

Modélisation prospective du risque d'inondation à l'horizon 2060 dans la municipalité d'Abomey-Calavi au Sud-Bénin

Prospective modeling of the risk of flooding by 2060 in the municipality of Abomey-Calavi in Southern Benin

HOUESSINON David Roméo B.

Doctorant

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire-Espace Culture et Développement

Université d'Abomey-Calavi

Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement

Bénin

dav.houes@gmail.com

TCHIBOZO Eric Alain M.

Professeur Titulaire

Département de Géographie et Aménagement du Territoire

Université d'Abomey-Calavi

Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement

Bénin

tchibalain@gmail.com

VISSIN Expédit Wilfried

Professeur Titulaire

Département de Géographie et Aménagement du Territoire

Université d'Abomey Calavi

Laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement

Bénin

exlaure@gmail.com

Date de soumission : 23/01/2023

Date d'acceptation : 23/02/2023

Pour citer cet article :

HOUESSINON D. R. B. & al (2023) « Modélisation prospective du risque d'inondation à l'horizon 2060 dans la municipalité d'Abomey-Calavi au Sud-Bénin », Revue Internationale du chercheur « Volume 4 : Numéro 1 » pp : 210 - 230

Résumé

Au Sud-Bénin, l'inondation inégalement répartie est devenue de plus en plus catastrophique eu égard aux dommages socio-économiques qui en résultent. L'objectif de l'étude est de spatialiser ce risque dans la municipalité d'Abomey-Calavi et de le modéliser à l'horizon 2060. L'approche méthodologique est axée sur l'analyse multicritère des facteurs de prédispositions dans un environnement SIG. En outre, les scénarios BAU et DEC ont été utilisés pour simuler les principaux paramètres susceptibles aux variations spatio-temporelles. Les résultats obtenus de la spatialisation du risque d'inondation sont répartis suivant trois niveaux : faible (19 %), modéré (65 %) et élevé (16 %). La simulation des tendances actuelles indique qu'à l'horizon 2060 ; 92 % du territoire sera soumis au risque élevé dans le scénario BAU ; alors qu'il est estimé à 16,42 % dans le scénario DEC. Cette décroissance du degré élevé au sein du scénario DEC favorise l'avancée des risques faible (34,6 %) et modéré (49,2 %). Ainsi, la réduction du risque d'inondation est inhérente à la durabilité des mesures développées.

Mots clés : Modélisation ; prospective ; risque d'inondation ; municipalité ; Abomey-Calavi.

Abstract

In southern Benin, unevenly distributed flooding has become increasingly catastrophic in terms of the resulting socio-economic damage. The objective of this study is to spatialize this risk in the municipality of Abomey-Calavi and model it on the horizon 2060. The methodological approach is characterized by the multi-criteria analysis of the factors of predispositions in a GIS environment. In addition, the BAU and DEC scenarios were used to simulate the main parameters susceptible to spatio-temporal variations. The results obtained from the spatialization of the flood risk are divided into three risk levels: low (19%), moderate (65%) and high (16%). Trend simulation current data indicates that by 2060; 92% of the territory will be subject to high risk in the BAU scenario; whereas it is estimated at 16.42% in the DEC scenario. This decrease in high degree within the DEC scenario favors the advancement of low (34.6%) and moderate risks (49.2%). Thus, reducing the risk of flooding is inherent in the sustainability of the measures developed.

Keywords: Modeling; prospective; flood risk; municipality; Abomey-Calavi.

Introduction

Les villes pays en développement sont fréquemment confrontées aux risques naturels. En Afrique subsaharienne, la situation est très préoccupante et la plupart des villes sont affectées par deux risques; il s'agit de l'érosion et de l'inondation (Alla et al., 2018 : 102). Cette dernière a suscité de par le monde entier un intérêt particulier et a occasionné plusieurs études (Kangah et Alla, 2015 : 298). C'est l'un des événements hydro climatiques souvent décriés par les populations de l'Afrique de l'Ouest et particulièrement celles du Bénin en raison de leur récurrence et de leur cycle dévastateur (Gemenne et al., 2017 : 2). Ainsi, dans un contexte d'urbanisation, de pression démographique et de changement climatique, les effets des inondations sont de plus en plus ressentis ces dernières années. L'analyse des paramètres géographiques de l'agglomération urbaine du Grand Nokoué au Sud Bénin a mis en exergue la susceptibilité du secteur aux inondations (Houessinon et al., 2022 : 226). Afin de contribuer à une gestion durable et pour pallier aux effets néfastes découlant de ce risque, la présente étude portant sur la modélisation du risque d'inondation a été initiée dans la municipalité d'Abomey-Calavi.

La modélisation a fait l'objet de plusieurs études scientifiques notamment en matière de propagation des inondations et des écoulements en milieu urbain (Abderrezzak et al., 2007 ; Gonzalez, 2016 & Goffin, 2016). Elle nécessite également la connaissance des mécanismes hydrologiques, hydrauliques et d'occupation urbaine. A cet effet, quatre types de modélisation ont été mis en exergue ; elle consiste à prévoir, extrapoler, aménager et mieux comprendre (Lhomme, 2006). En outre, Chakhar (2006) a étudié la modélisation cartographique qu'il présente comme une suite ordonnée d'opérations élémentaires du SIG, ce qui permet de simuler un processus de modélisation spatiale. Cette modélisation a été développée notamment dans le cadre des problèmes d'aménagement du territoire et dans des applications qui nécessitent une analyse intégrée de plusieurs facteurs géographiques dispersés spatialement. Pour la modélisation du risque d'inondation dans la municipalité d'Abomey-Calavi, la nécessité d'utiliser un modèle à référence spatiale pour simuler et améliorer la connaissance sur le risque de ruissellement et de débordement revêt un caractère primordial.

