

CARTOGRAPHIE DU RISQUE D'INONDATION DANS L'AGGLOMÉRATION URBAINE DU GRAND NOKOUÉ AU BÉNIN : SIG ET APPROCHE MULTICRITÈRE

**David Roméo B. HOUSSINON^{1*}, Eric Alain M. TCHIBOZO¹,
Expédit Wilfried VISSIN² et Azize OGNONDOUN¹**

¹ *Université d'Abomey-Calavi, Département de Géographie et Aménagement
du Territoire, Bénin*

² *Université d'Abomey-Calavi, Laboratoire des Applications Géomatiques et
Gestion de l'Environnement, Bénin*

(reçu le 27 Mai 2022 ; accepté le 30 Juin 2022)

* Correspondance, e-mail : dav.houes@gmail.com

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, la montée du niveau des mers et océans induit un risque d'inondation des terres émergées qui devient de plus en plus important de nos jours. Au Bénin, le drainage exoréique des eaux de pluie depuis le nord vers le sud aggrave cette situation. L'agglomération du Grand Nokoué coïncée entre le lac Nokoué et l'océan Atlantique est particulièrement concernée. La présente étude vise à cartographier le risque d'inondation dans les villes qui la constituent (Cotonou, Abomey-Calavi et Sèmè-Kpodji). La méthodologie est une approche géomatique basée sur la recherche documentaire, le traitement d'images, la cartographie du risque d'inondation et l'analyse SIG multicritère. Elle a permis de spatialiser et de classer le risque à partir du croisement des cartes critères d'aléa et de vulnérabilité. Les résultats obtenus ont montré que dans l'ensemble de l'agglomération urbaine du Grand Nokoué, le risque d'inondation est élevé de 19,97 %, modéré de 50,25 % et faible de 29,77 %. La ville de Cotonou, est particulièrement exposée au risque élevé sur 65 % de son territoire et 16 % sur celui du plateau d'Abomey-Calavi. A Sèmè-Kpodji, ce niveau de risque couvre 3 %. Il faut noter que les espaces urbanisés de l'extension périphérique de la ville de Cotonou (Godomey, Calavi, Akassato, Agblangandan et Ekpè) connaissent aussi un risque élevé d'inondation. Les résultats de cette étude peuvent aider à une prise de décision pour un aménagement prospectif et participatif du territoire de l'agglomération urbaine du Grand Nokoué dans la perspective d'une gestion durable du risque d'inondation.

Mots-clés : *agglomération du Grand Nokoué, risque d'inondation, cartographie, analyse SIG multicritère.*

ABSTRACT

Flood risk mapping in the urban agglomeration of grand Nokoue in Benin : GIS and multi-criterion approach

In the current context of global warming, the rise in sea and ocean levels induces a risk of flooding of emerged lands which is becoming more and more important nowadays. In Benin, the exoretic drainage of rainwater from the north to the south aggravates this situation. The agglomeration of Grand Nokoué wedged between Lake Nokoué and the Atlantic Ocean is particularly concerned. This study aims to map the risk of flooding in the cities that constitute it (Cotonou, Abomey-Calavi and Sèmè-Kpodji). The methodology is a geomatics approach based on documentary research, image processing, flood risk mapping and multi-criteria GIS analysis. It made it possible to spatialize and classify the risk from the crossing of hazard and vulnerability criteria maps. The results obtained showed that throughout the Greater Nokoué urban agglomeration, the risk of flooding is high at 19.97 %, moderate at 50.25 % and low at 29.77 %. The city of Cotonou is particularly exposed to high risk on 65 % of its territory and 16 % on that of the Abomey-Calavi plateau. In Sèmè-Kpodji, this level of risk covers 3 %. It should be noted that the urbanized areas of the peripheral extension of the city of Cotonou (Godomey, Calavi, Akassato, Agblangandan and Ekpê) are also at high risk of flooding. The results of this study can help decision-making for a prospective and participatory development of the territory of the Greater Nokoué urban agglomeration with a view to sustainable management of the risk of flooding.

Keywords : *greater Nokoue, flood risk, cartography, multicriteria GIS analysis.*

I - INTRODUCTION

De nos jours, les changements climatiques sont d'actualité. Selon l'occurrence des désastres observés (inondations, tempêtes, séismes, feux de forêt, sécheresses, activités volcaniques, etc.), les inondations seules représentent 43 % de toutes les catastrophes naturelles répertoriées dans le monde de 1994 à 2013 [1]. Au Bénin, elles sont importantes et constituent l'un des principaux risques naturels ayant occasionné des sinistrés sur les rives du lac Nokoué ces dernières années (2009, 2010 et 2019). Plusieurs auteurs [2, 3] ont montré le caractère périodique des inondations dans plusieurs villes du Bénin en général et dans celle de Cotonou en particulier. L'objectif de cette étude, est de cartographier le risque d'inondation dans l'agglomération urbaine du Grand Nokoué constituée des villes de Cotonou, d'Abomey-Calavi et celle de Sèmè-Podji.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Zone d'étude

Le secteur d'étude est situé au Sud du Bénin entre les coordonnées géographiques, 6°20'30'' et 6°42'00'' de latitude nord ; puis 2°13'20'' et 2°42'40'' de longitude est (*Figure 1*).

