



Journal Homepage: -www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/17202
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17202>



RESEARCH ARTICLE

APPORT DE LA GEOMATIQUE ALA DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION AUTOUR DE LA PRISE D'EAU POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE SUR LA RIVIERE ME A KONGOFON (SUD EST DE LA COTE D'IVOIRE)

DEH Serge Kouakou¹, EBA Anowa Evrade Larissa², KOUADIO Boyossoro Helene³, KOMA Achou Donald Hyacinthe², AHOUSSEI Kouassi Ernest¹, KOUAME Kan Jean² and JOURDA Jean Patrice³

1. Université Félix HouphouëtBoigny, 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 HouphouëtBoigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT).
3. VEOLIA/SIEE (Société Ivoirienne des Eaux et de l'Environnement).

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 05 May 2023
Final Accepted: 09 June 2023
Published: July 2023

Key words:-

Mé River, Pollution Vulnerability,
Protection Perimeter, Water Intake,
Watershed

Abstract

The quality of the Mé River's water is threatened by sources of pollution generated in the region without any measures being taken to protect this resource. So, to reduce the risk of pollution of this water resource, this study aims to delimit the protection perimeters around the water intake on the river. The methodological approach consisted firstly in assessing the vulnerability of the resource through the weighting and combination of five selected parameters, and then in determining the protection perimeters on the basis of the pre-established vulnerability map and data from previous studies. The pollution vulnerability map obtained reveals five classes of vulnerability around the water intake, with a dominance of the high class estimated at 29.44% of the watershed. Three protection perimeters have been defined. The immediate protection perimeter has a 200 m radius around the water intake and covers areas with a strong influence on the river's vulnerability to pollution over a surface area of 1.97 km². The close protection perimeter, covering a 1000 m radius, was delimited from the immediate protection perimeter. It covers an area of 43.7 km² and takes into account the river's low, medium and very high vulnerability classes, following the direction of water flow in the Mé watershed. The remote protection perimeter covers a large part of the watershed, with an area of 1,480 Km². It covers the rest of the catchment's highly vulnerable areas and adjoins the close protection perimeter. The defined protection perimeters can serve as a guide for sustainable management and protection of river quality.

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

Introduction:-

L'accès à une eau de boisson saine et en quantité suffisante est une condition indispensable et un droit humain élémentaire. Alors que, le problème de l'accès à l'eau devient crucial en raison des pressions énormes de pollution que subissent les ressources en eau dues à la diversité et à la toxicité des émissions polluantes, ainsi qu'à la forte

Corresponding Author:- DEH Serge Kouakou

Address:- Université Félix HouphouëtBoigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG).

demande en eau causée par la croissance démographique accélérée et des activités humaines [1]. A cet égard, des millions d'habitants dans le monde entier connaissent des pénuries d'eau et luttent quotidiennement pour trouver de l'eau potable afin de couvrir leurs besoins vitaux.

En Côte d'Ivoire, précisément dans certains quartiers d'Abidjan, on assiste à de récurrentes pénuries d'eau de nos jours. Le constat est que, la capacité de la nappe d'Abidjan, sous la menace des activités anthropiques (démographie galopante, urbanisation, activités industrielles et domestiques) pourrait s'avérer de plus en plus insuffisante pour l'alimentation en eau potable [2]. Par conséquent, le gouvernement ivoirien utilise la rivière Mé comme la source alternative pour le renforcement de la capacité d'alimentation en eau potable du District d'Abidjan. Alors que, cette rivière traverse une zone très favorable à l'agriculture dans laquelle les techniques culturales exigent l'usage excessif des produits phytosanitaires [3,4]. A cela s'ajoute l'exploitation clandestine de l'or qui est devenue une source potentielle de pollution de cette rivière [5].

Pour assurer une gestion efficace et durable de cette rivière destinée à l'approvisionnement en eau potable de la population, il est indispensable de la protéger contre les différentes sources de pollution. L'une des alternatives offertes à la communauté scientifique est de procéder à la délimitation de périmètres de protection autour de ladite ressource [6]. Elle permet ainsi de donner aux autorités en charge de sa gestion un outil d'aide à décision pour mieux orienter et réglementer les activités qui se déroulent dans son bassin versant. En effet, comme le soulignent plusieurs directives européennes, ces captages d'eau potable doivent être dotés d'un périmètre de protection afin d'éviter les pollutions liées aux activités humaines normales et les pollutions accidentelles pouvant entraîner une contamination de l'eau et par conséquent une crise sanitaire. En Côte d'Ivoire, ils sont prescrits par l'article 34 du code de l'eau et son décret d'application n°2013-440 du 13 juin 2013 qui détermine le régime juridique des périmètres de protection des ressources en eau, des installations et ouvrages hydrauliques. Cependant, la délimitation de ces périmètres nécessite une étude minutieuse dans le bassin versant de la ressource en tenant compte du sens de l'écoulement des eaux de surface. Le SIG est une solution informatisée pour la délimitation des périmètres de protection comme l'ont montré [7] sur la Lagune Aghien ; [6] à Adzopé ; [8] à Aboisso et dans d'autres pays à savoir [9] au Maroc sur le Barrage de Hachef. Il permet une connaissance large et surtout numérique des ressources en eau et de leur protection.

C'est dans ce contexte que la présente étude a été entreprise pour délimiter les périmètres de protection autour de la prise d'eau réalisée sur la rivière "Mé" pour sa gestion durable. Elle intègre dans sa démarche les outils de la géomatique notamment les SIG couplés à l'analyse multicritère de Saaty.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude porte précisément sur la partie du bassin versant de la rivière Mé située en amont de la prise d'eau. Cette rivière prend sa source au Nord d'Adzopé sous l'appellation de "Min" ou Mé et s'écoule du Nord vers le Sud parallèlement au cours inférieur du fleuve Comoé et de l'Agneby. La Mé draine un bassin versant qui est compris entre les Latitudes 5°30' et 6°20' Nord et les Longitudes 3°30' et 4°10' Ouest avec une superficie de 4140 km² et une longueur de 140 km (Fig. 1).

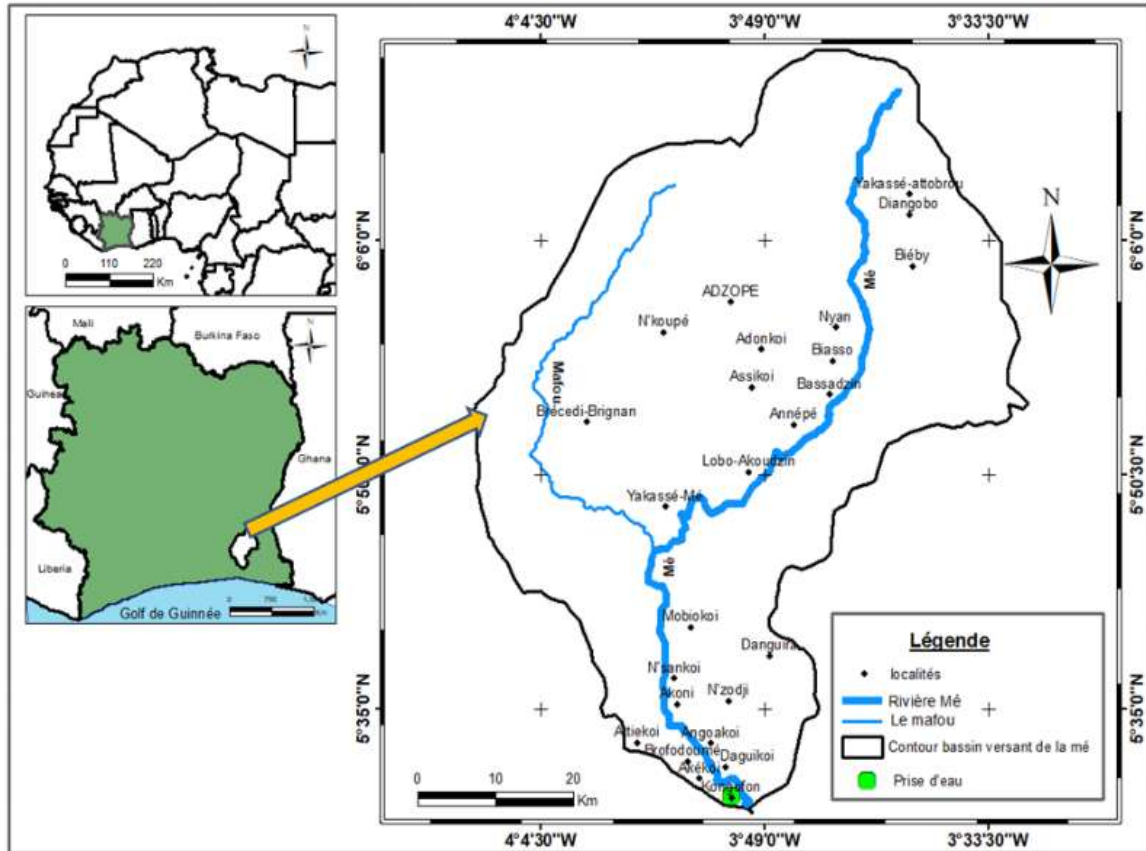


Figure 1:- Localisation de la zone d'étude.

