

## **CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ INTRINSÈQUE DES EAUX DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DU LAC DE TAABO EN CÔTE D'IVOIRE AUX FLUX DIFFUS DE PHOSPHORE**

**Kouao Armand ANOH<sup>1,3\*</sup>, Tanoh Jean-Jacques KOUA<sup>1</sup>,  
Sampah Georges EBLIN<sup>1</sup>, Aimé KOUDOU<sup>1</sup>, Kan Jean KOUAMÉ<sup>2</sup>,  
Jean Patrice JOURDA<sup>2</sup> et Octavian Gabriel LAZAR<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Département de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé,  
Daloa, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Département de l'Hydrogéologie, Université Felix Houphouët-Boigny  
d'Abidjan, Côte d'Ivoire*

<sup>3</sup> *Department of Environment and Mechanical Engineering,  
Vasile Alecsandri University of Bacau, Roumania*

---

\* Correspondance, e-mail : [anohkoua@gmail.com](mailto:anohkoua@gmail.com)

### **RÉSUMÉ**

Les eaux de surface du bassin versant du lac de Taabo représentent la principale source d'approvisionnement en eau de boisson des grandes agglomérations du bassin. Malheureusement, l'expansion des activités agropastorales constituent des entraves à leur mise en valeur. Cette étude s'est donnée dès lors pour objectif, d'évaluer le degré de protection des eaux de surface du bassin versant du lac de Taabo à l'expansion du phosphore afin de sensibiliser les différents protagonistes et l'opinion publique sur l'enjeu des problèmes posés par leur pollution. Pour atteindre cet objectif, l'application d'une méthodologie innovante combinant Systèmes d'Information Géographiques et analyse multicritère a été nécessaire. La conception de cette méthodologie a requis dans un premier temps, la caractérisation détaillée de 5 paramètres intervenant dans le transfert et l'atténuation de la pollution. L'importance relative de chaque paramètre a été ensuite évaluée par un poids fixe et une cote variant de 1 pour les alternatives les moins significatives à 10, pour celles qui sont le plus. La combinaison de ces 5 paramètres à l'origine de l'acronyme DOPES dans le SIG et l'analyse multicritère a permis de cartographier cinq classes de vulnérabilité intrinsèque. La fiabilité de cette carte a été reconnue par deux tests de sensibilité et une superposition des taux de phosphore total. Ainsi, avec un taux de couverture de 48,62 %, la classe de vulnérabilité très faible est la plus représentative sur le bassin. La très forte proportion de la classe de

vulnérabilité très faible montre que les eaux de surface du bassin versant du lac de Taabo sont fortement liées à leur environnement et aux conditions climatiques qui lui procurent un certain degré de protection vis-à-vis du polluant.

**Mots-clés :** *eau de surface, pollution, SIG, analyse multi-critère, Bassin versant de Taabo.*

## **ABSTRACT**

### **Mapping the intrinsic vulnerability of Taabo's watershed surface water in Côte d'Ivoire to diffuse phosphorus flow**

Surface waters of Taabo's lake watershed represent the main source of drinking water supply for the basin major agglomerations. Unfortunately, the expansion of agropastoral activities constitute an obstacle of their development. The purpose of this study was therefore to evaluate the protection degree of Taabo's lake watershed surface waters to the expansion of phosphorus in order to sensitize the various protagonists and public opinion on the issue posed by their pollution. To achieve this objective, the application of an innovative methodology combining Geographic Information Systems and multi-criteria analysis was necessary. The conception of this methodology initially required a detailed characterization of 5 parameters involved in the transfer and mitigation of pollution. The relative importance of each parameter was then evaluated by a fixed weight and rating ranging from 1 for the least significant alternatives to 10 for those are the most significant. The combination of these five parameters at the origin of the DOPES acronym in the GIS and multi-criteria analysis enabled to map five classes of intrinsic vulnerability. The reliability of this map has been recognized by two sensitivity tests and by a superposition of total phosphorus contents. Thus, with a coverage rate of 48.62%, the very low vulnerability class is the most representative in the basin. The largest proportion of the very low vulnerability class shows that the surface waters of Taabo's lake watershed are strongly linked to their environment and climatic conditions which gave them a certain degree of protection against pollutant.

**Keywords :** *surface water, pollution, GIS, multi-criteria analysis, Taabo's basin.*

## I - INTRODUCTION

Ces trente dernières années, le bassin versant du lac de Taabo situé au Centre de la Côte d'Ivoire a connu d'importantes mutations tant au niveau du paysage qu'au plan hydrologique. Ce bassin qui renferme deux des plus importants lacs du pays, constitue aujourd'hui un énorme espoir de par sa vitalité aussi bien pour les autochtones que les allogènes [1]. En effet, la réalisation des deux grandes retenues hydroélectriques du pays que sont Kossou et Taabo sur ledit bassin a entraîné d'importantes migrations anarchiques de populations de la sous-région Ouest Africaine au pourtour de ceux-ci. Selon une étude réalisée par la [2], 13,31 % de l'ensemble des populations des sous-préfectures drainées par le bassin du lac de Kossou sont riverains du lac. De même, l'Institut National de la Statistique [3] a rapporté que la population riveraine autour du lac de Taabo a connu des taux d'accroissement de 7,6 % entre 1977 et 1988 et 9,3 % entre 1988 et 1998 contre 3,2 % au plan national. Cette croissance démographique avec pour corollaire, l'intensification des activités anthropiques n'est pas sans effet sur ces ressources hydriques. En effet, plusieurs études menées sur le bassin par plusieurs auteurs dont [1, 4-9] ont relevé que les problèmes de dégradation des eaux du bassin sont la sédimentation et l'eutrophisation des lacs. Les sédiments qui comblent le fond des lacs renferment d'importants polluants toxiques qui perturbent l'équilibre biologique des eaux [10].

