



## Cartographie des risques d'inondation à l'échelle du bassin fluvial à l'aide de l'indice de potentiel d'inondation : Cas du sous-bassin du Niéri-Ko (Bassin de la Gambie)

Cheikh Faye<sup>1</sup>, Sidy Dièye<sup>2</sup>, Ababacar Fall<sup>3</sup>, Boubacar Solly<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, Université Assane Seck de Ziguinchor, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal).

<sup>2</sup> Département de Géographie, Faculté des lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005 Dakar-Fann, Sénégal.

<sup>3</sup> Département de Génie Civil, Ecole Polytechnique de Thiès, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE),

<sup>4</sup> Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, Université Assane Seck de Ziguinchor, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor (Sénégal)

### Résumé

L'étude des phénomènes catastrophes naturelles telles que les risques inondation est particulièrement importante pour les décideurs politiques. Elle permet d'obtenir des informations stratégiques afin de mettre d'anticiper ou atténuation les risques et catastrophes consécutives à la manifestation de ce phénomène grâce à la mise en œuvre de plan de gestion cohérents. Le présent article applique une méthode d'indice multicritères pour évaluer les zones inondables à l'échelle d'un bassin fluvial, dans un environnement de système d'information géographique (SIG). La méthodologie développée a été appliquée dans le sous-bassin de la rivière du Niéri-Ko, un affluent du fleuve Gambie, en traitant les informations de sept paramètres : l'accumulation de débit, la distance du réseau de drainage, l'altitude, la pente, l'utilisation des terres, l'intensité des précipitations et la géologie. Cette méthode qui utilise le modèle FIGUSED-S, attribue une importance relative à chacun des paramètres pour l'occurrence et l'ampleur des inondations, et les valeurs de pondération correspondantes sont définies par un "processus de hiérarchie analytique". Par la suite, et en fonction de l'importance relative de chaque indice, les informations spatiales sont superposées, ce qui donne une carte des risques d'inondation de le sous-bassin du Niéri-Ko situé dans le bassin de la Gambie. Les résultats obtenus indiquent les zones inondables, avec un risque d'inondation très élevé se produisant principalement dans les basses terres à proximité du réseau de drainage. La carte des risques d'inondation fournit les activités de planification et les plans d'atténuation qui sont essentiels pour protéger à la fois les activités agricoles et les infrastructures existantes contre les inondations futures.

**Mots clés :** analyse SIG, gestion des risques d'inondation, zones inondables, risques d'inondation, processus de hiérarchie analytique

### Mapping of flood risks at the river basin scale using the flood potential index: Case of the Niéri-Ko sub-basin (Gambia River basin)

#### Abstract:

The study of natural disasters such as flood risks is particularly important for policy makers. It makes it possible to obtain strategic information in order to anticipate or mitigate the risks and disasters following the manifestation of this phenomenon through the implementation of coherent management plan. This article applies a multicriteria index method to assess flood zones at the scale of a river basin, in a geographic information system (GIS) environment. The methodology developed was applied in the sub-basin of the Niéri-Ko river, a tributary of the Gambia river, by processing information from seven parameters: flow accumulation, distance from the drainage network, altitude, slope, land use, rainfall intensity and geology. This method, which uses the FIGUSED-S model, assigns a relative importance to each of the parameters for the occurrence and magnitude of flooding, and the corresponding weighting values are defined by an "analytical hierarchy process". Subsequently, and depending on the relative importance of each index, the spatial information is superimposed, which gives a flood risk map of the Niéri-Ko sub-basin located in the Gambia basin. The results obtained indicate areas prone to flooding, with a very high risk of flooding occurring mainly in the lowlands near the drainage network. The flood risk map provided supports planning activities and mitigation plans which are essential to protect both agricultural activities and existing infrastructure from future flooding. The study of natural disasters such as flood risks is particularly important for policy makers. It makes it possible to obtain strategic information in order to anticipate or mitigate the risks and disasters following the manifestation of this phenomenon through the implementation of coherent management plan. This article applies a multicriteria index method to assess flood zones at the scale of a river basin, in a geographic information system (GIS) environment. The methodology developed was applied in the sub-basin of the Niéri-Ko river, a tributary of the Gambia river, by processing information from seven parameters: flow accumulation, distance from the drainage network, altitude, slope, land use, rainfall intensity and geology. This method, which uses the FIGUSED-S model, assigns a relative importance to each of the parameters for the occurrence and magnitude of flooding, and the corresponding weighting values are defined by an "analytical hierarchy process". Subsequently, and depending on the relative importance of each index, the spatial information is superimposed, which gives a flood risk map of the Niéri-Ko sub-basin located in the Gambia basin. The results obtained indicate areas prone to flooding, with a very high risk of flooding occurring mainly in the lowlands near the drainage network. The flood risk map provided supports planning activities and mitigation plans which are essential to protect both agricultural activities and existing infrastructure from future flooding.

**Key Words:** GIS analysis, flood risk management, flood zones, flood risks, analytical hierarchy process

<sup>1</sup> Corresponding author: [cheikh.faye@univ-zig.sn](mailto:cheikh.faye@univ-zig.sn)

## INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de changement climatique et de croissance démographique, la multiplication et/ou l'intensification des crues et les inondations sont devenues une problématique majeure [1]. En effet, même si les précipitations constituent un élément vital pour l'homme et son environnement (rechargement des rivières, nappes souterraines, développement de la végétation, etc.), les épisodes pluvieux génèrent des volumes d'eau parfois difficilement maîtrisables. A l'échelle mondiale, les inondations comptent parmi les phénomènes naturels les plus fréquents, les plus dangereux et les plus destructeurs [2]. Elles touchent environ 170 millions de personnes par an dans le monde [3]. Ils affectent également la production agricole et les infrastructures dans les villes et les zones rurales. Des estimations récentes montrent que la fréquence des inondations extrêmes devrait augmenter d'ici 2100. Les facteurs qui influencent la genèse des inondations sont la topographie, le relief élevé, les précipitations extrêmes, la couverture végétale, les types de formations géologiques, les réseaux hydrographiques et les interventions humaines [4]. Au Sénégal, les inondations constituent un risque naturel important qui a connu un regain d'activité au cours des dernières décennies. Ces phénomènes d'inondations enregistrés mettent en péril les infrastructures existantes, les terres agricoles et la vie des citoyens. La croissance démographique, le développement de l'habitat dans les zones reculées et l'augmentation générale des infrastructures construites ont accru l'impact potentiel du risque d'inondation. Par ailleurs, les tendances à l'urbanisation croissante exercent une pression supplémentaire sur la nécessité d'étendre les zones habitées et les infrastructures routières à des zones qui pourraient être inadaptées en raison du risque élevé d'inondation [5 ; 6]. En outre, les inondations peuvent s'accompagner de glissements de terrain, un risque supplémentaire qui peut avoir un impact catastrophique sur les établissements humains et les vies humaines. Jusqu'à présent, un certain nombre d'études se sont concentrées sur la cartographie des risques d'inondation comme première étape afin d'estimer la vulnérabilité aux inondations [7 ; 8 ; 9 ; 10]. Depuis plusieurs années, les villes sénégalaises connaissent des épisodes répétitifs des inondations, une croissance progressive de l'érosion urbaine et des problèmes d'assainissement sans précédents. L'ensemble de ces risques environnementaux sont dus à l'agressivité des facteurs climatiques et aux activités anthropiques incontrôlées [2]. Ces aléas climatiques sont amplifiés par des facteurs aggravants comme la pauvreté des ménages, l'inadéquation des matériaux de construction, la construction d'habitations dans des zones inondables [11], la faiblesse des ouvrages de protection (digues), l'ensablement des points d'eau, l'inadéquation ou l'absence de plan d'aménagement urbain, la faiblesse des mécanismes d'information et d'alerte [12], la faiblesse des structures régionales de gestion des catastrophes, etc. Ainsi les dégâts causés par les inondations chaque année dans les différentes villes du pays sont entre autres : insalubrité, effondrements d'habitations et d'infrastructures (écoles, routes, ponts, digues, etc.), des pertes de bétail et des hectares de cultures pluviales ; mais aussi des pertes en vies humaines. Toutes les parties d'un bassin fluvial sont vulnérables aux inondations à des degrés différents selon les cas et les situations, ce qui les rend uniques. Une évaluation des risques d'inondation est un outil utile pour les décideurs politiques et les autorités locales afin de concevoir des mesures de protection dans les bassins hydrographiques. Les principales étapes de la gestion des risques d'inondation sont les suivantes [9] : planification des mesures d'atténuation (avant l'inondation), mesures d'intervention (pendant l'inondation) et rétablissement (après l'inondation). Différentes méthodes et techniques ont été appliquées, y compris la simulation (par exemple, le logiciel HEC-RAS), les méthodes d'indexation, l'analyse statistique et les méthodes hybrides dans un environnement de système d'information géographique (SIG) [13 ; 14 ; 15]. Le SIG est reconnu comme un moyen puissant pour intégrer et analyser des données provenant de différentes sources. Ainsi, la cartographie des risques d'inondation a été mise en œuvre pour différents scénarios de croissance urbaine, en simulant les conséquences de cas alternatifs [16]. Selon un rapport publié par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) [17], des approches déterministes sont utilisées pour évaluer les impacts des catastrophes d'un scénario d'aléa donné, tandis que des méthodes non déterministes sont utilisées pour obtenir des estimations plus précises de la fréquence des aléas et des dommages. Ainsi, les méthodes non déterministes prennent en compte tous les scénarios possibles, en intégrant les incertitudes inhérentes dues à la complexité du phénomène analysé, à son caractère aléatoire ou simplement aux limites des connaissances. Par ailleurs, d'autres méthodes d'études sur les inondations utilisent principalement des modèles spatiaux SIG, y compris un nombre important - et toujours croissant - de méthodes proposées par Chapi et ses collègues [18] ont proposé un nouveau modèle d'intelligence artificielle (IA), appelé bagging-LMT, qui est la combinaison d'un ensemble de bagging et d'un arbre modèle logistique. La méthode a été appliquée dans le bassin hydrographique de Haraz, dans le nord de l'Iran. Des techniques de télédétection associées à des SIG ont été utilisées pour évaluer la vulnérabilité aux inondations dans la région du Bengale-Occidental en Inde [19]. Les méthodes modernes sont basées sur des ensembles de systèmes d'inférence neuro-floue adaptatifs et d'algorithmes méta heuristiques [20] ainsi que sur des algorithmes génétiques et d'évolution différentielle [21]. Zhao *et al.* [22] ont utilisé un modèle de forêt aléatoire (RF) afin de cartographier les zones inondables dans la partie montagneuse de la Chine. Il est clair que le grand nombre de modèles incluant différents nombres de paramètres peut être déroutant. Nous nous sommes donc concentrés sur l'application d'une méthode existante dans un environnement différent et à une échelle plus petite (bassin fluvial). La présente étude vise à analyser l'occurrence des inondations dans une zone spécifique ; les inondations étant des aléas de nature particulièrement complexe, une méthode non déterministe, telle que celle appliquée dans la présente recherche, est appropriée [4]. Il s'agit d'un travail qui porte sur la définition des zones inondables dans un bassin fluvial du Niéri-Ko (affluent du bassin de la Gambie), en utilisant une méthode d'indexation dans un environnement SIG. Cette méthode analyse sept paramètres : l'accumulation de débit (F), l'intensité des précipitations (I), la géologie (G), l'utilisation des terres (U), la pente (S), l'altitude (E) et la distance par rapport au réseau de drainage (D). L'objectif est de définir les zones à risque d'inondation dans le bassin du Niéri-Ko, où les mesures d'atténuation et de protection doivent être prioritaires. La méthodologie développée a été présentée dans des travaux précédents [14]. Ces travaux fournissent des évaluations et des cartes des risques d'inondation à une échelle régionale. Cependant, un plan intégré de protection contre les inondations

présuppose une plus grande discrétisation des cartes des risques afin qu'elles soient économiquement abordables et descriptibles en termes de processus environnementaux. Par conséquent, nous avons réduit l'application de la méthode dans un bassin fluvial où les cartes des risques d'inondation ne sont pas disponibles.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

**Zone d'étude :** Le fleuve Gambie prend sa source à environ 1 150 m d'altitude dans le Fouta Djallon, près de Labé en République de Guinée. Le bassin de la Gambie couvre une superficie de près de 77 100 km<sup>2</sup>, partagés entre trois Etats [23]: la Guinée (pourcentage de la superficie du bassin), le Sénégal (% de la superficie) dont il draine presque toute la région Tambacounda, une partie de la Haute-Casamance et du Saloum méridional et la Gambie (% de la superficie) dont il est l'épine dorsale et où il rejoint l'océan Atlantique. Il s'étend, en latitude, du 11°22' Nord (dans le Fouta-Djallon) au 14°40' Nord (dans le Ferlo sud-oriental) et, en longitude, du 11°13' Ouest (Fouta-Djallon) au 16°42' Ouest (Banjul, embouchure). La longueur du cours d'eau principal est de 1180 km, un cours d'eau constitué de deux biefs : un bief continental et un bief maritime [24 ; 25]. Le bief continental reçoit de nombreux affluents sur sa rive gauche (Diaguéri, Niokolo-Koba, Niéri-Ko, Sandougou...) et sur sa rive droite (Thiokoye, Diarha, Koulountou...) (Figure 1). Le bassin versant du Niéri-Ko, sous-bassin le plus vaste du bassin de la Gambie, couvre une surface de 11757 km<sup>2</sup>. Cet affluent se trouve sur la partie aval du fleuve Gambie, entièrement dans la région du Sénégal Oriental, entre les latitudes 13°10' et 14°45' Nord et les longitudes 12°15' et 13°30' Ouest [23 ; 25]. Le Niéri-Ko qui prend sa source à 110 m d'altitude au Nord de Goudiry. Il traverse, au long de son cours (232 km), de même que son principal affluent le Sanone (132 km), des régions peu arrosées, et assez plates (essentiellement des plateaux gréseux du Continental Terminal). Son cours principal prend sa source à 110 m. d'altitude au Nord de Goudiry. Le Niéri-Ko qui est contrôlé au pont de la route de Kédougou, tout près de sa confluence avec la Gambie, est un affluent de rive droite dont les disponibilités en eau de surfaces sont très faibles, malgré la taille du bassin. Il est marqué par des étiages prononcés marqués par un arrêt de l'écoulement durant de nombreux jours sur une année [26].

