



Apports de la géoinformatique pour l'évaluation des zones à risque d'inondation dans le bassin versant Bendougou

Souleymane Bengaly

PhD en Géoinformatique Appliquée, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Oumar Coulibaly

PhD en Géographie de l'Environnement, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Yorombe dit Yoro Karembe

PhD en Système d'Information Géographique Appliquée, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Tinzanga Sanogo

Msc en Géomatique, Gestion et Aménagement des Territoires, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Doi: 10.19044/esipreprint.12.2025.p441

Approved: 16 December 2025

Copyright 2025 Author(s)

Posted: 18 December 2025

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Bengaly, S., Coulibaly, O., Karembe, Y.D.Y. & Sanogo, T. (2025). *Apports de la géoinformatique pour l'évaluation des zones à risque d'inondation dans le bassin versant Bendougou*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.12.2025.p441>

Résumé

Depuis plus de cinquante ans, les inondations sont récurrentes dans le sud du Mali, en particulier dans le bassin versant du Bendougou, où se trouve la ville de Bla. Ces inondations, considérées comme dangereuses, suscitent une attention croissante de la part du public et de la communauté scientifique. Cette étude utilise la géo-informatique pour évaluer les zones à risque d'inondation à l'aide d'une approche multicritères basée sur les systèmes d'information géographique (SIG). Les données utilisées comprennent un modèle numérique d'élévation (MNE) provenant d'ALOS PALSAR (2014, résolution de 12,5 m), 30 ans de données cumulées sur les

précipitations, des données démographiques provenant de WORLDPOP et des images satellite Landsat 8 OLI de 2023 (résolution de 30 m). Le MNT a été utilisé pour caractériser le terrain en termes de pente, d'altitude et de densité de drainage. Les images Landsat ont été analysées pour cartographier l'utilisation et la couverture des sols.

Le processus analytique hiérarchique (PAH) a été utilisé pour attribuer des pondérations à chaque facteur en fonction de son importance relative. La carte finale des risques d'inondation a été générée à partir d'une combinaison linéaire pondérée de la carte des aléas, de la densité de population et des données sur l'utilisation des sols. Les résultats indiquent que 40 % de la superficie du bassin versant (soit 260 505 hectares) est classée comme présentant un risque faible, 33 % un risque modéré, 23 % un risque très faible et seulement 4 % un risque élevé à très élevé. Les zones les plus vulnérables sont principalement situées dans les environs urbains de Bla. Ces résultats soulignent la nécessité urgente de renforcer les efforts de prévention et de gestion des inondations dans cette localité en rapide urbanisation.

Mots clés : Géoinformatique, risque, inondation, bassin versant, Bendougou

Contributions of Geoinformatics to the Assessment of Flood Risk Areas in the Bendougou Watershed

Souleymane Bengaly

PhD en Géoinformatique Appliquée, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Oumar Coulibaly

PhD en Géographie de l'Environnement, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Yorombe dit Yoro Karembe

PhD en Système d'Information Géographique Appliquée, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Tinzanga Sanogo

Msc en Géomatique, Gestion et Aménagement des Territoires, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie, Laboratoire Homme Peuplement Environnement (HoPE), Mali

Abstract

For over fifty years, flooding in southern Mali has been recurrent, particularly within the Bendougou watershed, where the city of Bla is located. These floods, regarded as dangerous, have attracted growing attention from the public as well as the scientific community. This study employs geoinformatics to evaluate flood risk zones using a multi-criteria approach based on Geographic Information Systems (GIS). The data used include a Digital Elevation Model (DEM) from ALOS PALSAR (2014, 12.5 m resolution), 30 years of cumulative rainfall data, demographic data from WORLDPOP, and Landsat 8 OLI satellite imagery from 2023 (30 m resolution). The DEM was used to characterize the terrain in terms of slope, elevation, and drainage density. Landsat imagery was analyzed to map land use and land cover. Flood hazard was estimated by integrating topographic, rainfall, and land use data. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to assign weights to each factor according to its relative importance. The final flood risk map was generated through a weighted linear combination of the hazard map, population density, and land use data. The results indicate that 40% of the watershed area (equivalent to 260,505 hectares) is classified as low risk, 33% as moderate risk, 23% as very low risk, and only 4% as high to very high risk. The most vulnerable areas are predominantly located in the urban vicinity of Bla. These findings highlight

the urgent need to strengthen flood prevention and management efforts in this rapidly urbanizing locality.

Keywords: Geoinformatics, risk, flood, watershed, Bendougou

Introduction

Les inondations sont des catastrophes naturelles destructrices qui se produisent dans les zones rurales et urbaines et qui causent des préjudices considérables aux habitants, aux moyens de subsistance et aux infrastructures (Fernández & Lutz, 2010; GUELBEODO & Lucien, 2022). Il a été constaté que les inondations font parties des risques naturels les plus courants et réputées dans le monde. Elles occupent la troisième place après les tempêtes et les séismes (Fénéant & Catas, 2020; Sanogo & Bengaly, 2022). Les inondations constituent en Afrique un fléau majeur pour les gouvernements notamment dans la zone ouest africaine. Ces catastrophes d'inondations sont de plus en plus accentuées à cause de la croissance rapide de la population, de l'urbanisation rapide et des extrêmes climatiques dans les pays en voie de développement (Aliyu et al., 2023). Cette altération des processus naturels constitue un défi particulier pour les pays en développement, qui disposent souvent de ressources limitées pour le rétablissement et les réparations à la suite de catastrophes naturelles (Diriba et al., 2024).

