



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

Vulnérabilité De La Commune Urbaine De Mopti Aux Inondations

Abdoulkadri Oumarou Toure, PhD

Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako - Faculté
d'Histoire et Géographie, Département de Géographie, Mali

Mostafia Boughalem, Professeur

Université Ain Temouchent - Institut des sciences et Technologie -
Département SNV-Labo Hydrologie Appliquée et environnement, Algérie

Fatoumata Maiga, PhD

Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako- Faculté
d'Histoire et Géographie, Département de Géographie, Mali

Issa Ouattara, PhD

Institut de Développement Economique et Social de Bamako, Mali

[Doi:10.19044/esj.2021.v17n40p37](https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n40p37)

Submitted: 05 August 2021
Accepted: 29 August 2021
Published: 30 November 2021

Copyright 2021 Author(s)
Under Creative Commons BY-NC-ND
4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Toure O.A., Boughalem M., Maiga F., & Ouattara I., (2021). *Vulnérabilité De La Commune Urbaine De Mopti Aux Inondations*. European Scientific Journal, ESJ, 17(40), 37.

<https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n40p37>

Résumé

La commune urbaine de Mopti, particulièrement la ville du même nom, du fait de son positionnement géographique (à la confluence du fleuve Niger et de son principal affluent, le Bani) est exposée aux épisodes d'inondation. L'objectif de cette recherche est de montrer la vulnérabilité de la commune aux évènements pluviométriques et hydriques extrêmes et de proposer des pistes de solutions en vue de prévenir les risques d'inondation. La démarche méthodologique a consisté à analyser les données pluviométriques et hydriques (données de crues et de hauteurs d'eau) journalières de la station de Mopti à l'aide des logiciels Excel et XLSTAT. Les analyses portent sur le calcul des indices de précipitations et hydriques extrêmes et la détermination de leur période de retour. Les résultats font ressortir que la fréquence des évènements pluviométriques et hydriques dans la commune a augmenté depuis la moitié des années 2000, occasionnant des inondations faisant de plus en plus de victimes et d'importants dégâts en raison

notamment des problèmes d'aménagement de la commune. Face à ce défi, faudra-t-il la prise en compte des risques climatiques dans les documents de planification locale, une large sensibilisation des populations et le strict respect de la réglementation en vigueur.

Mots clés: Inondation, Vulnérabilité, Débits Extrêmes, Précipitations Extrêmes, Mopti

The Populations' Vulnerability of Mopti's Urban Municipality to Extreme Rainfall and Water

Abdoulkadri Oumarou Toure, PhD

Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako - Faculté d'Histoire et Géographie, Département de Géographie, Mali

Mostafia Boughalem, Professeur

Université Ain Temouchent - Institut des sciences et Technologie - Département SNV-Labo Hydrologie Appliquée et environnement, Algérie

Fatoumata Maiga, Phd

Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako- Faculté d'Histoire et Géographie, Département de Géographie, Mali

Issa Ouattara, PhD

Institut de Développement Economique et Social de Bamako, Mali

Abstract

The urban commune of Mopti, particularly the city of the same name, due to its geographical location (at the confluence of the Niger River and its main tributary, the Bani) is exposed to flooding episodes. The objective of this research is to show the vulnerability of the town to extreme rainfall and water events and to propose possible solutions to prevent flood risks. The methodological approach consisted in analysing daily rainfall and water data (flood and water level data) from the Mopti station using Excel and XLSTAT software. The analyses focus on the calculation of extreme rainfall and water indices and the determination of their return period. The results show that the frequency of rainfall and water events in the commune has increased since the mid-2000s, causing floods with an increasing number of victims and significant damage, due in particular to the commune's development problems. Faced with this challenge, one should take in to consideration of climate risks in local planning documents, a broad awareness of the population and strict compliance with the regulations in force.

Keywords: Flooding, Vulnerability, Extreme Precipitation, Extreme Flows, Niger River Central Delta

1. Introduction

Avec les derniers rapports du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), notamment celui sur les événements extrêmes, et la série ininterrompue de sécheresses, de cyclones, de feux catastrophiques et d'inondations massives intervenue depuis, les désastres climatiques et les débats qui les accompagnent sont au cœur de l'actualité (Grünwald F, 2020, p.86). L'une des conséquences immédiates du changement climatique est l'intensification et la fréquence accrue des événements climatiques extrêmes à travers le monde entier et en Afrique de l'Ouest en particulier (GIEC 2013 ; Giorgi et al. 2014; Sylla et al. 2016 cités par Sylla M. B, 2020, p. 11).

Les événements climatiques extrêmes se caractérisent de plus en plus par leur fréquence au Mali. Le pays a subi près d'une vingtaine d'inondations majeures en 30 ans (1980-2010), affectant généralement entre 10 000 et plus de 45 000 personnes à chaque événement (DNPC, 2013, p.20). Pour les années 2002, 2003, 2007, 2008, les dégâts ont été évalués à près de 9 570 202 375 FCFA (ILWAC, DNPC, AEDD, OSS, 2019, p.19). Les inondations d'une seule journée (15-16 Mai 2019 où l'agglomération de Bamako a enregistré en une seule nuit 138 mm !) ont pu causer la mort de 16 personnes, des pertes et des dommages estimés à presque 5 milliards FCFA et des besoins de relèvement à presque 20 milliards FCFA (Programme ACP-UE PRCN, 2019, préface).

