



Revue Canadienne de Géographie Tropicale Canadian Journal of Tropical Geography

RCGT (En ligne) / CJTG (Online)
ISSN: 2292-4108
Vol. 7 (1):37-47
<http://laurentian.ca/cjtg>



Cartographie par télédétection des risques géomorphologiques sur la berge urbanisée de la vallée de Louho (ville de Porto-Novo, Bénin)

Remote sensing mapping of geomorphological risks on the urbanized bank of the Louho valley (city of Porto-Novo, Benin)

TCHIBOZO Éric Alain Mahugnon, AGBON Appolinaire Cyriaque & ZINSOU Eric Prudence Agoma

© 2020 CJTG-RCGT Tous droits réservés / All rights reserved

Résumé:

Dans les villes au sud du Bénin, l'extension périphérique de l'agglomération du fait de l'augmentation de la densité de la population n'épargne pas les zones impropres à l'habitat. La ville de Porto - Novo capitale administrative n'échappe pas à cette réalité. L'objectif de la présente étude est de cartographier par le SIG et la télédétection, les risques géomorphologiques d'inondation, d'érosion des sols et de glissement des terrains sur la berge urbanisée de la vallée de Louho dans le cinquième arrondissement de la ville de Porto -Novo. La méthodologie est une approche cartographique basée sur la recherche documentaire, le traitement d'image de télédétection, la cartographie par classification assistée d'image, la cartographie du risque, l'analyse SIG multicritères, et celle de la statistique en composantes principales. Son application a permis d'obtenir des résultats qui montrent que l'urbanisation rapide de la berge de la vallée de Louho expose les populations aux risques. Pour une augmentation de la hauteur d'eau d'un mètre, la plaine d'inondation autour de la lagune de Porto- Novo est submergée. Les quartiers Louho, Tokpota 2, Ouenlinda 1, Foun-Foun Tokpa et Ouando sont particulièrement exposés. Le risque d'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane est perçu dans la dépression et autour de la vallée de Louho de part et d'autre de la courbe de niveau 10 mètres. De manière générale, plus de 92,46% du secteur d'étude est menacé par le risque d'inondation. Le risque d'érosion est inégalement réparti et important au Sud-ouest et au Nord -est du secteur d'étude particulièrement au niveau de la dépression marécageuse de Louho et autour de la rivière Zounvi. Les quartiers les plus vulnérables sont Louho, Tokpota 2, Foun- Foun Tokpa et Ouando. Le taux de perte en terre varie de 1,0196 tonnes/hectare/an pour les zones de faible niveau d'érosion à 29,185 tonnes/hectare/an pour les zones où le risque d'érosion est fort. Le risque de glissement des terrains est fort au Sud-ouest et au Nord-est du secteur d'étude et moyen sur les versants de la vallée de Louho et le front de talus du rebord du plateau. Les quartiers les plus exposés sont Louho, Tokpota 1, Tokpota 2, Ouenlinda 1, Foun Tokpa et Adjina Sud.

Abstract:

In the cities in the South of Benin, the peripheral extension of the urban area due to the increase in population density does not spare areas unfit for habitation. The city of Porto - Novo, the administrative capital, is no exception to this reality. The objective of the present study is to map, through GIS and remote sensing, the geomorphological risks of flooding, soil erosion and landslides on the urbanized bank of the Louho valley in the fifth district of the city of Porto-Novo. The methodology is a cartographic approach based on documentary research, remote sensing image processing, mapping by image-assisted classification, risk mapping, multi-criteria GIS analysis, and statistical analysis in main components. Its application has led to results that show that the rapid urbanization of the Louho Valley's riverbank exposes populations to risks. For an increase in water height of one meter, the flood plain around the Porto- Novo lagoon is submerged. The Louho, Tokpota 2, Ouenlinda 1, Foun- Foun Tokpa and Ouando districts are particularly exposed. The risk of direct flooding by stagnant water in a flat area is perceived in the depression and around the Louho valley on either side of the 10-metre contour line. In general, more than 92.46% of the study area is threatened by the risk of flooding. The risk of erosion is unevenly distributed, and significant in the south-west and northeast of the study area, particularly in the Louho marshy depression and around the Zounvi River. The most vulnerable districts are Louho, Tokpota 2, Foun- Foun Tokpa and Ouando. The rate of soil loss varies from 1.0196 tons/hectare/year for areas with a low level of erosion to 29.185 tons/hectare/year for areas where the risk of erosion is high. The landslide risk is high in the south-west, northeast of the study area, and medium on the slopes of the Louho valley and the slope front of the plateau rim. The most exposed districts are Louho, Tokpota 1, Tokpota 2, Ouenlinda 1, Foun Tokpa and Adjina South.

Mots clés / Keywords

SIG, cartographie, risque, inondation, érosion, glissement des terrains, vallée de Louho
GIS, cartography, risk, flooding, erosion, landslide, Louho valley

Histoire de l'article/Article history
Reçu /Received: 29 décembre 2018

Accepté /Accepted: 13 septembre 2020

Publié en ligne /Published online: 25 novembre 2020

saison humide qui favorise une inondation directe des localités et un fort ruissellement dont la conséquence est l'érosion pluviale et le ravinement des sols. La période de novembre à février est la moins pluvieuse et correspond à la grande saison sèche. La végétation marécageuse est formée de : palmier à huile (*Elaeis guineensis*), le manguier (*Mangifera indica*), le typha australis, le bananier (*Musa sp.*), le chiendent (*Imperata cylindrica*), les oreilles d'éléphant (*Alocasia macrorrhiza*), chiendent des marais (*Paspalum vaginatum*).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

MATÉRIEL

Le matériel utilisé est constitué d'un GPS, d'un ordinateur portable, de logiciels (Envi 5.3, ArcGIS 10.4, Global Mapper 17, SPSS 21, etc.) et d'un appareil photographique. Pour cette étude, plusieurs types de données ont été nécessaires. Elles sont obtenues par la recherche documentaire, le téléchargement des images satellites et des investigations sur le terrain. Le tableau 1 en présente les caractéristiques (cf. tableau 1).

