

Application de la théorie des jeux et de la télédétection à l'identification des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire)

[Application of game theory and remote sensing to the identification of flood-prone areas in the Marahoué Watershed (Côte d'Ivoire)]

Kamenan Satti Jean Robert¹, Youan Ta Marc^{2,3}, Adja Miessan Germain⁴, and Kouassi Amani Michel⁵

¹Institut National Polytechnique Félix HOUPOUET-BOIGBY, Ecole doctorale polytechnique STI, UMRI Sciences et Techniques de l'ingénieur, Laboratoire des Sciences Géographiques, du Génie Civil et des Géosciences, Côte d'Ivoire

²Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

⁴Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), École Normale Supérieure (ENS), Abidjan, Côte d'Ivoire

⁵Institut National Polytechnique Félix HOUPOUET-BOIGBY, Ecole Supérieure des Mines et Géologie, UMRI Sciences et Techniques de l'ingénieur, Laboratoire des Sciences Géographiques, du Génie Civil et des Géosciences

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Every year in Côte d'Ivoire, during the rainy season, several localities, including those within the Marahoué watershed, are subject to recurrent floods that cause loss of human lives, population displacement, and significant material damage. Identifying areas sensitive to this phenomenon is therefore crucial for the implementation of effective and sustainable preventive measures. This study thus aims to identify flood-prone zones in the Marahoué watershed by using current physical and hydrological characteristics derived from remote sensing observations, with the goal of supporting decision-makers in their sustainable development projects. The methodological approach employed begins with the delineation of the watershed into sub-basins, followed by the extraction of topographic, morphometric, hydrological, and environmental parameters associated with flooding, and the identification of sensitive areas through game theory algorithms (Borda and Condorcet). The results indicate that the downstream areas of the Marahoué watershed, particularly those located along the main river course, are highly sensitive to flooding. Conversely, upstream areas, which are generally situated at higher altitudes, were classified within the low to very low flood risk categories.

KEYWORDS: Theoretical computer science, Spatial modeling, Marahoué, Côte d'Ivoire, Floods, Borda, Condorcet.

RESUME: Chaque année en CÔTE D'IVOIRE, pendant la saison pluvieuse, plusieurs localités dont celles du bassin versant de la Marahoué sont sujettes à de fréquentes inondations occasionnant des pertes en vie humaines, des déplacements des populations et des dégâts matériels importants. Identifier les zones sensibles à ce phénomène est crucial pour la mise en œuvre des mesures préventives efficaces et durables. Ainsi cette étude vise donc à identifier les zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué en utilisant les caractéristiques physiques et hydrologiques actuelles, extraites à partir des observations de télédétection en vue d'aider les décideurs dans leur projet de développement durable. L'approche méthodologique employée débute par la délimitation du bassin en sous bassin, ensuite l'extraction des paramètres topographiques, morphologiques, hydrologiques et environnementaux associés aux inondations et de l'identification des zones sensibles aux inondations via les algorithmes de la théorie du jeu (Borda et Condorcet). Les résultats obtenus, indiquent que les zones situées en aval du bassin versant de la Marahoué sont très sensibles aux inondations. À l'inverse, les zones situées

en amont du bassin et qui sont dans la majorité à des altitudes plus élevées ont été classées dans les catégories de risque faible et très faible.

MOTS-CLEFS: Informatique théorique, Modélisation spatiale, Marahoué, Côte d'Ivoire, Inondations, Borda, Condorcet.

1 INTRODUCTION

Depuis toujours le globe terrestre est sujet à des inondations dévastatrices [1], [2], [3], [4]. Ce sont d'importants débits d'eau qui dépassent les berges naturelles ou artificielles d'un cours d'eau [5]. Du point de vue hydrologique, une inondation se produit lorsqu'un événement d'entrée d'eau inhabituellement extrême ou prolongé est rencontré dans le bassin et que le débit résultant dépasse la capacité du canal [6]. Ces dernières années, les inondations se sont intensifiées fort de l'urbanisation rapide, de la croissance démographique et du changement climatique [7]. 23% de ces inondations touchent pratiquement l'Afrique faisant de ce continent le deuxième le plus touché après l'Asie [8]. En Afrique de l'Ouest, particulièrement en Côte d'Ivoire, depuis les années 2000, les fréquentes inondations dans les communes d'Abidjan et dans plusieurs autres localités du pays suscitent un intérêt particulier de la part des autorités locales et de la communauté scientifique comme en illustrent les récents travaux de [9]; de [10]; de [11] et de [12]. En effet, tous les ans, des pluies torrentielles s'abattent à Abidjan et dans plusieurs localités du pays, faisant de nombreux dégâts matériels et des pertes en vie humaine [13], [14]. Cette réalité hydro climatique est connue dans la région de la Marahoué, notamment à Bouaflé et à Zuénoula où le principal hydrosystème est le fleuve Marahoué, un affluent du fleuve Bandama. C'est l'exemple des inondations de juin 2018 qui sont les plus dévastatrices de ces dernières années. Elles ont affecté les villes de Bouaflé et de Zuénoula en faisant cinq mille neuf cents (5900) sinistrés dont un (01) mort, respectivement deux mille quatre cents (2400) à Zuénoula et trois mille cinq cents (3500) à Bouaflé avec plusieurs dégâts matériels. Anticiper ces aléas hydrologiques avant leur occurrence et protéger les personnes et biens demeurent l'une des préoccupations des autorités tant locales que nationales. Bien évidemment, l'exécution d'une telle action passe nécessairement par l'identification des zones les plus exposés à ces aléas hydrologiques. Ceci permettra de définir des mesures préventives efficaces et durables dans le temps et dans l'espace. Quoiqu'il existe plusieurs méthodes qui permettent de mener à bien cette action, des études récentes de [15], de [16] et de [17] menées sur divers bassins, ont montré que celles qui utilisent les paramètres physiques et hydrologiques qui sont très souvent décrits par les paramètres topographiques, morphologiques et hydrologiques offrent une compréhension plus vaste de la réponse hydrologique du bassin et aussi contribuent fortement dans l'identification des zones vulnérables. À ces paramètres s'y ajoutent les ceux environnementaux qui ont une influence dans les risques d'inondations. Aujourd'hui avec le progrès technique, les méthodes mathématiques et informatiques à travers de nombreux algorithmes de calculs, le contexte se présente favorable pour une identification de qualité. À ce titre, l'utilisation des algorithmes de la théorie des jeux offre un potentiel énorme d'identification des zones sensibles aux inondations comme en illustrent les travaux de [18]. Ainsi, cette présente étude qui vient en complément des travaux antérieurs menées en Côte d'Ivoire et particulièrement dans le bassin versant de la Marahoué, est réalisée dans le but d'améliorer les méthodes existantes dans le cadre de la gestion des risques d'inondations. Elle se donne alors pour ambition d'identifier les zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué en utilisant les caractéristiques hydrologiques actuelles, géologiques et terrestres, extraites à partir des observations de télédétection et des algorithmes de la théorie de jeu en vue d'aider les décideurs dans leur projet de développement durable. Il s'agira d'abord d'extraire les principaux facteurs associés aux inondations, ensuite d'évaluer le niveau de sensibilité aux inondations à l'aide de la théorie du jeu et enfin de générer les cartes de sensibilités aux inondations.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone objet de cette étude est dénommée bassin versant de la Marahoué. Elle est comprise entre les longitudes 5°5' et 7°1' Ouest et les latitudes 6°7' et 9°5' Nord (Figure 1). Sur le plan administratif (Figure 1), elle est à cheval sur les régions de la Bagoé, du Béré, du Haut-Sassandra, du Kabadougou, du Worodougou et de la Marahoué. L'environnement physique de l'espace d'étude présente un relief très contrasté marqué de plaines et des plateaux d'altitudes variant entre 400 m et 500 m [19] avec un climat soudanais dans la partie nord et un climat baouléen dans la partie sud. À ceux-ci, s'ajoutent des formations granitoïdes et des séries birimiennes qui constituent les principaux traits géologiques de la région [20], [21]. Son réseau hydrographique est dense et caractérisé par son principal fleuve qui est la Marahoué (un affluent du fleuve Bandama), long de 550 km et ses principaux affluents le Béré à l'Est et le Yani ou Bahoroni à l'Ouest puis se jette dans le Bandama blanc à l'endroit où se trouve le village de Bozi, peu après la ville de Bouaflé [22]. Quant à la vie socio-économique, elle est dominée par les activités agricoles, pastorales et minières [23], [11]. Les activités agricoles sont généralement développées autour des vivriers et des produits d'exportation qui sont sous la menace permanente des inondations et de la sécheresse. La production vivrière se compose de céréales, de légumes, de fruits, de bananes plantains, des ignames, du riz et du manioc. Les cultures de rentes destinées à l'exportation sont essentiellement le coton et l'arachide auxquelles s'ajoutent l'anacarde et la mangue pour la partie septentrionale du Bassin et principalement du café et du cacao pour la région de la Marahoué et du Worodougou [24], [25]. Concernant les activités pastorales développées à l'échelle du bassin, elles sont majoritairement tenues par les peuls transhumants venus du Mali et du Burkina-Faso auxquels s'ajoute une classe émergente de paysans éleveurs autochtones. Elles s'attellent principalement à

l'élevage de bovins, soutenue elle-même par la volaille, les cheptels ovins et caprins. Concernant les activités minières, le secteur d'étude est réputé pour son exploitation aurifère dans le département de Séguéla et de Bouaflé [26], [27]. Les pierres précieuses dykes kimberlitiques et lamproïte, riches en diamant sont exploités dans le département de Séguéla tant industrielle qu'artisanale [28], [25].