Au Mali, la prolifération des surfaces anthropisées peut avoir un impact significatif sur les caractéristiques du ruissellement, entraînant une augmentation des zones submergées lors des inondations. Suite à des pluies diluviales, le Mali a connu ces dernières décennies des grandes périodes d'inondation qui ont fait de nombreuses victimes et plusieurs dégâts matériels (Fofana et al., 2022). Le manque d'application de la politique d'aménagement du territoire et de gestion de l'utilisation des sols appropriés, associée à la faible capacité d'adaptation des gouvernements pour assurer une bonne gouvernance, exacerbe les cas de risques d'inondations tant en milieu rural qu'en milieu urbain (Ogato et al., 2020).

En effet, les données officielles de la Direction Générale de la Protection Civile (DGPC) révèlent une variabilité annuelle significative en termes d'ampleur. En 2020, 26 événements d'inondation ont touché 33 171 ménages, causant 32 décès ; en 2021, 23 inondations ont été recensées, avec 3 733 ménages affectés et 10 pertes en vies humaines. En 2022, le pays a connu une recrudescence avec 67 cas d'inondations, 16 357 ménages touchés et 10 décès enregistrés. En 2023, bien que le nombre d'événements ait baissé à 35, on compte 448 ménages sinistrés et 15 décès. Pour l'année 2024, les chiffres communiqués par le Bureau de la coordination des affaires

humanitaires (OCHA) font état de 649 cas d'inondation, ayant affecté plus de 88 000 ménages et causé 76 décès (OCHA, 2024).

Le bassin versant de Bendougou dans la zone de Bla et environs n'échappe pas à cette réalité. Elle est confrontée à des inondations récurrentes avec des dégâts considérables (Bruckmann et al., 2019; Coulibaly et al., 2024). Ce bassin a enregistré plusieurs cas d'inondations ces dernières années (1987, 1994, 2005, 2007, 2009, 2012, 2016, 2019, 2021 et 2024) à travers le débordement des cours d'eau (Wolon, Falaba, etc.). Au regard de l'ampleur du phénomène, aucune étude n'a été réalisée dans la zone sur l'analyse des facteurs physiques pour estimer les zones à risque dans le bassin de Bendougou.

Les méthodes d'analyse multicritères sont considérées comme des outils d'aide à la décision permettant de traiter des problèmes complexes. Les outils de la géo-information notamment les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection offrent un accès rapide aux données spatiales et une gestion efficace de grandes quantités de données afin d'identifier différents facteurs intervenant dans les processus des inondations dans le bassin versant de Bendougou. Ainsi, cette recherche vise à évaluer les zones à risque d'inondation via les outils de la géoinformatique sur les facteurs d'aléa et de vulnérabilité les plus importants dans le bassin versant de Bendougou.

Méthodologie

Présentation du bassin versant de Bendougou

Le bassin versant (BV) du Bendougou résulte d'un affluent du Bani (affluent du fleuve Niger). Le cours d'eau principal est de 132 km, et draine dans une superficie de 2 665 km². Il est situé au sud du Mali, principalement dans la région de Ségou. Son emprise géographique est comprise entre 12°25'30" Nord et 13°08'00" Nord de latitudes, et entre 5°54'59.95" Ouest et 5°21'57" Ouest de longitudes (*Figure 1*). En aval, les eaux du bassin versant de Bendougou coulent et traversent la ville de Bla, juste à peine un kilomètre avant son exutoire. Le relief du bassin versant de Bendougou est relativement plat avec des altitudes qui varient entre 300m et 433m. Le cumul annuel de la pluviométrie dans le Bendougou tourne autour des 900mm de pluie par an. La savane arbustive est la formation végétale la plus dominante avec la présence que quelques forêts galeries tout au long des cours d'eau. Le bassin versant de Bendougou traverse 17 collectivités territoriales dont la commune urbaine de Bla qui se situe à l'exutoire du bassin. En amont et au cours moyen du bassin versant, se trouve une dominance des activités agricoles. Ce qui fait du bassin de Bendougou un bassin périurbain.