Types	Format	Echelle/ Résolution spatiale	Date	Sources
Image SRTM v3	Numérique (Raster)	30 m	Téléchargée le 12/03/2017	USGS/Earth Explorer
Image satellite Sentinel 2A Path191-Row 56	Numérique (Raster)	10m (B2, B3, B4, B8)	Téléchargée le 01 jan 2017	USGS /Earth explorer
Image Google Earth	Numérique (Raster)	-	Téléchargée le 02 Septembre 2020	Google Earth, 2020
Plan parcellaire (RFU) de la ville de Porto- Novo	Numérique (Vecteur)	1/5000	Acquis le 25 Juillet 2017	Open Street Map
Carte pédologique /feuille de Porto-Novo	Numérique (Vecteur)	1/200000	Acquis le 20 Septembre 2017	CENAP, Bénin
Carte topographique feuille de Porto- Novo	Numérique Raster	1/200000	Acquis le 24 Juillet 2018	Géoportail, IGN, Bénin
Carte hydrogéologique du Bénin	Numérique Raster	1/500000	Acquis le 21 Août 2017	Direction de l'hydraulique, Bénin

Source : Recherche documentaire, 2020

Tableau 1: Caractéristiques des données utilisées

L'analyse du tableau montre que les images utilisées sont issues de trois capteurs : l'image Google Earth pour délimiter et visualiser le secteur d'étude, celles du SRTM a permis de réaliser le Modèle Numérique de Terrain (MNT) afin de mieux visualiser le relief et la dépression de Louho qui sont déterminants pour étudier l'inondation et l'érosion. Les images à haute résolution spatiale du capteur 2A du satellite Sentinel du projet « Copernicus » ont subi un traitement d'amélioration visuelle avant d'être utilisées pour les cartographies de l'occupation du sol et des risques. L'ensemble des cartes collectées a servi à vérifier les toponymies, les hydronymies et à cartographier les éléments structurants du paysage aux fins de réaliser un fond de carte.

MÉTHODES

Plusieurs auteurs ont utilisé la télédétection et les SIG pour l'étude des milieux urbains en Afrique (Bencheikroun, 1995 ; Wade, 2009 ; N'guessan Bi et al., 2014). La méthodologie adoptée est une approche cartographique basée sur la recherche documentaire, le traitement d'image de télédétection, la cartographie par classification assistée d'image, la cartographie du risque, l'analyse SIG multicritère et celle en composantes principales. La recherche documentaire a permis de faire le point des connaissances sur le sujet traité. Les données images ont été coupées sur le secteur d'étude et traitées afin de mieux visualiser les unités d'occupation du sol, facteurs déterminants de l'aléa et de la vulnérabilité aux risques d'inondation, d'érosion et des glissements de terrain. La cartographie de l'occupation du sol est exécutée pour apprécier

la répartition spatiale des unités et créer les cartes - facteurs. Elle est réalisée par classification supervisée grâce à l'algorithme de la distance de Mahalanobis. C'est l'un des algorithmes de classification les plus précis qui utilise une matrice de covariance et suppose que les histogrammes des bandes spectrales ont une distribution normale. Les résultats obtenus ont été appréciés avec la matrice de confusion. Cette dernière a permis de calculer les erreurs d'omission (EO), les erreurs de commission (EC), les indices de pureté des classes (IPC) et les indices de validité cartographique (IVC). L'analyse spatiale multicritères a consisté au choix des critères d'évaluation, la standardisation des critères, la pondération des facteurs par la matrice de Saaty et l'agrégation au moyen de la superposition pondérée. L'évaluation de la vulnérabilité aux risques est exprimée par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. Les variables nécessaires à la détermination de cette vulnérabilité sont de plusieurs types, car c'est l'action combinée de plusieurs facteurs qui provoque les inondations. Il s'agit de la densité de drainage, la lithologie, le domaine structural, le drainage souterrain (voies), la pente et la perméabilité induite par le réseau de fracture. La carte de la vulnérabilité à l'inondation est obtenue par la superposition de plusieurs cartes-critères de ces facteurs selon les travaux de plusieurs auteurs (Gilard et Gendreau, 1998 ; Onana, 2005, Vami H. et al., 2014). La carte du risque d'inondation découle d'une méthode hydrogéomorphologique (Masson M., G. Garry, Ballais J.L., 1996) qui consiste à superposer la carte de la vulnérabilité (pente) à celle de l'aléa (réseau hydrographique). Pour les inondations urbaines, la hauteur des eaux peut être révélatrice de leur capacité d'endommagement des différents aléas et de la vulnérabilité. Sur la berge urbanisée de la vallée de Louho, c'est l'inondation directe par augmentation de la hauteur d'eau qui est souvent constatée en période des hautes eaux liées à la crue de la lagune de Porto-Novo et des précipitations importantes des mois de juin et septembre. Pour l'évaluation de ce risque d'inondation, une simulation des niveaux d'augmentation de la hauteur d'eau est réalisée à partir d'une image SRTM (30 m) avec le logiciel Global Mapper 17. Le risque d'inondation par le débordement des cours d'eau est inspiré des travaux de Jourda, 2005 :57 ; Vami Herman N'guessan Bi B. S. et al., 2014 :176. En ce qui concerne le risque d'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane, plusieurs variables sont définies : la densité de drainage, la lithologie, le domaine structural, le drainage souterrain, la pente, la perméabilité, le type d'occupation du sol, et l'intensité pluviométrique (Bâ et al., 2007 : 205). Selon le Bissonnais et al. (2002 :6), les études cartographiques sur l'érosion aboutissent généralement à deux types de cartes : les cartes d'érosion, basées sur des observations ou des synthèses bibliographiques et les cartes de « risques d'érosion » pris dans le sens de l'aléa naturel, résultante de la modélisation du fonctionnement des phénomènes. 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 (cf. figure 2).

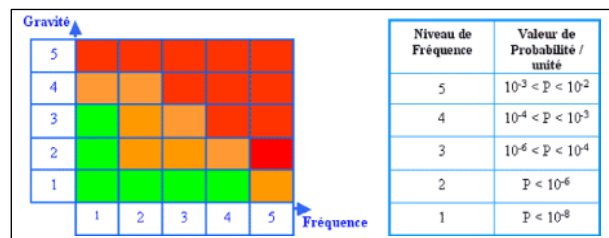


Figure 2 : Grille de criticité pour l'analyse du risque naturel

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° ; l'historique des risques révèle des pertes importantes dans ces espaces chaque année. Les zones orange 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. Les zones vertes sont drainées par les ruisseaux intermittents avec des pentes inférieures à 5° ; ici, les inondations sont des événements exceptionnels généralement déclenchés par des facteurs anthropiques.

Les SIG étudient généralement les risques d'érosion à partir de l'équation RUSLE (Ashiagbor G. et al., 2014 : p. 1). Les limites inhérentes à ce modèle ont été discutées entre autres par Yoder D.C. et al. (2001) et Roose (1994). Dans le secteur d'étude, les pratiques anti-érosives sont mal connues et le facteur cultural n'est pas suffisamment renseigné. Cette contrainte n'a pas permis d'utiliser cette équation de RUSLE et nous avons plutôt opté pour celle universelle de perte des sols (USLE) de Wischemeyer et Smith (1978 :4) pour cette étude. Elle s'exprime par une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives. Chaque facteur est considéré comme une couche raster thématique dans le SIG. La formule de l'USLE se présente comme suit :

$$A = R * K * LS * C * P \text{ où}$$

A = perte de sol en t/ha/an R : facteur d'agressivité des précipitations K : facteur d'érodibilité du sol LS : facteur de pente et de longueur de pente C : facteur de couverture végétale P : Facteur de pratique en matière de conservation.