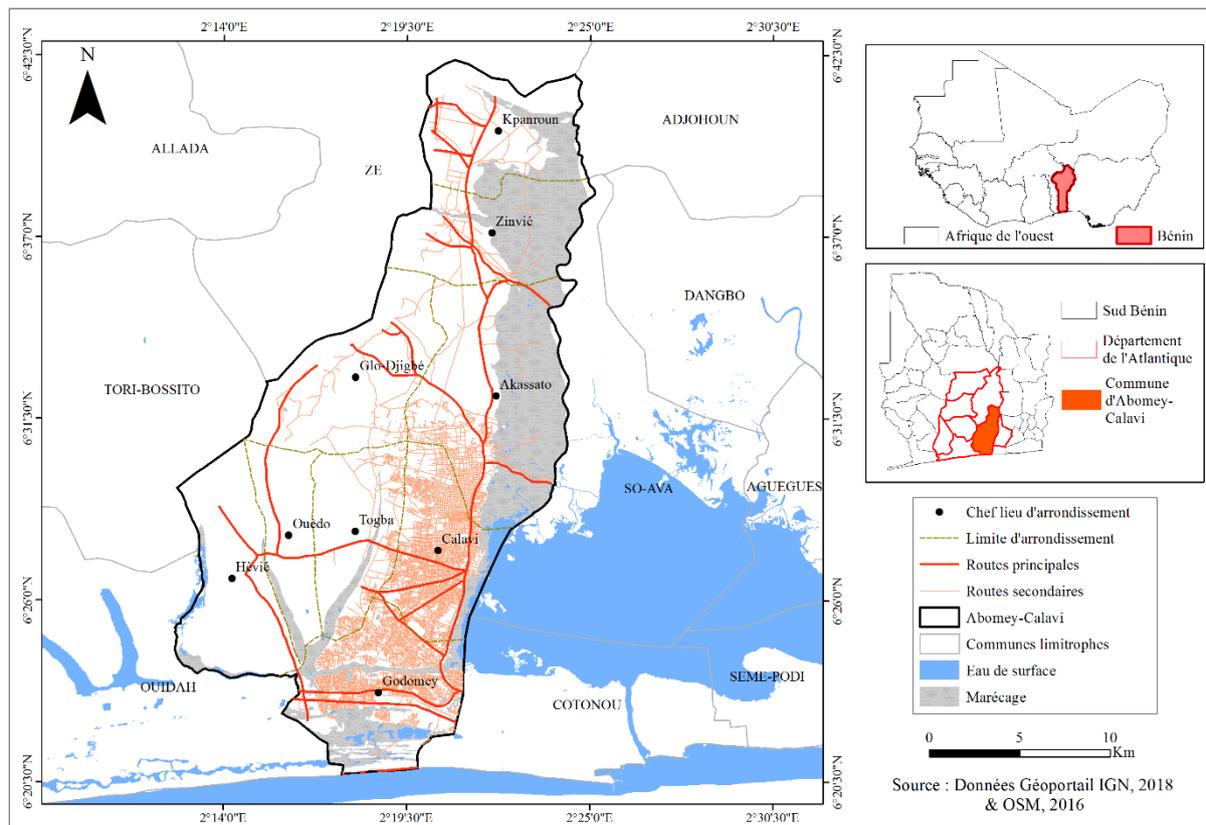
La problématique de cette étude est synthétisée par deux questions fondamentales à savoir : quelle est la répartition spatiale du risque d'inondation dans la municipalité d'Abomey-Calavi et son évolution d'ici à l'horizon 2060. A travers une approche SIG basée sur la simulation

des scénarios, ce travail vise à réaliser la cartographie du risque d'inondation, puis procéder à la modélisation de son évolution dans la perspective d'une aide à la prise de décisions par les autorités. La structuration du présent article est déclinée comme suit : la situation géographique du secteur d'étude, l'approche méthodologique, la susceptibilité à l'aléa inondation, la vulnérabilité des enjeux exposés, la géo-prospective du risque lié aux inondations, la discussion des résultats issus des travaux et la conclusion.

1. Localisation du secteur d'étude

La municipalité d'Abomey-Calavi est située au sud du Bénin, spécifiquement dans le département de l'Atlantique. Elle est limitée au nord et au sud respectivement par la commune de Zè et par l'océan Atlantique. A l'est, elle est cernée par la commune de Sô-Ava et la municipalité de Cotonou ; puis à l'ouest par les communes de Ouidah et de Tori-Bossito (Figure 1).

Figure N°1 : Situation géographique de la municipalité d'Abomey-Calavi



Source : Réalisée par les auteurs

L'analyse de la figure 1 montre que le secteur d'étude est constitué d'une zone marécageuse et lagunaire au nord-est, à l'est et au sud. C'est le territoire le plus vaste du département de l'Atlantique ; la population est évaluée à 656.358 habitants et le taux annuel d'accroissement inter censitaire est de 6,7 % (INSAE, 2016). Cette forte croissance démographique est observée à Abomey-Calavi au détriment de la ville de Cotonou dont elle est devenue la cité-dortoir. Face à cette rapide croissance et par conséquent à l'occupation non contrôlée de l'espace, les problèmes d'inondation se révèlent récurrents et pourraient s'accroître dans le futur.

2. Données et méthodes

2.1. Données utilisées

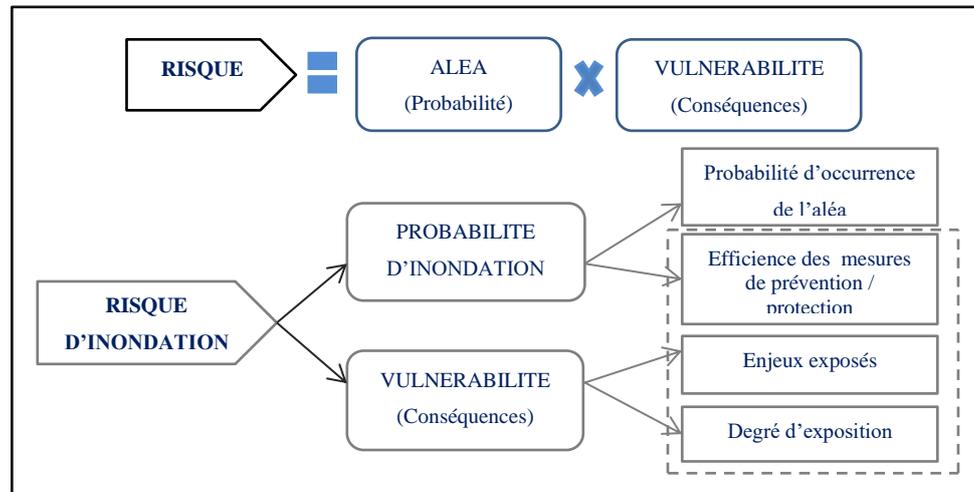
Elles sont relatives aux données géographiques, statistiques et spatiales influençant l'aléa inondation puis la vulnérabilité des personnes et des biens dans le secteur d'étude. Il s'agit spécifiquement des données : pluviométriques (1980-2010) ; démographiques (RGPH 2002 et 2012) ; Open Street Map (OSM, 2016) ; Digital Elevation Model (DEM, 2014) et du fond topographique de l'Institut Géographique National du Bénin (IGN, 2018). Ces données ont permis de cartographier les facteurs d'aléa et de vulnérabilité des inondations au sein du secteur d'étude (altitude, hydrogéologie, pluviométrie, pédologie, distance au plan d'eau, distance au réseau routier, pente, occupation du sol et densité de la population).

2.2. Méthodes

2.2.1 Approche de spatialisation du risque d'inondation

La cartographie du risque est un outil d'orientation indispensable pour la prise de décision. Elle permet d'anticiper ou d'atténuer les conséquences et catastrophes consécutives à la manifestation des inondations au seuil de risque significatif et critique. Deux principaux éléments sont à caractériser pour mesurer le niveau du risque d'inondation dans le secteur d'étude. Il s'agit de l'aléa et la vulnérabilité, illustrés par la figure 2.

Figure N°2 : Indicateurs du risque d'inondation



Source : Communauté Métropolitaine de Montréal, 2021, adapté par les auteurs

L'examen de la présente figure révèle que le risque est déterminé à partir du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. En outre, plusieurs paramètres influent le niveau du risque d'inondation en un lieu donné. Afin de déterminer le degré d'influence de chacun des paramètres, la cartographie multicritère a été adoptée. Elle résulte d'une approche couplée, basée sur l'utilisation des systèmes d'information géographique et de l'analyse hiérarchique des procédés.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse multicritère a permis de regrouper l'ensemble des facteurs influençant le risque d'inondation ; de les classer et de les pondérer en fonction de leur importance relative. C'est une analyse qui facilite la hiérarchisation du problème, la réalisation des combinaisons linéaires, la quantification et la synthétisation des priorités. Puis, elle évalue la cohérence de chaque jugement (Tangmouo Tsoata et al., 2020 : 7). Suite à la pondération des critères, la spatialisation du risque d'inondation est réalisée à partir du croisement des cartes critères à l'aide du logiciel ArcGis.

