

Cartographie des risques d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire

Kouassi Amani Michel¹, Gnangouin Asaph Yahot Joel², Kouame Kacou Essey Benjamin³

1 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

2 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Ecole Doctorale Polytechnique (EDP), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

3 Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

Résumé

Les inondations constituent un risque naturel majeur du monde contemporain et figurent au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde en occasionnant d'importants dégâts humains et matériels. La Côte d'Ivoire a connu durant la dernière décennie des inondations majeures qui ont causé des dégâts économiques et humains importants dans plusieurs régions du pays (Abidjan, Grand-Labou, Zuenoula, etc.) y compris le bassin versant du N'Zi (Bandama). Dans ce cadre, la détermination des zones susceptibles d'être affectées par les inondations est primordiale pour une meilleure gestion de ce risque. L'objectif de cette étude est de cartographier les risques d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire plus précisément dans les localités de Dimbokro et M'babikro. Des données de débits journaliers maximaux annuels ont été utilisées et couvrent la période allant de 1961 à 2016. La démarche méthodologique est basée sur une double modélisation qui part de la détermination des débits fréquents de crue à court (10 ans), moyen (50 ans) et long termes (100 ans) à partir d'une modélisation statistique basée sur l'analyse fréquentielle. Les résultats obtenus de cette analyse fréquentielle sont ensuite utilisés dans un modèle de simulation hydraulique afin de déduire les caractéristiques de l'écoulement en termes de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement. Ainsi, à partir de la matrice de danger suisse et d'un modèle numérique de terrain avec une résolution spatiale de 30 m, les zones inondables et les étendues des crues ont été déterminées au niveau des villes de Dimbokro et M'babikro. Les résultats obtenus mettent en évidence la forte vulnérabilité à l'inondation de plusieurs enjeux au sein de ces différentes localités (habitations, édifices religieux, restaurants, pharmacies, édifices administratifs, voiries, plantations, champs, etc.). Ces cartes constituent des outils d'aide à la prise de décision pour les structures décentralisées (Districts, Conseils régionaux, Mairies, etc.) et les gouvernements et servent à l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation dans les villes de Dimbokro et M'babikro.

Mots clés : Cartographie, Risques d'inondation, Modélisation statistique, Modélisation hydraulique, N'Zi (Bandama), Côte d'Ivoire.

Flood risk mapping in the N'Zi watershed (Bandama) in Côte d'Ivoire

Abstract:

Floods are a major natural hazard in the contemporary world and are at the forefront of natural disasters in the world, causing significant human and material damage. Côte d'Ivoire has experienced major floods over the past decade which have caused significant economic and human damage in several regions of the country (Abidjan, Grand-Labou, Zuenoula, etc.) including the N'Zi watershed (Bandama). In this context, the determination of areas likely to be affected by floods is essential for better management of this risk. The objective of this study is to map the risks of flooding in the N'Zi (Bandama) watershed in Côte d'Ivoire, more precisely in the localities of Dimbokro and M'babikro. Annual maximum daily flow data were used and cover the period from 1961 to 2016. The methodological approach is based on a double modeling which starts from the determination of the frequent flood flows in the short (10 years), medium (50 years) and long term (100 years) from statistical modeling based on frequency analysis. The results obtained from this frequency analysis are then used in a hydraulic simulation model in order to deduce the characteristics of the flow in terms of water heights and flow velocities. Thus, from the Swiss danger matrix and a digital terrain model with a spatial resolution of 30 m, the flood zones and the extent of the floods were determined at the level of the towns of Dimbokro and M'babikro. The results obtained highlight the high vulnerability to flooding of several issues within these different localities (dwellings, religious buildings, restaurants, pharmacies, administrative buildings, roads, plantations, fields, etc.). These maps are decision-making support tools for decentralized structures (Districts, Regional Councils, Town Halls, etc.) and governments and are used to draw up flood risk prevention plans in the cities of Dimbokro and M'babikro.

Key Words: Cartography, Flood risks, Statistical modeling, Hydraulic modeling, N'Zi-Bandama, Côte d'Ivoire.

¹ Corresponding author: michel.kouassi@inphb.ci

INTRODUCTION

Les inondations constituent un risque naturel majeur du monde contemporain et figurent au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde en occasionnant d'importants dégâts humains et matériels [1-3]. L'inondation est relativement commune dans certaines régions du monde. Elle fait partie des cycles naturels qui sont aggravés par les changements climatiques. Les inondations gagnent de l'intensité et réussissent à franchir les crues maximales à plusieurs reprises et tous les pays, qu'ils soient développés ou en développement, connaissent actuellement un mouvement sans précédent de concentration des populations et des activités dans les zones urbaines. Cette urbanisation croissante, préoccupe les collectivités territoriales, les élus locaux, les aménageurs du territoire et la communauté scientifique car elle entraîne la concentration des hommes dans des espaces plus ou moins réduits, exposant ces populations aux risques d'inondations. Ces faits imposent une prise en considération du risque d'inondation par les aménagistes et les décideurs locaux [1]. Dans ce cadre, la détermination des zones susceptibles d'être affectées par les inondations est primordiale pour une meilleure gestion de ce risque. Les conséquences des inondations sont accentuées par le phénomène d'érosion qui mérite également une attention particulière. En effet, la pression démographique responsable de la pression foncière conjuguée à l'utilisation du bois comme seule source d'énergie conduit à la destruction du couvert végétal, à la dégradation des sols.

Ces différentes formes de dégradations rendent les terres plus vulnérables à l'inondation. La Côte d'Ivoire a connu durant la dernière décennie des inondations majeures qui ont causé des dégâts économiques et humains importants dans plusieurs régions du pays (Abidjan, Grand-Lahou, Zuenoula, etc.). Comme pour diverses régions de la Côte d'Ivoire, le bassin versant du N'Zi (Bandama) est sensible aux événements hydroclimatiques extrêmes, notamment les crues liées à des épisodes de précipitations intenses. De tels épisodes sont fréquents et peuvent être dévastateurs. En effet, les intempéries enregistrées dans cette région montrent à quel point la protection contre les inondations est devenue un enjeu majeur. Elle constitue, par conséquent, un défi capital de la gestion des ressources hydriques. En effet, dans le bassin versant du N'Zi (Bandama), le 19 septembre 2018, une inondation a été observée à M'Bahiakro [4]. La route nationale A, qui relie la ville de M'Bahiakro à Bouaké, a été coupée par les eaux, suite aux pluies diluviennes qui se sont abattues sur la localité. Cette voie bitumée est devenue impraticable. L'eau qui avait envahi les deux côtés de la voie, juste après quelques mètres, à la sortie de la ville, a fini par déborder et couper la route en deux, rendant la circulation impossible à cet endroit. Les hauteurs d'eau pouvant atteindre le mètre et demi (1,5 m) par endroit. Les véhicules et autres usagers ont été obligés d'emprunter une déviation du côté du cimetière jusqu'au quartier TP au Nord de la ville pour reprendre la route nationale. Des quartiers de la ville comme tels que « Représentant », « Résidentiel », etc. ont été aussi menacés par les eaux qui progressent vers les habitations mais avec des hauteurs plus faibles (moins d'un mètre d'eau). Le 18 octobre 2018, une inondation du fleuve N'Zi a affecté plusieurs familles à Dimbokro dans le Centre de la Côte d'Ivoire, en raison des fortes pluies qui sont abattues sur le pays, plus précisément dans la capitale régionale du N'Zi [5]. Environ trois cent quatorze (314) personnes issues de 33 familles, résidents des quartiers de Dioulakro et Kennedy, ont quitté leurs maisons pour trouver refuge chez des parents et amis dans d'autres quartiers de la ville [5]. Ces faits constatés sur le bassin versant du N'Zi où les villes telles que M'Bahiakro et Dimbokro sont très proches du cours d'eau et se font même traversées par celui-ci, comme c'est le cas de Dimbokro, ce qui accentue leur vulnérabilité aux débordements d'eau, il est plus que nécessaire d'analyser les risques d'inondations dans le bassin versant du N'Zi (Bandama).