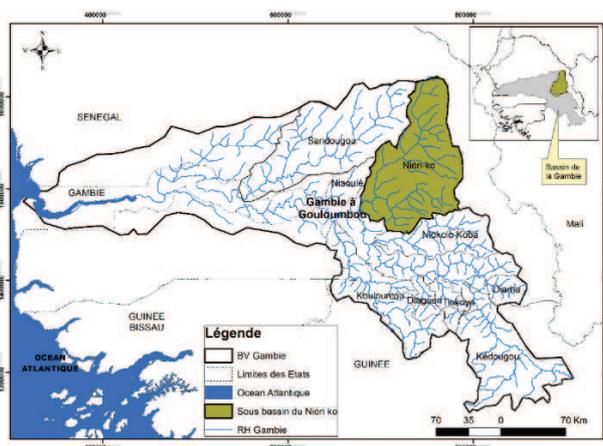


Figure 1 - Localisation du sous-bassin du Niéri-Ko dans le bassin versant de la Gambie

**Données :** Les zones inondables du bassin de la Mouriki ont été évaluées dans la présente étude à l'aide de la méthode FIGUSED-S. FIGUSED-S a été développé par les auteurs [14] et est un modèle basé sur un index et fonctionnant dans un environnement SIG. FIGUSED définit les zones inondables et avait à l'origine une portée régionale. Il traite les informations de sept paramètres, dont les initiales créent le nom de la méthode : "FIGUSED". Les paramètres, décrits en détail dans le texte suivant, sont : l'accumulation de débit (flow accumulation (F)), l'intensité des précipitations (I), la géologie (G), l'utilisation des terres (U), la pente (Slope (S)), l'altitude (Elevation (E)) et la distance par rapport au réseau de drainage (D). Les données morphologiques, météorologiques, géologiques et hydrogéologiques ont été recueillies par les auteurs dans le cadre d'une analyse détaillée de la zone étudiée [27]. Les informations obtenues ont ensuite été vérifiées, corrigées et harmonisées en fonction des objectifs du présent exercice.

**Accumulation de flux (F) :** Cette méthode permet d'estimer le débit accumulé, un critère important de l'occurrence des inondations. Elle le fait en agrégeant les flux d'eau de la montée à la descente sur la grille de sortie. Des valeurs élevées de débit accumulé indiquent les cellules dans lesquelles l'eau qui s'écoule a tendance à se concentrer. Ces zones sont plus sujettes au risque d'inondation. Comme indiqué dans le Tableau 1, les valeurs d'accumulation de débit sont comprises entre 0 et 1257465 avec une prédominance de la classe 0-60000 qui représente 99,7% de la surface du sous-bassin du Niéri-Ko. La Figure 2 montre la distribution de l'indice d'accumulation de débit dans la région étudiée, les valeurs élevées ne se produisant que dans les affluents et leurs sorties.

**Intensité des précipitations (I) :** Le paramètre de l'intensité des précipitations (I) est exprimé à l'aide de l'indice de Fournier modifié (IFM), qui est la somme de l'intensité mensuelle moyenne des précipitations enregistrées par les stations pluviométriques. La distribution spatiale de ce critère a été trouvée en utilisant la méthode d'interpolation spline afin de prendre également en compte l'allocation des stations dans le sous-bassin du Niéri-Ko. Les valeurs du paramètre de l'intensité des précipitations (I) se distinguent par cinq classes (avec des valeurs qui varient de 145 à 215), comme indiqué dans le Tableau 1. La distribution spatiale des valeurs de l'intensité de la pluie est illustrée dans la Figure 3, les valeurs les plus élevées étant situées dans la partie Sud-ouest de la zone étudiée. Les valeurs de l'indice IFM moyen ont montré une variabilité spatiale élevée dans le sous-bassin du Niéri-Ko. En effet, même si le risque d'inondation peut diminuer d'ampleur et d'intensité du Sud au Nord suivant la baisse des totaux pluviométriques annuels, paradoxalement, c'est le nord qui souffre le plus en raison des constructions et du type de sol, entre autres

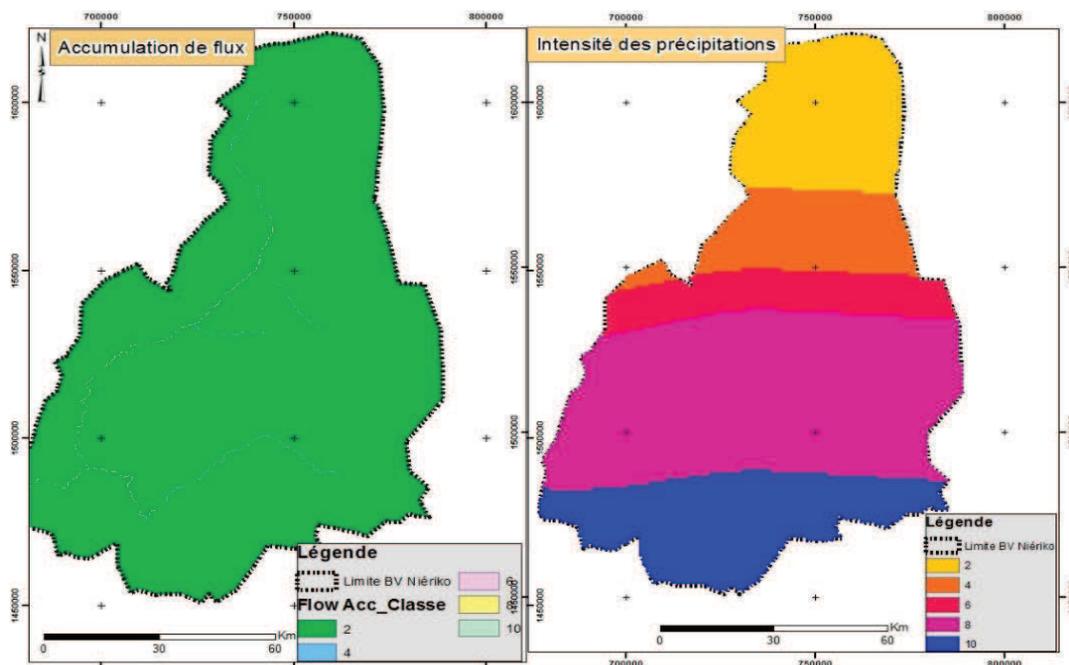


Figure 2 - Indice d'accumulation de flux (F) dans le bassin

Figure 3 - Indice de l'intensité des précipitations (I) dans le bassin

**Géologie (G) :** Le paramètre de la géologie est important pour la caractérisation des zones inondables, car il peut potentiellement influencer l'ampleur des inondations. Alors que les roches imperméables favorisent le ruissellement de surface et augmentent l'intensité des inondations, les formations perméables favorisent l'infiltration d'eau. Selon la géologie, cinq couches ont été notées, les roches du socle néoprotérozoïque et paléozoïque indifférencié qui représentent 28,6% de la surface du sous-bassin du Niéri-Kose voyant attribuer la valeur la plus élevée (10) et les alluvions fluviales récentes (avec 0,16% de la surface du sous-bassin) avec la valeur la plus faible (2) en raison de leur capacité d'infiltration croissante (Tableau 1). Les alternances de marnes à discocyclines et de calcaires jaunes à mollusque sont été notés 4, les grès bioturbés et argiles kaoloniques (la couche la plus importante du bassin avec 63,9%) notés 6 et la formation du Saloum notée 8. La Figure 4 montre la distribution spatiale des valeurs du paramètre de la géologie.

**Utilisation des terres (U) :** Le paramètre d'utilisation des sols est principalement lié au taux d'infiltration en raison de la corrélation existante entre les caractéristiques de surface qui affectent le ruissellement (sub) superficiel, l'infiltration des eaux souterraines et le flux de débris. Les informations sur l'utilisation des terres ont été extraites des images Landsat8 sur la couverture des terres [28], montrant qu'une grande partie de la zone étudiée est couverte de savanes boisées (66,6% de la surface du sous-bassin du Niéri-Ko) et de savanes arbustives (13,1% de la surface du sous-bassin), avec des taux de 10 et 8 respectivement (Figure 5). La forêt (3,41 % de la surface) favorise généralement l'infiltration, tandis que les zones agricoles (22,8 % de la surface) permettent à l'eau de s'écouler en plus grande quantité sous forme de ruissellement de surface ou de subsurface. Les zones de forêt clairsemée et les zones en eaux libres ne représentent qu'une fraction du sous-bassin du Niéri-Ko.