Quant à l'eutrophisation qui occupe 26% de la superficie du lac de Taabo depuis les années 1990 [5], a entraîné entre autres une augmentation de la disparité du sex-ratio de l'espèce *D. Rostratus* en faveur des mâles [11] et la dominance des Chlorophytes, des Cyanophycées et des Euglenophytes [12]. Face à l'enjeu major que représentent ces eaux tant pour la Côte d'Ivoire que pour les pays de la sous-région Ouest Africaine, leur gestion dans le cadre du service public apparait fondamentale. Ainsi, vu l'inexistence de méthode standard d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface, l'objectif principal de cette étude sera de concevoir une méthode pour cartographier les zones vulnérables à la pollution diffuse. De façon spécifique, cette étude permettra entre autres d'identifier les paramètres influençant le transfert horizontal des polluants diffus vers les eaux surfaciques afin d'élaborer la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des polluants. Celle-ci servira de référence pour les évaluations, les validations et les recommandations à formuler pour une implantation effective des activités anthropiques. Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie permettant d'évaluer la vulnérabilité à partir d'un ensemble d'informations géographiques combiné à une analyse multicritère sera mise en place.

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

### II-1. Zone d'étude

De par sa configuration géographique allongée, le bassin versant du lac de Taabo (BVL) est représentatif des grands ensembles hydro-climatiques de la Côte d'Ivoire. En effet, grâce à son contexte géologique et à sa bonne situation géographique, le BVL dispose d'un dense réseau hydrographique. Le plus long cours d'eau du bassin s'étend sur 666,95 km et couvre une superficie de 60 154,26 km<sup>2</sup> dont 0,05 % (soit 2975,33 km<sup>2</sup>) se trouve au Mali. Prenant ainsi sa source en territoire Malien, le BVL est quadrillé par les longitudes 4°59' et 7°10' Ouest et les latitudes 6°07' et 10°33' Nord (*Figure 1*).

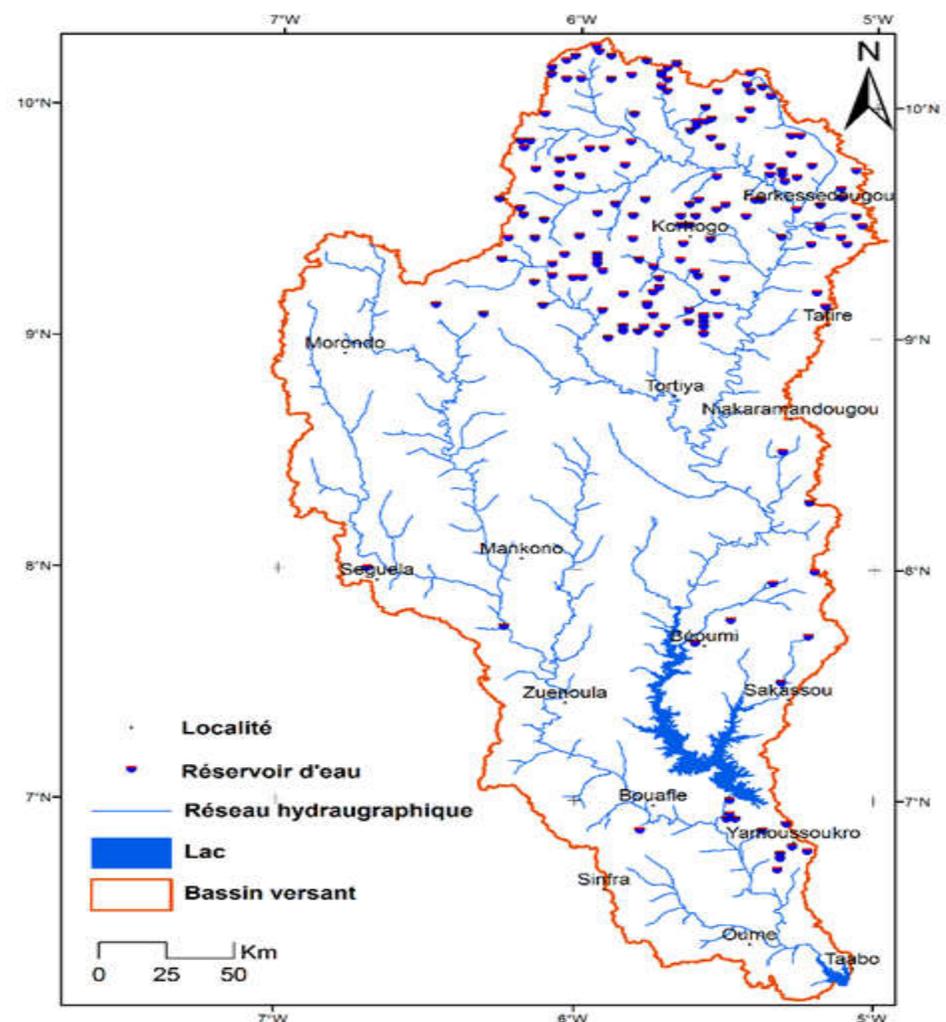


Figure 1 : Bassin versant du lac de Taabo

Au plan climatique, le BVLTL est balayé par trois types de climat que sont le climat équatorial de transition, le climat équatorial de transition atténué et le climat tropical de transition. Le BVLTL abrite ainsi des réserves d'eaux surfaciques abondantes dont deux grands lacs (Kossou et Taabo) à usage hydro-électrique et 181 petits réservoirs d'eau dont l'usage principal est dédié à l'hydro-agricole [1, 13].

