Afrique SCIENCE *15(3) (2019) 234 - 252*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Apport des SIG a la délimitation des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI à Aboisso, sud - Est de la Côte d'Ivoire

Gabriel Etienne AKE[1*], Anowa Evrarde Larissa EBA[1], Jean Jaurès ASSI[1], Boyossoro Hélène KOUADIO[1,2] et Jean BIEMI[1]

[1] *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*
[2] *Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, courriel : *ak_gabe@yahoo.fr*

Résumé

L'étude vise à délimiter des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia à Aboisso afin de réduire les risques de pollution. L'approche méthodologique à consister d'abord à évaluer la vulnérabilité à la pollution du cours d'eau puis à délimiter les périmètres de protection à partir de la carte de vulnérabilité établie. Elle a nécessité cinq paramètres : la pente, l'occupation du sol, les types de sol, le ruissellement annuel et la densité de drainage. Puis, une pondération de ces paramètres a été faite par la méthode d'analyse multicritère de Saaty. La carte de vulnérabilité révèle cinq classes : très faible (29,18 %) ; faible (29,59 %) ; moyenne (21,52 %) ; élevée (18,28 %) et très élevée (1,43 %). Trois périmètres de protection ont été délimités à partir de cette carte et des études antérieures. Le périmètre de protection immédiate est délimité à 150 m autour de la prise d'eau de la SODECI et couvre les zones à forte influence sur la vulnérabilité à la pollution dudit cours d'eau. Le périmètre de protection rapprochée avec une distance de 750 m, et prend en compte les zones à forte influence sur la vulnérabilité de la Bia et du sens d'écoulement des eaux. Le périmètre de protection éloignée couvre une grande partie de la basse Bia avec une superficie de 37,77 km^2 et prend en compte les zones qui influencent faiblement la vulnérabilité du cours d'eau. Cette carte des périmètres constitue un outil d'aide à la décision pour les autorités, dans la protection et la gestion des ressources en eau du département d'Aboisso.

Mots-clés : *périmètres de protection, analyse multicritère, Aboisso, Côte d'Ivoire.*

Abstract

GIS contribution to the delimitation of the protection perimeters around the water source of SODECI in Aboisso, South-East Côte d'Ivoire

The study aims at delimiting several perimeters protection around the water capture of the SODECI located downstream the Bia in Aboisso for reducing pollution risks. The methodology approach consisted first to evaluate that stream vulnerability to pollution, then to delimit the protection perimeters from the vulnerability map. It needed five parameters : the slope, the land use, the land types, the annual run off and the drainage density. Then was performed a weighting of these parameters throughout the multicriteria analysis method of Saaty. The vulnerability map exhibited five classes : very low (29.19 %); low (29.59 %);

medium (21.52 %); high (18.28 %) and very high (1.43 %). Three protection perimeters were delimited from that map and from previous works. The nearest perimeter protection is delimited at 150 m around the water capture of the SODECI, and covers areas having great influence on water pollution for that stream. The closer protection perimeter, at a distance of 750 m, includes areas of great influence on the vulnerability of the Bia and water run off direction. The farther protection perimeter covers a greater part of the downstream of the Bia with a size of 37.77 Km^2 and includes areas influencing weakly the stream's vulnerability. That perimeters map is a tool that could help authorities to make decision, then for water resources management and protection in the Department of Aboisso.

Keywords : *protection perimeters, multicriteria analysis, Aboisso, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

L'eau est une ressource limitée nécessaire à la vie et aux systèmes écologiques, et essentielle pour le développement économique et social. Les populations ont besoin d'eau en quantité et en qualité pour être en bonne santé [1]. Le problème d'accès à l'eau devient crucial car celle-ci est menacée par les pollutions (agro-industrielle, domestique) et l'accroissement de la demande lié à la croissance démographique. De plus, 1,1 milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'eau salubre [1]. Par conséquent, la gestion et la protection de la ressource en eau demeurent une préoccupation pour l'homme. Pour une meilleure gestion de cette importante ressource, plusieurs conférences se sont succédées sur la scène mondiale. Il s'agit notamment de celles de Mar de Plata en 1977 qui fut la première [2], de Dublin en 1992 et de Rio de Janeiro en 1992 appelée Sommet "Planète Terre" [1]. En Côte d'Ivoire, la faible productivité globale des aquifères du socle et la démographie croissante dans les villes situées sur le socle favorisent l'utilisation des eaux de surface comme sources alternatives ou principales d'alimentation en eau potable [3]. Cependant, la qualité physique et chimique de ces eaux de surface est dégradée car elles reçoivent des polluants d'origine divers (déchets et effluents domestiques ou industriels, eau de ruissellement provenant des terres cultivées, phénomènes d'envasement et ensablement, etc.) [3]. La ville d'Aboisso, chef-lieu du département d'Aboisso est alimentée en eau potable par le cours d'eau Bia à l'aide d'une station de pompage qui prélève cette eau. La Bia, un cours d'eau très important de ce Département, et prend sa source au Ghana (au nord de Chemraso), avec une longueur de 290 km, et draine un bassin versant d'une superficie de 1500 km^2 [4].

Cette rivière qui sert d'approvisionnent en eau potable dans le département d'Aboisso était en 2017, confrontée à un problème de pollution dans la mesure où sa couleur avait changé ; elle est devenue marron [5]. Ce constat a été fait par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) de la sous-préfecture de Bianouan en janvier 2017. Cela serait dû aux activités minières menées au Ghana voisin [5]. De plus, le département d'Aboisso est une zone agricole avec d'importantes plantations agro-industrielles (36 000 hectares de palmier à huile et plus de 5 000 hectares de bananes, ananas et hévéas), situées dans le bassin versant de la Bia, et qui utilisent des intrants agricoles (engrais, pesticides) pour une meilleure productivité [6] menaçant la qualité du cours d'eau. En plus de ces activités agricoles, il y a le rejet des ordures ménagères, des eaux usées dans le cours d'eau et des activités minières qui sont menées dans cette région. Pourtant, une des conséquences environnementales majeures de ces activités est la dégradation de la qualité des eaux de surface qui charrient toutes sortes d'éléments. Ainsi, pour faire face aux problèmes de dégradation de la qualité des ressources en eau de surface, la détermination des périmètres de protection est indispensable car ils constituent des moyens de prévention et de gestion durable de la ressource en eau. La présente étude a été entreprise dans cette perspective et a pour objectif de délimiter des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia à Aboisso en vue d'une protection et d'une gestion durable de la ressource en eau. Elle intègre dans sa démarche méthodologique les outils de la cartographie et des SIG qui demeurent des éléments de prises de décisions pour les gestionnaires en charge des ressources en eau.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans la partie basse du bassin versant de la Bia, qui est un bassin versant transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. Elle est localisée entre les latitudes 5°26'30"N et 5°34'30" N et les longitudes 3°13'30"W et 3°8'W ***(Figure 1)***. Le bassin versant de la Bia a une superficie d'environ 1500 Km^2 [4]. L'étude se fait au niveau de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia à Aboisso qui assure l'alimentation en eau potable des populations.