Ces faits démontrent la vulnérabilité du bassin versant du N'zi (Bandama) aux inondations liées aux crues du fleuve N'zi en général et dans les localités à forts enjeux tels que Dimbokro et M'bahiakro en particulier. En effet, la modélisation des événements extrêmes s'avère un enjeu scientifique essentiel pour améliorer les systèmes de prévision des crues et assurer la protection de la population et des infrastructures [6]. Afin de réduire les pertes en vies humaines et les dégâts causés aux infrastructures dans les plaines inondables, il est nécessaire de prévoir les niveaux d'eau des rivières, y compris l'étendue des inondations pour la cartographie des risques [6]. À cet effet, plusieurs approches ont été développées pour modéliser les risques d'inondation. Ces modèles numériques sont des outils importants pour comprendre et évaluer les inondations, étant donné la forte dynamique non linéaire des écoulements dans les plaines inondables.

Pour délimiter les zones inondées, des études récentes [7] indiquent que les approches actuelles sont basées sur la simulation hydraulique intersectant les niveaux d'eau prédits avec une surface de plaine inondable. En effet, la simulation hydraulique vise à étudier la propagation de l'onde de crue dans le fleuve, à délimiter les plaines inondables et à simuler les niveaux d'eau. Les méthodes numériques peuvent consister en des modèles unidimensionnels ou bidimensionnels de la surface de l'eau [7]. Ces modèles hydrauliques sont des outils mathématiques qui tentent de reproduire le mouvement des fluides et nécessitent généralement une estimation de

leurs paramètres. Selon leur représentation spatiale du débit de la plaine inondable, les modèles peuvent être regroupés de manière dimensionnelle [8].

Ainsi l'objectif de cette étude est d'étudier la problématique des inondations au niveau des localités de M'bahiakro et Dimbokro dans le bassin versant du N'zi (Bandama) à travers une modélisation des crues afin d'identifier les zones à risque. Il s'agit alors d'évaluer le risque d'inondation afin de fournir les informations nécessaires aux acteurs locaux pour asseoir une stratégie et se prémunir contre les effets néfastes des inondations.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation de la zone d'étude : Le secteur d'étude est le bassin versant du N'zi (Figure 1), sous-bassin du fleuve Bandama (Côte d'Ivoire). Il est compris entre les longitudes 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6°00' et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 km². Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement suivant une direction Nord-Sud. Le N'zi a une pente moyenne de 0,053%. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro [9]. De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du N'zi est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 et 1600 mm/an. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attiéen) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm/an [9]. Le bassin du N'zi se caractérise par une végétation savanicole dans le Centre et le Nord. La partie sud est couverte par la forêt. Le relief du bassin est peu accidenté. Il est généralement constitué de plateaux (100 à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferrallitiques moyennement dessaturés (Nord) et les sols ferrallitiques fortement dessaturés (Centre et Sud). Ces éléments (végétation, relief, types de sol, etc.) définissent les conditions physiques de l'écoulement [9].

Données de l'étude : Les données de débits utilisées proviennent de la Direction de l'Hydrologie. Il s'agit de données de débits journaliers maximaux annuels collectées au niveau des stations hydrométriques de Dimbokro et M'Bahiakro. Ces données couvrent la période 1961-2016. Les débits journaliers maximaux annuels dans le bassin versant du N'zi varient de 10,6 à 559 m³/s à la station de M'Bahiakro et de 45,8 à 646 m³/s à la station de Dimbokro. Ces valeurs montrent que les données retenues pour l'étude sont représentatives. Des données altimétriques ont été également utilisées. Il s'agit de modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 m recueilli par la navette spatiale américaine Endeavour et issu des missions SRTM (Shuttle Radar Topographie Mission).

Démarche méthodologique de cartographie des zones inondables

Afin d'identifier les zones à risque d'inondation et réduire la vulnérabilité des enjeux, une approche cartographique numérique basée sur une double modélisation a été adoptée. La première modélisation est de nature statistique basée sur une analyse fréquentielle qui a pour but de déterminer les quantiles de débits journaliers maximaux annuels. Cette analyse fréquentielle est généralement appliquée à partir de la méthode des maxima annuels (débits journaliers maximaux annuels) comme moyen de constitution des données. Cette méthode consiste en l'application de la théorie de valeurs extrêmes à une série de données. Ces données sont constituées en extrayant une valeur maximale par année et ajustées à une loi statistique. La modélisation hydraulique est réalisée afin de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques (hauteurs d'eau et vitesses de l'eau) à partir des quantiles de débits journaliers maximaux annuels déterminés au moyen de l'analyse fréquentielle. Enfin, une cartographie des zones inondables est réalisée à partir des matrices de danger qui croisent l'intensité maximale d'un phénomène de crue et sa probabilité d'occurrence [10].

