



Journal Homepage: - www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/17369

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17369>



RESEARCH ARTICLE

CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'INONDATION PAR DÉBORDEMENT DES COURS D'EAU DANS LA RÉGION SEMI-MONTAGNEUSE DE MAN : APPROCHE PAR TÉLÉDÉTECTION ET ANALYSE MULTICRITÈRE

Kouadio Boyossoro Hélène^{1,2*}, Oularé Sékouba^{1,2}, Boka Kouakou Charles², Miessan Adja Germain^{1,2,3} and Biemi Jean^{1,2}

1. Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG).
2. Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT).
3. Ecole Normale Supérieure d'Abidjan Côte d'Ivoire (ENS), Département des Sciences et Technologies.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 05 June 2023

Final Accepted: 09 July 2023

Published: August 2023

Key words:-

Mapping, Flood risk, Remote sensing, Geographic Information System, Multicriteria analysis, Semi-mountainous region of Man

Abstract

The semi-mountainous region of Man has been affected by recurrent flooding, linked to overflowing waters, since the 2010s in connexion with climatic variability. Numerous material and human damages are linked to these floods. Face to this, this study's aim was to map areas at risk of overflow flooding in the region, with a view to helping manage these floods. Methods used include remote sensing, Geographic Information Systems and multi-criteria analysis. Factors taken into account are rainfall, topography, drainage density and soil types for the hazard, and land-use entities and population exposure for vulnerability. All these factors were mapped using satellite images and soil, demographic and field data. Thematic maps were weighted, standardized and integrated into the GIS on the basis of multi-criteria analysis. Obtained results are hazard, vulnerability and risk maps. These maps were validated by the identification and geolocation of flood-related land features. High-hazard, high-vulnerability and high-risk zones represent 36.56%, 42.39% and 33.94% of the region respectively. High-risk zones cover around 75%, 50% and 30% of the Danané, Man and Logoualé departments respectively. Knowledge of these at-risk areas is an asset for decision-makers in choosing priority actions to be taken against flooding.

Copy Right, IJAR, 2023., All rights reserved.

Introduction:-

En Côte d'Ivoire, plusieurs régions telles que celle d'Abidjan, de Korhogo, de Grand-Lahou, de Tiassale, de Grand-Bassam, de Sinfra et de Man enregistrent des inondations de plus en plus récurrentes depuis 1996. Les conséquences sont graves. Ce sont plus de 198 pertes en vie humaine et 13 disparitions, 3 blessés et d'importants dégâts matériels [1].

Par conséquent plusieurs travaux sur la cartographie des zones à risque d'inondation ont été entreprises notamment ceux de [2], [3], [4] et [5] qui ont mis l'accent sur la cartographie de la vulnérabilité et du risque d'inondation en

Corresponding Author:- Kouadio Boyoyssoro Hélène

Address:- Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT).

milieu urbain. Pour le milieu rural, peu de travaux sont développés notamment ceux de [8] et [7] qui ont porté sur la cartographie du risque d'inondation respectivement dans la région de Man et de Sinfra. Dans la région semi-montagneuse de Man, les inondations sont devenues récurrentes depuis les années 2010 souvent en relation avec le débordement de plusieurs cours d'eau. A titre d'exemple, le débordement du Kô a entraîné des dégâts socio-économiques très importants dans la ville de Man en avril 2015 et en août 2016 [8, 9]. D'où l'intérêt de ce travail qui porte sur la cartographie des zones à risque d'inondation par débordement dans la région semi-montagneuse de Man par utilisation de la télédétection et de l'analyse multicritère en vue de mettre à disposition des décideurs, un outil d'aide à la gestion du territoire face aux inondations par débordement.

Présentation de la zone d'étude

La zone semi-montagneuse de Man est située à l'Ouest de la Côte d'Ivoire dans la région du Tonkpi. Elle couvre les régions administratives de Man, de Danané et de Biankouma. Elle est située à l'Ouest de la faille du Sassandra, entre 7°00 et 8°15 de latitude Nord et 0°00 et 8°15 de longitude Ouest (Fig 1).

Cette région semi-montagne est subdivisée en deux domaines distincts en raison de la végétation, du relief et de la géologie [10, 11, 12]:

- un domaine de pénéplaine au Sud caractérisé par des basses altitudes (200 m et 300 m) perturbée par endroit par quelques collines de 600 m à 750 m d'altitude (collines de fer de Man) avec une importante couverture végétale;
- un domaine à relief très accidenté (850 m et 1000 m) au Nord avec une couverture végétale fortement dégradée. La limite entre ces deux domaines est marquée par l'accident Man-Danané.

La région est soumise à un climat de montagne, très humide (1 100 à 2 300 mm par an) et caractérisé par une longue saison pluvieuse qui dure 8 mois (mars-octobre) et une saison sèche de 4 mois (novembre-février) selon [6].

La région d'étude est drainée dans sa totalité par les affluents du N'zo dont le Ko, orienté généralement N-S. L'importance du drainage et de la profondeur des vallées des collecteurs primaires accentuent l'aspect montagnard du paysage.

La région est soumise à un climat de montagne, très humide avec 1100 à 2300 mm de pluie par an. Plus de 50 % des précipitations tombent au cours des mois d'août et de septembre sur un sol déjà gorgé d'eau à partir du mois de juillet. Cette forte pluviométrie associée à l'aspect montagnard de la région est favorable aux risques naturels dont les glissements de terrain et les inondations dans la région [10, 12].

L'économie de la région est essentiellement basée sur l'agriculture de rente (Cacao, Café et autres), vivrière (riz, banane plantain, légumes et l'élevage [10, 12]. L'activité minière y est aussi développée. En effet la région est située dans une des principales régions minières de la Côte d'Ivoire. La région regroupe à elle seule, environ 2,7 milliards de tonnes de minerais de fer (33 à 46 % Fe) sur 3 milliards de tonnes de minerais estimés pour toute la Côte d'Ivoire [13]. En plus, d'autres accumulations minérales importantes de la région sont le nickel, l'ilménite, le rutile, l'or, le cuivre, le cobalt et le platine [12].

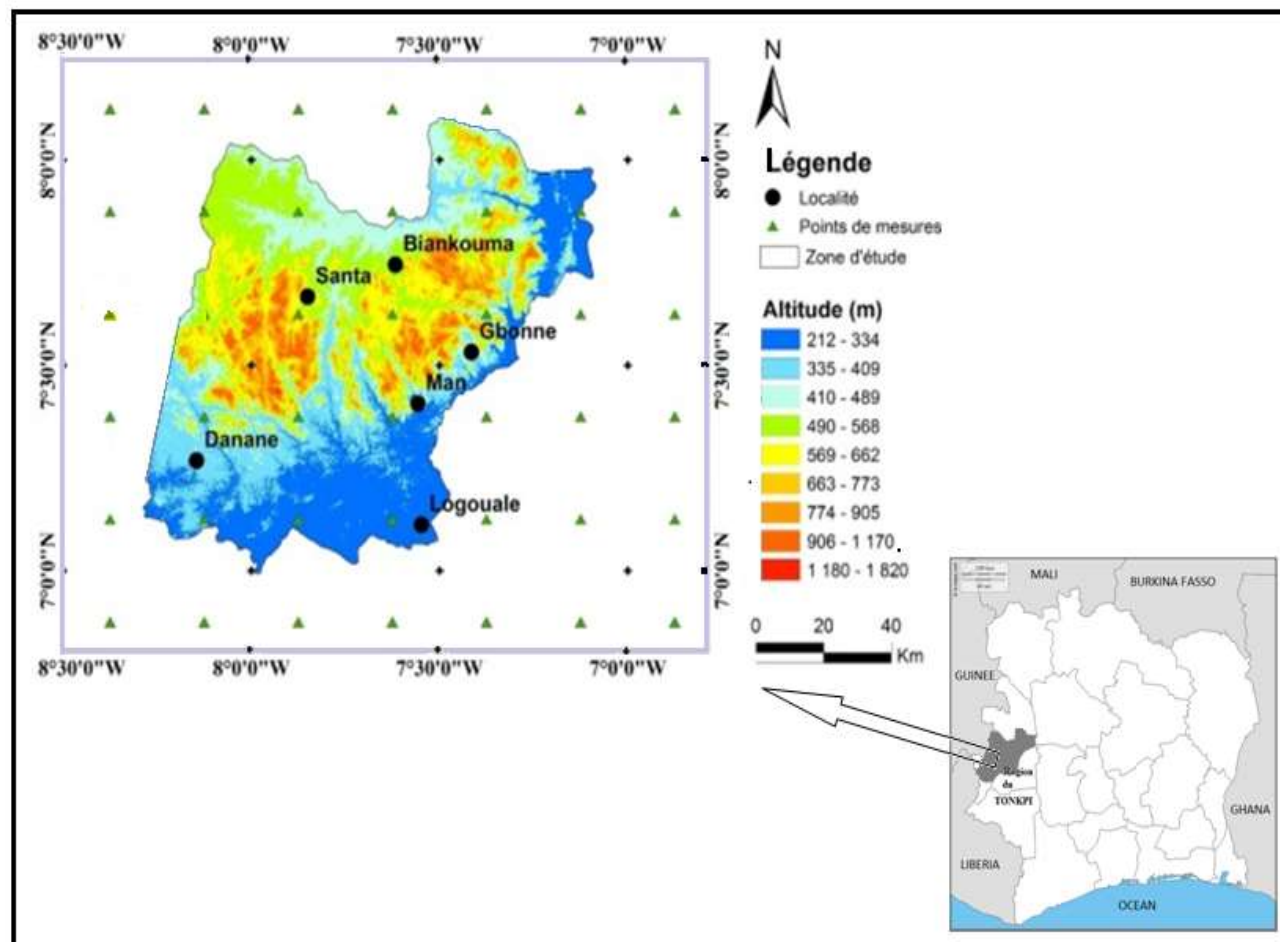


Figure 1:- Carte de localisation de la région semi-montagneuse de Man.