La Mé se jette dans le cordon reliant les lagunes Aghien-potou et son principal affluent est le Mafou. Les régions traversées par la Mé sont caractérisées dans son ensemble par la présence de nombreuses collines dont l'altitude moyenne ne dépasse pas 100 mètres et sont séparées par de longues vallées à l'aspect des précipices, d'où partent plusieurs marigots et rivières [10]. A cet effet, la Mé et ses affluents empruntent plusieurs directions d'écoulement dont la direction Nord-Sud est celle du cours d'eau principal [11]. Ainsi, le bassin de la Mé est parcouru par de nombreux cours d'eau en raison de son relief et de l'abondance des pluies justifiée par une pluviométrie moyenne annuelle de 1706 mm sur la période 1996-2016. La densité du réseau hydrographique de la zone d'étude varie en fonction de la nature du substratum. En effet, au niveau des métasédiments qui en constituent le fond géologique, le chevelu hydrographique est relâché avec des petits affluents rectilignes et parallèles entre eux à l'Ouest du bassin [11]. A Partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et des observations sur le terrain, il a été révélé de nombreux cours d'eau (secondaires et tertiaires) qui se déversent dans la rivière Mé(Fig. 2).

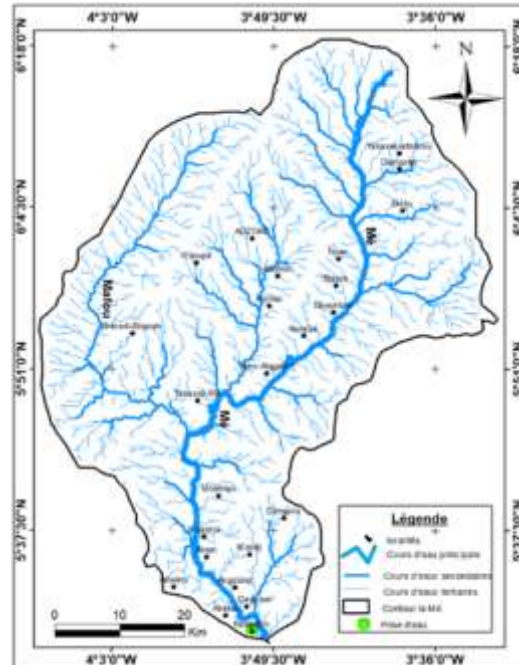


Figure 2:-Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude.

Toutes ces conditions environnementales favorisent la présence d'une végétation qui est dominée par la forêt tropicale humide constituée de massifs forestiers protégés et des parcelles de forêts secondaires et de jachères [11]. Ainsi au plan économique, l'on enregistre essentiellement sur le bassin à l'amont de la prise d'eau, la présence des activités agricoles à travers les cultures de rente (le cacao, l'hévéa et le palmier à huile) et les cultures vivrières (la banane plantain, le manioc, l'igname, le maïs etc.) et secondairement de quelques unités industrielles spécialisées dans la transformation du bois installées en amont de la prise d'eau. A cela s'ajoutent les activités clandestines d'orpaillage qui se déroulent pour la plupart aux alentours des cours d'eau. En effet, l'une des causes de la dégradation de la qualité de la rivière Mé serait liée à l'augmentation des rejets polluants dans les milieux récepteurs sans traitement préalable à partir des activités agricoles, urbaines et industrielles ainsi qu'aux activités d'orpaillers au cours des dernières décennies (Fig. 3).



Cultures de rente (a) : cacao-culture



Cultures de rente (b) : hévéa culture



Dépôt d'ordure ménagère (c)



site d'orpaillage clandestin (d)

Figure 3:- Quelques sources de pollution de la rivière Mé.

Au regard des risques de pollution constatés au niveau de la rivière Mé et de son apport stratégique dans le système d'approvisionnement en eau potable des populations du District d'Abidjan, des mesures de protection contre toutes les formes de pollutions s'avèrent indispensables pour une exploitation durable.

Matériel Et Méthodes:-

Les méthodes de détermination des périmètres de protection des eaux de surface sont nombreuses, mais celle qui établit les dimensions des périmètres de protection en fonction des espaces du bassin qui ont une influence sur la vulnérabilité du bassin de la rivière Mé a été retenue pour cette étude. En effet, la vulnérabilité à la pollution des eaux matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par un polluant. Elle est fonction des facteurs du milieu qui déterminent les grands types de circulation d'eau et de l'occupation du sol [11]. Ainsi, la méthode la plus pertinente est celle qui intègre les données topographiques, géologiques, hydrologiques et de l'occupation du sol et qui assure une détermination réaliste des zones influençant la vulnérabilité de ces ressources[9, 13].

Données et matériel

Dans ce travail, le bassin versant drainé par la rivière Mé et ses affluents a été considéré comme l'unité hydrologique dont la connaissance parfaite et celle des activités qui s'y déroulent sont indispensables pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la rivière. Ainsi, le contact entre les eaux de la rivière Mé et l'ensemble du bassin se fait par des phénomènes hydrologiques de surface dépendant de la morphologie du paysage [14]. Par conséquent, la cartographie des zones qui influencent la vulnérabilité à la pollution de cette rivière a nécessité la mise en place d'une base de données constituée :

- d'image satellitaire sentinel de 2020 couvrant la zone d'étude. Elle a été téléchargée sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov>. Elles ont permis de réaliser la carte d'occupation du sol sous le logiciel ENVI 5.3;
- d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 12,5 m de la Côte d'Ivoire issu de l'image satellitaire AlosPolsar disponible sur le site : <https://search.asf.alaska.edu>. Il a permis de réaliser la carte des pentes, du réseau hydrographique et celle de la densité de drainage.
- de la carte pédologique de Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500.000 établie par [15] du laboratoire pédologique du centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Elle a permis de réaliser la carte pédologique du bassin versant de la Mé.
- des données de pluviométries moyennes mensuelles des stations d'Alépé et d'Adzopé acquises auprès de la SODEXAM sur les Périodes de 1990 à 2020. Elles ont été utilisées pour déterminer la pluviométrie annuelle et évaluer le ruissellement annuel du bassin versant de la Mé lors des travaux d'Etude d'Impact Environnemental et Social [2] du projet de renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan à partir de la rivière Mé.

Toute cette base de données est stockée, analysée et gérée sous le logiciel Arcgis 10.8 pour l'élaboration des différentes cartes thématiques à partir de la mise en place d'un SIG.

Méthodes:-

La protection de la qualité des eaux de la rivière Mé a nécessité une approche méthodologique qui vise à déterminer les périmètres de protection de la rivière sur la base de la conjonction de la carte de vulnérabilité à la pollution préalablement établie de cette ressource et les données des études antérieures qui ont servi à déterminer les périmètres de protection autour des prises d'eau. Ainsi, cette démarche comprend quatre étapes présentées dans le tableau 1 et requiert l'application conjointe de la méthode d'analyse multicritère de Saaty et du Système d'Information Géographique. Cette méthodologie a été utilisée par plusieurs auteurs en Côte d'Ivoire : à savoir [16] à Gagnoa ; [17] à Taabo ; [7] sur la Lagune Aghien ; [6] à Adzopé ; [8] à Aboisso et dans d'autres pays à savoir [9] au Maroc sur le Barrage de Hachef.

Tableau 1:- Synthèse des étapes de la méthodologie.

Étapes	Méthodes	Démarches
1	Identification des paramètres	choix des paramètres utilisés pour calculer l'indice de vulnérabilité à la pollution
	Cartographie thématique	- cartographier chaque paramètre à l'échelle du bassin versant étudié - discrétisation de chaque carte de paramètre (taille de la maille = 20 X 20 m)
	Reclassification des paramètres	Chaque paramètre est subdivisé en 3 ou 4 classes selon les cotes ou poids assignées
2	Pondération des paramètres	Hierarchiser les paramètres les uns par rapport aux autres par la méthode de Saaty.
3	Évaluation de la vulnérabilité	Combinaison des différentes cartes thématiques par pondération afin d'obtenir une carte finale de répartition de l'indice de vulnérabilité
4	Détermination des périmètres de protection	Délimitation des PPI, PPR et PPE en fonction de la carte de vulnérabilité.

Identification, cartographie et reclassification des paramètres

L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution requiert plusieurs paramètres se rapportant aux caractéristiques du milieu, à l'occupation des sols, à la nature des activités et leurs rejets et enfin les propriétés du sol [6]. Ainsi, cette étude étant réalisée à l'échelle du bassin versant de la Mé, seuls les facteurs identifiables à cette échelle sont utilisés. Il s'agit de la pente (P), de l'occupation du sol (O), du type de sol (S), du ruissellement (R) et de la densité de drainage (D).

Pour l'attribution des notes qui varient de 1 à 4 selon l'importance des différentes classes des paramètres identifiés, la référence utilisée est basée sur les travaux de [13], du groupe de travail de BRGM sur l'évaluation de la vulnérabilité des eaux de surface (Tableau 2). Chacun d'eux est ensuite hiérarchisé et pondéré en fonction de l'importance de son rôle dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la ressource. Le tableau 2 récapitule les différentes classes des paramètres et les notes attribuées à ces classes.

Tableau 2:- Paramètres, classes et notes attribuées des facteurs.