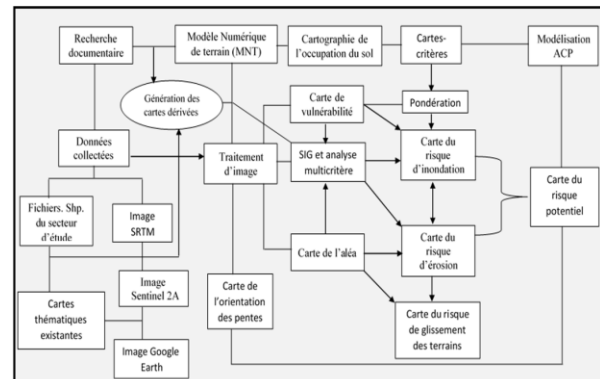
Dans le présent travail, le risque d'érosion directe est étudié par l'analyse spatiale multicritère. Le calcul de l'inclinaison et de la longueur des pentes est réalisé à partir de la détermination du facteur topographique (LS). Le calcul et la spatialisation des facteurs L et S reposent sur les données SRTM (30m de résolution) qui ont subi plusieurs prétraitements pour obtenir une carte MNT. Pour cela, il faut créer un raster de direction des écoulements à partir de chaque cellule vers son voisin de plus faible altitude. Cette détermination de la direction des flux du réseau hydrographique théorique permet ensuite de calculer la longueur de pente, tout d'abord pour une cellule et ensuite, pour chaque cellule. La seconde étape admet de calculer les pentes en degrés pour chaque cellule. En fonction de la pente obtenue, la valeur de l'exposant m varie (Roose, 1994). Les valeurs de m pour le facteur LS en fonction de la pente sont présentées dans le tableau 2.

Valeur de (m)	Pente en %
0,5	≥5
0,4	3-5
0,3	1-3
0,2	≤1

Source : Roose, 1994

Tableau 2 : Valeurs de m pour le facteur LS en fonction de la pente

Dans le secteur d'étude on observe également des glissements de terrain plan surtout autour des escarpements de la dépression de Louho. La cartographie des glissements de terrain découle de la superposition des données pédologiques à la carte des pentes. Ainsi, en référence à la grille de criticité, les zones rouges correspondent aux espaces aux pentes très élevées] 16,5°-29° ; les zones oranges] 8,65°-16,5° et les zones vertes [4,08°-8,65°]. La figure 3, le diagramme méthodologique de la cartographie des risques géomorphologiques.



Source : Roose, 2014

Figure 3 : Diagramme méthodologique

RÉSULTATS

L'application de la méthodologie aux données collectées a permis d'obtenir des résultats essentiels qui sont illustrés par quatre cartes thématiques de la berge de la vallée de Louho : l'occupation du sol, le risque d'inondation, le risque d'érosion directe et le risque potentiel.

L'OCCUPATION DU SOL

L'occupation du sol est l'un des facteurs déterminants pour la modélisation du risque potentiel d'érosion et d'inondation et de glissement des terrains. La carte de l'occupation du sol est présentée sur la figure 4 et le digramme montrant la répartition des taux de ses unités sur la figure 5.

La lecture de la carte montre que le paysage de la berge de la vallée de Louho est dominé par l'espace urbanisé (41,66%), l'espace non urbanisé (32,08%) et les marécages (16,06%). Les autres unités d'occupation du sol sont constituées des eaux de la lagune de Porto – Novo (8,65%), des zones de comblement (1,09%) et de la végétation dégradée (0,46%). Les îlots bâtis représentent 66,58% de l'espace urbanisé. La zone marécageuse de la vallée de Louho est comblée par les décharges d'ordure ménagère. Une courbe de niveau dix mètres d'altitude trace un couloir autour de cette vallée et de la lagune de Porto – Novo. Sur la figure 6, une droite montre la relation des dépôts sauvages d'ordure ménagère avec les zones de comblement. L'augmentation des ordures induit une augmentation des zones de comblement.

Les travaux de terrain ont permis de prendre quelques photos des décharges d'ordures et de les localiser sur la carte d'occupation du sol pour illustrer cette situation environnementale.

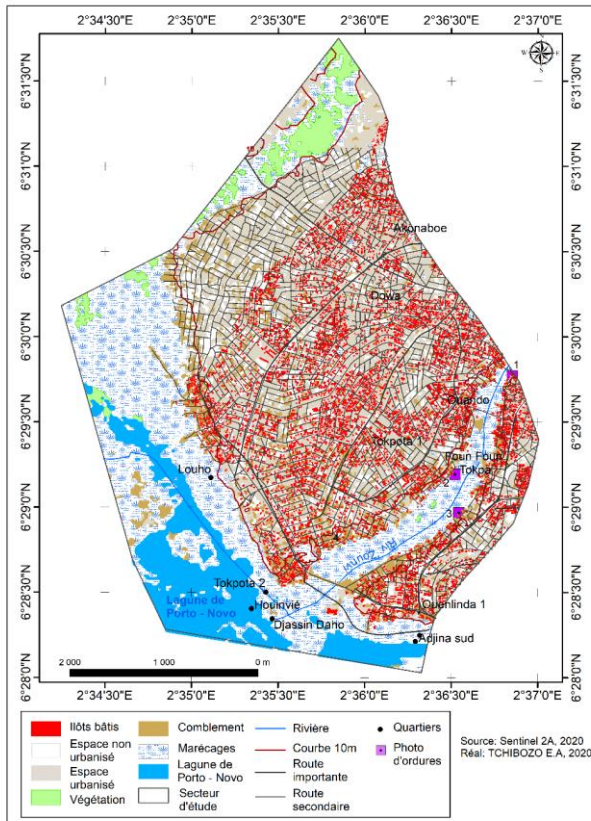


Figure 4 : Occupation du sol de la berge de la vallée de Louho en 2020

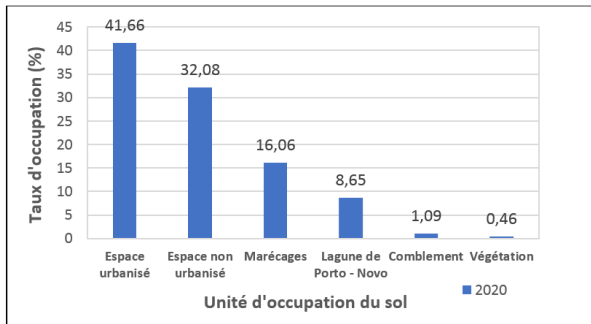


Figure 5 : Diagramme montrant la répartition des taux des unités d'occupation du sol

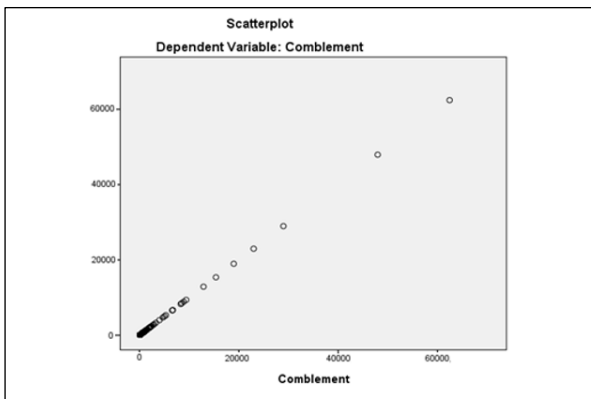


Figure 6 : Graphique des nuages de point autour de la droite de régression des dépôts sauvages d'ordure ménagère avec les zones de comblement



Source : Travaux de terrain, 30 août 2020.

