

Évaluation De La Vulnerabilite A La Pollution D'une Eau De Surface Destinee A L'adduction D'eau Potable D'une Metropole. Cas De La Lagune Aghein A Abidjan, (Sud De La Cote D'ivoire)

Anowa Evrade Larissa Eba

Kan Jean Kouame

Serge Deh

René Balliet

Mahmoud Touré

Université Félix HOUPHOUET BOIGNY, Côte d'Ivoire

Armand Kouao Anoh

Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire

Jean Patrice Roger Jourda

Université Félix HOUPHOUET BOIGNY, Côte d'Ivoire

doi: 10.19044/esj.2016.v12n36p306 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n36p306](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n36p306)

Abstract

The lagoon that is the subject of this study, was chosen as drinking water alternative source of supply for the city of Abidjan. However, this language is shown in a very favorable area of forest to agriculture. We observe large rubber plantations, food and oil palm crops spread throughout the lagoon basin. Also, fertilizers injected into these plantations, as well as releases from industries and homes they are potential sources of pollution of the lagoon. According Humbert (2012), this pollution is reflected in particular by widespread concentration of nitrates and pesticides.

Given these observed problems related to the quality of this resource, this study was initiated. Its objective is to develop a methodology based on the functionality of a Geographic Information System (GIS) to assess the degree of threat to what the Aghein lagoon faces through the completion of a vulnerability map at pollution.

The method used here is a spatial analysis model incorporating several parameters including the slope, land cover, soil type, runoff and drainage density. These parameters have been previously defined, prioritized and weighted, and then integrated into a GIS.

The resulting map shows five classes of vulnerability indices to pollution of the lagoon Aghein. They are: very small classes, low, medium, high and very high. These indices highlight the areas from which the lagoon is threatened.

Keywords: Lagoon Aghein , vulnerability, pollution, Spatial Analysis.

Résumé

La lagune qui fait l'objet de cette étude, a été choisie comme source alternative d'approvisionnement en eau potable de la ville d'Abidjan. Cependant, cette lagune est localisée dans une zone forestière très favorable à l'agriculture. On y observe d'importantes plantations d'hévéa, de palmier à huile et de cultures vivrières réparties sur tout le bassin de la lagune. Aussi, les fertilisants injectés dans ces plantations, ainsi que les rejets des industries et des habitations constituent-ils les sources potentielles de pollution de la lagune. Selon Humbert (2012), cette pollution se traduit notamment par une concentration généralisée de nitrates et de produits phytosanitaires.

Face à ces problèmes observés, liés à la qualité de cette ressource, cette étude a été initiée. Son objectif est de développer une méthodologie à partir des fonctionnalités d'un Système d'Information Géographique (SIG) en vue d'évaluer le degré de menace à laquelle la lagune Aghein est confrontée à travers la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution.

La méthode utilisée ici est un modèle d'analyse spatial intégrant plusieurs paramètres dont la pente, l'occupation du sol, le type de sol, le ruissellement et la densité de drainage préalablement définis, hiérarchisés et pondérés, puis intégrés dans un SIG.

La carte obtenue présente cinq classes d'indices de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein. Ce sont : les classes très faible, faible, moyenne, fort et très fort. Ces indices mettent en évidence les zones à partir desquelles la lagune est menacée.

Mots clés : Lagune Aghein, pollution, Vulnérabilité, Analyse Multicritères.

Introduction

L'accès à une eau de boisson saine est une condition indispensable et un droit humain élémentaire. Cependant, plus de 300 millions d'africains n'ont pas accès à des services aussi fondamentaux que sont l'eau potable et l'assainissement (Kouamé, 2007). Ainsi, le manque en eau salubre et en dispositifs d'assainissement coûte annuellement la vie à 1,8 millions d'enfants et met un frein au développement économique (PNUD, 2006). Face à cela, des solutions sont recherchées à travers des conférences, des séminaires et des colloques.

En Côte d'Ivoire, le succès du pays repose sur l'agriculture. Ainsi des terres sont mises en culture avec l'utilisation des produits phytosanitaires extrêmement rémanente et toxiques à l'exception de quelques produits minéraux (ASPA, 2006). Le transfert de ces produits vers les cours d'eau et les eaux souterraines entraînent la pollution diffuse de ceux-ci.

Au niveau du District d'Abidjan, la population est alimentée par la nappe sur laquelle s'étend son territoire avec les risques de pollution pouvant mettre en péril sa qualité. En plus, la demande en eau a subi une pression due à une démographie galopante, à l'urbanisation, et aux activités industrielles. Cela a fait observer des foyers de pollution au niveau des différentes nappes de la ville d'Abidjan (Kouamé, 2003 ; Jourda et *al.*, 2006 ; Ahoussi et *al.*, 2008). A cet effet, Plusieurs études ont été menées pour évaluer la vulnérabilité des captages d'eau souterraine (Jourda et *al.*, 2006 ; Kouamé 2007 ; BNETD, 2008). Cependant, concernant les eaux superficielles seules quelques études plus récentes sont soit menées (Anoh et *al.*, 2012; Eba et *al.*, 2013) ou soit en cours de réalisation. La présente étude a été effectuée sur la lagune Aghien située dans le District d'Abidjan zone favorable à l'agriculture. On y observe d'importantes plantations d'hévéa, de palmier à huile et de cultures vivrières. Une des conséquences environnementales majeures de cette agriculture intensive actuelle est la dégradation de la qualité des eaux. Elle se traduit notamment par une pollution généralisée par les nitrates et les produits phytosanitaires des eaux de surfaces et souterraines (Domange, 2005). D'ailleurs, les différentes analyses réalisées par le CREPACI (1999) sur trois points de prélèvement, et par Humbert (2012) sur 11 points dans la lagune montrent une dégradation de la qualité de la lagune au fil du temps. Cette lagune, malgré sa soumission aux activités anthropiques et aux phénomènes d'eutrophisation, a été coptée pour une éventuelle utilisation par la SODECI comme source alternative d'approvisionnement en eau potable du District d'Abidjan. C'est dans cette optique qu'elle est soumise à une étude de vulnérabilité à partir d'une approche géomatique pour évaluer le degré de menace au quelle elle est confrontée afin de la protéger au mieux.