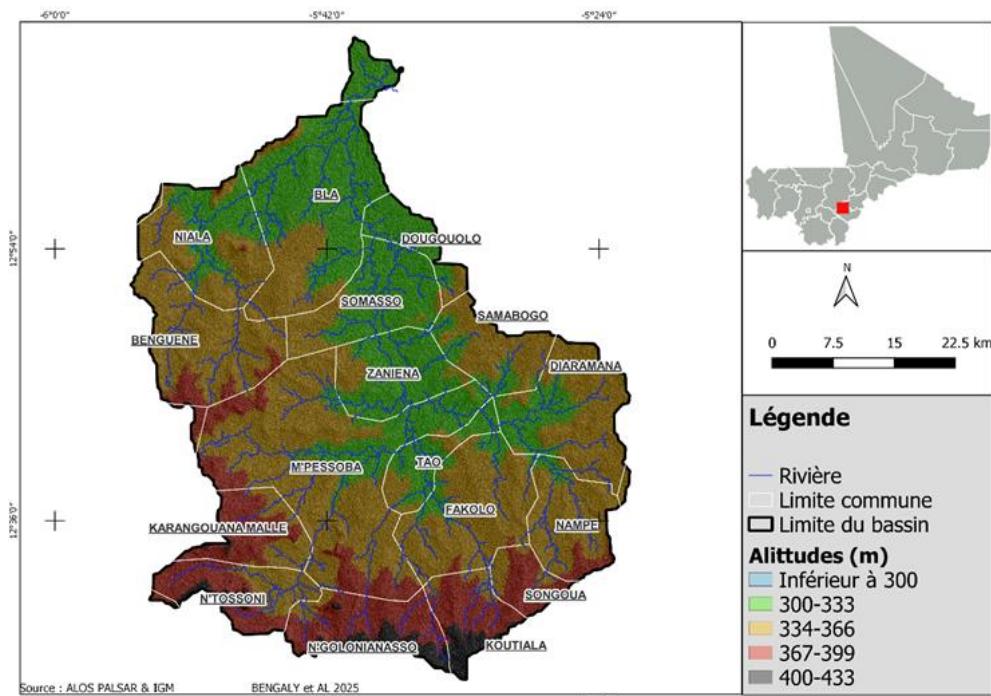


Figure 1 : Localisation du bassin versant de Bendougou

Données

Les données utilisées pour la réalisation de cette étude sont multiples et diverses selon leurs types et leurs formats (*Tableau 1*). Le DEM ALOS PALSAR a servi à l'extraction des limites du bassin versant, aux altitudes, aux pentes et à la densité de drainage. Les données pluviométriques ont été utilisées pour l'élaboration de la carte de l'intensité pluviométrique. Quant aux images Landsat ont été traitées afin de caractériser les unités d'occupation sol du bassin et les données démographiques pour l'extraction de la densité de la population.

Tableau 1 : Caractéristiques des données utilisées

Données	Format	Résolution	Date de collecte	Source
Images DEM	Tiff	12,5m	2011	ALOS PALSAR DEM (https://ASF.alaska.edu/ASF-DOI-List/)
Landsat8/OLI	Tiff	30	2024	USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/)
Données pluviométriques	XLS	-	1994-2024	CRU TS (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/)
Données démographiques	Tiff	100M	2020	WORLDPOP (https://www.worldpop.org/)

Méthodes

Le risque d'inondation est un phénomène assez complexe. Ainsi, pour évaluer le degré de risque d'inondation dans une localité, il est indispensable de tenir compte de l'aléa composé aussi de plusieurs facteurs, de la vulnérabilité et souvent du niveau d'exposition des vies humaines (Sanogo & Bengaly, 2022).

Aléa d'inondation

Pour évaluer l'aléa d'inondation dans le bassin versant de Bendougou, la pluviométrie, les altitudes, les pentes, la densité du réseau de drainage et les unités d'occupation du sol et d'utilisation des terres ont été prises en compte.

Pluviométrie

La pluviométrie est considérée comme le premier facteur qui produit des inondations (Saley et al., 2005). Ainsi, la carte des isohyètes a été établie à partir de la pluviométrie interannuelle de la série pluviométrique de 1994 à 2024. La carte des isohyètes a été ensuite reclasée en cinq classes à amplitudes égales dont la plus importante a une très forte susceptibilité à produire une inondation à la plus faible ayant une très faible susceptibilité.

Densité de drainage

La densité de drainage, définie comme la longueur totale des cours d'eau par kilomètre carré, constitue un indicateur essentiel dans l'analyse des dynamiques hydrologiques, notamment en lien avec le risque d'inondation (Ogato et al., 2020). Dans cette étude, les cours d'eau ont été hiérarchisés selon la méthode de Strahler (1944), puis la densité a été calculée à l'aide de l'outil « Line Density ». La carte résultante a été classée en cinq intervalles égaux, en postulant qu'une densité plus élevée reflète une plus grande susceptibilité aux inondations.

Altitudes

Dans un bassin versant, les eaux s'écoulent naturellement des zones de haute altitude vers les zones plus basses, où elles tendent à s'accumuler (Fénéant, 2020). Ainsi, les altitudes les plus faibles présentent une susceptibilité accrue aux inondations. Dans ce travail, le modèle altimétrique a été classé en cinq intervalles égaux, en considérant que la vulnérabilité aux inondations diminue progressivement des altitudes basses vers les altitudes élevées.

Pentes

Le degré d'inclinaison des pentes influence à la fois la vitesse d'écoulement et la rétention des eaux de ruissellement. Sur des surfaces planes, les eaux s'écoulent lentement et tendent à s'accumuler, augmentant ainsi le risque d'inondation. À l'inverse, les zones à fortes pentes favorisent un écoulement rapide, réduisant la probabilité de stagnation (Saley et al., 2005). À partir du Modèle Numérique de Terrain (DEM), une carte des pentes a été générée puis reclassifiée en cinq classes, allant des pentes très faibles à forte susceptibilité d'inondation aux pentes très fortes, présentant une vulnérabilité minimale.

Occupation du sol

L'occupation du sol et l'utilisation des terres, résultant à la fois des activités anthropiques et de facteurs naturels tels que les étendues d'eau et la couverture végétale, influence directement la susceptibilité d'un territoire aux inondations. Dans cette étude, elle a été cartographiée à partir d'une image Landsat 8 OLI en appliquant l'algorithme Support Vector Machine (SVM) à travers Orfeo ToolBox (OTB). La classification a été validée par 15 échantillons issus d'un échantillonnage aléatoire simple, avec un indice de Kappa de 0,96, indiquant une excellente précision. Cinq classes d'occupation ont été définies selon leur niveau de susceptibilité aux inondations : très forte (plans d'eau), forte (zones bâties), moyenne (sols nus), faible (terres agricoles) et très faible (végétation).