La photo 1 (6°29'46"N, 2°36'51"E) représente l'extrémité Est de la vallée de Louho où la déforestation de la berge a laissé place à une décharge d'ordures utilisée pour fertiliser le sol et empêcher la repousse de la végétation sauvage.

La photo 2 (6°29'12"N, 2°36'31"E) représente le front de talus du versant escarpé de la vallée de Louho où l'érosion et le vent ont amené une partie des ordures de la photo 1 en transit vers le lit de la rivière Zounvi.

La photo 3 (6°28'58"N, 2°36'32"E) montre un ravin comblé par les ordures ménagères dont une partie est enlevée par l'érosion des sols.

La photo 4 (6°28'51"N, 2°35'46"E) montre des sentiers ou pistes ouvertes dans une savane arbustive à l'aide des ordures ménagères.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Pour comprendre la distribution spatiale des différentes unités d'occupation du sol dans le paysage d'étude, une analyse des composantes principales (ACP) a été faite. Les composantes factorielles extraites de cette analyse ont permis d'extraire deux composantes déterminantes à partir des superficies des six variables connues de l'occupation du sol (cf. tableau 3).

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus			Somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	1,000	19,091	19,091	1,000	19,091	19,091	1,000	19,089	19,089
2	1,024	17,060	36,000	1,024	17,060	36,000	1,024	17,062	36,000
3	1,001	16,000	52,000						
4	,000	16,000	69,000						
5	,000	15,000	85,000						
6	,000	14,000	100,000						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales

Tableau 3 : Variance totale expliquée des superficies des unités d'occupation du sol (après analyse factorielle)

L'analyse du tableau III montre que les variables ont des pondérations différentes, proportionnellement à leur variance. Pour ce qui est de la somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation, on constate que la plus grande variance est relativement faible avec 19,089 pour la première composante et 36,000 pour la seconde. Ceci explique une hiérarchie de l'occupation dans la construction du paysage d'étude. Ensuite, deux composantes extraites par la méthode d'analyse en composantes principales sont présentées (cf. tableau 4).

À l'étape suivante, la même méthode citée ci-dessus est utilisée, mais cette fois-ci avec la variation maximale de Kaiser et une rotation normalisée. La convergence de la rotation est faite après cinq itérations.

	Composante	
	1	2
EsU	,000	,000
Mar	-,047	,000
Lagpn	,000	,000
Combl	,000	,089
Veget	,000	,000
EnU	,000	-,072

Légende : EsU-Espace urbanisé ; Mar – Marécages ; Lagpn-Lagune de Porto- Novo ; Combl-Comblement ; Veget-Végétation dégradée, EnU -Espace non urbanisé

Méthode d'extraction, Analyse en composantes principales

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser

Tableau 4 : Matrice des coefficients des coordonnées des composantes

L'extraction des axes factoriels a permis de construire les valeurs propres des graphiques d'analyse factorielle (cf. figure 7) et des diagrammes dans l'espace après la rotation des principales composantes des unités d'occupation du sol (cf. figure 8).

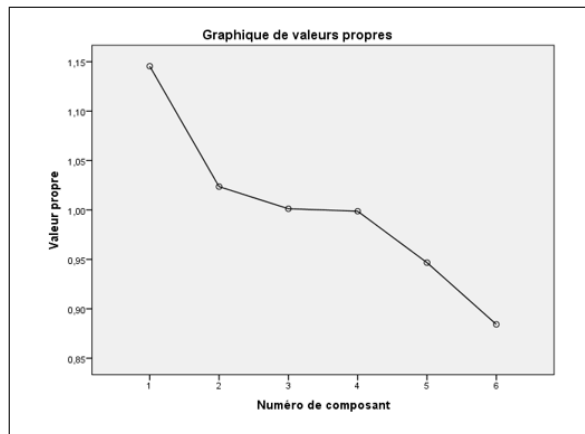


Figure 7 : Valeurs propres des graphiques d'analyse factorielle

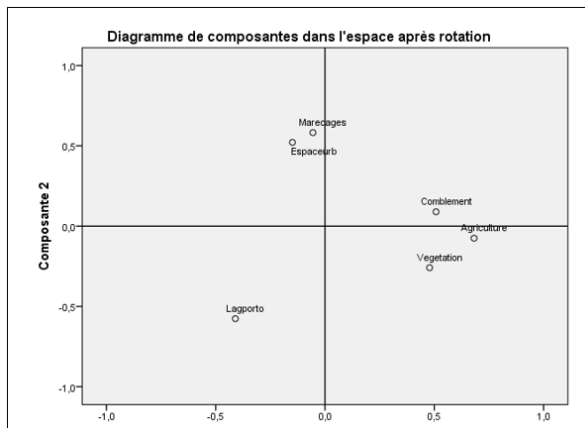


Figure 8 : Graphique des composantes dans l'espace rotatif après l'Analyse en Composantes Principales

Sur la figure 8, l'axe 1 représenté par la composante 1 dans la matrice considère 19,089 % de la variance et représente au mieux les marécages (-0,047). Elle se manifeste par une fonction linéaire $F(x) = -0,35 - 0,047 \text{ marécage}$. L'axe 2 représenté par la

composante 2 détient 36,000 % de la variance totale et exprime une meilleure représentation du comblement (0,089) et de l'espace non urbanisé (-0,072). L'axe factoriel 2 est exprimé par la fonction linéaire $F(x) = 0,52 + 0,089 \text{ Comblement} - 0,072 \text{ Espace non urbanisé}$.

De ce qui précède, on peut dire qu'une augmentation de 8,9% des zones de comblement est susceptible de diminuer 4,7% des marécages et 7,2% de l'espace non urbanisé. Le recul des marécages (exutoire naturel) est l'une des principales causes de l'inondation et de l'érosion dans les espaces non urbanisés.

RISQUE D'INONDATION PAR DÉBORDEMENT DU LIT MINEUR DES COURS D'EAU ET STAGNATION DE L'EAU DANS UNE ZONE PLANE

L'inondation par débordement du lit mineur de la vallée de Louho est expliquée par l'augmentation de la hauteur des eaux par la crue et celle du risque d'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane sur la carte par de faibles valeurs de pente. Les figures 9 et 10 présentent les cartes de ces deux types d'inondations dans le secteur d'étude.