Paramètres	Classes	Notes
Pente (%)	< 3	1
	3 - 7	2
	> 7	3
Occupation de sol	Forêt dense	1
	Forêt claire	1
	Habitat	2
	Sol nu	3
	Culture et jachère	4
Type de sol	Sol ferrallitique fortement désaturé	1
	Sol ferrallitique moyennement désaturé	2
	Sol hydromorphe	3
	< 0	1

Ruissellement (mm)	0 - 150	2
	> 150	3
Densité de drainage (km/km ²)	< 1,04	1
	1,04 - 1,33	2
	> 1,33	3

Paramètre pente (P)

La pente est un facteur essentiel pour le transfert des polluants vers les eaux de surface. Elle permet donc de contrôler la probabilité qu'un polluant a de s'écouler ou de s'infiltrer dans le sol [16]. En effet, une inclinaison du terrain influence grandement la vitesse de ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration. A partir du MNT de la zone d'étude, le paramètre "Pente" a été réalisé en utilisant l'outil "Slope " d'Arcgis. Une reclassification de la carte des pentes est ensuite réalisée à partir des cotes données par [13] (Tableau 2) pour obtenir la carte de pente reclassifiée. Cette carte présente trois classes sur l'ensemble du bassin versant avec une dominance des pentes moyenne et élevée.

Paramètre occupation du sol (O)

L'occupation du sol désigne l'ensemble des activités pratiques (activités urbaines, agricoles et industrielles) à la surface du sol. Elle joue un rôle prépondérant pendant le ruissellement des eaux, la retenue des matières en suspensions ainsi que l'absorption des polluants. Ainsi, une terre boisée aura tendance à retenir les eaux et les polluants, ainsi qu'à augmenter l'infiltration tandis qu'une terre nue ou imperméabilisée aura tendance à favoriser le ruissellement et l'érosion [18], qui permettront le transport des polluants vers les eaux de surface. La carte de l'occupation du sol du bassin versant de la Mé a été obtenue à partir des traitements d'images satellitaires sentinel acquise en 2020. Elle révèle les portions des différents types d'occupations identifiés à savoir les zones d'habitations, les sols nus, l'eau, les forêts, les cultures et les jachères. Ensuite, une reclassification de cette occupation du sol a été faite en se basant sur les cotes attribuées dans les travaux [19, 7, 6] (Tableau 2). Cette carte présente quatre classes sur l'ensemble du bassin versant. L'eau et la forêt représentent la classe très faible, les zones habitées correspondent à la classe faible comparativement aux sols nus qui traduisent la classe moyenne sur l'ensemble du bassin versant enfin les cultures et jachères représentent quant à elles la classe la plus élevée (classe 4).

Paramètre type de sol (S)

Les caractéristiques du sol conditionnent la partition des eaux de pluie entre l'infiltration et le ruissellement vers les eaux de surface en tenant compte également de la pente [8]. Ainsi, plus un sol est imperméable, plus le ruissellement et le lessivage sont importants et l'infiltration est faible. Par contre, plus le sol est perméable, plus l'infiltration est importante et le ruissellement est faible. Ainsi, la nature du sol est un facteur déterminant dans le processus de pollution des eaux de surface. La carte pédologique de la zone d'étude a été obtenue à partir de l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500.000 [15]. La zone présente trois grandes catégories de sols :

- des sols ferrallitiques remaniés indurés et des sols remaniés à recouvrement (moyennement désaturés) ;
- des sols ferrallitiques remaniés et appauvris ainsi que des sols rajeunis (fortement désaturés) ;
- des sols hydromorphes à gley et pseudogleys.

Ensuite, une reclassification de ces types de sols a été réalisée sur la base des cotes consignées dans le tableau pour obtenir la carte du sol reclassifiée (Fig. 4).

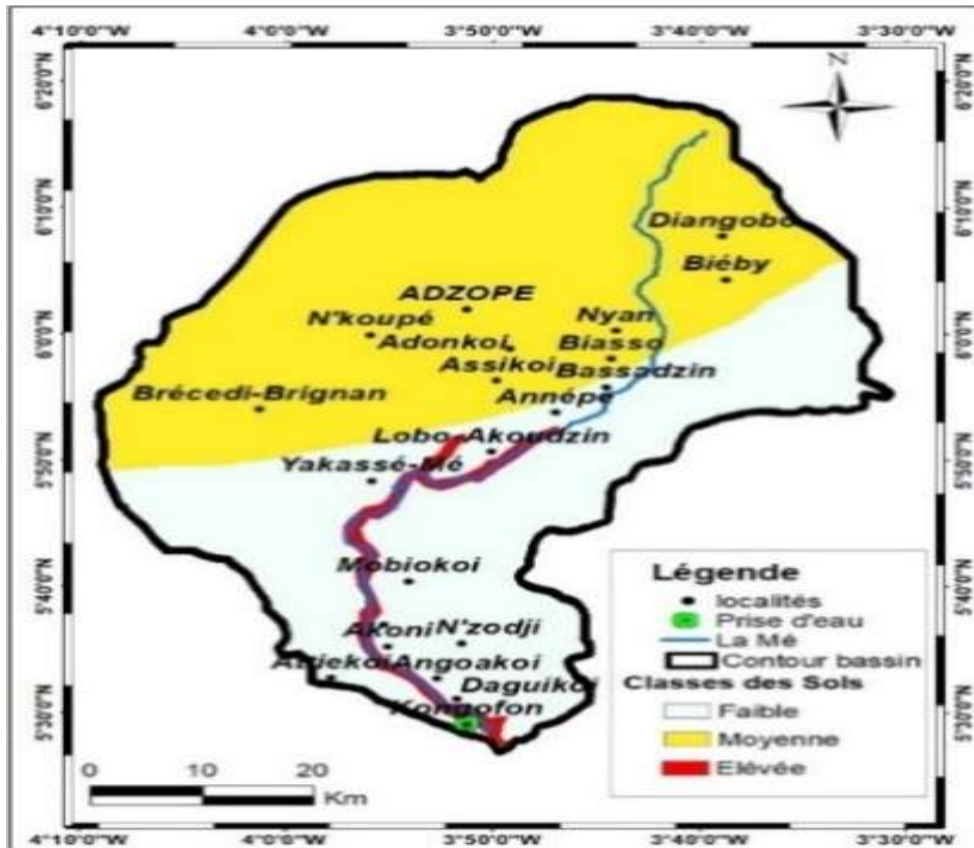


Figure 4:- Carte des types de sol reclassifiés.

Paramètre ruissellement annuel (R)

Les eaux de ruissellement constituent l'agent principal de transfert des polluants vers les eaux de surfaces. Plus les eaux de ruissellement sont abondantes, plus le risque de contamination des sources est élevé. Il représente un facteur d'aggravation de la pollution des eaux de surface lorsqu'il est lié à l'agriculture. Le paramètre "Ruissellement annuel" a été déterminé en multipliant le coefficient de ruissellement (13%) déterminé par [11] sur le bassin de la Mé par la pluviométrie moyenne annuelle des stations d'Adzopé et Alépé des périodes allant de 1990 à 2020 (méthode de Thornthwaite).

$$R = r \times P \quad (1)$$

Avec : R : Ruissellement annuel ; P : Pluviométrie moyenne annuelle ; r : coefficient de ruissellement.

Le ruissellement annuel varie de 189,44 mm à 169,37 mm et leur moyenne est de 179,40 mm au niveau du bassin versant. C'est une valeur importante dans le mécanisme de pollution car elle favorise le transport d'éventuelles polluants vers la rivière. La cote « 3 » a été assignée au paramètre « R » en se référant à la classification de [13].

Paramètre densité de drainage (D)

La pollution des ressources en eau de surface est liée à la densité du réseau hydrographique, car le réseau hydrographique collecte toutes les eaux d'un même bassin avec possibilité de contamination par des produits polluants pour les conduire vers l'exutoire [16]. Plus le réseau hydrographique est dense, plus la vulnérabilité à la pollution est élevée.

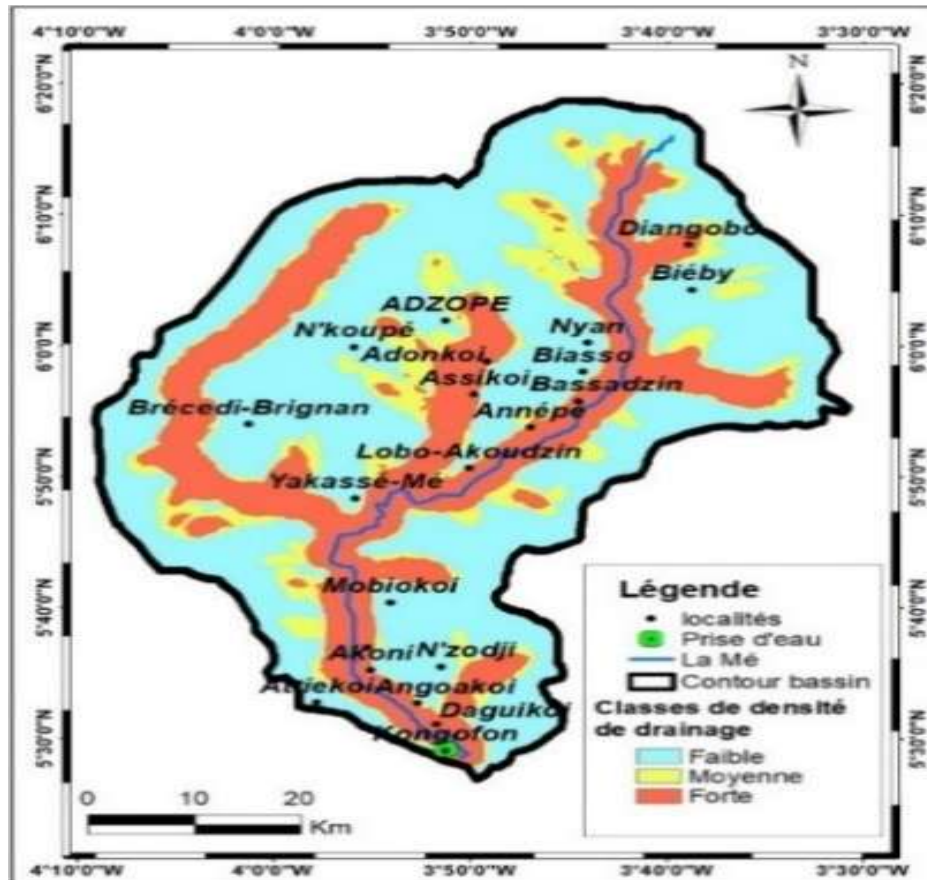


Figure 5:- Carte de densité de drainage reclassifiée.