2.2.2 Modélisation prospective spatialisée du risque d'inondation

La modélisation du risque a pris en compte trois principaux paramètres à savoir : les changements d'occupation du sol, la densité urbaine et la variabilité pluviométrique. Contrairement aux paramètres physiques (altitude, pente, pédologie, hydrogéologie...) du secteur d'étude qui sont relativement statiques, les paramètres à simuler sont très susceptibles aux fluctuations dans le temps et dans l'espace. Les simulations de ces paramètres ont été

réalisées à l'horizon 2060 sur la base des degrés de pondération adoptés pour la cartographie du risque d'inondation.

Les scénarios climatique (pluviométrie) et socio-économique (taux de croissance de la population) utilisés dans le cadre de cette étude (Tableau I) sont rendus disponibles par le GIEC et adoptés par le Bénin.

Tableau N°1 : Scénarios adoptés pour les projections climatiques et socio-économiques en 2060

Facteurs	Scénarios
Climatiques	Representative Concentration Pathways (RCP8.5 et RCP4.5) & Business As Usual (BAU)
Socio - économiques	Business As Usual (BAU) & SSP1

Source : MCVDD, 2018, complété par les auteurs

L'examen du tableau indique que les scénarios Representative Concentration Pathways (RCP) et Business As Usual (BAU) ont été utilisés pour la simulation des facteurs climatiques ainsi que socio-économiques. Le RCP constitue un cadre récemment adopté par la communauté internationale de recherche scientifique qui facilite d'une part les projections climatiques. Quant au BAU, il représente les scénarios du futur qui prolongent les tendances actuelles. En ce qui concerne le SSP (Shared Socio-economic Pathways), c'est un scénario socio-économique qui a été également adopté par la communauté scientifique. En somme, deux scénarios de projection du risque d'inondation ont été réalisés. Il s'agit du scénario pessimiste qui tient compte du scénario de référence pessimiste et le scénario optimiste ayant pour fondement le développement durable inclusif.

❖ Approche de Simulation des hauteurs de pluie en 2060

Le modèle CCMA CANESM2 développé par le Centre Canadien d'Analyse et de Modélisation Climatique a été adopté pour la simulation des hauteurs de pluie. Ce choix est justifié en raison du fait que ce modèle a été récemment utilisé par plusieurs pays africains en l'occurrence le Bénin, afin de simuler les conditions climatiques futures. A cet effet, les données pluviométriques du Sud-Bénin issues de ce modèle et des scénarios climatiques ont permis de réaliser une interpolation spatiale des précipitations du secteur d'étude par le biais de la méthode géostatistique du krigeage à l'aide du logiciel ArcGis.

❖ Projections démographiques en 2060

Elle a été déterminée à travers la formule mathématique de F. Pelletier et T. Spoorenberg (2016 : 11) définie comme suit :

$$P_t = P_0 (1+T_a)^t$$

Avec : P_t = population de l'année projetée (2060) ; P_0 = Population de départ (année 2013) ; T_a = Taux d'accroissement ; t = Nombre d'années de la période de projection (entre année de départ et année de fin de projection).

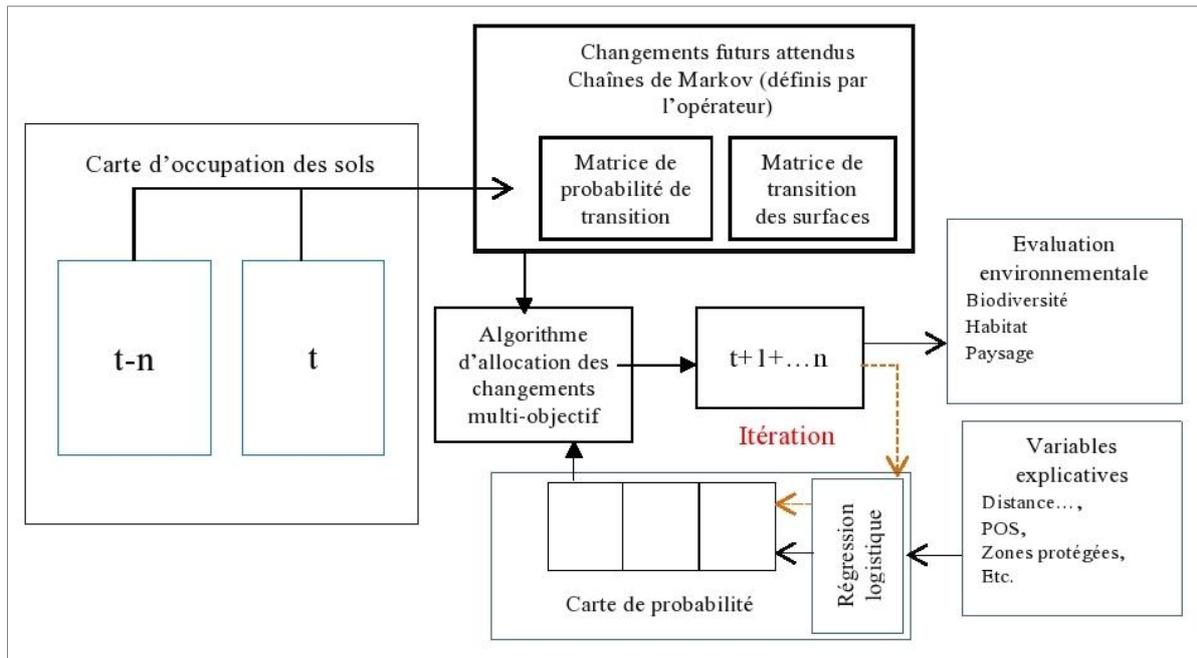
Le scénario BAU (pessimiste) pour ce qui concerne la projection démographique est basé sur le taux de croissance de la période 2002-2013 établi par le dernier recensement de la population. Selon l'Institut National de la Statistique et de la Démographie, ce taux est de 6,7 % pour la municipalité d'Abomey-Calavi. De même, l'indicateur taux de croissance de la population relativement au scénario optimiste a pris en compte les projections socio-économiques établies par le GIEC suivant le SSP1. Il ressort que ce taux est estimé à 0,45 % en 2060. A travers la projection de l'évolution démographique, la spatialisation de la densité humaine simulée en 2060 a été réalisée avec le logiciel ArcGis. La classification a été effectuée suivant trois catégories de degré (faible, modéré et élevé) et est basée sur celle de l'année de référence (2002).

❖ Méthode de simulation de l'occupation du sol en 2060

La projection des mutations d'usages et d'occupation des sols s'est révélée comme un outil indispensable de l'analyse des pressions anthropiques exercées sur les écosystèmes. De ce fait, elle constitue un moyen efficace et pertinent qui permet d'étudier méthodiquement la planification territoriale dans l'optique d'évaluer ou de prévenir les impacts environnementaux (Longaretti et al., 2016 : 52), notamment le risque d'inondation. Pour la présente étude, le modèle de projection Land Change Modeler (LCM) intégré au logiciel Terrset v18.21 (Kouta, 2020 : 79) a été adopté. C'est un modèle pratique auquel plusieurs chercheurs (Kouta, 2020 & Osseni et Tohozin, 2021) ont fait recours pour modéliser l'occupation des terres tant en milieu urbain que rural. Sur la base des occupations des sols actuelle et passée, ce modèle a permis de produire des cartes du futur (Agbanou et al., 2018) à des temps discrets, typiquement à des intervalles de quelques années. A cet effet, deux cartes d'occupation (2005 et 2015) ont été utilisées comme des données d'entrées afin d'étudier les changements passés et de calibrer le modèle sur les années 2060. A l'aide d'un module

probabiliste composé de chaînes de Markov, l'extrapolation des tendances passées est exécutée. Le processus markovien suppose que l'état d'un système au temps t_2 peut être prédit en se basant sur son évolution entre ses états à t_0 et t_1 . Cette description du fonctionnement du modèle est illustrée par la figure 3.