Au cours des 30 dernières années, les zones les plus touchées par les catastrophes au Mali sont situées dans le district de Bamako, la région de Kayes, de Koulikoro, de Mopti et de Gao entre autres (GIEC, 2013 ; Giorgi et al. 2014 ; Sylla et al. 2016 cités par Sylla M. B, 2020, p. 12). Au Mali, le nombre de communes exposées au risque d'inondations et/ ou de sécheresse est estimé à plus de 200 (Programme ACP-UE PRCN, 2019, préface, p. 9). Les inondations sont dues à la fois à l'occupation des zones inondables par les populations et par une perturbation des régimes des cours d'eau et des régimes pluviométriques, provoqués par la variabilité du climat (Dembélé et Ouattara, 2019, p.274).

Le Delta central du Niger est une vaste plaine inondable s'étirant au long de 300 km sur une superficie de 41 195 km². C'est une zone d'intérêt écologique classée site Ramsar depuis le 1^{er} février 2004 (site RAMSAR), en grande partie dans la région de Mopti au Mali. Elle constitue la plus vaste zone humide continentale d'Afrique de l'Ouest.

La commune urbaine de Mopti est située dans la partie Sud-est du delta, qui est soumise depuis les années 1970 à des aléas climatiques sans précédent. Cette situation s'est manifestée par une succession de vagues de sécheresses (1973, 1984, 1993, 2002, 2011) et d'inondations en 1979, 1994,

2010, 2012 (Touré, A, 2014, p.14). Face à une telle réalité, il est impératif de mener des études pour mieux comprendre le phénomène des risques climatiques et ses impacts sur les populations surtout dans un contexte d'urbanisation croissante. En effet, sur une période de 33 ans, la population de la commune urbaine de Mopti a doublé. Elle est passée de 53 885 habitants en 1976 à 114 296 habitants en 2009 (Recensement Général de la Population et de l'Habitat du Mali 1976 et 2009). Cette croissance pousse les populations à occuper les zones inondables surtout dans la ville de Mopti ; ce qui n'est pas sans conséquences surtout ces dernières décennies avec la fréquence des événements pluviométriques et hydriques extrêmes, conséquence des changements climatiques.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Zone d'étude

La commune urbaine de Mopti est située au centre du Mali dans le cercle et la région du même nom (Fig.1).



Figure 1 : Carte de la commune urbaine de Mopti

Source : PDSU 2007 (enquête de terrain) ; **Réalisation** : Cécilia Meynet, Avril 2009.

La commune de Mopti couvre une superficie de 125 km². Les limites de la commune de Mopti sont celles relatives à la loi n°61-36/AN-RM du 20 janvier 1961 portant rattachement des villages de Sévaré, Tiaboly et Banguetaba consécutivement à la délibération n°11/60 du 28 décembre 1960 du conseil municipal de Mopti (PDSEC Mopti 2021-2025). Sur la base des résultats du Recensement de la population de 2018 de la Direction Régionale de la Planification, de la Statistique et de l'Informatique, de l'Aménagement du Territoire et de la Population (DRPSIAP) de Mopti, la commune compte 168.980 habitants dont 80.112 hommes et 88 868 femmes. Le taux de

croissance est de 3,3 %. La ville constitue le chef-lieu de la cinquième région administrative du Mali (Fig. 2). Elle est l'une des premières attractions touristiques du pays. Sa position géographique à la confluence de deux cours d'eau importants (le Niger et son affluent principal qui est le Bani) fait qu'elle abrite le port de pêche le plus important du pays. En plus, la commune est entourée par une vaste plaine rizicole qui fait que la ville est enclavée en période de crue car n'ayant qu'une seule voie bitumée qui la relie à l'extérieur.), ce qui fait qu'on l'appelle la « Venise du Mali ». Ce positionnement rend du coup la commune vulnérable aux risques d'inondation.

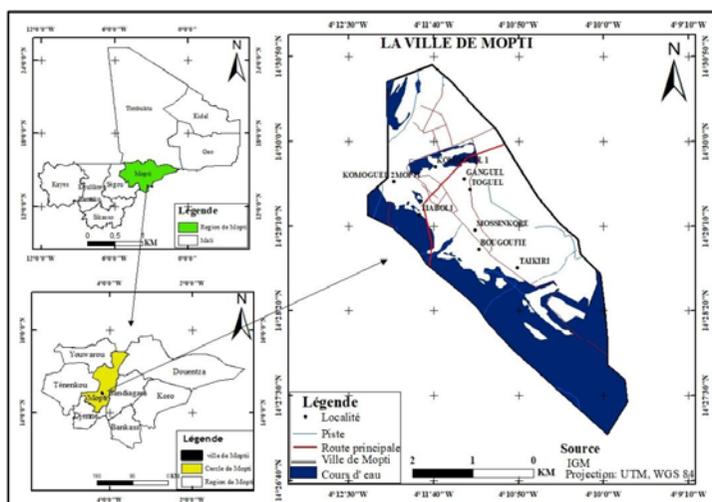


Figure 2 : Carte de la ville de Mopti, commune urbaine de Mopti

2.2. Données et méthodes

2.2.1. Données

Les données utilisées dans le cadre de ce travail sont celles pluviométriques et hydrométriques journalières (débits et hauteurs de crues) enregistrées au niveau de la station de Mopti. Les données ont été recueillies auprès de l'Agence Mali-Météo et la Direction Nationale de l'Hydraulique. Le traitement des données a été effectué par les logiciels Excel et XL STAT. Le traitement a porté sur les données pluviométriques journalières de la station de Mopti de 1971 à 2013 ; les données de crue journalières de 1960 à 2011 et les données de hauteur d'eau de 1960 à 2013. A travers une image Google Earth, l'une des zones les plus à risque de la commune a été visualisée en fonction des différents niveaux de risque (faible, moyen, élevé). Des images photographiques ont été prises pour illustrer certains facteurs de vulnérabilité. La tuile de la couche SRTM 90 m d'altitude pour la zone de Mopti a été traitée sous le logiciel Arc GIS 10.1 pour élaborer la carte de pente de Mopti.

