement utilisé par la DNH.

Tableau 1: Evaluation des paramètres de la DGP pour la série hydrologique

Paramètres de distribution	Séries stationnaires	Séries non stationnaires	Séries dépendantes
Seuil optimal	372,3	372,3	372,3
Nombre d'excès	41	41	41
Taux d'excédance	0,003	0,003	0,003
Nombre de clusters			5
Indice extrémal			$5/41 = 0.122$
Log de vraisemblance négatif	158.618	138,696	138,696
Maximum de vraisemblance de l'estimation du paramètre d'échelle	28,34	$\exp(-1,69 + 0,001t)$	$\exp(-1,69 + 0,001t)$
Maximum de vraisemblance de l'estimation du paramètre de forme	-0,48	-1,093	-1,093
Ecart-type du paramètre d'échelle	7,92	$0,001(\beta_0)$ $0.000(\beta_1)$	$0,001(\beta_0)$ $0.000(\beta_1)$
Ecart-type du paramètre de forme	0,24	0,001	0.001

Sources : Analyses des données, 2023

Des études similaires sur l'estimation des cotes d'inondation à Bamako ont été réalisées par Diawara et al. (2019) ; Cissé et al. (2007). Ils ont trouvé 399 cm comme seuils en utilisant la méthode de la moyenne des maxima. Leur méthode est différente de celle de Pareto utilisant les valeurs extrêmes au-dessus d'un seuil. La valeur 399cm (moyenne des côtes maximales à Bamako entre 1907 et 1967) trouvée par Diawara et al. (2019) comme seuil d'inondation est supérieure à la cote d'alerte 380cm estimée par la DNH le 14 septembre 2016. Utilisant la loi normale avec la méthode du maximum de vraisemblance, Cissé et al., (2007) ont estimé qu'en année moyenne, la cote de 359cm sera observée à Bamako. En utilisant la méthode de la moyenne des maxima, cela pourrait être un risque car à partir de 372,3cm une inondation pourrait survenir et 359 cm ou 323,6 cm pourrait être une fausse alerte.

Selon (Jacon, 1968), la crue exceptionnelle du Niger en 1967 montre que des précipitations des mois de septembre et d'octobre 1967 sont la source d'observations de hauteurs maximales supérieures à 376cm survenu le 12 septembre 1967 et confirme que la période d'inondation va du 11 septembre au 28 octobre. Durant cette période le niveau est supérieur à 372cm, ce qui valide le seuil de 372.3cm. La méthode de la moyenne des maxima obéissant à la loi Généralisée des Valeurs extrêmes (GEV) ou loi de Gumbel est utilisée par beaucoup d'auteurs pour sa simplicité comme l'a reconnu (Koungbanane et al., (2020) et Pan. et al. (2023). La pertinence du choix de la méthode utilisée, notamment celle de distribution généralisée pour estimer la cote d'alerte d'inondation est soutenue par Coles et al. (2003) ; Koutsoyannis, (2004) ; Álvaro et al. (2021) ; Souanef (2015) ; Kouassi et al. (2018), qui ont montré que la méthode de la moyenne des maxima est moins efficace que la méthode de la théorie de valeurs extrêmes observées au-dessus d'un seuil déterminé. Nous avons analysé le comportement de la série des données au-dessus du seuil (série stationnaire, non stationnaire et indépendante) et avons trouvé que le meilleur choix de la

distribution généralisée de Pareto (DGP) est le cas des séries dépendantes dans le temps. Nous avons estimé l'indice extrémal montrant ainsi une dépendance dans les excédents au-dessus du seuil 372,3cm. L'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes pour estimer le seuil d'alerte d'inondation hydrologique en Commune IV est plus efficace que l'utilisation de la moyenne annuelle des maxima au-dessus d'un seuil. Le niveau de la cote d'alerte 372,3cm estimée en utilisant le modèle de la distribution généralisée de Pareto, est plus efficace et différent de 380cm.