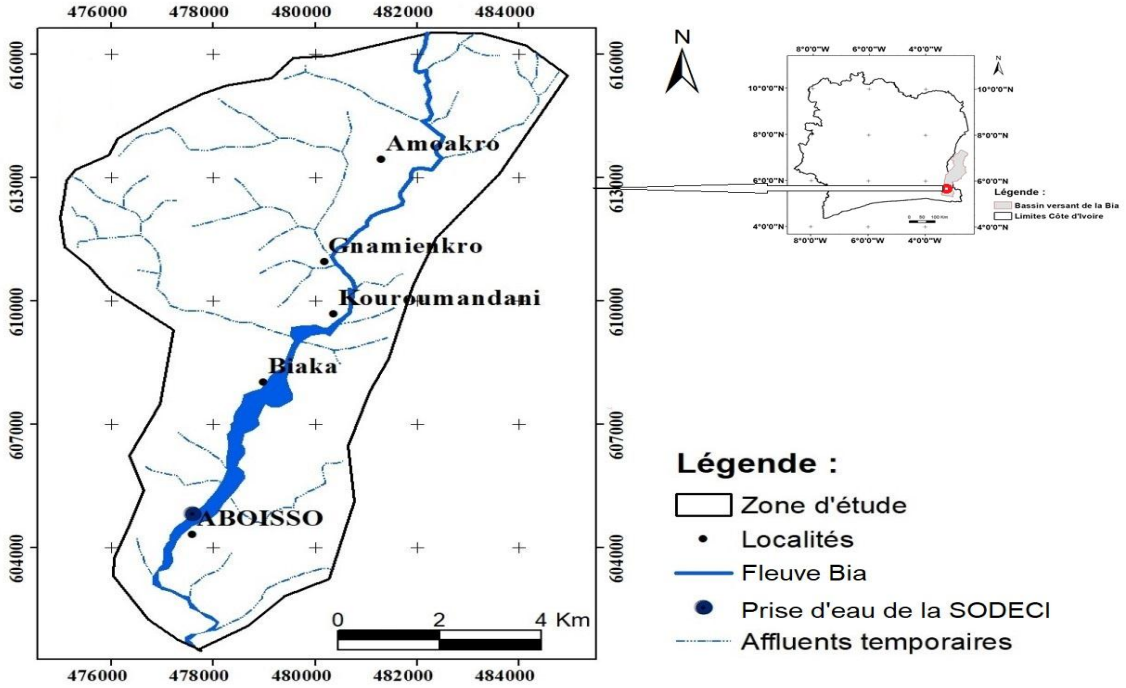

Figure 1 : *Localisation de la zone d'étude*

La Bia, cours d'eau principal du bassin, prend sa source au Sud-Ouest du Ghana précisément au Nord de Chemrasso. Elle a une longueur d'environ 290 km dont seulement 120 km en Côte d'Ivoire et se jette dans la lagune Aby au Sud d'Aboisso [7]. Dans son ensemble, le relief de la basse Bia est monotone [6]. C'est un paysage mamelonné et relativement peu élevé avec une altitude qui varie entre 2 et 213 m. Les altitudes les plus élevées (108 à 213 m) s'observent au Nord-Ouest de la zone et celles les plus basses au niveau d'Aboisso et ses environs mais aussi à Biaka et Kouroumandani. La zone d'étude est bien arrosée avec une pluviométrie annuelle de 1700 mm sur la période 1970-2015. Cette zone est constituée de forêt dense parsemée de plantations de caféiers, de cacaoyers, de palmiers à huile et quelques arbustes épineux, lianes et palmiers. Les zones d'affleurement sont couvertes d'herbes basses [8]. L'agriculture domine l'activité économique de la région avec plus de 75 % de la superficie de la zone [6]. Plusieurs types de cultures s'y développent telles que le café, le cacao, l'hévéa, l'ananas, la banane, le cocotier et surtout le palmier à huile. A ces cultures dites industrielles s'ajoutent les cultures vivrières (banane plantain, manioc, igname, taro, maïs etc.) et maraichères. La pêche est aussi l'une des activités qui a pris de l'importance dans cette région disposant de nombreux cours d'eau [9]. Dans cette région des activités minières sont aussi développées à travers la mine d'Afféma. La zone d'étude bénéficie d'un réseau hydrographique dense dont le cours d'eau principal, la Bia, sert à assurer l'alimentation en eau potable de la population par la SODECI. Nonobstant ce fait, certaines localités continuent d'être approvisionnées en eau potable à partir des forages et des puits.

2-2. Matériel et données

Les données utilisées dans cette étude sont d'ordre cartographique, satellitaire et climatique.

2-2-1. Données cartographiques

- la carte géologique du degré carré de Grand-Bassam au 1/200 000 [10] a été utilisée pour déterminer la carte géologique de la zone d'étude ;
- une carte topographique des feuilles 2d et 4b du degré carré de Grand-Bassam au 1/50 000 obtenue auprès du Centre d'Information Géographique et du Numérique (CIGN) (ex-CCT) a été utilisée pour délimiter la zone d'étude ;
- l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle de 1/500 000, feuille Sud-Est [11] a été utilisée pour réaliser la carte pédologique de la zone d'étude ;
- la carte d'occupation du sol datant de 2016 au 1/50 000 obtenue auprès du Centre d'Information Géographique et du Numérique (CIGN) (ex-CCT) pour extraire l'occupation du sol de la zone d'étude.

2-2-2. Données satellitaires

Les images Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de résolution 30 m de la Côte d'Ivoire, fournies par la navette spatiale américaine Endeavour et téléchargé sur le site américain "ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa" en 2000 ont permis d'établir la carte des pentes et de densité de drainage de la zone.

2-2-3. Données climatiques

Les données climatiques (pluviométries, températures moyennes mensuelles) de la station d'Adiaké de 1970 à 2015 acquises auprès de la Société de Développement et d'Exploitation, Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) ont été utilisées pour l'estimation du ruissellement annuel. Le logiciel ArcGis 10.5 a été utilisé pour la cartographie des paramètres et leur combinaison.

2-3. Méthodes

La méthodologie utilisée pour déterminer les périmètres de protection a fait l'objet de plusieurs applications. En Côte d'Ivoire, on peut citer [3] à Gagnoa ; [12] à Taabo, [13, 14] à Adzopé et ailleurs, [15] au Maroc (le barrage de Hachef), [16] au Québec (Canada) etc. Cette méthodologie se décline en deux étapes essentielles notamment l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la basse Bia et la détermination des périmètres de protection.

2-3-1. Évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso

Selon la disponibilité des données, cinq paramètres ont été retenus : la pente de la topographie de surface, l'occupation du sol, le type de sol (la pédologie), la densité de drainage et le ruissellement.

2-3-1-1. Identification, cartographie et reclassification des paramètres

2-3-1-1-1. Pente

La pente (la topographie) reflète la géomorphologie de la surface terrestre [3]. Elle est le rapport de la dénivellation et la distance horizontale [12]. Elle est le facteur qui accélère ou ralentit soit le ruissellement ou l'infiltration des effluents agronomiques vers les horizons de faible pente, donc vers les eaux de surface [17].

Un masque de la zone d'étude a été appliqué au MNT de la Côte d'Ivoire pour obtenir le MNT de la zone d'étude. A partir de ce MNT, le paramètre "Pente" a été généré en utilisant l'outil "Slope" d'ArcGis ***(Figure 2)***. Les pentes varient de 0 à 129,11 %.

