

Evaluation à l'aide du SAGA Wetness Index de l'inondabilité dans le District Autonome d'Abidjan, Côte d'Ivoire

Kinakpefan Michel TRAORE

¹ Département de Géographie, Université Jean Lorougnon GUEDE de Daloa, Côte d'Ivoire
Corresponding Author: Kinakpefan Michel TRAORE

RESUME: Cette étude soulève le problème de la recrudescence des inondations à l'origine de plusieurs pertes en vies humaines et d'importants dégâts matériels dans le District Autonome d'Abidjan chaque année. Elle vise à d'identifier les sous-espaces de ce territoire capital de la Côte d'Ivoire les plus enclins aux inondations. La démarche se base sur la détermination d'un indice topographique d'humidité en l'occurrence le SAGA Wetness Index (SAGAWI). La reclassification de cet indice par la méthode Seuils naturels (Jenks) de cet indice a permis de hiérarchiser le degré d'inondabilité des sous-espaces du District Autonome d'Abidjan.

Les résultats ont révélé que les valeurs du SAGAWI oscillent entre un minimum de 6,9 et un maximum de 25,3 pour une moyenne de 15,6 et un écart-type de 3,3. La carte d'inondabilité générée à partir de ces valeurs montre que le quart du territoire (24,9%) est encline à une susceptibilité d'occurrence « Très probable » ou « Certaine » correspondant à risque d'inondation « Elevé » ou « Très élevé ». Ce sont environ 45 597,09 hectares qui sont concernées par cette vigilance importante au risque d'inondation. Le coefficient de Corrélation de Matthews d'une valeur de 0,83 témoigne d'une excellente force d'accord et de la robustesse du modèle d'analyse entre les prédictions (jeu de données d'entraînement) et les observations in situ (jeu de données de validation).

L'inclination du District à cet aléa hydroclimatique est inhérente à la morphologie de son site. En dépit de quelques limites, le SAGAWI présente un potentiel fort intéressant pour évaluer et cartographier les niveaux de susceptibilité d'occurrence de l'aléa inondation. Il reste un important outil d'aide à la décision dans les politiques de gestion préventive des situations de crises inhérentes aux événements hydroclimatiques comme les inondations surtout dans cette nouvelle ère de déséquilibres et d'incertitudes climatiques, planétaires et sociales.

MOTS CLES: District Autonome d'Abidjan, SAGA Wetness Index, Inondations, Vulnérabilités, Gestion de crises

ABSTRACT: This study raises the problem of the recrudescence of floods, which cause several losses of human life and important material damage in the Autonomous District of Abidjan each year. It aims to identify the sub-areas of this capital territory of Côte d'Ivoire that are most prone to flooding. The approach is based on the determination of a topographical wetness index, namely the SAGA Wetness Index (SAGAWI). The reclassification of this index by the Natural breaks (Jenks) method of this index made it possible to rank the degree of flooding of the sub-areas of the Autonomous District of Abidjan.

The results revealed that the SAGAWI values range from a minimum of 6.9 to a maximum of 25.3 with a mean of 15.6 and a standard deviation of 3.3. The flood map generated from these values shows that a quarter of the territory (24.9%) is prone to a susceptibility of "Very likely" or "Certain" occurrence corresponding to a "High" or "Very high" flood risk. Approximately 45,597.09 hectares are affected by this important flood risk warning. The Matthews Correlation Coefficient of 0.83 indicates excellent agreement and robustness of the analysis model between predictions (training dataset) and in situ observations (validation dataset). The District's susceptibility to this hydro-climatic hazard is inherent in its site morphology. Despite some limitations, the SAGAWI has great potential for assessing and mapping the levels of susceptibility to flooding. It remains an important decision-making tool in the preventive management of crisis situations inherent in hydroclimatic events such as floods, especially in this new era of climatic, planetary and social imbalances and uncertainties.

KEYWORDS: Autonomous District of Abidjan, SAGA Wetness Index, Floods, Vulnerabilities, Crisis management

Date of Submission: 10-04-2023

Date of Acceptance: 24-04-2023

I. INTRODUCTION

Quand bien même le néologisme "anthropocène" inventé sur le vif au début du siècle par le prix Nobel de chimie Paul CRUTZEN comme une nouvelle période géologique reste encore largement discuté au sein de l'« Internationale Commission of Stratigraphie (ICS) » membre de l'« International Union of Geological Sciences » (IUGS), force est d'admettre que nous entrons dans une nouvelle ère (Wallenhorst et Boutinet, 2019). Cette

nouvelle ère géologique (l'âge des humains) est marquée par la rupture de l'équilibre particulièrement propice à la vie qui a prévalu durant l'holocène (Kozlowski, 2018).

Ces déséquilibres à la fois planétaires et sociaux résultent davantage des activités humaines et des inégalités que des cycles atmosphériques comme au cours des grandes ères géologiques (Benoît, 2007 ; Baud et al, 2018). Ces asymétries sont à l'origine de changements globaux qui semblent s'accélérer. En réalité, comme le souligne le rapport sur le développement humain 2020, consciemment ou non, les choix humains, déterminés par les valeurs et les institutions, ont engendré des déséquilibres planétaires et sociaux qui interagissent et s'exacerbent mutuellement pour produire des mutations dangereuses (PNUD, 2020).

Ces mutations comme le dérèglement climatique, entre autres, ont des impacts particulièrement perceptibles sur la planète, les environnements naturels et les établissements humains. Ils entraînent d'ores et déjà une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes : sécheresses, canicules, tornades, pluies fortes et abondantes sources d'inondations (Camirand et Gingras, 2011). Ce sont ces dernières qui font l'objet de cette étude. Certaines parties du monde auront à affronter des précipitations diluviennes, alors que d'autres s'assècheront à outrance (Villeneuve et François 2005 ; Benoît, 2007). Pour la première fois de notre histoire, les risques les plus graves et les plus immédiats sont d'origine humaine et d'ampleur planétaire (PNUD, 2020).

Les mesures d'atténuation comme la limitation de la hausse des températures à 1,5° Celsius préconisée par l'Accord de Paris (Nations Unies, 2015), même si elles étaient mises en œuvre en dépit des pérégrinations de certains Etats, ne pourraient endiguer significativement les effets néfastes déjà amorcés du moins dans le moyen terme. Il faudrait donc, outre ces mesures de mitigation, s'inscrire dans des politiques d'adaptations aux effets néfastes du dérèglement climatique. Cette étude s'inscrit ainsi dans les réflexions sur les moyens des systèmes territoriaux primordiaux comme le District Autonome d'Abidjan (DAA) en Côte d'Ivoire pour faire face et répondre efficacement aux crises nées des perturbations comme les inondations.

Le DAA est un territoire capital dans l'armature territoriale de la Côte d'Ivoire. Il accueille plus d'un habitant sur cinq et 80% de l'économie du pays (INS, 2013, 2021). Ce territoire est confronté année après année à des événements hydroclimatiques comme les inondations avec leurs corollaires de pertes en vies humaines et de nombreux dégâts matériels. Entre 1996 et 2022 ce sont 229 personnes qui ont perdu la vie suite à des événements pluvieux (POGCI, 2022). L'occurrence de ces inondations de plus en plus importante va inéluctablement s'exacerber avec les effets du dérèglement climatique doublés au phénomène urbain et les modes d'occupations des sols incontrôlés qui modifient l'usage et l'affectation des terres. L'étude pose alors la préoccupation suivante : Quels sont les niveaux d'occurrence de l'aléa inondation lié à la morphologie du site du DAA ?