Facteurs de vulnérabilité

Dans le contexte du risque d'inondation, la vulnérabilité peut être de nature physique, par exemple, la proximité des bâtiments par rapport aux cours d'eau, ou démographique, en lien avec la densité de population dans les zones inondables. Dans cette étude, deux facteurs principaux de vulnérabilité ont été pris en compte : la répartition des infrastructures bâties et la concentration de la population dans les lits d'inondation.

Densité de la population

La densité de population dans le bassin versant a été extraite à partir des données de la base WorldPop. Exprimée en nombre d'habitants par hectare, cette densité constitue un indicateur clé de vulnérabilité : plus elle est élevée, plus la population exposée aux inondations est importante, traduisant ainsi un niveau de vulnérabilité élevé.

Occupation du sol et utilisation des terres

Dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité, les classes d'utilisation du sol ont été hiérarchisées selon leur sensibilité au risque

d'inondation. Une attention particulière a été portée au bâti, en raison de la fragilité des constructions observées dans le bassin de Bendougou. Ainsi, les plans d'eau présentent une très forte sensibilité, suivis du bâti (forte sensibilité), des terres agricoles (sensibilité modérée), des sols nus (faible sensibilité) et de la végétation (très faible sensibilité).

Evaluation du risque d'inondation

L'analyse du risque d'inondation, en raison de sa complexité et de la diversité des facteurs impliqués (quantitatifs et qualitatifs), nécessite une méthode d'évaluation multicritère. À cet effet, l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP), développée par Saaty en 1980, a été retenue pour pondérer l'importance relative des différents facteurs d'aléa. Cette méthode, largement utilisée dans les études de risque d'inondation (Ogato et al., 2020; Sanogo & Bengaly, 2022), repose sur trois étapes principales.

La première consiste à établir une matrice de comparaison par paires, dans laquelle chaque facteur est comparé à un autre en termes d'importance relative. La comparaison s'appuie sur une échelle d'importance relative définie par Saaty, qui permet de quantifier combien de fois un facteur est jugé plus important qu'un autre. Cette échelle constitue la base de la pondération des facteurs dans le processus de hiérarchisation (Tableau 2).

Tableau 2 : Explications des échelles de valeurs selon Saaty (1980)

Valeur	Définition	Commentaire
1	<i>Importance égale</i>	Ils contribuent également à l'objectif
3	<i>Importance modérée</i>	Le jugement favorise légèrement un élément sur l'autre
5	<i>Importance forte</i>	Le jugement favorise fortement un élément sur l'autre
7	<i>Importance très forte</i>	Le jugement favorise très fortement un élément sur l'autre, sa dominance peut être montrée par expérience
9	<i>Importance extrême</i>	La dominance d'un élément à l'autre est démontrée et absolue

Dans la méthode AHP, une valeur x placée à l'intersection de la ligne i et de la colonne j d'une matrice de comparaison indique que le critère i est x fois plus important que le critère j . Par conséquent, la valeur à l'intersection symétrique (ligne j , colonne i) sera l'inverse, soit $1/x$. Par exemple, si la pluviométrie est jugée cinq fois plus importante que l'altitude, la matrice attribuera une valeur de **5** à la comparaison "pluviométrie vs altitude", et une valeur de **1/5** à la comparaison "altitude vs pluviométrie". Ce principe garantit la cohérence des jugements dans la construction de la matrice de comparaison.

La deuxième étape de la méthode AHP a consisté à déterminer le poids relatif de chaque facteur. Ce processus s'est effectué comme suit :

- Calcul de la somme de chaque colonne de la matrice de comparaison initiale ;
- Normalisation de la matrice, en divisant chaque élément de la matrice par la somme de sa colonne respective, afin d'obtenir une matrice normalisée ;
- Calcul du poids de chaque facteur, en faisant la moyenne des valeurs de chaque ligne de la matrice normalisée.

Les poids obtenus reflètent l'importance relative de chaque facteur et servent à établir un classement hiérarchique des éléments considérés dans l'analyse du risque d'inondation.

Sur la base des facteurs d'aléa identifiés dans le bassin versant de Bendougou, une pondération a été appliquée à l'aide de la méthode AHP (voir Tableau 3).

Tableau 3 : Pondération des facteurs d'aléa d'inondation

Facteurs	Poids relatifs (%)	Classes	Rang
Pluviométrie	38	Très faible	1
		Faible	2
		Modérée	3
		Forte	4
		Très forte	5
Densité drainage	29	Très faible	1
		Faible	3
		Modérée	5
		Forte	7
		Très forte	9
Pentes	14	Très forte	9
		Forte	7
		Modérée	5
		Faible	3
		Très faible	1
Occupation du sol	12	Très faible	1
		Faible	2
		Modérée	3
		Forte	4
		Très forte	5
Altitudes	7	Très forte	9
		Forte	7
		Modérée	5
		Faible	3
		Très faible	1

Une fois les poids relatifs de chaque critère déterminé, une analyse multicritère a été menée dans un environnement SIG afin de générer la carte des aléas d'inondation. Cette approche permet d'intégrer spatialement l'influence combinée des différents facteurs dans l'évaluation du risque. Suite aux analyses précédentes, la formule suivante a été appliquée dans un environnement SIG :