Figure N°3 : Principe de fonctionnement du modèle LCM



Source : Kouta, 2020, complétée par les auteurs

La lecture de cette figure indique que le fonctionnement du modèle s'organise principalement autour de cinq tâches à savoir : la préparation des données et l'analyse des changements passés ; l'estimation des quantités de changements futurs ; la modélisation des cartes de localisation des changements futurs ; la simulation de la dynamique des changements futurs et l'évaluation d'impact des changements simulés sur l'environnement. Afin de modéliser le risque d'inondation, le scénario prospectif Business As Usual (BAU) relatif à l'occupation du sol a été adopté. Il s'agit d'une simulation du sol basée sur les tendances actuelles. Ce scénario suppose l'immobilisme (MCVDD, 2018), l'absence des stratégies d'orientation pour un développement harmonieux de la municipalité. En outre, le second scénario optimiste qui s'inspire d'un contexte de durabilité environnementale coordonnée (DEC) implique un fort engagement de l'Etat pour le respect de la législation en vigueur par rapport à l'occupation des secteurs déclarés non propices aux aménagements. Ce scénario implique de développer des stratégies durables et participatives réduisant le risque d'inondation dans le secteur

d'étude à travers une planification urbaine pertinente. Dans ce cas, l'occupation des terres ne peut s'opérer de manière anarchique. Grâce aux outils de géotraitement du logiciel ArcGis, les cartes critères et les cartes de synthèses (aléa et vulnérabilité) ont été réalisées. Ce qui a permis de croiser les principaux facteurs du risque et de réaliser la simulation en 2060 suivant les deux scénarios.

2.2.3 Analyse prospective spatialisée de l'évolution du risque d'inondation

Les protocoles statistiques couramment utilisés pour évaluer les changements d'occupation du sol (Kpedenou et al., 2016) ont été adaptés à la présente étude afin d'analyser la dynamique du risque d'inondation suivant les deux scénarios. A cet effet, le taux d'évolution a été utilisé. Le protocole statistique du taux d'évolution du risque d'inondation (T_e) est illustré comme suit :

$$T_e(i, n) = [(S_n - S_i) / S_i] * 100$$

Soient S_i et S_n les superficies de chaque degré du risque d'inondation respectivement à l'année i et à l'année n ; avec $n > i$. Il est à notifier que si aux termes des résultats :

$T_e(i, n) = 0$, alors il y a une stabilité au niveau de ce degré du risque d'inondation ; $T_e(i, n) < 0$, il y a une régression de ce niveau du risque d'inondation et $T_e(i, n) > 0$, cela témoigne d'une extension du degré du risque d'inondation. Le taux d'évolution a été calculé pour les trois niveaux (faible, modéré et élevé) du risque d'inondation et a permis d'analyser leurs évolutions entre les deux périodes.

3. Résultats

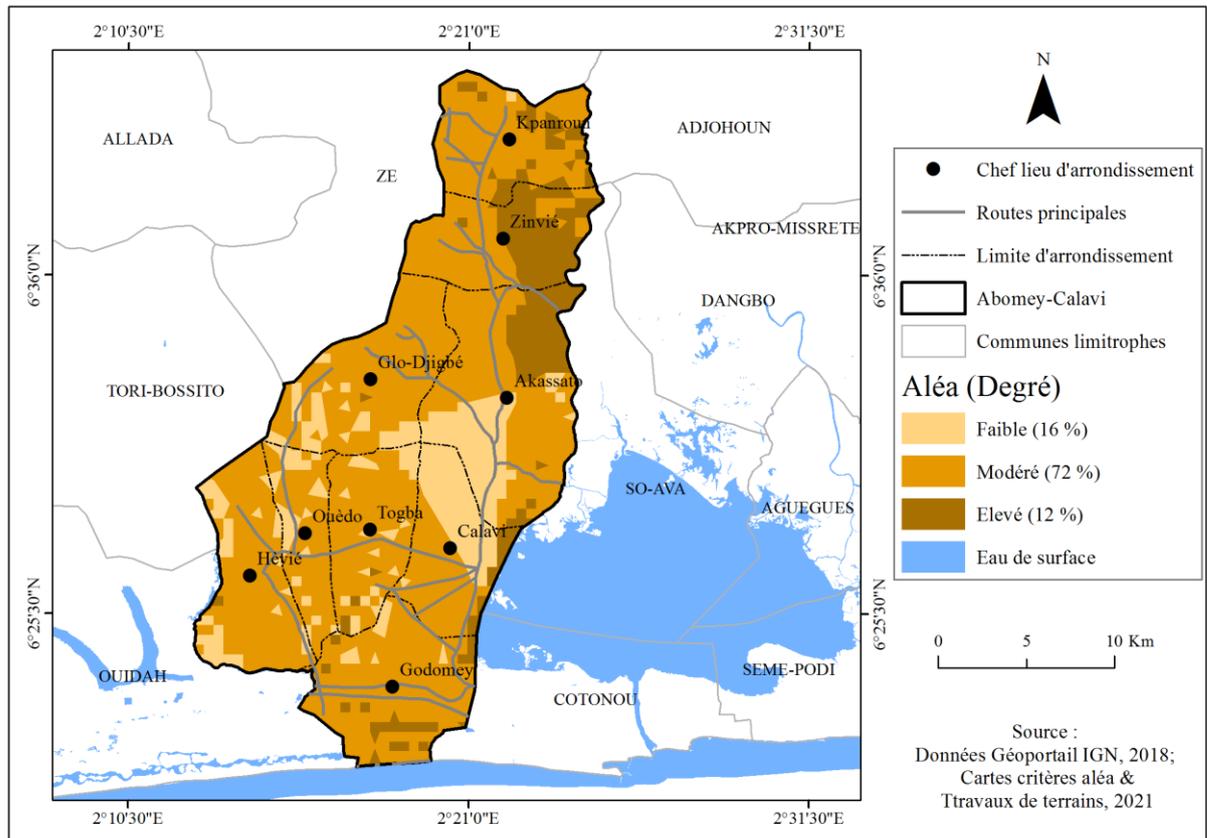
3.1 Répartition spatiale du risque d'inondation dans la municipalité d'Abomey-Calavi

La spatialisation du risque d'inondation résulte de la susceptibilité aux inondations et des enjeux exposés.

3.1.1 Cartographie de la susceptibilité aux inondations

L'aléa a été cartographié sur la base de la superposition et de la pondération des facteurs de susceptibilité aux inondations (figure 4). Il s'agit notamment des cartes critères : altitude ; pente ; intensité pluviométrique ; distance au plan d'eau ; pédologie ; hydrogéologie et occupation du sol.