## II-2. Matériel

Pour cartographier les zones sensibles aux flux de polluants dans le BVLTL, la méthodologie mise en place requiert une superposition spatiale de plusieurs couches d'informations incluant :

- l'occupation du sol du bassin établie par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) à une échelle de 1/900000, suivant le couvert végétal du mois de janvier 2012 ;
- la carte pédologique établie par la FAO en 1995 à la résolution spatiale de 10 km ;
- la mosaïque des images Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 35\_10 ; 35\_11 et 36\_11 à la résolution spatiale de 90 m obtenue sur le site « <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version4/SRTM3/Africa> » ;
- les données météorologiques journalières de 12 stations renfermant la pluviométrie (mm) et la température (°C) de l'année 2012 téléchargés sur le site <http://globalweather.tamu.edu/> ;
- les données physico-chimiques des eaux de l'année 2012 (**Tableau 1**). Le choix du phosphore comme indicateur de vulnérabilité répond aux conclusions de [14 - 17], qu'il est le principal facteur limitant la croissance des algues dans les eaux douces.

**Tableau 1 :** Teneur en phosphore total des eaux du bassin versant du lac de Taabo [1]

Localité	Phosphore total (mg/L)	Eau
Yamoussoukro	10	Surface
Mankono	0,13	Souterraine
Ferkessédougou	0,13	Souterraine
Korhogo	0,3	Souterraine
Taabo	3,75	Surface
Katiola	0,28	Surface
Zuénoula	1,42	Souterraine
Oumé	0,21	Souterraine
Niakaramandougou	0,125	Souterraine

Les logiciels ENVI 5.0 et ArcGIS 10.0 ont été utilisés pour le traitement de toutes ces données suivant le système de projection de coordonnées UTM WGS 84, zone 30, hémisphère Nord.

### **II-3. Méthodes**

La méthodologie mise en place dans le cadre de cette étude repose exclusivement sur le couplage des Systèmes d'Information Géographique (SIG) à une Analyse Multi-Critère (AMC). Cette combinaison de l'AMC aux SIG a déjà fait l'objet de plusieurs applications dans le monde notamment dans l'identification des zones favorables à l'implantation des points d'eau souterraine au Maroc et en Algérie [18] de même qu'en Côte d'Ivoire [19]. Elle a aussi été largement appliquée dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines en Côte d'Ivoire par [20], en Grèce par [21] et aux Etats-Unis par [22]. L'approche méthodologique de l'AMC retenue dans le cadre de cette étude se base sur la combinaison linéaire des poids établie dans la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) de [23]. La mise en place de cette méthodologie requiert de passer par différentes étapes d'analyses et différentes phases de calculs que sont :

- L'identification des variables impliquées dans la genèse et l'évolution de la pollution ;
- La réalisation de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface ;
- La vérification de la pertinence de la méthodologie adoptée.

#### ***II-3-1. Identification des variables***

L'étude de la vulnérabilité des eaux de surface est très complexe car l'intensité des polluants ruisselés est essentiellement dépendante d'une pléthorique de variables environnementales et naturelles. Ainsi, afin d'éviter une surestimation ou une sous-estimation des paramètres, les variables de décision utilisées dans le cadre de cette étude ont été inspirées des travaux de [24 - 27]. Pour soutenir cette bibliographie, le jugement d'un panel représentatif d'experts en hydrologie, hydrogéologie et climatologie des universités Félix Houphouët Boigny et Jean Lorougnon Guédé a été sollicité pour l'adaptation de certaines variables aux réalités de la Côte d'Ivoire. Dès lors, le risque pour les hydrosystèmes du BFLT est intimement lié à la conjugaison de la plus ou moins grande proximité du chevelu hydrographique (densité du réseau hydrographique) aux sources de pollution (occupation du sol), à la topographie (pente) conditionnant la vitesse d'écoulement de l'eau à la surface du sol (sol) et au climat (pluie efficace) influençant les transferts par ruissellements, les charges diffuses de phosphore. Dans le cas de cette étude, nous avons considéré que les variables varient très peu

temporellement. Par conséquent, elles sont considérées comme fixes dans le temps. Cela s'explique par le fait que les cultures pratiquées dans la zone d'étude sont pérennes ou annuelles. Ainsi chaque année, il y a une redondance des cultures sur pratiquement les mêmes parcelles. De même, la pédologie, la topographie et la climatologie varie également très lentement. Quant aux caractéristiques des polluants ; à savoir la dégradation et la propriété dispersive (diffusion, dilution), bien qu'importantes, elles n'ont pas été abordées dans cette étude pour des soucis de manque d'informations. En effet, nous sommes conscients que le manque d'informations sur ces dernières peut altérer la précision de notre étude. Toutefois, vu que notre étude traite l'aspect vulnérabilité et non le risque de pollution qui dépend non seulement de la vulnérabilité, mais également de l'existence d'une charge significative de pollution [20], ces paramètres peuvent être négligés.

### *II-3-2. Réalisation de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface*

Le SIG utilisant des valeurs numériques pour le croisement des données, l'importance relative de chaque paramètre est évaluée par un poids fixe (**Tableau 2**). Ainsi, à l'instar de la méthode DRASTIC qui traite de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines [8, 28 - 30], une pondération de toutes les variables retenues est effectuée. Notre méthode dite « cartographie à index avec pondération des variables » a requis une série de comparaisons par paire de variables suivant leur importance sur la pollution des eaux de surface. Le but de cette combinaison binaire est selon [23] d'aboutir à la détermination d'un coefficient de pondération ou poids (**Équation 1**) à partir de valeurs propres (**Équation 2**).

$$C_{pi} = \frac{V_{pi}}{\sum_{i=1}^n V_{pi}} \quad (1)$$

$$V_{pi} = \sqrt[n]{W_1 \times \dots \times W_n} \quad (2)$$

avec,  $C_{pi}$  = coefficient de pondération,  $V_{pi}$  = Vecteur propre du paramètre ;  $W_n$  = Valeur de chaque paramètres et  $n$  = nombre de paramètres.