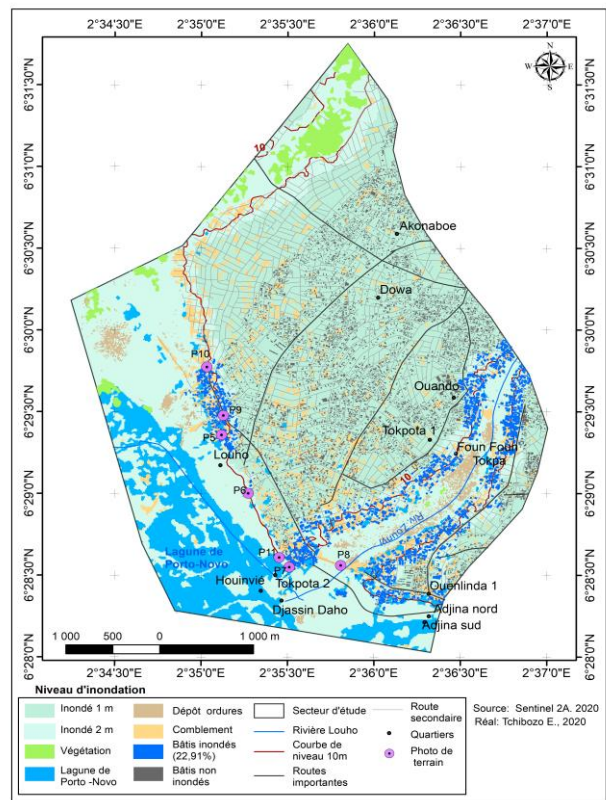


Figure 9 : Carte d'inondation par débordement du lit mineur de la vallée de Louho par les eaux de crue

L'analyse de la figure 9 révèle que pour une augmentation de la hauteur d'eau d'un mètre, la plaine d'inondation autour de la lagune de Porto-Novo est submergée et les zones de comblement des marécages par les ordures ménagères ne permettent plus l'infiltration facile de l'eau. L'inondation dure dans le temps et 2109 bâts sur 276 365 m² des zones urbanisées, mais impropres à l'habitat sont immergés. Cette situation est surtout constatée autour de la vallée de Louho et de part et d'autre de la courbe de niveau de 10m délimitant les marécages.

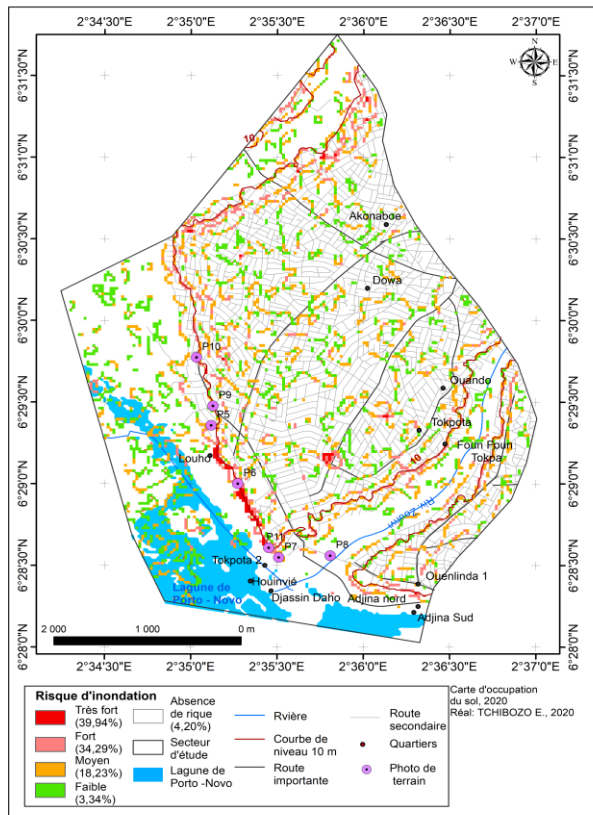


Figure 10 : Carte du risque d'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane

Les îlots bâtis qui se retrouvent à moins de 100 mètres de cette courbe de niveau sont les plus vulnérables. Les quartiers Louho, Tokpota 2, Ouandou, Foun-Foun Tokpa et Tokpota sont particulièrement exposés. Pour une augmentation de la hauteur d'eau de deux mètres, tous les quartiers du cinquième arrondissement sont inondés. On constate la submersion de plusieurs îlots autour des voies de communication et des équipements sociocommunitaires dans les quartiers Ouando, Foun-Foun Tokpa et Tokpota.

Sur la figure 10, le risque d'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane est très fort sur une proportion de 39,94% du secteur d'étude et particulièrement dans la dépression et autour de sa vallée de Louho de part et d'autre de la courbe de niveau deux mètres. Il est fort sur 34,29%, moyen sur 18,23% et faible sur 3,34%. Les zones où le risque est absent représentent 4,20% du secteur d'étude. Cette situation d'humidité relative offre des conditions édaphiques favorables au développement de la végétation. De manière générale, plus de 92,46% du secteur d'étude est menacé par ce risque d'inondation. Cette condition indique que les bâtiments situés à moins de 100m de la lagune de Porto -Novo et de la vallée de Louho seront les premiers à subir les affres de l'inondation.

RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE PAR RAVINEMENT DES SOLS

L'érosion hydrique est l'une des principales causes de dégradation du sol. Il existe trois formes d'érosion hydrique : l'érosion en nappe (entre les rigoles), l'érosion en rigoles et le ravinement. Dans le secteur d'étude, la forte pluviosité annuelle (P annuelle moyenne = 1278,22 mm) est susceptible de favoriser une forte érosion linéaire sur les sols de l'ensemble de la région (MÉTÉO

Bénin, 2019). Le tableau 5 présente les différents types d'érosion linéaire en fonction des profondeurs des lignes d'écoulement.

N°	Caractéristiques des lignes d'écoulement	
	Profondeur (cm)	Appellation
1	Quelques centimètres	Griffes
2	> 10 cm	Rigoles
3	10 à 20cm ; quelques cm de large	Nappes ravinantes
4	> à 50 cm	Ravines

Source : Adaptée de Roose 1994

Tableau 5 : Différents types d'érosion en fonction des lignes d'écoulement

Dans le secteur d'étude, c'est l'érosion hydrique linéaire qui est la plus répandue. Sa manifestation laisse des ravines sur le terrain. La carte du risque d'érosion hydrique directe de type linéaire est présentée sur la figure 11 et celle du risque de glissement des terrains sur la figure 12.