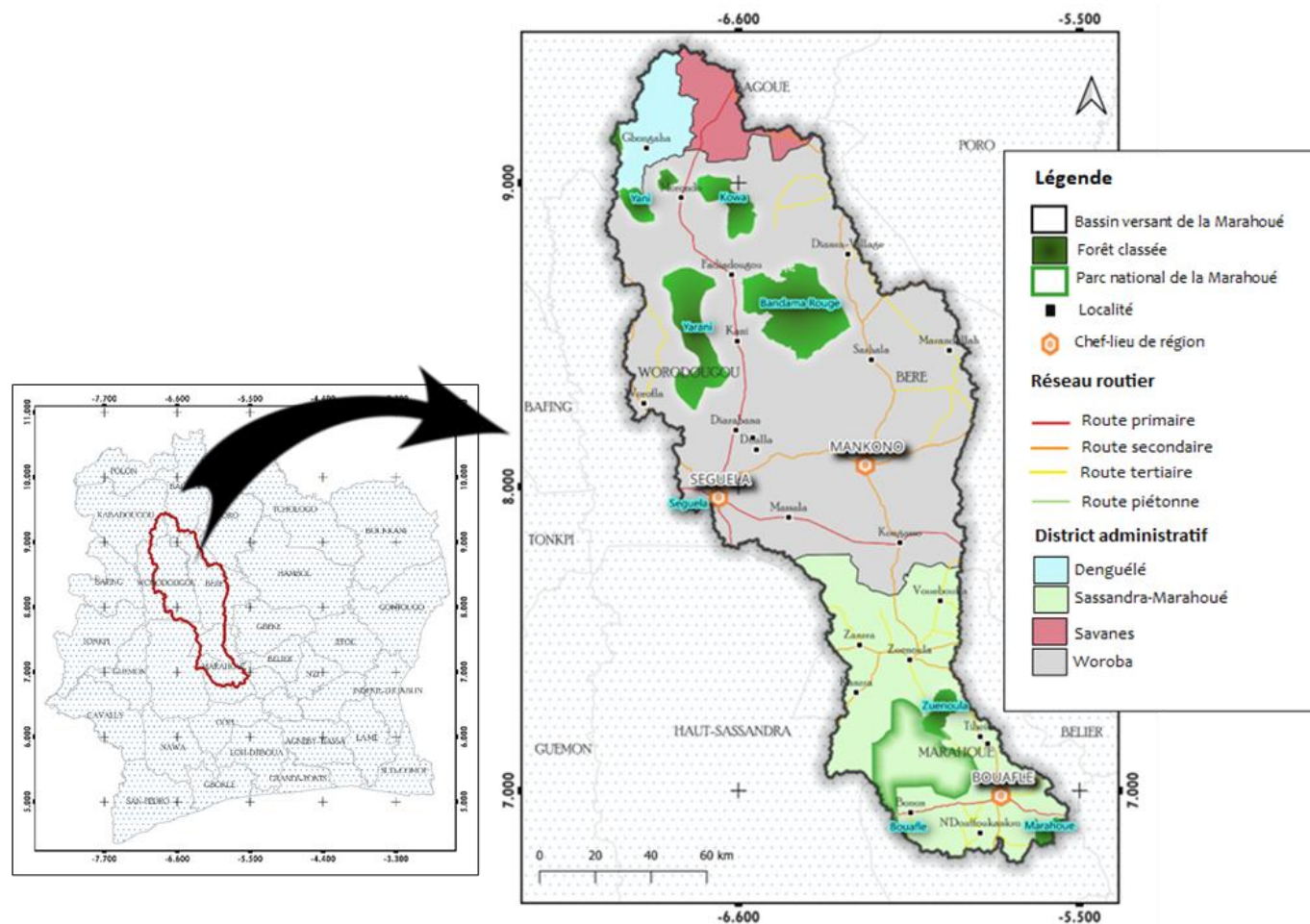


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

3 DONNÉES ET MATÉRIEL

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont composées de carte géologique, pédologique et topographique à l'échelle 1/2000 000 respectivement de 1971, 1960 et de 1972, disponibles en format papier au Centre d'Information Géographique et du Numérique, d'image SRTM de résolution 30 m qui est un Modèle Numérique d'Élévation (MNE), téléchargée à partir de la plateforme USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). À celles-ci s'ajoutent des données *in situ* qui sont essentiellement composées de données de pluies recueillies auprès de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Les données de pluies sont issues des enregistrements journaliers de la période 1961-2018 des stations de Béoumi, Bouaflé, Boundiali, Dianra, Kani, Madinani, Mankono, Séguéla, Vavoua et Zuenoula. Ce choix de ces stations est motivé d'une part, par la disponibilité des données et d'autre part, par la constitution d'un jeu de données assez représentatif pouvant permettre l'évaluation de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant. Toutes ces données recueillies dans cette étude, ont été traitées sur des ordinateurs équipés de plusieurs logiciels parmi lesquels les logiciels de télédétection et SIG (QGIS 3.10) pour le rendu des cartes et l'extraction des facteurs associés aux inondations, d'un environnement de développement interactif Google Colab pour l'exécution des scripts écrits en Python.

4 METHODES

L'approche méthodologique déployée dans cette étude, utilise une combinaison d'outils de télédétection, de SIG et des algorithmes de la théorie du jeu pour d'abord délimiter les sous bassins du versant de la Marahoué, ensuite extraire les paramètres associés aux inondations et enfin évaluer le niveau de sensibilité devant aboutir à cartographier les zones sensibles aux inondations.

4.1 DÉLIMITATION DES SOUS BASSINS

Les sous bassins de la zone d'étude ont été délimités selon des procédures usuelles et automatisées d'extraction de bassin versant dans un environnement SIG conformément aux travaux de [29] et [30] cités par [31]. Il s'agit de la correction du remplissage du MNE, de l'extraction de la direction de l'écoulement, de l'accumulation de l'écoulement, des ordres et caractéristiques des cours d'eau. La direction de l'écoulement a été calculée pour chaque pixel à l'aide du MNE rempli, c'est-à-dire la direction dans laquelle l'eau s'écoulera du pixel vers l'un des huit pixels. L'accumulation des flux a été utilisée pour générer un réseau d'hydrographie sur la base de la direction d'écoulement de chaque cellule et d'une valeur seuil qui spécifie le nombre de cellules matricielles à partir duquel une grille de cours d'eau doit être créée. Les cellules du raster de la source sont utilisées comme points d'écoulement au-dessus desquels la zone contributrice est déterminée.

4.2 EXTRACTION DES PARAMETRES ASSOCIES AUX INONDATIONS

4.2.1 EXTRACTION SPATIALE

L'extraction des paramètres associés aux inondations a été réalisée dans l'environnement Google Earth Engine en interaction avec Google Colab, et s'est articulée autour de deux étapes principales. Dans un premier temps, dix-huit (18) paramètres pertinents pour l'évaluation de la sensibilité aux inondations (Tableau 1) ont été sélectionnés à partir d'une revue approfondie de la littérature [32], [33], [34], [18]. Leur choix s'est fondé sur des critères tels que la disponibilité des données, la pertinence scientifique, l'efficacité analytique, la capacité à représenter la dynamique de l'écoulement ainsi que leur aptitude à caractériser les risques d'inondation. Dans un second temps, l'extraction spatiale proprement dite de ces paramètres a été effectuée conformément aux formules et méthodes associées, telles que présentées dans le Tableau 1. Toutes les phases énumérées ont été rigoureusement implémentées en langage python afin d'automatiser les tâches.

Tableau 1. Paramètres associés aux inondations

Catégories	Paramètres	Méthode / Formule
Topographiques	Altitude	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Pente	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Courbure de Profil (Pcou)	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Indice topographique de position (TPI)	$TPI_i = M_0 - \sum M_i/n$ [34]
	Indice de rugosité du terrain (TRI)	$TRI = \max^2 - \min^2 ^{(1/2)}$ [35]
Hydrologiques	Densité de drainage	$Dd = Lu/A$ [36]
	Précipitation	Moyenne annuelle de 1961-2018
	Fréquence d'écoulement (SF)	$Fs = Nu/A$ [36]
	Indice d'infiltration (IN)	$IN = Dd \times SF$ [35]
	Indice d'humidité topographique (TWI)	$TWI = \ln(As/\tan\beta)$ [37]
Morphologiques	Exposition	Analyse SIG (Modèle MNE)
	Indice de transport des sédiments (STI)	$STI = (As/22.13)^{0.6} (\sin\beta/0.0896)^{1.3}$ [38]
	Indice de puissance de flux (SPI)	$SPI = A \times \tan(\beta)$
Environnements	Distance au cours d'eau (DCE),	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	Extrait des travaux de [39]
	Pédologie	
	Occupation du sol	
	Lithologie	

A: Superficie du bassin versant (m^2); Nu: Nombre total de cours d'eau; As= Accumulation des flux (m^2) et β =le gradient de la pente; Lu: Longueur total de cours d'eau; M_0 = altitude du point central, M_i = altitude de la grille, n= le nombre total de points environnants; max et min sont respectivement les valeurs les plus grandes et les plus petites des cellules dans les voisinages rectangulaires 3×3 de l'altitude.

4.2.2 EXTRACTION DES VALEURS MOYENNES ET PROPORTIONS DES PARAMETRES ASSOCIES AUX INONDATIONS

Les valeurs des paramètres associées aux inondations à l'échelle des sous bassins, ont été extraites selon leur nature catégorielle ou non. Concernant les paramètres de nature non catégorielle, notamment l'altitude, la pente, l'exposition, la courbure de profil (Pcou), la distance au cours d'eau (DCE), la densité de drainage (Dd), les précipitations, l'indice de position topographique (TPI), l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de puissance de flux (SPI), l'indice de rugosité du terrain (TRI), l'indice de végétation par différence

normalisée (NDVI), la fréquence d'écoulement (SF), l'indice d'infiltration (IN), ainsi que l'indice de transport de sédiments (STI), leur traitement a été réalisé à l'aide d'outils d'analyse spatiale dans un environnement SIG où des statistiques zonales ont été calculées à partir des couches raster correspondantes en particulier la moyenne. Pour ceux de nature catégorielle (pédologiques, lithologiques et d'occupation du sol), leur quantification a été effectuée sur la base des proportions exprimées en pourcentage via Google Colab à l'aide d'un script écrit en python.

4.3 CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS

4.3.1 PRÉSENTATION DES ALGORITHMES

ALGORITHME CONDORCET

Condorcet est une méthode de décision collective qui consiste à confronter chaque alternative à toutes les autres dans des duels successifs en retenant celle qui l'emporte face à chacune de ses concurrentes. Ainsi, une alternative est considérée comme gagnante selon Condorcet si elle est préférée à toutes les autres dans l'ensemble des comparaisons par paires [40]. Selon le formalisme mathématique, soit un ensemble d'alternatives $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ et $M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ un ensemble de m votants, chacun exprimant des préférences ordinales sur ces alternatives. Conformément à la règle de Condorcet, un gagnant est identifié par le biais de comparaisons binaires entre toutes les paires d'alternatives [41]. Selon [42], la préférence entre deux alternatives est définie à l'aide de la fonction suivante: $O_j(A_j, A_k) = 1$ si $A_j > A_k$ pour la majorité des votants $i \in M$, sinon $O_j(A_j, A_k) = 0$. Autrement dit $O_j(A_j, A_k)$ prend la valeur 1 si l'alternative A_j est préférée à A_k par la majorité des individus et 0 dans le cas contraire. Finalement, le score global d'une alternative A_j , noté $O(A_j)$ est ensuite déterminé en sommant les résultats de ses confrontations avec toutes les autres alternatives [43], soit:

$$O(A_j) = \sum O_j(A_j, A_k) \quad (\text{Eq.1})$$

ALGORITHME BORDA

L'algorithme de Borda consiste à classer un ensemble d'alternatives en fonction des préférences d'un groupe de votants. Chaque votant établit un ordre de préférence entre les alternatives, puis des points sont attribués en fonction du rang occupé par chaque option: Par exemple une alternative classée première reçoit m points (où m est le nombre total d'alternatives), la deuxième reçoit $m-1$ points, et ainsi de suite jusqu'à la dernière qui reçoit 1 point. Un total pondéré appelé le score de Borda d'une alternative i noté $BS(i)$, est calculé à l'aide de l'équation (Eq.2) inspirée des travaux de [41].

$$BS(i) = (n) \times (NFi_{occupe_premier_rang}) + (n-1) \times (NFi_{occupe_deuxieme_rang}) + \dots + (2) \times (NFi_{occupe_avant_dernier_rang}) + (1) \times (NFi_{occupe_dernier_rang}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Où NFi représente le nombre d'occurrence de l'alternative i dans l'ensemble des préférences

Le classement final des alternatives est établi en fonction de tous les scores Borda des alternatives, et celle ayant obtenu le score Borda le plus élevé est déclarée vainqueur selon la méthode de Borda.