Cadre general de la zone d'etude

Située dans le district d'Abidjan au Sud de la Côte d'Ivoire, la lagune Aghien draine un bassin versant compris entre les latitudes 5°20 et 5°40 Nord et les longitudes 3°50 et 4°10 Ouest (Figure 1). Ce bassin versant dont la superficie est estimée à 341,74 km², regroupe plusieurs villages (Aghien télégraphe, Aghien village, Akoyaté, Akandjé etc..), une partie des communes d'Abobo et d'Anyama et une partie des villes d'Azaguié et de Bingerville (figure 1). En effet, la lagune Aghien s'étend sur une surface de 21 km², avec 11 km de long et 1,37 km de large. Son volume est estimé d'après la carte

bathymétrique (année 1963) à environ 71 million de m³ avec une profondeur moyenne de 3,7 m (CREPACI, 1999).

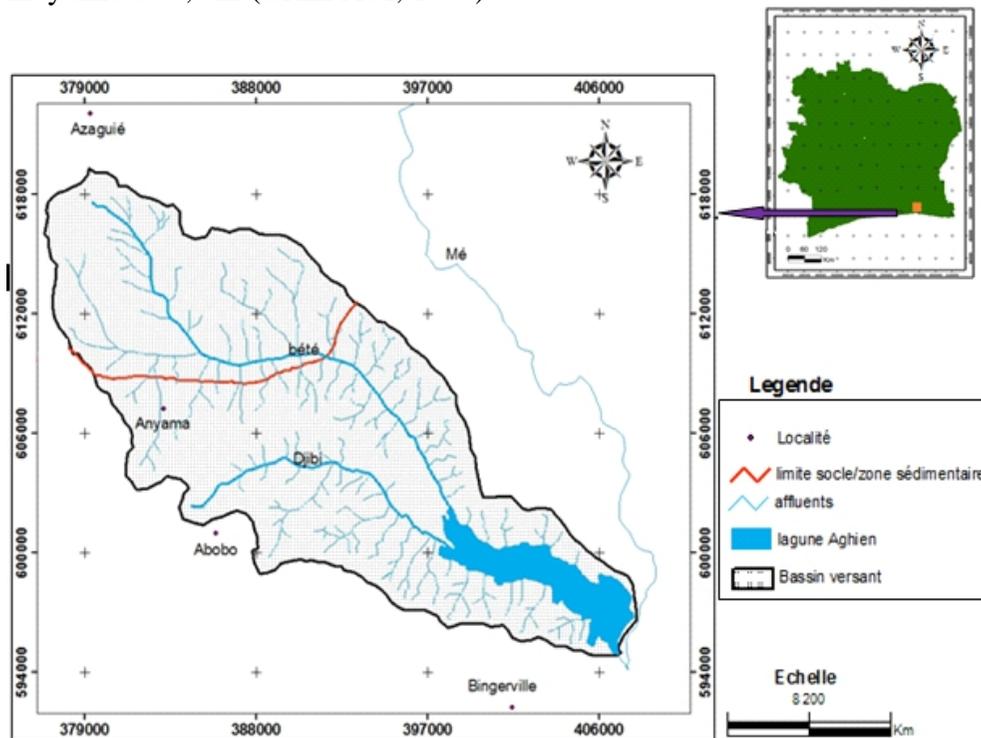


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

Concernant le relief, c'est une zone très accidentée localement, témoin des dénivelés de plus de 100 m aux alentours de la lagune (CREPACI, 1999).

La végétation, à l'image du Sud de la Côte d'Ivoire, est localisée dans la zone forestière. Cette zone favorable à l'agriculture laisse observer d'importantes plantations d'hévéa, de palmier à huile et de cultures vivrières réparties sur tout le bassin versant de la lagune. Les fertilisants injectés dans ces plantations, ainsi que les rejets des industries et des habitants se retrouvent dans la lagune et sont de nature à favoriser l'eutrophisation.

Approche méthodologique

Notion de vulnérabilité des eaux

Trois manières de définir la vulnérabilité sont couramment distinguées dans le contexte de la gestion des eaux souterraines (Freissinet, 1997):

- le potentiel de contamination de la ressource en eau, lié aux propriétés de mobilité et de persistance du contaminant;
- la vulnérabilité intrinsèque, déterminée uniquement en fonction du milieu;

- et la vulnérabilité spécifique, qui est fonction du milieu et du contaminant.

Aussi, selon Mohamed et *al* (2003) la vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution. Partant de ces définitions, on peut dire que la vulnérabilité à la pollution d'une eau superficielle est sa propriété à être atteinte par une pollution. Cette pollution peut être engendrée par une source:

- ponctuelle (décharge, cimetièrre, rejet d'eau usée brute domestique ou industrielle, etc.) ;
- linéaire (pipeline, réseau d'eau usée, réseau de drainage agricole, etc.) ;
- ou diffuse (engrais chimiques, pesticides, herbicides, épandage des eaux usées domestiques, etc.) (Mohamed et *al.*, 2003).

Démarche adoptée

Il n'existe pas de méthode standard pour évaluer la vulnérabilité à la pollution des eaux superficielles. Seulement, il est souhaitable de faire le choix d'une méthode qui assure une détermination réaliste des zones influençant la vulnérabilité de ces ressources à partir d'un minimum d'informations. En outre selon certains auteurs, (Lallemand et Roux, Shoen et *al.*, Garouani et Merzouk,) les plus pertinentes sont celles qui permettent l'intégration des données topographiques, géologiques et hydrologiques.

Dans ce travail, l'unité territoriale utilisée étant le bassin versant, la connaissance parfaite de celui-ci et des activités qui s'y déroulent est indispensable pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de la lagune. Pour cela, seuls les facteurs identifiables à cette échelle sont utilisés.

Aussi, la méthodologie appliquée dans les études réalisées par Shoen et *al.*, (2001), Garouani et Merzouk, (2006), Anoh et *al.*, (2012), Eba et *al.*, (2013) a été prise en compte. Ainsi, la méthodologie appliquée comprend trois étapes :

Etape 1 : Identification, classification et assignation des notes aux paramètres (données)

Etape 2 : Détermination des poids ou coefficients de pondération par la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty et évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la lagune par un SIG.

Identification et assignation de cote aux différents paramètres ou données d'entrées

Identification et classification des paramètres

Dans cette étude, en tenant compte de certains auteurs tels que le groupe de travail de la BRGM, Anoh et *al.*, (2012), Eba et *al.*, (2013) et selon la disponibilité des données, cinq (05) paramètres ont été retenus, à savoir ; la

pente, l'occupation du sol, le type de sol, le ruissellement annuel, et la densité du réseau hydrographique (Figure 2).