Dans une perspective de gestion préventive des situations de crises inhérentes aux inondations, cette étude a pour ambition d'identifier les sous-espaces du DAA les plus inclinés aux inondations. Spécifiquement, il s'agit de cartographier, à partir d'un indice topographique d'humidité, la susceptibilité d'occurrence de l'aléa inondation dans le DAA. Cette carte d'inondabilité se veut un outil d'aide à la décision. Aussi, les espaces dangereux plus sujets aux inondations devraient être considérés prioritairement dans les politiques de gestion préventive des situations de crises. Dans l'argumentaire qui suit, la méthodologie de travail est expliquée puis les résultats cartographiques et statistiques sont présentés et discutés.

II. DONEES ET METHODES

L'inondation naturelle d'un territoire donné se produit lorsque l'eau tellurique est en excès et ne peut plus être évacuée (Montoroi, 2012). Dans ce contexte, l'auteur distingue quatre principaux types d'inondation : débordement direct d'un cours d'eau qui sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur ; submersion journalière ou catastrophique des eaux marines ; débordement indirect par la remontée des nappes alluviales (effet de siphon) ; stagnation ou ruissellement des eaux pluviales par capacité insuffisante d'infiltration et de drainage des sols lors de pluies diluviennes. C'est ce dernier type qui fait l'objet de cet article. Cette étude s'inscrit dans le cadre des politiques de planification préventive des situations de crises comme les inondations qui s'annoncent plus récurrentes en cette ère de l'anthropocène et des changements globaux.

Ce présent article a pour cadre d'étude le District Autonome Abidjan (DAA) (figure 1). Il est situé sur le littoral de la Côte d'Ivoire entre le 5°10'0" et 5°40'0" de Latitude Nord et 4°30'0" et 4°60'0" de Longitude Ouest (figure 1). Outre la ville d'Abidjan constituée de dix communes, le DAA compte quatre Sous-Préfectures (Anyama, Bingerville, Brofodoumé et Songon) et s'étend sur environ 2 034 km².

Erkan Efiltili, et. al. "Investigating the Effect of Social Media on Female Users". *International Journal of Humanities and Social Science Invention (IJHSSI)*, vol. 12, no. 4, 2023, pp. 85-96.
Journal DOI- 10.35629/7722



Figure 1 : Situation de l'espace d'étude

Il est situé sur le littoral de la Côte d'Ivoire entre le 5°10'0" et 5°40'0" de Latitude Nord et 4°30'0" et 4°60'0" de Longitude Ouest (figure 1). Outre la ville d'Abidjan constituée de dix communes, le DAA compte quatre Sous-Préfectures (Anyama, Bingerville, Brofodoumé et Songon) et s'étend sur environ 2 034 km².

L'évolution géologique a conféré au site du DAA une morphologie partagée entre des plaines côtières et des plateaux intérieurs séparés par la présence très marquée du système lagunaire Ebrié. La platitude des plaines côtières avec des pentes très faibles ($\leq 2\%$) sur un peu moins d'un cinquième du territoire et les fortes dépressions des plateaux intérieurs avec des pentes fortes ($>7\%$) couvrant plus des deux tiers de l'espace, restent des facteurs d'inondabilité du DAA. En réalité, si dans la probabilité d'avènement des inondations pluviales dans les systèmes territoriaux, les précipitations sont un élément important, il n'en demeure pas moins que la topographie s'impose comme un facteur essentiel de l'aléa inondation. En réalité, les reliefs plats mal drainés et les dépressions sont naturellement plus enclins à l'accumulation des eaux et subséquemment aux inondations.

Dans cette étude, cette inclination naturelle aux inondations a été cartographiée à partir d'un indice topographique d'humidité. Les indices topographiques d'humidité sont constitués d'informations dérivées d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à partir duquel plusieurs variables hydrologiques et modèles spatiaux d'humidité du sol peuvent être décrits (Seibert et McGlynn, 2007 ; Drolet, 2020). Ce sont des outils qui ont un potentiel fort intéressant pour la compréhension de l'occurrence des inondations et leur gestion préventive. Ces indices illustrent de façon détaillée les espaces susceptibles d'accumuler l'eau du fait de la pente et de l'accumulation des flux. Les dépressions, le bas des pentes et les terrains plats et mal drainés présentent une plus grande sensibilité ou susceptibilité à l'accumulation des eaux et subséquemment aux inondations pluviales, qui se manifeste pendant plus longtemps suite à des précipitations (Drolet, 2020). Ces indices concentrent les valeurs d'accumulation, où les plus élevées correspondent généralement aux milieux humides et hydriques (Varin, 2021). Ces valeurs varient de 0 (sol sec) à 25 voire 30 (sol humide).

Le SAGAWI se calcule à l'aide des équations [1] et [2] :

$$[1] \quad ACS_M = ACS_{max} \left(\frac{1}{t}\right)^{\beta \exp(t^\beta)} \quad \text{pour } ACS < ACS_{max} \left(\frac{1}{t}\right)^{\beta \exp(t^\beta)}$$

$$[2] \quad SAGAWI = \ln \left(\frac{ACS_M}{\tan(\beta)}\right)$$

où ACS_M est l'aire contributive spécifique modifiée, ACS_{max} est l'aire contributive spécifique maximale parmi les huit pixels voisins de chacun des pixels, t est la valeur du paramètre « suction » qui simule l'infiltration de l'eau dans le sol (valeur de 10 par défaut) et β est l'angle de la pente en radians (Jböhner et Selige, 2006 ; Kempainen

et al., 2017, Drolet, 2020). Cette modification de l'ACS (accumulation de flux) a pour principal effet de « lisser » la modélisation du SAGAWI dans les zones où le terrain est plat (Besnard et al., 2013 ; Drolet, 2020).

Dans cette étude, le SAGAWI a été généré à partir de deux MNT (AP_08138_FBD_F0090_RT1.dem.tif et AP_08561_FBD_F0090_RT1.dem.tif) issus de l'imagerie radar de type « ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction (RTC) ». Ce sont des rasters des 18/07/2007 et 04/08/2007 d'une résolution de 12,5 m téléchargés à partir de la plateforme de « Alaska Satellite Facility » (ASF). Ces deux MNT ont été mosaïqués et découpés selon l'étendu du DAA. Pour une question de précision dans la discrétisation des valeurs du SAGAWI, les milieux hydriques (eaux de surface) ont été biffés du MNT découpé à partir de l'outil « Extract by Mask » de « Image Analysis » dans ArcGIS 10.8.