4.3.2 CLASSEMENT GENERAL DES SOUS BASSINS SELON L'INFLUENCE DES PARAMETRES ASSOICIES AUX INONDATIONS

Cette étape a été effectuée sur la base des valeurs extraites pour l'ensemble des paramètres et le sens de l'influence proposé par [44], [45], [46] et [47]. Ainsi, les faibles altitudes et les pentes douces traduisent des zones d'accumulation favorables à la stagnation de l'eau, donc à une forte sensibilité aux inondations. L'indice de position topographique (TPI) mettant en évidence des valeurs négatives, indique que ces dernières correspondent aux zones déprimées, fortement exposées aux inondations, contrairement aux valeurs positives qui indiquent des secteurs de drainage. Quant à l'exposition des versants, dans le contexte tropical ivoirien, les versants orientés au nord conservent une humidité plus élevée et présentent un risque accru de saturation, tandis que ceux exposés au sud connaissent une évaporation plus importante et donc un risque plus faible. Les courbures concaves (P_{cou}) favorisent la stagnation et l'infiltration des eaux, amplifiant la probabilité d'inondation, alors que les courbures convexes facilitent l'écoulement. L'indice de rugosité topographique (TRI) distingue les terrains plats, où l'accumulation d'eau est dominante et accroît le risque, des reliefs accidentés qui favorisent un drainage plus rapide et réduisent la sensibilité aux inondations. De même, la proximité au réseau hydrographique (DCE) accentue le risque lorsque les valeurs sont faibles, car les zones proches du lit majeur sont plus exposées aux crues. Une densité de drainage (D_d) élevée, des précipitations fortes, un indice de saturation (TWI) ou encore un indice de puissance de flux (SPI) traduisent un accroissement du potentiel de ruissellement et donc du risque d'inondation. De même, une fréquence d'écoulement élevée (SF) reflète une forte réactivité hydrologique, accentuant la probabilité de crues. En revanche, un indice d'infiltration (IN) élevé ou un NDVI important (végétation dense) atténuent le risque en améliorant l'infiltration et en limitant le ruissellement de surface. Enfin, concernant la

lithologique, les roches peu perméables telles que les schistes, les roches métamorphiques intenses ou les gabbros favorisent l'accumulation d'eau et donc un risque élevé d'inondation. À l'inverse, des formations fracturées ou plus perméables comme les granites calco-alcalins permettent un meilleur drainage et réduisent la sensibilité aux inondations. Quant à l'occupation du sol (OCS), les zones urbanisées ou à cultures intensives, caractérisées par une imperméabilisation croissante des sols, accroissent considérablement le risque d'inondation. Tandis que les zones humides atteignant leur seuil de saturation, deviennent elles-mêmes des espaces vulnérables aux submersions, favorisant l'expansion spatiale des eaux de crue.

4.3.3 IDENTIFICATION DES ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS

L'identification des zones sensibles aux inondation a été effectuée à l'aide des algorithmes de notation issus de la théorie des jeux, notamment ceux de Condorcet, de Borda et du tableau des classement général des sous bassins selon l'influence des paramètres extraits. Concernant l'algorithme de Borda utilisé, un score spécifique a été attribué à chaque sous-bassin en fonction de sa position relative dans le classement général. Plus précisément, chaque sous-bassin a été noté selon son rang dans ce classement. Le score Borda pour chaque sous bassin a été calculé, permettant de dresser un classement global de ces derniers. À l'issue de cette phase, les sous-bassins ont été classifiés en cinq catégories de sensibilité aux inondations selon les scores Borda: très faible, faible, modéré, élevé et très élevé. Parallèlement, l'algorithme de Condorcet a été utilisé en se basant sur des comparaisons directes entre les sous-bassins, et ce, pour chaque paramètre associé aux inondations. À cet effet, une matrice de confrontation par paire a été construite dans laquelle chaque sous-bassin a été comparé à un autre sur la base du classement général. Ce processus a permis de déterminer pour chaque paire de sous-bassins, celui qui obtiendrait le plus grand nombre de "votes" en termes de risque d'inondation. À l'issue de cette phase, pour chaque sous-bassin, les résultats des confrontations ont été comptabilisés en termes de victoires, défaites et matchs nuls. Trois points ont été attribués pour une victoire, un point pour un match nul et zéro point pour une défaite. Enfin, un classement final a été établi en fonction du nombre total de points obtenus par chaque sous-bassin dans les confrontations permettant de classer les sous-bassins en cinq catégories de risques à savoir très faible, faible, modéré, élevé et très élevé.

5 RÉSULTATS

5.1 DÉLIMITATION DES SOUS BASSINS

La figure 2 présente la délimitation des sous bassins et le tableau 2 décrit les caractéristiques. L'analyse de la figure 2 et du tableau 2, montre que le secteur d'étude est défini sur une superficie de 21556, 20 km² pour un périmètre de 1634,01 km. Il est subdivisé en quatorze (14) sous bassins codés respectivement de SB1 à SB14. La superficie de chaque sous bassin varie de 279,62 à 4398,05 km². Quant au périmètre associé à chaque sous bassin, il varie de 99,86 à 469,01 km. Les valeurs minimales de ces deux paramètres sont enregistrées dans le sous bassin SB11, tandis que les maximales sont observées dans le sous bassin SB6. Au niveau de la distribution spatiale des sous bassins, le Nord du secteur d'étude regroupe les sous bassins SB1 à SB3; le Centre regroupe les sous bassins SB4 à SB10 et le Sud couvre les sous bassins SB11 à SB14.

Tableau 2. *Caractéristiques des sous bassins*

Sous bassins	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)
SB1	801,28	166,15
SB2	2249,21	306,77
SB3	2779,36	456,21
SB4	1325,51	218,32
SB5	377,62	118,54
SB6	4398,05	469,01
SB7	2280,12	341,52
SB8	1499,70	284,43
SB9	386,28	132,00
SB10	961,83	206,81
SB11	279,62	99,86
SB12	1104,03	196,04
SB13	1413,49	246,24
SB14	1700,09	318,98
Total	21556,20	1634,01

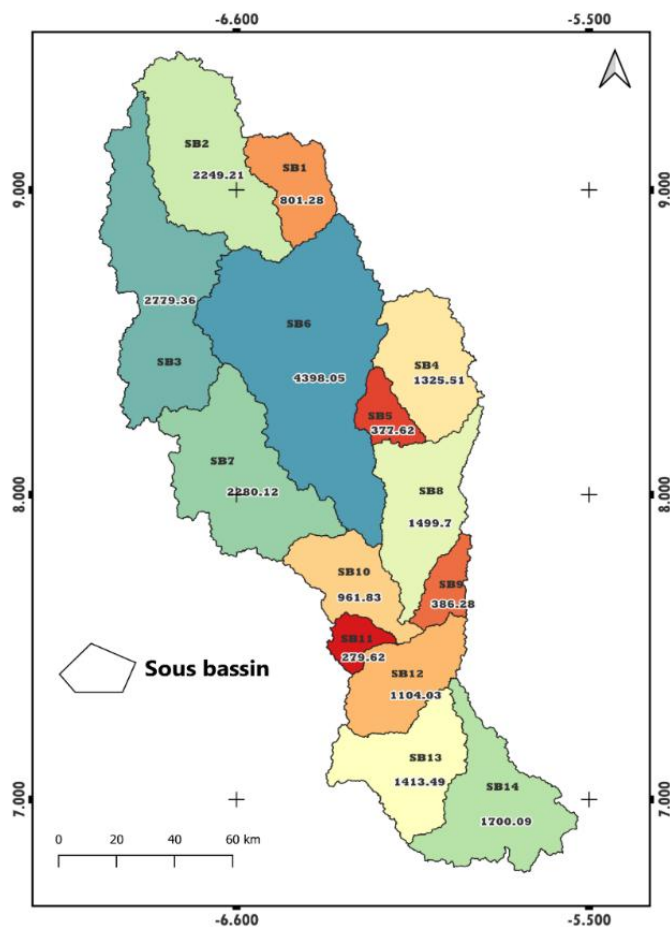


Fig. 2. Délimitation des sous bassins du secteur d'étude

5.2 EXTRACTION DES PARAMETRES ASSOCIES AUX INONDATIONS

La figure 3 présente la distribution spatiale des paramètres topographiques, morphologiques, hydrologiques et environnementaux du bassin de la Marahoué, complétées par les tableaux 3, 4, 5 et 6 qui résument leurs valeurs par sous-bassin.

EXTRACTION DES PARAMÈTRES DE NATURE CATÉGORIELLES

L'analyse spatiale des sols (Figure 3.p) combinée au tableau 3, montre une dominance des sols ferrallitiques moyennement désaturés dans la majorité des sous-bassins, tandis que les sols hydromorphes, peu évolués ou indurés sont identifiés comme les plus vulnérables aux inondations en raison de leur faible capacité d'infiltration et de leur localisation en zones dépressionnaires. Les données d'occupation du sol (Tableau 4) révèlent une forte hétérogénéité entre les sous-bassins, avec des zones amplement anthropisées (SB12, SB13, SB14) combinant plantations, cultures pérennes et habitats humains, et des zones moins utilisées (SB5, SB11). Les zones humides et marécageuses, présentes notamment dans les sous bassins SB6, SB7, SB13 et SB14, accentuent le risque d'inondation localisé. L'analyse lithologique (Tableau 5) met en évidence une homogénéité granitique favorable en amont (SB1–SB9) et une hétérogénéité accrue en aval (SB10–SB14) dominée par des formations métamorphiques peu perméables, accentuant le ruissellement. Les sous-bassins amont, à perméabilité modérée et sols majoritairement ferrallitiques, génèrent un ruissellement rapide mais limité, tandis que les unités aval présentent accumulation d'eau et saturation fréquente. La combinaison des caractéristiques pédologiques, lithologiques et de l'occupation du sol montre que certains sous-bassins (SB6, SB7, SB13, SB14, SB3 et SB8) sont particulièrement vulnérables aux inondations. Les sols ferrallitiques désaturés favorisent l'infiltration, tandis que les sols indurés, hydromorphes ou peu évolués agissent comme des surfaces imperméables, amplifiant le ruissellement. Les zones de plantations, cultures pérennes et habitats humains augmentent la pression hydrologique locale, nécessitant des stratégies de gestion ciblées.