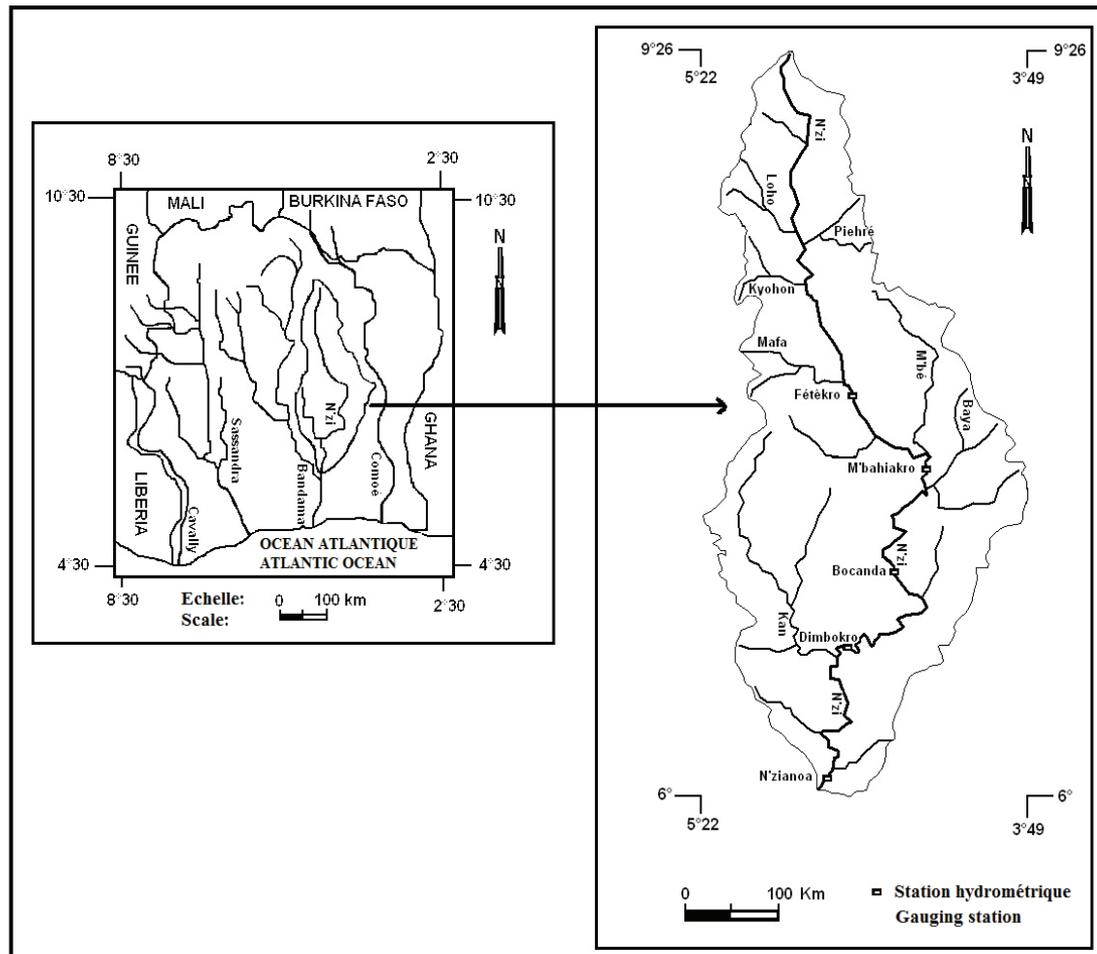


Figure 1 - Présentation du bassin versant du N'zi (Bandama).

Analyse fréquentielle des débits de crues

Les données utilisées doivent satisfaire certaines hypothèses de base de l'analyse fréquentielle [11-12]. En effet, les données doivent être indépendantes (test de Kendall), homogènes (test de Wilcoxon) et stationnaires (test de Wald-Wolfowitz). D'après la littérature spécifique, les lois GEV et Gumbel sont les plus adaptées [2 ; 13-14]. En effet, la loi GEV avec son aspect sécurisant, est plus appréciée, car elle peut donner des quantiles deux à trois plus élevés que ceux déterminés par la loi de Gumbel [2 ; 15]. D'autres lois telles que la loi Lognormale, la loi Gamma, etc. ont été utilisées par plusieurs autres auteurs [16-17]. En Côte d'Ivoire, la loi de Weibull s'ajuste au mieux aux extrêmes hydrologiques du bassin versant du fleuve Cavally [18]. Les lois qui ajustent au mieux les observations extrêmes (queue supérieure de la distribution) ont été privilégiées [14 ; 19-20] : la loi de Weibull, la loi Gamma et la loi de Gumbel. Ces différentes lois ont été testées. En effet, des représentations graphiques et des critères numériques [test de χ^2 , critère bayésien (BIC) et critère d'Akaike (AIC)] ont été utilisés pour le choix de la meilleure loi [12 ; 21-22]. Ces deux critères (BIC et AIC) permettent de réaliser un classement de modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie et les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs [22]. La détermination des quantiles a été faite aux périodes de retour de 10 ans (court terme ; débits décennaux), 50 ans (moyen terme ; débits cinquantennaux) et 100 ans (long terme ; débits centennaux) [1]. L'expression du quantile est basée sur l'équation 1 :

$$x(F) = x_0 + S * u(F) \tag{1}$$

x_0 et S étant respectivement la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables

Une modélisation hydraulique a permis de simuler et prédire l'évolution des caractéristiques hydrauliques des cours d'eau (hauteurs d'eau, vitesses de circulation) à partir des quantiles de débits journaliers maximaux annuels déterminés aux différentes périodes de retour [23]. Cette modélisation permet d'analyser la relation hauteur d'eau-débit dans le lit des rivières et identifier les zones inondables sur certains tronçons présentant une forte vulnérabilité.

Les écoulements dans cette étude sont considérés non permanents compte tenu de la variation des paramètres hydrauliques (débits, niveaux d'eau, profondeurs et vitesses) en fonction du temps. La modélisation hydraulique a été réalisée à partir du modèle HEC-RAS avec ses différentes composantes (géométrie, conditions hydrauliques, calage et simulation) [6 ; 8] qui est largement utilisé pour la cartographie des risques d'inondation, l'évaluation des dommages causés par les inondations [24] et la prévision des inondations en temps réel. L'outil utilisé (modèle HEC-RAS) est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique. Cette extension de modélisation permet de gérer des aspects quasi 2D du débit en reliant la géométrie de la rivière à un modèle de terrain numérique sous la forme d'un réseau irrégulier triangulé. De cette manière, la sortie distribuée fournie par HEC-RAS pour chaque section transversale est interpolée entre les sections transversales et conduit à une profondeur d'eau et à une surface de vitesse de l'eau [25]. Le système HEC-RAS contient trois composants d'analyse fluviale unidimensionnels pour :

- i) les calculs de profil de surface d'eau à écoulement constant ;
- ii) la simulation d'écoulement instable (hydrodynamique unidimensionnelle et bidimensionnelle);
- iii) les calculs de transport de sédiments à la limite mobile.