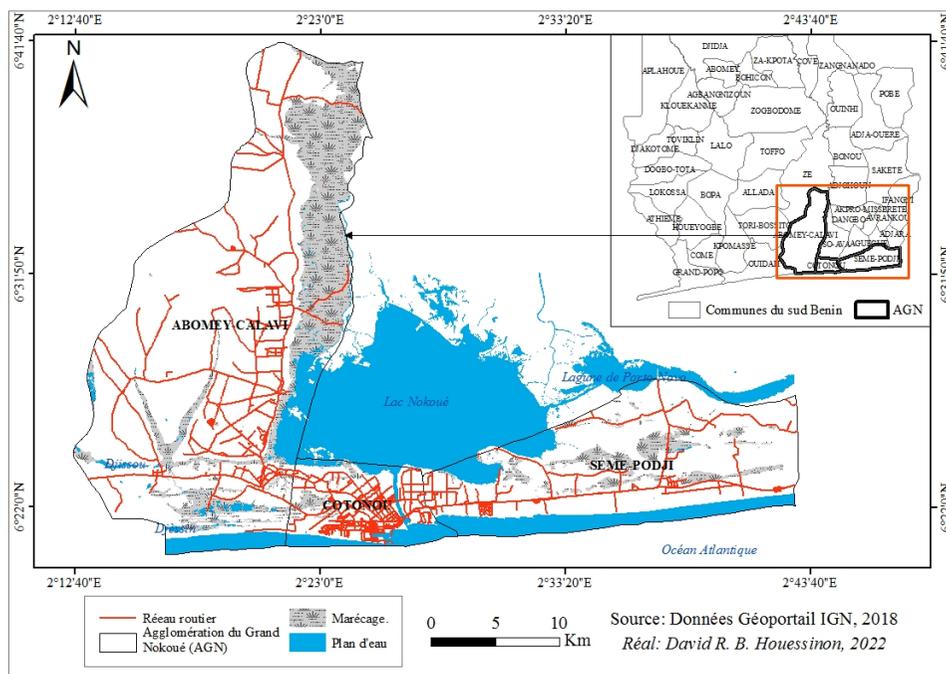


Figure 1 : Situation géographique de l'Agglomération du Grand Nokoué (AGN)

La lecture de la *Figure 1* montre que l'agglomération urbaine du Grand Nokoué, est drainée par un réseau hydrographique relativement dense constitué du lac Nokoué, des lagunes de Djonou et de Porto-Novo, du chenal de Cotonou et de plusieurs autres ruisseaux qui représentent ensemble environ 9,41 % du secteur d'étude et les zones marécageuses, 19 %.

II-2. Données et méthodes

Cette étude a été réalisée grâce à la collecte, l'analyse et le traitement de plusieurs données.

II-2-1. Données utilisées

Elles sont de plusieurs types :

- les statistiques hydro-pluviométriques : elles concernent les hauteurs maximales de pluies journalières et le débit du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bonou. Ces données proviennent de Bénin Météo (1980-2010), et du service hydrologique de la Direction Générale de l'Eau (1980-2020);
- les statistiques démographiques : il s'agit des données des quatre recensements généraux de la population (RGPH 1 ; 2 ; 3 et 4) dans les villes de l'agglomération du Grand Nokoué. Elles ont été obtenues à l'INStaD, en avril 2021 ;
- les données Open Street Map (OSM, 2016), celles de Digital Elevation Model (DEM, 2014), et du Géoportail de l'IGN Bénin (IGN, 2018) et les images du capteur Sentinel 2A (février 2021). Elles sont utilisées pour réaliser les cartes de pente, d'altitude, de pédologie, d'hydrogéologie, de pluviométrie, de distance au plan d'eau, de distance au réseau routier, de densité de la population et d'occupation du sol. Elles ont permis de spatialiser les critères de risque d'inondation dans le secteur d'étude ;
- les données issues de la recherche documentaire, de même que celles obtenues par enquête socio-économique.

II-2-2. Méthodes

Dans le cadre de cette étude, les approches SIG et multicritère AHP [4] sont utilisées. A l'aide de sa matrice, les facteurs de risque ont été standardisés, normalisés et pondérés. L'évaluation du risque d'inondation est exprimée, par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. La quantification du risque et la délimitation des espaces, en fonction de leur gravité (sévérité) et de la fréquence font recours à la grille de criticité (**Figure 2**).

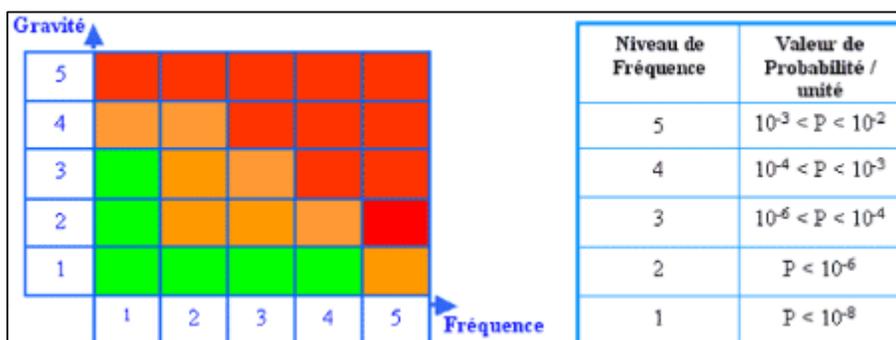


Figure 2 : Grille de criticité pour l'analyse du risque naturel

Source : [5]

L'interprétation de cette grille permet de diviser les zones à risque en trois catégories : Les zones rouges correspondent aux espaces drainés par un cours d'eau majeur avec des pentes comprises entre 0 et 1,98° ; Les zones oranges qui sont des espaces drainés par un cours d'eau secondaire et aux pentes comprises généralement entre 1,98° et 3,50° ; dans ces zones on observe une grande répétitivité des inondations, mais les dégâts sont généralement supportables et les zones vertes sont drainées par les ruisseaux intermittents avec des pentes inférieures à 5° ; ici, les inondations sont des évènements exceptionnels généralement déclenchés par des facteurs anthropiques. La cartographie du risque d'inondation est réalisée à partir du croisement de plusieurs cartes critères, à l'aide de l'outil "Raster Calculator" du logiciel ArcMap 5.3. Le croisement des cartes d'aléa et de vulnérabilité a permis de spatialiser le risque d'inondation. Pour cela, plusieurs étapes méthodologiques sont réalisées :

II-2-2-1. Caractérisation des facteurs de l'aléa l'inondation

Elle est réalisée par la combinaison pondérée des sept critères identifiés, comme étant à l'origine de l'aléa inondation dans le secteur d'étude. Il s'agit de :