Matériel Et Méthodes:-

Données et matériel

Plusieurs données ont été utilisées pour mener à bien ce travail. Ce sont :

- les données topographiques acquises en format SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de résolution 30 m de 2000 disponible sur le site "<http://www.eosrpO1U.ecs.nasa.gov/srtm/version1/africa>". Ces données permettent d'apprécier l'altimétrie de la région semi-montagneuse de Man, élaborer la carte des pentes et de densité de drainage.
- les données journalières de pluviométrie de 1981 à 2017 de la station synoptique de Man, mesurées par la Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM).
- les données journalières de pluie satellitaire CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) de 1981 à 2017 (sur 42 points de mesures virtuels ou stations pluviométriques virtuelles) et calibrées aux données de SODEXAM. Avec une résolution spatiale de 0,05° soit 5 km, elles sont disponibles sur le site <https://iri.columbia.edu> et ont permis de calculer la répartition spatiale des hauteurs pluviométriques. Au pas mensuel, ces données sont bien corrélées aux données in situ obtenues à la SODEXAM de la région avec un coefficient de corrélation 96% selon [14].
- Une image OLI de LANDSAT 8 (scène 198/55 de janvier 2018) de résolution spatiale 30 m téléchargée sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov> pour la cartographie de l'occupation du sol,
- les données démographiques de la région issues du recensement de 2014 et obtenues auprès de [15]. Elles ont servi au calcul de la densité de population par département.
- l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire de [16] au 1/500 000 utilisées pour extraire les types de sol,
- les données granulométriques des sols de [17] pour caractériser les types de sols.

Les logiciels utilisés pour le traitement de ces différentes données sont :

- ArcGIS 10.8 pour l'élaboration des cartes thématiques et les traitements dans le SIG;
- Envi 5.3 pour les traitements numériques des images Landsat OLI et images SRTM.

Le matériel de terrain est constitué d'un GPS Garmin Etrex Vista, précision 3 m et d'un appareil photo numérique.

Méthodes:-

Plusieurs facteurs ou critères qualitatifs et quantitatifs entrent en jeu pour l'évaluation du risque d'inondation par débordement. Il est donc nécessaire de recourir à des méthodes d'aide à la décision pour faciliter les choix nécessaires à l'évaluation [18]. La méthode d'analyse multicritère AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty [19], [20], a été choisie à cet effet car elle permet de faire la vérification des jugements d'experts. La méthodologie adoptée dans le présent travail comporte globalement les étapes suivantes :

- Sélection et élaboration des facteurs ou critères du risque d'inondation
- Application de la d'analyse multicritère AHP [19]
- Agrégation des facteurs du risque d'inondation par débordement.

Sélection et élaboration des facteurs ou critères du risque d'inondation

Sélection des facteurs ou critères

Les facteurs du risque d'inondation sont repartis en deux grands groupes : les facteurs d'aléa et les facteurs de vulnérabilité. L'aléa peut être défini comme une menace d'origine naturelle, technologique ou civile qui pèse sur l'homme, ses biens ou sur l'environnement. La vulnérabilité et les enjeux sont liés à la présence effective de l'homme et ses biens (habitations, activités économiques, infrastructures, etc.). Sur la base des travaux antérieurs [6, 21; 22, 18, 23, 24, 25, 26] et de la disponibilité des données, plusieurs facteurs d'aléa et de vulnérabilité ont été retenus pour l'étude du risque d'inondation par débordement. Ce sont l'intensité pluviométrique (isohyète), la topographie, la densité de drainage et les types de sol pour l'aléa. Un facteur important pour l'inondation par débordement est le débit des cours d'eau selon [27]. Ce facteur dépend de la lame d'eau précipitée selon [28] qui a montré dans ces travaux que le rendement annuel des cours d'eau de la zone d'étude est très corrélé à la pluviométrie. De plus, la discontinuité spatio-temporelle des données de débits dans la région semi-montagneuse de Man est notable. Par conséquent, les débits des cours d'eau n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation de l'aléa.

Quant à la vulnérabilité, elle a été évaluée à partir de la densité de population et de l'exposition de l'occupation du sol qui traduit pour une grande part les activités socio-économiques. Les facteurs de vulnérabilités tels que le niveau de pauvreté des populations, leurs niveaux d'instruction et de perception, l'implication des femmes n'ont pu être pris en compte en raison de la non disponibilité des données.

Elaboration des facteurs ou critères

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour élaborer ou cartographier les facteurs d'aléa (pluviométrie, topographie (pente), densité de drainage, types de sols) et les facteurs de vulnérabilité (densité de population et occupation du sol). La pente est extraite de l'image SRTM à l'aide du logiciel ArcGIS (ou QGIS à voir...). Par ailleurs, le réseau hydrographique a été également extrait de cette image. Le réseau hydrographique a servi par la suite à produire la carte de densité de drainage avec le logiciel ArcGis (ou QGIS). Pour la pluviométrie, les hauteurs de pluie de source satellitaire (données CHIRPS) ont été traitées pour avoir la carte des isohyètes de la région. La carte des types de sols de la zone d'étude a été numérisée à partir d'une carte existante de la région du Tonkpi à l'échelle 1/500000 [16]. Les propriétés granulométriques de ces types de sols, qui ont une influence sur la rétention de l'eau, ont été décrites à partir de la notice explicative de la carte des sols.

Pour l'occupation du sol, les prétraitements ont consisté à appliquer une correction atmosphérique et radiométrique à l'image OLI respectivement à partir de l'outil « Flash atmosphérique » et « Radiometric Calibration » du logiciel Envi afin d'affiner la qualité visuelle en améliorant le contraste de cette dernière. Ensuite, au terme de plusieurs compositions colorées, la composition 5-4-2 de l'image OLI a été choisie car elle permet de faire une meilleure distinction des entités d'occupation du sol. Puis un maximum de parcelles d'entraînements a été identifié et délimité sur cette image. Ces parcelles homogènes et représentatives ont été choisies en fonction de l'accessibilité du terrain. Puis lors de la mission de terrain du 18 au 23 février 2019 dans la région, à l'aide d'un GPS nous avons vérifié d'une part si les points définis sur les cartes au laboratoire correspondent à la réalité terrain et d'autre part la géo-localisation des points sur le terrain pour la validation de la carte finale. La dernière étape est une classification supervisée sur la base des parcelles d'entraînement validées sur le terrain, par la méthode de maximum de [29]. Les classes d'occupation du sol obtenues ont été traduites en classes de vulnérabilité. En effet, la vulnérabilité de l'occupation du sol face aux inondations traduit le fait que des dommages économiques directs et indirects, et plus

ou moins sévères, apparaissent lorsque l'eau inonde une parcelle de terrain [30]. Selon le même auteur, les dommages potentiels de l'occupation du sol dus aux inondations peuvent être calculés en utilisant l'approche développée par [31] (Fig 2).