La carte de densité de drainage de la zone a été réalisée à partir du réseau hydrographique, sur la base d'un maillage régulier de l'espace à travers l'outil "line-density" du logiciel Arcgis. Les valeurs obtenues varient de 0 à 3,23 km/km². En effet, cette carte présente une forte densité autour des cours d'eau et au niveau des zones de confluence des affluents. En plus, trois classes de densité de drainage ont ensuite été définies pour obtenir la carte de densité de drainage reclassifiée selon les cotes du tableau 2 (Fig. 5).

Pondération des paramètres par la méthode AHP de Saaty

La méthode utilisée pour déterminer les poids des paramètres est le processus de l'analyse multicritère (Analytic Hierarchy Process AHP) développée par Saaty. En effet, Cette méthode a permis d'affecter des poids aux paramètres selon leurs importances relatives dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la rivière. Ainsi, la démarche adoptée par la méthode AHP peut être résumée en trois grandes étapes.

- l'élaboration de la hiérarchie ;
- la réalisation des combinaisons binaires ;
- la vérification de la cohérence et la détermination des poids des paramètres.

Élaboration de la hiérarchie

Pour élaborer la hiérarchie, la méthode simplifie le problème à résoudre selon une structure hiérarchique, puis donne une importance relative à chaque élément de chaque niveau (Saaty, 1980). Les paramètres identifiés plus haut sont regroupés en un ensemble homogène et disposés à un niveau. Les différents niveaux de la méthode AHP sont :

1. niveau 0 : L'objectif général qui est d'établir une carte de vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé sur le bassin versant de la Mé.
2. niveau 1 : Critère de décision ou d'analyse.

Dans le cas de cette étude, les paramètres retenus sont au nombre de cinq et la hiérarchie établie est illustrée à la Figure 6.

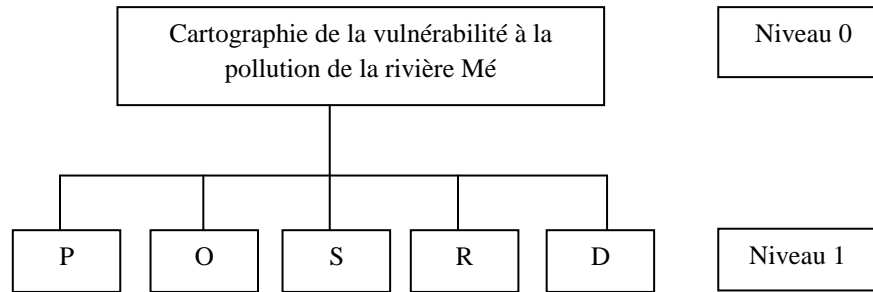


Figure 6:- Niveau hiérarchique des paramètres influençant la vulnérabilité.
Avec R= ruissellement, P = pente, O = occupation du sol, D = densité de drainage, S = type de sol.

Réalisation des combinaisons binaires

Elle consiste à comparer l'importance relative de tous les paramètres retenus pris deux à deux pour configurer une matrice carrée réciproque. Cette comparaison se fait sur la base d'une échelle numérique de 9 niveaux de comparaison par paire [20]. Ainsi, lorsque deux paramètres ont la même importance dans le phénomène étudié, l'échelle de Saaty leur donne la valeur "1". Cependant, si un paramètre est plus important que l'autre alors il prend une valeur supérieure comprise entre 1 et 10 et l'autre l'inverse de cette valeur. Le tableau 3 résume la matrice issue de la comparaison, avec $\sum a_i$ égale à la somme des paramètres par colonne. Cette matrice carrée permet d'effectuer les combinaisons pour la détermination des poids ou des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à "1".

Tableau 3:-Matrice issue de la comparaison par paire des paramètres.

Paramètres	P	O	S	R	D
P	1	2	3	5	6
O	1/2	1	2	3	5
S	1/3	1/2	1	2	3
R	1/5	1/3	1/2	1	2
D	1/6	1/5	1/3	1/2	1
$\sum a_i$	20,20	4,03	6,80	11,5	17

Détermination de la cohérence logique ou du Ratio de Cohérence (RC) de la matrice

Cette opération permet d'apprécier la stabilité du jugement et à vérifier la cohérence de la matrice. En effet, [21] a défini un indice de cohérence (IC) qui un ratio permettant de vérifier et de valider la cohérence de la matrice originelle. Si la valeur du ratio déterminée est inférieure à 10% alors les appréciations sont cohérentes ; dans le cas contraire, elles peuvent exiger certaines révisions. Le ratio est déterminé par la formule suivante :

$$RC = \frac{IC}{I_a} \quad (2) \text{ avec } I_a \text{ l'indice aléatoire et } IC \text{ l'indice de cohérence.}$$

Les valeurs de l'indice aléatoire ont été déterminées par [21] et sont données en fonction du nombre de paramètres comparés (Tableau 4).

Tableau 4:- Indice aléatoire d'une matrice de même dimension.

Nombre de critères	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ia	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Dans le cadre de cette étude, 5 paramètres ont été utilisés, ce qui correspond à 1,12 la valeur de l'indice aléatoire (Ia) utilisé. Ensuite, connaissant (Ia), il faut chercher à déterminer l'indice de cohérence en suivant les étapes suivantes :

- ❖ Etape 1: normaliser la matrice originale en divisant chaque élément d'une colonne par la somme de cette colonne ;
- ❖ Etape 2: faire la moyenne de chaque ligne pour déterminer le vecteur prioritaire;
- ❖ Etape 3: multiplier chaque colonne de la matrice par le vecteur prioritaire lui correspondant pour déterminer la priorité globale [B];
- ❖ Etape 4: diviser chaque priorité globale par le vecteur prioritaire lui correspondant a fin de déterminer la priorisation [E];
- ❖ Etape 5: déterminer la moyenne des priorisations λ_{max} ;

$$\lambda_{\max} = \frac{[E]}{k}$$

❖ Etape 6 : Calculer l'indice de cohérence (IC) ;

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1} \quad (3)$$

On déduit enfin le Ratio de cohérence (Rc) par la formule suivante :

$$RC = \frac{IC}{I_a} \quad (4)$$

Calcul du Ratio de cohérence de l'étude :

- Calcul de la moyenne des priorités rationnelles (λ_{\max})

$$\lambda_{\max} = \frac{25,45}{5} \text{ car } E = 25,45 \text{ et } k = 5 \quad \lambda_{\max} = 5,09$$

- Calcul de l'indice de cohérence (IC) :

$$IC = \frac{5,09 - 5}{5 - 1} = 0,0225$$

- Calcul du Ratio de cohérence

$$RC = \frac{0,0225}{1,12} \quad RC = 0,02 \text{ soit } 2\% \text{ donc } RC < 10$$

Le ratio de cohérence étant inférieur à 10%, les jugements attribués sont cohérents dans le cadre de cette étude. Ainsi, la matrice carrée (Tableau 3) obtenue, a servi pour effectuer les combinaisons afin de calculer les coefficients de pondération.

Détermination des coefficients de pondération

Le coefficient de pondération ou le poids d'un élément exprime l'intensité de son impact dans l'étude effectuée. Pour l'avoir, il faut d'abord calculer le vecteur propre de chaque paramètre à partir de la formule suivante :

$$V_p = \sqrt[k]{W_1 \times W_2 \times \dots \times W_k} \quad (5)$$

Avec W_1, W_2, \dots, W_k les différentes valeurs attribuées aux paramètres lors de leur comparaison et K le nombre de paramètres comparés.

Le coefficient de pondération (C_p) est déterminé par la formule suivante :

$$C_p = \frac{v_p}{\sum v_p} = \frac{v_p}{v_{p1} + v_{p2} + \dots + v_{pk}} \quad (6)$$

Avec V_p le vecteur propre du paramètre dont on veut calculer le C_p et le $V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pk}$, les différents vecteurs propres de chaque paramètre. La somme des C_p de tous les paramètres d'une matrice doit être égale à 1. Les différentes combinaisons binaires effectuées ainsi que les valeurs des vecteurs propres (V_p) et des coefficients de pondération correspondant sont consignés dans le tableau 5.

Tableau 5:- Vecteurs propres et coefficients de pondération des paramètres

Paramètre	P	O	S	R	D	V_p	C_p
P	1	2	3	5	6	2,83	0,44
O	1/2	1	2	3	5	1,72	0,27
S	1/3	1/2	1	2	3	1,00	0,15
R	1/5	1/3	1/2	1	2	0,58	0,09
D	1/6	1/5	1/3	1/2	1	0,35	0,05
$\sum a_i$	20,20	4,03	6,80	11,5	17	6,48	1,00

Le Tableau 6 récapitule les classes, les cotes et les poids attribués aux différents paramètres dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé.