- La pente : elle est calculée à partir du MNT obtenue sur les images SRTM de 30 m de résolution et classifiée en trois niveaux selon la fréquence et la valeur de probabilité (faible, modérée et élevée). La pente favorise l'écoulement de l'eau des zones de pentes élevées, vers celles de faibles pentes. Ces dernières représentent un aléa de l'inondation, qui favorise souvent la stagnation des eaux après les pluies. C'est pourquoi des coefficients élevés de pondération leurs sont affectés ;
- L'altitude / élévation : l'altimétrie du milieu d'étude répartie en trois classes (faible, modérée et élevée), est obtenue à partir du modèle numérique de terrain. Les zones de basses altitudes constituent les points de confluence et de convergence, des différents cours ou plans d'eau. Par conséquent, plus l'altitude de la ville est basse, plus elle est susceptible d'être inondée. C'est ainsi que dans le secteur d'étude, les zones de plaine aux pieds des plateaux sont sujettes aux inondations ;
- La pédologie influence les inondations par l'infiltration des eaux, et la capacité de rétention des types de sol présents dans le milieu. Cette dernière accentue les processus de ruissellement et crée d'inondation ;
- L'hydrogéologie : elle est constituée de deux principaux paramètres qui influencent les inondations ; l'eau et la lithologie. Cette dernière peut caractériser les zones inondables et influencer potentiellement l'infiltration, qui détermine l'ampleur des inondations [6], à travers les aquifères et d'autres milieux poreux peu profondes. Les couches hydrogéologiques identifiées dans le secteur de recherche, sont entre autres

- le sédimentaire côtier, les alluvions de sable, l'argile, etc ;
- distance au plan d'eau : ce facteur est généré suivant la position géographique des plans et cours d'eau, par rapport aux infrastructures et favorise le risque d'inondation en fonction de leurs proximités avec le chenal. Les zones très proches de l'eau sont plus exposées et le risque diminue progressivement au fur et à mesure que l'on s'y éloigne [7]. La distance qui sépare une habitation ou toute autre infrastructure socio-économique, d'une rivière est un facteur qui définit l'exposition au risque d'inondation lors des débordements des cours et/ou plans d'eau ;
 - L'intensité pluviométrique est un paramètre fondamental des inondations. Une forte pluviométrie peut favoriser l'inondation. Ce paramètre naturel est évalué à travers la répartition spatiale de la pluviométrie dans l'agglomération du grand Nokoué. Elle s'obtient par l'interpolation spatiale avec un Krigeage des données pluviométriques. Dans le secteur d'étude dix-huit (18) stations sont prises en compte. L'intensité pluviométrique est classée en trois zones d'influences pluviométriques. Il s'agit respectivement des zones faibles, moyennes et fortes selon le taux de précipitation ;
 - L'occupation du sol : la connaissance de l'occupation du sol est nécessaire, pour évaluer les impacts potentiels liés aux différents aménagements. L'occupation du sol influence l'écoulement des eaux. Le rôle des différentes classes d'occupation du sol dans l'écoulement et l'infiltration des surfaces, a permis de réaliser la légende normalisée.

II-2-2-2. Normalisation des couches de chaque carte critère

Les sept facteurs d'influence de l'inondation, n'ont pas la même importance dans la survenue de l'inondation. C'est pourquoi une évaluation de chaque carte critère a été effectuée, afin de déterminer l'influence de chaque couche. Pour cela, l'adaptation au secteur d'étude de la technique de normalisation [8], a permis d'exprimer l'aptitude de chacune des couches des cartes critères suivant une échelle commune.

II-2-2-3. Détermination des enjeux vulnérables

Afin d'évaluer la vulnérabilité, seuls les principaux facteurs influencés par l'aléa seront analysés. Il s'agit dans l'agglomération du grand Nokoué, de la densité du bâti, de l'occupation du sol et du réseau routier. La densité du bâti est souvent liée à celle de la population. C'est une variable indispensable à la planification du territoire et par conséquent pour la gestion du risque d'inondation. Dans le secteur d'étude, elle connaît une évolution sans cesse croissante et favorise une pression foncière, une occupation anarchique de

l'espace, particulièrement celle des zones inondables. L'occupation du sol et les infrastructures socio-économiques qui s'y développent, sont aussi exposées. De même, l'état de praticabilité du réseau routier constitue un enjeu, qui peut aggraver la vulnérabilité du territoire au risque d'inondation. Pour rendre visible les enjeux exposés à l'aléa, une standardisation des couches de chaque critère est nécessaire.

II-2-2-4. Pondération des critères de l'aléa et de vulnérabilité

Dans le cadre de cette étude, cette pondération est réalisée à l'aide de la méthode de Saaty encore appelée Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). Elle est appliquée par la comparaison deux par deux de plusieurs critères [9, 10]. C'est une méthode accessible, flexible et systématique qui permet de structurer puis d'hiérarchiser une problématique, à partir de plusieurs critères. Elle résulte du tableau de l'échelle de valeurs de la méthode AHP. En outre, les poids et la cohérence des jugements ont été déterminés à l'aide du Ratio de Cohérence ou de Consistance [11], établi par *l'Équation 1* et l'indice randomisé [12], défini par *l'Équation 2*.

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

$$CI = \lambda_{\max} / n - 1 \quad (2)$$

Le CI est l'indice de consistance. λ_{\max} indique la plus grande valeur propre de la matrice et n désigne le nombre de critères. L'indice aléatoire (RI) varie en fonction du nombre (n) de critères. Par ailleurs, les jugements de comparaison par paires sont cohérents, si et seulement si la valeur du CR est inférieure à 0,1. En revanche, lorsque cette valeur est supérieure à 0,1 les coefficients de la matrice sont incohérents. A l'issue de la détermination des poids des critères identifiés, l'agrégation a été réalisée. Elle résulte de la combinaison pondérée sous ArcMap 5.3, des critères d'aléa et de vulnérabilité. Le diagramme méthodologique conduisant à la cartographie du risque d'inondation est illustrée, par la *Figure 3*.