Figure N°4 : Cartographie de l'aléa inondation



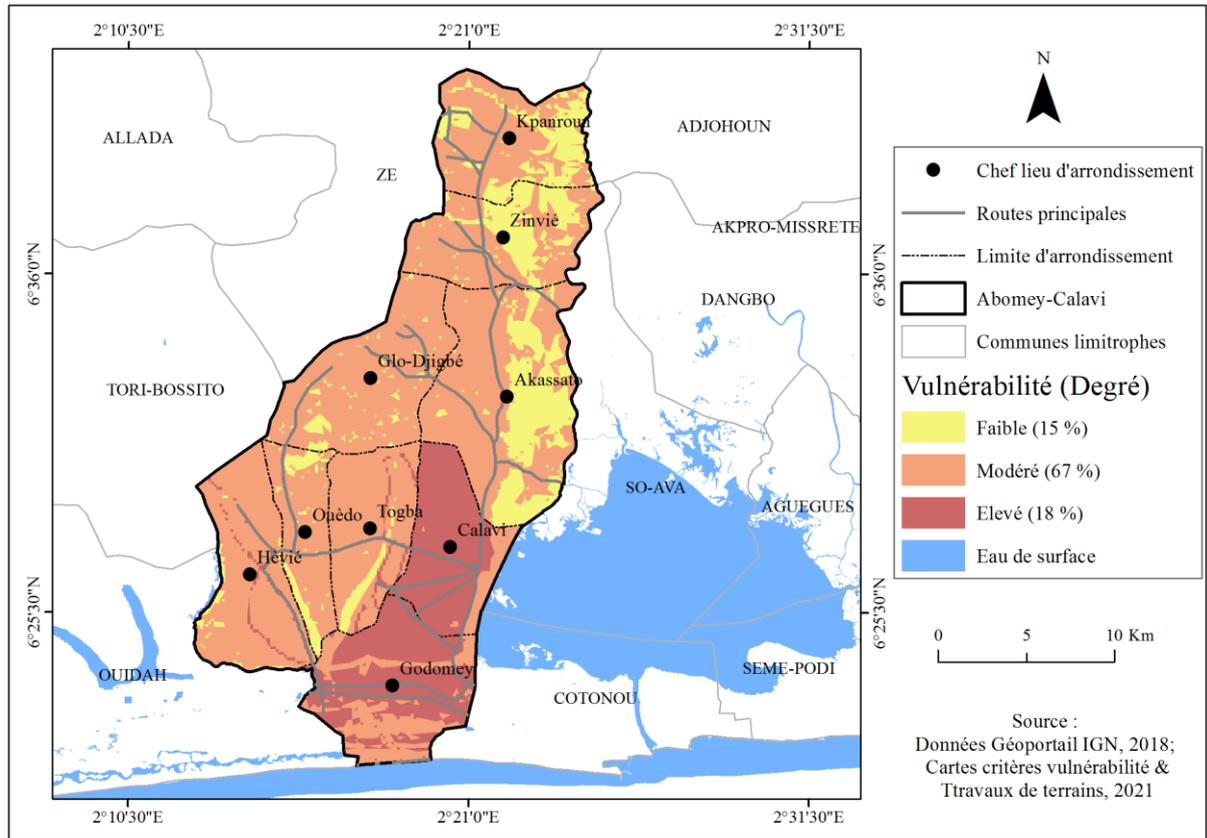
Source : Réalisée par les auteurs

La susceptibilité aux inondations dans la municipalité d'Abomey-Calavi a été déterminée suivant trois classes : faible, modéré et élevé. Les secteurs modérément susceptibles à l'aléa s'étendent sur 72 % du territoire, tandis que les taux de susceptibilité faible et élevé occupent respectivement 16 % et 12 % de la superficie totale qui avoisine 500 km². Il ressort de l'examen de cette figure qu'une portion relativement réduite de l'espace (79 km²) est exposée à un aléa élevé. Ces espaces sont fortement localisés dans les arrondissements de Zinvié et Akassato ; d'autres sont disséminés à Calavi et Godomey.

3.1.2 Cartographie de la Vulnérabilité

Le degré de concentration des enjeux exposés à l'aléa inondation est illustré par la figure 5.

Figure N°5 : Cartographie de la vulnérabilité



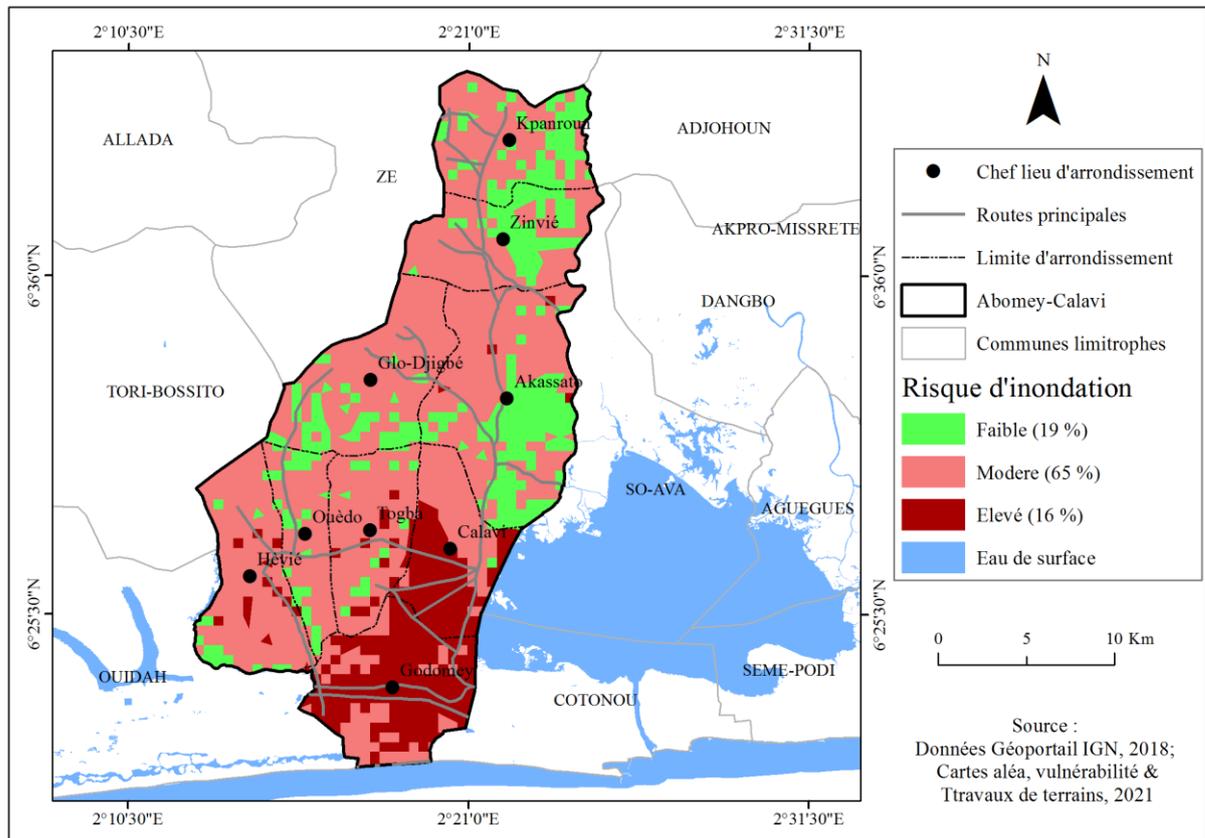
Source : Réalisée par les auteurs

L'analyse de la vulnérabilité dans le secteur d'étude indique que les enjeux exposés à l'aléa sont plus concentrés au Sud (Godomey et Calavi) sur 18 % du territoire. Par ailleurs, il importe de noter que les enjeux humains et économiques sont très peu limités dans certaines localités d'Akassato, Zinvié et Kpanroun. Ce taux de vulnérabilité faible est de 15 % alors qu'il est évalué à 67 % pour les espaces à risque modéré du secteur d'étude.