Le poids indique l'importance subjective du paramètre par rapport aux autres variables. Un coefficient de pondération élevé aura tendance à accentuer la vulnérabilité de la retenue tandis qu'un poids faible réduira la vulnérabilité. [23] recommande que dans la matrice de calcul, la somme des coefficients de pondération soit égale à l'unité (01). Par ailleurs, pour chaque paramètre, des alternatives faisant références aux principales variables auxquelles l'on peut faire allusion ont été déduites. Chaque alternative s'est aussi vu attribuer une

cote variant entre 1 et 10 selon sa tendance à réduire ou favoriser la pollution (**Tableau 2**). Les formules de l'United States Department of Agriculture–Soil Conservation Service (USDA-SCS) (**Équations 3 et 4**) ont été utilisées pour le calcul des pluies efficaces.

$$\text{Pour } Prec_{mens} < 250 \text{ mm} \rightarrow P_{eff} = \frac{Prec_{mens} \times (125 - 0,2 \times Prec_{mens})}{125} \quad (3)$$

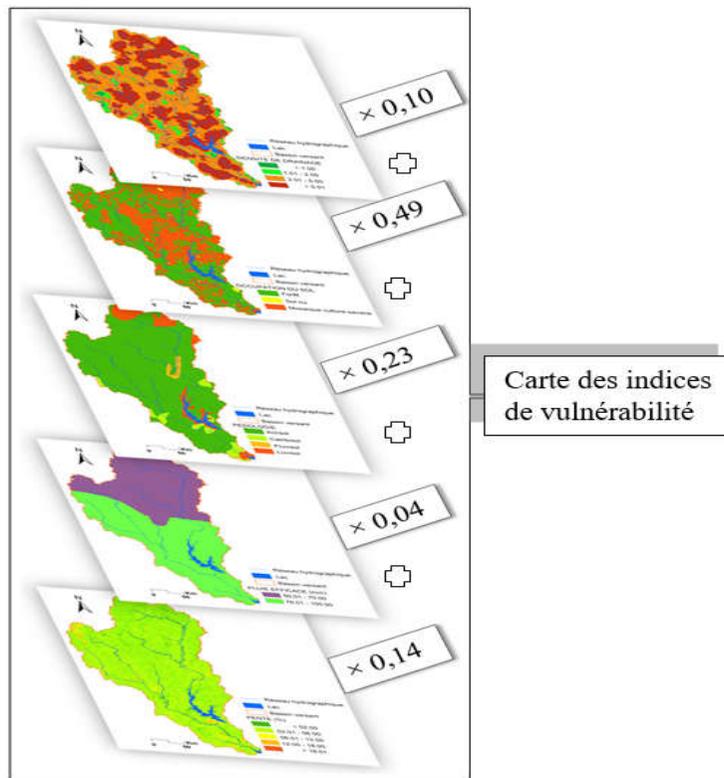
$$\text{Pour } Prec_{mens} > 250 \text{ mm} \rightarrow P_{eff} = 125 + 0,1 \times Prec_{mens} \quad (4)$$

où,  $P_{eff}$  : précipitation efficace (mm) et  $Prec_{mens}$  : précipitation moyenne mensuelle (mm).

**Tableau 2** : Variables impliqués dans la vulnérabilité des eaux surfaciques

Paramètres	Poids (w)	Alternatives	Cotes (r)	Sources
Densité du réseau hydrographique (D) (km/km <sup>2</sup> )	0,10	< 1	1	[31] modifié par l'enquête de terrain
		1 à 2	2	
		2 à 5	4	
		> 5	7	
Occupation du sol (O)	0,49	Forêt, savane et mosaïques forêt-savane	1	[1, 8, 32]
		Agglomérations et sols nus	5	
		Cultures et mosaïques cultures-savane, culture-forêts	10	
Pente (P) (%)	0,23	0-2	1	[1, 8]
		2-6	3	
		6-12	5	
		12-18	9	
		≥ 18	10	
Pluie efficace mensuelle (E)	0,04	< 50	3	Enquête de terrain
		50 à 70	5	
		70 à 100	8	
		> 100	10	
Pédologie (S)	0,14	Acrisols	2	[1]
		Cambisols	6	
		Fluvisols	7	
		Luvisols	9	

La détermination des cotes de la pluie efficace a reposé essentiellement sur les réponses d'experts en hydrogéologie, hydrologie et climatologie. Ainsi des questionnaires accompagnés d'une notice explicative sur l'expertise ont été envoyés à neuf (09) experts. Six (06) sur les neuf (09) experts ont participé à la réalisation de cette expertise. Pour chaque expert, la cohérence des réponses a été contrôlée en vérifiant que l'avis de priorité croissait ou décroissait avec l'augmentation ou la réduction des phénomènes de pollution. Lorsque le résultat a été jugé satisfaisant, une moyenne des notes attribuées a été faite afin d'en déduire la cote correspondante. La carte de vulnérabilité intrinsèque à l'érosion hydrique du phosphore qui servira de référence est le produit de l'agrégation des 5 paramètres dont l'acronyme est DOPES. Dans cette étude, nous avons adopté la méthode d'agrégation complète qui a donné des résultats satisfaisants dans plusieurs pays dont la Côte d'Ivoire [19, 20, 33, 34], l'Algérie [21], le Maroc [35] et la Grèce [36]. L'agrégation complète (**Figure 2**) abouti à une carte de vulnérabilité avec des indices numériques ( $I_v$ ). La valeur minimale de l'indice de vulnérabilité ( $I_{v_{\min}}$ ) est de 1,22 et la valeur maximale ( $I_{v_{\max}}$ ) de 9,56.