La création du SAGAWI a été précédée d'un ensemble d'opérations de prétraitement visant à réduire l'effet de la rugosité et du bruit du MNT par l'application d'un filtre passe-bas au MNT (Drolet, 2020). Ces opérations de correction ont consisté essentiellement au brèchage puis au remplissage de celui-ci. Cette combinaison donne des résultats plus intéressants (Lindsay, 2015 in Lidberg et al., 2017, Varin et al., 2017 ; Drolet, 2020, p. 6). L'opération de brèchage a été effectuée grâce aux outils « Breach Depressions ». Il s'agit d'une réimplémentation dans le logiciel SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) GIS du code Java « Breach Depressions » fourni par le logiciel WhiteBox GAT du Dr John Lindsay. Ainsi, dans l'interface de SAGA le chemin d'exécution du brèchage est « Geoprocessing », « Terrain Analysis », « Preprocessing », « Breach Depressions ». Afin de remplir le MNT, l'outil de remplissage « Fill Sinks XXL » de l'extension « Terrain Analysis » de « Preprocessing » du logiciel SAGA GIS a été utilisé (Wang et Liu, 2006)

A partir de ce MNT brèché puis rempli, le SAGAWI a été produit avec l'outil « SAGA Wetness Index » dans SAGA GIS selon le chemin « Geoprocessing », « Terrain Analysis », « Hydrology », « Topographic Indices », « SAGA Wetness Index. » avec « Suction » = 10, « Type of Area » = « total catchment area », « Type of slope » = « local slope » et les autres paramètres par défaut). Le raster obtenu a subi une reclassification à partir du chemin « Arctoolbox » « Spatial Analyst Tools » « Reclass » « Reclassify » dans ArcGIS 10.8. Dans cette étude, après plusieurs analyses des discrétisations en 4, 5, 6, 7, 8 et 9 classes c'est la méthode de combinaison « 6 classes – seuils naturels » qui a été retenue car elle permet un meilleur regroupement des valeurs du SAGAWI et donc une meilleure discrimination des susceptibilités d'accumulation des eaux selon la topographie. La méthode « 6 classes – seuils naturels » s'est faite en quatre étapes (De Smith, Goodchild et Longley, 2021) et repose sur l'algorithme Seuils naturels (Jenks) comme décrit dans Jenks et Caspall, (1971).

Étape 1 : L'utilisateur sélectionne l'attribut, x, à classer et précise le nombre de classes requises, k ;

Étape 2 : Un ensemble de k-1 valeurs aléatoires ou uniformes est généré dans la plage [min{x}, max{x}]. Ceux-ci sont utilisés comme limites de classe initiales ;

Étape 3 : Les valeurs moyennes pour chaque classe initiale sont calculées et la somme des écarts au carré des membres de la classe par rapport aux valeurs moyennes est calculée. La somme totale des écarts au carré (TSSD) est enregistrée ;

Étape 4 : Les valeurs individuelles de chaque classe sont ensuite systématiquement attribuées aux classes adjacentes en ajustant les limites des classes pour voir si le TSSD peut être réduit. Il s'agit d'un processus itératif, qui se termine lorsque l'amélioration du TSSD tombe en dessous d'un seuil, c'est-à-dire lorsque la variance intra-classe est la plus petite possible et la variance entre les classes la plus grande possible. La véritable optimisation n'est pas assurée. L'ensemble du processus peut être éventuellement répété à partir de l'étape 1 ou 2 et les valeurs TSSD comparées. Cette méthode de classification par seuils naturels (Jenks) crée des seuils optimisant le regroupement des valeurs similaires tout en maximisant les différences entre les classes (De Smith et al., 2018 in Varin, 2021).

Afin d'éviter surtout qu'une maille inondable soit identifiée comme sèche, la robustesse de notre modèle de prédiction a été testée. Il s'est agi de confronter les données du modèle à la réalité du terrain. Pour ce faire, un jeu de données d'entraînement a été produit à partir du modèle de prédiction et croisé à un jeu de données de validation sur le terrain à partir d'une matrice de confusion qui divise les observations en quatre groupes : (i) les vrais positifs (VP) lorsque l'indice identifie correctement une maille humide, les vrais négatifs (VN) lorsque l'indice identifie correctement un milieu sec, les faux positifs (FP) lorsque l'indice prédit une maille humide qui est en fait une maille sèche sur le terrain (erreur de commission) et les faux négatifs (FN) lorsque l'indice identifie une maille sèche qui est en fait une maille inondable sur le terrain (erreur d'omission) (Congalton, 1991; Chalghaf et al., 2016; Ågren et al., 2014 ; Drolet, 2020 ; Varin, 2021) (Tableau 1).

Tableau 1 : Matrice de confusion

		Validation de terrain	
		Non	Oui
Prédiction de l'indice d'humidité	Non	V _N	F _N
	Oui	F _P	V _P

Source : Adapté de Fawcett, 2006 et DROLET, 2020

A partir de cette matrice, la précision globale (« overall accuracy ») (ACC), qui mesure le pourcentage de pixels correctement classifiés (diagonale de la matrice), a été calculée à partir du Coefficient de Corrélation de Matthews (CCM) plus informatif que la coefficient Kappa de Cohen dans le cas d'une classification binaire (Matthews, 1975 ; Chicco, 2017, Iuchi, 2017 ; Drolet, 2020 ; Varin, 2021). Le CCM se calcule selon l'équation [3] :

$$[3] \text{ CCM} = \frac{(VP \times VN) - (FP \times FN)}{\sqrt{(VP+FP)(VP+FN)(VN+FP)(VN+FN)}}$$

Le CCM varie de - 1 (désaccord parfait entre la prédiction et l'observation) à 1 (accord parfait entre la prédiction et l'observation) (Matthews, 1975 ; ; Drolet, 2020). Afin d'élaborer le jeu de données de validation, il a été décidé de produire un échantillon de mailles proportionnellement à la superficie du DAA qui est de 2 034 km². Pour ce faire, le territoire du DAA a été découpé en des entités géographiques de 100 m de côté constituant ainsi une matrice de 153 739 carrés d'un hectare. Cette opération vise à déterminer sur l'espace d'étude une grille de cellules régulières de même taille (D'Ercole et Metzger, 2009 ; Kedowide Mevo Guezo, 2010 ; Traoré, 2016). Ensuite, il a été décidé d'enquêter une maille tous les 50 km² (5 km * 10 km). Ce présupposé a permis de déterminer la taille de l'échantillons (E) selon la formule : E = 2 034/ 50 = 40,68.

C'est donc un échantillon de 41 mailles qui ont été enquêtées afin de juger de l'efficacité de notre modèle de prédiction. Dans le souci de pouvoir extrapoler les résultats, les mailles à enquêter ont été tirées au sort selon la méthode de sondage aléatoire systématique. Elle a consisté, à partir de la base de sondage qui est la liste numérotée de 1 à 153 739 mailles, à déterminer le pas (P) du tirage selon la formule $P = \frac{N}{n}$ avec N le nombre de mailles (153 739) et n la taille de l'échantillon (41). Le pas du tirage est alors 3 750. Le premier numéro de maille compris entre 1 et le pas tiré aléatoirement est 530, le deuxième numéro est alors 4 280 (530+ le pas), le troisième 8 030 ainsi de suite jusqu'à la 41^{ème} maille qui correspond à la 150 530^e maille dans la base de sondage.

L'objectif de cette enquête était de vérifier si les données du jeu d'entraînement issu de la prédiction du modèle (12 mailles humides et 29 mailles sèches) est conforme à la réalité du terrain. A partir des coordonnées, chaque maille a été observée in situ afin de se rendre compte d'une accumulation des eaux ou si du fait de la topographie (dépressions, bas des pentes ou terrains plats et mal drainés), la maille présente une susceptibilité d'inondation.

Les résultats de ces observations sont contenus dans le tableau 2. A l'analyse 92,68% des prédictions du modèle générées par le SAGAWI ont été confirmées par les observation in situ. Les observations non confirmées étaient sur des espaces à la topographie plane qui ne permettait pas à l'état de confirmer ou d'infirmer le niveau d'inondabilité. Dans le doute, il a fallu s'abstenir.

Tableau 2 : Observations in situ

		Validation de terrain	
		Non	Oui
Prédiction de l'indice d'humidité	Non	27	1
	Oui	2	11

Source : Nos investigations, 2022

Le calcul du coefficient de Corrélation de Matthews a donné une valeur de 0,83 qui témoigne d'une excellente force d'accord entre les prédictions et les observations in situ. Cette force d'accord entre le jeu de données d'entraînement et le jeu de données de validation témoigne de la robustesse du modèle d'analyse.