EXTRACTION DES PARAMÈTRES DE NATURE NON CATÉGORIELLES

L'analyse des 14 sous-bassins (Tableau 6) révèle une forte variabilité des altitudes (214,97 à 408 m) et des pentes (2,50 à 3,61 %), traduisant des reliefs doux à modérément inclinés. L'exposition dominante vers l'est influence l'insolation et l'humidité du sol, tandis que le NDVI (0,52–0,61) indique une couverture végétale relativement dense. Les précipitations annuelles varient de 1007 à 1196 mm, structurant les régimes hydrologiques locaux. Les indices SF et IN montrent des contrastes dans la dynamique de ruissellement et la capacité d'infiltration des sols. Les indices TWI, SPI, TPI, TRI et STI confirment une hétérogénéité des zones d'accumulation, d'érosion et de transport de l'eau. Les sous-bassins situés en amont présentent des altitudes et pentes plus élevées favorisant un ruissellement rapide, tandis que ceux en aval, plus bas et moins pentus, favorisent l'accumulation et la saturation des sols. La densité de drainage plus élevée en amont accélère l'export des eaux vers l'aval. Globalement, le bassin montre une transition hydrologique amont-aval structurante pour la sensibilité aux inondations.

Tableau 3. Proportion en pourcentage des unités pédologiques sensibles aux inondations par sous bassin

Sous bassins	Sols hydromorphes à gley et pseudogley, et sols peu à évolués d'apport (%)	Sols remaniés ou typiques avec induration et bruns eutrophes trop (%)	Proportion moyenne (%)
SB1	13,4	1,25	7,33
SB2	13,4	1,25	7,33
SB3	12,68	6,68	9,68
SB4	12,57	0	6,29
SB5	12,82	0	6,41
SB6	14,96	0,71	7,84
SB7	14,96	0,71	7,84
SB8	12,78	0,97	6,88
SB9	9,82	0	4,91
SB10	12,76	1,17	6,97
SB11	12,01	10,19	11,1
SB12	12,01	10,19	11,1
SB13	12,01	10,19	11,1
SB14	12,01	10,19	11,1

Tableau 4. Proportion en pourcentage des unités d'occupation du sol par sous bassin

Sous bassins	Ocs2	Ocs4	Ocs9	Ocs10	Ocs11	Ocs12	Ocs13	Ocs16	Proportion moyenne
SB1	2,2	0,04	5,19	0,1	0,03	0,37	1,73	0,63	1,29
SB2	6,3	0,1	7,21	0,23	0	1,76	2,14	3,39	2,64
SB3	14,29	1,17	5,72	4,53	0	2,54	1,6	10,41	5,03
SB4	5,91	0,13	7,61	0,1	0,09	0,44	1,94	1,33	2,19
SB5	1,48	0,04	2,65	0,01	0,03	0,07	0,99	0,49	0,72
SB6	15,54	1,68	24,45	1,71	1,88	9,12	5,51	20,95	10,11
SB7	8,31	2,64	12,7	2,35	1,55	7,58	4,67	24,94	8,09
SB8	7,96	2,9	4,84	5,61	3,08	8,7	3,59	11,07	5,97
SB9	1,02	4,45	0,67	4,76	2,9	1,52	1,22	2,38	2,37
SB10	5,57	5,4	2,13	0,45	4,38	15,46	6,41	2,52	5,29
SB11	0,6	1,77	0,52	0,58	2,07	0,21	4,33	0,58	1,33
SB12	10	27	12	10	28	16,78	21,48	8	16,66
SB13	10,59	28,56	10,25	29,33	28,08	18	20	8,45	19,16
SB14	10,23	24,12	4,06	40,24	27,91	17,45	24,39	4,86	19,16

Ocs2: Culture d'anacarde; Ocs4: Culture de cacao-café; Ocs9: Habitat humain; Ocs10: Culture d'hévéa; Ocs11: Culture de palmier; Ocs12: Plan d'eau; Ocs13: Canne à sucre; Ocs16: Zones marécageuses

Tableau 5. Proportion en pourcentage des unités lithologiques par sous bassin

Sous-bassin	Lithologies principales et %
SB1	35,08 % granites, 21,49 % conglomérats, 11,27 % mylonites/conglomérats, 5,4 % schistes
SB2	66,42 % granitoïdes à biotite, 10,75 % formations métamorphiques, 4,33 % conglomérats
SB3	91,65 % granitoïdes à biotite, 3,4 % schistes/grauwackes, 0,79 % schistes
SB4	94,04 % granitoïdes à biotite, 3,32 % rhyolites/dacites, 1,02 % granites calco-alcalins
SB5	99,43 % granitoïdes à biotite, 0,57 % rhyolites/dacites
SB6	79,87 % granitoïdes hétérogènes, 6,32 % granitoïdes homogènes, 1,27 % granites divers, 0,74 % gabbros
SB7	80,24 % granitoïdes à biotite, 4,42 % granitoïdes homogènes, 1,36 % granitoïdes homogènes
SB8	59,35 % granitoïdes à biotite, 16,91 % granitoïdes subalcalins, 10,36 % schistes/grauwackes
SB9	43,54 % schistes/grauwackes, 39,54 % granitoïdes subalcalins
SB10	77,35 % granitoïdes à biotite, 4,27 % schistes/grauwackes
SB11	23,27 % granitoïdes à biotite, 16,28 % schistes/grauwackes, 36,94 % granitoïdes subalcalins
SB12	23,01 % migmatites, 16,28 % schistes/grauwackes, 15,24 % granitoïdes hétérogènes
SB13	49,20 % schistes/grauwackes, 19,97 % granitoïdes subalcalins
SB14	47,09 % schistes/grauwackes, 20,59 % migmatites

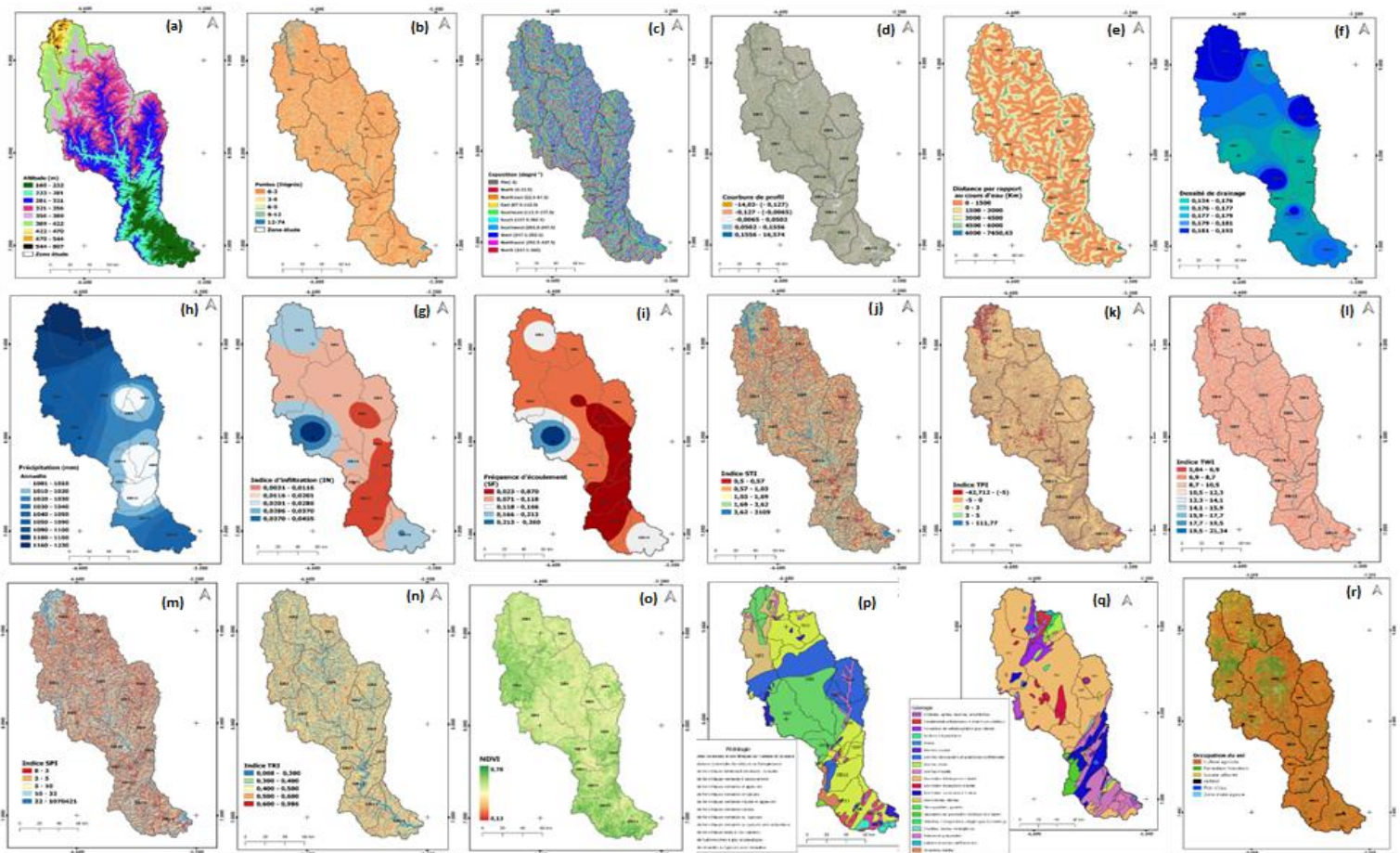


Fig. 3. Paramètres associés aux inondations (a): Altitude, (b): Pente, (c): Exposition, (d): Courbure du plan, (e): Distance par rapport au cours d'eau, (f): Densité de drainage, (g): Précipitation annuelle, (h): IN, (i): SF, (j): STI, (k): TPI, (l): TWI, (m): SPI, (n): TRI, (o): NDVI, (p): Pédologie, (q): Lithologie, (r): Occupation du sol,

Tableau 6. Extraction des paramètres de nature non catégorielles

Sous bassins	Altitude	Pente	Exposition: East	Exposition: Nord	Pcou	DCE	Densité D.	Préci.	SF	IN	STI	TPI	TWI	SPI	TRI
SB1	370,20	2,50	0,036	-0,03	0,018	1817,15	0,178	1141,36	0,108	0,019	3,35	-0,00011	6,14	-0,88	0,44
SB2	408,00	3,61	0,036	-0,03	0,018	1653,09	0,184	1195,72	0,116	0,0216	5,59	-0,00015	5,97	-0,67	0,427
SB3	398,06	3,14	0,036	-0,03	0,018	1767,32	0,180	1100,41	0,103	0,0183	5,62	0,00049	6,01	-0,76	0,427
SB4	333,89	2,57	0,07	-0,029	0,018	1727,50	0,181	1016,07	0,086	0,0165	3,37	-0,00006	6,10	-0,85	0,429
SB5	334,46	2,77	0,012	-0,028	0,017	1827,67	0,174	1010,07	0,046	0,008	3,44	-0,00001	6,04	-0,81	0,425
SB6	332,88	3,00	-0,011	-0,021	0,015	1739,01	0,178	1040,39	0,090	0,0159	7,21	-0,00004	6,02	-0,78	0,423
SB7	312,07	3,33	0,021	-0,022	0,016	1719,51	0,176	1051,82	0,173	0,0304	7,2	0,00006	5,90	-0,66	0,427
SB8	295,79	2,89	-0,011	-0,021	0,012	1719,65	0,171	1012,7	0,065	0,0118	5,92	-0,00034	5,99	-0,74	0,432
SB9	263,49	2,78	0,021	-0,02	0,014	2052,01	0,147	1007,47	0,038	0,0059	3,13	-0,00050	5,98	-0,72	0,449
SB10	271,55	3,06	0,021	-0,01	0,008	1628,71	0,181	1013,64	0,094	0,0186	15,21	0,00020	5,97	-0,72	0,43
SB11	260,61	2,68	0,072	0,017	0,008	1970,92	0,172	1011,72	0,070	0,0119	3,16	0,00026	6,04	-0,79	0,423
SB12	242,14	2,86	0,072	0,017	0,008	1784,26	0,175	1007,32	0,056	0,01	13,97	-0,00002	6,06	-0,77	0,429
SB13	239,07	3,08	0,072	0,017	0,008	1731,66	0,177	1026,22	0,058	0,0102	8,41	0,00014	5,95	-0,68	0,439
SB14	214,97	3,08	0,072	0,017	0,010	1819,80	0,178	1043,29	0,124	0,023	12,93	-0,00032	6,09	-0,78	0,426