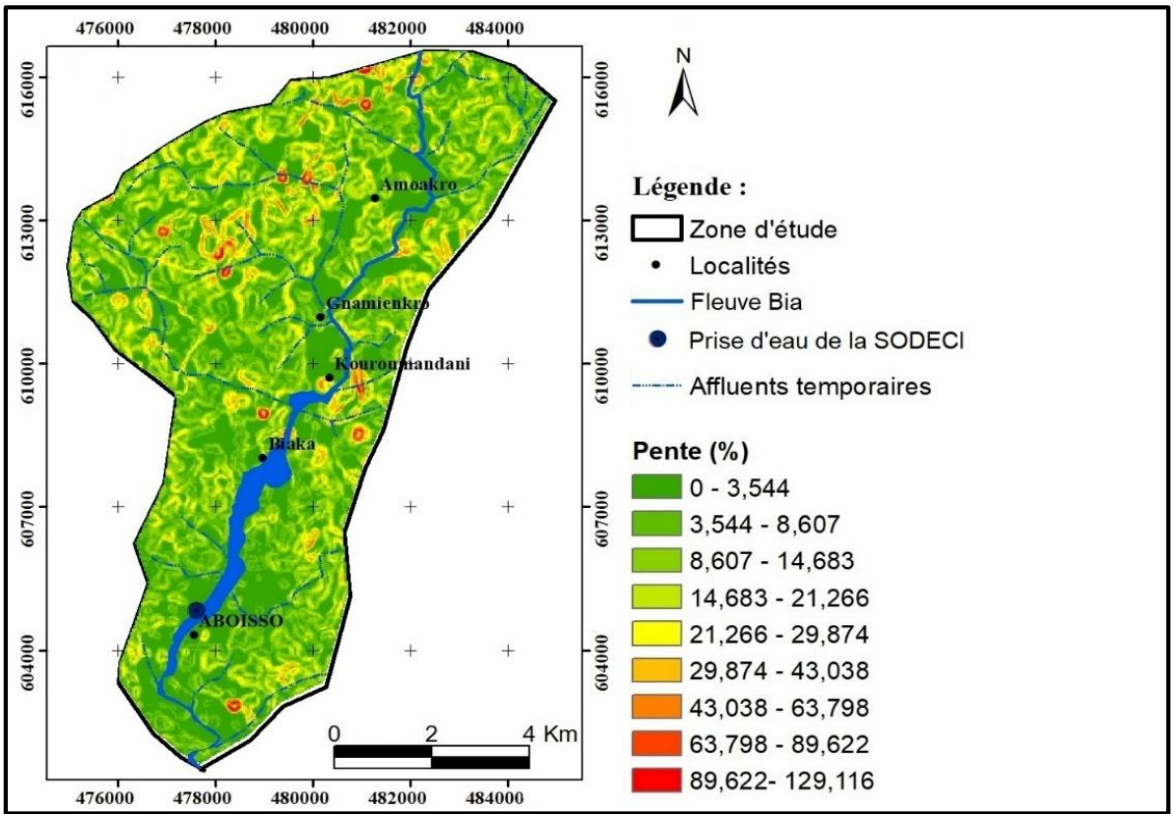

Figure 2 : *Carte des pentes de la basse Bia à Aboisso*

2-3-1-1-2. Occupation du sol

Elle correspond à l'utilisation du sol (activités urbaines, agricoles et industrielles). Elle joue un rôle prépondérant dans le ruissellement des eaux, dans la retenue des matières en suspensions ainsi que dans l'absorption des polluants. Ainsi, une terre boisée aura tendance à retenir les eaux et les polluants et 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 d'occupation du sol ***(Figure 3)*** est issue de la carte d'occupation du sol réalisée par le Centre d'Information Géographique et du Numérique (CIGN ex-CCT) en 2016. Celle-ci a été transférée sur ArcGis 9.3 pour être rastérisée afin de la rendre utilisable dans un SIG. Cinq classes ont été distinguées : Eau ; forêt dense ; forêt dégradée ; mosaïque cultures/jachères et habitats/sols nus.

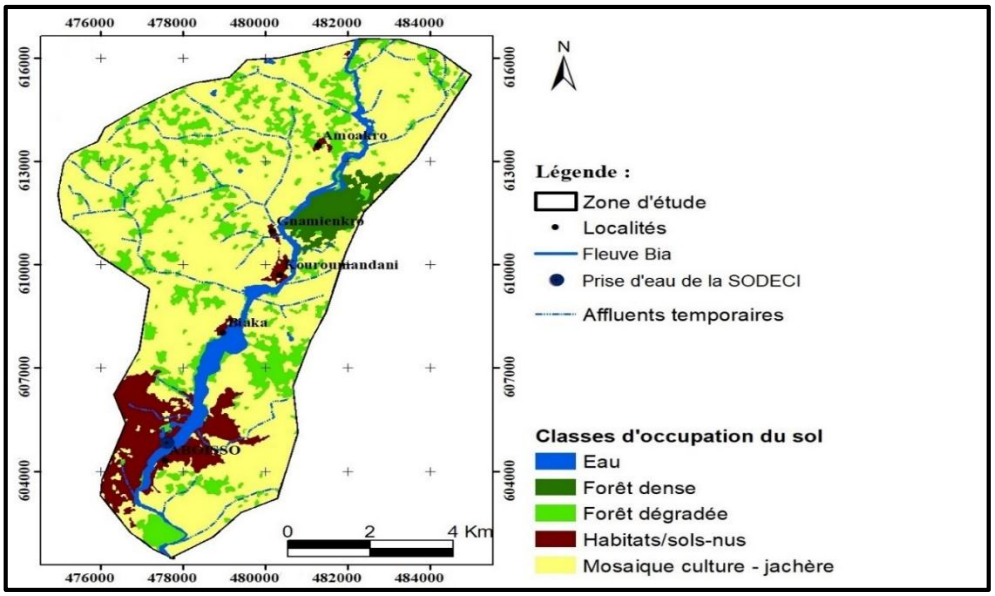

Figure 3 : *Carte d'occupation du sol de la basse Bia à Aboisso*

2-3-1-1-3. Type de sol

Les caractéristiques du sol conditionnent la partition des eaux de pluies entre le ruissellement et l'infiltration en tenant compte également de la pente [3]. 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. La carte pédologique de la zone d'étude ***(Figure 4)***a été obtenue à partir de l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500 000 de [11]. La zone présente trois grandes catégories de sols :

- les sols typiques ferralitiques fortement désaturés (Ferralsol dystic) ;
- les sols ferralitiques fortement désaturés remaniés (Plinthic ferralsol dystic) ;
- les sols hydromorphes à gley et pseudogley (Gleysol stagnic).

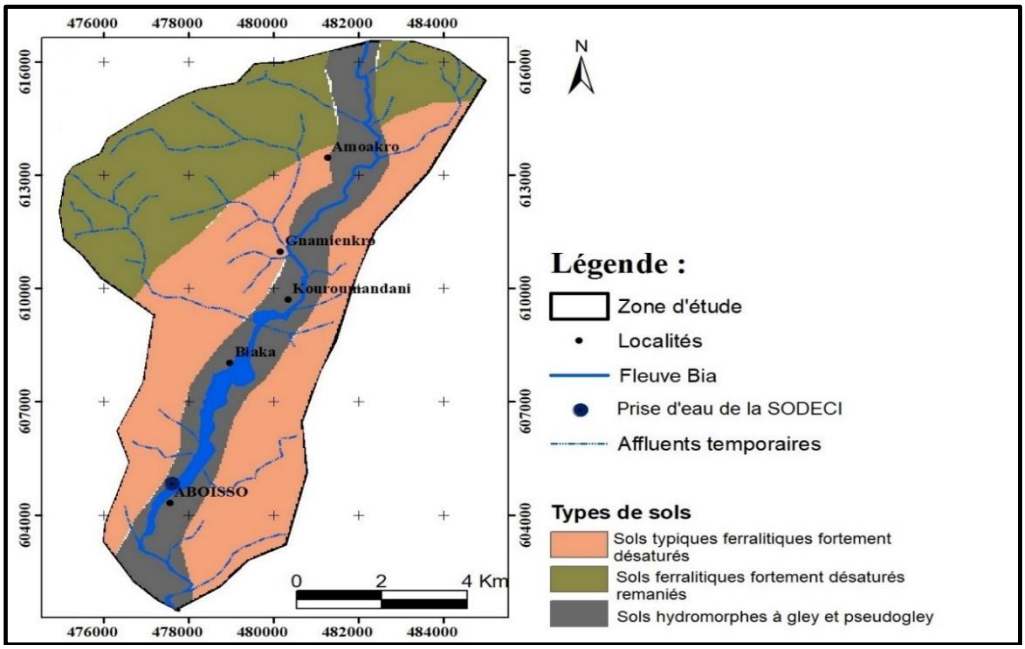

Figure 4 : *Carte des types de sol de la basse Bia à Aboisso*

2-3-1-1-4. Ruissellement annuel

Le ruissellement désigne en hydrologie le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. L'intensité des pluies influence le ruissellement de la fraction d'eau tombée [19]. Les eaux de ruissellement constituent un agent principal de transfert des polluants vers les eaux de surfaces. Plus les eaux de ruissellement sont en grande quantité, plus le risque de contamination des sources est élevé [3]. Le paramètre " Ruissellement annuel " a été déterminé en multipliant le coefficient de ruissellement par la pluviométrie moyenne annuelle de la région (méthode de Thornthwaite). Selon les travaux de l'ORSTOM, réalisés entre 1959 et 1962 sur le bassin versant de la Bia, le coefficient de ruissellement est de 18 %. Les données pluviométriques utilisées sont les données pluviométriques moyennes mensuelles de la station d'Adiaké de 1970 à 2015 avec une pluviométrie moyenne annuelle estimée à environ 1679,68 mm. La valeur du ruissellement annuel obtenu a été interpolée sur l'ensemble du bassin versant de la basse Bia à Aboisso.