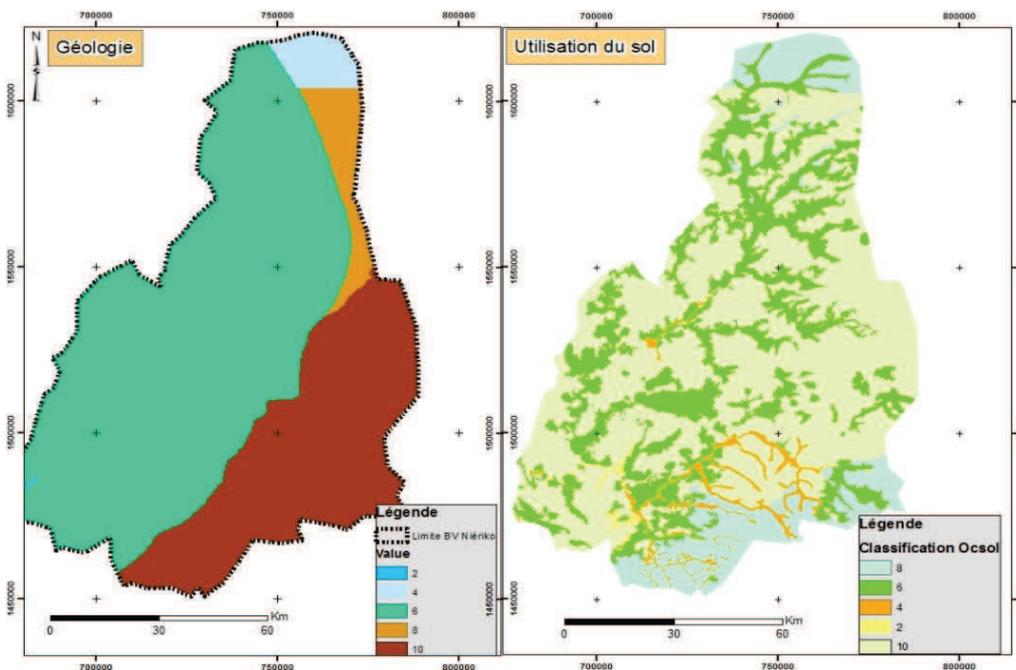


Figure 4 - Indice de géologie (G) dans le bassin

Figure 5 - Indice d'utilisation des sols (U) dans le bassin

**Pente (S) :** La pente est fortement corrélée à la fois au volume et à la vitesse du ruissellement de surface, ainsi qu'à l'infiltration dans les eaux souterraines. Les zones plates s'inondent plus rapidement que les zones inclinées où le ruissellement s'écoule plus bas. La carte des pentes du sous-bassin du Niéri-Koa a été construite à partir du modèle numérique de terrain (MNT tiré du SRTM 30 m USGS) de la zone avec une résolution de cellule de m. En suivant la classification décrite dans la bibliographie [29], cinq classes de pentes ont été définies. La Figure 6 illustre la distribution spatiale de la pente, montrant que la partie Est - la zone la plus élevée - est plus raide. Les parties centrale et occidentale ont une pente plus faible, principalement couverte par la savane.

**Élévation (E) :** Comme l'eau coule de plus en plus haut, les zones de plaine sont plus sujettes aux inondations. La carte d'élévation a été obtenue à partir de la reclassification du MNT du sous-bassin du Niéri-Ko. Le Tableau 1 présente les définitions des cinq niveaux d'élévation, tandis que la Figure 7 illustre leur répartition. L'élévation augmente de l'Ouest à l'Est, de  $\approx 11$  à  $\approx 177$  m. Ainsi, une augmentation de plus de 166 m a lieu sur une distance de 63 km, ce qui indique clairement la partie Est abrupte de la région. Les zones de faible altitude sont situées principalement dans la partie occidentale, dans le sud et, en partie, dans la partie centrale du bassin versant étudié. Les classes d'altitudes 55.1-75 m et 75.1-100 m représentent la surface du sous-bassin du Niéri-Ko la plus importante, avec respectivement avec 30% et 29%.

**Distance par rapport au réseau de drainage (D) :** Les débordements de rivières peuvent également déclencher une inondation, car l'eau déborde du canal de la rivière et se répand dans les environs. Plus la distance augmente, plus le risque diminue, car les zones plus proches du réseau fluvial sont sujettes à ce risque. La distance par rapport à la couche du réseau de drainage a été définie en appliquant un outil de zone tampon dans un environnement SIG, en conjonction avec le réseau de drainage existant. Les zones proches du réseau de drainage ont été considérées comme étant celles de moins de 200 m (7% de la surface du sous-bassin du Niéri-Ko) ; la classification exacte est présentée dans le Tableau 1. En revanche, l'effet de ce critère a diminué pour les distances supérieures à 2000 m et qui représentent 36% de la surface du sous-bassin. La Figure 8 illustre les valeurs des cellules de l'indice D, qui suivent la géométrie du réseau de drainage, les valeurs les plus élevées étant situées dans la partie Est.

Naturellement, des paramètres supplémentaires peuvent être pris en compte en fonction des caractéristiques régionales spécifiques et de la disponibilité des données. Il peut s'agir de nouveaux paramètres, par exemple l'évapotranspiration ou des paramètres dérivés tels que le pic annuel maximum de précipitations, le nombre annuel moyen de jours de fortes précipitations et autres [4 ; 30].

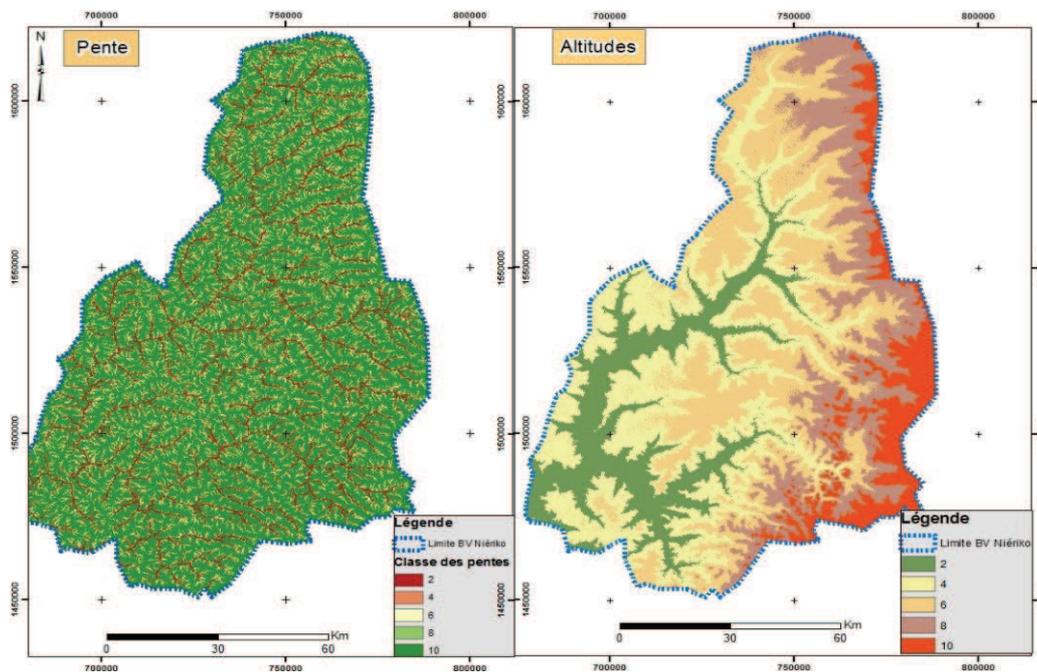


Figure 6 - Indice de pente (S) dans le bassin

Figure 7 - Indice d'élévation (E) dans le bassin

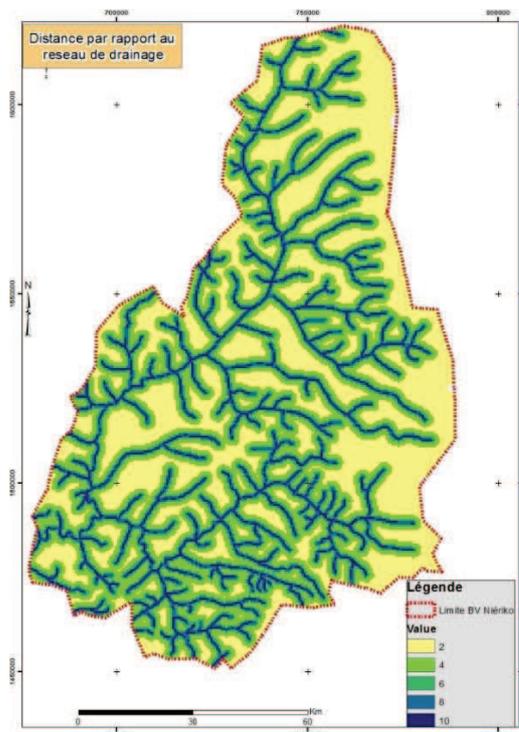


Figure 8 - Indice de distance par rapport au réseau de drainage (D) dans le bassin