Un élément clé est que ces composants utilisent une représentation de données géométriques commune et des routines de calcul géométriques et hydrauliques communes [26]. Au niveau de HEC-RAS, la morphologie du cours d'eau est représentée par une série de sections transversales appelée section de rivière [6]. La distance entre les sections transversales adjacentes est appelée la longueur de la portée. L'outil HEC RAS est capable d'effectuer des calculs unidimensionnels du profil de la surface de l'eau dans le cas de l'hydrodynamique de la surface de l'eau à flux constant et de l'écoulement instable [26]. La représentation la plus simple du débit de la plaine inondable consiste à traiter le débit comme unidimensionnel le long de la ligne médiane du chenal de la rivière [8 ; 26]. Le modèle unidimensionnel HEC-RAS [26] définit un environnement de modélisation entièrement fonctionnel qui traite pratiquement tous les types de problèmes de réseau fluvial [25]. Le modèle RAS (River Analysis System) du Centre d'ingénierie hydrologique (HEC) du Corps de l'armée américaine comprend un modèle à débit constant, un modèle à débit instable, ainsi qu'un large éventail de travaux hydrauliques et l'installation de conception hydraulique. En raison de sa grande capacité à décrire un large éventail de processus physiques, il s'est avéré très utile pour appuyer toutes les phases de la planification de la gestion des cours d'eau [25]. La cartographie des risques d'inondations nécessite des données précises sur la topographie [27] et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) réaliste qui constitue un apport essentiel aux modèles hydrauliques [28-29]. La précision des calculs hydrauliques dépend de la qualité du MNT utilisé et des légers changements des niveaux d'eau qui peuvent induire des changements majeurs dans la zone inondée. La résolution spatiale du MNT est le paramètre le plus crucial [27], et les caractéristiques de surface, dont généralement les crevasses ou la couche des débris, doivent être identifiées à partir de la résolution du MNT [6]. Les cartes de danger se basent sur une matrice (Figure 2) qui croise l'intensité maximale d'un phénomène de crue et sa probabilité d'occurrence [10]. En termes d'aménagement urbain, cette approche permet de mettre en place des mesures de réduction des risques adaptées et ciblées pour chaque portion du terrain analysé. Des seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence ont été établis pour chaque aléa considéré (Tableaux 1 et 2).

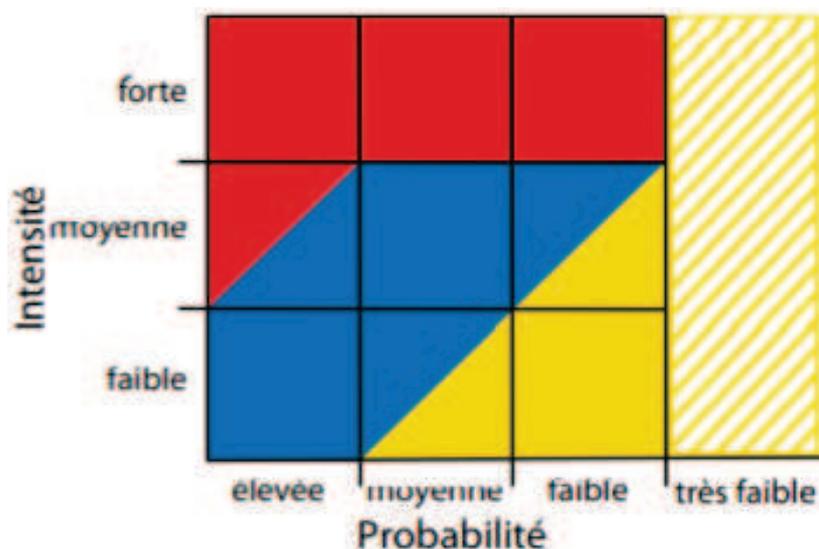


Figure 2 - Matrice de danger Suisse [10]

Tableau 1 - Seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence [10]

MESURE	Critère	Faible	Moyenne	Forte
Intensité	Hauteur (m)	$h < 0,5$	$2 > h > 0,5$	$h > 2$
	Vitesse x Hauteur (m^2/s)	$v \times h < 0,5$	$! > v \times h > 0,5$	$v \times h > 2$
Probabilité	Temps de retour T (ans)	100	50	10

Tableau 2 - Code de couleur de la matrice suisse et sa signification [10]

ZONE	Niveau de danger	Signification pour l'aménagement
Rouge	Danger élevé	Interdiction de construire, dézonage des zones constructibles non utilisés ;
Bleu	Danger moyen	Construction possible à condition de prendre des mesures préventives
Jaune	Danger faible	Construction agréée, zone de sensibilisation au danger.
Jaune-blanc	Danger très faible	Construction agréée

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats de la modélisation statistique et analyse des quantiles de débits

Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité ont été respectivement vérifiées par les différentes séries de débits journaliers maximaux annuels à l'aide des tests statistiques de Wald-Wolfowitz, de Wil-Coxon et de Mann-Kendall aux seuils de 1% et 5% (Tableau 3).

Tableau 3 - Résultats des tests d'hypothèses

Station	Test d'hypothèses	Résultat du test
Dimbokro	Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	Accepté au seuil de 5%
	Test d'homogénéité de Wilcoxon	Accepté au seuil de 5%
	Test de stationnarité de Kendall	Accepté au seuil de 1%
M'bahiakro	Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	Accepté au seuil de 5%
	Test d'homogénéité de Wilcoxon	Accepté au seuil de 5%
	Test de stationnarité de Kendall	Accepté au seuil de 1%

Les différents résultats du test de khi-deux appliqué aux données de débits journaliers maximaux annuelles sont consignés dans le tableau 4. L'application de ce test s'est révélée concluante pour la totalité des lois d'ajustement sur les débits de crue. Les différentes lois ont été acceptées au seuil de signification de 5%. Ce test n'a pas permis de trancher sur le choix de la meilleure loi d'ajustement des Q_{\max} . D'où la nécessité de recourir aux critères d'Akaike et Bayésien.

Tableau 4 - Test de χ^2 appliqué aux débits maximaux des stations de Dimbokro et M'bahiakro (1961-2016)

Station	Loi de probabilité	χ^2	P value
Dimbokro	Gamma	3,64	0,82
	Gumbel	3,64	0,82
	Weibull	5,07	0,65
M'bahiakro	Gamma	10,43	0,17
	Gumbel	9,71	0,21
	Weibull	5,07	0,65

Les résultats obtenus suite à l'application des critères d'Akaike et bayésien sont consignés dans le tableau 5. Pour la station de Dimbokro, la loi qui ajuste au mieux les données de débits journaliers maximaux annuels est la loi Weibull, suivie de la loi Gumbel et enfin la loi Gamma. Quant à la station de M'bahiakro, la meilleure loi est la loi Gamma, suivie de la loi Gumbel et enfin la loi Weibull.