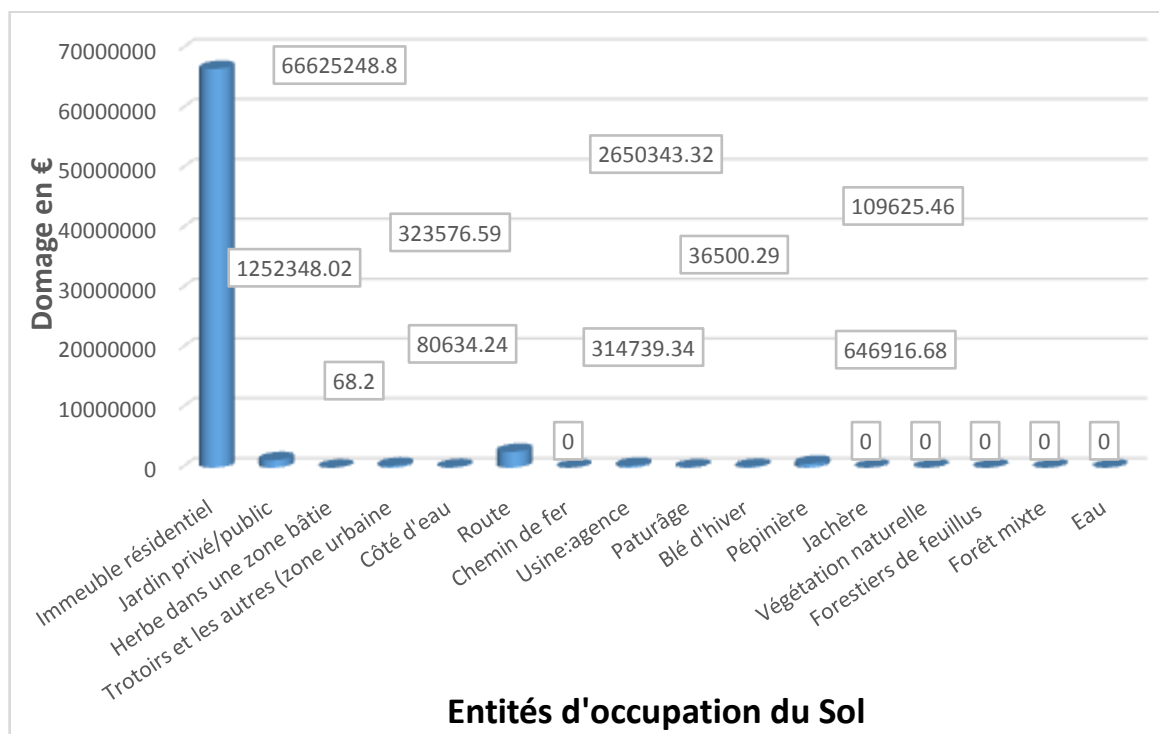


Figure 2:- Dommage en fonction du type d'occupation du sol (Sande, 2001[30], modifié).

Application de la d'analyse multicritère AHP

Hierarchisation des critères

La structure hiérarchique du risque d'inondation par débordement dans la région semi-montagneuse de Man selon la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) est donnée par la figure 3. Cette étape est suivie de celle de la classification et de la standardisation des critères [32, 21, 33, 24, 11, 25, 34].

Classification et pondération des critères

La classification des critères est une étape qui consiste à rendre les facteurs (qualitatif et quantitatif) comparables. À partir de la construction d'une matrice carrée, on évalue l'importance relative d'un facteur par rapport à un autre, en utilisant pour cela, une échelle adéquate telle proposée par [19] (Tableau 1).

Tableau 1:- Échelle de comparaison binaire [19].

Degré d'importance numérique	Degré d'importance verbale
1	Egale importance
3	Un élément est plus important (sensible) que l'autre
5	Un élément est plus important (sensible) que l'autre
7	Un élément est beaucoup plus important (sensible) que l'autre
9	Un élément est absolument plus important (sensible) que l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Valeurs réciproques des appréciations précédentes

Les tableaux 2 et 3 montrent respectivement les matrices de comparaison par paire des critères d'aléa et de vulnérabilité où les valeurs de la diagonale sont égales à 1. Les valeurs de chaque ligne sont comparées à chaque colonne pour définir l'importance relative de chaque facteur afin d'obtenir une valeur.

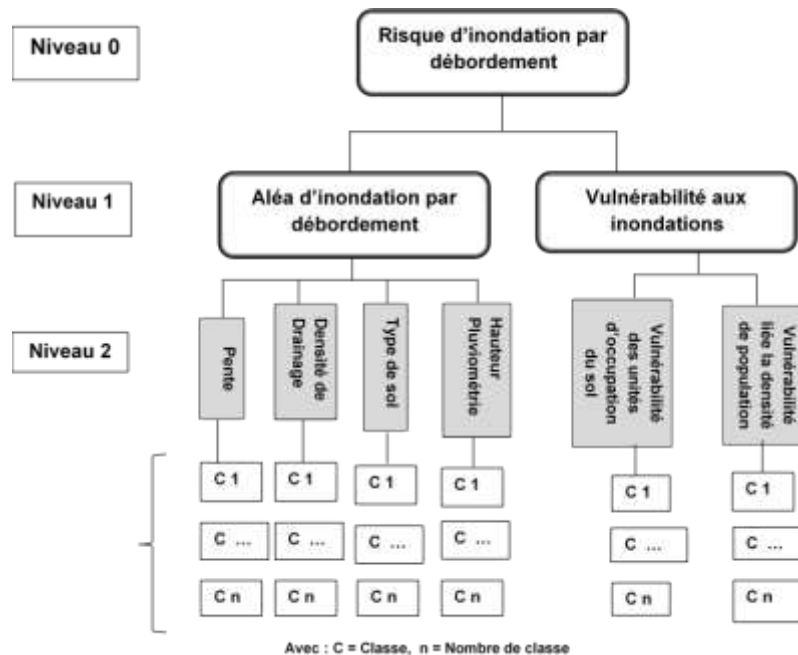


Figure 3:- Hiérarchie des paramètres retenus pour le risque d'inondation par débordement.

Tableau 2:- Matrice de comparaison par paire des critères d'aléa.

	HP	P	DD	S
HP	1	3	5	5
P	1/3	1	3	3
DD	1/5	1/3	1	3
S	1/5	1/3	1/3	1

Avec **HP** = Hauteur de pluie, **P** = Pente, **DD** = Densité de Drainage, **S** = Type de sol

Tableau 3:- Matrice de comparaison par paire des critères de vulnérabilité (V).

	OS	DP
OS	1	3
DP	1/3	1

Avec **OS** = Occupation du Sol, **DP** = Densité de Population

Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chacune et le vecteur propre lui correspondant. Le vecteur propre (V_p) ou le coefficient de pondération (C_p) indique l'ordre de priorité des facteurs étudiés. Ces paramètres sont calculés selon les équations 1 et 2. Ils sont importants pour l'évaluation de la probabilité et seront utilisés pour indiquer l'importance relative de chaque facteur induisant l'inondation.

$$V_p = \sqrt[k]{W_1 \times \dots \times W_k} \quad (1)$$

k = nombre de paramètres comparé et W_k = principales notes attribuées aux paramètres

$$C_p = \frac{V_p}{V_{p1} + \dots + V_{pk}} \quad (2)$$

La somme des C_p de tous les paramètres d'une matrice doit être égale à 1. Cette étape a été suivie par le calcul de $\lambda_{\max}$, Ic (indice de cohérence) et Rc (Ratio de cohérence). Les valeurs calculées des $\lambda_{\max}$, Ic et Rc pour les facteurs d'aléa et de vulnérabilités sont consignés respectivement dans les tableaux 4 et 5.

Lorsque $Rc < 10\%$, cela montre que les jugements des experts sont cohérents. Le Rc calculé est de $0,073 = 7,3\%$ ($< 10\%$) pour les facteurs d'aléa et de 0 pour les facteurs de vulnérabilité (Tableau 6). Par conséquent, les jugements pour ces deux types de facteurs sont qualifiés de cohérents.

Tableau 4:- Matrice de pondération des facteurs d'aléa.

	HP	P	DD	S		V _p	C _p (poids)
HP	1	3	5	5		2,94	0,55
P	1/3	1	3	3		1,32	0,25
DD	1/5	1/3	1	3		0,67	0,13
S	1/5	1/3	1/3	1		0,39	0,07
Σ	1,73	4,66	9,33	12		5.31	1
K = 4		Ia = 0,90					
λ _{max} = 4,197				Ic = 0,065			Rc = 0,073

Tableau 5:- Matrice de pondération des facteurs de vulnérabilité.

	OS	DP		V _p	C _p (poids)
OS	1	3		1.73	0.5
DP	1/3	1		0.58	0.5
Σ	1.33	4		2.31	1
K = 2		Ia = 0			
λ _{max} = 2.00				Ic = 0	Rc = 0

L'équation 3 de [35], qui exprime la combinaison linéaire des couches thématiques avec leurs poids respectifs, est utilisée pour avoir la fonction « d'aléa inondation par débordement » et la vulnérabilité

$$I = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij} \quad (3)$$

Avec I : l'indice lié à l'indicateur, W_j : le poids du paramètre j, w_{ij} : le poids de la classe i dans le paramètre j et n : le nombre de paramètres.

Ainsi, la fonction « d'aléa inondation par débordement » s'écrit selon l'équation 4 :

AID (Aléa Inondation par Débordement) = (0,55xIntensité pluviométrique + 0,25xPente + 0,13xDensité de drainage + 0,07xtypes de sol).....(4)

En ce qui concerne la vulnérabilité, elle est donnée par l'équation 5 suivante :

V = (0,5xOccupation du Sol + 0,5xDensité de Population).....(5)

En outre il faut noter que pour chaque facteur ou critère, il peut être défini une ou plusieurs classes. Pour cette étude le nombre de classe défini est 5. Ce nombre a été défini en s'appuyant sur les travaux antérieurs [21, 32, 24, 11, 25, 34]. Les poids attribués aux différentes classes des critères d'aléa et de vulnérabilité sont consignés respectivement dans les tableaux 6 et 7.