5.3 CARTE DES ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS PAR LA THEORIE DU JEU

5.3.1 CLASSEMENT GENERAL DES SOUS BASSINS SELON L'INFLUENCE DES PARAMETRES ASSOCIES

Les tableaux 7 à 12 présentent les rangs des sous-bassins selon l'exposition, l'indice TRI, la courbure de profil, l'occupation du sol, les unités pédologiques et lithologiques. L'analyse combinées des tableaux, révèle une variabilité notable de leur influence sur le risque d'inondation. Les sous-bassins SB11 à SB14, orientés est/nord, présentent un risque élevé, tandis que les unités amont et centrales affichent des risques modérés ou faibles. L'indice TRI montre que des terrains peu ou moyennement accidentés contribuent différemment à la vulnérabilité avec SB6 et SB11 restant sensibles. La courbure de profil met en évidence l'accumulation dans les zones concaves (SB1, SB9) et un ruissellement rapide dans les zones convexes. L'occupation du sol souligne l'impact des zones anthropisées, agricoles et humides, avec SB6, SB7, SB13 et SB14 particulièrement vulnérables. Les sols hydromorphes, peu évolués ou indurés augmentent le ruissellement et la stagnation. Enfin, les formations lithologiques peu perméables à l'aval renforcent la vulnérabilité, SB12 à SB14 étant les plus exposés.

Tableau 7. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de l'exposition

Sous bassins	East	Nord	Orientation dominante	Interprétation hydrologique	Rang
SB1	0,036	-0,03	Est / Sud	Risque modéré	11
SB2	0,036	-0,03	Est / Sud	Risque modéré	11
SB3	0,036	-0,03	Est / Sud	Risque modéré	11
SB4	0,07	-0,029	Fort Est / Sud	Risque légèrement élevé	10
SB5	0,012	-0,028	Faible Est / Sud	Risque modéré	9
SB6	-0,011	-0,021	Ouest / Sud	Risque faible	11
SB7	0,021	-0,022	Est / Sud	Risque modéré	8
SB8	-0,011	-0,021	Ouest / Sud	Risque faible	7
SB9	0,021	-0,02	Est / Sud	Risque modéré	6
SB10	0,021	-0,01	Est / Faible Sud	Risque modéré à faible	5
SB11	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1
SB12	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1
SB13	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1
SB14	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1

Tableau 8. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de l'indice TRI

Sous bassins	TRI	Interprétation terrain	Sensibilité aux inondations	Rang
SB1	0,440	Moyennement accidenté	Risque modéré	13
SB2	0,427	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	5
SB3	0,427	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	5
SB4	0,429	Moyennement accidenté	Risque modéré	8
SB5	0,425	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	3
SB6	0,423	Peu accidenté	Risque élevé	1
SB7	0,427	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	5
SB8	0,432	Moyennement accidenté	Risque modéré	11
SB9	0,449	Relativement accidenté	Risque faible à modéré	14
SB10	0,430	Moyennement accidenté	Risque modéré	10
SB11	0,423	Peu accidenté	Risque élevé	1
SB12	0,429	Moyennement accidenté	Risque modéré	8
SB13	0,439	Moyennement accidenté	Risque modéré	12
SB14	0,426	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	4

Tableau 9. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de la courbure de profil (Pcou)

Sous bassins	Pcou	Interprétation	Rang
SB1	0,008	Concave (accumulation)	1
SB2	0,013	Convexe léger	9
SB3	0,013	Convexe léger	9
SB4	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB5	0,013	Convexe léger	9
SB6	0,014	Convexe	13
SB7	0,015	Convexe marqué	14
SB8	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB9	0,010	Concave (accumulation)	2
SB10	0,013	Convexe léger	9
SB11	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB12	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB13	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB14	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3

Tableau 10. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de l'OCS

Sous bassins	Ocs2	Ocs4	Ocs9	Ocs10	Ocs11	Ocs12	Ocs13	Ocs16	Taux moyen	Rang
SB1	2,2	0,04	5,19	0,1	0,03	0,37	1,73	0,63	1,29	13
SB2	6,3	0,1	7,21	0,23	0	1,76	2,14	3,39	2,64	9
SB3	14,29	1,17	5,72	4,53	0	2,54	1,6	10,41	5,03	8
SB4	5,91	0,13	7,61	0,1	0,09	0,44	1,94	1,33	2,19	11
SB5	1,48	0,04	2,65	0,01	0,03	0,07	0,99	0,49	0,72	14
SB6	15,54	1,68	24,45	1,71	1,88	9,12	5,51	20,95	10,11	4
SB7	8,31	2,64	12,7	2,35	1,55	7,58	4,67	24,94	8,09	5
SB8	7,96	2,9	4,84	5,61	3,08	8,7	3,59	11,07	5,97	6
SB9	1,02	4,45	0,67	4,76	2,9	1,52	1,22	2,38	2,37	10
SB10	5,57	5,4	2,13	0,45	4,38	15,46	6,41	2,52	5,29	7
SB11	0,6	1,77	0,52	0,58	2,07	0,21	4,33	0,58	1,33	12
SB12	10	27	12	10	28	16,78	21,48	8	16,66	3
SB13	10,59	28,56	10,25	29,33	28,08	18	20	8,45	19,16	1
SB14	10,23	24,12	4,06	40,24	27,91	17,45	24,39	4,86	19,16	1

Tableau 11. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence des unités pédologiques

Sous bassins	Sols hydromorphes à gley et pseudogley, et sols peu à évolués d'apport (%)	Sols remaniés ou typiques avec induration et bruns eutrophes trop (%)	Proportion moyenne (%)	Rang
SB1	13,4	1,25	7,33	8
SB2	13,4	1,25	7,33	8
SB3	12,68	6,68	9,68	5
SB4	12,57	0	6,29	13
SB5	12,82	0	6,41	12
SB6	14,96	0,71	7,84	6
SB7	14,96	0,71	7,84	6
SB8	12,78	0,97	6,88	11
SB9	9,82	0	4,91	14
SB10	12,76	1,17	6,97	10
SB11	12,01	10,19	11,1	1
SB12	12,01	10,19	11,1	1
SB13	12,01	10,19	11,1	1
SB14	12,01	10,19	11,1	1

Tableau 12. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence des unités lithologiques

Sous bassins	Sens d'influence sur le risque d'inondation	Rang
SB1	Élevé	4
SB2	Modéré	6
SB3	Faible	10
SB4	Faible	10
SB5	Faible	10
SB6	Élevé	4
SB7	Modéré	6
SB8	Modéré	6
SB9	Faible	10
SB10	Modéré	6
SB11	Faible	10
SB12	Très élevé	1
SB13	Très élevé	1
SB14	Très élevé	1

L'analyse du classement général des sous-bassins (Tableau 13), révèle que les premières places, indiquant le risque le plus élevé, sont occupées par les zones situées en aval SB12, SB13 et SB14, qui présentent des conditions favorables à l'accumulation d'eau (faible altitude, sols hydromorphes et lithologie peu perméable). Les rangs intermédiaires sont principalement attribués aux sous-bassins centraux et intermédiaires (SB6 à SB10), dont la vulnérabilité varie selon les paramètres, illustrant un équilibre entre pentes modérées et sols aux capacités d'infiltration diverses. Les sous-bassins amont (SB1 à SB5) obtiennent majoritairement les rangs les plus faibles, reflétant un risque modéré ou limité, en lien avec leur altitude élevée et leurs pentes prononcées favorisant un ruissellement rapide mais limitant l'accumulation. Certains sous-bassins, comme SB11, apparaissent à la fois sensibles pour certains paramètres (exposition, TRI, pédologie) mais moins pour d'autres, traduisant l'effet combiné des facteurs naturels et anthropiques.

Tableau 13. Classement général des sous bassins en fonction de l'influence des paramètres

Sous bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10	SB11	SB12	SB13	SB14
Altitude	12	14	13	10	11	9	8	7	5	6	4	3	2	1
Pente	1	14	12	2	4	8	13	7	5	9	3	6	11	10
Exposition	11	11	11	10	9	11	8	7	6	5	1	1	1	1
Courbure de profil	11	11	11	11	10	8	9	6	7	1	1	1	1	5
Distance au cours d'eau	10	2	8	5	12	7	3	4	14	1	13	9	6	11
Densité D.	5	1	4	2	11	7	9	13	14	3	12	10	8	6
Précipitation	2	1	3	8	12	6	4	10	13	9	11	14	7	5
SF	4	3	5	8	13	7	1	10	14	6	9	12	11	2
IN	11	12	9	8	2	7	14	5	1	10	6	3	4	13
STI	12	9	8	11	10	5	6	7	14	1	13	2	4	3
TPI	5	4	14	6	9	7	10	2	1	12	13	8	11	3
TWI	1	11	8	2	5	7	14	9	10	12	6	4	13	3
SPI	14	2	7	13	12	10	1	6	5	4	11	8	3	9
TRI	13	5	5	8	3	1	5	11	14	10	1	8	12	4
NDVI	2	7	13	3	1	6	4	8	8	8	4	11	14	11
Pédologie (%)	8	8	5	13	12	6	6	11	14	10	1	1	1	1
Ocs (%)	13	9	8	11	14	4	5	6	10	7	12	3	1	1
Lithologie (%)	4	6	10	10	10	4	6	6	10	6	10	1	1	1

5.3.2 ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS IDENTIFIEES

Le tableau 14 présente la distribution des scores de Borda obtenus à l'échelle des sous-bassins, tandis que le tableau 15 rend compte des résultats issus des différentes confrontations par paire selon l'algorithme de Condorcet. Ces analyses sont complétées par la figure 7, qui illustre la répartition spatiale des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué.