Tableau 5 - Critères BIC et AIC appliqués aux débits maximaux des stations de Dimbokro et M'bahiakro (1961-2016)

STATION		BIC	AIC
Dimbokro	Weibull	699,48	695,43
	Gumbel	702,34	698,28
	Gamma	704,92	700,87
M'bahiakro	Gamma	685,44	681,39
	Gumbel	686,05	681,99
	Weibull	689,01	684,96

Les quantiles de crues décennales, cinquantennales et centennales estimés à partir des meilleures lois identifiées dans le bassin versant du N'Zi sont respectivement de 405, 518 et 559 m³/s à la station de M'Bahiakro. Quant à la station de Dimbokro, les quantiles de crues décennales, cinquantennales et centennales estimés sont respectivement de 371, 507 et 561 m³/s.

Résultats de la cartographie des zones inondables

Les résultats de cartographie de propagation des crues aux différentes périodes de retour de retour ont été présentés par ville (M'Bahiakro et Dimbokro).

Cas de la ville de M'Bahiakro

Les résultats du tableau 6 montrent les hauteurs et vitesses maximales ainsi que les zones touchées du N'Zi à M'Bahiakro. Les hauteurs varient de 0,6 (10 ans) à 8,36 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,25 (10 ans) et 0,89 m/s (100 ans).

Tableau 6 - Synthèse des hauteurs et vitesses d'eau du N'Zi à M'Bahiakro

10 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	5,95	0,79
Pharmacie N'Zi	0,6	0,25
Nationale A	1,5	0,28
Zone non urbanisée	3	0,32
50 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	6,19	0,64
Pharmacie N'Zi	1,1	0,47
Nationale A	1,7	0,45
Zone non urbanisée	3,2	0,27
100 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	8,36	0,89
Pharmacie N'Zi	1,3	0,47
Nationale A	2,1	0,45
Zone non urbanisée	3,7	0,42

Trois zones inondables se démarquent pour une période de retour de 10, 50 et 100 ans au niveau de M’bahiakro dans la partie nord du bassin. Cette propagation spatiale touche principalement la Nationale A axe M’bahiakro-Bouaké, une grande zone non urbanisée qui sert de plantation et la pharmacie N’Zi au Nord de la ville. Plusieurs plantations (cacao, anacarde, etc.) et champs (igname, etc.) sont également concernées par les inondations au niveau de M’bahakro.

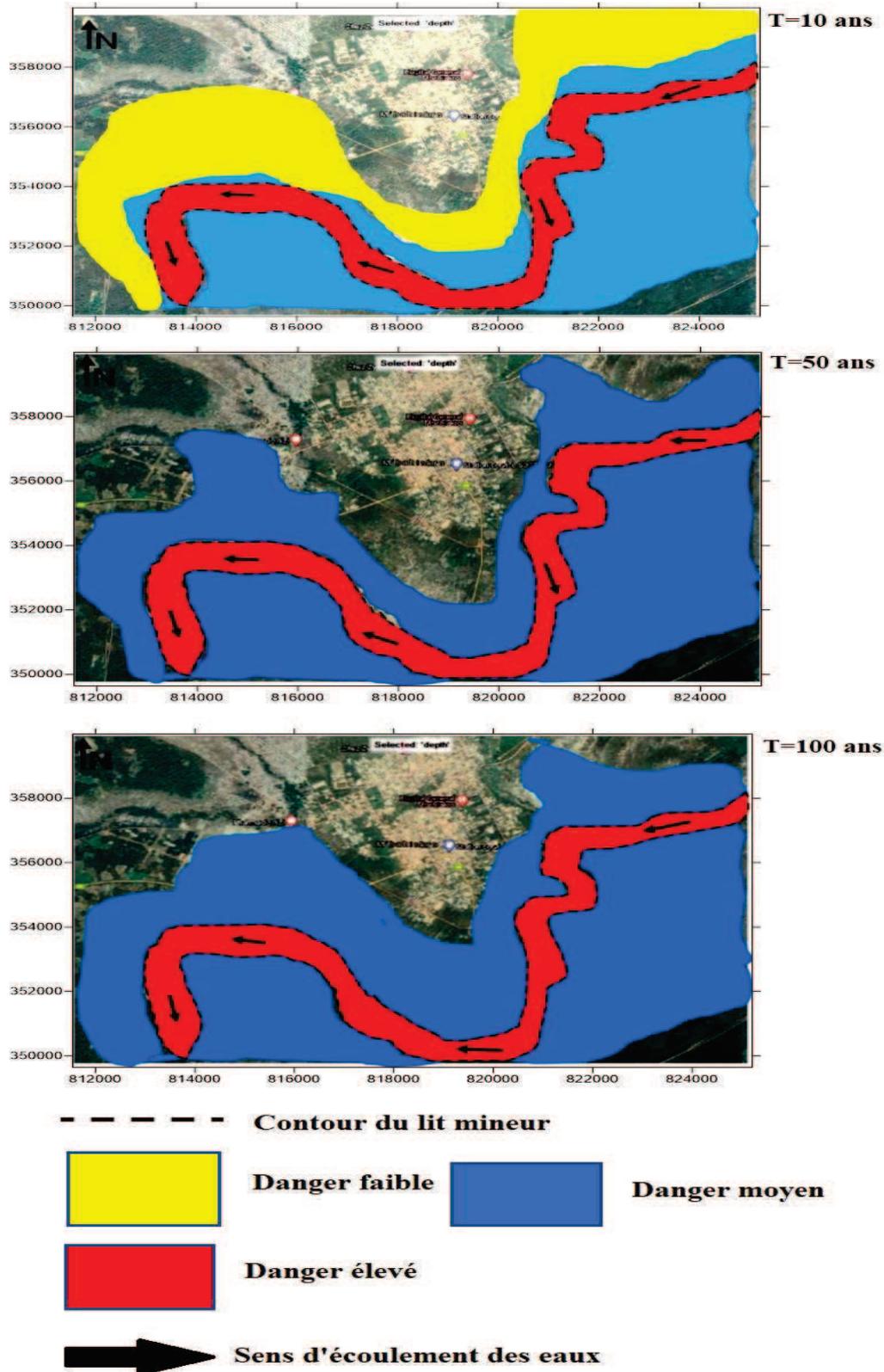


Figure 3 - Zones inondables de la ville de M’bahiakro

Cas de la ville de Dimbokro

Le tableau 7 montre les hauteurs et vitesses maximales du N'Zi à Dimbokro. Les hauteurs varient de 0,6 (10 ans) à 10,91 m (100 ans) et les vitesses oscillent entre 0,23 et 0,56 m/s (100 ans).