III. RESULTATS

A l'issu des opérations de prétraitement et de traitement du MNT, la distribution X des valeurs du SAGAWI générées oscillent entre un minimum (X_{\min}) de 6,9 et un maximum (X_{\max}) de 25,3 (figure 2). Cette distribution constitue une série statistique quasiment symétrique avec une moyenne de 15,6 pour une médiane de 15,4. La dispersion de ces valeurs autour de la moyenne est relativement faible avec un écart type de 3,3.

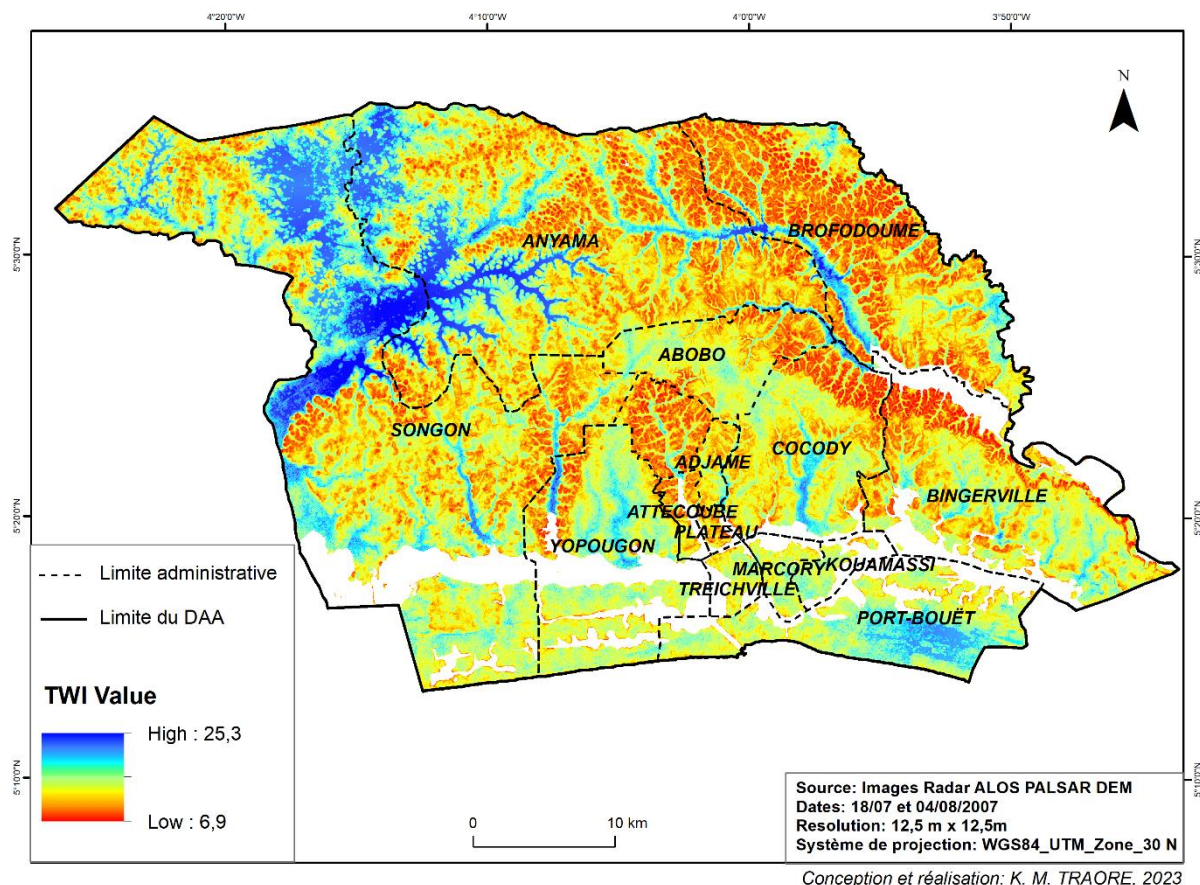


Figure 2 : SAGA Wetness Index dans le DAA

A partir de ces valeurs du SAGAWI, la méthode de reclassification seuils naturels (Jenks) a permis de générer le raster de la figure 3 pour les opérations d'analyses spatiales et statistiques. A l'analyse, la susceptibilité d'occurrence des inondations en fonction de la morphologie du site du DAA oscille entre « Très improbable » et « Certaine » (figure 3). Selon le modèle de prédiction, spatialement, l'inondabilité des espaces du DAA se répartit invariablement sur tout le DAA. Toutefois, il faut noter une tendance à l'inondabilité certaine au nord de Songon, au sud de Port-Bouët et le long de la frontière entre Anyama et Brofodoumé (figure 3).

Par ailleurs, cette inondabilité reste globalement probable au sud du système lagunaire Ebrié, à Yopougon et selon un axe orienté nord-ouest et sud-est couvrant les communes d'Abobo de Cocody et de Bingerville. Ces espaces sont globalement d'une forte occurrence de l'aléa donc d'une vigilance au risque d'inondation plus qu'importante.