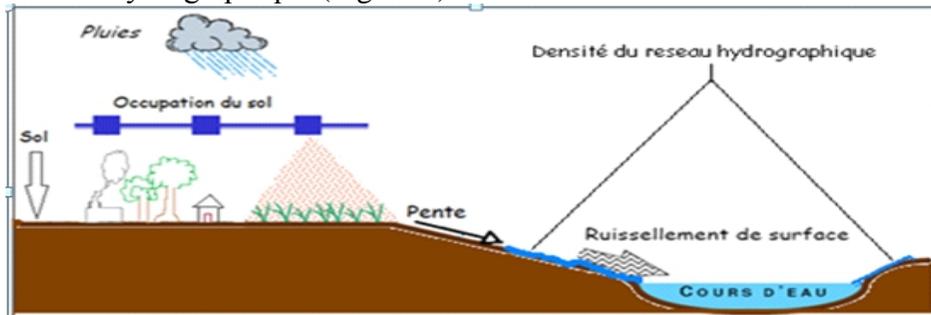


Figure 2 : Paramètres retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution (Anonyme 1, 2005) modifié

Pente (P)

La pente est considérée comme un facteur très important dans le transfert de produits polluants vers les eaux de surface. Elle conditionne la circulation de l'eau en surface et a un effet direct sur le temps de transfert. Elle intervient dans les phénomènes d'érosion et favorise les transports de substances actives fixées sur les matières en suspension (Macary *et al.*, 2010). De plus, la pente traduit les zones potentiellement favorables au ruissellement ou à l'infiltration.

La carte de pente (figure 3) a été réalisée après traitement d'une carte du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) du bassin versant de la lagune sous environnement ArcGis 9.3. Ensuite, la classification a été effectuée avec le module « Spatial analyst tool » du même logiciel. On obtient une carte dont la classe dominante est celle comprise entre 3 et 7%.

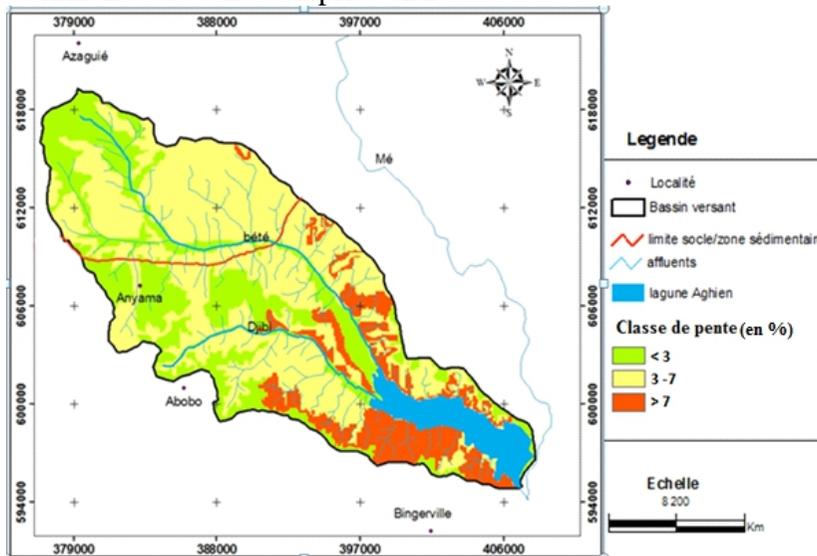


Figure 3 : Carte des pentes du bassin de la lagune Aghien

Occupation du sol (O)

L'occupation du sol désigne l'ensemble des activités pratiquées à la surface du sol. Elle renferme les sources potentielles de pollution des retenues d'eau. En effet, ces sources potentielles de menace concernent les rejets des activités anthropiques susceptibles d'engendrer des polluants. Ce paramètre a été obtenu à partir d'une image Landsat TM orthorectifiée et mosaïquée à partir des scènes 195-056 et 196-056 datant de 2000. L'acquisition de la carte de la couverture du sol de la zone d'étude à partir de cette image satellitaire a été possible grâce à la classification supervisée sous le logiciel ENVI 4.3. Aussi, la fiabilité de cette classification est-elle donnée par le calcul du coefficient Kappa qui (dont la valeur permet d'apprécier la classification faite. Dans le cas présent, la valeur est de 0,6968. Et, cela montre une fiabilité entre la classification réalisée et la réalité du terrain. En effet, plus la valeur est proche de 1 plus la classification est considérée comme bien faite, et lorsqu'elle est proche de 0, elle est considérée comme mal faite.

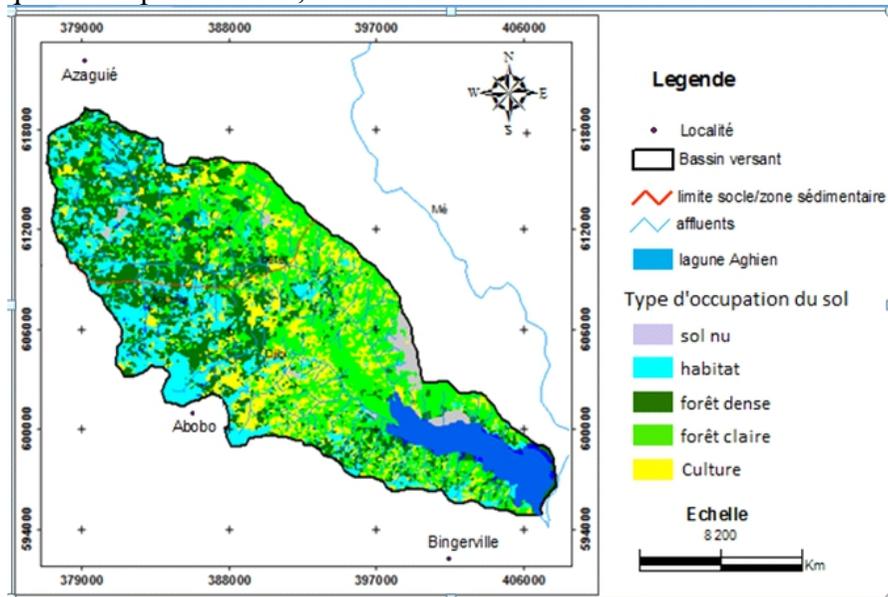


Figure 4: Carte d'occupation du sol du bassin versant de la lagune Aghien (année 2000)

Type de sol (S)

Ce paramètre correspond approximativement au premier mètre de dépôt à partir de la surface du sol (Rasmussen et Rouleau, 2003). En effet, la vulnérabilité du milieu en transfert de produits phytosanitaires vers les eaux dépend des caractéristiques du sol qui est le récepteur de ces produits. Les caractéristiques du sol conditionnent la partition des eaux entre infiltration vers les eaux souterraines et ruissellement vers les eaux de surface. L'analyse de l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500 000 montre que la pédologie du bassin versant de la lagune Aghien est caractérisée par des sols

ferralitiques moyennement ou fortement désaturés et deux portions de sol hydromorphe organique (figure 5).