2.2.2. Méthodes

Les méthodes de traitement des données climatiques (pluviométrie) et hydriques (crue et hauteur d'eau) ont porté sur la caractérisation des indices d'anomalie, l'étude de stationnarité, la détermination des périodes de retour.

- i) la caractérisation des années pluviométriques par le calcul de l'Indice d'Anomalie Pluviométrique (IAP) qui a permis de définir les années sèches et les années humides (Paturel et al, 1995 ; Servat et al, 1998).

$$IAP = (X_j - X) / S$$

Où :

X_j : hauteur de pluie annuelle pour une année j ;

X : moyenne annuelle de pluie à la station i pendant la durée de l'étude ;

S : écart-type de la pluviométrie annuelle pour la série chronologique.

Ainsi, les années sèches ont été définies comme celles dont les IAP sont ≤ -1 et années humides celles dont les IAP sont $\geq +1$.

- ii) Calcul des indices de précipitations extrêmes

L'analyse des précipitations a exigé de calculer annuellement neuf indices pluviométriques proposés par Donat et al, 2013 ; Omondi et al, 2013 et Ozer et al, 2014 (voir tableau 1).

Tableau 1 : Tableau des indices pluviométriques à étudier

Indices	Définition	unité
PTOT	Pluviométrie totale annuelle	mm
JP>1	Nombre de jours humides dans l'année (précipitations quotidiennes ≥ 1 mm)	jour
SDII	Lame d'eau moyenne précipitée par jour	mm/jour
P*1J	maximum annuel enregistré en 1 jour	mm
JP>10	Le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm	jour
JP>20	Le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 20 mm	jour
NJ90P	Total annuel de jours de pluies ≥ 90 ème percentile de 1971-2013	jour
NJ95P	Total annuel de jours de pluies ≥ 95 ème percentile de 1971-2013	jour
NJ99P	Total annuel de jours de pluies ≥ 99 ème percentile de 1971-2013	jour

iii) l'étude de stationnarité des données pluviométriques par le test de Pettit (1979), dont le but est d'analyser les données pour la détection d'une rupture éventuelle constitutive dans les séries. En Afrique, l'application de ce test sur des variables pluviométriques et hydrométriques a donné des résultats intéressants (Gautier et al., 1998; Morel, 1998 ; Paturel et al., 1998 ; Ozer, 2000 ; Sene et Ozer, 2002 ; Hountondji et al., 2003).

iv) l'application de la loi de Gumbel (1958) permettant d'estimer la récurrence des événements jugés exceptionnels (Sène et Ozer, 2002). La détermination de la période de retour d'un phénomène peut se faire à partir de certaines lois statistiques lorsque l'on est en possession de séries d'observations s'étendant sur une période suffisamment longue.

Calcul de la période de retour des événements pluvieux et de crue

La loi de Gumbel (1958) permet d'estimer la récurrence des événements jugés exceptionnels (Sène et Ozer, 2002).

En se basant sur la terminologie de l'Institut Royal de Météorologie de Belgique (Vandiepenbeeck, 1997), les événements pluvieux sont classés selon la manière suivante :

- Inférieur à 6 ans (normal),
- De 6 à 10 ans (anormal) ;
- 10 à 30 ans (très anormal) ;
- 30 à 100 ans (exceptionnel) ;
- Plus de 100 ans (très exceptionnel).

3. Résultats

3.1. Retour des événements pluvieux au milieu des années 2000

Le calcul de l'Indice d'Anomalie Pluviométrique (IAP), a permis de définir les années sèches et les années humides. A la station de Mopti, sur une période de 43 ans, l'IAP a permis d'identifier les années à pluviométrie excédentaire ($IAP > 1$) qui sont 1980, 2008, 2009, 2010, 2012. Les années 1973, 1982, 1984, 1997 et 2002 ont été identifiées comme celles de déficits pluviométriques ($IAP < -1$). D'une manière générale, la moyenne lissée sur cinq ans démontre un déficit pluviométrique jusqu'en 2007, date à partir de laquelle les années humides se sont succédé (Fig. 3).

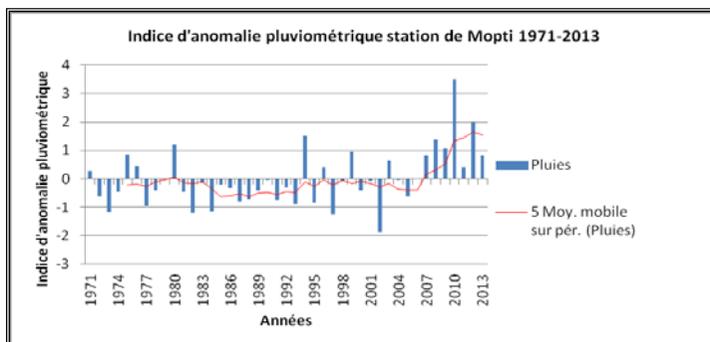


Figure 3 : Indice d'anomalie pluviométrique à la station de Mopti.

Par rapport à l'indice des précipitations extrêmes, sur les 1627 jours de pluie > à 1 mm enregistrés à la station de Mopti sur la période 1971-2013, les pluies au 90^{ème} percentile (162 jours) représentent 10% des précipitations, les pluies au 95^{ème} percentile (81 jours) représentent 5% des précipitations et celles au 99^{ème} percentile (16 jours) représentent 1% des précipitations. Quant aux pluies ordinaires (1368), elles représentent 84% des jours de pluies enregistrés. Les valeurs des précipitations journalières sont de 29 mm pour les précipitations intenses (P 90), 37 mm pour les précipitations très intenses (P 95) et 51 mm pour les précipitations extrêmes (P 99). En somme, les pluies extraordinaires représentent 16% du total avec cependant des dégâts importants du fait de leur caractère imprévisible et leur intensité.