**Méthode :** La méthode FIGUSED-S analyse les paramètres hydrogéologiques, morphologiques et socio-économiques ci-dessus et attribue un poids relatif à chaque facteur. La zone étudiée a ainsi été analysée spatialement, et chaque point de grille a été évalué pour chacun des sept paramètres. Chaque point de grille a ensuite été évalué sur une échelle allant de 2 à 10. La notation des paramètres dans la zone étudiée, ainsi que la zone correspondante et sa part sont indiquées dans le Tableau 1. Les valeurs acquises ont été traitées afin de calculer l'importance relative de chaque critère et le facteur de pondération correspondant ( $w$ ). Ces pondérations relatives ont été déterminées par un processus analytique hiérarchique (AHP), dont les informations détaillées sont également disponibles dans l'étude de Kazakis *et al.* [14]. La caractéristique supplémentaire de la méthode FIGUSED-S par rapport à la méthode FIGUSED (-S dans l'acronyme) est le processus de validation réalisé par une analyse de sensibilité. Ainsi, la version validée de la méthode intègre également cette caractéristique statistique pour tenter de garantir que les poids des paramètres utilisés sont représentatifs. La réalisation d'une analyse de sensibilité est mise en évidence dans des méthodes similaires disponibles dans la littérature [31 ; 32 ; 33]. Une comparaison par paire a été effectuée pour le développement de la méthode FIGUSED, en utilisant une matrice. L'importance des différents paramètres a été déterminée à la suite de l'expérience dans la littérature ainsi que des suggestions spécifiques fournies par la consultation d'experts. En conséquence, l'outil de calcul matriciel du SIG a été utilisé pour superposer les paramètres évalués et ajuster les poids produits. En fonction des valeurs obtenues, une carte des risques d'inondation a été produite. Les sept paramètres ont influencé, avec le poids qui leur a été attribué (équation), la superposition de la carte.

$$FHIS = 1,2 \times F + 0,5 \times I + 0,4 \times G + 0,7 \times U + 1,6 \times S + 3,0 \times E + 2,5 \times D \quad (1)$$

L'équation 1 montre les poids attribués à chacun des sept paramètres pour déterminer l'AHP. Il apparaît que les paramètres d'élévation et de distance par rapport au drainage jouent le rôle le plus important dans la définition du risque d'inondation. Cela montre que l'AHP permet d'interpréter les phénomènes physiques qui font que les zones de faible altitude situées à proximité du réseau de drainage sont particulièrement sujettes aux inondations. L'accumulation des inondations et l'utilisation de la couverture terrestre sont deux paramètres qui revêtent une grande importance pour la définition du risque d'inondation. L'intensité des précipitations et les paramètres géologiques semblent avoir un rôle moindre, selon l'AHP, même si 63,7% de la zone étudiée se situent dans les deux dernières classes du paramètre I. De plus, la variance du paramètre I est élevée (entre 145 et 215 mm). Dans les cas où cette variance est plus élevée [14], le poids du paramètre I semble augmenter.

## RÉSULTATS

Le Tableau 1 indique la part des zones en fonction de leur risque d'inondation. Il apparaît que seulement 4,59 % de la surface du sous-bassin du Niéri-Koest confronté à un risque d'inondation très élevé, tandis que pour 38,17 % supplémentaires du sous-bassin, le risque d'aléa est élevé. Cela signifie que plus de 40 % du sous-bassin est soumis à un risque d'inondation élevé ou très élevé. De plus, 24,86 % de la zone est exposée à un risque d'aléa moyen et 25,73 % à un risque faible. En revanche, seulement 6,65 % du sous-bassin sont soumis à des risques d'inondation très faibles. La superposition pondérée des critères analysés a permis de créer la carte des risques d'inondation du sous-bassin du Niéri-Ko. Cette carte est illustrée à la Figure 9 et montre que les zones à risque d'inondation élevé/très élevé sont situées dans la partie proche du réseau de drainage. Il est clair que le risque d'inondation suit le réseau de drainage, et les zones à risque sont celles situées près des ruisseaux. Plus important encore, on observe des villages situés dans des zones à risque d'inondation élevé ou très élevé. Par conséquent, les mesures d'atténuation des inondations doivent partir de ces endroits, afin de soutenir la résistance aux inondations des zones habitées.

L'application réussie de la méthode FIGUSED-S dans un petit bassin fluvial permet de vérifier l'adaptabilité de la méthode. En outre, cette étude constitue la base d'une future modification de cette méthode, en y ajoutant de nouveaux paramètres. En outre, une comparaison croisée des résultats obtenus avec des scénarios de simulation d'inondation peut encore améliorer la méthode FIGUSED-S. Enfin, il convient de mentionner que l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface est négligée dans la cartographie des risques d'inondation. Bien que le coefficient d'infiltration dans les formations géologiques soit pris en compte dans la méthode FIGUSED-S, la contribution des sources et de l'écoulement des eaux souterraines dans les rivières a été moins étudiée [4].

Les cartes des risques d'inondation peuvent être des outils utiles dans le cas où les résultats sont adaptés et passent à des mesures telles que les changements d'utilisation des terres et l'établissement de petits barrages dans les torrents. Les zones inondables sont sensibles aux modifications des forêts et peuvent changer radicalement le régime d'une région [33]. Les tempêtes provoquées par le changement climatique peuvent également exacerber les inondations [34 ; 35]. Plusieurs chercheurs ont proposé des stratégies détaillées pour atténuer les risques naturels [36]. Dans le sous-bassin du Niéri-Ko, les changements d'utilisation des terres dans les basses terres en conjonction avec des aménagements pourraient être la solution optimale pour atténuer les inondations. La présente étude intègre une combinaison linéaire pondérée (CLP) des différents paramètres. L'exigence fondamentale de cette approche est que les cartes d'attributs ne soient pas fortement corrélées et soient indépendantes les unes des autres. Les cartes combinées illustrées dans la section 3 (Figures 2 à 8) ne sont pas fortement corrélées, ce qui permet d'utiliser la CLP. La question de savoir si la CLP est la meilleure technique pour cette application ou non est un sujet qui a fait l'objet d'un débat considérable parmi les universitaires [37]. Bien qu'il ne soit pas possible de fournir une réponse directe, il est certain que, grâce à son efficacité, la CLP est l'une des techniques basées sur les SIG les plus utilisées [4].