Tableau 14. Distribution du score de Borda

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Point Borda	Rang
Points	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01		
SB1	2	2	0	2	2	0	0	1	0	1	3	2	2	1	131	10
SB2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	0	3	1	0	2	140	7
SB3	0	0	1	1	3	0	1	4	1	1	2	1	2	1	116	12
SB4	0	3	1	0	1	1	0	4	0	3	3	0	2	0	129	11
SB5	1	1	1	1	1	0	0	0	2	3	2	4	1	1	110	13
SB6	1	0	0	2	1	3	6	2	1	1	1	0	0	0	150	4
SB7	2	0	1	2	2	3	0	2	2	1	0	0	1	2	144	6
SB8	0	1	0	1	1	4	4	1	1	2	2	0	1	0	135	9
SB9	2	0	0	0	3	1	1	1	0	3	0	0	1	6	105	14
SB10	3	0	1	1	1	3	1	1	2	3	0	2	0	0	150	4
SB11	4	0	1	2	0	2	0	0	1	1	2	2	3	0	139	8
SB12	4	1	3	1	0	1	0	3	1	1	1	1	0	1	165	2
SB13	5	1	1	2	0	1	1	1	0	0	3	1	1	1	159	3
SB14	5	1	3	1	2	1	0	0	1	1	2	0	1	0	180	1

Tableau 15. Matrice des confrontations par paire des sous bassins (Algorithme de Condorcet)

vs	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10	SB11	SB12	SB13	SB14
SB1		(6;12)	(8;10)	(8;10)	(10;8)	(7;11)	(8;10)	(8;10)	(11;7)	(8;10)	(10;8)	(7;11)	(7;11)	(7;11)
SB2	(12;6)		(8;10)	(11;7)	(10;8)	(6;12)	(6;12)	(8;10)	(11;7)	(9;9)	(9;9)	(8;10)	(9;9)	(6;12)
SB3	(10;8)	(10;8)		(7;11)	(8;10)	(5;13)	(6;12)	(6;12)	(9;9)	(6;12)	(7;11)	(6;12)	(6;12)	(5;13)
SB4	(10;8)	(7;11)	(11;7)		(9;9)	(7;11)	(6;12)	(7;11)	(10;8)	(8;10)	(10;8)	(8;10)	(8;10)	(6;12)
SB5	(8;10)	(8;10)	(10;8)	(9;9)		(5;13)	(6;12)	(6;12)	(10;8)	(6;12)	(7;11)	(5;13)	(6;12)	(4;14)
SB6	(11;7)	(12;6)	(13;5)	(11;7)	(13;5)		(10;8)	(10;8)	(11;7)	(10;8)	(9;9)	(7;11)	(8;10)	(5;13)
SB7	(10;8)	(12;6)	(12;6)	(12;6)	(12;6)	(8;10)		(10;8)	(11;7)	(8;10)	(9;9)	(7;11)	(7;11)	(5;13)
SB8	(10;8)	(10;8)	(12;6)	(11;7)	(12;6)	(8;10)	(8;10)		(11;7)	(5;13)	(8;10)	(6;12)	(7;11)	(6;12)
SB9	(7;11)	(7;11)	(9;9)	(8;10)	(8;10)	(7;11)	(7;11)	(7;11)		(5;13)	(4;14)	(6;12)	(5;13)	(5;13)
SB10	(10;8)	(9;9)	(12;6)	(10;8)	(12;6)	(8;10)	(10;8)	(13;5)	(13;5)		(9;9)	(7;11)	(8;10)	(8;10)
SB11	(8;10)	(9;9)	(11;7)	(8;10)	(11;7)	(9;9)	(9;9)	(10;8)	(14;4)	(9;9)		(5;13)	(5;13)	(5;13)
SB12	(11;7)	(10;8)	(12;6)	(10;8)	(13;5)	(11;7)	(11;7)	(12;6)	(12;6)	(11;7)	(13;5)		(7;11)	(6;12)
SB13	(11;7)	(9;9)	(12;6)	(10;8)	(12;6)	(10;8)	(11;7)	(11;7)	(13;5)	(10;8)	(13;5)	(11;7)		(4;14)
SB14	(11;7)	(12;6)	(13;5)	(12;6)	(14;4)	(13;5)	(13;5)	(12;6)	(13;5)	(10;8)	(13;5)	(12;6)	(14;4)	

Tableau 16. Classement définitif des sous bassins à l'issu des confrontation (Algorithme de Condorcet)

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10	SB11	SB12	SB13	SB14
Victoires	3	4	2	4	2	9	7	6	0	7	4	11	11	13
Défaites	10	6	10	8	10	3	5	7	12	4	5	2	1	0
Nuls	0	3	1	1	1	1	1	0	1	2	4	0	1	0
Total	9	15	7	13	7	28	22	18	1	23	16	33	34	39

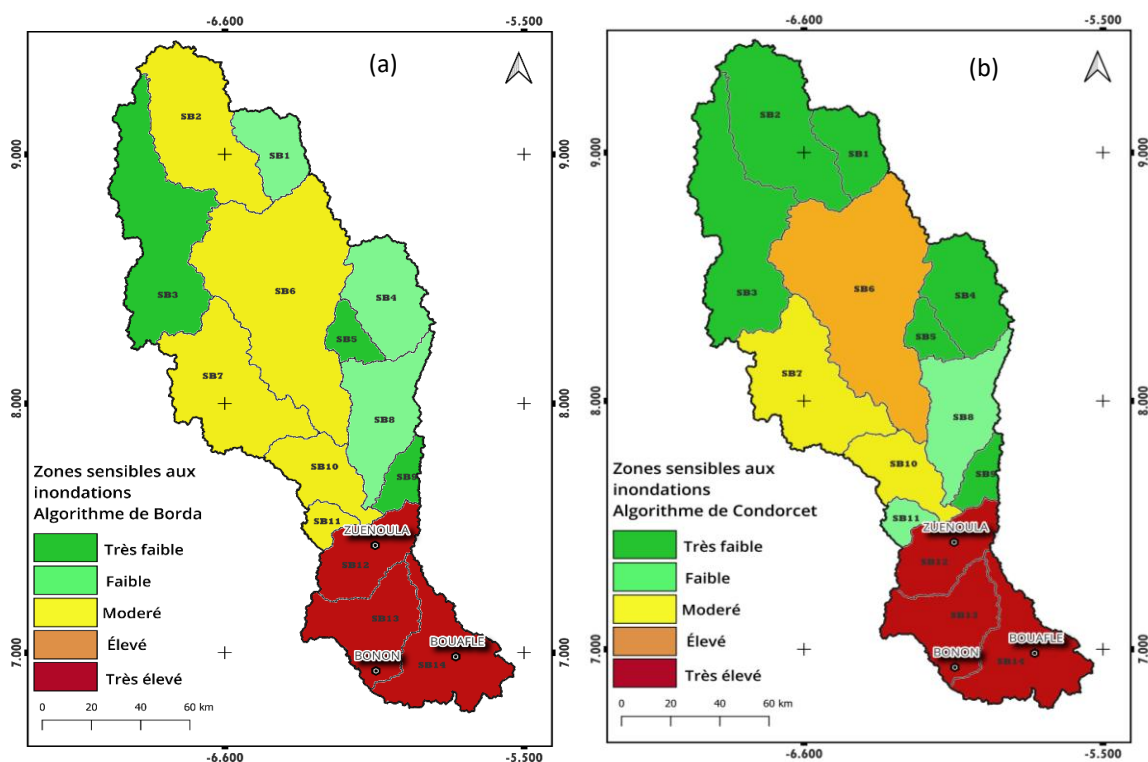


Fig. 4. Carte des zones sensibles aux inondations. (a): Borda, (b): Condorcet

Concernant l'algorithme de Borda (Tableau 14 et Figure 4.a), l'analyse des données met en évidence une hiérarchisation des sous-bassins fondée sur la régularité des positions obtenues dans les classements. Le sous-bassin SB14 se distingue nettement avec un score de 180 points, porté par un nombre élevé de premières places (cinq), traduisant un consensus marqué quant à sa sensibilité. Des sous-bassins tels que SB13 (165 points) et SB12 (159 points) affichent également des scores élevés, soulignant que la constance dans les classements supérieurs peut compenser un nombre plus limité de premières positions. À l'inverse, SB9, bien qu'occasionnellement bien classé, présente un score globalement faible (105 points), attribuable à une forte dispersion dans les classements souvent en bas de tableau. L'analyse spatiale (Figure 4.a) avec l'algorithme Borda, révèle que les sous-bassins SB12, SB13 et SB14 présentent les niveaux de sensibilité les plus élevés en termes de risque d'inondation, tandis que SB2, SB6, SB7, SB10 et SB11 se situent à un niveau de priorité modéré. Les sous-bassins SB1, SB3, SB4, SB5, SB8 et SB9 apparaissent quant à eux comme présentant une priorité faible à très faible en termes de sensibilité aux inondations. En termes de localisation, les sous-bassins situés en aval du bassin versant (SB12; SB13; SB14) semblent les plus exposés aux risques d'inondation, alors que plusieurs sous-bassins en amont, notamment SB1, SB3, SB4 apparaissent relativement peu sensibles. Les sous bassins intermédiaires SB5, SB8 et SB9 suivent aussi la même tendance. Cependant, cette tendance est totalement différente pour les sous bassins SB2, SB6, SB7 qui également sont situés en amont pour SB2, SB6 et dans la zone intermédiaire pour SB7. En effet, ces derniers présentent une sensibilité modérée traduisant une variabilité intrarégionale importante dans la sensibilité aux inondations. Concernant l'algorithme de Condorcet, le tableau 16 présente le classement définitif des sous-bassins SB1 à SB14 à l'issue des confrontations par paires (Tableau 15). Les résultats obtenus, révèlent une hiérarchisation marquée avec en tête le sous-bassin SB14 qui totalise 13 victoires, aucune défaite et un score maximal de 39 points. Ce résultat indique une domination complète dans l'ensemble des confrontations. Ensuite, suivent les sous-bassins SB13 avec 34 points et SB12 avec 31 points qui affichent également une performance élevée. À l'opposé, les sous-bassins SB3, SB5 et SB9 avec respectivement 7 points pour SB3, SB5 et 1 point pour SB9, se positionnent en fin de classement comme ayant cumulé un nombre élevé de défaites et très peu voire même aucune victoire. Ce résultat suggère une faible priorité en termes de risques d'inondations dans ces espaces. Les points obtenus par SB6, SB7 et SB10 traduisent une position médiane, marquée par une performance équilibrée pour SB7 et SB10 mais dominante pour SB6 avec une priorité élevée. En termes de sensibilité aux inondations, l'analyse de la figure 4.b permet de distinguer les sous-bassins les plus exposés selon une logique de consensus entre critères. Les sous-bassins classés en tête, notamment SB14, SB13 et SB12 qui sont situés en aval du bassin de la Marahoué, apparaissent comme les zones les plus sensibles aux inondations. Leur domination quasi systématique dans les confrontations par paires suggère une convergence des indicateurs de vulnérabilité les plaçant en priorité. La forte exposition aux inondations de ces sous bassins pourrait s'expliquer par la concentration des écoulements et la topographie qui accentuent les phénomènes de ruissellement et de submersion. À l'inverse, les sous-bassins SB1, SB2 et SB3, situés en amont, se caractérisent par une faible sensibilité aux inondations traduite par un nombre élevé de défaites dans les confrontations avec les autres. Leur position géographique, souvent associée à une plus grande capacité d'infiltration ou à des surfaces imperméabilisées plus faibles, pourrait

expliquer cette moindre exposition aux inondations. Concernant les sous bassins intermédiaires (SB8 et SB11) avec une sensibilité faible, présentent une situation géographique mixte incluant à la fois des secteurs intermédiaires et certains compartiments amont soumis à des pressions croissantes. Le sous bassin SB4 a été identifié très faiblement sensible aux inondations par l'algorithme de Condorcet