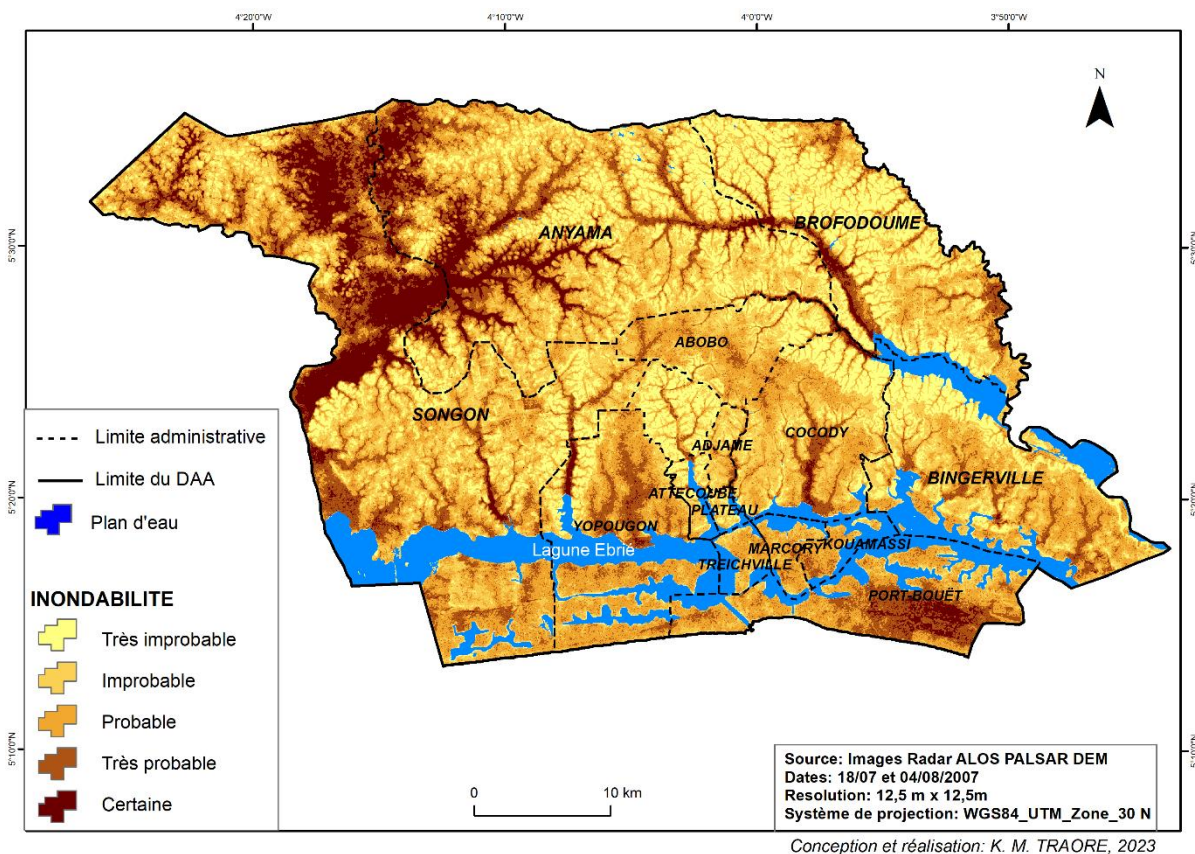


Figure 3 : Probabilité d'accumulation des eaux dans le DAA

Statisquement, il ressort de cette discrétisation en cinq classes qu'un peu moins d'un dixième du District à une propension d'inondabilité « Certaine » correspondant à un niveau de risque d'inondation « Très élevé » (tableau 3) sur plus de 14 mille hectares. Cette proportion atteint près d'un quart du territoire avec la susceptibilité « Très probable » (tableau 3).

Tableau 3 : Statistiques spatiales du SAGAWI

N°	Classes	Inondabilité	Surface (ha)	Fréq. (%)	Fréq. CC	Fréq. CD.	Risque
1	19,8 - 25,3	Certaine	14 867,1	8,1	8,1	100,0	Très élevé
2	16,7 - 19,7	Très probable	30 729,9	16,8	24,9	91,9	Elevé
3	14,3 - 16,6	Probable	55 948,9	30,6	55,5	75,1	Moyen
4	11,8 - 14,2	Improbable	51 443,8	28,1	83,6	44,5	Faible
5	6,9 - 11,8	Très improbable	30 117,7	16,4	100,0	16,4	Très faible

Fréq. : Fréquence ; Fréq. CC. : Fréquence Cumulée Croissante ; Fréq. CD. : Fréquence Cumulée Décroissante
 Source : Nos traitements, 2023.

En outre, les susceptibilités d'occurrence « Improbable » et « Très improbable » renvoyant à des degrés de risque d'inondation « Faible » et « Très faible » couvrent plus des deux cinquièmes du DAA. La classe modale équivaut à une inondabilité « Probable » pour un risque d'inondation « Moyen » sur 56 mille ha.

Le DAA présente une inclination naturelle importante aux aléas hydroclimatiques comme les inondations du fait de sa topographie. Cette forte propension aux inondations se rencontrent, outre l'extrême ouest de Songon, dans les communes du DAA les plus peuplées et les plus densément bâties. Il s'agit d'une part des communes-nord Yopougon Abovo et Cocody et d'autre part des communes-sud Treichville, Marcory, Koumassi et Port-Bouët. Ces communes abritent environ quatre habitants du DAA sur cinq (79, 78%). En termes de densité, ce sont 70,94 habitants à l'hectare contre 23,14 habitants à l'hectare pour l'ensemble du DAA.

IV. DISCUSSION

4.1 Le SAGAWI, en dépit de quelques limites reste un indice topographique d'humidité fort intéressant pour évaluer l'aléa inondation

Le but de ce papier était de définir un outil d'aide à la décision dans une perspective de planification préventive des situations de crise inhérentes aux inondations lors des précipitations. De façon spécifique, il s'agissait d'évaluer, de hiérarchiser et de cartographier l'inondabilité dans le DAA afin d'identifier les mailles les plus inclinées naturellement à cet aléa. La méthode est basée sur l'usage d'un indice d'humidité topographique. Les indices topographiques d'humidité sont constitués d'informations dérivées d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ce sont des outils qui ont un potentiel fort intéressant pour la compréhension de l'occurrence des inondations et leur gestion préventive. Ces indices illustrent de façon détaillée les espaces susceptibles d'accumuler l'eau du fait de la pente et de l'accumulation des flux. Les dépressions, le bas des pentes et les terrains plats et mal drainés présentent une plus grande susceptibilité à l'accumulation des eaux et subséquemment aux inondations pluviales, qui se manifeste pendant plus longtemps suite à des précipitations (Drolet, 2020). Ils concentrent les valeurs d'accumulation, où les plus élevées correspondent généralement aux milieux humides et hydriques (Varin, 2021). Ces valeurs varient de 0 (sol sec) à 25 voire 30 (sol humide).

Dans la pratique, il existe plusieurs indices topographiques d'humidité générés à partir de différentes ressources informatiques. Dans cette étude nous avons eu recours au « SAGA Wetness Index » (SAGAWI). Le SAGAWI, proposé par Böhner et Selige (2006), est une version modifiée du « Topographic Wetness Index (TWI) » développé par Beven et Kirkby (1979) afin d'évaluer l'humidité du sol en tenant compte de la pente et de son aire contributive en amont (Drolet, 2020). Il intègre une modification de l'Aire Contributive Spécifique (ACS) de chaque pixel pour les zones où le terrain est plat, de même qu'une modification de l'ACS en fonction de l'angle de la pente (β) et de la valeur maximale voisine d'ACS (Drolet, 2020). L'auteure comparant le TWI au SAGAWI est arrivée à la conclusion selon laquelle ce dernier : (i) prend davantage en considération les pixels voisins par la prise en considération des fines différences de valeurs d'élévation entre les pixels grâce à l'utilisation d'une modification itérative de l'ACS ; (ii) permet d'obtenir une modélisation nettement plus performante et donc une séparation beaucoup plus claire entre zones humides et zones sèche et (iii) présente visuellement un résultat beaucoup plus lissé et dont les zones sont plus uniformes qui facilite grandement l'interprétation de l'indice par l'utilisateur (Drolet, 2020).

En outre, pour être robuste, comme le suggère (Jenson et Dominique, 1988 in Drolet, 2020, p. 6), le MNT doit subir des ajustements permettant entre autres, l'application d'un filtre spatial, la gestion des dépressions et la correction des irrégularités du terrain causées par l'absence de point et [par] la méthode d'interpolation » (Bournival, Varin et Fink, 2017 ; Drolet, 2020). Un filtre passe-bas a donc été appliqué pour réduire l'effet de la rugosité et du bruit du MNT du relief pour que l'eau puisse poursuivre son écoulement cohérent tout au long de la pente (O'callaghan et Mark, 1984 ; Jenson et Dominique, 1988 ; Drolet, 2020). En fait, le prétraitement des modèles numériques de terrain (MNT) est primordial puisqu'un obstacle, telle une route, peut faire dévier l'écoulement et incidemment causer des erreurs dans le calcul de l'indice topographique d'humidité (Ariza-Villaverde et al., 2013; Murphy et al., 2008; Varin et al., 2021).

En réalité, les dépressions réelles (ornières, étangs, etc.) ou d'artéfacts liés à des structures anthropiques (fossés longeant les chemins, etc.) empêchent l'écoulement modélisé de circuler vers un exutoire, causant ainsi une rupture dans les algorithmes d'accumulation de flux (Drolet, 2020, p. 6). Les dépressions ont donc été enlevées du MNT par brèchage puis par remplissage à l'effet d'un écoulement cohérent de l'eau.