Tableau 6:- Classes des critères d'aléa et leur poids.

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Codes de sensibilité	Poids (Cp)
Aléa d'inondation par débordement	Pente (P) en %	Très faible	< 6.5	9	0,25
		Faible	6.5– 12	7	
		Moyen	12 – 19	5	
		Forte	19 – 27	3	
		Très forte	> 27	1	
	Hauteur Pluviométrique (HP)	Très faible	<1500	1	0,55
		Faible	15000 - 1650	3	
		Moyen	1650 - 1796	5	
		Forte	1796 – 1942	7	
		Très forte	≥ 1942	9	
	Type de sol (S)	Très Faible	Sol hydromorphe à gley et psœudogley	1	0,07

		Faible	Sol remanié typique	3	
		Moyen	Sol remanié induré	5	
		Fort	Sol remanié et rajeuni	7	
		Très forte	Sol remanié faiblement induré et appauvri	9	
		Très forte	Sol remanié	9	
		Très forte	Sol avec présence de buttes cuirassées et de sol lithique sur cuirasse et carapace	9	
	Densité de drainage (DD) (km/km ²)	Très faible	< 2.82	1	0,13
		Faible	2.82 – 3.28	3	
		Moyen	3.28 – 3.88	5	
		Forte	3.88 – 5.59	7	
		Très forte	> 5.59	9	

Tableau 7:- Classes des critères de vulnérabilité et leur poids.

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Code de vulnérabilité	Poids (Cp)
Vulnérabilité	Occupation du sol	Très faible	Eau	0	0,5
		Faible	Forêt dense	1	
		Faible	Affleurements/sols minéralisés	1	
		Moyen	Plaine inondable ou incluse	5	
		Forte	Forêts dégradées/cultures	7	
		Très fort	Habitats/sols nus	9	
	Densité de population	Très faible	< 18	1	0,5
		Faible	18- 39	3	
		Moyen	39 - 46	5	
		Forte	46 - 61	7	
		Très fort	> 61	9	

Agrégation des facteurs du risque d'inondation par débordement

La spatialisation du risque d'inondation par débordement (RID) a été déterminée utilisant la méthode de combinaison linéaire ou WLC method [35]). Cette méthode exprime la combinaison linéaire des couches thématiques avec leurs poids respectifs selon l'équation (6).

$$\text{RID} = \text{AID} + \text{V} = ((0,55 \times \text{Intensité pluviométrique} + 0,25 \times \text{Pente} + 0,13 \times \text{Densité de drainage} + 0,07 \times \text{types de sol}) + (0,5 \times \text{Occupation du Sol} + 0,5 \times \text{Densité de Population})) \dots (6)$$

Avec : RID = Risque d'Inondation par Débordement

AID = Aléa Inondation par Débordement

V = Vulnérabilité

Toutes les couches ou cartes thématiques, citées l'Eq.6, ont été projetées dans le même système de projection (UTM WGS 84) pour leur intégration dans le SIG ArcGIS avec le module Spatial Analyst.

La validation de la carte de risque s'est faite lors d'une mission qui s'est tenue du 18 au 23 février 2019. Au cours de cette étude de terrain, une identification d'indices d'inondation antérieurs (zone inondée, trace d'eau sur les maisons, maisons abandonnées, etc...), puis leur géolocalisation ont été effectuées dans la zone d'étude à l'aide d'un GPS. La projection de ces indices sur la carte de risque permet de valider les zones inondables.

Résultats Et Discussion:-

Analyse spatiale des facteurs d'aléa et de vulnérabilité

Les facteurs d'aléa pris en compte sont la pente, l'intensité pluviométrique, la densité de drainage.

La carte de pente, présentant 5 classes, montre des inclinaisons de pente allant de 0 à plus de 27% (Fig 4a). Les valeurs d'inclinaison de pente très faible et faible (<12%) occupent environ 45% de la zone d'étude. Ces valeurs de pente faibles contribuent fortement à l'accumulation des eaux et par conséquent à l'occurrence des inondations [25]). Les inclinaisons de pente moyennes à forte se trouvent essentiellement au niveau de la zone de montagne (altitude comprise en 569 m et 1820 m) qui se localise au centre de la zone d'étude. Ces zones sont plus propices au ruissellement et couvrent pratiquement presque la moitié des départements de Man, Danané, Biankouma, Sangouiné et Gbomé.

La carte des isohyètes (Fig 4b) traduit l'intensité pluviométrique sur la zone d'étude. Cette carte montre que la majeure partie de la région est soumise à une forte pluviométrie (>1500 mm) qui suit un gradient croissant du Nord-est vers le Sud-ouest. Le département de Danané qui se trouve à l'extrême sud-ouest connaît la plus forte pluviométrie (≥ 1942 mm).

La carte de densité de drainage (Fig 4c) présente des valeurs qui varient de 0 à plus de 5.52 avec une distribution spatiale similaire à celle de la pente. En effet, les plus fortes valeurs (>3.28) se retrouvent au niveau des zones montagneuses qui présentent un fort degré de fracturation [13]. Cela s'explique par le fait que les cours d'eau se logent généralement dans les zones de fracturation selon [36].

La carte de types de sol (Fig 4d) montre que les types de sol dans la région étudiée sont des sols tropicaux essentiellement remaniés et des sols hydromorphes [17] dont les caractéristiques sont données par le tableau 8.

Tableaux 8:- Caractéristiques des types de sol de la région [17].

	% Sable	% Limon	% Argile	Nom textural
Sol remanié typique	60,8	13,9	24,9	Sable argile
Sol remanié et rajeuni	35,5	30,5	26,1	Sable limon argile
Sol remanié induré	45,96	20,52	24,8	Sable limon argile
Sol remanié faiblement induré et appauvri	41,18	15,77	43,24	Argile sableux
Sol remanié	41,18	15,77	43,24	Argile sableux
Sol hydromorphe à gley et pseudo-gley	61,7	14	22,8	Sable argile
Sol avec présence de buttes cuirassées et de sol lithique sur cuirasse et carapace	41,18	15,77	43,24	Argile sableux

Ces sols, essentiellement remaniés, contiennent tous un important taux d'argile supérieur à 22% et présentent un fort taux d'imperméabilité qui n'est pas favorable à l'infiltration. Ces sols pourraient par conséquent être propices aux inondations. Parmi eux, les sols Sol remanié faiblement induré et appauvri, les sols avec présence de buttes cuirassées et les sols remaniés avec un taux d'argile supérieur à 40% sont les plus imperméables et donc, plus propices aux inondations. A côté des sols remaniés, se trouvent des sols hydromorphes qui sont des sols saturés en eau et propices aux inondations.

Les facteurs de vulnérabilité utilisés sont les dommages potentiels des inondations aux entités d'occupation du sol et aux populations.

Les entités d'occupation du sol dans la région semi-montagneuse de Man sont la forêt dense, la forêt dégradée/culture, l'habitats/sols nus, les affleurements/sols minéralisés, les plaines inondables ou incluses et l'eau.

La forêt dense est une forêt naturelle qui regroupe essentiellement les forêts sacrées, les forêts classées et les forêts reconstituées (Fig 5a). Ces forêts font quelques fois l'objet de visite des exploitants forestiers et de guérisseurs, garants de la tradition à la recherche de plantes médicinales.

La forêt dégradée/culture, avec un aspect plus clairsemé, est une mosaïque de forêt et de cultures (Fig 5b). Elle est issue de la dégradation de la forêt dense en liaison avec les activités anthropiques. Des plantations de diverses cultures de rente (cacao, café, hévéa, etc.) et vivrières (Riz, Manioc, bananes plantains, etc.), se trouvent en son sein.