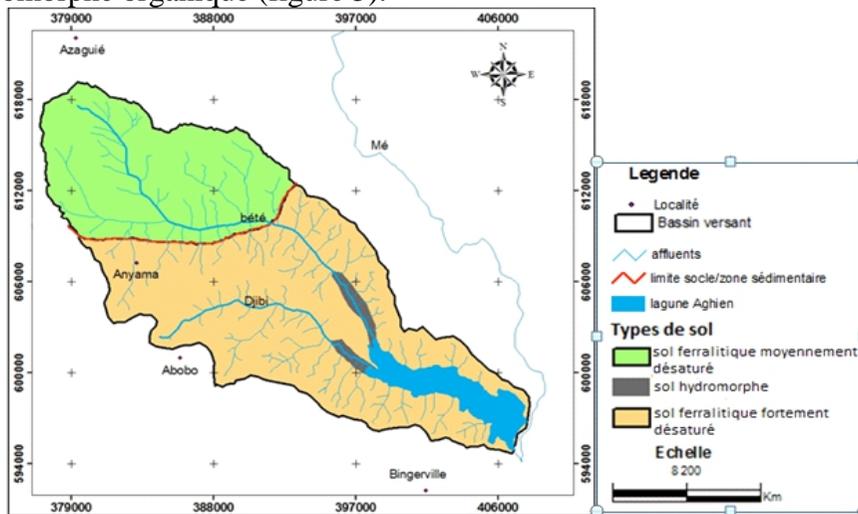


Figure 5 : Type de sol du bassin versant de la lagune Agoué

Ruissellement annuelle (R)

Ce paramètre représente la part de la pluie qui alimente le réseau de surface. Il est très dépendant des facteurs physiques et morphologiques du bassin versant, notamment le relief, le contexte géologique, le couvert végétal, la forme, l'orientation et la densité du réseau hydrographique (Ahoussi, 2008). Ainsi, la qualité de l'eau brute résulte des processus de minéralisation qui s'opèrent à la faveur du ruissellement de l'eau sur le sol (Carré *et al.*, 1997). Pour la détermination de ce paramètre, les données de pluviométrie moyenne annuelle de la station d'Azaguié et celle de la station de Bingerville (1945-2000) ont été utilisées. Cette valeur qui représente P est de 1635,2 mm.

La méthode utilisée est celle de Thornwaite qui tient compte du bilan hydrologique.

$R = r \times P$ (1) avec : R : ruissellement (mm); r : coefficient du ruissellement (%) et

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

Dans cette étude le coefficient de ruissellement de 13% déterminé par Soro (1987) sur le bassin de la Mé, dans le sud-est de la Côte d'Ivoire a été utilisé vu que la zone sud-est a des caractéristiques morphologiques et climatiques que notre zone d'étude.

Ainsi, à partir du bilan hydrologique, on a : $R = 13\% \times 1635,2 = 212,58\text{mm}$

Ce facteur ne comportera qu'une classe avec 3 comme note en se référant à la classification de Schoen *et al.*, (2001), dans le cadre des travaux réalisés sur la vulnérabilité des eaux de surface.

Densité du réseau hydrographique (D)

La pollution des ressources en eau de surface (Lacs, Barrages, fleuves etc..) est tout aussi liée à la densité du réseau hydrographique qui sous-tend ces ressources. En effet 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. Plus le réseau hydrographique par unité de gestion est dense, plus la vulnérabilité à la pollution de la ressource est élevée (Schoen et al., 2001).

Pour cette étude, le Modèle Numérique d'Altitude a été utilisé sous environnement ArcGis pour obtenir la carte de densité du réseau hydrographique de la lagune Aghien (Figure 6)

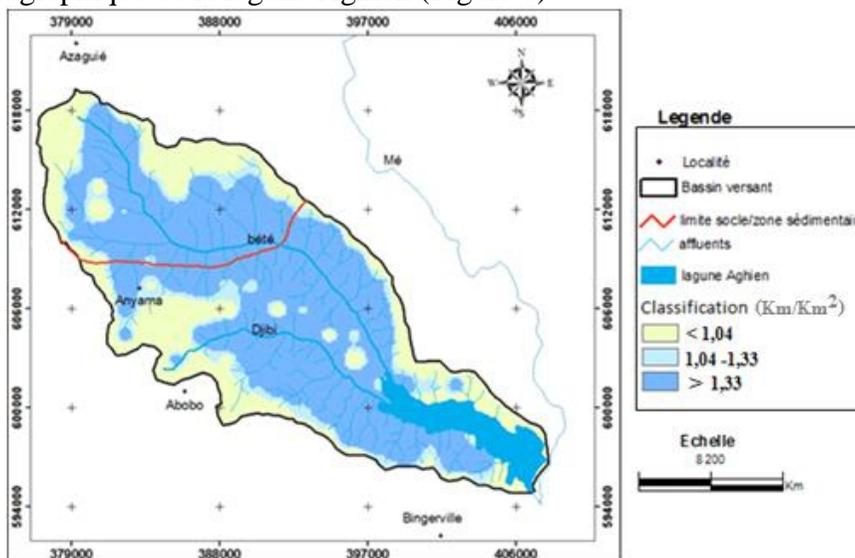


Figure 6 :Densité du réseau hydrographique du bassin versant de la lagune Aghien

Assignment de côte ou note aux différentes classes des paramètres

Pour l'attribution des différentes notes aux différentes classes, la référence utilisée est basée sur les travaux de Schoen et al., (2001) du groupe de travail de BRGM sur l'évaluation de la vulnérabilité des eaux de surface. Cependant, le facteur Pluie efficace utilisé par ce groupe a été remplacé par le ruissellement dans cette étude.