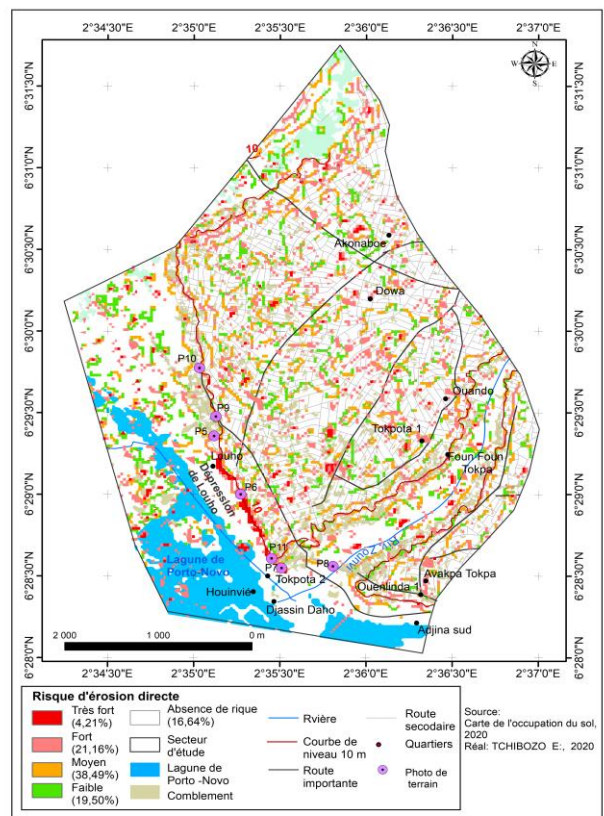


Figure 11 : Carte du risque d'érosion hydrique par ravinement des sols

L'analyse de la figure 11 révèle que le risque d'érosion est inégalement réparti sur le secteur d'étude avec une concentration remarquable des points d'érosion sur les zones de comblement des marécages et de la lagune de Porto-Novvo. Il présente une importance relative au Sud-ouest et au Nord-est du secteur d'étude particulièrement au niveau de la dépression marécageuse de Louho et autour du lit mineur de la rivière Zounvi. Sur le secteur d'étude, le risque est très fort de 4,21%, fort de 21,16%, moyen sur 38,49% et faible sur 19,50%. Sur le secteur d'étude, le risque est très fort de 4,21%, fort de 21,16%, moyen sur 38,49% et faible sur 19,50%. Les quartiers les plus vulnérables sont Louho, Tokpota 2, Foun-Foun Tokpa et Ouando.

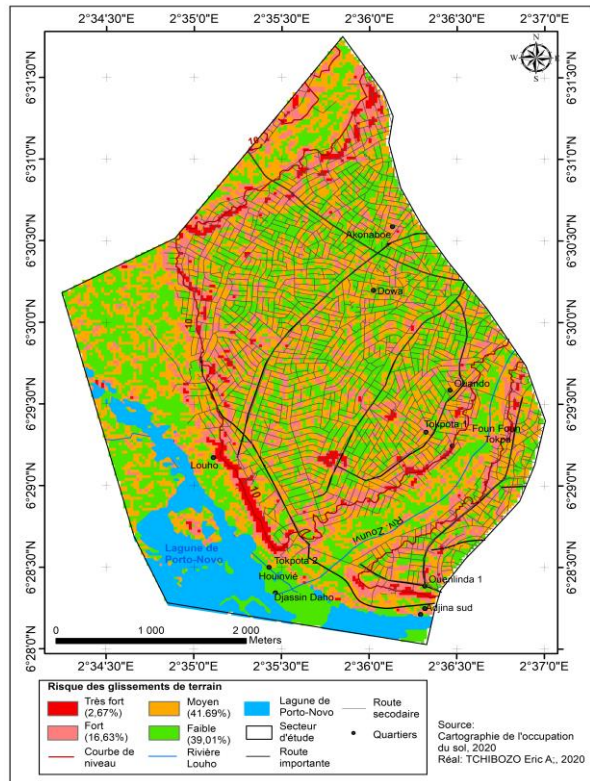


Figure 12 : Carte du risque de glissement des terrains

Le faible risque d'érosion est constaté sur la plaine marécageuse autour de la lagune de Porto – Novo et autour de la végétation dégradée. Le taux de perte en terre varie de 1,0196 tonnes/hectare/an pour les zones de faible niveau d'érosion à 29,185 tonnes/hectare/an pour les zones où le risque d'érosion est fort. Pour mieux apprécier le risque d'érosion sur la berge urbanisée de la vallée de Louho, plusieurs mesures ont été faites par des observations de terrain pour caractériser les ravines (cf. tableau 6).

Caractéristiques de la pente	Ravine profonde moyenne (20cm à 1,5m)	Incision
Faible pente	5	13
Moyenne pente	8	29
Forte pente	12	95

Source : Travaux de terrain, Zinsou et Padonou, septembre 2017

Tableau 6 : Profondeur des ravines par secteur de pente

La lecture de la figure 12 indique que le risque de glissement des terrains est inégalement réparti sur le secteur d'étude. Il est très fort au Sud-ouest et au Nord-est sur 2,67% de l'espace d'étude et particulièrement autour de la dépression et de la vallée de Louho. Il est fort sur 16,63% du secteur d'étude autour de la courbe de niveau de dix mètres qui délimite la plaine d'inondation marécageuse du rebord du plateau et moyen sur 41,69% sur les versants de la vallée de Louho et sur le front de talus du rebord du plateau. Sur le reste du secteur d'étude, le risque est faible de 39,01%. Les quartiers les plus exposés à l'érosion sont Louho, Tokpota 1, Tokpota 2, Ouenlinda 1, Foun Tokpa et Adjina Sud.



Photo 5 : Érosion des sols à proximité d'une canalisation de voie menant à la dépression de Louho (6°28'32"N et 2°35'29"E).

Photo 6 : Érosion et ravinement des sols du lit mineur de la rivière Zounvi (6°38'33"N et 2°35'47"E).

RISQUES GÉOMORPHOLOGIQUES POTENTIELS

Dans le secteur d'étude, les risques géomorphologiques les plus rencontrés sont l'inondation par débordement du lit mineur de la vallée de Louho par les eaux de crue, l'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane. L'érosion hydrique directe par ravinement des sols et le glissement des terrains. La prise en compte de chacun de ces risques a permis de réaliser la carte du risque potentiel (cf. figure 13).