En ce qui concerne les tendances pluviométriques sur la série 1971-2013, certains indices sont stables (JP>1, JP>20 et JP99), d'autres connaissent une rupture significative à la hausse (PTOT, SDII, JP>10, P*1J, P90). Seul l'indice P 95 connaît une rupture très significative à la hausse.

3.2. Retour des pluies exceptionnelles

Pour l'ajustement de Gumbel, l'analyse des totaux maximaux journaliers annuels et des totaux pluviométriques annuels sur la période allant de janvier 1971 à décembre 2013 a été faite (fig. 4).

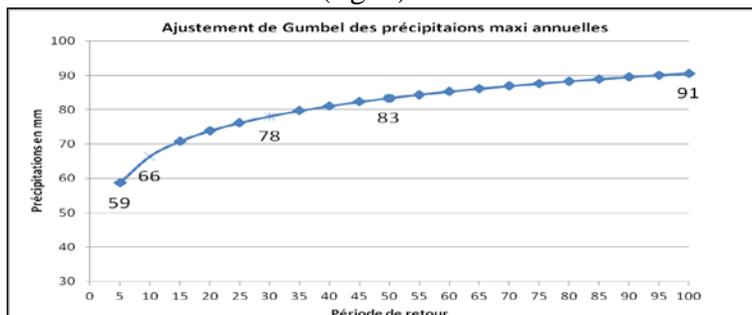


Figure 4 : Période de retour des précipitations maximales annuelles à Mopti

Les données maximales ont été prises en compte en vue de déterminer leur période de retour. Le maximum pluviométrique journalier de même que les totaux pluviométriques annuels de la série ont été observés en 2010 avec respectivement 80 mm et 868 mm. Après l'analyse des données pluviométriques journalières sur la période suivant le modèle de Gumbel sur les périodes de retour, on remarque que la pluie journalière de 80 mm qui a eu lieu le lundi 7 juillet 2010 est exceptionnelle avec une période de retour de 35 ans. Un évènement extrême est jugé exceptionnel sur le graphe de Gumbel si sa période de retour est située entre 30 et 100 ans. Quant au total pluviométrique de 868 mm enregistré durant l'année 2010, il constitue un évènement extrême sur la période 1971-2013. Sa période de retour est de 157 ans alors que la période de retour de 100 ans correspond à un total pluviométrique de 826 mm. Un évènement extrême est jugé très exceptionnel si sa période de retour dépasse 100 ans.

En considérant les maximas journaliers sur la période 1971-2013, les pluies anormales sont de 61 mm et celles exceptionnelles de 91 mm. De même pour les totaux pluviométriques annuels, les totaux anormaux sont de 564 mm et exceptionnels 826 mm (tableau 2).

Tableau 2 : Période de retour des évènements pluviométriques à Mopti (Touré A, 2014)

Période de retour des totaux pluviométriques annuels				
Période de retour PTOT	6 ans	10 ans	30 ans	100 ans
Pluviométrie correspondante	564 mm	613,5 mm	716 mm	826 mm
Période de retour des maxi pluviométriques annuels				
période de retour T	6 ans	10 ans	30 ans	100 ans
Pluie pour période de retour T	61 mm	66 mm	78 mm	91 mm

L'analyse sur une période de 30 ans de 1983 à 2013 démontre une montée en force des évènements pluviométriques extrêmes, 08 en 30 ans dont 02 anormaux (1983 et 1989), 05 très anormaux (1985, 1988, 1996, 2007, 2009) et un évènement très exceptionnel (dont la période de retour se situe entre 30 et 100 ans) en 2010.

3.3. Reprise des débits depuis la fin des années 1990

Les modules moyens allant de 1960 à 2011 donnent une moyenne de 866 m³/s avec un minimum de 426 m³/s en 1984 et un maximum de 1402 m³/s en 1964. Une analyse des débits moyens de 1960 à 2007 au test de Pettitt montre une rupture de tendance à la baisse à partir de 1970. Cette baisse est très significative (P-value 0.000). Les sous séries 1960-1970 et 1971-2011 présentent des moyennes différentes avec respectivement 1239 et 764 m³/s (Fig. 5).

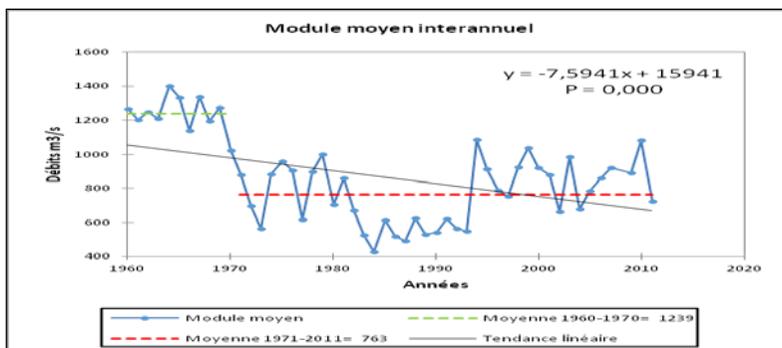


Figure 5 : Evolution interannuelle des modules moyens de débits à la station de Mopti

En calculant le coefficient moyen interannuel de débit, l'étude a pu différencier les années humides des années sèches. Nous constatons sur une période de 51 ans, des variations interannuelles fortes entre années très humides et années très sèches. Sur la figure 6, nous pouvons faire la différence entre les années très humides (de 1960 à 1969) avec un coefficient interannuel de débits supérieur à 1 et les années très sèches (1973, 1983, 1986, 1987, 1989, 1990, 1992, 1993) avec un coefficient interannuel de débit inférieur à -1. Depuis 1993, on a une variation entre années sèches (2004, 2005) et humides (2009, 2010) avec des coefficients variants entre -1 et 1.