Conclusion

En traitant la problématique concernant l'estimation de seuil d'alerte du risque d'inondation dans la Commune IV du District de Bamako, nous avons vérifié l'efficacité du seuil d'alerte d'inondation hydrologique 380 cm et la dépendance des données hydrologiques observées au-dessus du seuil estimé 372,3 cm. La cote 380 cm est le seuil actuel d'alerte des autorités d'hydrologie. Au Mali, l'indice extrémal que nous avons estimé est rarement estimé dans les modélisations hydrologiques pour déterminer la dépendance des données au-dessus d'un seuil. Nous avons utilisé la méthode, des excès au-dessus d'un seuil, de la théorie des valeurs extrêmes pour estimer le seuil d'alerte d'inondation hydrologique en Commune IV. Elle nous a permis de comparer le seuil estimé avec le seuil d'alerte de crue des autorités de l'hydrologie. Nous avons trouvé qu'il est différent du seuil estimé. Nous avons trouvé qu'il y a une forte dépendance dans les excès au-dessus du seuil pour les données hydrologiques. Nous avons utilisé la méthode des excédents dans la détermination d'un seuil de la théorie des valeurs extrêmes pour estimer le seuil d'alerte d'inondation hydrologique en Commune IV. Nous avons reconnu que l'une des limites de cette recherche était aussi liée au fait que les données hydrologiques récentes ne sont pas disponibles. Ainsi, il est juste de mentionner que les résultats de la présente recherche pourront servir de base solide pour toute étude visant à estimer le seuil d'alerte d'inondation hydrologique au Mali en vue de renforcer le dispositif de prévention des risques de catastrophes liées aux inondations. Elle pourrait servir de base pour la mise à jour du seuil ou de la cote d'alerte d'inondation hydrologique identifiée par la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH).

Références

- Álvaro J. B., Bonfante, F. M. (2021). Evaluation of generalized extreme value and Gumbel distributions for estimating maximum daily rainfall. pp 654-664.
- Balkema, A., et Haan, L. (1974). Residual Life Time at Great Age. *The Annals of Probability*, 2, 792-804.
- Bamba. H (2017). Analyse du risque d'inondation sur la rive nord du fleuve Niger à Bamako, Mali. Mémoire de fin d'étude DESS, Institut régional africain des sciences et techniques de l'information géospatiale (AFRIGIST), 59 pages.
- Cissé, C. Diarra, L. Fofana, A. Pierrick, G. (2007). Prévention des risques ; avenir du fleuve Niger, chapitre 4, pp.310-363, Editions IRD 200
- Demetris, K. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation / Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique, *Hydrological Sciences Journal*, 49:4, pp575-590, DOI: 10.1623/hysj.49.4.575.54430.

- Diawara, H., Maïga, F., Ballo, A., Mallé, K.S. (2019). district de Bamako Rev. Sc. Env. Univ., Lomé (Togo), n° 16, vol. 1 ISSN 1812-1403 Evaluation des zones à risque d'inondation sur les berges du fleuve Niger dans le District de Bamako. pp193-319.
- Jaccon, G. (1968). La crue exceptionnelle du fleuve Niger en 1967. cah. ORSTOM. Sér. Hydrol.vol.v, numéro1, 1968. pp15-54.
- Kouassi, A. M., Relwindé, A.-K. N., Koffi, B. Y., Koffi, F. K., Biemi, J. (2018). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). Statistical modelling. Maximum annual rainfall in the Abidjan district (southern Ivory Coast), an article of Journal /Water Science Volume 31, Number 2, 2018, p.147-160.
- Koungbanane, D., Zahiri, P. E., Lare, L. Y., Totin, V., Sourou, H., Amoussou, E., (2020). Variabilité hydro climatique et risques d'inondation dans le bassin versant de l'Oti au Togo Afrique SCIENCE 17(1) (2020) 73 – 88.pp1-17.
- Leadbetter, MR. (1983): Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes. eBook ISBN (978-1-4612-5449-2) XII, 336. pp3-30
- Mwinguè L.C.DA., et Bonnet, E. (2020). Risques d'inondation au Sahel : Modélisation des facteurs sociaux porteurs de dommages structurels aux ménages de Bamako (Mali). 2020 Numéro spécial. pp1-19.
- Chahinian, N., Alcoba, M., Dembélé, N. J., Cazenave, F., Bouvier, C. (2023) : Evaluation of an early flood warning system in Bamako (Mali) : Lessons learned from the flood of May 2019. Journal of Flood Risk Management, 2023, 16 (3), pp.e12878. 10.1111/jfr3.12878. hal-04036806. pp1-18.
- Embrechts, P. Kluppelberg, C. Mikosch, T. (1997). Modelling Extremal Events for Insurance and Finance, Springer-Verlag. 645 pp (1.04 kg). ISSN. 655 pages.
- Pickands, J. (1975): "Statistical Inference Using Extreme Order Statistics." Ann. Statist. 3 (1) 119 - 131, January, 1975. pp1-13.
- Reiss, R-D. Thomas, M. Coles S.G (2001). Statistical Analysis of Extreme Values with Applications to Insurance Finance. Hydrology and Other Fields. Third Edition. 511 pages.
- Souanef, N. (2015). Analyse fréquentielle des débits max de crues de L'Oued Abiod. Master's thesis, Université Mohamed Khider - Biskra. 134 pages.