En effet les notes varient de 1 à 4, et la valeur de la note attribuée est fonction de l'importance des différentes classes dans le processus du phénomène étudié. Ainsi, en tenant compte du paramètre pente, une note de 3 a été attribuée à la classe des pentes supérieures à 7% car cette classe est supposée avoir une importante capitale dans l'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux de surface.

Le tableau I, récapitule les différents paramètres et leurs classes, ainsi que les différentes notes attribuées à ces classes.

Tableau I: paramètres, classes, et notes attribuées aux différents facteurs

Paramètres	Classes	Notes
Pente	< 3	1
	3 - 7	2
	> 7	3
Occupation du sol	Forêt dense	1
	Forêt claire	1
	Habitat	2
	Sol nu	3
	Culture	4
Type de sol	Sol ferrallitique fortement désaturé	1
	Sol ferrallitique moyennement désaturé	2
	Sol hydromorphe	3
Ruissellement	< 0	1
	0 - 150	2
	> 150	3
Densité de drainage	< 1,04	1
	1,04 -1,33	2
	> 1,33	3

Détermination des poids par méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty

La méthode utilisée pour déterminer les poids des paramètres est la méthode multicritère AHP (Analytic Hiérarchy Process) de Saaty. Cette méthode permet de prendre des décisions efficaces relatives à des problèmes complexes par la simplification et l'accélération des processus de prise de décision (Saaty, 1980).

La démarche adoptée par la méthode multicritères AHP peut être résumée en deux étapes à savoir:

- la réalisation des combinaisons binaires ;
- et l'élaboration des matrices pour la détermination des priorités.

Réalisation des combinaisons binaires

Dans la réalisation des combinaisons binaires, les paramètres sont comparés deux à deux selon leur importance. Ces comparaisons aboutissent à des matrices carrées réciproques. La comparaison de ces paramètres pris deux à deux se fait sur la base de l'échelle de Saaty, échelle utilisée par El Morjani (2002) et Kouamé (2007) et plusieurs autres auteurs. En effet, selon cette comparaison, lorsque deux paramètres ont la même importance dans le phénomène étudié, l'échelle de Saaty donne à ces deux paramètres 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.

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 paramètres est résumée dans le tableau II
Tableau II: Matrice issue de la comparaison des paramètres (Matrice originale)

	P	O	S	R	D
P	1	3	3	5	7
O	1/3	1	3	4	5
S	1/3	1/3	1	3	4
R	1/5	1/4	1/3	1	3
D	1/7	1/5	1/4	1/3	1
$\sum a_i$	2	4,78	7,58	13,33	20

Avec: P= Pente; O= Occupation du sol; S= type de Sol; R= ruissellement; D= Densité de drainage et $\sum a_i$ = somme des valeurs de la colonne i

Après les combinaisons binaires, une vérification de la cohérence des jugements (cohérence logique) est effectuée. Et aussi, cette matrice carrée permettra d’effectuer les combinaisons pour la détermination des poids.

Détermination des Poids des paramètres et vérification de la Cohérence logique

Détermination des Poids des paramètres ou Coefficient de pondération (Cp)

Le coefficient de pondération de chaque paramètre correspond à l’intensité de son impact dans l’étude de la vulnérabilité à la pollution de la ressource en eau. Leur détermination se faire en deux étapes :

Etape 1: Déterminer le Vecteur propre (Vp) de chaque paramètre

$$V_p = \sqrt[k]{W_1 \times W_2 \times \dots \times W_k} \quad (2)$$

Avec W1, W2,.....WK les différentes valeurs attribuées aux paramètres lors de leur comparaison et k le nombre de paramètres comparés.

Exemple de calcul de Vp du paramètre pente: $V_p = \sqrt[5]{1 \times 3 \times 3 \times 5 \times 7} = 3,16$

Etape 2: Calculer le Coefficient de pondération (Cp) de chaque paramètres :

$$C_p = V_p / \sum V_p = \frac{V_p}{V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pk}} \quad (3)$$

Avec Vp le Vecteur Propre du paramètre dont on veut calculer le Cp et Vp1, Vp2,....Vpk les différents Vecteurs propre de chaque paramètres.

Exemple de calcul de Cp du paramètres pente: $C_p = \frac{3,16}{6,85} = 0.47$

La somme des Cp de tous les paramètres d’une matrice doit être égale à 1.

Vérification de la Cohérence logique ou Ratio de Cohérence (RC) de la matrice

La cohérence logique est un ratio qui permet de vérifier ou de valider la cohérence de la matrice originelle. Ce ratio peut être interprété comme la probabilité que la matrice soit complétée d’une manière aléatoire. En effet,

AHP n'exige pas que les jugements soient cohérents ni transitifs. Par contre, Saaty (1980), a défini la valeur du ratio de cohérence. Dans le cas où la valeur du ratio de cohérence dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions. Ainsi donc la formule s'écrit comme suite:

$RC = IC/IA$ (4) avec IA l'Indice Aléatoire et IC l'indice de cohérence

Les valeurs de l'indice aléatoire sont données en fonction du nombre de paramètres comparés et ces valeurs ont été déjà déterminées par Saaty. Le tableau III, présente ces différentes valeurs. Dans le cadre de cette étude, IA = 1,12, correspondant à 5 paramètres comparés.

Tableau III: Indices Aléatoires en fonction du nombre d'éléments comparés (Saaty, 1977)

Nombre d'éléments	2	3	4	5	6	7	8	9
			10					
			comparés					
IA	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45
			1,49					

En outre la Valeur de IC est à déterminer. Et la formule est la suivante:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - \text{Nombre d'éléments comparés } (k)}{\text{Nombre d'éléments comparés} - 1}$$

Les étapes de détermination de la valeur de IC sont les suivantes:

Etape 1 : normaliser la matrice originelle 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}); $\lambda_{max} = \frac{[E]}{k}$ (5)

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

La méthodologie de IC étant connue, la dernière partie revient à calculer le Ratio de Cohérence (RC),

$$RC = IC/IA$$

-Si $RC \leq 10$, alors la matrice est dite cohérente

-Si $RC > 10\%$ alors la matrice est incohérente et devra être révisée.

Selon le tableau III et les calculs effectués pour IC (tableau IV), IA = 1,12 et IC = 0,05

$$RC = \frac{0,05}{1,12} = 0,04$$

Le ratio de cohérence est inférieur à 10 % (Rc =4%). Par conséquent, les jugements attribués sont bons.