Tableau 6:- Récapitulatif des classes, cotes et poids attribués aux différents paramètres.

Paramètres	Classes	Cotes	Poids
Pentes (%)	< 3	1	0,44
	3-7	2	
	> 7	3	
Occupation du sol	Eau	1	0,27
	Forêt dense /Forêt dégradée	1	
	Habitats	2	
	Sols nus	3	

	Mosaïque cultures / jachères	4	
Type de sols	Sols ferrallitiques fortement désaturés	1	0,15
	Sols ferrallitiques moyennement désaturés	2	
	Sols hydromorphes à gley et pseudogley	3	
Ruissellement annuel (mm)	169,37- 189,44	3	0,09
Densité de drainage (km/km ²)	< 1	1	0,05
	1 - 2	2	
	> 2	3	

Détermination des zones influençant la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé

Elle consiste à établir la carte des indices de vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé par la combinaison des différentes cartes des cinq paramètres reclassifiées (couches) dans un SIG. Selon la méthode de l'approche opérationnelle du critère unique de synthèse de [22] cité par [23], le calcul des indices de vulnérabilité se fait par l'équation suivante :

$$IV = 0,44 \times P + 0,27 \times O + 0,15 \times S + 0,09 \times R + 0,05 \times D \quad (7)$$

Pour chaque paramètre, le poids est multiplié par les différentes cotes correspondantes. Ce calcul est effectué avec l'outil " Raster Calculator " du sous module " MapAlgebra " du logiciel Arcgis. On obtient des intervalles d'indices auxquels des classes de vulnérabilité sont attribuées. Ainsi, la classification des indices de vulnérabilité va aboutir à la détermination de la carte des zones d'influence sur la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé.

La conversion des intervalles d'indices de vulnérabilité en degré de vulnérabilité est basée sur l'équation 8 établie par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec [24]. Elle permet d'effectuer la conversion des indices de vulnérabilité en pourcentage afin de mieux appréhender l'expression de la classification des degrés de vulnérabilité. Les indices sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "très élevée" (Tableau 7). Le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice. Cette conversion s'est faite par la formule suivante :

$$Iv (\%) = \frac{Ii - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times 100 \quad (8)$$

Avec : Ii : Indice de vulnérabilité à identifier ; I_{min} : Indice de vulnérabilité minimal ;

I_{max} : Indice de vulnérabilité maximal ; Iv : Indice de vulnérabilité.

Les indices sont répartis en 5 classes de vulnérabilités allant du "Très faible" à "très élevée" (Tableau 7).

Analyse de sensibilité de la carte de vulnérabilité : test d'analyse de sensibilité à paramètre unique

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour apprécier l'effet de chaque paramètre retenu pour la cartographie des zones influençant la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé. À cet effet, le test de sensibilité développé par [25] a été utilisé. Ce test permet d'analyser l'influence réelle de la pondération par rapport aux poids affectés à chaque paramètre par l'analyse multicritères. Dans cette analyse, le poids effectif est comparé à celui fourni par l'analyse multicritères. Le poids effectif (W) d'un paramètre est calculé à partir de l'équation (9) suivante :

$$W(\%) = \frac{X_r \times X_w}{V} \times 100 \quad (9)$$

Avec, X_r et X_w sont respectivement la cote et le poids assignés au paramètre X et V l'indice de vulnérabilité à la pollution selon la méthode de l'analyse multicritères.

Détermination des périmètres de protection autour de la prise d'eau sur la rivière Mé

La détermination des périmètres de protection (PPI, PPR et PPE), intègre à la carte de vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé, les résultats et les recommandations des études antérieures ainsi que la législation nationale (Côte d'Ivoire) en vigueur.

Périmètre de Protection Immédiat (PPI)

Le PPI se détermine en tenant compte des zones contiguës ou proches de la prise d'eau et qui influencent plus la vulnérabilité à la pollution de la rivière. Cette opération s'est aussi basée sur des rayons définis autour de la prise d'eau par plusieurs études antérieures. Ainsi, nous avons considéré d'abord autour de la prise d'eau, une zone de rayon 100 m comme périmètre de protection immédiate où le risque de contamination est maximal en raison du potentiel de dilution plus faible et du faible temps de transport des contaminants. Ensuite, ce rayon a été augmenté pour des zones vulnérables contiguës à la retenue dont le rayon est supérieur à 100 m. Les rayons de ces zones ont aussi été adoptés comme PPI.

La délimitation de ce périmètre de protection a été effectuée à l'aide de l'outil 'Buffer' du module 'arctoolbox' en imposant une bande de 100 m dans la projection orthogonale par rapport au cours d'eau. Cette bande a été modifiée par numérisation pour inclure les zones de forte vulnérabilité proche de la rivière.

Périmètre de Protection Rapproché (PPR)

Le périmètre de protection rapprochée doit protéger efficacement la retenue d'eau vis-à-vis de la migration des substances polluantes. Les limites du périmètre de protection rapprochée correspondent à une distance équivalente à un temps nécessaire pour l'élimination complète de toute contamination par atténuation naturelle [6]. Son étendue est déterminée dans la présente étude en prenant en compte plusieurs facteurs comme les caractéristiques physiques (la pente), le sens d'écoulement des eaux et les zones de vulnérabilité élevée. Le périmètre de protection rapprochée a donc été obtenu en délimitant un rayon de 1km autour du PPI. Des ajustements (augmentation ou réduction) en fonction des zones les plus vulnérables et des limites du bassin versant ont été apportés. L'outil « Buffer » et la numérisation ont permis de réaliser cette délimitation.

Délimitation du périmètre de protection éloignée (PPE)

Dans la présente étude, le PPE couvre en grande partie l'ensemble de la surface du bassin d'influence de la rivière situé en amont de la prise d'eau où les risques de pollution sont évidents. Cette zone est reliée à l'extérieur du périmètre de protection rapproché (PPR) et englobe une partie ou toute l'aire d'alimentation du bassin versant selon que l'on veut lutter contre la pollution ponctuelle ou diffuse [16]. Ainsi, le périmètre de protection éloigné est établi en considérant à partir des limites du périmètre rapproché, les zones éloignées de la rivière de vulnérabilités élevées et très élevées.

Résultats Et Discussion:-

Carte de vulnérabilité à la pollution de la Mé

La carte de vulnérabilité à la pollution de la Mé réalisée à partir des opérations de reclassification et de convection en pourcentage des indices de vulnérabilité de la Mé (Tableau 7), révèle cinq classes de vulnérabilité à savoir : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée (Fig.7).

Tableau 7:-Classes des indices et des degrés de vulnérabilité à la pollution du bassin versant de La Mé.

Indice de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité (%)	Degré de vulnérabilité	Pourcentage surfacique des degrés de vulnérabilité (%)
1, 38 – 1,92	0 – 30 %	Très faible	19, 72
1,92 – 2,27	31- 45 %	Faible	19,95
2,27 – 2,49	46 – 60 %	Moyen	8, 12
2,49 – 2, 90	61 – 75 %	Elevé	29, 44
2, 90 – 3, 52	75 – 100 %	Très élevé	22, 77
Total			100

Les différentes classes des indices caractérisent les degrés de vulnérabilité de la ressource en eau (Fig. 7). En effet, les classes de vulnérabilité très faible et faible occupent respectivement 19,72% et 19,95% du bassin versant d'étude. Elles sont généralement situées dans les zones forestières au Nord, au Nord-Est et au Centre du bassin versant. La classe de vulnérabilité très faible est due à la présence des forêts non cultivées dans ces zones où les pentes sont généralement faibles. Le ruissellement y est donc réduit et cela rend difficile le transport des polluants vers la rivière.

La classe de vulnérabilité faible occupent quant à elle des zones caractérisées par des pentes faibles et moyennes, des forêts dégradées et une densité de drainage faible. La classe de vulnérabilité moyenne occupe 8,12% de la zone d'étude et elle est plus répandue au Nord et à l'Ouest du bassin versant. Cette classe se trouve dans les zones cultivées et caractérisée par les pentes fortes. Elle présente une densité de drainage moyenne.

La classe de vulnérabilité élevée occupant 29,44 % de la zone d'étude a une prédominance sur les autres classes. Elle est observée un peu partout sur la zone d'étude. Elle est plus accentuée dans les zones de culture et de jachère qui favorisent beaucoup plus la pollution des eaux superficielles. Les pentes abruptes dans cette zone favoriseraient le ruissellement des polluants issus des zones culturales et des habitats vers la rivière et elles sont très marquées au niveau de la prise d'eau à cause des sols nus. Elle est aussi caractérisée par une densité de drainage élevée.