Tableau 7 - Synthèse des valeurs de hauteurs et vitesses d'eau du N'Zi à Dimbokro

10 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	7,8	0,28
Mosquée de Dimbokro	0,9	0,35
Paroisse de Dimbokro	0,6	0,28
Route église témoins de Jéhovah	1,4	0,23
50 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	10,08	0,47
SODEFOR	1,65	0,31
Mosquée de Dimbokro	1,32	0,35
Paroisse de Dimbokro	1,4	0,28
Route église témoins de Jéhovah	0,9	0,23
100 ans		
Sites	Hauteur H (m)	Vitesse V (m/s)
Lit mineur	10,91	0,56
SODEFOR	1,9	0,27
Mosquée de Dimbokro	2,1	0,26
Paroisse de Dimbokro	1,8	0,29
Restaurant O'falé	1,62	0,31
Route église témoins de Jéhovah	0,95	0,35

La ville de Dimbokro dans le Sud du bassin est marquée par trois zones inondables aux périodes de retour de 10 et 50 ans. Il s'agit de la grande mosquée de Dimbokro, la paroisse catholique de Dimbokro et la route conduisant à l'église du royaume des témoins de Jéhovah. En plus des trois zones, le siège de la SODEFOR et le restaurant « O'falé » sont identifiées comme des zones rouges à la période retour de 100 ans. Les villages de Krokrokro et Ebimolossou à Dimbokro sont également dans la zone inondable. Ces villages payent le fait de leur proximité au cours d'eau.