Tous les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV : Tableau contenant les résultats des différents calculs effectués plus haut

	P	O	S	R	D	V	C	Cpx	ΣL	[c]	[D	[E]	λ _m	IC	R
						p	p	100	IG]		ax		C
P	0,5	0,63	0,4	0,38	0,35	3,16	0,47	47	2,26	0,45	2,42	5,38	5,21	0,05	0,04
O	0,16	0,21	0,40	0,3	0,25	1,81	0,27	27	1,32	0,27	1,36	5,03			
S	0,16	0,07	0,13	0,23	0,2	1,05	0,15	15	0,79	0,16	0,5	5			
R	0,11	0,05	0,04	0,07	0,15	0,54	0,07	7	0,42	0,08	0,41	5,12			
D	0,07	0,04	0,03	0,02	0,05	0,29	0,04	4	0,21	0,04	0,22	5,5			
Σ	1	1	1	1	1	6,85	1	100	5	1	4,91	26,03			

Evaluation de la vulnérabilité de la lagune Aghien à la pollution

Après la détermination des poids, la carte des indices de vulnérabilité (Iv) est obtenue à partir de la formule suivante:

$$\text{Carte Vulnérabilité} = 0,47 \times (P) + 0,27 \times (O) + 0,15 \times (S) + 0,07 \times (R) + 0,04 \times (D) \quad (7)$$

En outre, la classification des indices de vulnérabilité aboutit à la détermination de la carte de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghien. Pour la détermination des intervalles des différents indices de vulnérabilité, la méthode appliquée dans les travaux de Jourda et al., (2007) a été utilisée. Cette méthode permet d’effectuer la conversion des indices de vulnérabilité en pourcentage afin de mieux appréhender l’expression de la classification des degrés de vulnérabilité. Elle permet de fixer les limites des intervalles des indices déterminés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices. La conversion des indices en pourcentage est calculée à partir de l’équation 8 :

$$Iv = \frac{(Ii - Imin) \times 100}{Imax - Imin} \quad (8)$$

Avec Ii = indice à identifier, Imax = l’indice maxima (3,11) et Imin = l’indice minimum (1,13)

Résultats et Discussion

La mise en relation par superposition des différentes cartes thématiques et données ponctuelles obtenues dans un SIG a permis :

- la mise en place d’une carte des indices de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein (Figure 7);
- Puis à partir de cette carte, la carte des différentes classes de vulnérabilités.

Carte des indices de vulnérabilité

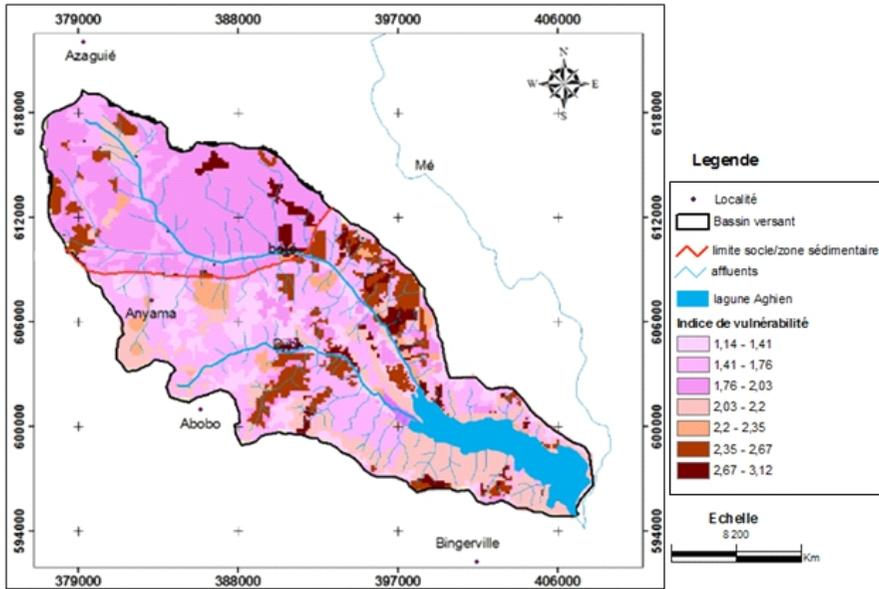


Figure 7 : Carte des indices de vulnérabilité

Les indices de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein varient de 1,14 à 3,12. Ces indices mettent en évidence les zones à partir desquelles la lagune est menacée.

En outre, en appliquant la formule 8, des intervalles de vulnérabilité sont obtenues et réparties en 5 classes qui varient du "très faible" au "Très forte" et le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice. Les valeurs d'indices sont dans le tableau V :

Tableau V : Classes de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein

Classes des indices de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein	Pourcentages	Degré de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein
1,1 - 1,7	0 - 30	Très faible
1,72 - 2	30 - 45	Faible
2,2 - 2,3	46 - 60	Moyenne
2,32 - 2,6	61 - 75	Forte
2,62 - 3,1	76 à 100	Très forte

Carte de vulnérabilité

La carte de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghein est présentée à la figure 8.

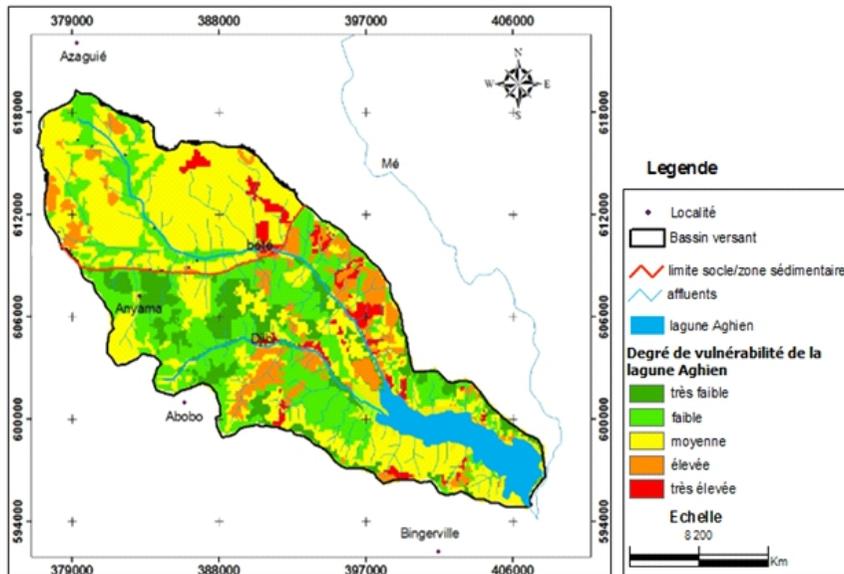


Figure 8 : Carte de vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghien

Cette carte présente cinq (5) classes de vulnérabilité (très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée) :