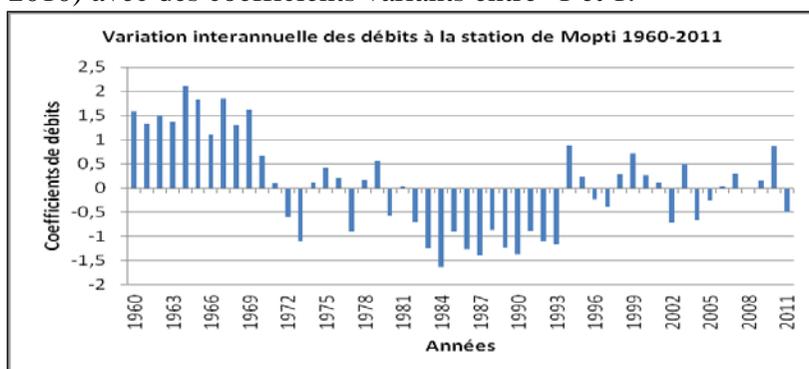


Figure 6 : Variation des coefficients de débits à la station de Mopti

3.4. Période de retour des débits

En procédant à l'ajustement de Gumbel des données de débits à la station de Mopti de 1960 à 2011, on se rend compte que les crues de 1994 (3027 m³/s) et 2010 (2946 m³/s) n'ont rien d'exceptionnel, elles sont tout à fait normales (tableau 3).

Tableau 3 : Période de retour et débits correspondants 1960-2011

Période de retour T	6	10	30	50	100
Débits correspondants	3117	3352	3840	4062	4363

Seule la crue de 1967 (3681 m³/s) est considérée comme un évènement très anormal qui ne s'est plus reproduit (fig. 7).

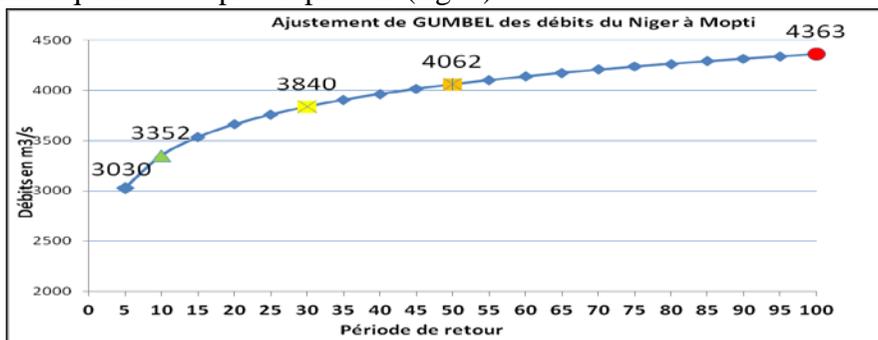


Figure 7 : Ajustement de Gumbel débits période 1960-2011

Nous pouvons en conclure que le barrage de Sélingué, depuis sa mise à eau en 1982, joue réellement son rôle d'écrêteur des crues et que les problèmes d'inondations sont surtout liés à un problème d'aménagement du territoire.

3.5. Un milieu physique favorable aux inondations

Mopti est une zone située à basse altitude, dans la partie inondable du Sud-est du Delta, une grande partie de la superficie a une pente inférieure à 6% (fig. 8).

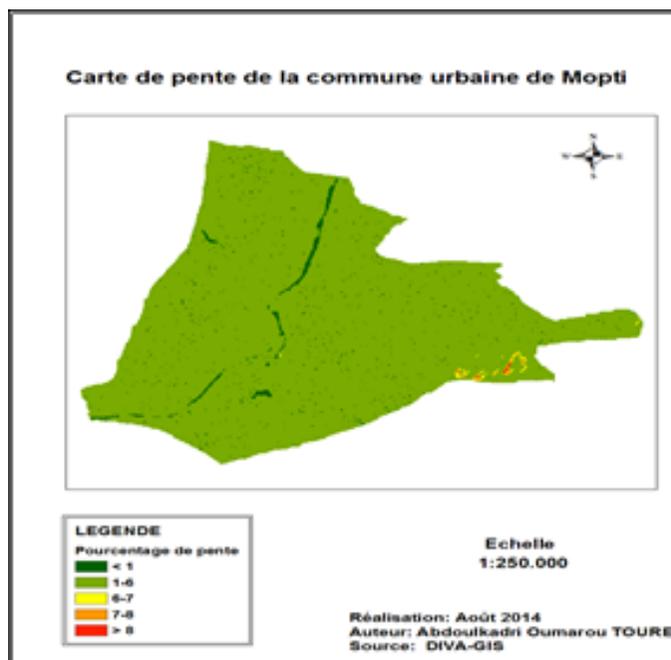


Figure 8 : Carte de pente de la commune urbaine de Mopti

Cette faible pente a pour conséquence de ralentir la force d'écoulement surtout des eaux pluviales lors des précipitations. Cela peut constituer un risque important dans une zone où la majorité des constructions sont faites en banco (80% à Mopti et 77,9% à Sévaré). L'eau, avec une certaine durée sous les maisons, peut les fragiliser. Elles finiront par s'écrouler. Par ailleurs, on rencontre dans la zone inondée et/ou inondable (ville de Mopti et alentours) des sols argileux, argilo-limoneux qui s'imbibent rapidement d'eau et rend l'infiltration de l'eau difficile surtout pendant l'hivernage. La nappe phréatique est presque affleurante et son niveau est fonction de celui du Bani. A Sévaré, en zone exondée, on rencontre des sols légers à textures sableuse, argilo-sableuse ou sablo-limoneuse, des plaines exondées. Avec l'extension urbaine qu'a connue Mopti, des habitants plus nantis s'achètent des parcelles à Sévaré pour s'y installer. Une manière de décongestionner le centre qui est Mopti.