3.1.3 Cartographie du risque

La spatialisation du risque d'inondation qui résulte du croisement entre l'aléa et la vulnérabilité est présentée par la figure 6.

Figure N°6 : Spatialisation du risque d'inondation



Source : Réalisée par les auteurs

L'observation de la figure 6 révèle que les secteurs ayant un risque élevé de submersion sont concentrés au sud -est du secteur d'étude dans la municipalité d'Abomey-Calavi (Arrondissements de Godomey et d'Abomey-Calavi). Ils occupent un territoire avoisinant 80 km² soit une superficie de 16 %. Ce seuil de risque élevé est justifié par la forte densité de population et l'importance des enjeux socio-économiques qui y sont installés. En outre, le niveau du risque d'inondation est majoritairement modéré à 65 % et faible à hauteur de 19 %. Le risque d'inondation est inégalement réparti dans la municipalité d'Abomey-Calavi. Il est fonction de plusieurs paramètres naturels et anthropiques comme la topographie, les évènements pluvieux, le débordement des plans d'eaux, la croissance démographique, la perception des populations, l'occupation des terres, etc. En fonction de l'évolution des

variables explicatives dynamiques, le risque d'inondation est susceptible de connaître un accroissement ou une régression dans le temps et dans l'espace.

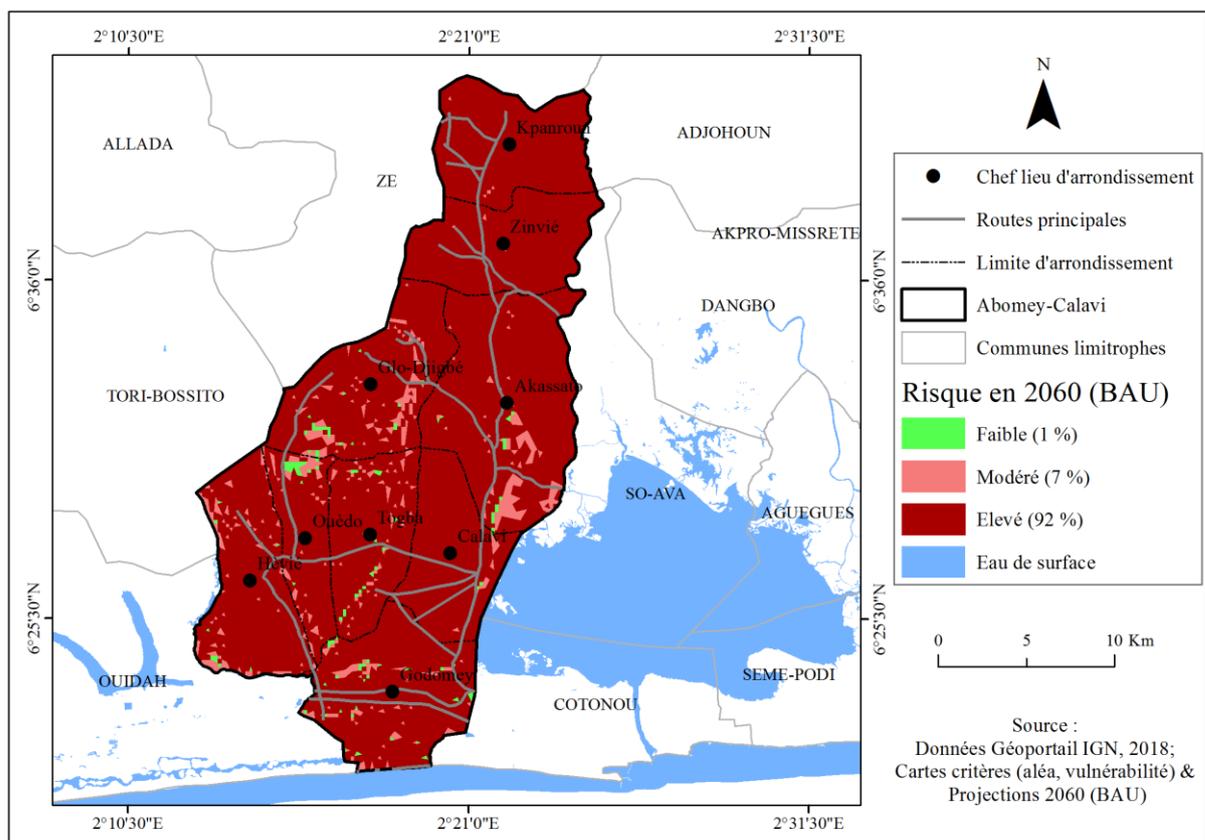
3.2 Modélisation du risque d'inondation en 2060 dans la municipalité d'Abomey-Calavi

La simulation du risque a été réalisée à titre prospectif afin d'évaluer l'influence potentielle du risque d'inondation sur les intérêts économiques et sur les populations dans les années à venir. A cet effet, les deux scénarios de prédiction (optimiste et pessimiste) ont été mis en œuvre.

3.2.1 Simulation du risque suivant le scénario pessimiste ou BAU

Le risque d'inondation dans la municipalité d'Abomey-Calavi a été modélisé (figure 7) dans la perspective de déterminer l'évolution future des tendances actuelles afin de contribuer à une amélioration des prises de décisions.

Figure N°7 : Modélisation du risque d'inondation en 2060 (Scénario BAU)