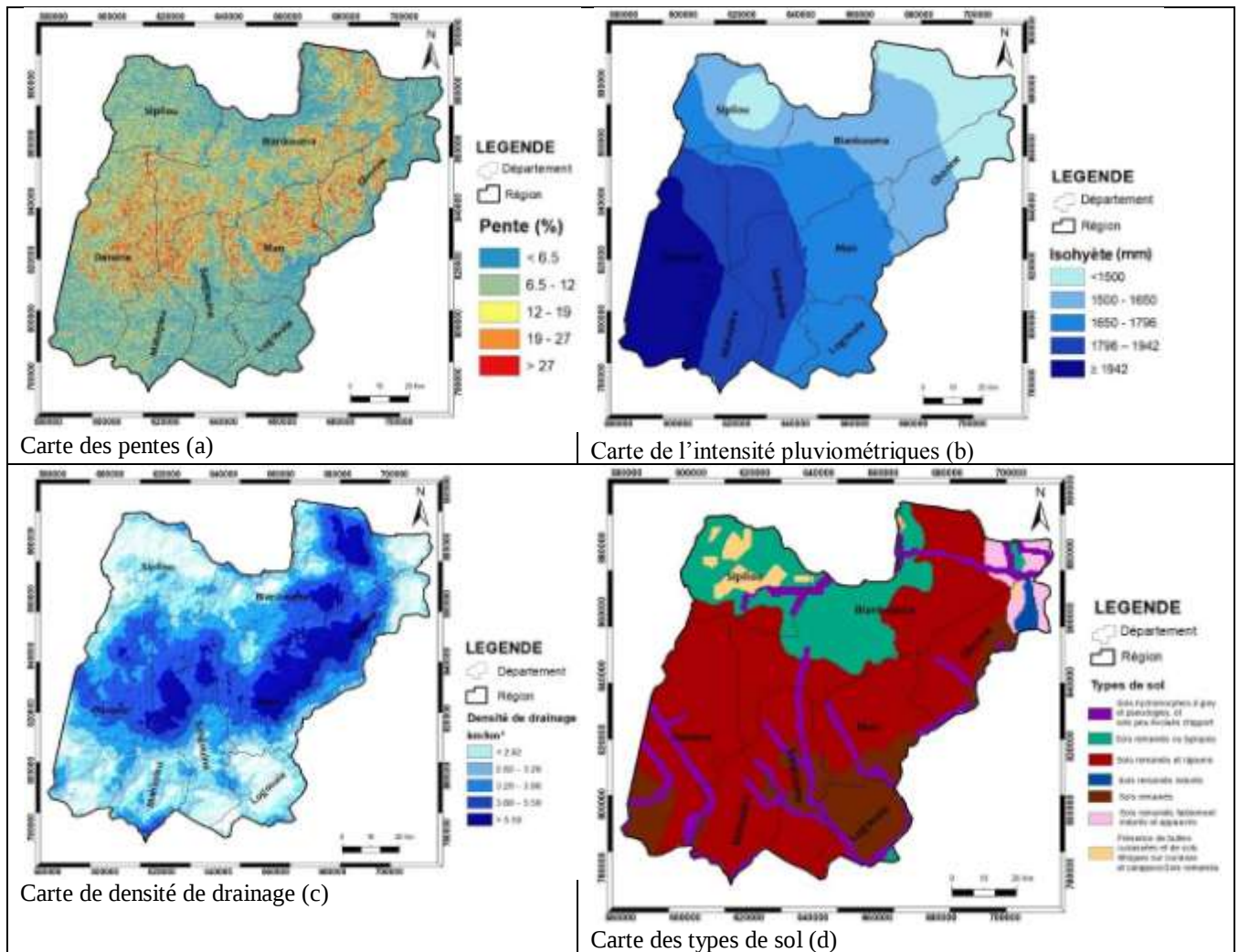


Figure 4:- Cartes des facteurs d'aléa inondation.

Les affleurements/sols minéralisés regroupent les affleurements rocheux constitués des chaînes de montagne de dômes granitiques (Fig 5c).

L'habitat/sols nus est l'ensemble des localités (villes, villages, campements avec des espaces publics comme les marchés), des infrastructures, des voies de communication (routes bitumées et non bitumées, pistes) et des zones de pâturages (Fig 5d).

Les plaines inondables ou incluses sont les bas-fonds, souvent occupées par l'eau et ne sont pas trop exploitées pour l'agriculture (Fig 5e). Cependant, quelques-uns de ces bas-fonds sont utilisés pour la riziculture et la culture maraîchère.

L'eau regroupe les cours d'eau de la région. Ces cours d'eau sont souvent bordés de forêt (Fig 5f) et cela les rend difficilement visibles sur l'image satellitaire de résolution 30 m qui a été utilisée pour la cartographie de l'occupation du sol.

La distribution spatiale de ces entités est donnée à la figure 6a.



Figure 5:- Différentes entités d'occupation du sol dans la région semi-montagneuse de Man.

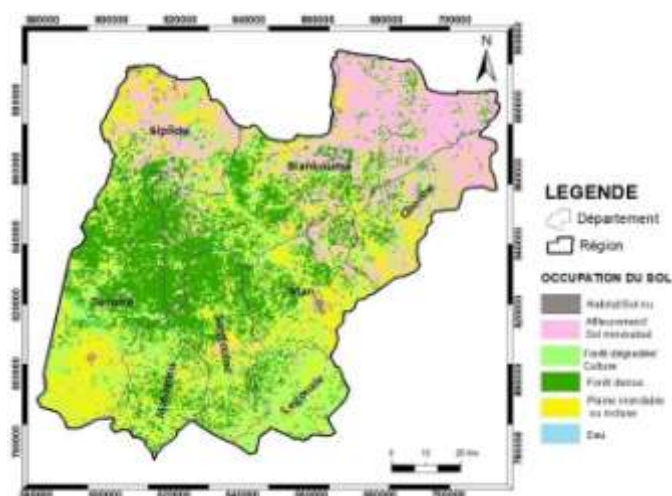
En terme de vulnérabilité des entités d'occupation (Fig 6b), déterminée sur la base des travaux antérieurs, de ceux de [31] et de l'échelle de Saaty, la classe habitats/sols, qui regroupe les infrastructures socio-économiques (résidences, bureaux, écoles, hôpital, routes, etc.), présentent la plus forte vulnérabilité. Ensuite, il y a la classe forêts dégradées/culture qui est constituée essentiellement des plantations (cacao, café, hévéa, vivriers, pâturages, etc.) et qui présente une forte vulnérabilité. Puis vient la classe plaine inondable ou incluse qui est souvent utilisée pour la riziculture de bas-fond et les cultures de maraichères et qui présente une vulnérabilité moyenne. Les classes de forêt dense et des affleurements/sols minéralisés ont une vulnérabilité faible. Quant à la classe eau, elle présente une vulnérabilité nulle.

Pour la densité de population (D_p) dans la région semi-montagneuse de Man (Fig 6c), elle varie de 0 à plus de 61 habitants/km² (hab./km²) Elle est répartie sur 5 classes qui traduisent différents niveaux de vulnérabilité et qui sont :

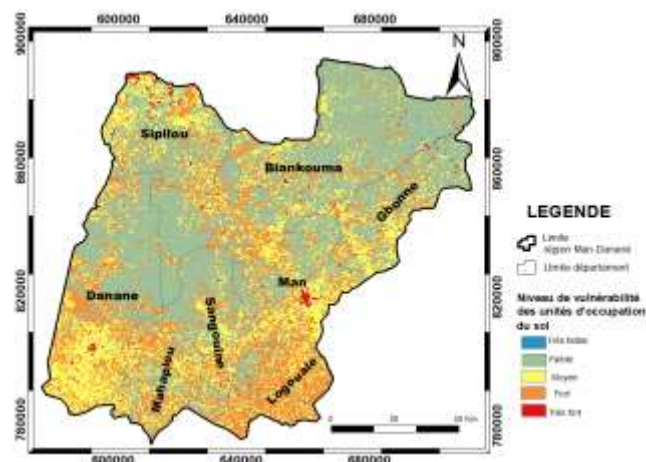
- $D_p < 18$ hab./km² : Très faible vulnérabilité
- $18 < D_p < 39$ hab./km² : Faible vulnérabilité
- $39 < D_p < 46$ hab./km² : Vulnérabilité moyenne
- $46 < D_p < 61$ hab./km² : Forte vulnérabilité
- $D_p > 61$ hab./km² : Très forte vulnérabilité

La très faible vulnérabilité se voit au niveau du département de Biankouma. La faible et moyenne vulnérabilité couvre les départements de Gbomé, de Sipilou et de Sangouiné. La forte vulnérabilité se retrouvent dans les

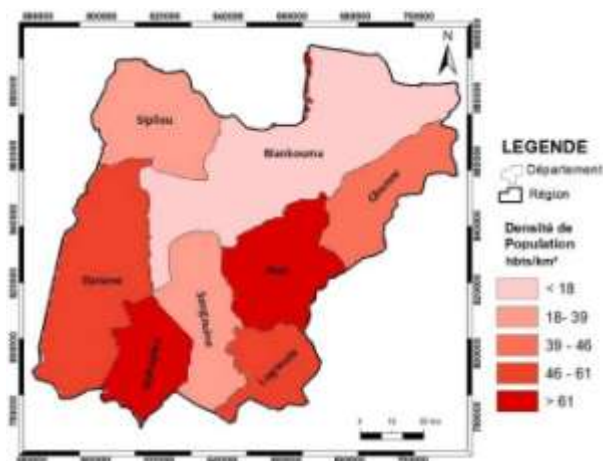
départements de Man, de Logoualé, de Mahapleu et de Danané qui ont une densité de population supérieure à 46 hab./km².



Carte d'occupation du sol (a)



Carte de vulnérabilité des entités d'occupation du sol (b)



Carte de densité de population (c).

Figure 6:- Cartes des facteurs de vulnérabilité à l'inondation.