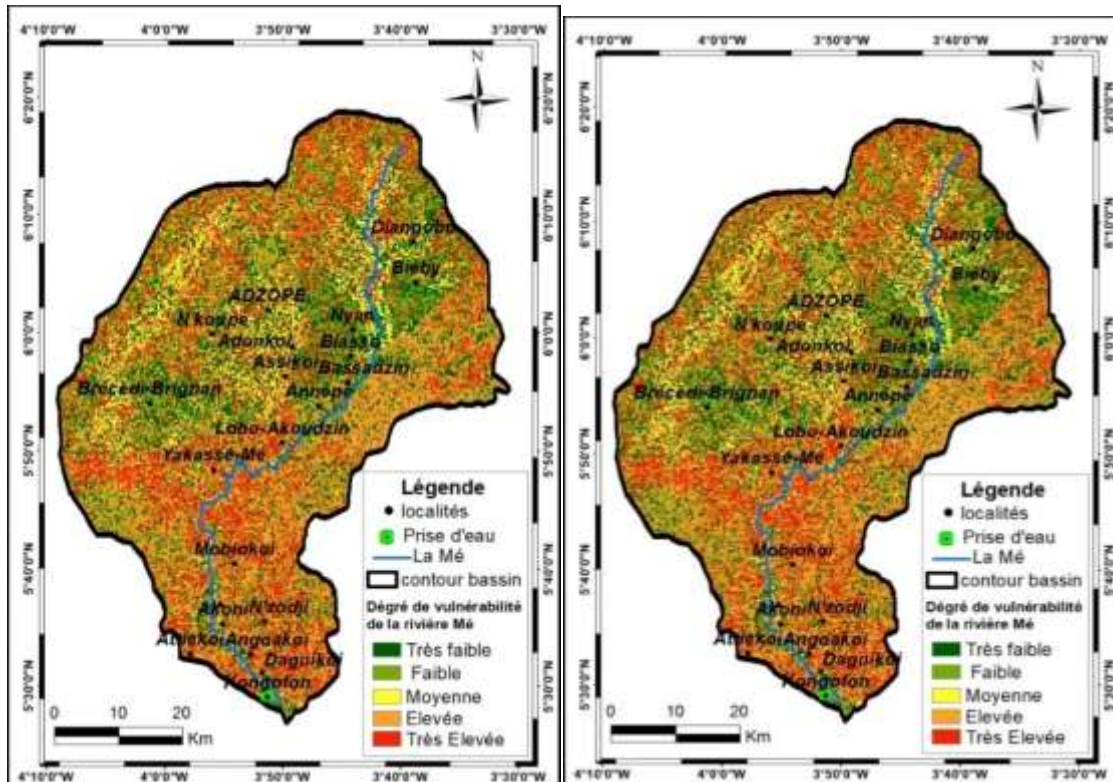


Figure 7:- Carte de vulnérabilité de la Mé à la pollution.

La classe de vulnérabilité très élevée occupe 22,77% de la zone d'étude. Elle est répartie un peu partout sur le bassin versant mais plus représentée en amont du bassin et au Sud (aux alentours de la prise d'eau brute). Cette classe est présente dans les zones de culture et de jachère qui favorisent beaucoup plus la pollution des eaux superficielles. Il est également constaté que ces zones de culture ont une densité de drainage élevée, favorisant donc un fort ruissellement des eaux dans ces zones. Ces zones contiguës au cours d'eau doivent aussi leur degré de vulnérabilité très élevée à l'occupation du sol (sols nus) et aux pentes très abruptes sur le bassin versant de la Mé.

L'analyse de sensibilité de paramètres simples pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé (Tableau 8) révèle qu'il y a une différence entre les poids théoriques et les poids effectifs.

Tableau 8:- Résultat du test de l'analyse de sensibilité à paramètre unique.

Paramètres	Poids théoriques (%)	Poids effectifs (%)		
		Wmin	Wmoyen	Wmax
Pente (P)	44	29,73	37,05	40,37
Occupation du sol (OS)	27	18,24	28,42	33,03
Type de sol (S)	15	10,14	12,63	13,76
Ruissellement (R)	9	6,08	7,58	8,26
Densité drainage (D)	5	3,38	4,21	4,59

Le tableau 8 montre que les poids effectifs calculés des paramètres tels que la pente, le type de sol, le ruissellement et la densité de drainage sont inférieurs aux poids théoriques. Par contre, seul le paramètre d'occupation du sol a un poids effectif (28,42%) supérieur à son poids théorique (27%). Nous en déduisons donc que l'occupation du sol influence significativement l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la retenue d'eau étudiée.

Carte des périmètres de protection du bassin versant de la Mé.

La figure 8 illustre les limites des différents périmètres de protection établies sur la base de la cartographie des zones ayant une influence sur la vulnérabilité à la pollution de la Mé. Ils permettent ainsi de prendre des dispositions afin de préserver la qualité de la ressource en eau.

Le périmètre de protection immédiate a été délimité à un rayon de 200 m autour de la prise d'eau brute. Il couvre une superficie de 1,97 km² sur le bassin versant et comprend les classes de vulnérabilité très élevée, élevée, faible qui sont contiguës à la prise d'eau ou se trouvant à proximité de la prise d'eau. En effet, cette zone enregistre une forte densité de drainage avec la présence de pente très abrupte et une occupation de sols marquée par la présence de sol nu, de cultures et de jachères. Par ailleurs, toutes les activités sont interdites dans cette zone sauf des opérations d'entretien des installations. Cette mesure permet d'empêcher la détérioration des installations et le déversement de tout type de polluants à proximité de la source.

Le périmètre de protection rapprochée a été délimité à un rayon de 1000 m sur le bassin versant de la Mé à partir des limites du PPI. Il a une superficie de 43,7Km². Il prend en compte les zones ayant une influence sur la vulnérabilité à la pollution la rivière Mé (classes moyenne, élevée et très élevée de la carte de vulnérabilité) ainsi que le sens d'écoulement des eaux. Les pentes de ces zones sont moyennes et élevées avec une densité de drainages non négligeable et un sol nu favorisant le ruissellement des polluants vers la rivière.

Le périmètre de protection éloignée concerne le reste des zones ou surfaces qui influencent la vulnérabilité de la rivière (classe moyenne, élevée et très élevée de vulnérabilité) situé en amont de la prise d'eau. Il a été délimité en tenant compte de ces zones dans le bassin d'alimentation de la rivière Mé. Il couvre une superficie de 1480 km².

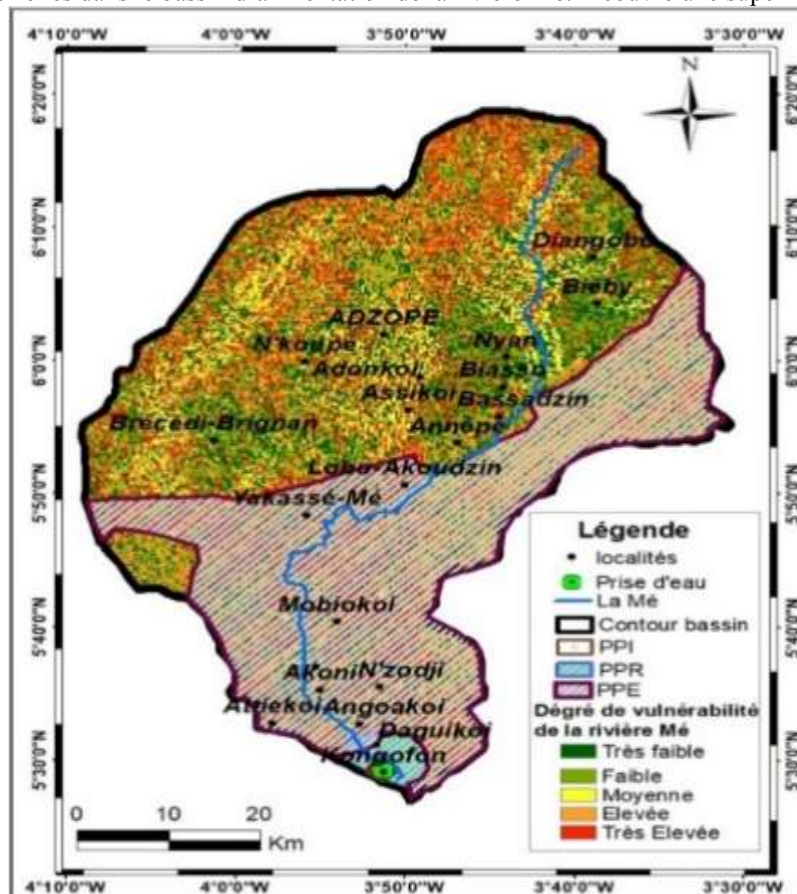


Figure 8:- Carte des périmètres de protection délimités autour de la prise d'eau de la rivière Mé.

Discussion:-

Le SIG a permis la réalisation de la carte des zones ou surfaces d'influences sur la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé, en assurant la synthèse des paramètres pris en compte à travers une analyse multicritère (AHP de Saaty). Cinq paramètres ont été pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de cette ressource (la pente, l'occupation du sol, les types de sol, le ruissellement annuel et la densité de drainage). Le paramètre déterminant dans cette cartographie de la vulnérabilité est la pente suivie de l'occupation du sol comme l'ont montré certains travaux dont, [16, 6, 8, 26]. Ainsi, la détermination des zones influençant la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé se base sur l'identification des activités agricoles polluantes pratiquées à ces endroits. Ces activités qui

pour la plupart utilisent les produits phytosanitaires, les engrais et les pesticides [4], aggravés par les pentes du terrain qui favoriseraient le ruissellement des matières nutritives issues des zones culturales vers la Mé. En effet, la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la Mé a mis en évidence cinq classes de zones d'influence de la vulnérabilité (très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée). Des études similaires réalisées par [27, 7, 6] confirment ce résultat.