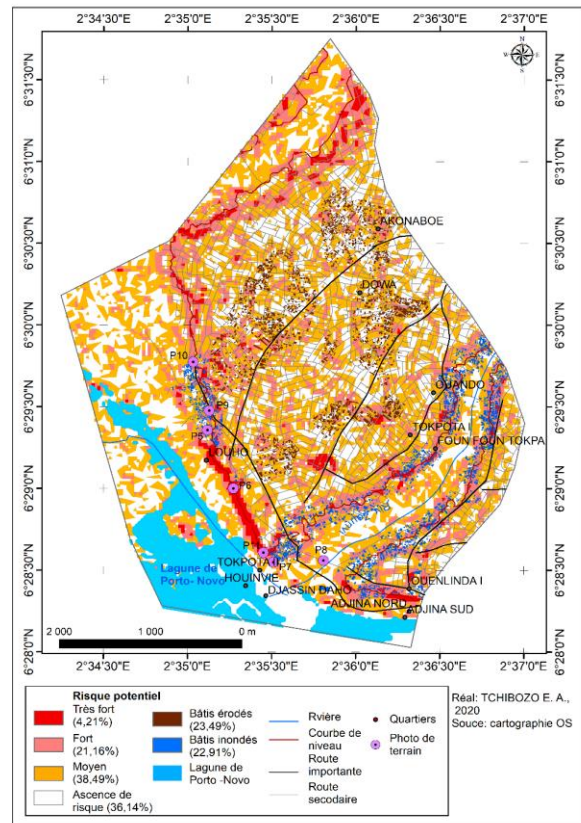


Figure 13 : Carte des risques potentiels sur la berge urbanisée de la vallée de Louho

L'analyse de la figure 13 indique que le risque potentiel est inégalement réparti. Il est très fort sur 4,21% du cinquième arrondissement de la ville de Porto – Novo, fort de 21,16% et moyen sur 38,49%. Le reste du secteur d'étude, soit 36,14% ne présentent pas de risque géomorphologique potentiel. Spécifiquement, l'avènement du risque potentiel peut inonder 22,91% des bâtis et l'érosion peut en détruire 23,49%. Les quartiers les plus vulnérables au risque potentiel sont Louho,

Tokpota 2, Foun- Foun Tokpa et Ouando. Quelques photos prises sur le terrain permettent de caractériser les dégâts du risque potentiel dans le secteur d'étude.



Photo 7 : Dégradation de la végétation et dénudation des sols autour de la rivière Zounvi (6°28'32"N et 2°35'29"E).

Photo 8 : Érosion par ravinement des sols à l'entrée de la dépression de Louho (6°28'29"N et 2°35'27"E).

Photo 9 : Talus escarpé sur le versant de la dépression de Louho (6°28'35"N et 2°35'34"E).



Photo 10 : Bâti construit à proximité du front de talus de la dépression de Louho (6°29'21"N et 2°35'06"E).

Photo 11 : Le front de talus de la dépression de Louho est végétalisé (6°28'37"N et 2°35'26"E).

Source : Travaux de terrain du 31 août 2020

DISCUSSION

La présente étude a permis de cartographier les risques géomorphologiques urbains d'inondation, d'érosion et des glissements de terrain sur la berge de la vallée de Louho. Les résultats obtenus confirment que l'occupation des zones moins propices aux implantations urbaines expose les populations aux risques. Le risque potentiel est distribué sur 97,28% du secteur d'étude. Cette situation décriée déjà par plusieurs auteurs (Domingo et al., 1996 ; Cascini et al., 2005) continue d'être d'actualité. Au Nigeria voisin par exemple, l'érosion a été à l'origine de l'enlèvement de plus de 250 à 500 m² de sédiments dans certaines zones de la plage de la Bar Beach (Folorunsho, 2004). Selon Defossez (2009), l'organisation de la lutte contre les inondations dépend des moyens dont disposent les sociétés qui la subissent. Le présent travail donne l'alerte sur les menaces potentielles de l'urbanisation sauvage. Soulignons qu'il existe plusieurs autres méthodes pour l'évaluation du risque d'inondation (Masson et al., 1993, 1996) ; Meyer et al., 2001). L'approche quantitative examine les risques naturels sur le plan de valeur comptable des dommages subis. Dans ce cas, on s'intéresse aux différents facteurs qui matérialisent la vulnérabilité.

En plus de ces facteurs stationnaires classiques (structuraux, géographiques et contingents), la variabilité climatique intervient aujourd'hui comme un nouveau facteur notamment dans son rôle de déclencheur et d'aggravateur. La présente étude présente une limite à ne pas suffisamment prendre en compte ce facteur. La perspective de ce travail devra se baser sur les pluviogrammes pour le calcul des intensités pluviométriques afin de construire des hiérogammes nécessaires à la caractérisation de l'évolution d'une averse. Il faut souligner que l'utilisation des images SRTM pourrait être complétée par d'autres images de plus grande résolution qui utilise un géoïde plus adapté.

CONCLUSION

L'utilisation des données satellitaires à haute résolution et du SIG a permis de cartographier les risques géomorphologiques majeurs que sont l'inondation, l'érosion hydrique et les glissements de terrain sur la berge de la vallée de Louho. Les résultats obtenus montrent que le paysage de la berge de la vallée de Louho est dominé par l'espace urbanisé (41,66%). La zone marécageuse de la vallée de Louho est comblée par les décharges d'ordure ménagère. L'analyse ACP a montré qu'il existe une corrélation directe entre les ordures ménagères et le comblement des marécages. Une augmentation de 8,9% des zones de comblement est susceptible de faire régresser de 4,7% les marécages. L'analyse du risque d'inondation indique que pour une augmentation de la hauteur d'eau d'un mètre, la plaine d'inondation autour de la lagune de Porto-Novo est submergée et les zones de comblement des marécages par les ordures ménagères ne permettent plus une infiltration facile de l'eau. Les quartiers Louho, Tokpota 2, Ouenlinda 1, Foun- Foun Tokpa et Ouando sont particulièrement exposés à l'inondation. Pour une augmentation de la hauteur d'eau de deux mètres, tout le cinquième arrondissement est inondé. On constate la submersion des îlots autour des voies de communication et des équipements sociocommunautaires dans les quartiers Ouando, Foun-Foun Tokpa et Tokpota. Le risque d'inondation directe par stagnation de l'eau dans une zone plane est perceptible particulièrement autour de la dépression et de la vallée de Louho de part et d'autre de la courbe de niveau de dix mètres. De manière générale, plus de 92,46% du secteur d'étude est menacé par le risque d'inondation. Cette situation montre que les bâtiments situés à moins de 100m de la lagune de Porto-Novo et de la vallée de Louho seront les premiers à subir les affres de l'inondation. Le risque d'érosion est inégalement réparti sur le secteur d'étude avec une concentration remarquable des points d'érosion sur les zones de comblement des marécages et de la lagune de Porto – Novo. Il est important au Sud-ouest et au Nord-est du secteur d'étude particulièrement au niveau de la dépression marécageuse et sur le lit mineur de la rivière Zounvi. Les quartiers les plus vulnérables à ce risque d'érosion sont Louho, Tokpota 2, Foun-Foun Tokpa et Ouando. Le faible risque d'érosion est observé sur la plaine marécageuse autour de la lagune de Porto – Novo et de la végétation dégradée. Le taux de perte en terre varie de 1,0196 tonnes/hectare/an pour les zones de faible niveau d'érosion à 29,185 tonnes/hectare/an pour les zones où le risque d'érosion est fort. Le risque de glissement des terrains est important au Sud-ouest et au Nord-est du secteur d'étude autour de la courbe de niveau de dix mètres qui délimite la plaine d'inondation marécageuse du rebord du plateau. Il est moyen sur les versants de la vallée de Louho et le front de talus du rebord du plateau. Sur le reste du secteur d'étude, le risque est faible. Les quartiers les plus exposés à l'érosion sont Louho, Tokpota 1, Tokpota 2,

Ouenlinda 1, Foun Foun Tokpa et Adjina Sud. Les perspectives de cette recherche s'inscrivent dans la réalisation d'un impact environnemental sur l'urbanisation des zones humides afin de proposer des solutions pour leur gestion durable.