Le brèchage a consisté à réduire l'élévation des pixels le long d'un tracé liant le pixel le plus bas de la dépression à un pixel situé encore plus bas, généralement en aval du déversoir (Lindsay, 2016 ; Lindsay et Dhun, 2015 ; Martz et Garbrecht, 1998; Martz et Garbrecht, 1999; Poppenga et al., 2010; Drolet, 2020). Toutefois, comme le soulignent Varin et al (2021) l'effet du brèchage peut être problématique car les brèches peuvent ne pas être créées au bon endroit modifier ainsi les valeurs de pixels et rendre contraignante la production d'indice cohérent. Le remplissage qui consiste en le fait d'élever les pixels de la dépression au niveau du pixel le plus bas entourant la dépression, appelé déversoir (O'callaghan et Mark, 1984 ; Jenson et Dominique, 1988 ; Wang et Liu, 2006 ; Drolet, 2020) vise à corriger ou juguler ces contraintes. Dans cette étude ces deux opérations (remplissage et brèchage) ont été combinées. Cette combinaison permet des résultats plus intéressants (Lindsay et Creed, 2005 ; Poggio et Soille, 2012 ; Varin et al., 2017 ; Drolet, 2020, p. 6).

Les valeurs du SAGAWI générées ont été discrétisées grâce à l'outil « Reclassify » sous ArcGIS 10.8. Cet outil propose sept méthodes de reclassification : Manual, Equal Interval, Defined Interval, Quantile, Geometrical Interval, Standart Deviation et Natural Breaks (Jenk). Il faut indiquer qu'il n'existe pas de méthode de reclassification idéale. Toutefois, certaines sont mieux indiquées et plus adaptées que d'autre en fonction des données à analyser et des objectifs à atteindre. Ainsi, la méthode de classification par seuils naturels a été retenue pour la discrétisation des données du SAGAWI. En effet, avec la classification par seuils naturels (Jenks), les classes sont déterminées par les regroupements naturels inhérents aux données. Les seuils de classe sont créés de manière à optimiser le regroupement des valeurs similaires et à maximiser les différences entre les classes. Les

entités sont réparties en classes dont les limites sont définies aux endroits où se trouvent de grandes différences dans les valeurs de données (ESRI, 2021). Cette reclassification a permis de générer la carte d'inondabilité du DAA.

Toutefois, si le SAGAWI reste un outil pour gestion efficace et efficiente des vulnérabilités des enjeux (personnes, activités, biens...) liées aux événements hydroclimatiques comme les inondations, force est d'admettre qu'il ne peut pas, à lui seul, être utilisé avec confiance pour détecter les milieux humides (Varin, 2021) par ricochet le risque d'accumulation des eaux et les niveaux d'occurrence de l'aléa inondation. S'il demeure un indicateur de qualité, la couche de l'indice peut différer de la réalité sur certaines portions du territoire. En effet, l'indice renseigne uniquement sur l'hydrologie des milieux humides en occultant d'autres caractéristiques essentielles comme la pédologie, la composition végétale et la microtopographie (Bazoge et al., 2014) ; Lachance et al, 2021 ; Varin, 2020).

L'indice ne tient donc pas compte du niveau de perméabilité des sols. La forte tendance d'accumulation d'eau sur un sol sableux par exemple peut être atténuée par sa texture très poreuse et donc d'une perméabilité élevée. Par contre, les faibles ou moyennes valeurs de l'indice peuvent couvrir des espaces qui se retrouvent avec des niveaux importants d'accumulation d'eau du fait d'un sol tourbeux, vaseux ou argileux avec un degré de perméabilité moindre.

Dans la pratique, les zones mal classées par le SAGAWI sont principalement des milieux secs classés comme humides se trouvant sur des dépôts de surface qui permettent une infiltration d'eau importante (Drolet, 2020). Aussi, la composition végétale et la microtopographie peuvent-elles être influencées ou altérées par le type et le mode d'occupation du sol. En milieu urbain, la forte artificialisation du sol peut engendrer des fausses accumulations d'eau en amont d'une route par exemple. En dépit, donc des techniques de correction du MNT par les opérations de brèchage et de remplissage qui ne sont pas efficaces à 100%, il est donc fort probable que des erreurs soient présentes dans les données produites (Lessard, 2020, Varin et al., 2017 ; Varin, 2021).

Ces erreurs sont généralement de deux ordres : des erreurs d'omission lorsqu'un milieu humide est identifié comme sec et des erreurs de commission lorsque l'indice prédit un milieu humide qui en réalité est sec (Drolet, 2020 ; Varin, 2021). Aussi, la cartographie l'inondabilité pourrait être plus précise avec la prise en compte des caractéristiques édaphiques, les paramètres de l'utilisation et de l'occupation du sol afin d'évaluer la conductivité hydraulique ou le ruissellement vertical du sol (Drolet, 2020). La perméabilité du sol peut être également influencée par l'artificialisation (bâti, asphalte...) qui affecte et transforme les géosystèmes et le sociosystème (Traoré et al, 2019).

4.2 La carte d'inondabilité : un outil d'aide à la décision

En dépit de ses limites, le SAGAWI reste un outil fort intéressant pour cartographier l'occurrence de l'aléa inondation liée à la topographie des sites anthropisés ou en cours d'artificialisation. Cet indice a permis d'analyser, d'évaluer, de hiérarchiser et d'identifier les mailles du DAA les plus inclinées naturellement aux inondations. Dans une perspective de gestion préventive des situations de crise, de prime à bord, ces espaces les plus exposés doivent être considérés prioritairement. Dans les plans d'aménagement par exemple, ces espaces déjà bâtis devraient voir leurs réseaux d'assainissement et de drainage des eaux pluviales revisités et adaptés aux débits des eaux. Sur les nouveaux fronts urbains, les mailles les plus inclinées à l'aléa inondation devraient être soumises à des travaux d'aménagement plus conformes qui anticipent les risques de montée des eaux (emprise des égouts et des caniveaux plus importantes, voirie plus large qui jouerait le rôle de cours d'eau et faciliterait l'évacuation des eaux).

Par ailleurs, le suivi des Zones à Aménagement Différé (ZAD) comme les fonds des vallées devrait être renforcé afin qu'elles ne deviennent pas des marges urbaines qui sont généralement l'apanage des populations les plus pauvres. En effet, ce sont généralement les populations les moins nanties qui occupent les zones dangereuses (Reghezza, 2006). Des événements météorologiques comme la canicule de 2003 en Europe et l'ouragan Katrina en 2005 ont montré que les premières victimes des aires urbaines ont été les populations les plus déshéritées et les plus démunies : personnes âgées, mal logées, handicapées, ou malades chroniques, généralement à revenus très faibles ou souffrant d'isolement social (Quenault, 2013).

Somme toute, les indices topographiques d'humidité en général et le SAGA Wetness Index utilisé dans cette étude en particulier offre un fort potentiel pour la réalisation des cartes d'inondabilité visant à anticiper les risques d'inondation et en limiter les effets de plus en plus importants année après année. Il apparaît comme un outil d'aide à la décision dans les politiques de gestion préventive des situations de crises. Il s'impose comme un instrument de la rénovation et de la restructuration urbaines afin de corriger les tares du mal-développement induit par l'installation informelle et anarchique des hommes et des infrastructures. Au-delà, la carte d'inondabilité est un atout dans l'élaboration des documents stratégiques de développement comme le Plan d'Urbanisme Directeur (PUD) et le Mode d'Occupation du Sol (MOS). En sus, dans une perspective de planification préventive, il est indéniable qu'il peut jouer un rôle primordial dans l'analyse et l'évaluation des vulnérabilités territoriales qui ont pour ambition de comprendre où et comment la vulnérabilité se génère et se diffuse à partir des espaces du territoire urbain (Demoraes, 2004 ; D'Ercole, Metzger, 2009 ; et Hardy, 2009).