**Figure 2 :** Agrégation des paramètres

La conversion des indices de vulnérabilité DOPES en classe de vulnérabilité est donnée par l'Équation 5.

$$IV_{DOPES} = \frac{(Iv_i - Iv_{min})}{(Iv_{max} - Iv_{min})} \times 100 \quad (5)$$

avec,  $Iv_i$  = indice de vulnérabilité calculé.

Suivant cette formulation, cinq intervalles de vulnérabilité ont été retenus pour la classification de l'indice DOPES (Tableau 3).

**Tableau 3 : Classes de vulnérabilité**

Valeur de $Iv_i$	Pourcentage	Degré de vulnérabilité
0,00 – 2,88	20	Très faible
2,89 – 4,55	40	Faible
4,56 – 6,22	60	Moyenne
6,23 – 7,89	80	Forte
7,90 – 9,56	100	Très forte

### II-3-3. Test de vérification

#### II-3-3-1. Vérification de la fiabilité du modèle

A l'instar de la méthode DRASTIC qui est caractérisée par une combinaison de plusieurs paramètres censé limiter l'impact des erreurs et des incertitudes dans les paramètres individuels sur la sortie finale [37, 38], la méthode DOPES combine 5 variables. Afin d'affirmer la fiabilité de la carte de vulnérabilité intrinsèque et d'apprécier la pertinence de chaque variable sur cette carte, trois tests de vérification ont été effectués. Le premier test a consisté à authentifier la carte de vulnérabilité intrinsèque sur la base d'analyses chimiques des taux de phosphore total des eaux surfaciques et souterraines prélevées dans les différentes zones. Dans cette validation, les zones réellement contaminées (fortes teneurs de phosphore) doivent se superposer à celles où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés. Cette technique de vérification adoptée par plusieurs auteurs dont [1, 20, 26, 30, 33, 39 - 41] et a donné des résultats très satisfaisants. D'autres auteurs comme [42] ont affirmés que les poids et les cotes utilisées dans l'AMC sont subjectifs ; ce qui réduit la fiabilité de la carte de vulnérabilité. Afin de lever tous ces équivoques, deux autres tests basés sur des analyses de sensibilité du modèle sont effectuées. Le premier test dénommé « Map removal sensitivity analysis » a été développé par [43] (Équation 6). Ce test permet de décrire la sensibilité de la carte de vulnérabilité après suppression d'un ou plusieurs paramètres du processus de superposition.

$$S = \left| \frac{I_v}{N} - \frac{I_{vi}}{n} \right| \times 100 \quad (6)$$

où,  $S$  : la sensibilité de la carte de vulnérabilité,  $I_v$  : l'indice de vulnérabilité intrinsèque du modèle,  $N$  : le nombre total de paramètres utilisés pour calculer  $I_v$ ,  $I_{vi}$  : l'indice de vulnérabilité intrinsèque obtenu après suppression du paramètre  $X$  et  $n$  : le nombre de paramètres utilisés pour calculer  $I_{vi}$ .

Le second test de sensibilité dit à paramètre unique « single parameter sensitivity analysis » a été développé par [42] (**Équation 7**). Il permet d'analyser l'influence réelle de la pondération par rapport aux poids affectés à chaque paramètre de l'indice de vulnérabilité.

$$W = \frac{X_r \times X_w}{I_v} \times 100 \quad (7)$$

où,  $W$  : le poids effectif du paramètre,  $X_r$  : la cote assignée au paramètre,  $X_w$  : le poids assigné au paramètre et  $I_v$  : l'indice de vulnérabilité intrinsèque.

La fiabilité de ces deux tests a été attestée par plusieurs auteurs, entre autres [44 - 51].

### II-3-3-2. Vérification de la cohérence des jugements

Dans une étude qui repose sur une subjectivité de valeurs, il est impératif de déterminer la cohérence de tous les jugements effectués. En effet, les valeurs attribuées présentant souvent un certain degré d'incohérence, une synthèse de tous les jugements s'avère nécessaire. Pour vérifier la cohérence des appréciations, [23] a déterminé un critère d'appréciation qui est le ratio de cohérence (Rc). Si ce dernier est inférieur à 10 % alors les appréciations sont cohérentes ; dans le cas contraire, elles nécessiteront une révision. Le principe de vérification impose de passer par 7 étapes successives décrites à travers les **Équations 8, 9, 10, 11, 12, 13 et 14** :

- Étape 1 : normalisation de la matrice  $[A]$ .  $[A] = \sum \frac{W_n}{\sum W_n}$  (8)

- Étape 2 : calcul du vecteur prioritaire  $[C]$ .  $[C] = [A] \times \frac{1}{n}$  (9)

- Étape 3 : calcul de la priorité globale  $[D]$ .  $[D] = \sum [W_n] \times [C]$  (10)

- Étape 4 : calcul de la priorité rationnelle  $[E]$ .  $[E] = \frac{[D]}{[C]}$  (11)