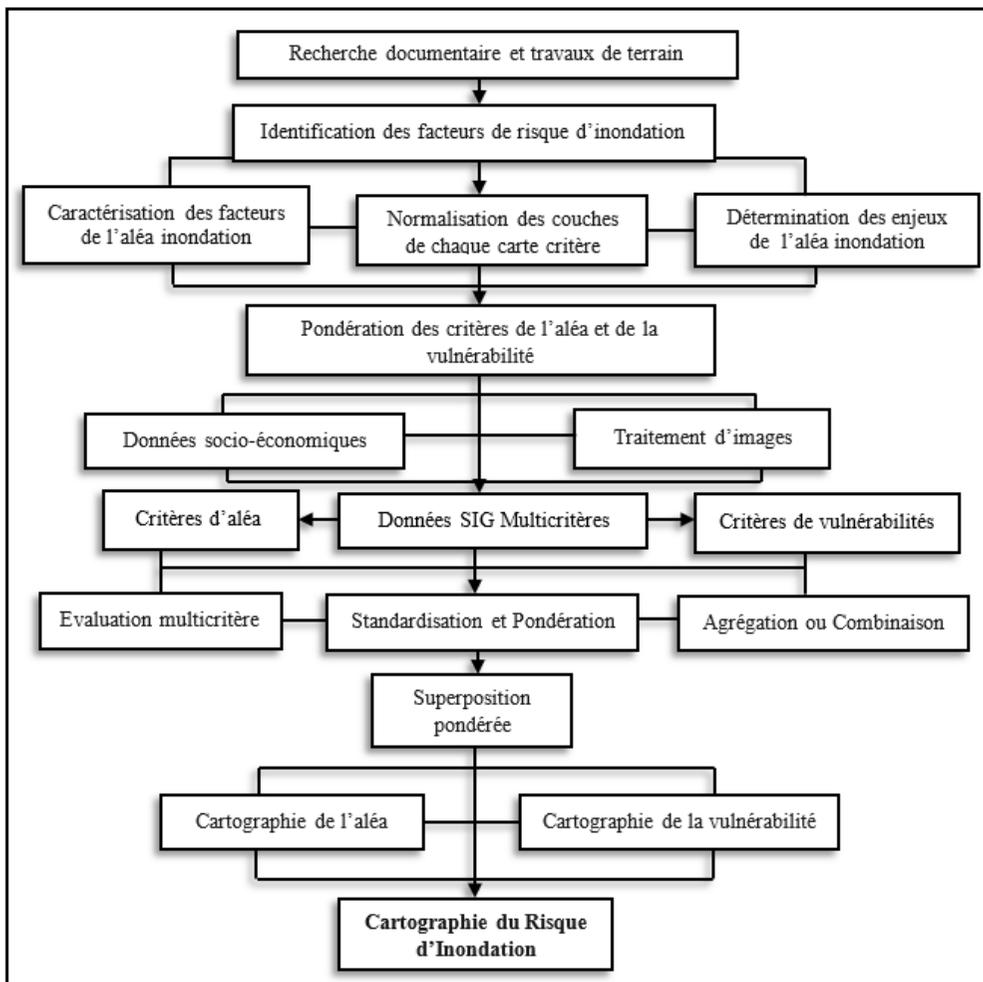


Figure 3 : *Diagramme méthodologique de la cartographie multicritère du risque d'inondation*

Source : Analyse de la documentation scientifique & travaux de laboratoire, 2022

III - RÉSULTATS

III-1. Standardisation des couches des cartes critères aléa et vulnérabilité

Le processus de normalisation des principaux facteurs de risque, a permis de définir l'influence et l'aptitude de chacune des couches des cartes critère (*Tableau 1*).

Tableau 1 : Normalisation des couches de chaque carte critère

Critères	Classes / Sous-critères	Influence des couches	Catégorisation
Pentes (%)	1,7 - 6,7	3	Faible
	1 - 1,6	5	Modéré
	0 - 0,9	9	Elevé
Altitude (m)	36,55 - 70	3	Faible
	23,34 – 36,24	6	Modéré
	0 - 23,33	9	Elevé
Répartition spatiale pluviométrie (mm)	1101,41	3	Faible
	1101,42 – 1121,87	6	Modéré
	1121,88 – 1148,41	9	Elevé
Distance au plan d'eau (m)	25-75	9	Elevé
	75-150	5	Modéré
	> 150	2	faible
Pédologie	Sols ferrallitiques / ferrugineux	3	Faible
	Sols peu évolués du cordon littoral	5	Modéré
	Sols hydromorphes / eau de surface	10	Elevé
Hydrogéologie	Bassin côtier	3	Faible
	Sable blanc et argile	5	Modéré
	Alluvions argilo-sableux et lagune	10	Elevé
Occupation du sol	Plantations, cultures et Sols nus	3	Faible
	Marécages et eaux de surface	10	Elevé
	Agglomérations	6	Modéré

Source : Analyse documentaire & travaux de terrains, 2021

La lecture du **Tableau**, montre que la normalisation des classes ou sous-critères de chaque paramètre, a été réalisée sur une échelle continue d'aptitude allant de 0 (le moins apte) à 10 (le plus apte). Le rang d'une classe est fonction de son incidence, dans la survenance des inondations. Aux classes les plus susceptibles d'engendrer l'aléa, sont affectés les rangs les plus élevés. C'est le cas des zones dont les pentes sont très faibles ($< 1^\circ$) ; d'une altimétrie faible variant entre 0 et 23 m ; d'une faible distance au plan d'eau ; des sols hydromorphes et de la présence des eaux de surface. La normalisation des éléments de vulnérabilité est présentée dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Standardisation des couches de chaque critère

Critères	Classe / Sous-critère	Catégorisation de la classe	Influence des couches
Densité 2013 (Hbts/Km2)	7246 - 16210	Elevé	9
	1668 - 7245	Modéré	5
	242 - 1667	Faible	3
Occupation du sol (OS)	Bâtis, champs et cultures	Elevé	9
	sols nus et zone inondable	Modéré	5
	Plan d'eau	Faible	3
Réseau routier	0 à 75	Elevé	8
	75,01-150	Modéré	5
	>150	Faible	1

Source : Analyse de la documentation & travaux de terrains, 2021

Les critères densité et occupation du sol, ont été classifiés sur une échelle à trois classes. En ce qui concerne l'influence, elle varie de 1 à 10 en fonction du rang et selon l'importance des différentes couches.

III-2. Cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité

III-2-1. Cartographie de l'aléa

La standardisation des couches des cartes critère aléa, a permis de spatialiser les critères de l'aléa inondation (**Figure 4**).