Analyse spatiale du risque d'inondation par débordement

Analyse de l'Aléa

La carte d'aléa (Fig 7a) présente différents niveaux d'aléas qui suivent une évolution croissante du Nord-Est vers le Sud-Ouest et qui se présente comme suit :

- le faible degré d'aléa couvre une grande partie des départements de Biankouma, de Gbonné, de Logoualé et Sipilou et une petite partie du département de Man. Ces zones représentent 39,52% de la zone d'étude.
- le degré moyen d'aléa couvre 23,92% de la zone étudiée. Il touche essentiellement une partie des départements de Biankouma, de Gbonné, de Logoualé, Sipilou et une grande partie du département de Man.
- le fort degré d'aléa s'étend sur 36,56% de la région. Il affecte les départements de Danané, de Sangouiné, de Mahapleu, une très grande partie du département de Man et le Sud de Biankouma. Cela est dû à la forte pluviométrie dans ces zones.

Aussi faut-il remarquer que la zone centrale du secteur d'étude est soumise à un aléa moyen à fort. Cela est dû au relief très accidenté de cette zone centrale et qui fait ressortir le caractère déterminant de la pente dans l'aléa inondation après l'intensité pluviométrique.

La zone d'étude est couverte dans sa majorité par un niveau d'aléa moyen à très fort.

Analyse de la vulnérabilité

La carte de vulnérabilité (Fig 7b) présente 5 classes qui vont de la vulnérabilité très faible à la très forte vulnérabilité.

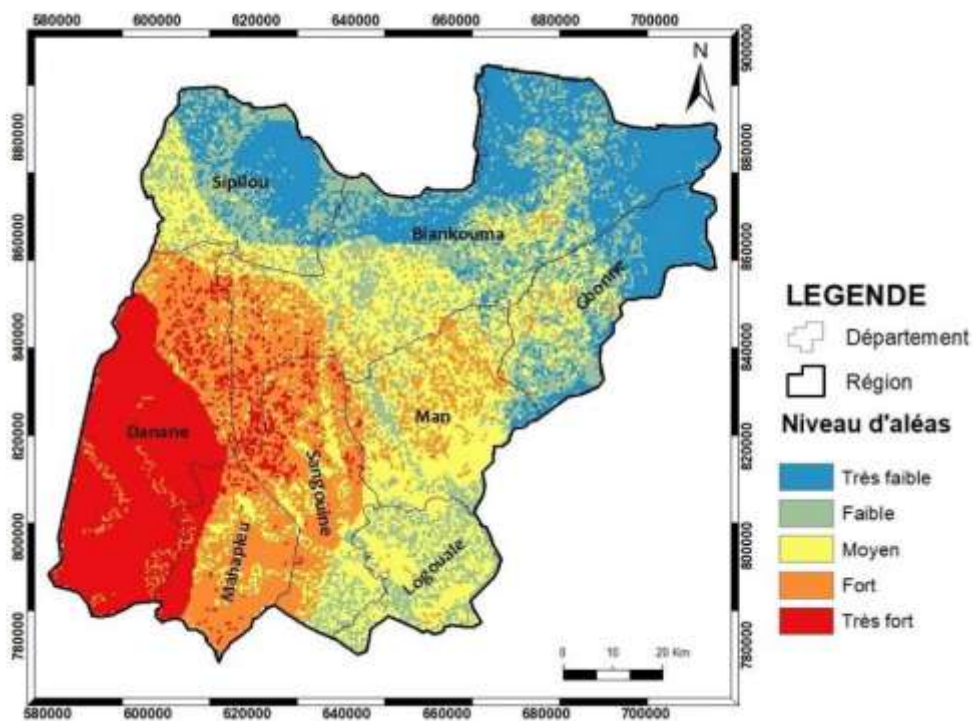
Les zones à faible à moyenne vulnérabilité couvrent la zone centrale du secteur d'étude qui s'étend majoritairement sur le département de Biankouma et le Nord de Danané. Ces zones qui couvrent 58% de la zone d'étude, représentent le prolongement du Fouta Djallon en Côte d'Ivoire et présentent des inclinaisons de pente élevées supérieures à 19%. En effet, elles sont le lieu des affleurements rocheux non habitables dont les versants ne sont souvent utilisés que pour les produits vivriers.

Les zones à forte vulnérabilité (42% de la zone étudiée) s'étendent essentiellement sur les départements de Man, Danané, Mahapleu, Sangouiné et Logoualé qui présentent d'importantes caractéristiques socio-économiques (fortes densités de population, importantes activités primaires et tertiaires). Les principales villes ont des caractéristiques urbaines plus développées. Dans ces zones, la pente des terrains est généralement faible (< 12%)

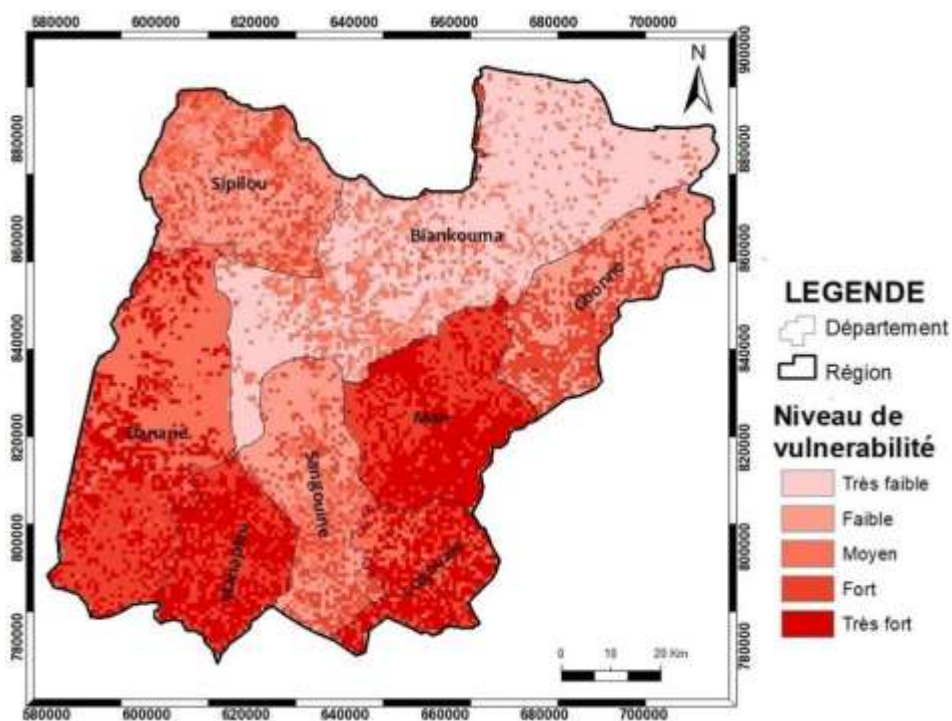
Analyse spatiale du risque d'inondation

La carte de risque d'inondation par débordement obtenue (Fig 8) présente 5 niveaux de risque du très faible au très fort. Le faible à moyen risque touchent les départements de Biankouma, de Sipilou, de Gbonné et de Sangouiné. Les zones concernées occupent 66% de la zone d'étude. Ces zones sont généralement à faible pluviométrie, à forte pente et à vulnérabilité socio-économique faible.

Le fort risque couvre essentiellement les départements de Danané, de Man et Logoualé respectivement dans les proportions d'environ 75%, 50% et 30%. L'ensemble de ces zones représente près de 34% de la zone d'étude. Dans ces zones, généralement les pentes sont faibles, la pluviométrie est forte, la densité de drainage est forte et la vulnérabilité socio-économique est forte. La ville de Man est une référence dans cette zone car elle subit le débordement fréquent du Kô dans ces dernières décennies. En effet, dans la ville de Man, le quartier Kennedy, une des zones les plus impactées, montre des indices des dégâts socio-économiques importants liés à ces débordements récurrents du Kô depuis 2003. Les dégâts concernent la destruction et l'abandon des habitats (Fig 9) et des pertes en vie humaine. En 2007, l'inondation a emporté un enfant.



Carte d'aléa d'inondation par débordement (a)



Carte de vulnérabilité (b)

Figure 7:- Carte des facteurs de risque d'inondation dans semi-montagneuse de Man.