- la classe de vulnérabilité très faible (zone de très faible influence sur la lagune) représente **29,78%** de la zone étudiée. Elle est localisée au Nord, à l’Ouest et au centre du bassin versant. Le degré de vulnérabilité très faible de ces zones résulte de la coïncidence de ces zones avec les zones non cultivables et des pentes faibles et moyennes (inférieur à 7%). Le ruissellement dans ces zones est aussi négligeable. Cela rend difficile le transport des polluants vers la lagune ;

- la classe de vulnérabilité faible (zone de faible influence sur la lagune) occupe 10,57% du bassin versant. Elle est observée à l’Ouest, au Nord et au Sud-Est du bassin versant. Le degré faible de vulnérabilité à la pollution de la retenue dans ces zones s’explique par la présence des zones boisées et des pentes faibles et moyennes. Cependant, un site avec un indice de vulnérabilité faible n’est pas à l’abris d’une contamination, mais un tel site est moins susceptible à la contamination par rapport à un site ayant un indice de vulnérabilité à la pollution élevée (Osborn et *al.*, 1998);

- la classe de vulnérabilité moyenne (zone de moyenne influence sur la lagune) a une prédominance sur les autres classes (45,43% de la zone d’étude). Elle est observée un peu partout sur la zone d’étude. Elle est surtout importante au Nord du bassin versant et au niveau du flanc gauche de la lagune. Son importance au Nord s’explique par la densité hydrographique plus ou moins élevée et par une activité agricole modérée bien que le type de sol soit favorable au ruissellement des polluants vers les affluents de la retenue.

Au niveau du flanc gauche de la lagune, la vulnérabilité moyenne est due à la présence de forêt qui empêcherait le ruissellement vers la retenue ;

- la classe de vulnérabilité élevée (zone ayant une influence élevée sur la lagune) représente 10,32% du bassin versant. Elle est localisée à quelques endroits du flanc droit de la rivière Bété, au niveau du flanc gauche de la rivière Djibi et ses affluents. Elle occupe quelques espaces sur le flanc droit de la lagune, à l'Est et au Nord du bassin versant. La vulnérabilité forte observée au niveau de ces zones s'explique par la pente (supérieur à 7%) du terrain qui favoriserait le ruissèlement des polluants issus des zones culturales et des habitats vers la lagune, les rivières et leurs affluents ;

- la classe de vulnérabilité très élevée (zone ayant une influence très élevée sur la lagune) représente 3,9% de la zone d'étude. Elle occupe quelques espaces au Nord-Est de la lagune Aghien, les flancs droits de la rivière Djibi et Bété ainsi qu'à l'Est du bassin versant. La forte vulnérabilité observée s'explique par les activités agricoles polluantes pratiquées à ces endroits. Ces activités agricoles utilisent les produits phytosanitaires, les engrais et les pesticides, aggravés par les pentes du terrain qui favoriseraient le ruissèlement des matières nutritives issues des zones culturales vers la lagune. En effet, selon Jourda et *al.* (2007), les pentes faibles favorisent l'infiltration de tous contaminants présents, et les pentes élevées favoriseront le ruissellement de tous contaminants présents à la surface du sol vers les eaux superficielles. Par ailleurs, la contamination des eaux superficielles par les produits phytosanitaires est très dépendante de la distance séparant le lieu d'application du ruisseau collecteur (Macary et *al.*, 2010). Cependant, l'importance de la densité du réseau hydrographique observée à proximité de la lagune pourrait être la base d'une contamination.

Comme tout outil, toute analyse, la méthode appliquée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la lagune Aghien a comporté certaines difficultés. En effet, le SIG a assuré une synthèse de plusieurs paramètres à travers une analyse multicritères. Cette synthèse a permis la réalisation d'une carte de vulnérabilité de la ressource. Cependant, pour Youan Ta (2008), l'utilisation des SIG révèle 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, 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. En plus, comme remarqué par Eba et *al.*, (2013), la subjectivité des poids et des cotes assignés aux paramètres dans l'application de l'analyse multicritère est un facteur limitant. De même, les valeurs attribuées aux paramètres, ont parfois tendance à surestimer ou sous-estimer le degré de vulnérabilité de la ressource. Toutefois, l'approche

géomatique appliquée a permis d'évaluer la vulnérabilité à la pollution de la lagune tout en cernant la problématique liée à sa sauvegarde. Dans cette étude cinq paramètres ont été pris en compte. Ces mêmes paramètres ont été utilisés par Schoen et *al.* (2001) et Marchal (2007) et par El Garouani et Merzouk (2006). Egalement l'approche utilisée a aussi été utilisée pour le barrage Hachef au Maroc par El Garouani et Merzouk (2006). Ainsi, les cartes établies peuvent servir non seulement à l'instauration des servitudes mais aussi à l'aménagement du territoire

Conclusion

Au regard de la carte de vulnérabilité à la pollution réalisée, les alentours de la lagune Aghien bénéficient en grande partie d'une vulnérabilité moyenne. Ce degré de vulnérabilité n'exclut pas sa contamination, raison pour laquelle, les autorités en charge de la surveillance des ressources en eau doivent prendre des mesures de nature à supprimer toutes les activités à risque telles que les installations ou extension d'industries et de plantation à l'approche de la lagune et aussi de favoriser l'évacuation des eaux usées domestiques dans les réseaux d'assainissement appropriés. Toute activité inhérente à la production de contaminant doit être réglementé ou interdite. Bien que n'ayant pas un caractère obligatoire, toutes les activités pouvant avoir une influence négative sur la qualité de lagune peuvent être réglementé à l'intérieur du bassin versant.

References:

1. **AHOUSI K. E., SORO N., SORO G., LASM T., OGA M. S. AND ZADE S. (2008).** Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 20, No 2, pp. 302-316
2. **AHOUSI K.E. (2008):** Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le sud de la cote d'ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan. 270p.
3. **ANOH K. A., JOURDA J. P., KOUAME K. J., KOUA T. J. J., EBA A. E., GABRIEL L. (2012).** Demarcation of protection perimeters for surface waters of Taabo (IVORY COAST) watershed using GIS and multicriteria analysis. *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 11, N°12, pp. 2123-2131
4. **ANONYME 1 (2005).** Voies de transfert de pesticides vers les eaux superficielles et souterraines. DRAF-SRPV Lorraine, Mars 2005. 2 p.