Indice aléa d'inondation

$$\begin{aligned}
 &= 0,38x\text{pluviométrie} + 0,14x\text{occupation du sol} \\
 &+ 0,12xpente + 0,7x\text{altitude} \\
 &+ 0,29xdensité de drainage
 \end{aligned}$$

La carte des aléas d'inondation obtenue a été classée en cinq niveaux de gravité : très faible, faible, modérée, forte et très forte. Conformément aux approches méthodologiques adoptées par plusieurs auteurs (Ogato et al., 2020 ; Sanogo & Bengaly, 2022), la carte du risque d'inondation a ensuite été produite à partir de la combinaison des composantes de l'aléa et de la vulnérabilité, selon la formule suivante :

Indice risque inondation

$$\begin{aligned}
 &= 33,34x\text{indice aléa} + 33,333xdensité population \\
 &+ 33,333x\text{occupation sol}
 \end{aligned}$$

La carte finale est classée en cinq classes : très faible, faible, modérée, forte, très forte.

Résultats

Facteurs d'aléa d'inondation

Dans le bassin versant de Bendougou, sept facteurs naturels ont été identifiés afin d'évaluer le niveau d'aléa d'inondation (*Figure 2*).

L'intensité pluviométrique représente le principal facteur déclencheur des inondations dans le bassin versant de Bendougou (Tableau 3). Elle évolue entre 829mm et 905mm du nord au sud. Quant à la densité de drainage des rivières, elle se concentre fortement au centre et à l'aval du bassin versant. Les pentes faibles dominent l'inclinaison des terrains du bassin ainsi bien que les altitudes qui sont majoritairement faibles. Enfin, les unités d'occupation du sol (plan d'eau et végétation) constituent le dernier facteur d'aléa d'inondation avec une dominance nette de la végétation.

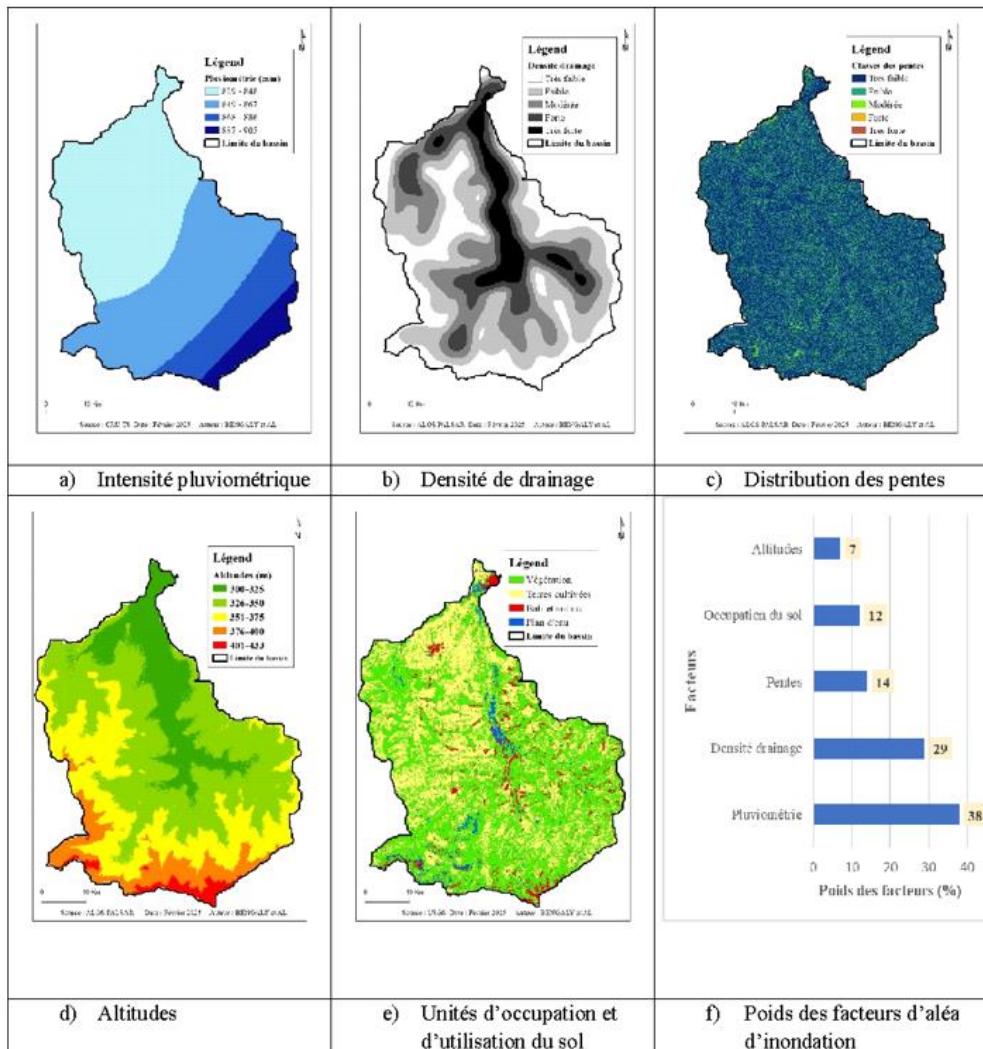


Figure 2 : Répartition spatiale des aléas d'inondation

Aléa d'inondation

Le niveau d'aléa d'inondation dans le bassin versant de Bendougou varie de très faible à niveau très fort (Figure 3). En effet, les zones d'aléa d'inondation très faible sont faiblement présentées dans le bassin. Les zones d'aléa faible sont majoritairement présentes au nord tandis que celles avec un niveau modéré sont réparties de part et d'autre dans le bassin. Les zones d'aléa fort se situent au centre et au nord alors que les zones de très forte susceptibilité se concentrent au centre.