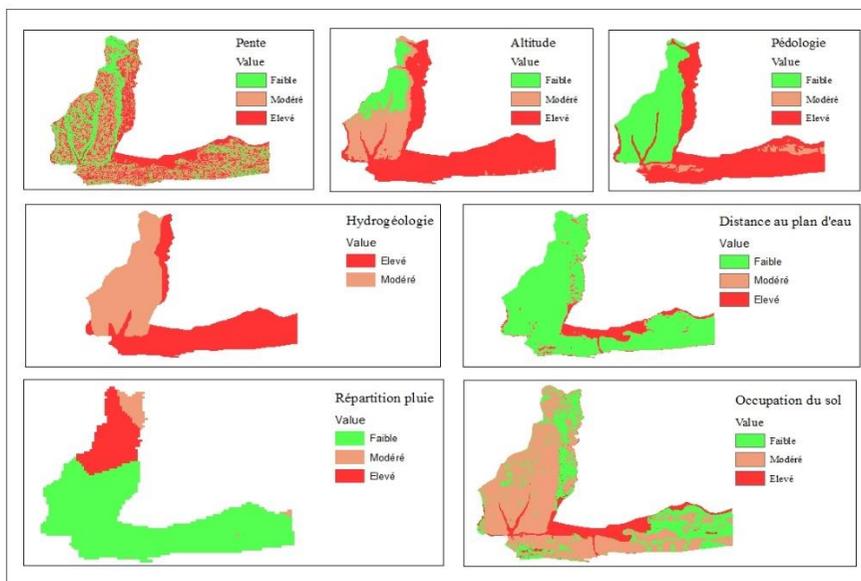


Figure 4 : Cartes critère aléa inondation

Afin de réaliser la cartographie de l'aléa, les sept critères (altitude, pente, pédologie, répartition spatiale des pluies, distance au plan d'eau, occupation du sol et hydrogéologie) identifiés ont été pondérés et spatialisés en format raster. Par ailleurs, les résultats issus de la pondération des critères ont permis de démontrer que, la pluviométrie, la distance par rapport au plan d'eau, la pente et la pédologie constituent les principaux paramètres de l'aléa dans le cadre de cette étude. Ils influent majoritairement sur les inondations respectivement à hauteur de 36 % ; 21 % ; 14 % et 12 % à l'opposé de l'occupation du sol (8 %), l'hydrogéologie (5 %) et l'altitude (4 %) dont les emprises sont relativement faibles. Le Ratio de Cohérence déterminé est égale à 0,063. Ce résultat étant inférieur à 0,1 ; alors le degré de cohérence est acceptable et les poids des critères sont raisonnables. La combinaison pondérée des cartes critère a permis de générer, la carte de susceptibilité aux inondations dans l'agglomération du Grand Nokoué (**Figure 5**).

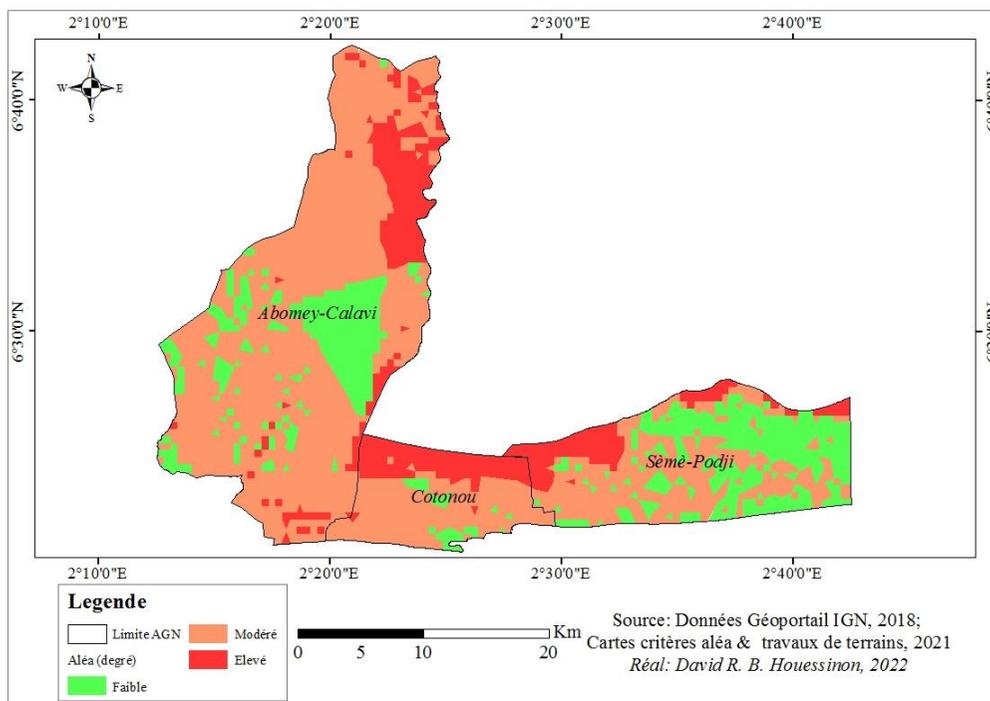


Figure 5 : Carte de susceptibilité aux inondations dans l'AGN

Les secteurs soumis à l'aléa ont été répertoriés suivant trois classes : faible, modérée et élevée. Les milieux modérément susceptibles à l'aléa s'étendent sur 64 % de la superficie du secteur, tandis que les taux de susceptibilité faible et celui élevé occupent respectivement 21 % et 15 % du territoire.

III-2-2. Cartographie de la vulnérabilité

Trois principaux critères ont permis d'évaluer, la vulnérabilité des enjeux exposés aux inondations. On peut citer la densité de la population, l'occupation du sol et la distance au réseau routier. Le ratio de cohérence calculé ($RC = 0,021$) étant inférieur à 0,10 ; alors la pondération de ces différents critères de vulnérabilité est raisonnable. Le taux de pondération des critères de vulnérabilité sus énoncés avoisine, respectivement 57 % ; 33 % et 10 %. Les cartes critères et la distribution spatiale du niveau de vulnérabilité des enjeux sont illustrées par les *Figures 6 et 7*.