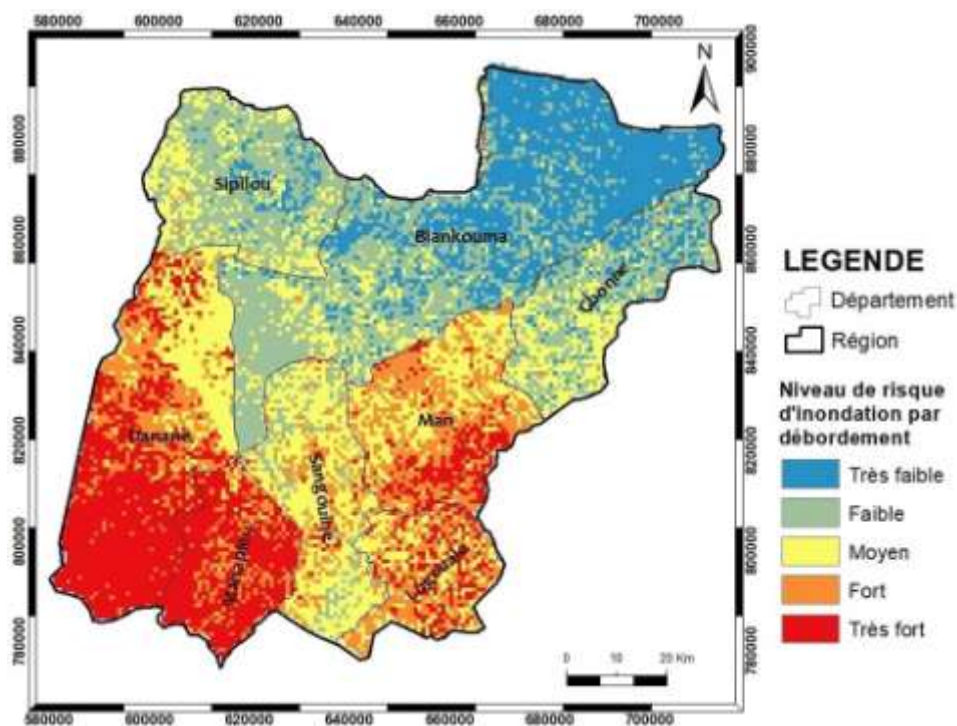


Figure 8:- Carte de risque d'inondation par débordement.



Vue d'ensemble de la zone d'inondation récurrente (a)



Traces laissées par la hauteur d'eau sur la maison pendant les inondations et dépôts sauvages (b)
Figure 9:- Indices liés au débordement régulier du Kô au quartier Kennedy à Man (Photos prises le 22/02/2019) :

Discussion:-

Cette étude du risque d'inondation par débordement dans la région semi-montagneuse de Man s'est basée sur la combinaison de facteurs d'aléa et de vulnérabilité (liée à la densité de population et aux entités d'occupation du sol dans un SIG en utilisant l'analyse multicritère de Saaty. Plusieurs auteurs dont [23], [25], [26] ont également utilisé cette méthode pour cartographier le risque d'inondation en Côte d'Ivoire respectivement dans les régions de Divo, de Sinfra et d'Abidjan. C'est une méthode d'aide à la décision qui a fait ses preuves dans la résolution de problèmes variés et complexes et qui permet de vérifier la cohérence des choix relatifs aux différents critères [14]. Cependant, elle a l'inconvénient de créer beaucoup de subjectivité lors de la pondération des facteurs qui est fonction de la sensibilité de l'expert et de sa connaissance du phénomène qui déterminent son appréciation [37].

Les résultats montrent que près de 25% de la zone étudiée est couverte par un fort risque qui se localise essentiellement dans les régions de Danané, de Man et de Logoualé. Ces zones représentent les zones à fort aléa et à forte vulnérabilité caractérisées par des faibles pentes, une forte pluviométrie et un important enjeu socio-économique.

Les facteurs d'aléa pris en compte sont la pluie, la pente, la densité de drainage et la nature des sols en accord avec les travaux de [26] qui a utilisé les mêmes facteurs pour la cartographie du risque d'inondation dans la ville d'Abidjan. La pente et la densité de drainage ont été obtenues à partir des données satellitaires SRTM qui ne traduisent pas toujours la réalité « terrain » de la dénivellation entre deux pixels car influencées par la canopée et tendent à minimiser la pente quelle que soit la précision d'interpolation [38], [14]. L'utilisation d'images Lidar qui ont une très haute résolution et une grande précision pourrait donner une carte d'aléa plus affinée.

Les données de pluie utilisées sont les données CHIRPS qui sont calibrées sur les stations au sol de SODEXAM. Ces données ont l'avantage d'être continues selon une maille régulière et permettent une meilleure spatialisation de la pluviométrie qui est nécessaire pour le suivi et la gestion des inondations. Ce qui n'est souvent pas le cas avec les données in situ de la SODEXAM qui sont discontinues spatialement et temporellement. Les données pluviométriques sont souvent manquantes, ou les relevés existants peuvent comporter de grandes lacunes ou incohérences. D'autres solutions sont nécessaires dans ces situations. Les jeux de données maillées sur les précipitations obtenues par satellite sont une excellente option et ces deux dernières sources sont d'ailleurs certainement plus robustes que les données in situ [39].

La méthode IDW a été utilisée pour l'interpolation de la pluviométrie. Cette méthode, selon [40], est un interpolateur exacte et très rapide du point de vue temps de calcul mais elle a l'inconvénient est de fournir des interpolations et des isovaleurs en forme d'œil de boeuf" autour des points d'observation.

Les données de sol utilisées datent de 1971 en raison du manque de carte de sols récente représente une faiblesse par rapport à la précision des données.

Les travaux de [27] sur le bassin versant de Tahaddart au Maroc montrent que l'aléa repose sur la combinaison de la récurrence d'une inondation et de la submersion et font ressortir l'importance du bassin versant pour l'étude des inondations. Cependant, la présente étude a été abordée sans se limiter à un bassin versant en se basant sur les travaux de [25] et [26] sur les inondations ont été faits respectivement sur la région de Sinfra et d'Abidjan qui couvrent plusieurs bassins versants comme la région semi-montagneuse de Man. Les facteurs de vulnérabilité utilisée sont les types d'occupation et la densité de population qui à elles seules ne traduisent pas la vulnérabilité dans son ensemble. En effet, plusieurs autres facteurs de vulnérabilité parmi lesquels on peut citer le degré de pauvreté des populations, leurs niveau d'instruction et de perception, l'implication des femmes qui sont importants dans l'évaluation de la vulnérabilité selon [41] et [42]. Mais, par manque de données relatives à ces facteurs, ils n'ont pas été pris en compte et cela constitue une faiblesse par rapport à la précision des données.

Les classes de forêt dense et des affleurements/sols minéralisés ont une vulnérabilité faible malgré le fait que selon [31] la vulnérabilité de la forêt naturelle est nulle, celle de la forêt dense dans cette étude, devait être nulle. Mais, dans la région agricole étudiée, la forêt dense a des traces d'activités anthropiques et présente une vulnérabilité non nulle mais faible.

La méthode de maximum de vraisemblance a été utilisée pour établir la carte d'occupation car selon [29], c'est une des méthodes les plus utilisées. Cette méthode a été utilisée par [26] pour la cartographie de l'occupation dans la

région d'Abidjan et permis d'avoir des résultats fiables. Mais selon [43], l'utilisation des modèles de Markov pour la cartographie de l'occupation du sol permet une meilleure prise en compte des conditions du voisinage des pixels dans la classification.

Les cartes relatives aux différents facteurs d'aléa et de vulnérabilité ont été obtenues avec un ratio de cohérence respectif de 0,073 et 0 qui sont inférieurs à 10%. Par conséquent les jugements sur les choix relatifs aux critères sont cohérents et confèrent une fiabilité acceptable à la carte de risque réalisée dans le cadre de ce travail. Cette carte a fait l'objet d'une validation de terrain avec le recensement des indices des zones inondées et des zones inondables.

Conclusion:-

L'utilisation de la télédétection et des SIG a permis de cartographier le risque d'inondation par débordement dans la région semi-montagneuse de Man. L'analyse multicritère a facilité la hiérarchisation des facteurs impliqués, leur pondération et a permis des jugements cohérents. Les zones à fort risque représentent près de 34% de la zone d'étude et couvre essentiellement les départements de Danané, de Man et Logoualé respectivement dans les proportions d'environ 75%, 50% et 30%. Ces zones présentent généralement un fort aléa avec des pentes faibles (< 12%), une forte densité de drainage, une forte pluviométrie et une forte vulnérabilité socio-économique. Les dégâts socio-économiques liés à ces débordements sont importants et quelques-uns ont été recensés au quartier Kennedy de Man qui est inondé de façon récurrente depuis 2003 par le débordement du Ko. Ces dégâts concernent la destruction et l'abandon des habitats et même des pertes en vie humaine. Une gestion rationnelle de ces inondations s'avère nécessaire et la carte de risque réalisée dans ce travail est un outil important pouvant contribuer efficacement aux prises de décision dans le contexte actuel de changement climatique.

Remerciements:-

Au terme de ce travail, nous disons grand merci au CURAT pour son aide financière et à tous ceux qui nous ont soutenu au plan matériel et technique. Nous tenons à exprimer notre gratitude aux autorités locales de la région de Man et à la SODEXAM pour leur soutien lors des missions de terrain effectuées dans la région en 2019 et l'accès aux données.