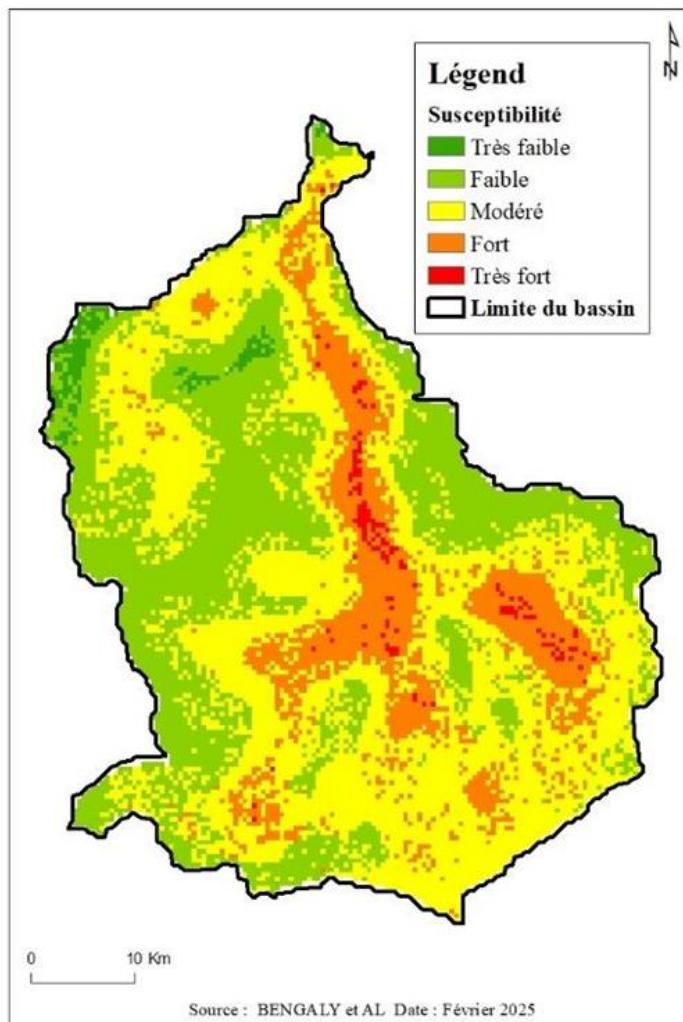


Figure 3 : Répartition spatiale de l'aléa d'inondation

Vulnérabilité d'inondation

La densité de la population a été considérée comme le principal facteur de vulnérabilité d'inondation dans le bassin versant de Bendougou. Elle a été évaluée en nombre de personnes par hectare. Les zones de très faible vulnérabilité (5 à 81 personnes par hectare) constituent la quasi-totalité de l'étendue du bassin versant (Figure 4).

Les zones de très forte vulnérabilité (de 1308 à 4653 habitants par hectare) se localisent de part et d'autre dans le bassin mais avec une forte représentativité à l'aval du bassin où toutes les eaux se convergent.

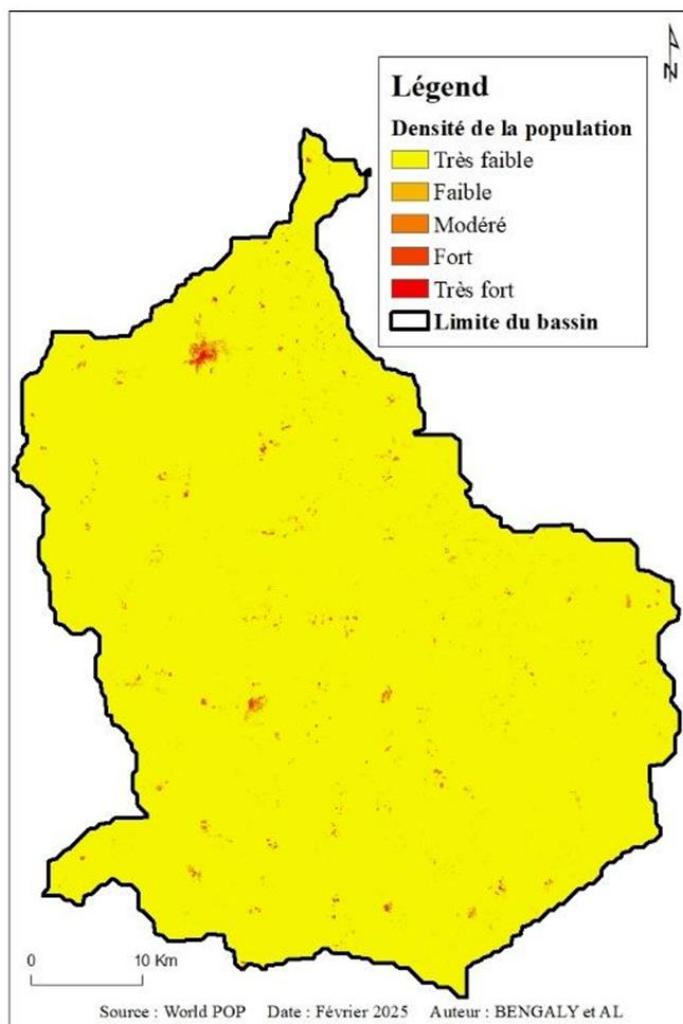


Figure 4 : Niveau de vulnérabilité d'inondation

Risque d'inondation

Le niveau du risque d'inondation dans le bassin versant de Bendougou varie entre les zones du niveau très faible aux zones de très fort niveau de risque (*Figure 5*).