3.6. Extension urbaine et vulnérabilité

L'urbanisation de Mopti s'est faite à une vitesse croissante depuis 1930 des zones d'altitude moyennes (Mopti centre, Komogel 1 et Taïkiri) aux zones inondées (zones de bas-fonds) qui se trouvent en deçà du seuil d'inondation 268,2 m. Depuis les sécheresses successives des décennies 1970 et 1980, les populations en milieu rural ont entrepris des déplacements de plus en plus massifs à l'intérieur, vers les centres urbains et à l'extérieur du Mali. La ville de Mopti, du fait de son dynamisme économique des années 1950 et 1960 a continué à attirer un nombre important de ruraux qui viennent y chercher du travail.

De nos jours, le niveau d'extension de la ville est saisissant. La ville s'est étendue à des zones de faible altitude très vulnérables aux inondations. La conséquence est que les constructions sont faites dans des zones inondables et même inondées (Photo 1 Google Earth avec images correspondantes).



Photo 1 : Progression des zones à risque en fonction de l'urbanisation
Source : Google Earth 2013 ; Interprétation : Touré, A.O, 2013

En analysant l'image Google Earth et les photos de la zone d'étude, on peut constater l'augmentation du niveau de vulnérabilité à travers la construction dans les zones à risque. La zone A correspond à la limite de la ville dans les années 1980. Progressivement, des zones ont été conquises sur le fleuve (Zone B) pour y ériger des constructions. Dans la zone C, on voit que les constructions sont faites expressément dans la plaine d'inondation derrière la digue. Ce qui constitue un risque énorme même si des pilotis y sont implantés. D'autre part, des zones qui constituaient des dépotoirs d'ordures ont été progressivement remblayées, donc des zones conquises sur le fleuve, qu'un retour à la normale pluviométrique ou des crues des années 1960 peut facilement inonder. L'effet serait alors catastrophique si avec une crue exceptionnelle ou une pluie exceptionnelle comparable aux niveaux de crue ou de pluie des années 1950 et 1960 devrait se reproduire.

En termes d'aménagement, le réseau d'évacuation des eaux de ruissellement se raréfie au fur et à mesure qu'on quitte les centres villes. Des quartiers non tramés comme Mopti hindé, Djenedaga, Barigondaga, Bigna ville et Taïkiri ne disposent d'aucun système moderne d'évacuation des eaux. Les digues de protection de Médina-Coura et Banguétaba n'ont pas été réalisées, ce qui rend les populations vulnérables aux inondations. En plus de l'insuffisance du réseau à assurer l'évacuation des eaux de ruissellement particulièrement les eaux pluviales, on note le sous dimensionnement de certains ouvrages indispensables à l'évacuation des eaux, c'est-à-dire que dans certains cas la dimension des ouvrages est petite par rapport à la quantité d'eau qui ruisselle (Photo 2). A cela s'ajoute l'incapacité des services de voirie à

pouvoir curer les caniveaux tous les ans, ce qui accentue l'inondation des zones les plus basses. Il en est de même lorsqu'une « pluie normale » tombe car les caniveaux se trouvent souvent bouchés. Les effets cumulés de ces facteurs font qu'une moindre pluie provoque une stagnation des eaux dans certains quartiers de la ville. Ainsi, il n'est pas rare de voir des saignées creusées par les populations pour évacuer les eaux (Photo 3).



Photo 2 : Caniveau à petite dimension au centre-ville

Photo 3 : Evacuation des eaux de ruissellement dans les zones dépourvues de réseau d'évacuation

Source : Clichés, Touré, A.O., 2014

4. Discussion

La moyenne pluviométrique de la période 1971-2013 est de 461 mm avec, cependant une variation entre les différentes sous-séries. En effet, la moyenne de la sous-série 1971-2002 est de 426 mm contre 566 mm pour la seconde sous-série qui va de 2003 à 2013, soit une augmentation de 32% par rapport aux années de sécheresse.

Ces résultats complètent ceux de Sanogo publiés en 2012 au niveau de la même station. L'horizon de temps sur lequel s'étendait l'étude de Sanogo va de 1936 à 2003. Avec une moyenne interannuelle de 498,9 mm pour la période, tous les indicateurs ont une tendance à la baisse. Le total pluviométrique de même que le nombre de jours de pluies ont une tendance significative à la diminution. Cependant, l'année 2003 à laquelle se sont limitées les études constitue un point de rupture significative à la hausse de totaux pluviométriques selon nos analyses.

Les observations de la reprise des événements pluvieux ces dernières décennies, après la sécheresse, ont été faites par Faïhum (2006) dans le bassin du fleuve Ouémé au Bénin, par Sanogo (2012) au Mali, Ozer et al, (2014) en Mauritanie, Mohammed et al, (2016) en Algérie Occidentale, Bouba et al (2017) dans le Nord du Cameroun.

Dans une étude des données pluviométriques journalières de la station de Gouré au Niger de 1936 à 2003, Ozer et al (2005) ont mis en évidence 03 périodes d'anomalies pluviométriques par l'application du test non paramétrique de Pettitt : une période « humide » allant de 1936 à 1967, une

période de sécheresse allant de 1968 à 1987 et la période « actuelle » caractérisée par la reprise des précipitations depuis 1988 mais qui sont en deçà de la moyenne des années dites humides. Il en est de même pour Sanogo (2012), qui a mis en évidence 03 périodes différentes à travers l'analyse des données pluviométriques sur le Mali notamment à la station de Mopti.