Par ailleurs, [13, 17] en ont déterminé respectivement trois (faible, moyenne et forte) par des méthodes de calcul et quatre (très faible, faible, moyen et fort) à travers un SIG. Selon [16], les classes de vulnérabilité peuvent varier d'une étude à une autre comme d'une région à une autre car elles dépendent des limites de classe et des notes assignées à ces classes au départ par l'opérateur ainsi que de la sensibilité de celui-ci. De plus, selon [28], l'utilisation des SIG révèle-t-elle souvent de multiples problèmes liés à la qualité, au nombre souvent insuffisant des données, à leur interpolation et la notion de variabilité spatio-temporelle. Aussi, dans le cas de la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution à l'aide d'un SIG réside de façon générale dans le nombre et la qualité des paramètres à prendre en compte. Pour [21], le choix des paramètres ou critères doit se limiter à 7 par niveau d'hierarchisation. Ainsi, les cinq paramètres retenus dans cette méthode, ont été jugés comme les plus significatifs de la vulnérabilité et les plus utilisés dans les études effectuées en Côte d'Ivoire. Certains paramètres comme le type de sol et l'occupation du sol peuvent être regroupés en un facteur [18] pour permettre la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres. En plus, le paramètre pente qui exprime l'inclinaison de la topographie à lui seul ne suffit pas pour juger du ruissellement. La forme de la pente doit aussi être considérée [29]. De même la fiabilité et le nombre très limité de ces données ne permettent souvent pas une bonne évaluation spatiale des critères. Aussi, selon [30], l'interpolation utilisée peut entraîner des erreurs, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles.

En plus, comme remarqué par [6], la subjectivité des poids et des côtes assignées aux paramètres dans l'application de l'analyse multicritère est un facteur limitant. En effet, dans la reclassification d'occupation du sol, les mêmes cotes ont été attribuées aux cultures et aux jachères. Or une terre laissée en jachère après plusieurs années peut reconstituer une végétation considérée comme forêt claire. Donc, les valeurs attribuées aux paramètres, ont parfois tendance à surestimer ou sous-estimer le degré de vulnérabilité de la ressource.

Pour corriger cette subjectivité, l'analyse de sensibilité à paramètre unique, telle qu'appliquée par [31], demeure une solution efficace. Cette analyse permet d'ajuster la carte de vulnérabilité de la ressource en eau préalablement établie à partir des poids effectifs permettant d'obtenir une carte de vulnérabilité modifiée de la ressource en eau comme démontré par plusieurs auteurs tels que [32, 33].

Au regard de tout ce qui précède, l'approche géomatique appliquée a permis d'évaluer la vulnérabilité à la pollution de la rivière Mé tout en cernant la problématique liée à sa sauvegarde. La carte de vulnérabilité à la pollution obtenue permet d'avoir une idée sur les zones sensibles auxquelles il faut accorder une attention particulière lors de l'aménagement du territoire. Elle est d'une importance capitale dans l'aménagement du territoire, la gestion et la protection des ressources en eau.

Par conséquent, la délimitation des périmètres de protection du bassin versant de la Mé à partir de la prise d'eau a nécessité au préalable la connaissance de ces zones ayant une influence sur la vulnérabilité à la pollution de la Mé. Trois périmètres de protection ont été délimités (**PPI, PPR, PPE**).

Le périmètre de protection immédiate (PPI) a été délimité à un rayon de 200 m autour de la prise d'eau et couvre une superficie de 1,97km². Il est destiné à interdire l'accès au point de prélèvement, aux installations de traitement et à protéger ceux-ci vis-à-vis des actes de malveillance [34]. Certains auteurs, comme [26, 6, 17, 16] ont limité le PPI à un rayon respectivement de 200 m (rivière Agbo), 450m (lac d'Adzopé), 200m (lac Taabo), 100 m (retenue d'eau de Gagnoa). Pour [35], elle doit être délimitée suivant une étendue comprise de 150 à 300 m à partir de la ligne naturelle des hautes eaux du cours d'eau. Cette limite n'est pas exhaustive, elle peut être déterminée en fonction de l'état du cours d'eau, de sa taille et aussi des activités menées dans son environnement [16]. Selon [34], la dimension de cette zone doit permettre d'intervenir convenablement en cas d'accident lié à la pollution de la rivière et à toutes les activités pouvant détériorer la qualité de l'eau sont interdites à l'intérieur de cette zone.

Le périmètre de protection rapprochée (PPR) a été délimité à un rayon de 1Km par rapport au PPI, en tenant compte du sens d'écoulement de l'eau dans le bassin versant (Nord-Sud) et des zones sensibles influençant la vulnérabilité à la pollution de la rivière. Il couvre une superficie de 43,7 km².

La dimension est limitée à une distance de 1Km par rapport au cours d'eau ; car, selon [16] à cette distance, il est possible qu'une pollution dissoute dirigée vers la retenue d'eau puisse être interceptée ou piégée à la faveur de la présence d'une végétation adaptée. Cette distance correspondante à quelques heures de transfert jusqu'au point de prélèvement, en supprimant les rejets d'eaux usées, les dépôts polluants et la pollution diffuse par ruissellement [36]. Les travaux de [16, 6, 26] ont également délimité cette zone à 1km du PPI.

Le groupe de travail [37] préconise un périmètre de protection rapproché entre 100m et 1km. Pour [34], la largeur de cette zone est fonction de la pente, des rives et de la couverture du sol. Selon [16], tout dépend de l'étendue de la source d'eau et du bassin, des activités menées au sein de ce dernier qui sont susceptibles d'influer sur la vulnérabilité du cours d'eau et de l'appréciation de l'exécutant.

Le périmètre de protection éloignée (PPE) couvre une superficie de 1480 Km². Il doit assurer la protection des eaux en particulier les pollutions persistantes ainsi que la pollution chimique ou radioactive [38]. C'est une zone où les servitudes sont non contraignantes, car elle est facultative, mais peut se justifier quand certaines activités sont à l'origine de pollution importante. Il englobe les terrains ayant des pentes inférieures à 3 degrés et les étendues de cette zone peuvent augmenter ou diminuer en faisant intervenir les autres paramètres et/ou par des ajustements en fonction des limites cadastrales (communes ou parcelles) et géographiques (cours d'eau, voies de communication) [23]. D'autres auteurs tels que [17, 37, 8], étendent cette zone sur l'ensemble du bassin contenant la source d'eau (retenue, lacs, rivière...). Ainsi, ce périmètre n'a pas vocation à entraîner la création de servitudes, mais d'alerter d'une façon plus large le public sur la nécessité de préserver la qualité des eaux de surface qui sont destinées à la consommation.

Au regard de tout ce qui précède, Les limites des zones de protection varient d'un auteur à un autre. Ce qui est certainement dû à la variation des caractéristiques des différentes zones d'étude et aux exigences des différents codes de l'eau des pays. C'est une difficulté qui a été contournée dans cette étude en imposant un intervalle pour le PPI. Aussi, des auteurs intègrent-ils le temps de transfert des polluants et la relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines de la localité. Certains périmètres de protection sont réalisés sur la base de la distance hydrologique (longueur du trajet suivi par l'eau jusqu'à la ressource ou l'ouvrage à protéger) [39, 40]. D'autres par contre, sont réalisés suivant le temps de transfert des eaux de ruissellement qui semble offrir plus de précision car elle intègre la pente, la rugosité du terrain et l'intensité de la pluie qui est le moteur de l'écoulement [12]. Mais, il faut indiquer que le temps de transfert de l'eau jusqu'à la retenue d'eau à protéger n'est pas toujours assimilable au temps de transfert du polluant. En effet, certaines molécules polluantes à coefficient d'adsorption élevé s'accrochent aux particules de terre. Ce qui implique le choix d'un modèle de transfert dans lequel sont intégrés la pente, le type de sol, le taux de ruissellement (la perte de sol) et surtout l'occupation du sol révélée par les résultats de l'analyse de sensibilité à paramètre unique.

Autrement dit, le SIG est une solution informatisée pour la délimitation des périmètres de protection comme l'ont montré [23]. Il permet une connaissance élargie et surtout « numérique » des ressources en eau et de leur protection [12]. C'est pourquoi, en dépit des différentes limites énumérées dans la réalisation de la méthode utilisée, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité à la pollution soit fiable. Par conséquent, les périmètres de protection sont bien adaptés. Ainsi, les périmètres de protection établis peuvent servir à l'instauration des servitudes à l'intérieur desquels de meilleures pratiques culturelles et domestiques seront obligatoires afin d'assurer continuellement l'approvisionnement en eau potable des populations à partir de la rivière Mé.

Conclusion:-

La délimitation des périmètres de protection de la rivière Mé à partir de la prise d'eau s'est faite après avoir évalué au préalable la vulnérabilité à la pollution de cette ressource en eau à travers une carte. Elle présente cinq classes de vulnérabilité que sont : classe très faible (19,72%), classe faible (19,95%), classe moyenne (8,12%), classe élevée (29,44%) et classe très élevée (22,77%). Cette carte est surtout dominée par les classes élevées qui représentent 29,44 % de la zone étudiée.

Les périmètres de protection ont ensuite été déterminés en tenant compte des classes de vulnérabilité et de leur répartition sur le bassin versant. Trois périmètres de protection ont été délimités : le périmètre de protection immédiate (PPI), le périmètre de protection rapprochée (PPR) et le périmètre de protection éloignée (PPE).

Cette étude a montré que les outils SIG peuvent apporter une contribution dans la cartographie des surfaces influençant la vulnérabilité à la pollution des eaux de surface.