Les zones de très faible et faible niveau de risque se situent de part et d'autre dans le bassin versant. Les zones où le risque est modérément présent suivent une répartition similaire. Les zones à très fort risque se localisent au centre et au nord du bassin.

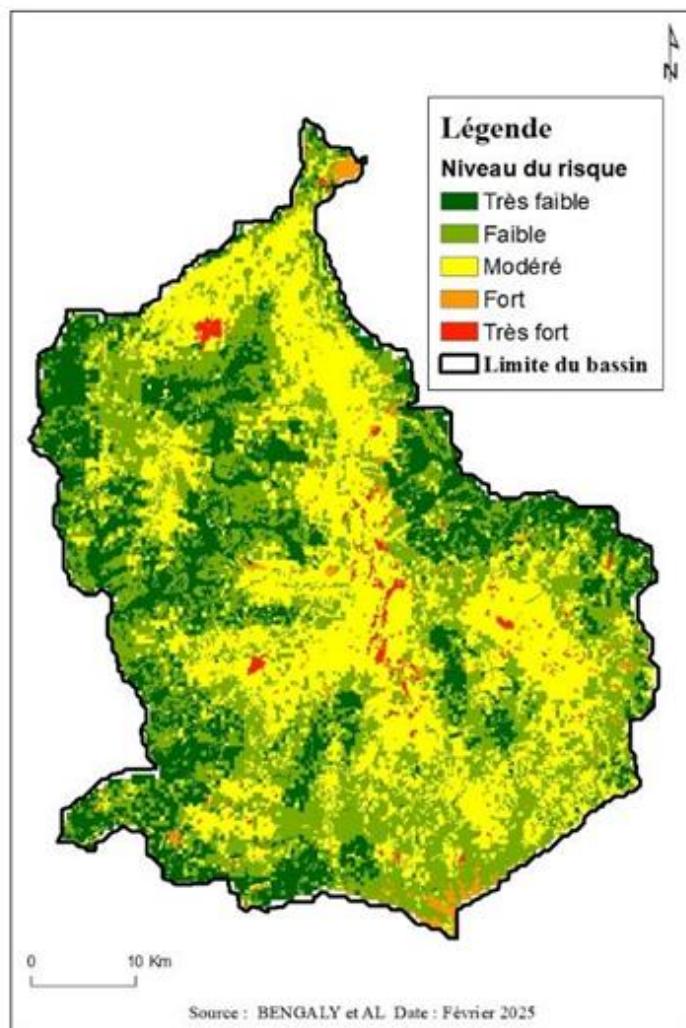


Figure 5 : Répartition spatiale du risque d'inondation

A travers le Tableau 4, il ressort que les zones de très faible niveau de risque couvrent une superficie de 60 212ha, soit 23% de la superficie totale du bassin. Les zones de faible niveau représentent la plus importante superficie (102 816ha avec 39,50% de la superficie totale). Les zones à risque modéré représentent 33% de la superficie totale, soit 86 853ha ; les zones à risque fort couvrent 5 983ha, soit 2,3% et les zones de très fort risque représentent 4642ha, soit 1,8% de la superficie totale.

Tableau 5 : Répartition des superficies du niveau de risque d'inondation

Risque	Superficie (ha)	Pourcentage
Très faible	60212	23,1
Faible	102816	39,5
Modéré	86853	33,3
Fort	5983	2,3
Très fort	4642	1,8
Total	260505	100,0

Discussion

Les résultats issus de cette étude mettent en évidence trois constats majeurs. Premièrement, l'aléa d'inondation dans le bassin versant de Bendougou a été évalué à partir de cinq facteurs naturels déterminants, à savoir la pluviométrie, la densité de drainage du réseau hydrographique, la pente, l'altitude et les unités d'occupation du sol. L'analyse spatiale de ces paramètres a permis de caractériser les zones selon leur niveau de susceptibilité aux inondations. Il ressort que la classe de susceptibilité modérée est prédominante, couvrant une superficie estimée à 123 967 hectares, soit 47,6 % de l'ensemble du bassin versant. Cette prédominance pourrait s'expliquer par la situation géographique du bassin, localisé dans une zone où les précipitations sont relativement abondantes sur une partie significative de l'année, favorisant ainsi la concentration des eaux de ruissellement. Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Kabore (2024), qui a montré que la majeure partie de la préfecture de Coyah, en Guinée, se situe également dans une zone où l'aléa d'inondation est modéré.