2-3-1-1-5. Densité de drainage

La densité de drainage est définie comme le rapport de la longueur totale des cours d'eau d'un bassin sur la surface de ce bassin versant [20]. Elle s'exprime en (km/km^2) et dépend de la géologie (structure et lithologie) et des caractéristiques topographiques du bassin versant. La pollution des ressources en eau de surface est liée à la densité du réseau hydrographique. Plus le réseau hydrographique par unité de gestion est dense, plus la vulnérabilité à la pollution de la ressource en eau est élevée [19]. La carte de densité de drainage ***(Figure 5)*** a été réalisée à partir du réseau hydrographique par l'outil "line-density" du logiciel ArcGis. Les valeurs de densité varient entre 0 et 4,462 km/km^2. La carte de densité présente une forte densité autour des cours d'eau et au niveau des croisements des affluents. La densité baisse lorsqu'on s'éloigne des différents cours d'eau.

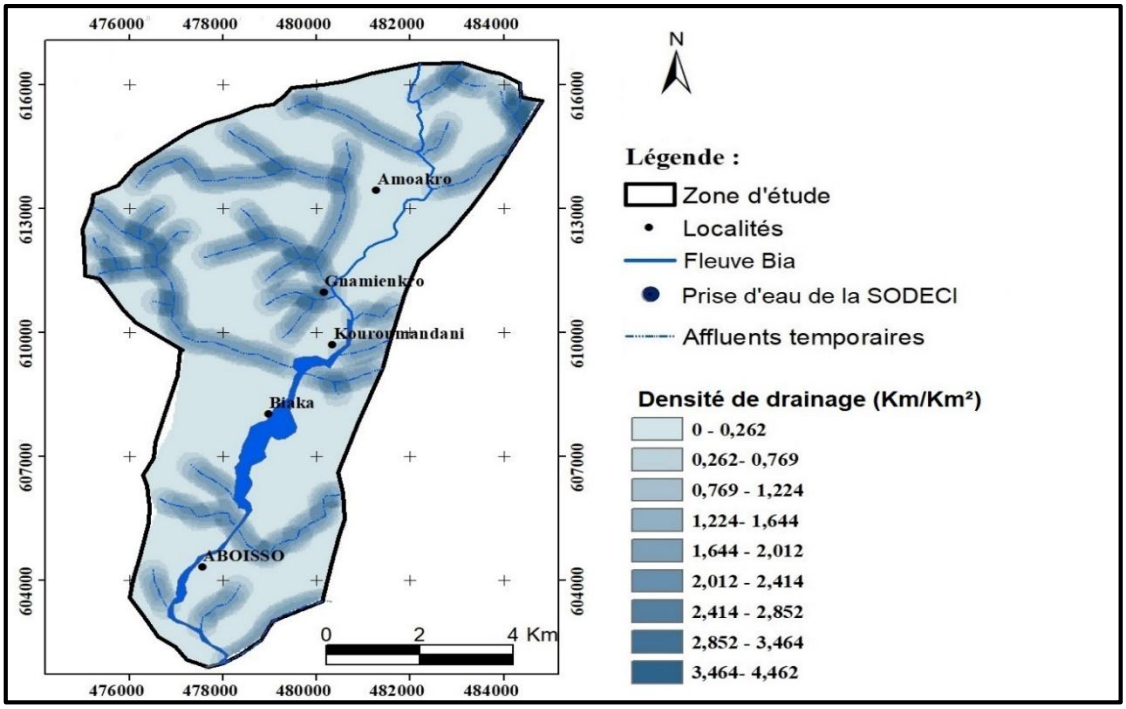

Figure 5 : *Carte de densité de drainage de la basse Bia à Aboisso*

La cartographie des paramètres a été suivie d'une reclassification des différentes valeurs de ces cinq paramètres sur la base des travaux de [19] et a permis de représenter les cartes de classification desdits paramètres à partir de l'outil "Reclassify" du module "Analyst spatial" sous ArcGis avant leur pondération.

2-3-1-2. Pondération des paramètres par analyse multicritère de Saaty

2-3-1-2-1. Elaboration de la matrice carré

La méthode de comparaison par paire par le processus d'analyse hiérarchique Analytical Hierarchy Process (AHP) développée par [21], utilisée par [3, 14, 22], a été exploitée. Il s'agit de 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 [21] de comparaison par paire. Lorsque deux paramètres ont la même importance dans le phénomène étudié, l'échelle de Saaty donne à ces deux paramètres la valeur de "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. Cette méthode permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à "1". La matrice issue de la comparaison par paire des différents facteurs est résumée dans le ***Tableau 1***.

Tableau 1 : *Matrice issue de la comparaison des différents paramètres (Matrice originale)*

	P	OS	S	R	D
P	1	3	5	6	7
OS	1/3	1	3	4	5
S	1/5	1/3	1	2	3
R	1/6	¼	1/2	1	2
D	1/7	1/5	1/3	1/2	1
Total	1,842	4,783	9,833	13,5	18

Cette matrice carrée issue de la hiérarchisation a permis d'effectuer les combinaisons pour la détermination des poids. Avec $\sum a_i$ égale à la somme des paramètres par colonne.

2-3-1-2-2. Détermination des différents coefficients de pondération

Le poids d'un élément exprime l'importance de celui-ci par rapport à un autre [21]. Il correspond à l'intensité de son impact dans l'étude de la vulnérabilité de la ressource en eau. La détermination de ces poids revient à calculer le coefficient de pondération pour chaque élément. Ce coefficient se calcul à partir de la ***Formule*** suivante :

$$Cp = \frac{Vp}{\sum Vp} \quad (1)$$

Vp correspond au vecteur propre de chaque élément comparé. Il se détermine comme suite :

$$Vp = \sqrt[k]{w1X \ldots \ldots \ldots . . Xwk} \quad (2)$$

Avant la détermination des différents coefficients de pondération, on vérifie que la matrice de base établie ***(Tableau 2)*** est cohérente. Pour cela, on calcule le Ratio de Cohérence (RC) qui sert de référence pour le jugement de la cohérence de la matrice. Si la valeur du ratio est inférieure à 10 % alors les appréciations sont cohérentes ; dans le cas contraire, elles peuvent exiger certaines révisions. Le ratio est égal au rapport de l'indice de cohérence (IC) par l'indice aléatoire (Ia) et est donnée par ***l'Équation*** suivante :

$$RC = \frac{IC}{Ia} \quad (3)$$

Avec $IC = \frac{\lambda max - nombre\ d'éléments\ comparés}{Nombre\ d'éléments comparés - 1}$ (4)

IC est l'indice de cohérence Ia, l'Indice aléatoire et λmax, la valeur propre maximale.
- Si RC ≤ 10, alors la matrice est dite cohérente ;
- Si RC > 10% alors la matrice est incohérente et devra être révisée.

Le calcul de λmax est expliqué en-dessous. Par ailleurs, les valeurs de l'indice aléatoire sont données en fonction du nombre de paramètres comparés et sont consignées dans le ***Tableau 2***.

Tableau 2 : *Valeurs d'Indice aléatoire (Ia) d'une matrice de même dimension* [23]

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

La valeur de "Ia" est de 1,12 car cinq paramètres ont été combinés pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de la Bia à Aboisso. Connaissant l'Indice aléatoire (Ia), il faut chercher à déterminer l'Indice de cohérence (IC). Les étapes sont les 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 [C] ;
- Etape 3 : multiplier chaque colonne de la matrice par le vecteur prioritaire lui correspondant pour déterminer la priorité globale [D] ;
- Etape 4 : diviser chaque priorité globale par le vecteur prioritaire lui correspondant afin de déterminer la priorité rationnelle [E] ;
- Etape 5 : déterminer la moyenne des priorités rationnelles (λ max) ;

$$\lambda\max = \frac{[E]}{k} \quad (5)$$

- Etape 6 : calculer l'indice de cohérence (IC) : $IC = \frac{\lambda\max - k}{k-1}$ (6)

On déduit enfin le Ratio de cohérence par la ***Formule*** suivante : $RC = \frac{IC}{Ia}$ (7)

Calcul du Ratio de cohérence (RC) de l'étude :

✓ Calcul la moyenne des priorités rationnelles (λ max)

λ max= $\frac{25,68}{5}$ car E = 25,68 et k = 5

λ max = 5,14

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

IC = $\frac{5,14-5}{5-1}$; IC = 0,035

✓ Calcul du Ratio de cohérence

RC = $\frac{0,035}{1,12}$; RC = 0,031 soit 3,1 % donc RC < 10 %. Par conséquent les jugements attribués sont bons.