- Etape 5 : calcul de la moyenne des priorités rationnelles  $\lambda_{\max}$ .  $\lambda_{\max}$   

$$= \frac{[E]}{n} \quad (12)$$

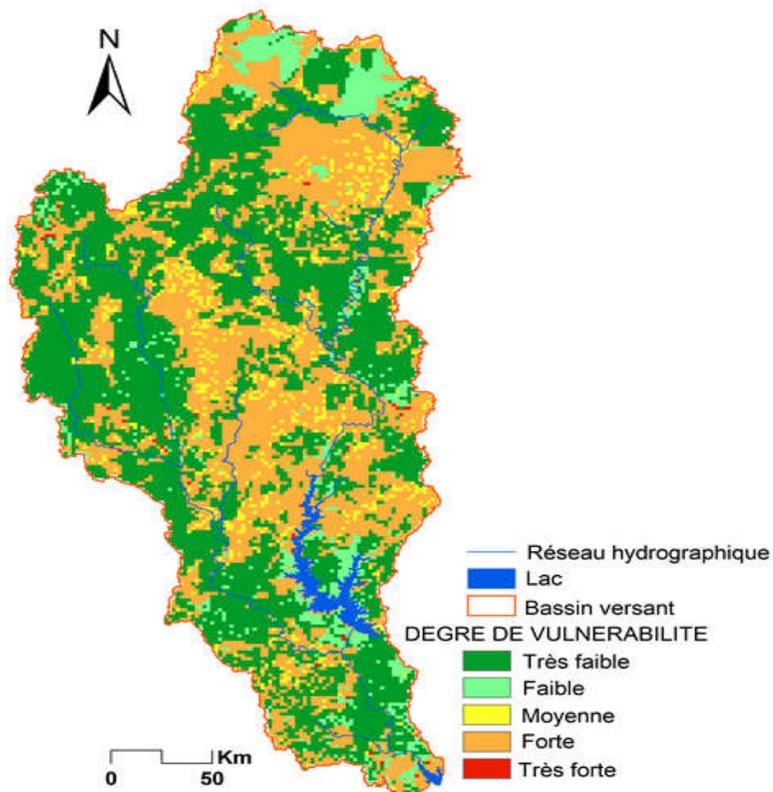
- Etape 6 : calcul de l'indice de cohérence ( $Ic$ ).  $Ic = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (13)$

- Etape 7 : déduction du coefficient de cohérence ( $Rc$ ).  $Rc = \frac{Ic}{Ia} \quad (14)$

où, ( $Ia$ ) : l'indice aléatoire selon [23] est de 1,12 et  $n$  : le nombre de paramètres.

### III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

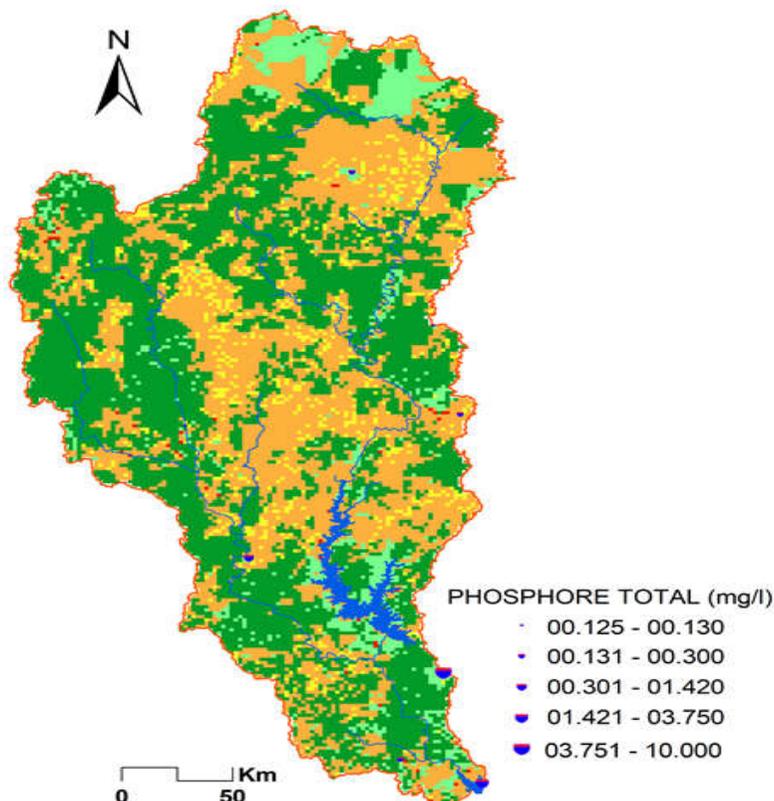
Suivant l'ordre des classes établi dans le **Tableau 2**, trois classes de vulnérabilité intrinsèque prédominent le bassin (**Figure 3**).



**Figure 3** : Carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface du BVLТ

Avec une superficie de 48,62 %, la classe de vulnérabilité très faible est la plus représentative. Elle est la conséquence du fort couvert végétal combiné aux bonnes caractéristiques morpho-pédologique du bassin. En effet, ces derniers ont tendance à favoriser l'infiltration des flux d'eau. Selon [52], la très forte proportion d'une telle classe de vulnérabilité montre que les eaux de surface du BVLT ont une prédisposition à être à l'abri de la pollution en considérant uniquement les paramètres intrinsèques de l'aquifère. Cette remarque sur la classe de vulnérabilité très faible a aussi été rapportée dans les travaux de [1]. La seconde classe de vulnérabilité (élevée) couvre 38,03 % de la superficie du bassin. Cette zone de vulnérabilité correspond à des surfaces agricoles où le sol présente une faible perméabilité. Outre l'agriculture, les activités minières pratiquées par les populations en amont du lac de Kossou [1, 6, 8, 9] sont aussi à l'origine de cette dominance de la classe de vulnérabilité élevée dans ces parties Centre et Nord du bassin. La troisième classe de vulnérabilité (faible) couvre 7,47 % du bassin. Elle est le domaine des zones agricoles sur des sols épais à texture limoneux-sableux avec par endroit de fortes accumulations d'argile.