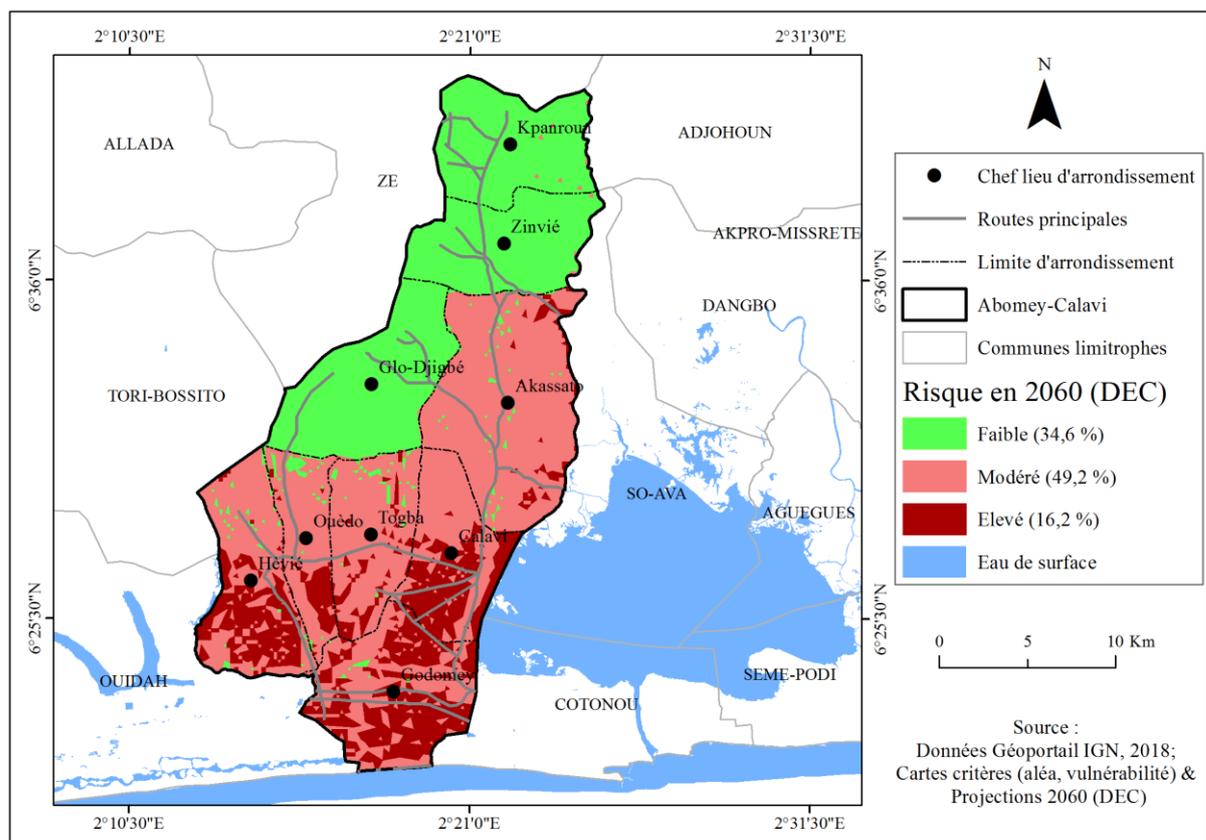
Source : Réalisée par les auteurs

L'analyse du scénario pessimiste de l'évolution du risque révèle qu'à l'horizon 2060, tout le secteur d'étude à l'exception de quelques localités serait soumis à un risque élevé d'inondation. Ainsi, 92 % du territoire de la municipalité pourrait être fortement impacté par les inondations, alors que les territoires disposant de seuils de risque faible et moyen seraient respectivement dans l'ordre de 7 % et 1 % de la superficie totale. Aux termes de la simulation, il se dégage que le risque élevé d'inondation est en nette progression à Abomey-Calavi. Il pourrait davantage s'accroître si des projets ou programmes structurants ne sont pas adoptés pour limiter les effets découlant de l'aléa. Cette expansion du risque d'inondation est justifiée par l'essor de la croissance démographique, l'occupation anarchique de l'espace urbain et le défaut d'un aménagement prospectif du territoire.

3.2.2 Simulation du risque suivant le scénario optimiste ou durabilité environnementale coordonnée (DEC)

Au-delà du scénario pessimiste, les résultats obtenus de la simulation axée suivant l'approche de durabilité sont illustrés à travers la figure 8.

Figure N°8 : Modélisation du risque d'inondation en 2060 (Scénario DEC)



Source : Réalisée par les auteurs

Le scénario optimiste ou celui de durabilité environnementale coordonnée met en évidence une régression substantielle du risque élevé d'inondation. Evalué à 92 % lors du scénario pessimiste, ce degré de risque est passé à 16,2 % en cas de mise en œuvre et d'adoption des mesures de durabilité environnementale et sociale. Corrélativement, il est observé une évolution de la superficie impactée par le degré de risque d'inondation faible à raison de 34,6 % et celui modéré dans l'ordre de 49,2 %. L'examen de cette figure permet également de constater que sous ce scénario, les arrondissements du sud (Godomey ; Calavi et Hêvié) sont les plus sujets à l'emprise élevée du risque d'inondation au détriment de Glo-Djigbé, Zinvié et Kpanroun qui sont très peu exposés. En outre, l'étude comparée des deux scénarios (BAU et DEC) a permis de déterminer que les localités situées au sein des arrondissements Sud de la municipalité sont très susceptibles à l'aléa inondation. Elles disposent également d'un potentiel élevé d'enjeux vulnérables comme les populations, de même que les intérêts socio-économiques. Ainsi, la gestion du risque d'inondation à travers une approche basée sur la durabilité environnementale concourt à une perspective meilleure de bien-être des populations.

3.2.3 Analyse statistique et prospective de la simulation du risque d'inondation en 2060

L'évolution du risque d'inondation dans le secteur d'étude a été traduite statistiquement à l'aide du tableau ci-après.

Tableau N°2 : Evolution du risque d'inondation dans la municipalité d'Abomey-Calavi en 2060

Année / Scénario	2022		2060 / BAU		2060 / DEC	
	Superficie (km ²)	Superficie %	Superficie (km ²)	Taux d'évolution (%)	Superficie (km ²)	Taux D'évolution (%)
Faible	93	19	6	-93,5	173	86
Modéré	327	65	33	-90	246	-25
Elevé	80	16	461	476,25	81	1,25

Source : Auteurs

La dynamique spatio-temporelle du risque d'inondation issue du scénario BAU à l'horizon 2060 met en exergue un taux de régression estimé à -93,5 % et -90 % relativement aux degrés de risque d'inondation faible et modéré ; tandis que le degré élevé a connu une forte

croissance estimée à 476,25 % suivant cette même période. En ce qui concerne le scénario de durabilité (DEC), le taux d'évolution des trois degrés de risque sont en nette diminution comparativement au scénario BAU. En l'occurrence, l'évolution du degré faible est évaluée à 86 % et celle du risque élevé à 1,25 %. Ces résultats témoignent de la pertinence des mesures de durabilité environnementale et sociale pour une gestion efficace du risque d'inondation dans le secteur d'étude.

4. Discussion

Divers travaux de modélisation des inondations ont été réalisés et ont permis d'obtenir des résultats probants. A cet effet, il a été démontré que la modélisation hydraulique permet de déterminer par calcul et en fonction des débits simulés, tous les secteurs exposés de même que les caractéristiques hydrauliques des écoulements (Bachi, 2011). De plus, les approches hydrologique et hydraulique de la modélisation ont également facilité la détermination des données chiffrées sur l'ampleur des crues (Werren et Lasri, 2014). En réalité, la modélisation hydraulique constitue l'un des moyens les plus utilisés pour évaluer l'aléa inondation. Elle ne participe pas à la détermination du risque d'inondation (Renzoni et al., 2005).

Par ailleurs, d'autres recherches ont mis en évidence que la représentation mathématique d'un phénomène physique est fonction des relations existantes entre les variables qui caractérisent ce phénomène (Moufida, 2008). Ce type de modèle statistique permet de simuler le fonctionnement et de faire des prévisions pour l'avenir. Cette approche basée sur le modèle linéaire et la méthode des moindres carrés. Au-delà des modèles énoncés, il est à souligner que l'interprétation cartographique, graphique et statistique des données de terrain peut permettre d'appréhender les variations spatiales et leur niveau d'évolution à l'aide de la modélisation prospective.

Cette démarche géo-prospectiviste développée dans le cadre de cette étude a également été utilisée pour construire et simuler les scénarios prospectifs de la ville de Lomé à l'horizon 2050 (Takou et al., 2021). L'intérêt de ces scénarios relève de l'exploration des futurs éventuels de l'étalement dans un secteur urbanisé. Egalement, la pertinence des outils SIG utilisés relativement à la modélisation spatiale du risque d'inondation est confortée par d'autres recherches (Medjir et Meterfi, 2021) qui ont mis en évidence la contribution du SIG et de la télédétection afin d'établir la modélisation spatiale des risques naturels liés au sol.