Table 1 - Classes des paramètres de la méthode FIGUSED-S et valeurs correspondantes

Paramètres	Classes	Classement	Superficie (km <sup>2</sup> )	Part (%)
F : Accumulation de flux	0 - 60,000	2	11291,0724	99,7
	60,000.1- 250000	4	14,0013	0,27
	250000,1 - 500000	6	6,0006	0,055
	500000,1 - 800000	8	5,0008	0,048
	800000,1 - 1257465	10	3,0003	0,030
I : Intensité des précipitations	145 - 160	2	1802,23	15,92
	160,1 - 175	4	1296,55	11,45
	175,1 - 190	6	1115,88	9,86
	190,1 - 200	8	4895,70	43,25
	200,1 - 215	10	2208,73	19,51
G : Géologie	Alluvion fluviale récente	2	18,53	0,16
	Alternances de marnes à discocyclines et de calcaires jaunes à mollusques	4	318,77	2,82
	Grès bioturbés et argiles kaoloniques	6	7238,19	63,94
	Formation du Saloum/Formation de Matam	8	502,61	4,44
	Socle néoproterozoïque et paléozoïque indifférencié	10	3240,96	28,63
U : Utilisation du sol	Forêts et eaux libres	2	74,03	0,67
	Forêts galeries	4	304,82	2,74
	Zones de culture	6	2538,76	22,81
	Savanes arbustives	8	1461,42	13,13
	Savanes boisées/savanes boisées parsemées de steppes	10	7752	60,66
S : Pente	0 - 8	10	743,1	6,56
	8,1 - 25	8	478	4,22
	25,1 - 45	6	636	5,62
	45,1 - 70	4	1667	14,73
	70,1 - 90	2	7795	68,87
E : Elevation	11 - 55	2	1705,72	15
	55,1 - 75	4	3351,91	30
	75,1 - 100	6	3245,36	29
	100,1 - 120	8	2018,04	18
	120,1 - 177	10	975,59	9
D : Distance par rapport au drainage	<200	10	808,36	7
	200-500	8	1191,00	11
	501-1000	6	1928,24	17
	1001-2000	4	3322,59	29
	>2000	2	4068,85	36
FIGUSED: Risque d'inondation	20,45 - 60	Très faible	752,26	6,65
	60,1 - 90	Faible	2911,97	25,73
	90,1 - 130	Modéré	2813,9	24,86
	130,1 - 170	Élevé	4320,94	38,17
	170,1 - 205	Très élevé	519,99	4,59

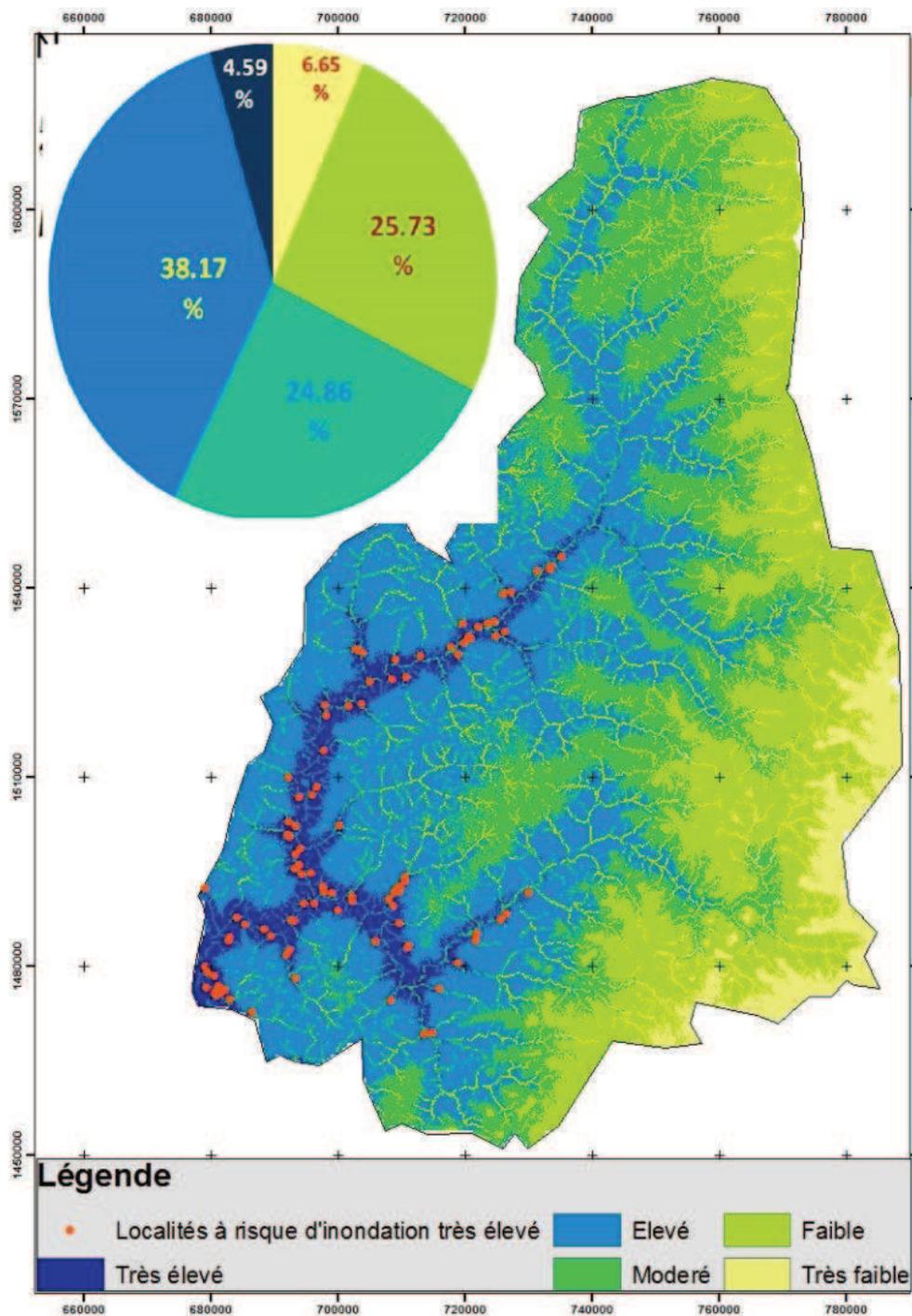


Figure 9 - Indice spatial de sensibilité aux risques d'inondation grâce à la méthodologie FIGUESD-S et pourcentage (%) de sensibilité aux inondations dans le bassin