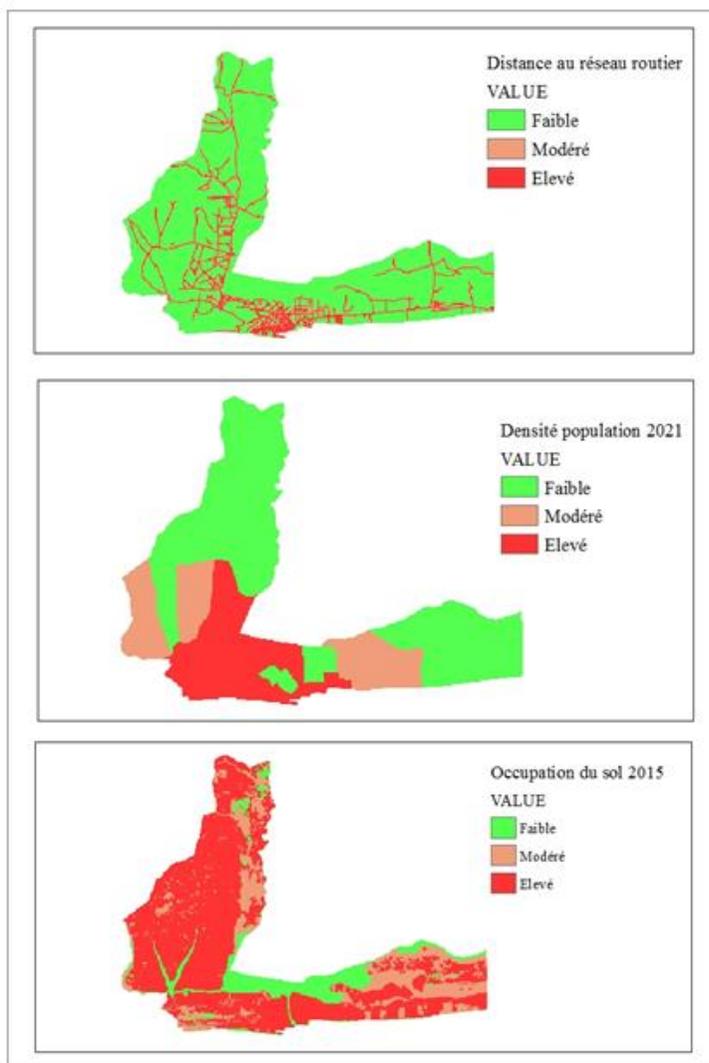


Figure 6 : Degré de vulnérabilité des enjeux

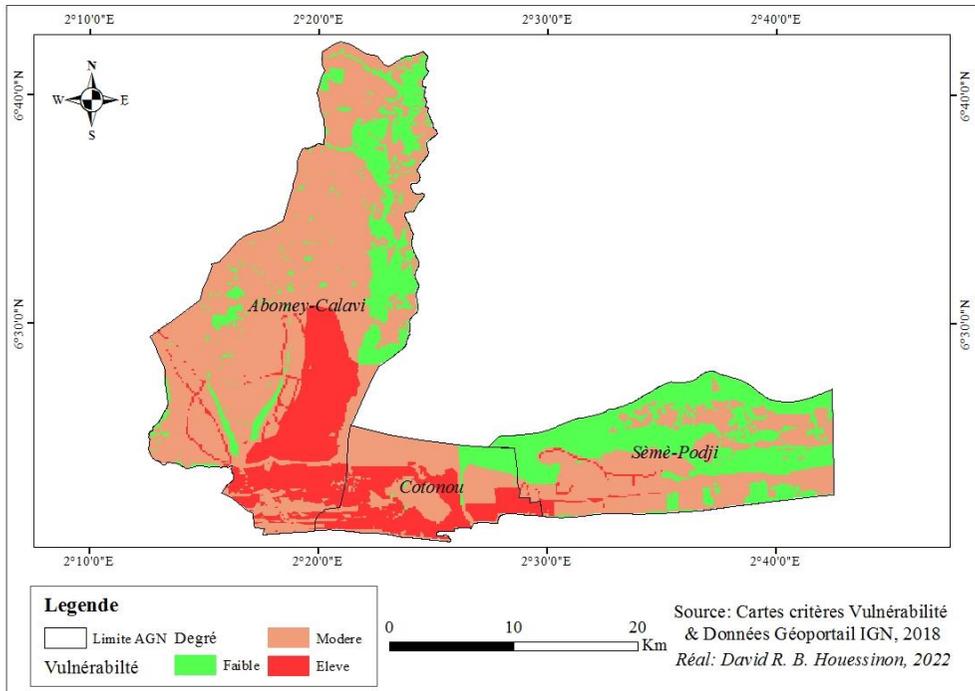


Figure 7 : Cartographie de la vulnérabilité dans l'Agglomération du Grand Nokoué

La spatialisaton et l'agrégation des principaux critères ont permis de cartographier l'état de la vulnérabilité dans le secteur d'étude. Le degré de la vulnérabilité est globalement élevé à Cotonou, dans la partie méridionale d'Abomey-Calavi, puis dans certaines localités des arrondissements d'Agblangandan et d'Ekpé. Il s'agit des secteurs urbanisés et/ou en cours d'urbanisation de l'agglomération.

III-3. Spatialisation du risque d'inondation dans l'agglomération du Grand Nokoué

Le risque d'inondation résulte du croisement de deux composantes indépendantes, que sont l'aléa et la vulnérabilité. Toutefois, le risque n'existe que lorsqu'un aléa s'applique sur un territoire vulnérable, c'est-à-dire un espace comportant des enjeux pouvant être altérés par une inondation. La spatialisation du risque d'inondation dans l'agglomération du Grand Nokoué est illustrée par la **Figure 8**.