La planification préventive est un processus itératif qui part d'une analyse ou diagnostic territorial pour aboutir à un cadre d'action stratégique qui intègre les Atouts et Faiblesses, les Opportunités et les Menaces des territoires. Elle vise à identifier les fragilités qui peuvent contribuer à l'avanie et compromettre le fonctionnement systémique du territoire voire d'autres échelles supérieures. La planification préventive est une démarche opérationnelle qui s'inscrit dans le champ des politiques de préparation aux situations de crise.

En réalité, les vulnérabilités inhérentes aux processus de mal-développement subséquents à la production et à l'occupation informelle, anarchique et désordonnée de l'espace urbain vont s'exacerber inéluctablement avec les effets du dérèglement climatique. Ces vulnérabilités intrinsèques ou immanentes propres au développement et au fonctionnement des systèmes territoriaux menacent voire compromettent leur trajectoire durable (Quenault, 2013). Aussi, la durabilité de ces systèmes territoriaux implique l'adoption de politiques de préparation aux situations de crise qui regroupe toutes les dispositions préventives pour parer aux éventuelles perturbations et juguler leurs effets domino (Traore, 2016). Il ne s'agit pas plus que de se préparer et se tenir prêt à agir et surtout à faire face. Ce niveau de préparation témoignera de la résilience qui traduit la capacité de chaque territoire à maintenir son fonctionnement, poursuivre son développement et tenir son rôle régional, national voire international après l'avènement de la perturbation et de la crise.

V. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer et de hiérarchiser la susceptibilité d'occurrence de l'inondabilité dans le DAA. La méthode s'est basée sur la détermination d'un indice topographique d'humidité en l'occurrence le SAGA Wetness Index. Cet indice a permis d'identifier les sous-espaces du District les plus enclins aux inondations du fait de la morphologie de son site. Selon le modèle de prédiction, avec un coefficient de Corrélation de Matthews d'une valeur de 0,83 qui témoigne d'une excellente force d'accord entre les prédictions (jeu de données d'entraînement) et les observations in situ (jeu de données de validation), le quart du territoire District Autonome d'Abidjan connaît une inondabilité variant entre « Très probable » et « Certaine ». Cette occurrence correspond à un niveau de risque d'inondation « Elevé » ou « Très élevé ». Le SAGAWI, grâce à une meilleure discrimination entre les zones humides et sèches, apparaît comme un outil d'aide à la décision dans les politiques de planification et de gestion préventive des inondations. Toutefois, le SAGAWI en dépit de ce fort potentiel de discrétisation de l'inondabilité des espaces, peut s'avérer erroné sur des dépôts de surface qui permettent une infiltration d'eau importante, à l'instar de tous les indices topographiques d'humidité.

En dépit de ces limites il reste un outil d'aide à la décision pour une gestion préventive de la propension naturelle des territoires aux inondations de plus en plus catastrophiques. En réalité, de plus en plus les asymétries planétaires et sociales engendrées par les activités anthropiques amplifient l'occurrence et la fréquence des événements hydroclimatiques extrêmes comme les inondations. La durabilité des systèmes territoriaux majeurs comme le DAA implique, outre les mesures de mitigation afin d'endiguer le dérèglement climatique, la mise en place de système d'alerte précoce et de préparation « à faire face ». La carte de l'inondabilité s'inscrit dans le cadre de cette politique de gestion préventive de ces crises inhérentes aux catastrophes.

Bien que les résultats obtenus soient forts intéressants, nous projetons dans le souci d'affiner la carte d'inondabilité, d'intégrer à la méthode par l'Analyse Multicritère les caractéristiques édaphiques, les paramètres de l'utilisation des terres et les modes d'occupation du sol afin d'évaluer la conductivité hydraulique ou le ruissellement vertical du sol.

REFERENCES

- [1]. Ågren, A. M., Lidberg, W. Strömgren, M., Ogilvie, J. et Arp, P. A. (2014). Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, p. 3623-3634. DOI : 10.5194/hess-18-3623-2014.
- [2]. Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J. et Gutiérrez de Ravé, E. (2013). Multifractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation. *Geomorphology*, 197, 85-95
- [3]. Baud, P. Bourgeat S. et Bras C. (2008). *Dictionnaire de géographie*, Paris, Hartier, 607 p..
- [4]. Bazoge A., Lachance D. et Villeneuve C., 2014, Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional, ville de Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'expertise en biodiversité et Direction de l'aménagement et des eaux souterraines, 64 p.
- [5]. Benoît E. (2007). Variabilité et changements climatiques: y a-t-il des impacts sur la pratique de la médecine traditionnelle au Burkina Faso?, mémoire, Université du Québec à Montréal, 131 p.
- [6]. Besnard, A. G., La Jeunesse, I., Pays, O. et Secondi, J. (2013). Topographic wetness index predicts the occurrence of bird species in floodplains. *Diversity and Distributions*, 19, p. 955-963. DOI :10.1111/ddi.12047
- [7]. Beven Keith J. et Kirkby M. J. A. (1979) « physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant ». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 24, no 1, p. 43-69.
- [8]. Böhner J. et Selige T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *SAGA-Analyses and modelling applications*.– Göttinger Geographische Abhandlungen, 115, 13-28.
- [9]. Bournival, P., Varin, M. et Fink, J. (2017). Validation d'une méthode semi-automatisée de détection des milieux humides à partir du lidar aéroporté. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2017-01, 44 p.
- [10]. Camirand J. et Gingras C. (2011). les changements climatiques : quels en sont les causes et les impacts ?, *Nature Québec*, mars 2011, http://www.naturequebec.org/ressources/fichiers/Agriculture/fermeszerocarbone_2011/TXT11-03_refChangClimat.pdf