## DISCUSSION

La cartographie des risques d'inondation a été évaluée en fonction des données de l'accumulation de débit, de l'intensité des précipitations, de la géologie, de l'utilisation des terres, de la pente, de l'altitude et la distance par rapport au réseau de drainage. Il convient de noter attentivement que les zones utilisées sont les zones à risque d'inondations telles qu'identifiées par la direction d'écoulement et l'accumulation d'écoulement de l'eau [38]. L'accumulation d'eau d'écoulement se produit à la suite d'une pluie excessive causant plus de dommages aux terrains de construction. La méthode d'analyse hiérarchisée (AHP) a été largement utilisée dans l'évaluation des risques naturels. Dans la littérature actuelle, on peut trouver des options modifiées et des approches hybrides, telles que l'AHP floue [39] et l'AHP assistée par simulation de Monte Carlo (MC-AHP) [40], qui ont toutes deux été utilisées dans l'évaluation des risques d'inondation. L'AHP a également été intégrée à un modèle d'évaluation de la pertinence pour évaluer les risques d'inondation de manière spatiale [41]. Dans une approche différente, Liu *et al.* [42] ont récemment utilisé une approche naïve de Bayes pour évaluer spatialement les risques d'inondation dans leur modèle basé sur le SIG. Des études antérieures [43 ; 44] ont analysé et présenté des prévisions de crues à une résolution de 100 m. Cependant, afin de déterminer et valider les zones sujettes à cet aléa naturel, il est essentiel de disposer de données à haute résolution [45]. Des approches similaires ont été testées en utilisant l'imagerie satellitaire à différentes résolutions spatiales [46], parallèlement à diverses techniques de traitement d'image. De telles approches présentent un grand potentiel dans les zones où les observations au sol sont rares ou insuffisantes. Les auteurs ont l'intention de combiner la méthodologie de l'indice présentée avec des modèles de simulation, en développant une méthodologie plus sophistiquée qui couple les résultats des deux modèles. L'échelle d'une telle analyse est celle du bassin fluvial. A ce jour, Vu et Ranzi [47] ont développé le modèle FLO-2D et l'ont appliqué dans la province côtière de Quang Ngai au Vietnam afin d'estimer la profondeur, la durée et la vitesse des inondations. Cependant, dans de nombreux cas, le manque de données fiables entrave le processus de simulation. Ce problème, en particulier pour l'évaluation des risques d'inondation, a été souligné par Kabenge *et al.* [48] dans leurs récents travaux. La présente étude a montré qu'il est possible d'obtenir les zones sujettes aux inondations et aux crues soudaines grâce à des techniques d'apprentissage automatique et des méthodes statistiques. L'obtention des deux indices par la corrélation spatiale des variables de conditionnement des crues et des crues éclair représente un outil utile pour évaluer les zones sujettes à ces types de risques naturels. Cette méthodologie utilise des technologies et des données open-source, ce qui est pertinent pour les chercheurs car le processus d'obtention de données représente un obstacle important dans le développement de méthodologies et d'études pertinentes dans l'analyse de divers risques naturels. La présente étude propose le calcul des deux indices qui ont été mis en évidence dans de nombreuses études visant à déterminer les zones sujettes à ces risques naturels. Les résultats de l'analyse rendent cette étude pertinente, car d'autres études [4 ; 38 ; 45] proposent le calcul d'un seul indice pour créer des cartes de risques. Les modèles développés constituent un support d'aide aux décisions prises en matière de gestion et d'élargissement des politiques publiques visant à atténuer les risques naturels. Les résultats obtenus montrent la nécessité de compléter des approches similaires [45 ; 49 ; 50] avec de nouvelles variables, ce qui augmentera la pertinence des techniques de modélisation avancées. En fin l'étude montre l'importance de développer des méthodologies pour évaluer les zones vulnérables aux inondations dans un contexte d'accélération des événements climatiques mais aussi d'intensification de l'utilisation des terres en constante évolution. Il est ainsi nécessaire et impératif de développer de nouvelles méthodologies avec de nouvelles approches et, plus important encore, d'obtenir des résultats plus décisifs.

## CONCLUSION

La méthode FIGUSED-S a été principalement développée pour l'évaluation des dangers régionaux. Nous montrons ici une application de la méthode à un bassin hydrologique. Les résultats ont indiqué que seulement 6,65% des zones dans le sous-bassin du Niéri-Ko sont classées comme non sensibles aux inondations, 25,7% sont classées comme peu sensibles aux inondations, 24,86% sont classées comme moyennement sensibles aux inondations, 38,17% sont classés comme sensibles aux inondations et 4,59% sont classés comme très sensibles aux inondations. La majorité des zones de la forte sensibilité aux inondations se concentre le long des ruisseaux du sous-bassin et est occupée par la savane. Par ailleurs, le sous-bassin du Niéri-Ko est caractérisé par le développement d'intenses activités agricoles et d'élevage. Par conséquent, la carte des risques d'inondation fournie peut être utilisée pour la prévention des inondations, l'adaptation des stratégies d'atténuation et/ou des mesures de protection. Une autre étape de cette étude a été la simulation des inondations afin de déterminer la profondeur, la durée et la vitesse des inondations, ainsi que de quantifier l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface lors des inondations. Car le couplage des informations hydrologiques obtenues avec les outils analytiques de gestion des ressources en eau peut permettre de concevoir des stratégies pour l'allocation optimale de la ressource en eau [51] et la minimisation du risque d'inondation. Cela permet également de mieux utiliser les infrastructures existantes dans les zones rurales éloignées, comme les barrages d'irrigation [52], de manière intégrée. En fin les méthodes utilisées peuvent être appliquées au niveau national ou sur différents bassins versants, compte tenu de l'augmentation de l'intensité des événements climatiques et des activités anthropiques qui ont néanmoins un impact direct sur la manifestation des inondations. L'évaluation des risques d'inondation, en corrélant les paramètres de divers facteurs qui ont un impact direct sur la génération d'inondations, avec les changements d'occupation du sol les emplacements historiques des crues et les zones affectées par la torréalité, représente un outil vital dans la gestion des bassins versants pour mettre en œuvre des stratégies de prévention de ces types de risques naturels afin d'éviter ou d'amoindrir sur les pertes en vie humaine et tout dommages dans les activités socio-économiques. Ainsi, un modèle hydrologique distribué présente l'avantage de réaliser des simulations spatialement raffinées de composants hydrologiques sur une vaste zone tout en augmentant la précision des données et offre davantage de possibilité dans l'exécuter des modèles à grande échelle, avec de faibles coûts.

## Références

1. Fiorillo E, Issa H, Rocchi L et Tarchiani V., 2015. Manuel de la base de données des inondations. Rapport N° 5. Projet Adaptation Au changement climatique, prévention des catastrophes et Développement agricole pour la sécurité Alimentaire ANADIA Niger Projet Adaptation Au changement climatique, prévention des catastrophes et Développement agricole pour la sécurité Alimentaire. 37 p.
2. Mamadou I. A.A., 2016. Gestion des eaux pluviales et risques environnementaux dans la ville de Tessaoua (Région de Maradi) au Niger. *Revue Territoires, Sociétés et Environnement*, Revue scientifique semestrielle (Territoires, Sociétés et Environnement), Université de Zinder, N°007, p. 130-120.
3. Kowalzig, J. 2008. Climate, Poverty, and Justice: What the Poznan UN climate conference needs to deliver for a fair and effective global deal. *Oxfam Policy Pract. Clim. Chang. Resil.*, 4, 117–148.
4. Patrikaki O., Kazakis N., Kougiaris I., Patsialis T., Theodosiou N. and Konstantinos V., 2018. Assessing Flood Hazard at River Basin Scale with an Index-Based Approach: The Case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8(2), 50. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020050>.
5. Plan ORSEC, 2009. Données du Plan ORSEC et des Municipalités au 23 Septembre 2009.
6. Thiam M. D., 2011. Les syndromes des inondations au Sénégal. Presses Universitaires du Sahel, 224 p.
7. Kourgialas N.N., Karatzas G.P., 2011. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—A case study. *Hydrol. Sci. J.*, 56, 212–225.
8. Kourgialas N.N., Karatzas G.P., 2017. A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece—Protection and adaptation policy approaches. *Sci. Total Environ.*, 601, 441–452.
9. Nasiri H., Yusof M.J.M., Ali T.A.M., 2016. An overview to flood vulnerability assessment methods. *Sustain. Water Resour. Manag.*, 2, 331–336.
10. Papaioannou G., Loukas A., Vasiliades L., Aronica, G., 2016. Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Nat. Hazards*, 83, 117–132.
11. Wallez L., 2010. Inondations dans les villes d'Afrique de l'Ouest. diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le Grand Cotonou, Maitrise en environnement de l'université de Sherbrooke (Québec, Canada) & Master en ingénierie et management de l'environnement et développement durable de l'université de Troyes (France). 90 p.
12. Cutter SL, Emrich CT, Webb JJ, Morath D., 2009. Social vulnerability to climate variability hazards: a review of the literature. Final report to Oxfam America. Columbia, South Carolina: Hazards and Vulnerability Research Institute, University of South Carolina. [http://adapt.oxfamamerica.org/resources/Literature\\_Review.pdf](http://adapt.oxfamamerica.org/resources/Literature_Review.pdf). Accessed on 4 Feb 2013.
13. Domakinis C., Oikonomidis D., Voudouris K., Astaras T., 2004. Using geographic information systems (GIS) and remote sensing to map flood extent and to assess flood hazard in erythropotamos river basin (Evros, Greece). In Proceedings of the 10th International Congress of the Hellenic Geographical Society, Thessaloniki, Greece, 22–24 October 2014, pp. 689–709.
14. Kazakis N., Kougiaris I., Patsialis T., 2015. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope—Evros region, Greece. *Sci. Total Environ.*, 538, 555–563.
15. Tsirolis I., Voudouris K., Vasileiou A., Mattas C., Sapountzis M., Maris F., 2016. Flood hazard assessment and delimitation of the likely flood hazard zones of the upper part in Gallikos River Basin. In Proceedings of the 14th International Conference, Thessaloniki, Greece, 25–27 May, pp. 995–1004.
16. Correia F.N., Da Silva F.N., Ramos I. 1999. Floodplain management in urban developing areas. Part I. Urban growth scenarios and land-use controls. *Water Resour. Manag.*, 13, 1–21.
17. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2012. *Global Modelling of Natural Hazard Risks: Enhancing Existing Capabilities to Address New Challenges*, Report, Organisation for Economic Co-operation and Development: Paris, France.
18. Chapi K., Singh V.P., Shirzadi A., Shahabi H., Bui D.T., Pham B.T., Khosravi K. 2017. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environ. Model. Softw.*, 95, 229–245.
19. Kaur H., Gupta S., Parkash S., Thapa R., Mandal R. 2017. Geospatial modelling of flood susceptibility pattern in a subtropical area of West Bengal, India. *Environ. Earth Sci.*, 76, 339.
20. Termeh S.V.R., Kornejady A., Pourghasemi H.R., Keesstra S. 2018. Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Sci. Total Environ.*, 615, 438–451.
21. Hong H., Panahi M., Shirzadi A., Ma T., Liu J., Zhu A.X., Chen W., Kougiaris I., Kazakis N. 2017. Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro-fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Sci. Total Environ.*, 621, 1124–1141.
22. Zhao G., Pang B., Xu Z., Yue J., Tu T. 2018. Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Sci. Total Environ.*, 615, 1133–1142.
23. Lamagat J.P., 1989. Monographie hydrologique du fleuve Gambie Collection M&M. ORSTOM-OMVG, 250 p.
24. Dione O., 1996. *Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie*. Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, 477 p.
25. Sow A. A., 2007. *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens. les bassins de la Gambie et de la Falémé*. Thèse d'Etat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1232 p.