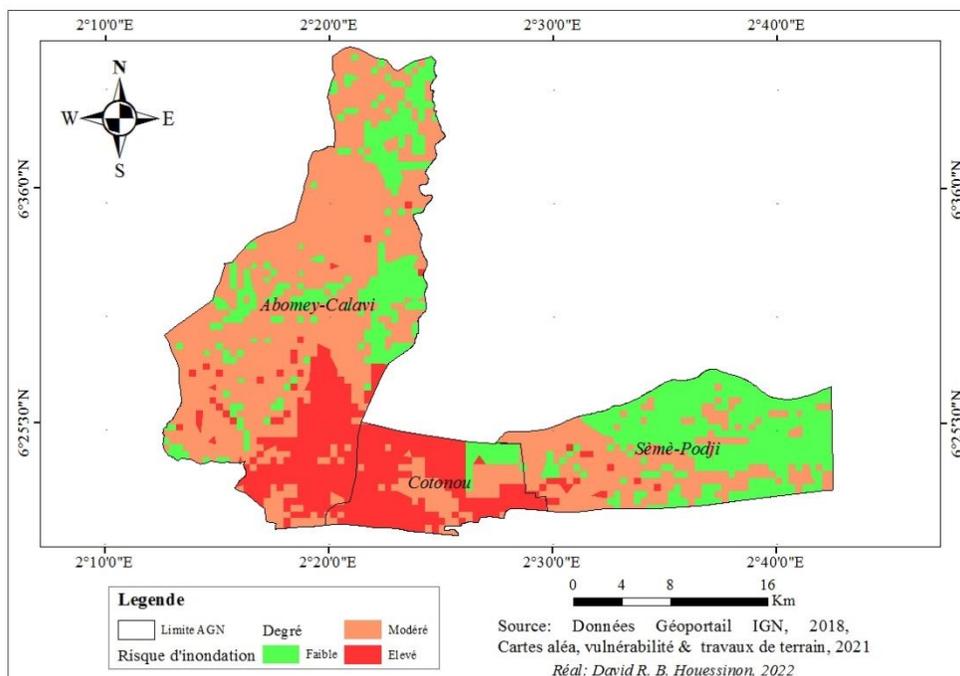


Figure 8 : Risque d'inondation dans l'agglomération du Grand Nokoué

La cartographie du risque d'inondation dans l'Agglomération du Grand Nokoué, a permis de délimiter les zones et les catégories de risque auxquelles elles sont soumises. Les 1^{er}, 4^{ème}, 6^{ème}, 9^{ème}, 12^{ème} et 13^{ème} arrondissements de Cotonou ; ceux de Godomey et de Calavi sont les plus exposées au risque d'inondation. Le niveau de risque y est élevé, et occupe une superficie avoisinant 164,35 km² soit 19,97 % du secteur d'étude. Par ailleurs, le seuil du risque d'inondation est modéré dans les 2^{ème}, 3^{ème}, 7^{ème}, 8^{ème}, 10^{ème} et 11^{ème} arrondissements de Cotonou. C'est également le cas à Agblangandan et Ekpê dans Sèmè-Podji. De même, les territoires de Hêvié, Togba, Glodji-Gbé, Zinvié et Akassato sont sujets au risque modéré. Il s'étend sur 50,25 % du territoire (413,5 km²). Il ressort également que les secteurs ayant un potentiel modéré, sont spatialement distribués sur toute l'étendue de l'Agglomération du Grand Nokoué, contrairement aux zones faiblement exposées aux inondations. Ces dernières sont fortement concentrées dans la commune de Sèmè-Podji au sein des arrondissements de Drjégbé, Aholouyèmè et Tohoué ; puis dans les arrondissements de Kpanroun, Zinvié, Akassato et Glo-Djigbé à Abomey-Calavi. Le taux de couverture de ce risque est évalué à 29,77 % (245 km²) de l'agglomération du Grand Nokoué.

IV - DISCUSSION

La notion du risque est perçue comme l'éventuelle occurrence d'un aléa, sur les enjeux potentiellement vulnérables. Elle est fonction du phénomène naturel mais aussi de l'ensemble des personnes, biens et activités économiques susceptibles d'en être affectés. La présente recherche a évalué le risque d'inondation, dans l'agglomération du Grand Nokoué sur la base du croisement des critères aléa inondation et de vulnérabilité. A cet effet, le SIG et l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) ont permis de caractériser le risque d'inondation dans le secteur d'étude. L'AHP est un outil qui permet de définir les priorités, en évaluant le poids de chacun des critères qui génèrent le risque d'inondation. Cette approche méthodologique a été utilisée dans plusieurs études [7, 13 - 15]. Par ailleurs, d'autres options modifiées de l'AHP ont également été développées pour l'évaluation du risque d'inondation. Il s'agit de l'AHP assistée par simulation de Monte Carlo (MC-AHP) et de l'AHP floue [15]. Il est à noter que les critères d'évaluation de la criticité, du risque d'inondation à savoir les pentes et les espaces drainés par un cours ou plan d'eau [5] ne sont pas spécifiquement adaptés à l'agglomération urbaine du Grand Nokoué. D'autres critères pertinents tels que la distance au plan d'eau, la pluviométrie, la pédologie et l'occupation du sol y ont été combinés pour définir les espaces soumis au risque dans le secteur d'étude.

En outre, les résultats obtenus de cette recherche ont montré que certains arrondissements (1^{er}, 4^{ème}, 6^{ème}, 9^{ème}, 12^{ème}, 13^{ème}, Calavi et Godomey) de l'agglomération du Grand Nokoué sont exposés au risque d'inondation élevé. De plus, certains quartiers ou localités de Hêvié, Agblangandan et Ekpê sont également sujets à un risque élevé. Ces résultats sont confortés par les travaux d'autres chercheurs [16, 17] qui ont démontré, que les arrondissements d'Ablangandan, de Godomey, de même que certains arrondissements de Cotonou (1^{er}, 3^{ème}, 6^{ème}, 9^{ème}, 12^{ème} et 13^{ème}) sont très affectés par les inondations. Par ailleurs, la pertinence de cette étude relève également du fait qu'elle met en évidence le degré du risque d'inondation auquel le territoire est soumis aussi bien lors du débordement des eaux du Lac Nokoué, qu'au cours de la grande saison pluvieuse. Contrairement à d'autres études qui ne produisent qu'une vision fragmentaire du risque, parce que uniquement basées sur l'aléa [18]; la spatialisation du risque d'inondation dans l'agglomération du Grand Nokoué est axée sur les différents critères qui sous-tendent l'aléa et la vulnérabilité. Ce qui a permis de matérialiser un portrait réaliste de ce risque. La cartographie se révèle donc être un outil pouvant aider à améliorer la compréhension, la gestion et l'appréhension du risque d'inondation [19]. Cependant, cette méthode rencontre des difficultés au niveau de la pondération des critères choisis et les notes assignées aux différentes classes de critères. En

effet, les poids attribués aux critères dans le cadre de l'évaluation multicritère constituent un facteur limitant du fait de leurs subjectivités. Toutefois, l'utilisation des SIG couplée à l'AHP peut contribuer significativement à l'élaboration des mesures d'atténuation et d'adaptation appropriées face au risque d'inondation. En somme, cette méthodologie synthétique, novatrice et universelle propose aux autorités locales ainsi qu'aux gestionnaires, un outil efficace de la répartition spatiale du risque.