Par ailleurs, les analyses ont révélé que les zones de forte vulnérabilité sont essentiellement localisées dans les espaces d'implantation humaine, en particulier au niveau des zones bâties et des infrastructures. Cependant, leur superficie demeure relativement limitée à l'échelle du bassin, traduisant une exposition localisée mais susceptible d'engendrer des impacts significatifs en cas d'événements pluvieux extrêmes. Ces observations rejoignent celles de Hlal et Abdelkader (2022), dont les travaux ont montré que les zones inondées situées dans le nord-est du Maroc se trouvent majoritairement à proximité des rives des cours d'eau, confirmant ainsi la forte corrélation entre la proximité du réseau hydrographique et la vulnérabilité aux inondations.

Enfin, les résultats statistiques indiquent que le risque d'inondation dans le bassin versant de Bendougou demeure globalement faible, couvrant une superficie de 102 816 hectares, soit 39,5 % de la surface totale du bassin. Les zones à risque élevé et très élevé représentent environ 5 % de l'ensemble du bassin versant. Ces dernières se concentrent principalement dans les zones habitées, notamment au niveau de la ville de Bla, traduisant une vulnérabilité accrue des populations et des infrastructures face aux épisodes

d'inondation de ladite ville. Ces observations corroborent celles de Sanogo et Bengaly (2022), qui ont également mis en évidence un niveau de risque globalement faible dans leur zone d'étude, confirmant ainsi la prédominance de conditions d'exposition modérée dans les bassins versants soumis à des caractéristiques hydroclimatiques similaires.

Conclusion

Cette étude a permis d'élaborer la cartographie du risque d'inondation dans le bassin versant de Bendougou en s'appuyant sur une approche d'analyse multicritère intégrée dans un environnement SIG. Les résultats obtenus montrent que, bien que le risque d'inondation soit présent dans l'ensemble du bassin, il demeure globalement faible. Les zones à risque élevé se localisent principalement dans les lits (majeur et mineur) des cours d'eau, en particulier dans les secteurs urbanisés (notamment la ville de Bla) du bassin. Toutefois, le risque apparaît nettement plus marqué dans la partie aval, fortement anthropisée, où la pression humaine accentue la vulnérabilité du milieu.

Ces constats soulignent la nécessité de poursuivre et d'approfondir les recherches sur le risque d'inondation dans le bassin versant de Bendougou, notamment par une évaluation détaillée des dommages économiques et physiques potentiels. Enfin, cette étude constitue à la fois un outil d'aide à la décision pour les autorités locales et nationales dans la planification territoriale, et un instrument de sensibilisation des populations installées dans les zones exposées aux inondations.

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

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

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

References:

1. Bruckmann, L., Amanejieu, A., Moffo, M. O. Z., & Ozer, P. (2019). Analyse géohistorique de l'évolution spatio-temporelle du risque d'inondation et de sa gestion dans la zone urbaine de Douala (Cameroun). *Physio-Géo*, Volume 13, 91-113. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.8038>
2. Coulibaly, O., Bengaly, S., & Traore, D. (2024). Récurrence des inondations dans la ville de Bla Au Mali : enjeux et perspectives. *La Revue Africaine des Lettres, des Sciences Humaines et Sociales*

- KURUKAN FUGA, 3(11), 296-313.
<https://doi.org/10.62197/RVPU2141>
3. Diriba, D., Takele, T., Karuppannan, S., & Husein, M. (2024). Flood hazard analysis and risk assessment using remote sensing, GIS, and AHP techniques : A case study of the Gidabo Watershed, main Ethiopian Rift, Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2361813. <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2361813>
 4. F Fénéant, D. (2020). Analyse par Système d'Information Géographique (SIG) du risque d'inondation dans la ville de Gros-Morne en aval du bassin versant de la Rivière Mancelle, Haïti [Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes, Université de Liège]. p. 79
 5. Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
 6. Fofana, M., Adounkpe, J., Larbi, I., Hounkpe, J., Djan'na Koubodana, H., Toure, A., Bokar, H., Dotse, S.-Q., & Limantol, A. M. (2022). Urban flash flood and extreme rainfall events trend analysis in Bamako, Mali. *Environmental Challenges*, 6, 100449. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100449>
 7. Guelbeogo, S., & Lucien, O. (2022). Cartographie des risques d'inondation dans le bassin versant du Kou au Burkina Faso. *Afrique SCIENCE*, 21(3), 60-75.
 8. Hlal, M., & Abdelkader, S. (2022). Vulnérabilité des zones côtières du nord-est du Maroc aux risques d'inondation : cas de Saidia et Nador. 171-175
 9. Kabore, H. (2024). Evaluation de l'aléa inondation dans la préfecture de Coyah, République de Guinée [Université de Liège, Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes]. p. 74
 10. OCHA. (2024, octobre 3). Mali : Aperçu des régions affectées par les inondations de 2024 (03 octobre 2024) | OCHA. <https://www.unocha.org/publications/report/mali/mali-apercu-des-regions-affectees-par-les-inondations-de-2024-03-octobre-2024>
 11. Ogato, G. S., Bantider, A., Abebe, K., & Geneletti, D. (2020). Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 27, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100659>
 12. Saley, M. B., Kouamé, F., Penven, M. J., Biemi, J., & Kouadio, B. H. (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région

- semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : Apport des MNA et de l'imagerie satellitaire. Télédétection. 5, 53-67.
13. Sanogo, T., & Bengaly, S. (2022). Evaluation des zones à risque d'inondation dans le bassin versant de Kotoroni dans la région de Sikasso au sud du Mali à l'aide des outils géomatiques. 5(6), 73-86.