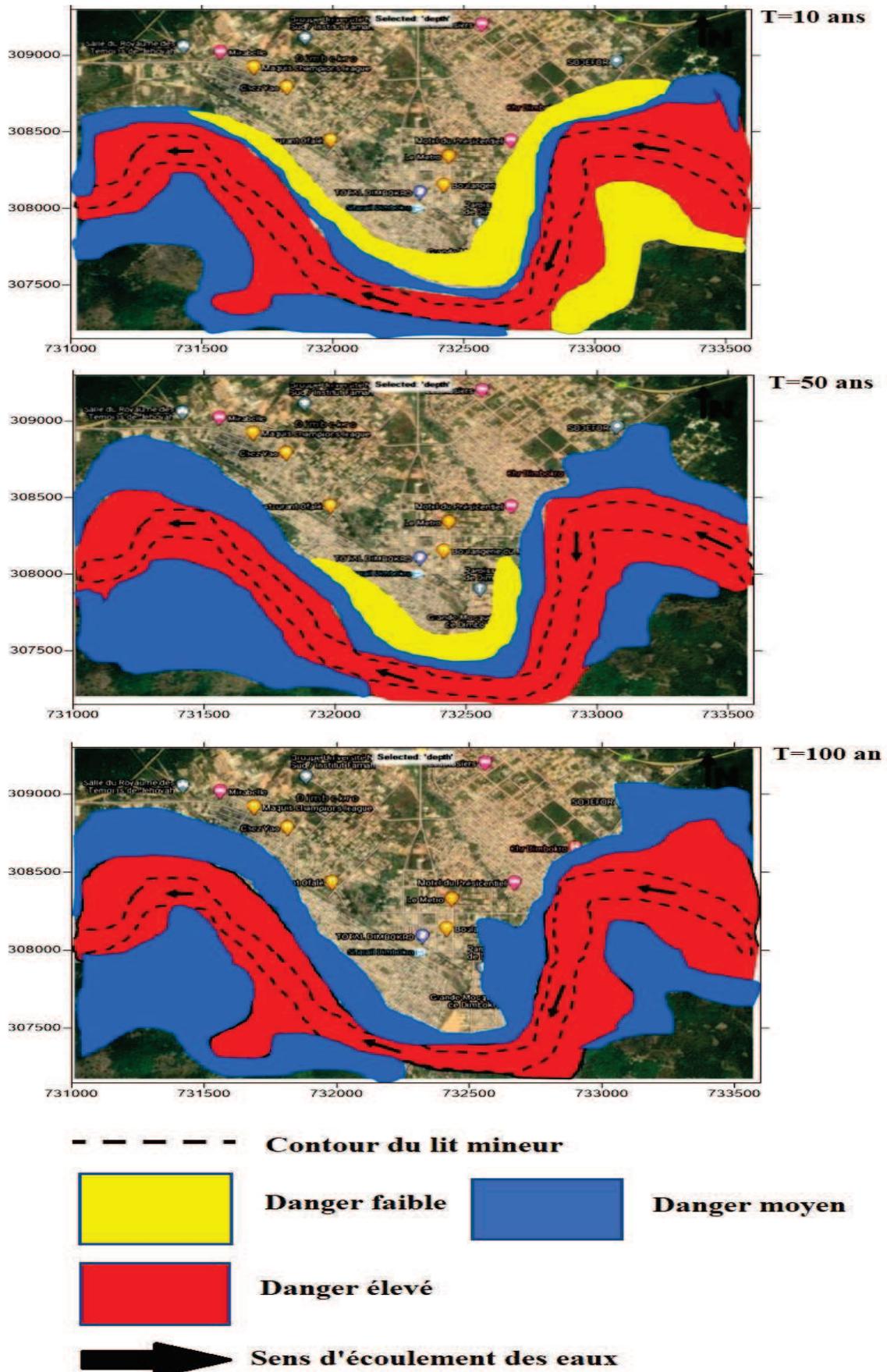


Figure 4 - Zones inondables de la ville de Dimbokro

DISCUSSION

Les principaux résultats ont montré que la loi qui ajuste au mieux les débits journaliers maximaux annuels de la station de M'bahiakro est la loi Weibull. Quant aux débits journaliers maximaux annuels de la station de Dimbokro, ils sont mieux ajustés par la loi de Gumbel. La loi Weibull et GEV ont occupé la deuxième place respectivement au niveau de la station de M'bahiakro et Dimbokro. Ces résultats sont concordants à ceux obtenus par plusieurs auteurs ayant travaillé sur l'analyse fréquentielle des débits de crue [2 ; 13-15 ; 18]. Ces résultats confortent l'idée selon laquelle la distribution de Gumbel, bien que plus simple, ne fournit pas nécessairement les meilleurs résultats [13 ; 30-35]. Les quantiles de débits journaliers maximaux déterminés aux périodes de retour de 10, 50 et 100 ans, varient de 417 (T=10 ans) à 583 m³/s (T=100 ans) à la station de M'Bahiakro et fluctuent entre 385 (T=10 ans) et 605 m³/s (T=100 ans) à la station de Dimbokro. Ces quantiles ont ensuite été utilisés pour déterminer les hauteurs et vitesses de propagation de crues. Il ressort qu'à la station de M'bahiakro, les hauteurs d'eau varient de 5,95 (10 ans) à 8,36 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,79 (10 ans) et 0,89 m/s (100 ans). Au niveau de la station hydrométrique de Dimbokro, il est constaté des valeurs de hauteurs d'eau allant de 7,8 (10 ans) à 10,1 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,28 (10 ans) et 0,58 m/s (100 ans). Des cartes de « risque d'inondation » ont été produites afin de permettre aux aménagistes et aux autorités locales de proposer des mesures d'atténuation dans les zones susceptibles d'être affectées par les inondations et d'agir plus efficacement en cas de crue. Une comparaison des résultats obtenus aux récentes inondations de 2018 qui se sont produites à M'Bahiakro et Dimbokro, montre que les zones touchées par les inondations sont en parfaite adéquation avec les zones inondables définies au cours de cette étude. L'analyse des limites des plaines inondables montre que le canal du N'Zi concerné par la présente étude à l'état actuel n'arrive pas à évacuer totalement les eaux pluviales surtout celles engendrées par une pluie décennale. Il est observé déjà un débordement pour la crue décennale pour toutes les deux localités étudiées. Pour évacuer le trop plein, nous préconisons le drainage qui consiste à enterrer dans le sol des canalisations drainantes c'est-à-dire qui récupèrent l'eau en excès et qui la conduisent vers un puits perdu, un fossé ou vers le réseau public d'évacuation des eaux pluviales. La vulnérabilité aux inondations est de plus en plus ressentie avec l'épanouissement que connaissent les différentes villes en matière d'urbanisme et d'infrastructures à l'intérieur ou à proximité du bassin versant (habitations, lieux de cultes, restaurants, structures hôtelières, écoles primaires, secondaires et supérieures, etc.). Les zones à risque de dommages élevés ont une représentation relativement importante. Ces zones correspondent en grande partie aux habitations et terrains en cultures et révèlent à quel point le risque d'inondation est important. En effet, plusieurs facteurs sont à l'origine de ce phénomène. Il s'agit en premier lieu du relief. Les parties amont et centre de la ville de Dimbokro se caractérisent par un relief relativement élevé tandis que la partie aval occupe principalement une plaine d'altitude faible et sujette aux inondations en période de forte pluie. En deuxième lieu, on peut avancer les intensités pluvieuses qui peuvent être importantes, et ce, surtout en périodes pluvieuses, comme le démontre les retours d'expériences évoqués en 2018, qui ont été consécutives à des pluies diluviennes.

À ces facteurs naturels s'ajoutent la gestion déficiente de l'espace, marquée par l'absence d'une application rigoureuse de la réglementation relative à la construction en zones inondables, ainsi que le problème de l'imperméabilisation des sols favorisant, par la suite, le ruissellement des eaux et la réduction de la capacité d'infiltration des sols. En effet, l'augmentation de la population a accentué la pression sur le milieu naturel et augmenté les enjeux exposés au risque [36]. Dans ce contexte, la gestion du risque d'inondation doit, en conséquence, être conjointement établie en prenant en considération l'aléa et la vulnérabilité [1]. Elle doit répondre à deux objectifs principaux, à savoir : la limitation de l'implantation des bâtiments et des personnes dans les zones fortement exposées et la protection de l'existant. De même, dans la gestion du risque d'inondation, il est possible de distinguer deux aspects complémentaires qui se différencient par le niveau d'urgence des moyens à mettre en œuvre. D'une part, la prévention et le retour d'expérience qui interviennent hors contexte de crise et, d'autre part, la prévision et la gestion de crise qui interviennent en situation de crue [1]. La prévention est basée sur l'analyse de crues potentielles afin d'aider à la compréhension des phénomènes physiques. Elle vise à caractériser l'aléa et la vulnérabilité pour protéger l'existant, informer les populations concernant leur vulnérabilité aux inondations et les démarches à suivre en cas de crise et limiter l'implantation des biens et des personnes dans les zones fortement exposées.

Quant au retour d'expérience, ultérieur à la crise, il vise à tirer des leçons des crues survenues par le passé afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et d'aider à la gestion des crues futures. Le retour d'expérience est en particulier mis en œuvre pour une analyse de la vulnérabilité [1] et le découpage spatial des plaines d'inondation en ce qui a trait à l'exposition au risque d'inondation. Contrairement à la prévention, la prévision et la gestion de

crise correspondent à des actions en état d'urgence. La prévision est le préalable direct à une crise éventuelle. Elle vise à anticiper la survenue d'une inondation et de ses conséquences afin d'alerter les populations et de mettre en place des secours plus efficaces. La gestion de crise rassemble l'ensemble des moyens mis en œuvre en période de crue pour protéger, informer et secourir les populations. Elle nécessite des outils opérationnels pour des décisions rapides permettant aux organismes d'intervention et de secours d'avoir des informations très utiles sur les étendues inondées et les voies de circulation coupées.

Une meilleure information des populations exposées et la diminution de la vulnérabilité des biens situés dans les zones inondables sont à privilégier [1 ; 36]. Cependant, si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, chaque citoyen doit aussi contribuer à se protéger efficacement et diminuer sa propre vulnérabilité. De plus, la protection contre les inondations constitue un axe majeur. Il s'agit de généraliser les systèmes d'annonce des crues de manière à répondre aux besoins grandissants en matière de prévisions hydrométéorologiques et de prévention des situations de risques, d'apporter des corrections à des situations héritées du passé ayant permis l'implantation dans des zones à haut risque et d'intégrer le risque d'inondation dans les plans d'aménagement.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer les risques d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) principalement dans les villes de M'Bahiakro et Dimbokro. Il s'est agi de déterminer les zones susceptibles d'être affectées par les inondations pour une meilleure gestion de ce risque. La méthodologie mise en place dans cet article est basée sur la modélisation hydraulique. En Ainsi, à partir de données des débits instantanés collectées aux stations hydrométriques de Dimbokro et M'bahiakro, qui se situent entre 1961 et 2016, l'objectif a été de déterminer les meilleures distributions des séries de débits de crues pour chaque bassin versant ainsi que l'estimation des débits de pointe de crues pour les différentes périodes de retour. Les principaux résultats ont montré que la loi qui ajuste au mieux les débits journaliers maximaux annuels de la station de M'bahiakro est la loi Weibull. Quant aux débits journaliers maximaux annuels de la station de Dimbokro, ils sont mieux ajustés par la loi de Gumbel. Ces résultats ont permis par la suite d'estimer les débits fréquentiels de crues selon les différentes périodes de retour. Les différents quantiles et leurs périodes de retour obtenus par cette analyse fréquentielle ont servi comme données d'entrée au niveau de la modélisation hydraulique.

Ces quantiles ont ensuite été utilisés pour déterminer les hauteurs et vitesses de propagation de crues. Il ressort qu'à la station de M'bahiakro, les hauteurs d'eau varient de 5,95 (10 ans) à 8,36 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,79 (10 ans) et 0,89 m/s (100 ans). Au niveau de la station hydrométrique de Dimbokro, il est constaté des valeurs de hauteurs d'eau allant de 7,8 (10 ans) à 10,1 m (100 ans). Quant aux vitesses, elles oscillent entre 0,28 (10 ans) et 0,58 m/s (100 ans).