Ces différentes étapes permettent de déterminer le coefficient de pondération des différents paramètres. Les ***Tableaux 3 et 4*** rassemblent les résultats obtenus à la suite des différents calculs.

Tableau 3 : *Matrice originale normalisée*

	P	OS	S	R	D	Total ligne
P	0,543	0,627	0,508	0,444	0,389	2,512
OS	0,181	0,209	0,305	0,296	0,278	1,269
S	0,109	0,070	0,102	0,148	0,167	0,595
R	0,090	0,052	0,051	0,074	0,111	0,379
D	0,078	0,042	0,034	0,037	0,056	0,246
Total colonne	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	5,000

Tableau 4 : *Poids des différents paramètres retenus*

Paramètres	Poids (Coefficient de pondération)
Pente	0,35
Occupation du sol	0,25
Type de sol	0,17
Ruissellement annuel	0,13
Densité de drainage	0,10

Le ***Tableau 5*** récapitule les classes, les cotes et les poids attribués aux différents paramètres dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la Bia à Aboisso.

Tableau 5 : *Récapitulatif des classes, cotes et poids attribués aux différents paramètres dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso*

Paramètres	Classes	Cotes	Poids
Pente (%)	< 5	1	0,35
	5 - 10	2	
	> 10	3	
Ruissellement annuel (mm)	302,34	3	0,13
Densité de drainage (km/km^2)	< 1	1	0,10
	1 - 2	2	
	> 2	3	
Type de sols	Ferrasol dystic	1	0,17
	Plinthic ferrasol dystic	2	
	Gleysol stagnic	3	
Occupation du sol	Eau	1	0,25
	Forêt dense	1	
	Forêt dégradée	1	
	Habitats / sols nus	2	
	Mosaïque cultures / jachères	3	

2-3-1-3. Détermination des zones influençant la vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso

Elle a consisté à déterminer la carte des indices de vulnérabilité à la pollution de la Bia à Aboisso par la combinaison des différentes couches dans un SIG. La démarche choisie est celle de l'approche opérationnelle du critère unique de synthèse de [24]. Le calcul de l'indice de vulnérabilité se fait par ***l'Équation*** suivante :

$$Iv = (0{,}35 \times P) + (0{,}25 \times OS) + (0{,}17 \times S) + (0{,}13 \times R) + (0{,}10 \times D) \quad (8)$$

Pour chaque paramètre, le poids (Cp) est multiplié par les différentes cotes correspondantes. Ce calcul est effectué avec l'outil " Raster Calculator " du sous module " Map Algebra " du logiciel Arcgis. On obtient des

intervalles d'indices auxquels des classes de vulnérabilité leur sont attribuées. La détermination des intervalles d'indices est basée sur la méthode de vulnérabilité intrinsèque développée dans les travaux de [25]. 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 6)***. Le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice.

$$Iv\ (\%) = \frac{Iv - Ivmin}{Ivmax - Ivmin} \times 100 \quad (9)$$

avec, Iv min : Indice de vulnérabilité minimal ; Iv max : Indice de vulnérabilité maximal.

Tableau 6 : *Indices et degré de vulnérabilité à la pollution* [25]

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
0 - 30 %	Très faible
31 - 45 %	Faible
46 - 60 %	Moyen
61 - 75 %	Elevé
76 - 100 %	Très Elevé

2-3-2. Détermination des périmètres de protection

Les périmètres de protection (PPI, PPR et PPE) sont déterminés à partir de la carte de vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso. De plus, leur délimitation se base sur les travaux antérieurs et la législation nationale (Côte d'Ivoire) en vigueur.

2-3-2-1. Périmètre de Protection Immédiat (PPI)

De façon générale, le périmètre de protection immédiate (PPI) est la zone immédiate autour de la prise d'eau. Le risque de contamination dans cette zone est maximal en raison du potentiel plus faible de dilution et du faible temps de transport des contaminants [13]. Dans le cas de la présente étude, le PPI se détermine en tenant compte des zones les plus vulnérables contigües ou proches de la ressource en eau. La délimitation de ce périmètre de protection s'effectue à l'aide de l'outil "Buffer" du module "Arctoolbox" de ArcGis.

2-3-2-2. Périmètre de Protection Rapproché (PPR)

Le PPR doit permettre de maintenir la qualité de l'eau à l'approche de la prise. L'extension longitudinale de ce périmètre doit offrir par ailleurs un délai de réaction pour l'exploitant en cas de pollution accidentelle et son extension latérale doit permettre de limiter le ruissellement et de réduire ou de supprimer les risques de pollution liée aux activités présentes sur les versants de la cuvette du plan d'eau [26]. L'approche méthodologique pour sa détermination est celle utilisée par les auteurs des références [3, 13, 15, 27]. Elle consiste à prendre en compte les zones vulnérables, le sens d'écoulement et la pente. L'outil "Buffer" de ArcGis et la numérisation ont permis de réaliser cette délimitation. En fait, cet outil permet de déterminer une zone tampon autour de la ressource qu'on veut protéger.

2-2-2-3. Périmètre de Protection Eloigné (PPE)

Il correspond à une zone complémentaire. Pour [3], 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.

3. Résultats et discussion

3-1. Carte de vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso et délimitation des différents périmètres de protection

La ***Figure 6*** présente la carte des indices de vulnérabilité. Les valeurs des indices de vulnérabilité varient entre 1,25 (valeur minimum) et 3 (valeur maximum). Les valeurs les plus élevées (2,14 - 3) se trouvent aux alentours de la Bia, de ses affluents et au Nord de la zone d'étude. Les indices ont été reclassifiés puis convertis en pourcentage ***(Tableau 7)***. Les différentes classes caractérisent les degrés de vulnérabilité des différentes zones sur la ressource en eau ***(Figure 7)***.

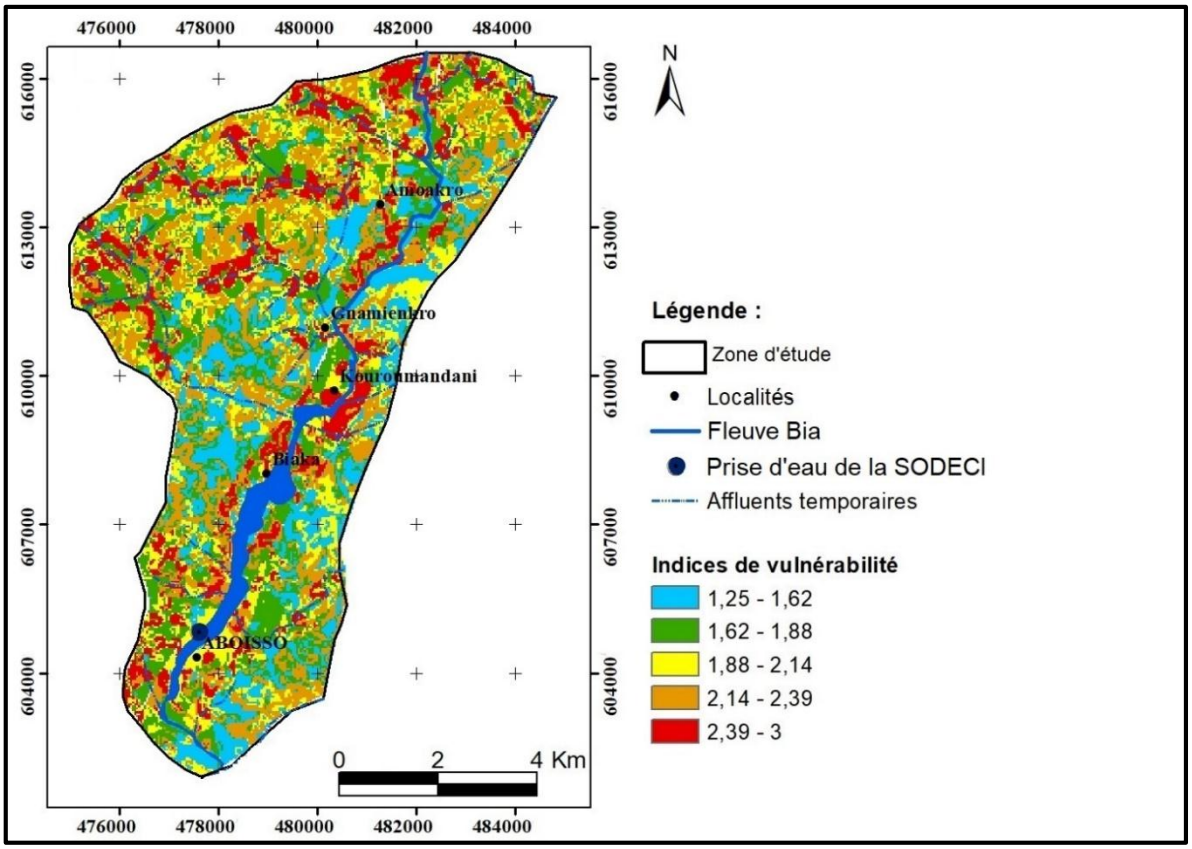

Figure 6 : *Carte des indices de vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso*