Ainsi, l'existence d'une classe de vulnérabilité faible dans ces zones agricoles est imputable à la présence d'une couverture antiérosive (résidus de récoltes ou feuilles morte). En effet, selon [53], la présence d'une couverture antiérosive réduit les pertes de sol et donc le transfert de polluant vers le système hydrique. Les classes de vulnérabilité moyennes (5,59 %) et très forte (0,30 %) sont quasi imperceptible sur le bassin. La faible proportion de la classe de vulnérabilité très forte montre la plus ou moins bonne prévalence des eaux de surface du bassin à la pollution. La comparaison de ces résultats à ceux obtenus par [1, 8] sur le même bassin, présentent beaucoup de concordances ; notamment dans les aires vulnérables, malgré la dissimilitude des données et approches. On peut donc dire que l'approche DOPES utilisée pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux de surface du BVLT est fiable. Elle permet donc selon [26] de circonscrire les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte lors de l'aménagement du territoire. Pour conforter cette affirmation, la fiabilité de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface du bassin a été évaluée à travers la superposition de la carte de répartition spatiale des flux de phosphore total (*Figure 4*).



**Figure 4 :** Répartition spatiale des flux de phosphore total

La coïncidence des analyses chimiques aux zones à faible et très faible vulnérabilité corrobore l'approche par la méthode DOPES. En effet, bien que tous les échantillons d'eaux collectées aient des taux de phosphore total en deçà de la norme admise par l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) sur la potabilité de l'eau de boisson, il convient toutefois de recenser certaines difficultés et limites. L'une des difficultés de l'application de la méthode DOPES est la subjectivité des poids et cotes assignées aux paramètres dans l'application de l'analyse multicritère [23]. En effet, les valeurs attribuées aux paramètres ont parfois tendance à surestimer ou sous-estimer l'impact du paramètre sur la pollution de la retenue. De même, les classes de vulnérabilité ne correspondent pas très souvent à la réalité de la zone étudiée. En effet, une zone vulnérable peut avoir un faible indice de vulnérabilité du fait que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuelle, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle, si rien n'est entrepris pour les protéger [20]. Les classes et cotes ne sont donc pas des valeurs absolues, mais plutôt des valeurs relatives [30]. Au niveau de la répartition spatiale de

la pluie efficace, il faut souligner que le manque d'analyses sur le terrain nous a contraints à tenir compte des résultats du bilan hydrique pour son évaluation. Or selon l'évolution du phosphore total, la pluie efficace joue un rôle très capital. Ainsi, les cartes de la densité du réseau hydrographique et de la pluie efficace ont été obtenues par interpolation. Selon [30], l'interpolation peut entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres. Elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. Toutefois, d'après [52] elle a néanmoins un avantage, car elle permet d'affecter des valeurs à ces paramètres même dans des secteurs où aucune donnée n'est connue. Outre l'interpolation de données existantes, figure l'absence de données relatives à la cinétique du phosphore. En effet, pour être plus efficace à tout type de pollutions, il serait souhaitable d'inclure le temps de transfert du polluant jusqu'au captage et le mode de communication entre la nappe souterraine et superficielle dans la prise en compte des paramètres. Pour lever toute ces équivoques sur la fiabilité de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface du BVLT, une analyse de sensibilité du modèle s'impose.

### III-1. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité réalisée à partir du test de suppression d'un ou plusieurs paramètres à la fois a montré une claire variation de l'indice de vulnérabilité (**Tableau 4**).

**Tableau 4** : Statistique du test de sensibilité de suppression d'un ou plusieurs paramètres

Paramètre extrait	INDICE DE VULNERABILITE		
	Maximal	Moyen	Minimal
Densité du réseau (D)	30,30	17,93	3,60
Occupation du sol (O)	74,70	38,25	6,15
Pente (P)	9,70	5,53	0,35
Pluie efficace (E)	37,80	20,18	3,10
Pédologie (S)	16,30	5,68	0,90

En effet, il ressort de cette analyse que l'indice de vulnérabilité est très sensible à la suppression de la carte du couvert végétal (indice moyen = 38,25). Selon [45], les paramètres comme l'occupation du sol sont les plus favorables à la pollution. En revanche, l'indice de vulnérabilité semble être moins sensible à la suppression de la pente (indice moyen = 5,53). La sensibilité de l'indice de vulnérabilité à la suppression du paramètre pluie efficace est très perceptible. En effet, bien que ce paramètre ait le plus faible coefficient de pondération, sa suppression entraîne une variation de l'indice de vulnérabilité. Dès lors,

nous pouvons dire que les valeurs des coefficients de pondération de la méthode DOPES ne constituent pas une limite à la fiabilité de la carte de vulnérabilité des eaux de surface. Vu que le coefficient de pondération n'agit pas sur l'indice de vulnérabilité, vérifions les résultats du second test de sensibilité (*Tableau 5*).

**Tableau 5** : Statistique du test de sensibilité dit à paramètre unique

	Poids Théorique	Poids Théorique (%)	Poids effectif (%)
Densité du réseau (D)	0,10	10	7
Occupation du sol (O)	0,49	49	49
Pente (P)	0,23	23	24
Pluie efficace (E)	0,04	4	5
Pédologie (S)	0,14	14	16

Les résultats obtenus par le test de sensibilité dit à paramètre unique montrent une très grande concordance entre les valeurs des poids effectifs et celles attribuées par la modélisation multicritère. Ainsi, tout comme le test de suppression d'un ou plusieurs paramètres à la fois, la vulnérabilité des eaux superficielles est beaucoup sensible à la variation du paramètre couvert végétal. Par contre, la variation du poids de la pluie efficace n'affecte pas trop la vulnérabilité du système hydrique. Ainsi, en dépit de toutes les réserves soulevées dans la présente discussion, les cartes de vulnérabilité établies par l'approche DOPES ; laquelle combine SIG et analyse multicritère est fiable. Elle permet d'appréhender les zones sensibles du bassin en vue de prendre des dispositions de protection et d'aménagement nécessaires.