26. Kaba M., 2008. Etude des crues et des étiages dans le bassin versant du Nieri-Ko. Mémoire de Maîtrise, Université Cheikh Anta Diop (UCAD)
27. Patrikaki O., 2009. Hydrogeological Research of Potamia Basin, in Kozani Prefecture, in Northern Greece. Ph.D. Thesis, Department of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece. (In Greek)
28. Bossard M., Feranec J., Othahel J., Steenmans C. 2000. *The Revised and Supplemented Corine Land Cover Nomenclature*, European Environment Agency: Copenhagen, Denmark.
29. Demek J. 1972: *Manual of Detailed Geomorphological Mapping*, Academia: San Francisco, CA, USA.
30. Liu R., Chen Y., Wu J., Gao L., Barrett D., Xu T., Li X., Li L., Huang C., Yu J. 2017. Integrating Entropy-Based Naïve Bayes and GIS for Spatial Evaluation of Flood Hazard. *Risk Anal.*, 37, 756–773.
31. Gao L., Hailu A., 2013. Identifying preferred management options: An integrated agent-based recreational fishing simulation model with an AHP-TOPSIS evaluation method. *Ecol. Model.*, 249, 75–83.
32. Zhang X., Gao L., Barrett D., Chen Y., 2014. Evaluating water management practice for sustainable mining. *Water*, 6, 414–433.
33. Bhattacharjee K., Behera B., 2017. Forest cover change and flood hazards in India. *Land Use Policy*, 67, 436–448.
34. Clark G.E., Moser S.C., Ratick S.J., Dow, K., Meyer W.B., Emani S., Jin W., Kasperson J.X., Kasperson R.E., Schwarz H.E., 1998. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 3, 59–82.
35. Ratick S.J., Morehouse H., Klimberg R.K., 2009. Creating an index of vulnerability to severe coastal storms along the North Shore of Boston. In *Financial Modeling Applications and Data Envelopment Applications*, Emerald Group Publishing Limited: Bingley, UK, pp. 143–178.
36. Runfola D.M., Ratick S., Blue J., Machado E.A., Hiremath N., Giner N., White K., Arnold J., 2017. A multi-criteria geographic information systems approach for the measurement of vulnerability to climate change. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 22, 349–368.
37. Malczewski, J., 2000. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. *Trans. GIS*, 4, 5–22.
38. Hamid A.H.T., Wenlong W., Qiaomin L., 2020. Environmental sensitivity of flash flood hazard using geospatial techniques. *Global J. Environ. Sci. Manage.* 5(1), 2-17.
39. Xiao Y., Yi S., Tang, Z., 2017. Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Sci. Total Environ.*, 599, 1034.
40. Dahri N., Abida H., 2017. Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). *Environ. Earth Sci.*, 76, 302.
41. Chen Y., Liu R., Barrett D., Gao L., Zhou M., Renzullo L., Emelyanova I., 2015. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. *Sci. Total Environ.*, 538, 512–523.
42. Liu R., Chen Y., Wu J., Gao L., Barrett D., Xu T., Li L., Huang C., Yu J., 2016. Assessing spatial likelihood of flooding hazard using naïve Bayes and GIS: A case study in Bowen Basin, Australia. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 30, 1575–1590.
43. Feyen L., Dankers R., Bódis K., Salamon P., Barredo J., 2012: Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Clim. Chang.*, 112, 47–62.
44. Veijalainen N., 2012. Estimation of Climate Change Impacts on Hydrology and Floods in Finland; Aalto University: Helsinki, Finland, ISBN 978-952-60-4614-3.
45. Cao C., Xu P., Wang Y., Chen J., Zheng L., Niu C., 2016. Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Methods in Coalmine Subsidence Areas. *Sustainability*, 8, 948.
46. Westerho R.S., Kleuskens M.P.H., Winsemius H.C., Huizinga H.J., Brakenridge G.R., Bishop C., 2013: Automated global water mapping based on wide-swath orbital synthetic-aperture radar. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 651–663.
47. Vu T.T., Ranzi R., 2017. Flood risk assessment and coping capacity of floods in central Vietnam. *J. Hydro-Environ. Res.*, 14, 44–60.
48. Kabenge M., Elaru J., Wang H., Li F. 2017. Characterizing flood hazard risk in data-scarce areas, using a remote sensing and GIS-based flood hazard index. *Nat. Hazards*, 89, 1369–1387.
49. Costache R., Zaharia L., 2017. Flash-flood potential assessment and mapping by integrating the weights-of-evidence and frequency ratio statistical methods in GIS environment—Case study: Bâsca Chiojdului River catchment (Romania). *J. Earth Syst. Sci.*, 126, 59.
50. Costache R., Tien Bui D., 2019. Spatial prediction of flood potential using new ensembles of bivariate statistics and artificial intelligence: A case study at the Putna river catchment of Romania. *Sci. Total Environ.*, 691, 1098–1118.
51. Kougias I., Karakatsanis D., Malatras A., Monforti-Ferrario F., Theodossiou N., 2016: Renewable energy production management with a new harmony search optimization toolkit. *Clean Technol. Environ. Policy*, 18, 2603–2612.
52. Patsialis T., Kougias I., Kazakis N., Theodossiou N., Droegge P. 2016. Supporting Renewables' Penetration in Remote Areas through the Transformation of Non-Powered Dams. *Energies*, 9, 1054.