Au terme de cette étude, pour une bonne protection de la prise d'eau et un bon suivi de la qualité de l'eau de la rivière Mé, il est recommandé de :

1. prendre des décisions pour réglementer et contrôler toutes activités localisées à l'intérieur des périmètres de protection établis ;
2. faire une délocalisation ou un suivi régulier de toute activité autour de la prise d'eau de nature à détériorer l'ouvrage de prise d'eau.
3. déclarer le bassin versant de la Mé zone d'utilité publique afin de réguler toutes activités anthropiques qui s'y déroulent.

References Bibliographiques:-

1. Guiraud F. (1995) : Actualisation de guide d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau de surface. Rapport BRGM R38853, 59 p.
2. EIES (2018) : Rapport final d'étude d'Impact Environnemental et Social du projet pour la conception, le financement et la réalisation des travaux de renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan à partir de la rivière Mé, 403 p.
3. Traoré A., Ahoussi K. E., Aka N., Soro N. (2015) : Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la côte d'Ivoire). Int j. Pure App. Biosci. 3(4), P.P.312-322.
4. Ahoussi K.E., Seka A.M., Traoré A. (2019) : Caractérisation d'un environnement hydrologique influencé par l'usage des pesticides en agriculture en Côte d'Ivoire : Cas du bassin versant de la Mé. Journal of Applied Biosciences, Vol : 161, pp. 16652-16662.
5. Affessi A.S. et Affessi A. (2019) : Migration incontrôlée, pratique de résilience et fragilisation des rapports sociaux dans l'exploitation clandestine de l'or à Nyan (Côte d'Ivoire) international journal of innovation and Applied Studies, Vol. 28, N° 1, pp. 191-202.
6. Deh K.S., Kouamé K.J., Eba A.L., Edoukou D.J., Kpan A. et Jourda J.P. (2017) : Contribution of Geographic Information Systems in Protection Zones Delineation around a Surface Water Resource in Adzope Region (Southeast of Côte d'Ivoire). Journal of Environmental Protection, 2017, Vol. 8, pp. 1652-1673.
7. Eba A. E., Kouamé K. J., Deh S., Anoh K. A., Balliet R., Touré M. et Jourda J.P. (2016) : Evaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une eau de surface destinée à l'adduction d'eau potable d'une Métropole. Cas De La Lagune Aghein à Abidjan, (Sud de la Côte d'Ivoire). European Scientific Journal, Vol 12, pp. 1857- 7431.
8. Aké G. E., Eba A. E. L., Assi J. J., Kouadio B. H., Biémi J. (2019): Apport des SIG à la délimitation des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI à Aboisso, Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Afrique Sciences 15 (3) (2019), pp. 234-252.
9. ElGarouani A. et Abdelaziz M. (2006) : Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage hachef (Maroc) par télédétection et SIG. Revue des sciences de l'eau, Vol.19, N° 1, pp 1-10.
10. Avenard J.M. (1971): Aspect de la géomorphologie. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris, n 50, pp 7-71.
11. Soro N. (1987) : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, bassin versant de la Mé. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Scientifique, Technique et Médicale de Grenoble, 243 p.
12. Koffi K. J.P., N'go Y. A., Yéo K. M., Koné E. D., Savané I. (2014) : Détermination des périmètres de protection de la lagune Aghien par le calcul du temps de transfert de l'eau jusqu'à la lagune, Larhyss Journal, n°19, pp. 19-35.
13. Shoen R., Codivell A., Richard J. (2001) : Vulnérabilité des eaux souterraines. Cartographie de l'aléa de pollution des eaux superficielles et souterraines par les substances phytosanitaires en région Midi-Pyrénées. Service public du BRGM 2001-000EAU726. 46p.
14. Rosi S., Stamm C., Reichert P. (2009): Modeling potential herbicide loss to surface waters on the Swiss plateau, Journal of Environmental Management, 91, pp 290-302.
15. Perraud A. et De LaSouchere P., (1979): Carte de l'esquisse pédologique de la CI au 1/500 000.

16. Eba A. E. L., Kouamé K. J., Jourda J.P., Saley M. B., Aké G. E., Deh Serge K. and Anoh K. A. (2013): Demarcation of Surface Water Protection Perimeters by Using GIS: Case of Gagnoa Reservoir in West Central of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.4, Issue 4, pp.1311-1320.
17. Anoh K. A. (2014) : Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Cote d'Ivoire). Thèse de Doctorat unique, Université de Cocody, 182p.
18. Douay D. et Lardieg E. (2010) : Délimitation des Aires d'Alimentation des captages prioritaires du bassin Adour Garonne, Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des captages d'eau superficielle, 28 p.
19. Anoh K.A. (2009) : Evaluation de la vulnérabilité spécifique aux intrants agricoles des eaux souterraines de la région de Bonoua. Mémoire de DEA, option Télédétection et SIG, UFR STRM, Université de Cocody, 49 p.
20. Saaty T.L. (1977): How to make a decision The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, vol. 48, p. 9-26.
21. Saaty T. L. (1980) : The Analytics Hierarchy Process : Planning, Priority setting, Resource allocation, Mc Graw-Hill, New York, 19 p.
22. Roy B. (1985): Méthodologie multicritères d'aide à la décision. Paris, Économica, XXII 423p.
23. ElGarouani A. et Merzouk A. (2004): Approche géomatique pour la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau souterraines (champ captant). 11 p.
24. (MAPAQ) (1995) : Guide d'application. Examen des projets de distribution au Québec d'eau embouteillée importée. Centre québécois d'inspection des aliments et de santé animale, p. 29.
25. Napolitano P. and Fabbri A.G. (1996): Single-Parameter Sensitivity Analysis for Aquifer Vulnerability Assessment Using DRASTIC and SINTACS. In: Kovar K. and Nachtnebel H. P., Eds., *HydroGIS Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, IAHS Publication, Vol. 235, pp. 559- 566.
26. Aké G. E., Eba A. E. L., Assi J. J., Kouadio B. H., Biemi J. (2020): Contribution de la géomatique à la délimitation des périmètres de protection: Cas d'Agbo Rivière à Agboville (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *Journal of environmental protection*, Vol.11, pp. 470-490.
27. Macary F., Balestrat M., Puech C. et Saudubray Y. F. (2006) : Méthode d'estimation d'un risque spatialisé de la contamination des eaux de surface par les intrants agricoles à différentes échelles spatiales. Application sur les coteaux de Gascogne. 20 p.
28. 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 de doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan. 237p.
29. GEO-HYD (2005) : Diagnostic SAGE Estuaire de la Loire, Annexe technique sur les méthodologies d'estimation de la vulnérabilité des sous bassins versants au risque de ruissellement, 13 p.
30. Jourda J. P., Kouamé K. J., Adja M. G., Deh S. K., Anani A. T., Effeni A. T. et Biemi J. (2007) : Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Acte de conférence Francophone ESRI 10 et 11 octobre-Versailles. 18 p.
31. Djemin Edoukou J., Kouamé K. J., Deh S. K., Anani A. T., Jourda J. P. (2016) : Contribution of the Sensitivity Analysis in Groundwater Vulnerability Assessing Using the DRASTIC Method : Application to Groundwater in Dabou Region (Southern of Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, 2016, 7, pp.129-143.
32. Saïdi S., Bouri S. and Ben-Dhia H. (2011) : Sensitivity Analysis in Groundwater Vulnerability Assessment Based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf Aquifer, Tunisia : A Validation Study. *Hydrological Sciences Journal*, 56, 288-304. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.552886>
33. Neshat A., Pradhan B., Pirasteh S. and Shafri H.Z.M. (2014) : Estimating Groundwater Vulnerability to Pollution using A modified DRASTIC Model in the Kerman Agricultural Area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3119-3131. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2690-7>.
34. Carre J. (2005) : Protection des prises d'eau de surface destinées à l'alimentation d'eau potable. *TSM N° 4*, pp. 27-34.
35. Bibeau R. et Breune I. (2009) : "Les initiatives réglementaires municipales de protection environnementale en milieu agricole au Québec : état de la situation", Ed. Agriculture et Agroalimentaire Canada. ISBN 978-1-100-91188-5, (2009) 69 p
36. Marchal J.P., (2007) : Eaux destinées à la consommation humaine. Guide pour la protection des captages publics. Départements du Gard et de l'Hérault. Rapport final BRGM/RP-55699-Fr, 155 p.
37. MEEB (2010) : Ministère de l'Énergie et de l'Eau du Bénin. Guide méthodologique à l'usage des communes. 10 p.

38. ONEP-GTZ (1995) : Étude en vue de la requête pour l'installation des périmètres de protection pour la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur l'oued Bou Regreg. Office national de l'eau potable et Gesellschaft für TechnischeZusammenarbeit, Office national de l'eau potable du Maroc, Rapport scientifique, 175 p.
39. Rousseau A.N., MaihotA., Massicotte A.S., Duchemin M., Dupont J. and Villeneuve J.P. (1997)GIBSI : A Watershed-Based Software System for the Integrated Management of Surface Water Quality. Journal of Soil and Water Conservation, 25, 284-301.
40. Melesse, A.M. AND Graham W.D. (2004) : Tempête prédiction de ruissellement basé sur une méthode de temps de parcourrépartis dans l'espace utilisant la télédétection et des SIG. Journal of American Water Resources Association, 8, 863-879. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01051.x>