Toutefois, il s'avère important de signaler que les études portant sur la géo-prospectivité du risque d'inondation sont presque inexistantes à l'échelle nationale.

Conclusion

En somme, le risque d'inondation correspond à une confrontation d'un aléa avec des enjeux susceptibles de subir des préjudices en un point (lieu) géographique. Son évaluation résulte de l'utilisation de plusieurs outils répartis en deux principales méthodes à savoir : les SIG et les analyses multicritères hiérarchiques. Le couplage de ces méthodes a permis successivement de pondérer les critères d'aléa et ceux de vulnérabilité ; de les croiser et enfin de les spatialiser afin d'obtenir la carte du risque d'inondation. Il s'agit d'une approche globale qui a étudié les aspects physiques du milieu et les paramètres anthropiques.

Par ailleurs, la modélisation du risque d'inondation a été réalisée afin de procéder à une évaluation de l'évolution du risque et de contribuer à l'élaboration de politiques de gestion durable. A cet effet, la modélisation du risque d'inondation a été utile à une exploration du futur sur la base de la projection des tendances actuelles et celles de durabilité environnementale à l'horizon 2060. Il ressort de ces simulations qu'une forte extension spatiale du risque d'inondation pourrait être observée de persistance des tendances actuelles (scénario pessimiste). Mais l'évolution du risque serait peu perceptible en cas d'élaborations et d'applications des stratégies pertinentes de réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens.

Au plan socio-économique et scientifique, l'étude a un caractère crucial et constitue une réflexion prospective visant à circonscrire les secteurs à fort potentiel de risque d'inondation. De plus, il faut souligner que la modélisation offre des perspectives importantes pour l'aide à la décision en matière de planification urbaine. Elle constitue un outil pertinent d'identification des territoires les plus sujets au risque et permet la facilitation d'une prise de décision anticipée à travers l'élaboration de stratégies durables. Toutefois, les cartes de modélisation du degré de risque sont susceptibles d'être actualisées et perfectionnées en raison de l'évolution des enjeux climatiques, démographiques, d'utilisation et d'affectation des sols. Ainsi, la planification urbaine durable à titre d'instrument de prévision d'aléa et d'atténuation de la vulnérabilité constitue un axe prioritaire de recherche à venir.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abderrezzak K. E. K., Paquier A., Rivière N., Leblois E. & Guinot V. (2007). Vers une meilleure connaissance et gestion du risque d'inondation dans les zones urbaines : le projet RIVES. Novatech, 473-480.

Agbanou, B. T., Paegelow, M., & Toko, I. I. (2018). Modélisation des changements d'occupation des terres en région soudanienne au Nord-Ouest du Bénin. European Scientific Journal, Vol.14, N°12, e-ISSN 1857-7431, <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n12p248>, 248-266.

Alla, D. A., Atta K. J-M., & Yassi, G. A. (2018). Les risques naturels et leurs manifestations dans une ville secondaire : érosion et inondation à Daloa (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement, n°2, http://www.revue-geotropique.com/update/root_revue/20181201/8-Allah-Della-et-al.pdf, 101-113.

Chakhar S. (2006), Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique. Thèse pour l'obtention du Doctorat en informatique, Université Paris Dauphine, D.F.R. Sciences des Organisations, URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00143960>, 288 p.

Communauté Métropolitaine de Montréal (2021). L'approche de gestion des inondations par le risque, <https://cmm.qc.ca/projets/résilience-aux-inondations/>, consulté le 15 septembre 2021 à 14:53, 2 p.

Gemene, F., Blocher, J., De longueville, F., Vigil Diaz Telenti, S., Zickgraf, C., Gharbaoui, D. & Ozer P. (2017). Changement climatique, catastrophes naturelles et mobilité humaine en Afrique de l'ouest. Geo-Eco-Trop., n° 41, 22 p.

Goffin C. (2016), Apport de la géomatique dans la modélisation d'un écoulement en région urbaine en 2D à l'aide de logiciels de SIG. Master en sciences géographiques, Orientation Géomatique et Géométrie, Université de Liège, URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/1594>, 114 p.

Gonzalez P. (2016), Modélisation de la propagation des inondations en zone urbaine. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées en Génie civil, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, URL : <https://publications.polymtl.ca>, 244 p.

Houessinon, D. R. B., Tchibozo, E. A. M., Vissin E. W. & Ognondoun A. (2022). Cartographie du risque d'inondation dans l'Agglomération urbaine du Grand Nokoué au Bénin : SIG et Approche Multicritère. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, N°39, ISSN 1813-3290, 266-233.

INSAE. (2016). Cahier des villages et quartiers de ville du département de l'Atlantique. Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, Bénin, 42 p.

Lhomme J. (2006), Modélisation des inondations en milieu urbain : approches unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique. Thèse de Doctorat en Science de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université de Montpellier II, 299 p.

Tangmouo Tsoata, F., Yemmafouo, A. & Ngouanet, C. (2020). Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain à Bafoussam (Cameroun). Approche par analyse multicritère hiérarchique et Système d'Information Géographique. *Revue Internationale de Géomatique, Aménagement et Gestion des Ressources*, Vol. 7-8, n° ISSN : 2520-9574, 30 p.

Kangah, A., & Alla D. A. (2015). Détermination des zones à risque d'inondation à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du système d'information géographique (SIG) : Cas du bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie (commune de Cocody, Côte d'ivoire). *Geo-Eco-Trop.*, n° 39, 297-308.

Kouta, S. (2020), Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres et résilience de la flore dans le bassin cotonnier du Nord-Bénin. Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 278 p.

Kpedenou, K. D., Boukpepsi, T. & Tchamie, T. T. (2016). Quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto (Sud-Est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat. *Revue du Laboratoire de Recherches Biogéographiques et d'Etudes Environnementales*, Lomé, Togo, n°13, ISSN 1812-1403, 137-156.

Longaretti, P-Y., Vannier, C., Lasseur, R. & Lavorel S. (2016). La modélisation des changements d'usage et de couverture des sols comme outil d'aide à la planification territoriale. *CAIRN.INFO*, Sciences Eaux & Territoires, N° 21, <https://hal.inria.fr/hal-01685718>, 52-57.

MCVDD (2018), Troisième communication nationale du Bénin à la Convention Cadre des



Nations Unies sur les Changements Climatiques. Ministère du Cadre de Vie et du Développement Durable, Bénin, 272 p.

Moufida B. (2008), Modélisations des écoulements et perspectives de prévention contre les risques d'inondation dans quelques bassins de la Mederda (Coffins Algéro-Tunisiens). Mémoire de Master, Université El Had Lakhdar, Algérie, 138 p.

Osseni, A. A. & Tohozin, C. A. B. (2021). Mutations spatiales du paysage et prospective territoriale dans le secteur habité de la Commune De Karimama au Nord Bénin. International Journal of Progressive Sciences and Technologies, Vol. 26 N°. 2, ISSN: 2509-0119, 603-616.

Pelletier, F. & Spoorenberg, T. (2016), Aperçu sur les méthodes de projection. Atelier régional sur les projections de population, Dakar, Division de la Population, DESA, Nations Unies, 36 p.