5. **ANONYME 2 (1998)**. Loi n°98-755 du 23 décembre 1998 portant Code de l'Eau. République de Côte d'Ivoire, 68 p.
6. **ANONYME 3 (1990)**. Analyse multicritère: Optimisation et analyse de faisabilité, 24 p.
7. **ASPA (2006)**. Note sur la surveillance des produits phytosanitaires en alsace, France. 29 p.
8. **AUBERT G. (1965)**. Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sols utilisés par la section de pédologie de l'O.R.S.T.O.M. Cahiers O.R.S.T.O.M. Série Pédologie 1965, vol. 3, N° 3. P 269-288.
9. **BESANÇON., METTETAL J.P. ET DORFLIGER N. (2005)**. Guide méthodologique. Cartographie de la vulnérabilité en vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique, BRGM, DIREN FRC, 41 p.
10. **BIEMI J. (1992)**. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat Université Nationale de Côte d'Ivoire, 480 p
11. **BNETD (2008)**. Impact environnemental et social de la mise en œuvre des périmètres de protection autour des points de captage d'eau souterraine du District d'Abidjan. Champs captants de Niango Nord, Zone Ouest, Adjamé Nord, Zone Nord et Nord Riviéra. Rapport final (Février 2008) , Direction de l'Hydraulique Humaine, 109 p.
12. **CARRE J. (2005)**. Protection des prises d'eau de surface destinées à la production d'eau potable. TSM numéro 4 – 2005- 100^e année, pp 27- 34.
13. **CARRE J., MARJOLET G., BURLOT T., RAMBERT B. ET TSM., (1997)**. Protection des prises d'eau de surface destinées à la production d'eau potable : l'exemple Breton, pp. 42-48.
14. **CIVITA M. (1993)**. Ground water vulnerability maps: arcview. In Proceeding sin IX symposium Pesticide Chemistry: mobility and degradation of xenobiotics, pp.587–631.
15. **CREPACI (1999)**. Bilan en eau et hydrochimique de la lagune Aghien. Lutte contre les pollutions lagunaire, 32 p.

16. **DOMANGE N. (2005).** Etude des transferts de produits phytosanitaires à l'échelle de la parcelle et du bassin versant viticole (Rouffach, Haut-Rhin). Mémoire de Thèse des Sciences de la terre et de l'Univers, Université Strasbourg 1, 222 p.
17. **EBA A. E., KOUAME K. J., JOURDA J. P., AKE G. E., SALEY M. B., ANOH K. A., DEH S. K. (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, Volume 4, Issue 4, pp.1311-1320
18. **EL MORJANI Z. (2002).** 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 (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, Université de Genève, Terre et Environnement Vol. 42, 300 p.
19. **FREISSINET C. (1997).** Estimation des imprécisions dans la modélisation du devenir des produits phytosanitaires dans les sols: une méthode fondée sur la logique floue. Doctorat, Université Joseph Fourier—Grenoble I, 385 p.
20. **GAROUNI E. A. ET MERZOUK A. (2006).** Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG. Journal of water science. Vol. 19, N°1, 2006, pp 1-10.
21. **HUMBERT J.F. (2012).** Rapport sur la mission « lagune Aghien ». UMR Bioemco, ENS Paris, 25 p.
22. **JOURDA J. P. (2005).** Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p.
23. **JOURDA J. P.; KOUAME K. J, SALEY M. B., KOUADIO B.H ET OGA Y.S (2006):** Contamination of the Abidjan aquifer by sewage: An assessment of extent and strategies for protection. Dans Groundwater pollution in Africa, pp. 293-302.
24. **JOURDA J. P., KOUASSI K. J., ADJA M. G., DEH S. K., ANANI A. T., EFFINI 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. 18p.
25. **KOUAME K. J. (2003).** 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 option hydrogéologie, Université de Cocody, 63 p.
 26. **KOUAME K. J. (2007):** Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire): Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan. 225p.
 27. **LALLEMAND-BARRES A., ROUX J.C., (1989).** Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Collection : Manuels et Méthodes, N° 19, BRGM, 224 p.
 28. **MACARY F., LECCIA O., UNY D. ET PETIT K. (2010).** Usage de la géomatique afin de déterminer les zones à risque agroenvironnemental pour la qualité des eaux de surface, SIG2010 Conférence Francophone ESRI 29 et 30 septembre-Versailles.
 29. **MOHAMED S., RACHID M. ET MOUMTAZ R. (2003).** Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc, 25 p.
 30. **MURAT V., MARTEL R., MICHAUD Y., THERRIEN R. (2000).** Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien, Québec. 53e conférence canadienne de géotechnique, 15-18 Octobre 2000, Montréal, pp 411-418.
 31. **OSBORN N. I., ECKENSTEIN E. ET KOON K. Q. (1998).** Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma. Oklahoma water resources boards, technical report, 14 p.
 32. **PNUD (2006).** Au-delà de la pénurie : Pouvoir, pauvreté et la crise mondiale de l'eau. Human Development report 2006, 422p.

33. **RASMUSSEN H. ET ROULEAU A. (2003)**. Guide de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captage d'eaux souterraines. Centre d'étude sur les ressources minérales, Université Québec à Chicoutimi; contrat du ministère de l'environnement du Québec, 182 p.
34. **SAATY T. L. (1980)**. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority setting, Resource allocation, Mc Graw-Hill, New York, 19 p.
35. **SAKHO M. A. (1998)**. Le système d'information géographique (SIG), l'hydrologie et la gestion des ressources en eau. World Meteorological Organisation Technical Reports in hydrology and water resources, n°59, 14 p.
36. **SHOEN R., CODVELL 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.
37. **SOGREAH (1996)**. Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant l'alimentation d'eau potable d'Abidjan. Etude sur modèle mathématique. Rapport de la phase 1 collecte et synthèse des données. version définitive. 110 p.
38. **YACOUB I. (1999)**. Analyse de l'évolution qualitative et quantitative des ressources en eaux souterraines du Grand Abidjan. Mémoire de DEA, Université d'Abobo-Adjamé, 58 p.
39. **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