Tableau 7 : *Classes des indices de vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso*

Indices de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité (%)	Degré de vulnérabilité
1,25-1,78	0 - 30 %	Très faible
1,80-2,04	31 - 45 %	Faible
2,06-2,30	46 - 60 %	Moyen
2,32-2,57	61 - 75 %	Elevé
2,58-3,00	76 - 100 %	Très élevé

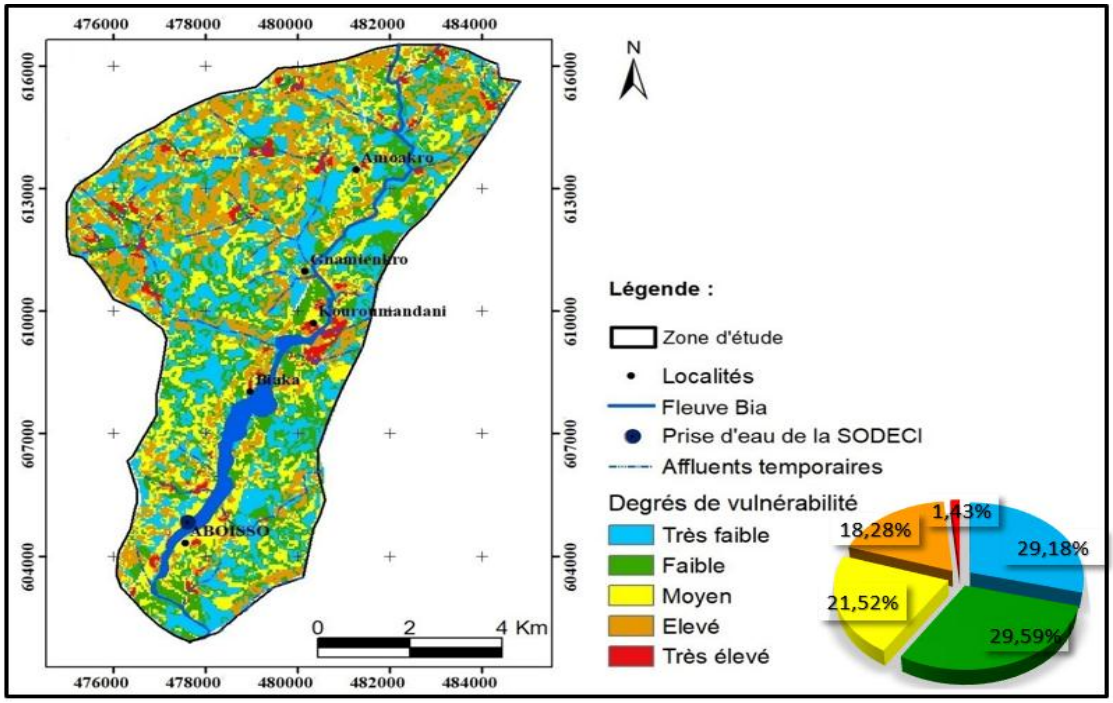

Figure 7 : *Carte de vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso*

Cinq classes de degré de vulnérabilité à la pollution ont été mises en évidence :

- la classe très faible occupe 29,18 % de la zone d'étude. Elle est observée un peu partout sur la zone. Cette très faible vulnérabilité est due aux forêts non cultivées qui occupent ces zones et aux faibles pentes qu'on y trouve.
- la classe faible, occupant 29,59 % de la zone d'étude. Elle est repartie sur toute la zone mais plus représentée à l'Ouest et Est du bassin versant de la basse Bia. En effet, ces zones sont caractérisées par des forêts denses, dégradées et une densité de drainage faible.
- la classe moyenne, couvrant 21,52 % de la zone d'étude. Cette classe est représentée un peu partout sur toute la zone d'étude. Elle se trouve dans les zones habitées et cultivées.
- la classe élevée qui est repartie sur toute la zone d'étude mais plus représentée au Nord tient compte des zones cultivées et habitées mais aussi où les pentes sont élevées (5 – 10 %). Elle représente 18,28 % du bassin versant de la basse Bia.
- la classe très élevée représente une infirme partie de la zone d'étude avec 1,43 %. Elle se localise dans les zones situées en amont et aux alentours de la Bia où la prise d'eau de la SODECI est faite. Dans ces zones (Biaka, Kouroumandani, Gnamienkro etc.), les activités agro-industrielles sont intenses (le cacao, le café, du palmier à huile etc.) et utilisent des intrants (engrais et des produits phytosanitaires). Ces zones sont aussi caractérisées par des densités de drainage très élevées entraînant un fort ruissellement des eaux dans ces zones.

En tenant compte de la carte des zones ayant une influence sur la vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso, la carte des différents périmètres de protection ***(Figure 8)*** a été établie.

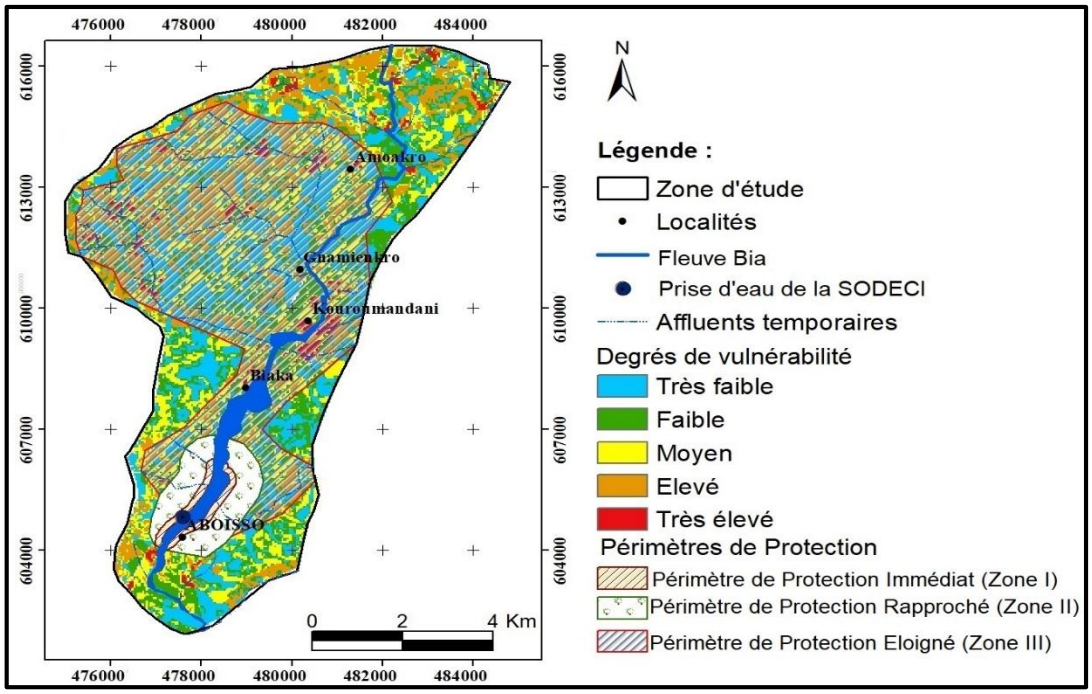

Figure 8 : *Carte des différents périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI à Aboisso*

Cette carte présente trois zones de périmètres de protection : Immédiat, Rapproché et Eloigné.