6 DISCUSSIONS

Les sous-bassins du versant de la Marahoué ont été classés en fonction de leur valeur numérique d'exposition aux inondations à l'aide des algorithmes de notation Borda et de Condorcet. L'analyse croisée des résultats issus de ces deux méthodes a mis en évidence une hiérarchisation cohérente des sous-unités hydrologiques en termes de sensibilité aux inondations. Ces résultats s'inscrivent dans une logique de priorisation spatiale fondée sur des approches d'agrégation multicritère, couramment mobilisées dans l'évaluation de la vulnérabilité hydrologique [48], [49], [50]. De manière convergente, les sous-bassins SB12, SB13 et SB14 localisés en aval du bassin versant de la Marahoué apparaissent comme les plus sensibles aux phénomènes d'inondation selon les deux méthodes de classement. Cette convergence des deux méthodes traduit une stabilité de la vulnérabilité spatiale, corroborée par les scores élevés de classement (méthode de Borda) et de domination (méthode de Condorcet). Cette concentration des zones sensibles aux inondations en aval du bassin est confirmée par de nombreux travaux scientifiques antérieurs. En effet, les zones situées en aval des bassins versants sont généralement caractérisées par une accumulation progressive des écoulements, une topographie plus plane ainsi qu'une dynamique sédimentaire qui ralentit les flux en augmentant ainsi le risque de submersion [51], [52], [53]. À cela s'ajoute une pression anthropique plus forte dans les zones basses, notamment en raison de l'urbanisation croissante, de la suppression des zones tampons naturelles et de l'artificialisation des sols comme le soulignent [54]. Des résultats similaires ont été obtenus par [43] dans le bassin versant du Tajan, situé à proximité de la ville de Sari en Iran. À travers une approche multicritère, ces auteurs ont identifié les sous-bassins les plus exposés aux inondations, ceux-ci étant localisés en aval et présentant une densité urbaine plus élevée. À l'inverse, les zones à plus faible probabilité d'inondation se situaient dans des secteurs à faible activités anthropiques et à des altitude et pentes très élevés. Par ailleurs, la vulnérabilité accrue des zones en aval s'explique également par la dynamique hydrologique des bassins versants. Les précipitations intenses sur les parties en amont génèrent des volumes importants de ruissellement, qui, en s'écoulant vers l'aval, entraînent une élévation du niveau des cours d'eau. Lorsque cette accumulation dépasse la capacité de rétention des lits fluviaux, un débordement se produit, inondant les zones périphériques situées en contrebas. Ce mécanisme est bien documenté par [55] qui décrivent ce processus comme une cause majeure des inondations dans les zones basses, notamment dans les contextes où l'infrastructure hydraulique est insuffisante ou dégradée. Les sous-bassins SB6, SB7 et SB10, situés dans des zones intermédiaires du bassin, présentent des classements médians, reflétant une variabilité spatiale intrarégionale. Leurs performances plus nuancées peuvent s'expliquer par des facteurs combinés: pentes modérées, occupation mixte du sol (zones agricoles en mutation, habitats semi-urbains), ainsi qu'un état de conservation variable de la couverture végétale. Ces résultats rejoignent les observations de [56], qui insistent sur la difficulté à catégoriser de manière binaire la sensibilité aux inondations dans des sous-unités intermédiaires du bassin. La sensibilité y est souvent liée à des facteurs locaux et dynamiques tels que les pratiques agricoles, la saturation des sols ou l'absence de réseaux de drainage. Les sous-bassins SB1, SB3, SB4, SB5, SB8 et SB9 situés en amont du bassin, présentent dans leur grande majorité des scores faibles confirmant une moindre sensibilité aux inondations. Ces résultats s'expliquent par la plus grande capacité d'infiltration des sols, des pentes plus marquées favorisant le ruissellement rapide, et une imperméabilisation moindre. Ces observations sont en phase avec les travaux de [57]. En effet, ces auteurs à travers un modèle d'hydrologie de bassin basé sur des données physiques et des zones de contribution variables, ont montré que l'accumulation du flux et la saturation du sol sont plus probables en zones aval qu'en amont. Cependant dans cette présente étude, certains sous-bassins localisés en amont, notamment SB2 et SB6 se sont distingué par une sensibilité modérée selon les résultats de l'algorithme de Borda et d'un autre côté, Condorcet a classé SB6 parmi les sous-bassins à sensibilité élevée. Ce résultat révèle ainsi une divergence d'interprétation entre les deux méthodes quant à la vulnérabilité de cette unité. Cette variabilité intra-amont suggère que l'altitude ou la position dans le bassin ne peuvent à elles seules expliquer la vulnérabilité. Par exemple, des facteurs tels que la compacité du sous-bassin et bien d'autres morphométriques y pourraient jouer un rôle important comme l'ont indiqué [58]. Parallèlement, le sous bassin SB9, malgré des classements ponctuellement favorables, est faiblement priorisé par Condorcet, traduisant ainsi une forte dispersion dans les préférences. Cela souligne la limite des approches linéaires dans la prise de décision et justifie l'intérêt de combiner plusieurs méthodes pour mieux cerner la sensibilité réelle. En effet, l'intégration conjointes des méthodes de Borda et Condorcet dans l'identification des zones sensibles aux inondations permet de renforcer la robustesse de la prise de décision. Selon [59], les algorithmes de la théorie de jeu reflètent le mieux le comportement des acteurs et des parties prenantes impliqués dans la prise de décision multi-objectifs. Aussi, les différences entre les résultats produits par les algorithmes de Condorcet et de Borda, sont aussi observé par [43]. Ces auteurs ont relevé que ces différences sont inéluctablement liées à la nature des algorithmes eux même. En effet, Borda valorise la constance dans les bons classements (effet de fréquence), tandis que Condorcet révèle les cas de domination nette dans les comparaisons directes (effet de préférence majoritaire). Dans un contexte d'incertitude, le recours à des méthodes hybrides est nécessaire comme l'a recommandé [60]. Au regard des résultats obtenus à partir des algorithmes de la théorie des jeux, les zones situées en aval du bassin versant de la Marahoué sont les plus sensibles aux inondations. Par conséquent elles ont un risque d'inondation très élevée. Quant à la partie septentrionale du bassin de la Marahoué, le risque d'inondation est faible et voire très faible. En définitive, toutes les approches utilisées pour identifier les zones sensibles aux inondations ont montré que les zones à haut et très haut niveau de sensibilité ont tendance à se situer au centre et au sud près de l'exutoire du bassin versant. Dans ce contexte, la surveillance des événements pluvieux dans ces zones sensibles s'avère opportun pour une alerte précoce. Bien évidemment la

modélisation des précipitations et des débits du cours d'eau d'un délai raisonnable pourrait fortement contribuer à la mise en place d'un système alerte précoce.

7 CONCLUSION

La présente étude a évalué le potentiel de la combinaison entre les données de télédétection et les algorithmes de la théorie des jeux, en particulier les méthodes de classement de Borda et de Condorcet, pour la cartographie des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). Dans un contexte de forte pression anthropique, d'urbanisation non planifiée et d'accroissement des risques d'inondation, cette approche intégrée s'avère particulièrement pertinente pour soutenir la mise en place de systèmes d'alerte précoce. La sélection et l'analyse de dix-huit (18) paramètres liés aux inondations ont permis d'optimiser l'identification des zones les plus vulnérables. Les résultats mettent en évidence une sensibilité accrue aux inondations dans la partie sud du bassin, notamment au niveau des sous-bassins SB12, SB13 et SB14, caractérisés par une topographie relativement plane, une forte proximité du cours d'eau principal et une pression anthropique marquée. À l'inverse, les sous-bassins situés en amont (SB3, SB4, SB5, SB8 et SB9) apparaissent globalement moins exposés, grâce à des pentes plus importantes et à une meilleure capacité d'infiltration. L'analyse croisée des classements issus des méthodes de Borda et de Condorcet confirme cette hiérarchie spatiale, tout en soulignant l'existence de zones intermédiaires à sensibilité variable. Par ailleurs, l'étude corrobore les inondations récurrentes observées ces dernières années dans les localités de Bouaflé et de Zuénoula, situées en aval du bassin. Ainsi, cette approche fournit un outil puissant pour le suivi environnemental, la gestion durable du territoire et la prévention des risques d'inondation dans le bassin de la Marahoué. Les zones aval doivent, de ce fait, être considérées comme prioritaires dans les stratégies de gestion du risque, en particulier à travers la mise en place d'un système d'alerte précoce fondé sur la modélisation hydrologique en temps réel.

REFERENCES

- [1] Banque M. (2014). Gérer les risques de catastrophe pour protéger le développement. En ligne <https://www.banquemondiale.org/fr/results/2013/04/12/managing-disaster-risks-resilient-development>, consulté le 20 Mars 2023.
- [2] Guha-sapir D, Hoyois P., Wallemacq P. and BELOW R. (2016). Annual disaster statistical review 2016: The Numbers and Trends. Édit. CRED, Université catholique de Louvain, Bruxelles (Belgique), 91 p.
- [3] Ibrahim M. B. (2022). Evolution des dégâts et du cadre de gestion du risque des inondations à Niamey entre 1991 et 2020. *Sciences Humaines*, No. 16, pp. 29-42.
- [4] Bola G. B., Tshimanga R. M., Neal J., Hawker L., Trigg M. A., Mwamba L. and Bates P. D. (2022). Evaluation des risques d'inondation à périodes de retour multiples dans le bassin du fleuve Congo. In *Hydrologie, Climat et Biogéochimie du Bassin du Congo: Une Base pour l'Avenir*, pp. 537-559.
- [5] Kumar A., Samuel S. K. and Vyas V. (2015). Morphometric analysis of six sub-watersheds in the central zone of Narmada River. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 8, No. 8, pp.5685-5712.
- [6] Dingman S. L. (2008). *Physical Hydrology*. Waveland Press, Inc., 3^e édition, 656 p.
- [7] Huong H and Pathirana A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam, *Hydrol Earth Syst Sci.*, Vol. 17, pp. 379–394.
- [8] Perera D., Seidou O., Agnihotri J., Rasmy M., Smakhtin V., Coulibaly P. and Mehmood H. (2019). *Flood Early Warning Systems: A Review Of Benefits, Challenges and Prospects* United Nations University Institute for Water, Environment and Health, No. 8, Hamilton, Canada, ISBN 978-92-808-6096-2, 48p.
- [9] Saley M. B., Kouamé F., Péven M. J., Biémi J. and 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*, Vol. 5, Nos 1–2–3, pp. 53-67.
- [10] Vami B. H. N., Saley B., Wade S., Valere D. E., Kouame F. and Affian K. (2014). Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, Vol. 10, No. 2, pp. 170-191.
- [11] Assoko A. S. V. (2022). Conception d'outils de prévision des extrêmes hydrologiques en région tropicale ouest africains : cas du bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat en Hydrologie et environnement. Institut national polytechnique Felix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 240p.
- [12] Njeugeut M. A. C. N., Ta, M. Y., Satti J.-R. K., Assoma T. V., and Jourda, J. P. (2023). Cartographie Automatique des Zones Inondées et Evaluation des Dommages dans le District d'Abidjan depuis Google Earth Engine. *European Scientific Journal*, ESJ, 19 (32), Article 32. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n32p54>.
- [13] Hauhouot C. (2008). Analyse du risque pluvial dans les quartiers précaires d'Abidjan. Etude de cas à Attécoubé. *Geo-Eco-Trop*, Vol. 32, pp. 75–82.
- [14] UNDDR. (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDDR). <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>.