- [11]. Chalghaf, B., Chlif, S., Mayala, B. et al. (2016). Ecological niche modelling for the prediction of the geographic distribution of cutaneous Leishmaniasis in Tunisia. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 94 (4), p. 844-851. DOI : 10.4269/ajtmh.15-0345.
- [12]. Chicco, D. (2017). Ten quick tips for machine learning in computational biology. *BioData Mining*, 10 (35), 1-17. DOI : 10.1186/s13040-017-0155-3.
- [13]. Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37 (1), 35-46.
- [14]. D'Ercole R. et Metzger P. (2009). « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, Vulnérabilités urbaines au sud, document 447, mis en ligne le 31 mars 2009, consulté le 04 août 2014. URL : <http://cybergeo.revues.org/22022> ; DOI : 10.4000/cybergeo.22022
- [15]. De Smith M.I J., Goodchild Michael F., Longley Paul A. (2021). *Geospatial Analysis- A Comprehensive Guide to Principles Techniques et Software Tolls 6th Edition*, (2021). update, <https://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html>
- [16]. Demoraes F. (2004). *Mobilité, enjeux et risque dans le District Métropolitain de Quito (Equateur)*, Thèse de doctorat, Université de Savoie, 587 p.
- [17]. Drolet E. (2016). *Identification des zones de contrainte de drainage aux opérations forestières à l'aide des données lidar*, Mémoire, Université Laval, Québec, 62 p.
- [18]. ESRI (2021). *Méthodes de classification des données*, [En ligne] <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- [19]. Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27, p. 861-874. DOI : 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- [20]. Hardy S. (2009) *La vulnérabilité de l'approvisionnement en eau dans l'agglomération parcéniennaise : le cas du sous-système El Alto*, *Cybergeo : European Journal of Géographie* [en ligne], Dossiers vulnérabilité urbaines au sud, document 457, mis en ligne le 20 mai 2009, consulté le 16 février 2015. URL : <http://cybergeo.revues.org/2270> ; DOI : 14.4000/cybergeo.22270
- [21]. Institut National de la Statistique (INS) (2013). *Enquête sur la demande de transport dans le grand Abidjan : enquête ménage (Rapport provisoire)*, Ministère d'état, Ministère du plan et du développement, Abidjan, 64 p.
- [22]. Institut National de la Statistique (INS-SODE) (2014). *Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 2014, Répertoire des localités : District Autonome d'Abidjan*, Abidjan, 13 p.
- [23]. Institut National de la Statistique (INS) (2021). *Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2021, RGPH-Résultats globaux*, URL : https://www.ins.ci/RGP2021/RGPH2021-RESULTATS%20GLOBAUX_VF.pdf, 13 p.
- [24]. Iuchi, H. (2017). Package 'mccr', The Matthews Correlation Coefficient. 3 p.
- [25]. Jenks George F. et Caspall Fred C. (1971). Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction, *Annals of the Association of American Geographers*, 61:2, 217-244, DOI: 10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x
- [26]. Jenson S. K. et Domingue J. O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no 11, p. 1593-1600.
- [27]. Kemppinen J., Niittynen P., Riihimäki H., et al (2018). Modelling soil moisture in a high- latitude landscape using LiDAR and soil data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, (5), 1019-1031.
- [28]. Kozłowski G. (2018). « Anthropocène », CFS asbl, URL : <http://ep.cfsasbl.be/IMG/pdf/anthropocene.pdf>
- [29]. Lachance D., Fortin G. et Dufour T. G. (2021). *Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional – décembre 2021*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction adjointe de la conservation des milieux humides, 70 p. + annexes, [En ligne], [https:// www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/guide-identif-dellimit-milieux-humides.pdf](https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/guide-identif-dellimit-milieux-humides.pdf).
- [30]. Lessard, F. (2020). *Optimisation cartographique de l'hydrographie linéaire fine*. Thèse de doctorat, Université Laval, 97 p
- [31]. Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T. et Ågren, A. M. (2017). Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 31 (26), p. 4660-4668. DOI : 10.1002/hyp.11385.
- [32]. Lindsay J. B., 2016, Efficient hybrid breaching- filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. *Hydrological Processes*, 2016. 30 (6,) 846-857.
- [33]. Lindsay, J. B., et Dhun, K. (2015). Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(3), p. 397–411. DOI:10.1080/13658816.2014.975715.
- [34]. Martz, L. W., et Garbrecht, J. (1998). The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. *Hydrological Processes*, 12 (6), 843– 855. DOI : 10.1002/(SICI)1099-1085(199805)12:6<843::AID-HYP658>3.0.CO;2-R.
- [35]. Martz, L. W., et Garbrecht, J. (1999). An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers and Geosciences*, 25 (7), p. 835–844. DOI : 10.1016/S0098-3004(99)00018-7.
- [36]. Matthews B. W. (1975). Comparison of the predicted and observed secondary structure of T4 phage lysozyme. *Biochimica Biophysica Acta (BBA) Protein Structure*, 405(2), p. 442–51. DOI : 10.1016/0005-2795(75)90109-9.
- [37]. Montoroi, J.P. (2012). *Rôle des sols sur la genèse des inondations*. In *Publications du symposium européen sur les problèmes actuels de la protection contre les inondations de mars 2012*, 6p.
- [38]. Murphy, P. N. C., Ogilvie, J., Meng, F.-R. et Arp, P. (2008). Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22 (12), 1747-1754.
- [39]. Nations Unies (2015). *Accord de Paris*, In : 21ème Conférence des Parties, 40 p.
- [40]. O'callaghan John F., et Mark D. M. (1984). The extraction of ordered vector drainage networks from elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28(1), 323–344. DOI :10.1016/0734-189X(89)90053-4.
- [41]. PNUD, 2020, *Rapport sur le développement humain 2020, La prochaine frontière, le développement humain et l'Anthropocène*, 446 p.
- [42]. Poggio, L. et Soille, P. (2012). Influence of pit removal methods on river network position. *Hydrological Processes*, 2012, (26) 13, 1984-1990.
- [43]. Poppenga, S. K., Worstell, B. B., Stoker, J. M., et Greenlee, S. K. (2010). Using selective drainage methods to extract continuous surface flow from 1-meter lidar-derived digital elevation data. *USGS Scientific Investigations Report 2010-5059*, 2010–5059, 12.
- [44]. Portail Officiel du Gouvernement de Côte d'Ivoire (POGCI), (2022). *Inondation à Abidjan*, https://www.gouv.ci/_actualite-article.php?recordID=8953&d=3
- [45]. Quenault B. (2013). « Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique », *EchoGéo* [En ligne], 24 | 2013, mis en ligne le 10 juillet 2013, consulté le 30 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/13403> ; DOI : 10.4000/echogeo.13403
- [46]. Reghezza M. (2006). *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine parisienne : La métropole parisienne face au risque de crue centennale*, Thèse de Géographie, Université de Nanterre - Paris X, 385p.

- [47]. Seibert J. et McGlynn B. L. (2007). A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water resources research*, vol. 43, no 4.
- [48]. Traoré K. M. (2016). Analyse des vulnérabilités de la ville côtière de San-Pedro (sud-ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Géographie, Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, p. 355.
- [49]. Traoré K. M., Yao K. E. et Adou A. G. (2019). Le fait urbain à l'épreuve des effets du réchauffement climatique : exemple de la crue du fleuve Bandaman à Bouaflé (Centre-ouest de la côte d'ivoire), Actes du colloque en hommage aux professeurs Bonaventure Maurice MENGHO et Marie-Joseph SAMBA KIMBATA, Baluki, 2019 (3ème année), III (5), juin 2019, 28-45.
- [50]. Varin M. (2021). Analyse de l'efficacité de l'indice d'humidité topographique (TWI) à cartographier les milieux humides, Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de SainteFoy inc. (CERFO). Rapport 2021-13. 28 p.
- [51]. Varin, M., Bournival, P., Blanchot, C. et Boulfroy, E. (2017). Identification du réseau hydrologique potentiel à partir du lidar aéroporté. Technote, Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Récupéré de http://cerfo.qc.ca/wpcontent/uploads/2019/09/Technote_2017_02.pdf
- [52]. Villeneuve C. et François R.. (2005). *Vivre les changements climatiques: Quoi de neuf?* Sainte-Foy (Québec): Éditions Multimondes, 382 p.
- [53]. Wallenhorst, N., Robin, J. Y., & Boutinet, J. P. (2019). L'émergence de l'Anthropocène, une révélation étonnante de la condition humaine, 23-36
- [54]. Wang L. et Liu H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (2), 193-213.

Kinakpéfan Michel TRAORE. "Evaluation à l'aide du SAGA Wetness Index de l'inondabilité dans le District Autonome d'Abidjan, Côte d'Ivoire". *International Journal of Humanities and Social Science Invention (IJHSSI)*, vol. 12, no. 4, 2023, pp. 85-96. Journal DOI- 10.35629/7722