V - CONCLUSION

Les inondations dans l'agglomération du grand Nokoué, s'amplifient au fil des ans au regard des pressions anthropiques. Les résultats de ces travaux ont révélé que le secteur de recherche, est une zone exposée aux inondations surtout en raison de ces caractéristiques physiques et géographiques, mais aussi du fait des facteurs relevant des Hommes et du développement urbain. Les déterminants physiques qui influencent la survenance de l'aléa inondation sont : l'altitude, la pente, la pédologie, l'hydrogéologie, la distance au cours d'eau, l'intensité pluviométrique et l'occupation du sol. Il est à noter que le type d'affectation des sols, le réseau routier et la densité de la population impactent le degré de vulnérabilité au niveau du territoire. Les résultats obtenus de l'approche SIG combinée à l'AHP indiquent que 19,97 % du territoire est extrêmement exposé au risque d'inondation contre 29,97 % pour les zones moyennement exposés. Par ailleurs, les territoires faiblement exposés au risque d'inondation s'étendent sur 50,25 % de la superficie de l'agglomération. La cartographie du risque d'inondation dans l'agglomération du Grand Nokoué a été réalisée à l'aide de procédés statistique et géomatique ayant permis la combinaison de plusieurs cartes. Via une représentation globale, concise et pédagogique, elle a permis de mettre en exergue la territorialisation du risque d'inondation et le degré de vulnérabilité des populations. Toutefois, il importe de souligner que les paramètres anthropiques notamment l'évolution démographique, l'occupation et l'utilisation du territoire constituent autant de facteurs pouvant contribuer à l'accroissement du risque d'inondation dans l'agglomération du Grand Nokoué. En termes de perspective, la caractérisation du risque d'inondation pourrait davantage être affinée, avec la prise en compte des facteurs de vulnérabilité des enjeux matériels et environnementaux.

RÉFÉRENCES

- [1] - M. TANGUY, « Développement d'une méthode de caractérisation et d'évaluation du risque humain lié aux inondations en milieu urbain ». Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, (2016) 429 p.
- [2] - C. LOKOSSOU, « Cadastre et inondations cycliques dans la ville de Cotonou ». Mémoire de DEA, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, (2012) 78 p.
- [3] - C. P. BLALOGOE, « Stratégies de lutte contre les inondations dans le Grand Cotonou : diagnostic et alternative pour une gestion durable ». Thèse de doctorat en Géographie et Gestion de l'Environnement, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire, Université d'Abomey-Calavi, (2014) 242 p.
- [4] - T. L. SAATY, « How to Make a Decision : The Analytic Hierarchy Process ». European Journal of Operational Research, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications, 48, N° 1 (1990) 9 - 26, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057I)
- [5] - M. TCHINDJANG, « Paradoxes et risques dans les Hautes terres camerounaises. Multifonctionnalité naturelle et sous valorisation humaine ». HDR, Université Paris Diderot, Paris7, Vol. 3, (2012) 266 p.
- [6] - C. FAYE, S. DIEYE, A. FALL, B. SOLLY, « Cartographie des risques d'inondation à l'échelle du bassin fluvial à l'aide de l'indice de potentiel d'inondation : Cas du sous-bassin du Niéri-Ko (Bassin de la Gambie) ». Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement, Vol., N° 1 (2021) 40 - 51
- [7] - M. O. ZOGNING MOFFO, « Contribution des Systèmes d'Information Géographique pour la cartographie des zones à risques d'inondation à Yaoundé : application au bassin versant du Mfoundi ». Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes, Liège Université, Arlon Campus Environnement, Faculté des Sciences, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, (2017) 71 p.
- [8] - G. M. OULAI, « Approche SIG pour la cartographie du risque et prévention des inondations pluviales à Cotonou (Bénin) ». Mémoire d'Ingénieur en Topographie, Ecole Supérieure des Ingénieurs Géomètres Topographe, (2016) 74 p.
- [9] - A. RAMOS, L. CUNHA, P. CUNHA, « Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré ». Geo-Eco-Trop, 38, 1 (2014) 33 - 44
- [10] - G. GUEDSON, « 5e. Méthodes et outils Aide multicritère à la décision-Comparaison de Saaty ». Université LAVAL, (2011) 24 p.

- [11] - J-B. RAKOTOARIVELO, « Aide à la décision Multicritère pour la gestion des risques dans le domaine financier ». Université Paul Sabatier de Toulouse, Thèse de doctorat, (2018) 358 p.
- [12] - Z. A. ROUKH, A. NADJI, « Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie ». Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement ISSN : 1737-9350 ; Vol. 3, N°1 (2018) 67 - 73
- [13] - A. A. AKINDELE, L. TODOME, « Evaluation du risque d'inondation par une analyse spatiale multicritère dans les communes de Pobè et d'Adja-Ouèrè », *International Journal of English Literature and Social Sciences*, Vol. 6, Issue-3 (2021) 12 p. ISSN : 2456 - 7620, <https://dx.doi.org/10.22161/ijels.63.20>
- [14] - F. DIEUBON, « Analyse par Système d'Information Géographique (SIG) du risque d'inondation dans la ville de Gros-Morne en aval du bassin versant de la Rivière Mancelle, Haïti ». Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes, Université de Liège, Faculté des Sciences, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, (2020) 79 p.
- [15] - A. ZOUGGARI, « Une approche couplant logique flou et capitalisation des connaissances pour la résolution du problème de choix des fournisseurs ». Thèse de Doctorat en UFR Mathématique, Informatique et Mécanique, Université Paul Verlaine – Metz, (2018) 107 p.
- [16] - L. WALLEZ, « Inondations dans les villes d'Afrique de l'ouest : diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le Grand Cotonou ». Mémoire de Maîtrise en environnement ; Mémoire de Master en Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable, Centre Universitaire de Formation en Environnement de l'Université de Sherbrooke et Université de Technologie de Troyes, (2010) 78 p.
- [17] - CREDEL, « Protection de la Communauté Urbaine de Grand Cotonou face aux Changements Climatiques (PCUG3C) ». Rapport technique final, (2012) 50 p.
- [18] - G. WERREN, M. LASRI, « Cartographie du danger d'inondation, Guide pratique pour l'application de la méthode Suisse au Maroc ». Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne, Laboratoire d'analyses géo-environnementales et aménagement de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, (2014) 28 p.
- [19] - G. FORTIN, C. POIRIER, F. DUHAMEL, D. GERMAIN, « Risques d'inondation et vulnérabilité : l'exemple du bassin versant de la rivière Kennebecasis, Nouveau Brunswick, Canada ». IDEAS, (2020) 17 p. DOI : <https://doi.org/10.4000/ideas.7999>