❖ *Périmètre de Protection Immédiat*

Le périmètre de protection immédiat (Zone I) a été délimité à un rayon de 150 m autour de la prise d'eau de la SODECI sur la Bia à Aboisso. Il a une superficie de 0,84 km^2 et prend en compte la prise d'eau de la Bia et l'usine de traitement de la SODECI. Dans cette zone toute activité est interdite sauf des opérations d'entretien des installations. Elle permet d'empêcher la détérioration des installations et le déversement de tout type de polluants à proximité de la source.

❖ *Périmètre de Protection Rapproché*

Le périmètre de protection rapproché (Zone II) a été délimité à un rayon de 750 m à partir des limites de la Zone I et a une superficie de 5,16 km^2. Il prend en compte les zones ayant une influence sur la Bia (classes moyenne, élevée et très élevée) et le sens d'écoulement des eaux. En outre, à l'intérieur de cette zone, toute activité susceptible de dégrader la qualité de la ressource en eau est interdite ou soumise à des prescriptions particulières.

❖ *Périmètre de Protection Eloigné*

Ce périmètre (Zone III) est une zone complémentaire de la Zone II. Il prend en compte le bassin d'alimentation de la Bia. Il a été délimité en prenant en comptant le bassin et les zones ayant une influence sur la Bia (classe moyenne, élevée et très élevée). Il couvre une grande partie du bassin avec une superficie de 37,77 km^2.

3-2. Discussion

- *Cartographie des zones influençant la vulnérabilité à la pollution du cours d'eau de la basse Bia à Aboisso*

Le SIG a permis de réaliser la carte des zones ayant une influence sur la vulnérabilité à la pollution de la basse Bia à Aboisso en assurant la synthèse des paramètres pris en compte à travers une analyse multicritère (AHP de Saaty). C'est un outil très puissant dans les études de gestion des ressources en eau et l'aménagement

des territoires. Cinq paramètres ont été pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de cette ressource. Il s'agit de l'occupation du sol, les types de sol, la densité de drainage, le ruissellement annuel et la pente. Cependant, le paramètre déterminant dans cette cartographie est la pente suivi de l'occupation du sol. Les valeurs des indices de vulnérabilité obtenues varient entre 1,25 et 3,00. Les indices de vulnérabilité les plus élevés se retrouvent au Nord de la basse Bia (Amoakro, Kouroumandani etc.). Ces valeurs sont similaires à celles trouvées par [3] au niveau de la retenue de Gagnoa (1,17 à 3) et [28] au niveau de lagune Aghin (1,1 à 3,1). Cinq classes de vulnérabilité (très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée) ont été mises en évidence. Des études similaires réalisées par [14, 28, 29] ont révélé également cinq classes de vulnérabilité (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé). En outre, [12, 19] en ont déterminé respectivement quatre (très faible, faible, moyen et fort) par un SIG et trois (faible, moyenne et forte) par des méthodes de calcul. Pour [3], 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 et aussi de la sensibilité de celui-ci. Pour [30], l'utilisation des SIG révèle de multiples problèmes liés à la qualité, au nombre souvent insuffisant des données, à leur interpolation et à leur variabilité spatio-temporelle. Aussi, la difficulté dans 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.

La fiabilité (qualité des données souvent douteuse) et le nombre très limité des données ne permettent souvent pas une bonne évaluation spatiale des critères. Par exemple, le paramètre ruissellement annuel déterminé à partir de la pluviométrie moyenne mensuelle d'une seule station (Adiaké) a été interpolé sur toute la zone (assignant des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue). Pourtant, pour [31], l'interpolation utilisée peut entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. Une difficulté est aussi rencontrée dans la pondération des paramètres dans l'application de l'analyse multicritère. En effet, selon [3, 27], la subjectivité des poids et des cotes assignées aux paramètres est un facteur limitant. De plus, les valeurs attribuées aux paramètres, ont parfois tendance à surestimer ou sous-estimer le degré de vulnérabilité de la ressource. Malgré toutes ces difficultés énumérées plus haut dans la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité réalisée est fiable. Elle est d'une importance capitale dans l'aménagement du territoire, la gestion et la protection des ressources en eau et peut servir d'outil d'aide de décision pour les gestionnaires et les autorités du département d'Aboisso.

- *Délimitation des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI à Aboisso*

La délimitation des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI a nécessité préalablement la connaissance des zones ayant une influence sur la vulnérabilité à la pollution de la Bia. Trois périmètres de protection ont été délimités (PPI, PPR, PPE). Le périmètre de protection immédiat (PPI) a été délimité à un rayon de 150 m autour de la Bia et couvre une superficie de 0,84 km^2. Cette zone prend en compte la prise d'eau et les installations de traitement de la SODECI. 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 [26]. Certains auteurs, [3, 12, 13] ont limité le PPI à un rayon respectivement de 100 m (retenue d'eau de Gagnoa), 200 m (lac Taabo) et 100 à 450 m (lac d'Adzopé). Pour [32], 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 [3]. Selon [26], la dimension de cette zone doit permettre d'intervenir convenablement en cas d'accident lié à la pollution de la source d'eau. A l'intérieur de cette zone, en dehors des activités d'entretien de de traitement de l'eau, toutes les activités pouvant détériorer la qualité de l'eau sont interdites [26]. Or, diverses activités anthropiques ***(Planche 1)*** ont été recensées dans cette zone notamment des :

- puits perdus à proximité de la prise d'eau de la SODECI (Photo a) ;
- dépôts d'ordures ménagères (Photo b) en amont de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia à Aboisso ;
- habitats à proximité de la prise d'eau de la SODECI de la ville d'Aboisso sur la basse Bia (Photo c);
- WC à proximité de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia (Photo d) et
- caniveaux dans lesquels les eaux usées sont évacuées directement dans la basse Bia sans être traitées (Photo e).

A ces activités s'ajoutent les activités commerciales (maquis, restaurants, etc.) à proximité de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia. Le périmètre de protection rapprochée (Zone II) a été délimité en tenant compte du sens d'écoulement de l'eau dans la basse Bia et des zones sensibles à la pollution du cours d'eau. Cette zone est à un rayon de 750 m et couvre une superficie de 5,16 km^2. Elle vise à maintenir la qualité de la retenue à une distance correspondante à quelques heures de transfert jusqu'au point de prélèvement, en supprimant les rejets d'eaux usées, les dépôts polluants et les causes de pollution diffuse par ruissellement [33]. Cette Zone II a été délimitée à une distance de 1000 m dans les travaux de [3, 14]. Selon ces auteurs, à cette distance, il est possible qu'une pollution dissoute dirigée vers la retenue puisse être interceptée ou piégée à la faveur de la présence d'une végétation adaptée. Pour [15], la zone II est délimitée à des terrains limitrophes ayant une pente supérieure à 3 degrés, mais sans que l'étendue de cette bande ne dépasse un kilomètre de largeur. [34] préconise un périmètre de protection rapproché entre 100 m et 1 km. Pour [26], la largeur de cette zone est fonction de la pente, des rives et de la couverture du sol. Selon [3], 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 de la source d'eau et de l'appréciation de l'exécutant. Le périmètre de protection éloigné (Zone III) a été délimité en prenant en compte des surfaces qui influencent la vulnérabilité de la Bia. Il couvre une superficie de 37,77 km^2.

Il doit assurer la protection des eaux contre les détériorations étendues, en particulier les pollutions persistantes ou difficiles à éliminer ainsi que la pollution chimique ou radioactive [35]. 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 [3]. Pour [15], 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). D'autres auteurs, étendent cette zone sur l'ensemble du bassin contenant la source d'eau (retenue, lacs, rivière etc.). C'est le cas [12] et le groupe de travail du [34]. 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 [3]. Bien que les différents périmètres de protection aient été délimités, il est toutefois intéressant d'énumérer certaines difficultés notamment au niveau des appréciations des auteurs sur leurs distances. En effet, ces limites (périmètre de protection) varient d'un auteur à un autre. Malgré toutes ces difficultés, les périmètres de protections sont appréciables pour la gestion et la protection des ressources en eau de surface, comme la Bia à Aboisso ainsi que dans l'aménagement du territoire dans cette zone.