Des cartes de « risque d'inondation » ont été produites afin de permettre aux aménagistes et aux autorités locales de proposer des mesures d'atténuation dans les zones susceptibles d'être affectées par les inondations et d'agir plus efficacement en cas de crue. Les résultats obtenus ont permis d'avoir un outil d'évaluation du risque d'inondation dans le bassin versant du N'Zi (Bandama).

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction de l'Hydrologie pour leur avoir fourni les données hydrométriques utilisées dans cette étude.

Références

- [1] Rifai N., Khattabi A. & Rhazi L. 2014. Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (Nord-Ouest du Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 27 (1), 57-69. <https://doi.org/10.7202/1021982ar>
- [2] Souanef N. 2015. Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'oued Abiod. Mémoire de Magister en Hydraulique, Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie, Algérie, 108 p.
- [3] Gemenne F., Blocher J., De Longueville F., Vigil D., Telenti S., Zickgraf C., Gharbaoui D. & Ozer P. 2017. Catastrophes naturelles, changement climatique et déplacements de populations en Afrique de l'Ouest. *Geo-Eco-Trop*, 41, 317-337.
- [4] Agence Ivoirienne de Presse (AIP) 2018a. Septembre 2018
- [5] Agence Ivoirienne de Presse (AIP) 2018b. Octobre 2018
- [6] Bennani O. 2020. Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride. Cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc). Mémoire de Thèse de Doctorat, Université Paul Valéry, Montpellier 3, l'école doctorale Territoires, Temps, Sociétés et Développement - ED60

- et de l'unité de recherche Gouvernance, Risque, Environnement, Développement – UMR GREDFrance, 162p.
- [7] Sarhadi A., Soltani S. & Modarres R. 2012. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 458, 68-86.
 - [8] Teng J., Jakeman A.J., Vaze J., Croke B.F.W., Dutta D. & Kim S. 2017. Flood inundation modeling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modeling & software*, 1, 201-216.
 - [9] Kouassi A.M., Nassa R.A.K., N'Guessan B.T.M., Kouamé K.F. & Biemi J. 2019. Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'Zi (cote d'ivoire). *Agronomie Africaine*, 30 (3), 215-223.
 - [10] Gabriela W. & Mohamed L. 2014. Cartographie du danger d'inondation guide pratique pour l'application de la méthode suisse au Maroc. Rapport technique, Université de Lausanne, Suisse, 28p.
 - [11] EL Adlouni S., Bobée B. & Ouarda T. B.M.J. 2008. On the tails of extreme event distributions in Hydrology. *Journal of Hydrology*, 355, 1-4, 16-33. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.011)
 - [12] Kouassi A.M., Nassa R.A.K., Koffi Y.B., Kouamé K.F. & Biemi J. 2018. Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, 31 (2), 147-160.
 - [13] Koutsoyannis D. 2004a. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences—Journal des Sciences Hydrologiques*, 49 (4), 575-590.
 - [14] Belagoune F. 2012. Etude et modélisation des crues des cours d'eau en milieu semi-aride : cas des grands bassins versants 05, 06 et 07. Mémoire de Magistère, Université D'Ouargla, 181p.
 - [15] Arnaud P. & Lavabre J. 2007. Estimation de l'aléa pluvial en France Métropolitaine. Editions Quae, 153 p.
 - [16] Meddi M. & Sadeuk B.A.A 2014. Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie). *Nature & Technologie, C- Sciences de l'Environnement*, 10, 21-31.
 - [17] López J. & Francés F. 2012. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir index as external covariates, 3rd STAHY International Workshop on statical methods for hydrology and water resources management, October 1-2, 2012 Tunis, Tunisia.
 - [18] Brou L.A. 2018. Modélisation de la dynamique hydrologique du fleuve Cavally sous l'influence de fortes pressions anthropiques dans la région de Zouan-Hounien (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé, Côte d'Ivoire, 200p.
 - [19] Béliveau J. 2006. Analyse fréquentielle multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en statistique pour l'obtention du grade de Maître de sciences (M.Sc.), 60p.
 - [20] Meylan P., Favre A.C. & Musy A. 2012. *Hydrologie fréquentielle : Une science prédictive*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 168 p.
 - [21] Soro G.E. 2011. Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193p.
 - [22] Dewals J.B., Detrembleur S., Archambeau P., Ercicum S., Ernst J. & Piroton M. 2011. Caractérisation micro-échelle du risque d'inondation : modélisation hydraulique détaillée et quantification des impacts socio-économiques. *La bouille blanche*, 2, 28-34. DOI [10.1051/lhb/2011015](https://doi.org/10.1051/lhb/2011015)
 - [23] Hostache R. 2006. Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. Thèse de Doctorat de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, 255p.
 - [24] Mertz B., Kreibich H., Schwarze R. & Thielen A. 2010. Review article Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (8), 1697-1724.
 - [25] Pistocchi A. & Mazzoli P. 2002. Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. *Proceeding IEMSS*, 305-310.
 - [26] Brunner G.W. 2016. HEC-RES River Analysis System - User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 962p.
 - [27] Papaioannou G., Loukas A., Vasiliades L. & Aronica G.T. 2016. Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modeling approach. *Natural Hazards*, 83, 117-132.
 - [28] Pereira-Cardenal S.J., Riegels N.D., Berry P.A.M., Smith R.G., Yakovlev A., Siegfried T.U., Bauer-Gottwein P. 2011. Real-time remote sensing driven river basin modeling using radar altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 241–254.

- [29] Musa Z.N., Popescu I. & Mynett A. 2015. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3755-3769.
- [30] Koutsoyannis D. 2004b. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences—Journal des Sciences Hydrologiques*, 49 (4), 591-610.
- [31] Turcotte D.L. & Malamud B.D. 2004. Landslides, forest fires, and earthquakes: examples of self-organized critical behavior. *Physica A*, 340, 580-589.
- [32] Sisson A.S. & Pericchi L. 2006. A case for a reassessment of the risk of extreme hydrological hazards in the Caribbean. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, DOI: 10.1007/s00477-005-0246-4.
- [33] Benkhaled A. 2007. Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff : comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*, 8, 83-91.
- [34] Goula B.T.A., Brou K., Brou T., Savané I., Vamoryba F. & Bernard S. (2007). Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois log normale et de Gumbel. *Hydrological Science-journal-des Sciences Hydrologiques*, 43 (4), 435-444.
- [35] Goula B.T.A., Soro G.E. Dao A., Kouassi F.W. & Srohourou B. 2010. Frequency analysis and new cartography of extremes daily rainfall events in Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Sciences*, 10 (16), 1684-1694.
- [36] Neppel L., Bouvier C., Desbordes M. & Vinet F. 2003. Sur l'origine de l'augmentation apparente des inondations en région méditerranéenne. *Revue des sciences de l'eau-Journal of Water Science*, 16 (4), 475-494. <https://doi.org/10.7202/705519ar>