RÉFÉRENCES

Ashiagbor G., E. K. Forkuo, P. R. Aabeyir, 2014. Modeling soil erosion using rusle and GIS tools. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG)* www.ijrsg.com, Volume 2, Issue 4, pp. 7-17

Banque Mondiale, *Africa's Development in a Changing Climate. Key policy advice from World Development Report 2010 and Making Development Climate Resilient: A World Bank Strategy for Sub-Saharan Africa.* The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank, 2009, 16 p.

Benckroun, H., 1995. « Urbanisme et télédétection spatiale dans les pays en développement », dans *Géo observateur*, éd. La télédétection spatiale pour l'environnement et le développement (Marisy, 95), Ifrane, Maroc. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), pp. 155-170.

Booij, M. J., 2003. « Decision support system for flood control and ecosystem upgrading in the Red River basin » in *G*, 3, pp. 115-122.

Defossez S., 2009. Évaluation des mesures de gestion du risque inondation. Application au cas des basses plaines de l'Aude. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier III-Paul Valérie. 501p. Dutta I., Foster J., Mishra A., 2011. On measuring vulnerability to poverty, *Social Choice and Welfare* volume 37/4, p. 743-761. URL: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel00542397/file/these_defossez_sans_secure.pdf

D'Ercole R., P. Gluski, Hardy S. et Alexis S., 2009. « Vulnérabilités urbaines dans les pays du Sud. Présentation du dossier », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, Vulnérabilités urbaines au sud, mis en ligne le 6 avril 2009, consulté le 24 mai 2012. URL: <http://cybergeo.revues.org/22151>; DOI: 10.4000/cybergeo.22151

DI Ruocco, A., Gasparini, P., & Weets, G., 2015. « Urbanisation and climate change, in Africa: setting the scene ». In: Pauleit, S., Coly, A., Fohlmeister, S., Gasparini, P., Jorgensen, G., Kabisch, S., Kombe, W.J., Lindley, S., Simonis, I., Yeshitela, K. (Eds.) *Urban vulnerability and climate change in Africa.* Springer, International Publishing Switzerland, Springer International Publishing, vol. 4, pp. 1-35.

Domingo, E., Tchibozo, F., Codjia, C.L., 1996. « Étude des effets de l'érosion sur les infrastructures dans la moitié ouest de la ville de Porto-Novu, bassin versant de Zounvi ». *CBRST*, 4 rapports et 3 cartes, 53 p.

Gilard O., et Gendreau N. : « Inondabilité : Une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants », *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 11, n° 3, 1998, p. 429-444.

INSAE, 2015. *RGPH4 : Que retenir des effectifs de population en 2013 ?* Direction des études démographiques, 33 p.

Jourda, J.P., 2005. *Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest.* Concept de l'hydrotechnique spatiale. Cas de la zone test de Korhogo (Côte

d'Ivoire), Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan, 402 p.

Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C. et Daroussin J., 2002. *L'érosion hydrique des sols en France.* Rapport INRA-IFEN, 106 p.

MEHU, 2005. *Rapport de la Communication Nationale Initiale du Bénin sur les changements climatiques.* Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme République du Bénin, Direction de l'Environnement, Cotonou, 76 p.

MÉTÉO Bénin, 2015. *Rapport annuel*, Dakar, Sénégal, 96 p.

N'Guessan BI, V. H., Saley B., Wade, S. et al., 2014. « Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire) ». *European Scientific Journal* éditions vol.10, No.2 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431; 22 p.

Onana (2005). *Dynamique urbaine à l'aide d'images RSO de ERS et HRV de spot, et son impact dans les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain : cas de la ville de Douala (Cameroun).* Édition Université de Douala, Vol. 5, n° (1-2-3), p 19-32.

Saaty T.L. (1977): A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, N°15, 1977.

Saha F., 2013. *La vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain: cas de la ville de Bamenda.* Mémoire de Master en Géographie, Université de Yaoundé I.

Tchindjang M. « Les risques naturels au Cameroun » Support de cours pour MASTER URAMDEUR 2011/2012 Université YAOUNDE I The OFDA/CRED International Disaster Database, 2008 (<https://www.emdat.be/>)

Vami H., Saley B., Wade S., Djagoua E.V., Kouamé F., Kouadjo A., 2014. *Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire).* Edition *European Scientific journal*, vol. 10, N°2. Repérée par l'URL: <https://eujournal.org/index.php/esj/article/viewFile/2588/2449>

Wade, S. 2009. *Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine: le cas de la région de Dakar (Sénégal)*, Journée d'animation scientifique (JAS09) de l'AUF, 7 p.

Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to soil conservation planning.* USDA-ARS, Handbook, n°537, 58 p.22. SAHA F., 2013.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier sincèrement monsieur Rock Abdon Bah, directeur général de l'IGN pour sa franche collaboration scientifique, monsieur Ognondoun Azize, étudiant en Master 2 de Géoinformation pour la collecte de données sur le terrain et les prises de photos, les chercheurs du Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement (LA2GE) du département de Géographie et Aménagement du Territoire de la FLASH Adjara de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin.

Référence électronique

TCHIBOZO Éric Alain Mahugnon, AGBON Appolinaire Cyriaque & ZINSOU Éric Prudence Agoma (2020). « Cartographie par télédétection des risques géomorphologiques sur la berge urbanisée de la vallée de Louho (ville de Porto-Novo, Bénin) ». Revue canadienne de géographie tropicale/Canadian journal of tropical geography [En ligne], Vol. (7) 1. En ligne le 25 novembre 2020, pp. 37-47. URL: <http://laurentian.ca/cjtg>

Auteurs

TCHIBOZO Éric Alain Mahugnon
Maître de conférences
Télédétection et aménagement du territoire
Géomètre – Expert de l’État
Directeur du Laboratoire des Applications Géomatiques et
Gestion de l’Environnement (LA2GE)
Université d’Abomey-calavi, Bénin
Émail : tchibalain@gmail.com
tchibozeric@yahoo.fr

Agbon Appolinaire Cyriaque
Enseignant-chercheur
Cartographie et aménagement du territoire
Laboratoire de cartographie
Université d’Abomey-calavi, Bénin
Émail : cyrto_74@yahoo.fr

Zinsou Éric Prudence Agoma
Étudiant en géographie
Option géomatique
Université d’Abomey-calavi, Bénin