La période « actuelle » caractérisée par la reprise des événements pluvieux s'accompagne d'événements intenses, voire extrêmes dans certains cas. A Mopti, ces événements pluvieux ont connu un départ à partir de 1990 pour atteindre leur plus haut niveau observé en 2010. L'année 2010 a été marquée par un total pluviométrique exceptionnel de 868 mm, une quantité que la commune de Mopti n'a enregistrée depuis 1952 où il avait plu 963 mm. Cette même année (2010) a enregistré la valeur la plus élevée du maximum journalier (80 mm) depuis 1969 où elle avait atteint 9,8 mm. En 1952, la ville a enregistré en une seule journée 127,7 mm de pluie (Sanogo, 2012). L'analyse de la reprise pluviométrique depuis 20 ans (1994) montre que les cumuls pluviométriques deviennent de plus en plus importants, en ce sens que 10 des 20 années de pluies enregistrées à la station cumulent plus de 500 mm dépassant donc largement la moyenne de la période 1971-2013 et dont les plus importants ont provoqué des inondations (1994, 1999, 2008, 2010, 2012). Ce constat est confirmé par plusieurs auteurs qui ont observé une augmentation importante du nombre d'inondations depuis la fin des années 1980 (Sène et Ozer, 2002 ; Omondi et al, 2013).

Cette reprise même si son intensité n'atteint pas celles des années dites «humides», pourrait avoir des répercussions préjudiciables sur l'environnement et sur le patrimoine foncier. Cela se traduira non seulement par des inondations, étant donné la fragilité des sols pour l'agriculture, mais aussi la destruction des habitats fragiles et des routes. Les épisodes d'inondation qui se sont succédé à Ouagadougou en 2009, à Cotonou en 2010, à Dakar en 2012 et à Bamako en 2013 en sont les témoignages éloquents. Les inondations en Afrique de 2007 qui se sont étendues de la Mauritanie à l'Ouest jusqu'au Kenya à l'Est sont considérées comme les pires des dernières décennies. Plus d'un million et demi de personnes ont été touchés dont plus de 600.000 en Afrique de l'Ouest. La sous-région a connu en 2007, 2008 et 2009 les pires inondations depuis plus de 30 ans.

Par rapport aux crues, il a été constaté après les années de sécheresse 1970 et 1980 une certaine reprise des niveaux de débits. L'analyse des données de débits (modules moyens annuels) de 1960 à 2011 au test de Pettitt montre une tendance significative à la baisse à partir de 1971. Cependant, cette analyse cache une autre réalité qui est une rupture à la hausse des crues depuis 1993 quand on analyse les données de 1971 à 2011. Le même constat a été fait au niveau de l'analyse des données des hauteurs d'eau. Depuis la reprise de crues dont la rupture significative à la hausse date de 1993, nous avons

enregistré sur 20 ans (1994-2013) 11 années où la côte d'alerte des crues (620 cm) est dépassée avec des pics en 1994 (655 cm), 2003 (649 cm), 2007 (644 cm), 2010 (646 cm) et 2012 (652 cm). Ce rapprochement de la population des zones à risque peut s'expliquer par le fait qu'à la faveur de la sécheresse des années 1970 et 1980, la baisse des précipitations et les crues ont favorisé la libération des espaces qui étaient inondés.

A la faveur des années de sécheresse, les habitants avaient peu à peu occupé des zones jusque-là impraticables car souvent inondées. Donc, en se rapprochant du lit majeur, ou même en le colonisant, leur vulnérabilité ne baisse pas, malgré la baisse des débits de crue. C'est exactement ce qui s'est passé en 1994, année où la crue, à peine supérieure à la moyenne du siècle mais qui n'était plus apparue depuis 20 ans, a inondé et détruit de nombreux champs, troupeaux, villages, faisant de nombreuses victimes (Tarhule, 2005). Le même constat est fait par Diawara et al (2016) qui ont constaté une augmentation considérable des populations sur les superficies inondables à Bamako passant de 14 ha en 1972 à 307.2 ha en 2016 pour la côte d'alerte de 513 cm et de 13.8 ha en 1972 à 205.6 ha en 2016.

En plus, de récentes études en Afrique de l'Ouest (Ozer et al, 2014 ; Roudier P., Mahé G, 2010 ; Ould Sidi Cheikh et al, 2007) confirment cet état de fait dans les zones urbaines où les zones à risque font de plus en plus l'objet d'occupation très souvent anarchique.

Conclusion

Au plan pluviométrique, après la grande sécheresse des années 1980, les événements pluvieux reprennent, surtout cette dernière décennie dans la zone de Mopti. Du coup, les inondations par ruissellement deviennent de plus en plus fréquentes et plus intenses depuis presque 10 ans. Par leur caractère imprévisible, elles causent plus de dégâts.

Les inondations par la remontée du niveau des crues deviennent de plus en plus importantes et préoccupantes. Les années les plus marquantes depuis 1990 sont celles de 1993 et celle de 2010. Il se trouve que ces crues sont tout à fait normales. Cependant, l'étalement urbain opéré depuis fait que les populations s'installent progressivement dans les zones inondables et deviennent des victimes en cas de remontée d'eau. Cela dénote le problème d'aménagement du territoire que les autorités locales se doivent de résoudre. Pour prévenir les inondations dans la commune urbaine de Mopti, il faut une application des textes en matière de prévention des risques d'inondation, le dimensionnement adapté des ouvrages contre les inondations, comme les digues de protection ou encore le réseau d'évacuation des eaux de ruissellement. En plus, une large campagne de sensibilisation doit être effectuée en vue d'inculquer dans les esprits la culture du risque et les mesures de prévention.