Planche 1 : *Principales activités anthropiques recensées autour de la prise d'eau de la SODECI à Aboisso (Photos : Assi, 2018)*

4. Conclusion

La délimitation des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI sur la basse Bia à Aboisso s'est faite après avoir évalué au préalable la vulnérabilité à la pollution de cette ressource en eau à travers la carte de vulnérabilité. Cette carte révèle cinq classes de vulnérabilité : très faible (29,18 %), faible (29,59 %), moyenne (21,52 %), élevée (18,28 %) et très élevée (1,43 %). Elle est dominée par les classes très faible et faible représentant environ 59 % de la zone étudiée. Trois périmètres de protection ont été délimités :

- ✓ Périmètre de Protection Immédiate ou Zone I couvrant une superficie de 0,84 km^2 et a un rayon de 150 m autour la prise d'eau de la SODECI assurant l'approvisionnement en eau potable de la population d'Aboisso et d'autres localités.
- ✓ Périmètre de Protection Rapproché ou Zone II, d'une largeur de 750 m à partir des limites de la Zone I et couvre une superficie de 5,16 km^2.
- ✓ Périmètre de Protection Eloignée ou Zone III, couvrant une superficie de 37,77 km^2 à partir de la Zone II.

En définitive, cette étude a montré que les outils SIG peuvent apporter une contribution dans la cartographie des zones qui influencent la vulnérabilité à la pollution de la ressource et la délimitation des périmètres de protection d'une eau de surface comme la Bia.

Références

[1] - 2IE, "Manuel technique de Gestion Intégrée des Ressources en Eau", *Rapport*, (2010) 11 - 12

[2] - J. P. JOURDA, "Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'informations géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire", Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2005) 430 p.

[3] - A. E. L. EBA, K. J. KOUAME, J.P. JOURDA, M. B. SALEY, G. E. AKE, S. K. DEH and K. A. ANOH, 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. IV, Issue IV, (2013) 1311 - 1320

[4] - N. H. MELEDJE, K. L. KOUASSI, Y. A. N'GO, K. M. KOUASSI, I. SAVANE et K. AKA, Caractérisation des apports sédimentaires et morphologie du lac du barrage hydroélectrique d'Ayame 1 (Sud-Est Côte d'Ivoire), *International Journal of Biological and Chimical Sciences*, (2014) 1290 - 1307

[5] - ANONYME, "Ruée vers l'or en Côte d'Ivoire : des villageois privés d'eau potable accusent les orpailleurs", *Rapport*, France 24, (2017) 5 p.

[6] - B. DIBI, *"Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) : apport du SIG et de l'analyse multicritère"*, Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2008) 164 p.

[7] - G. GIRARD, J. SIRCOULON et P. TOUCHEBOEUF, Aperçu sur les régimes hydrologiques. In : *Avenard JM, Eldin M, Girard G,* eds. Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Paris : ORSTOM ; (1971) 109-55

[8] - A. O. AW, "Impact des exploitations minières sur l'environnement et les populations : Cas de la mine d'or de l'Afema au Sud-Est de la Côte d'Ivoire", Mémoire de DEA des Sciences de la Terre, option Télédétection et SIG, Université de Cocody, (2001) 49 p.

[9] - H. BERRON, La pêche. In *Atlas de Côte d'Ivoire*. Ministère du Plan /ORSTOM/Institut de Géographie Tropicale, partie C4b, (1979) 27 p.

[10] - C. DELOR, I. DIABY, Y. SIMEON, B. YAO, J-P. TASTET, M. VIDAL, J-C. CHIRON et A. DOMMANGET, "Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200 000 : Feuille de Grand-Bassam", *Mémoire de la Géologie de Côte d'Ivoire*, Abidjan, Côte d'Ivoire, N°4 (1992) 30 p.

[11] - A. PERRAUD et P. DE LA SOUCHERE, Carte de l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/500 000 (1971)

[12] - K. A. ANOH, "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 Côte d'Ivoire)", Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2014) 182 p.

[13] - G. H. KPAN, "Apport des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans la détermination des périmètres de protection de la retenue d'eau d'Adzopé", Mémoire de Master des Sciences de la Terre, Université Felix Houphouët Boigny, (2016) 60 p.

[14] - K. S. DEH, K. J. KOUAME, A. L. EBA, D. J. EDOUKOU, A. KPAN et J. P. JOURDA, 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*, 8 (2017) 1652 - 1673

[15] - A. EL GAROUANI et M. ABDELAZIZ, Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage hachef (Maroc) par Télédétection et SIG. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol XIX, N° 1 (2006) 1 - 10

[16] - P. MICHELE, M. ANNE-SOPHIE et D. SARAH, "Guide d'évaluation des sources d'approvisionnement en eau potable", (2011) 230 p.

[17] - K. J. KOUAME, "Apports d'un Système d'Information Géographique à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe du Continental Terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan", Mémoire de DEA des Sciences de la Terre, Université de Cocody, (2003) 60 p.

[18] - D. DOUAY et E. LARDIEG, "Délimitation des Aires d'Alimentation des captages prioritaires du bassin Adour Garonne, Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des captages d'eau superficielle", (2010) 28 p.

[19] - R. SCHOEN, J. RICARD et A. CODVELLE, "Cartographie de l'aléa de pollution des eaux superficielles et souterraines par les substances phytosanitaires en Région Midi-Pyrénées, Vulnérabilité des eaux souterraines ", *Rapport BRGM/RP-51337-FR*, (2001) 32 p.

[20] - B. RAMBERT, "Application à la détermination et à la cartographie de l'écoulement souterrain : Rapport d'étude sur la recherche sur la signification hydrogéologique de la densité du drainage", *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, (1973) 25 p.

[21] - T. L. SAATY, A scaling method for priorities in hierachical structures. *J. Math. Psychology,* 15, (1977) 234-281

[22] - Z. El MORJANI, "Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Sousse, Maroc)", Thèse de Doctorat de l'Université de Genève, Suisse, Terre et Environnement, Vol. XLII, (2002) 300 p.

[23] - T. L. SAATY, The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority setting, Resource allocation, *McGraw-Hill,* New York, (1980) 19 p.

[24] - B. ROY, Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris, *Économica,* XXII (1985) 423 p.

[25] - J. P. JOURDA, K. J. KOUAME, M. G. ADJA, S. K. DEH, A. T. ANANI, A. T. EFFINI et J. BIEMI, 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*. (2007) 18 p.

[26] - J. CARRE, Protection des prises d'eau de surface destinées à l'alimentation d'eau potable. *TSM* numéro IV, (2005) 27 - 34

[27] - K. A. ANOH, J. P. JOURDA, K. J. KOUAME, T. J-J. KOUA, A. E. EBA et L. GABRIEL, Demarcation of protection perimeters for surface waters of Taabo (Côte d'Ivoire) watershed using gis and multicriteria analysis. *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol XI, N° XII (2012) 2123 - 2131

[28] - A. E. EBA, K. J. KOUAME, S. DEH, K. A. ANOH, R. BALLIET, M. TOURE et J. P. JOURDA, 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 XII, (2016) 1857 - 7431

[29] - F. MACARY, M. BALESTRAT, C. PUECH et F. SAUDUBRAY, "Méthode d'estimation d'un risque potentiel spatialisé de la contamination des eaux de surface par les intrants agricoles à différentes échelles spatiales. Application sur les coteaux de Gascogne", (2006) 20 p.

[30] - M. YOUAN TA, "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), Côte d'Ivoire, (2008) 237 p.

[31] - J. P. JOURDA, K. J. KOUAME, M. B. SALEY, B. H. KOUADIO et Y. S. OGA, Contamination of the Abidjan aquifer by sewage : An assessment of extent and strategies for protection. *Groundwater pollution in Africa*, (2006) 293 - 302

[32] - R. BIBEAU et I. BREUNE, "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.

[33] - J. P. MARCHAL, "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,* (2007) 155 p.

[34] - MEEB, Ministère de l'Energie et de l'Eau du Benin. "Guide méthodologique à l'usage des communes", (2010) 10 p.

[35] - ONEP-GTZ, "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 fur Technische Zusammenarbeit, Office national de l'eau potable du Maroc, *Rapport scientifique*, (1995) 175 p.