References Bibliographiques:-

- 1.Kaman, P. (2013): Analyse des vulnérabilités aux catastrophes et des capacités de réponse en Côte d'Ivoire, Rapport d'étude, Gouvernance du risque et diagnostic de vulnérabilité de la Côte d'Ivoire, 58p.
- 2.Danumah, J.H. (2016): Assessing Urban Flood Risks under Changing Climate and Land Use in Abidjan District, South Cote d'Ivoire. PhD Thesis, Kwame Nkrumah University of Science and Technology Kumasi Ghana, 178p.
- 3.Kouassi K.D. (2019): Apport de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prévention et à la prévision du risque d'inondation dans la commune d'Abobo (Abidjan, côte d'ivoire), thèse de Doctorat unique, Université Félix Houphouët Boigny, 164p.
- 4.Boka, K. C. (2017): Étude par télédétection et des SIG de l'implication de l'extension urbaine dans le risque d'inondation à Abidjan : Application à la commune de Cocody. Mémoire de Master, Université Felix Houphouët Boigny, 82p.
- 5.Kablan, M.K.A. (2017): Vulnérabilité et adaptation des populations urbaines aux effets des variations climatiques (température et pluviométrie): Analyse de la situation dans la commune de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat unique, Université Félix Houphouët-Boigny, 242p.
- 6.Saley, M.B., Kouamé, K.F., Penven, M.J., Biémi J. et Kouadio, B.H. (2005): Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : Apports des MNA et de l'imagerie satellitaire, Revue Télédétection, 5 (1-2-3): 53-67.
- 7.N'guessan Bi, V.H. (2014): Modélisation markovienne du champ de précipitations et du mode d'occupation du sol pour une prévision du risque d'inondation à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) : cas du Département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat Unique, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 228p.
- 8.Doumbia, B.M. (2015): Côte d'Ivoire-Man : Protestation suite à une inondation/ Bilan un mort, <http://lepoinstsur.com/ci-man-protestation-suite-a-une-inondation-bilan-un-mort/>, Consulté le 22 décembre 201
- 9.Doumbia, B.M. (2016): Côte-d'Ivoire saison des pluies: Man sinistrée, des habitations inondées «deux disparus», <http://www.connectionivoirienne.net/120063/cote-divoire-saison-des-pluies-man-sinistree-des-habitations-inondees-deux-disparus>, Consulté le 22 décembre 2016.

- 10.Kouadio, B.H. (2001): Insécurité climatique et géorisques en Afrique de l'Ouest : Apport des systèmes d'information géographique et de la télédétection à l'étude des phénomènes de risques naturels dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université de Cocody, 164p.
- 11.Saley, M.B. (2003). Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 211p.
- 12.Kouame, K.F (2011): Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi- montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Félix Houphouët Boigny, 389p.
- 13.Kouamé, K.F. (1999): Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouestde la Côte d'Ivoire). Thèse 3è Cycle. Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 210p.
- 14.Kouadio, B.H., N'guessan Bi, V.H., Djè, K.B., Aké, G.E. Yapi, A., Sika, B. et Biémi, J. (2017): Analyse spatio-temporelle des extrêmes climatiques dans la région semi-montagneuse de Man-Danané par utilisation du programme RClimDEX, Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement n°2 – 2017, PP 1-4.
- 15.INS. (2014): Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014, Principaux Résultats Préliminaires. Institut National de la Statistique : Abidjan, Côte d'Ivoire ; 26p.
- 16.Perraud, A. et De la Souchere, P. (1971): Esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/500 000, Feuille Sud-Ouest. In Le milieu naturel en Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM, France, n°50, 391 p.
- 17.Perraud, A. (1971): Les sols de Côte d'Ivoire. pp. 269-391. In Le milieu naturel en Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM, France, n°50, 391p.
- 18.Renard, F. et Chapon, P.-M. (2010): Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise, L'Espace géographique, Edition Belin, 2010/1 Vol. 39, pp 35-50
- 19.Saaty, T.L. (1980): The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. Mcgraw-Hill, New York, 19p.
- 20.Sande, V.D. (2001): IKONOS imagery classifiecl with Definiens eCognition for a flood damage assessment, Natura1Hazards Unit, Research Centre of the European Union: 3.
- 21.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'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p.
- 22.Souleye, W., Rudant., J.-P., Kader, B. et Ndoye, B. (2008): Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : applications à l'étude des inondations urbaines de saint louis et du ravinement lié à l'érosion hydrique à Nioro-Durip (Sénégal). Revue Télédétection, Editions scientifiques GB, Vol. 8, n° 3, pp.203-210.
- 23.Saley, M.B., Danumah, J.H., Kanohin, F. Epse O., Sorokoby, V.M., Atcheremi, D., Denean, S. P., Kouame, K.F. et Djagoua, V.E. (2013): Méthodologie pour la cartographie des zones vulnérables à l'inondation par système d'information géographique et analyse multicritère : application au bassin versant de la Davo à Sassandra (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Africa Geoscience Review, Vol. 20, No.1, 2, pp.21-34.
- 24.Youan Ta, M. (2008): Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de l'Université Felix Houphouët Boigny, 270 p.
- 25.N'guessan Bi, V.H., Saley, M.B., Wade, S., Djagoua, E.V. M., Kouame, K.F. et Affian K. (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 cote d'ivoire). European Scientific Journal, January 2014, edition vol.10, No.2 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- 26.Danumah, J.H., Odais, N., Saley, M.B., Szarzynski, J., Thiel M., Kwaku A., Kouamé K.F. et Akpa Y.L. (2016): Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (Côte d'ivoire), Geoenvironmental Disasters (2016) 3:10, DOI 10.1186/s40677-016-0044-y.
27. Rifai, N., Khattabi, A. et Rhazi, L. (2014): Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (nord-ouest du Maroc). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 27(1), 57–69. <https://doi.org/10.7202/1021982ar>.
- 28.Adiaffi, B., Wango; T.E., Gnamba, F.M., Kpan, O.J.G. et Baka, D. (2016): Analyse de la relation pluie-débit dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Katiola. International Journal of Engineering, Vol.5(12)

- December 2016, PP. 38-45, Science Invention ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6726 www.ijesi.org.
29. Bonn, F. et Rochon, G. (1992): Précis de télédétection, principe et méthode. Volume 1. Presse Univ. du Québec, AUPÉLF-UREF, 485p.
30. Anh, T. L. (2012): Évaluation des risques d'inondations dans le bassin du fleuve Huong, Province de Thua Thien Hue, Centre du Vietnam, Thèse de l'Université du Québec à Montréal, avril 2012, 303p.
31. Sande, V.D. (2001): IKONOS imagery classified with Definiens eCognition for a flood damage assessment. Natural Hazards Unit, Research Centre of the European Union: 3.
32. Savané, I. (1997): Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné Nord- Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 386 p.
33. Jourda, J.P., Kouamé, K.J.; Saley, M.B., Kouamé, K.F., Kouadio, B.H. et Kouamé K. (2006). A new cartographic approach to determine the groundwater vulnerability of the Abidjan aquifer. pp. 103-114. In Groundwater pollution in Africa, 355 p.
34. Mohamed El Amraoui, S., Rouchdi, M., Bouziani, M. et El Idrissi, A. (2017): Intégration du SIG et de l'analyse hiérarchique multicritère pour l'aide dans la planification urbaine : étude de cas de la province de Khemisset, Maroc. Papeles de Geografía 2017, 63 pp. 71-90, <http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2017/280211>.
35. Voogd, H., 1983, Multi-criteria evaluation for urban and regional planning, Pion Ltd., Londres, 255p.
36. Biémi, J. (1992): Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat, Univ. Nat. d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 493p.
37. Caillet, R. (2003): Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie, Série Scientifique, Montréal Août 2003, 2003s-53, ISSN 1198-8177.
38. Ake, G. E., Kouadio, B. H., Adja, M. G., Ettien, J.-B., Effebi, K. R. et Biémi, J. (2012): Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Physio-Géo, Vol.6, 2012: Varia 2012, p.1-42.
39. Prignon, M. (2016): Incertitudes sur les données climatiques en Afrique : Intercomparaison de divers jeux de données, Mémoire de Master, Université de Liège, 83p.
40. Arnaud, M. et Emery, X. (2000): Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Paris : Hermès, 221 p. ISBN 2-7462-0138-0, <https://agritrop.cirad.fr/300576/1/ID300576.pdf> consulté le 05/05/2023.
41. Leone Frédéric et Vinet Freddy (2006). La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles, Publications de l'Université Paul Valéry Montpellier 3, Collection « Georisques » n°1, 72p.
42. Bascope, R. (2015): Analyse multicritère pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale aux séismes. L'exemple de Mendoza, Argentine. Milieux et Changements globaux. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01281970/document> consulté 10 février 2023.
43. N'Guessan, Bi V. H., Saley, M.B., Talla, N., Fotsing, J., Affian, K. et Tonye, E. (2013): Apport de la télédétection à l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol à partir d'une utilisation couplée d'un modèle de markov et d'un automate cellulaire cas du département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 204 (octobre 2013), pp 23-41.