En complément à cette étude qui s'est focalisée sur les paramètres physiques, il sera nécessaire de faire celle relative à la vulnérabilité des populations afin de pouvoir faire le lien vulnérabilité physique d'avec celle socio-économique. Ce qui fera l'objet d'un prochain article.

References :

1. Bouba L., Sauvagnargues S., Gonne B., Ayrat P A et Auguste Ombolo A. (2017). Tendances pluviométriques et aléa inondation à l'Extrême-Nord Cameroun. *Geo-Eco-Trop*, 41, 3, n.s. 339-358
2. Dembélé, O ; Ouattara, I. (2019). Contribution du SIG à la prévention et à la gestion des risques d'inondation dans le District de Bamako au Mali, *European Scientific Journal (ESJ)*, vol.15, n°30, Octobre 2019, pp.256-277
3. Diawara, H; Maïga, F; Ballo, A; Mallé, K. S. (2019). Evaluation des zones à risque d'inondation sur les berges du fleuve niger dans le district de
4. Bamako, *Rev. Sc. Env. Univ.*, Lomé (Togo), 2019, n° 16, vol. 1, pp 193-208
5. Direction Nationale de la Protection Civile. (2013). *Stratégie Nationale pour la Réduction des Risques de Catastrophes au Mali*,
6. Donat M.G., Peterson T.C., Brunet M., et al., (2013). Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO, *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.3707.
7. Faïhum, S. F. (2006). *Dynamique environnementale au niveau du bassin supérieur du fleuve Ouémé au Bénin : risques climatiques et modifications spatiales*. Mémoire de fin d'études de Master complémentaire en gestion des risques naturels, Université de Liège, (Belgique), 47p.
8. GIEC. (2007): *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de)]. GIEC, Genève, Suisse, 104 pages.
9. Grünewald, F. (2020). Catastrophes : qu'ont à dire les humanitaires ? *Annales des Mines*, n°98, PP 86-91
10. Gumbel E.J. (1958). *Statistics of extremes*. NY, États-Unis : Columbia University Press, 375p.
11. ILWAC, DNPC, AEDD, OSS. (2019). Gestion intégrée de la terre et de l'eau pour l'adaptation à la variabilité climatique et au changement

- climatique : Guide méthodologique de cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques, 37 p
12. Mohammed A., Benchaben. (2016). Réflexions sur les variations pluviométriques de la région de Tiaret (Algérie Occidentale) durant La Période 1984 – 2015, *European Scientific Journal*, Edition vol.12, No.11. PP 498-508
 13. Omondi P.A., Awange J.L., Forootan E. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes over the Great Horn of Africa region from 1961 to 2010, *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.3763.
 14. Ould Sidi Cheikh, M.A., Ozer, P., Ozer A. (2007). Risques d'inondation dans la ville de Nouakchott (Mauritanie). *Geo-Eco-Trop*, 31: 19-42.
 15. Ozer P., Bodart, C., Tychon, B. (2005). Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo. Revue Européenne de Géographie*, 308
 16. Ozer P., Hountondji Y.C., Gassani J., Djaby B. & De Longueville F. (2014). Evolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010), In: *CAMBERLIN P. & RICHARD Y. (Eds.)*, Actes du 27e Colloque International de l'Association Internationale de Climatologie. Dijon, France : Université de Bourgogne, 394-400.
 17. Patuere J.E., Servat E., Kouamé B., Boyer J.F., Lubès H., Masson J.M. (1995). Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin, *Sécheresse*, 6 (1)14-23.
 18. Programme ACP-UE de prévention des risques liés aux catastrophes naturelles. (2019). *Evaluation rapide des dommages, pertes et besoins post-inondation à Bamako (Rapid PDNA)*, Gouvernement du Mali, Rapport final
 19. Roudier, P., Mahé G. (2010). Calcul des pluies et débits classés sur le bassin du Bani (Mali) : une approche de la vulnérabilité des ouvrages et de la population depuis la sécheresse. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 55 (3), 351-363.
 20. Sanogo, Y.B. (2007). *Analyse de la variabilité pluviométrique, aux pas de temps quotidiens au Mali de 1936 à 2003*. Mémoire de DES Gestion des risques naturels, Université de Liège, (Belgique), 51p.
 21. Sene S., Ozer P. (2002). Evolution pluviométrique et relation inondations événements pluvieux au Sénégal, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 42: 27-33

22. Servat E., Paturel J.E., Kouame B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubes-Niel H., Fritsch J.M., Masson F.J. et Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale in: Wafer Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998), *IAHS Publ.* no. 252.
23. Sylla, M.B (2020). *Identification des risques climatiques rencontrés au Mali à court, moyen et long terme dans le cadre du Projet de Gestion des Risques Climatiques et d'Inondations (PGRCI) au Mali*, Agence de l'Environnement et du Développement Durable (AEDD), Rapport final
24. Tarhule, A. (2005). Damaging rainfall and flooding: the other sahel hazards. *Climatic Change*, 72: 355-377.
25. Touré, A. (2014). *Prévention et gestion des risques climatiques dans le delta central du Niger : analyse de la vulnérabilité de la commune urbaine de Mopti aux évènements pluviométriques et de hydriques extrêmes*. Travail de fin d'études de Master complémentaire en gestion des risques naturels, Université de Liège, (Belgique), 64p.
26. Vandiepenbeeck, M. (1997). Bilan climatologique saisonnier. Hiver 1997 : Une période de froid remarquable, *Ciel et Terre*, 113 : 65-66.

Webographie :

1. <https://rsis.ramsar.org/fr/ris/1365s> consulté le 07 Septembre 2021
2. <http://eujournal.org/index.php/esj/issue/view/376> consulté le 06 Septembre 2021