- [15] Bashir B. (2023). Morphometric Parameters and Geospatial Analysis for Flash Flood Susceptibility Assessment: A Case Study of Jeddah City along the Red Sea Coast, Saudi Arabia. *Water*, Vol. 15, No. 5, Article 870, <https://doi.org/10.3390/w15050870>.
- [16] Obeidat M., Awawdeh M. and Al-Hantouli F. (2021) Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *J Flood Risk Management*. 2021; Vol. 14, No. 2, Article e12711, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12711>.
- [17] Utlu M. and Özdemir H. (2018). The Role of Basin Morphometric Features in Flood Output: A Case Study of the Biga River Basin, No. 36, pp. 49-62. <https://doi.org/10.26650/JGEOG408101>.
- [18] Pourzangbar A., Oberle P., Kron A. and J. Franca M. (2024). Analysis of the utilization of machine learning to map flood susceptibility, *Journal of Flood Risk Management*, Karlsruhe Institute of Technology, Allemagne, 44p.
- [19] Lévêque C., Dejoux C. and Itlis A. (1983). Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire. O.R.S.T.O.M., France, *Hydrobiologia*, Vol. 100, pp. 113-141.
- [20] Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. SODEMI Abidjan, 302 p.
- [21] Kouamé, K. A., Koudou, A., Sorokoby, V. M., Kouamé, K. F., and Kouassi, A. M. (2017). Relation entre les écoulements de surface et souterrain dans le bassin versant du haut Bandama en Côte d'Ivoire. *LARHYSS Journal*, No. 29, pp.137-152.
- [22] Soro G., Noufé, D., and Goula, B. (2018). Analyse de la sensibilité d'un modèle hydrologique global aux estimations de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle: application au bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, No. 33, pp. 155-168.
- [23] Peltre Wurtz, J., and Steck, B. (1979). Influence d'une société de développement sur le milieu paysan. Coton et culture attelée dans la région de la Bagoué (Nord Côte d'Ivoire). ORSTOM.
- [24] Dje Bi D. D. (2015). Évaluation et Planification des ressources en eau du Bassin versant de la Marahoué (centre ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire, Université Nangui Abrogoua, 83p.
- [25] Adon G. C. R. (2015). Évaluation des potentialités en eau de l'hydrosystème de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse, Université Félix Houphouët Boigny, 177p.
- [26] Denis G. (2016). L'exploitation Artisanale De L'or En Côte D'ivoire: La Persistance D'une Activite Illegale. *European Scientific Journal*, ESJ, Vol. 12, No. 3, pp.18-36, <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n3p18>.
- [27] Kouadio A. C., Kouassi K., and Assi Kaudjhis J. P. (2018). Orpaillage, disponibilité alimentaire et compétition foncière dans les zones aurifères du département de Bouaflé. *TROPICULTURA*, Vol. 36, No. 2, pp. 369-379.
- [28] Pouclet A., Allialy M., Daouda-Y. B. and Esso B. (2004). Découverte d'un diatrème de kimberlite diamantifère à Séguéla en Côte-d'Ivoire. *Comptes Rendus Géosciences*, Vol. 336, No. 1, pp. 9-17.
- [29] Ozdemir H, Bird D. 2009. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. *Environ. Geol.* 56, pp. 1405–1415.
- [30] Ahmed S.A., Chandrashekarappa K.N., Raj S.K., Nischitha V., and Kavitha G. (2010). Evaluation of morphometric parameters derived from ASTER and SRTM DEM – a study on Bandihole sub-watershed basin in Karnataka. *J Indian Soc Remote Sens.* 38, pp. 227–238.
- [31] Bhatt S. and Ahmed S. A. (2014). Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. *Geocarto International*, Vol. 29, No. 8, pp. 878-894.
- [32] Das S. (2018). Système d'information géographique et zonage des risques d'inondation basé sur l'AHP du bassin de Vaitarna, Maharashtra, Inde. *Arabe. J. Géosci.* Vol. 11, 576.
- [33] Liuzzo L.; Sammartano V. and Freni G. (2019). Comparaison entre différentes méthodes distribuées pour la cartographie de la sensibilité aux inondations. *Ressource en eau. Géré*, Vol. 33, pp. 3155–3173.
- [34] Sellami E. M., Maanan M. and Rhinane H. (2022). Performance of machine learning algorithms for mapping and forecasting of flash flood susceptibility in tetouan, morocco. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLVI-4/W3-2021, pp. 305-313.
- [35] Waiyasuri K., Wetchayont P., Tananonchai A. and Suwanmajo D. (2023). Flood Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis In Lam Khan Chu Watershed, Chaiyaphum Province, Thailand. *GEOGRAPHY, Environment, Sustainability*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-56.
- [36] Horton R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 13, No. 1, pp. 350-361.
- [37] Costache R., Hong H. and Pham Q. B. (2020). Comparative assessment of the flash-flood potential within small mountain catchments using bivariate statistics and their novel hybrid integration with machine learning models, *Science of The Total Environment*, No. 711, Article 134514.
- [38] Wang Z., Chen X., Qi Z. and Cui C. (2023). Flood sensitivity assessment of super cities. *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, Article 5582.
- [39] Kamenan S. J.-R., Youan T. M., Adja M. G., and Kouassi A. M. (2025). Using Deep Learning and the combination of multi-sensor images to map land use and land cover in the Marahoué watershed, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, M. Vol. 80, No. 1, pp. 6–24.
- [40] Adhami M., Sadeghi S. H., Duttman R. and Sheikhmohammady M. (2019). Changes in watershed hydrological behavior due to land use comanagement scenarios. *Journal of Hydrology*, No. 577, Article 124001.
- [41] Eloudi H., Hssaisoune M., Reddad H., Namous M., Elaloul A., Hajji S., Faouzi E. and Bouchaou L. (2023). Determination of the potential soil losses and prioritization of sub-watersheds: Insight from North African highland system, *Scientific African*, Vol. 22, Article e01930, 14p.

- [42] Khiavi A. N., Vafakhah M. and Sadeghi S. H. (2023). Application of participatory approach in identifying critical sub-watersheds based on flood generation potential in the Cheshmeh-Kileh Watershed, Mazandaran Province. *Water and Soil Management and Modeling*, Vol. 3, No. 3, pp. 90-107.
- [43] Avand M., Khiavi A. N., Khazaei M. and Tiefenbacher J. P. (2021). Determination of flood probability and prioritization of sub-watersheds: A comparison of game theory to machine learning. *Journal of Environmental Management*, No. 295, Article 113040.
- [44] Di B. G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte, L. and Blöschl, G. (2010). Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, No. 22.
- [45] Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Van D. Z. E. H., Poesen J. and Alewell C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, Vol. 51, pp. 23–34.
- [46] Elkhachy I. (2015). Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 18, No. 2, pp. 261–278.
- [47] Youssef A. M., Pradhan B., and Sefry S. A. (2016). Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 1, 12p.
- [48] Malczewski J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, No. 7, pp. 703-726.
- [49] Hadipour V., Vafaie F. and Deilami K. (2020). Coastal Flooding Risk Assessment Using a GIS-Based Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Approach. *Water*, Vol. 12, No. 9.
- [50] Nkonu R. S., Antwi M., Amo-B. M. and Dekongmen B. W. (2023). GIS-based multi-criteria analytical hierarchy process modelling for urban flood vulnerability analysis, Accra Metropolis. *Natural Hazards*, Vol. 117, No. 2, pp. 1541-1568.
- [51] Luu C., Von M. J. and Kanjanabootra S. (2018). Assessing flood hazard using flood marks and analytic hierarchy process approach: a case study for the 2013 flood event in Quang Nam, Vietnam. *Natural Hazards*, Vol. 90, pp. 1031–1050.
- [52] Deroliya P., Ghosh M., Mohanty M. P., Ghosh S., Durga R. K. H. V. and Karmakar S. (2022). A novel flood risk mapping approach with machine learning considering geomorphic and socio-economic vulnerability dimensions. *Science of The Total Environment*, Vol. 851, No. 1, Article 158002.
- [53] El-magd S. A., Maged A. and Farhat H. I. (2022). Hybrid-based Bayesian algorithm and hydrologic indices for flash flood vulnerability assessment in coastal regions: machine learning, risk prediction, and environmental impact. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp. 57345–57356.
- [54] López-dóriga U. and Jiménez J. A. (2020). Impact of Relative Sea-Level Rise on Low-Lying Coastal Areas of Catalonia, NW Mediterranean, Spain. *Water*, Vol. 12, No. 11, Article 3252.
- [55] Saha A., Pal S. C., Arabameri A., Blaschke T., Panahi S., Chowdhuri I., Chakraborty R., Costache R. and Arora A. (2021). Flood Susceptibility Assessment Using Novel Ensemble of Hyperpipes and Support Vector Regression Algorithms. *Water*, 13, No. 2, Article 0241.
- [56] Bronstert A., Niehoff D. and Bürger G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 2, pp. 509-529.
- [57] Beven K. J. and Kirkby M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- [58] Narendra B. H., Setiawan O., Hasan R. A., Siregar C. A., Pratiwi, Sari N., Sukmana A., Dharmawan I. W. S. and Nandini R. (2024). Flood susceptibility mapping based on watershed geomorphometric characteristics and land use/land cover on a small island. *Global Journal of Environmental Science and Management*, Vol. 10, No. 1, pp. 301-320.
- [59] Madani K. (2010). Game theory and water resources. *J. Hydrol.*, Vol. 381, No: 3–4, pp. 225–238.
- [60] Coulibaly A. (2019). *Décision de groupe, Aide à la facilitation: Ajustement de procédures de vote selon le contexte de décision*. Thèse de Doctorat en Informatique et Télécommunication. Université Toulouse 1 Capitole, Toulouse, France, 130p.