#### IV. CONCLUSION

Au-delà des constats de plus ou moins bonne qualité des ressources hydrique du bassin versant du lac de Taabo, une cartographie des zones vulnérable s'est avérée indispensable dans un souci de prévention à la pollution. Ainsi, une méthodologie combinant les SIG à une analyse multicritère a été effectuée en intégrant cinq paramètres incluant la densité du réseau hydrographique (D), l'occupation du sol (O), la pente (P), la pluie efficace (E) et le sol (S). La combinaison de ces 5 variables à l'origine de l'acronyme DOPES dans le SIG et l'analyse multicritère a permis de discrétiser cinq classes de vulnérabilité intrinsèque dont trois prédominent le bassin. La classe de vulnérabilité très faible est la plus représentative car elle couvre quasiment la moitié (48,62 %) de la superficie du bassin. Elle est suivie par les classes de vulnérabilité élevée et faible qui occupent respectivement

38,03 % et 07,47 % de la surface du bassin. La très forte proportion de la classe de vulnérabilité très faible montre que les eaux de surface du bassin versant du lac de Taabo sont fortement liées à leur environnement et aux conditions climatiques qui leur procurent un certain degré de protection vis-à-vis des polluants. Pour soutenir la fiabilité de cette carte de vulnérabilité intrinsèque, deux tests de sensibilité ; notamment le test de sensibilité dit à paramètre unique et le test de sensibilité dit à suppression d'un ou plusieurs paramètres ont été réalisés. Ses analyses de sensibilités ont permis de valider et évaluer la fiabilité de la méthode DOPES. Ainsi, la carte de vulnérabilité croisée aux teneurs de phosphore a permis de montrer quelles sont suivant la morphologie des terrains rencontrés en surface et les conditions hydro-pédologiques, les possibilités de propagation du phosphore dans le système hydrique.

### **REMERCIEMENT**

*Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) pour l'octroi du soutien financier à travers une bourse Postdoctorale. Aussi, un merci à l'Université Vasile Alecsandri à Bacau pour son soutien technique.*

### **RÉFÉRENCES**

- [1] - K. A. ANOH, "Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eau du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire)", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (2014) 197
- [2] - F. PITTALUGA, N. OUMAROU, J. ASSIENAN, A. KODJO, Y. NDIA, N. SALVATI, C. SEGHIERI, "Profil de pauvreté des communautés riveraines du lac de Kossou en Côte d'Ivoire", Livelihood System Profile Working Papers Series. FAO. Roma, (2003)
- [3] - INS, "Recensement général de la population et de l'habitation, données sociodémographiques et économiques des localités. Résultats définitifs/ Région des lagunes", in: I.N.d.l. Statistique (Ed.), INS, Côte d'Ivoire, (1998)
- [4] - J. BIEMI, B.F. LOROUX, "Impacts des grands projets de développement sur l'environnement en Côte d'Ivoire. Etude d'impact environnemental préliminaire", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, (2000) 62
- [5] - K. N. VÉI, "Suivi et évaluation de l'impact sociotemporel d'un projet d'aménagement du territoire en Afrique de l'Ouest. L'exemple du barrage de Taabo en Côte d'Ivoire. Apport de la télédétection et des SIG", Ph. D. Dissertation, Université de Cocody, Abidjan, (2005)
- [6] - K. L. KOUASSI, "Hydrologie, transport solide et modélisation de la sédimentation dans les lacs des barrages hydroélectriques de Côte

- d'Ivoire : Cas du lac de Taabo", Sciences et Techniques de l'Eau, Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, (2007) 202
- [7] - K. L. KOUASSI, A. V. WOGNIN, T. GNAGNE, Y.A. N'GO, J.-R. COURIVAUD, P. KASSY, M. DEME, K. AKA, "Caractérisation des sables et morphologie du fond du lac du barrage hydroélectrique de Taabo (Côte d'Ivoire)", *Sciences & Nature*, 4 (2007) 93 - 103
- [8] - K. A. ANOH, J. P. JOURDA, K. J. KOUAMÉ, T. J.-J. KOUA, A. E. EBA, G. LAZAR, "DEMARCATIION OF PROTECTION PERIMETERS FOR SURFACE WATERS OF TAABO (IVORY COAST) WATERSHED USING GIS AND MULTICRITERIA ANALYSIS", *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 11 (2012) 2123 - 2131
- [9] - N. GROGA, "Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire)", *Écologie Toulouse, France* (2012) 224
- [10] - G. GOURÈNE, G. G. TEUGELS, B. HUGUENY, D. T. VAN DEN AUDENAERDE, "Evaluation de la diversité ichtyologique d'un bassin ouest-africain après la construction d'un barrage", *Cybium*, 23 (1999) 147 - 160
- [11] - N. G. ALIKO, K. S. DA COSTA, Y. M. DIETOA, A. OUATTARA, G. GOURÈNE, "Caractéristiques de la population de *Distichodus rostratus* Günther, 1864 (pisces : Distichodontidae) du lac de barrage de Taabo (bassin du Bandama, Côte d'Ivoire). Implications pour une gestion rationnelle du stock ", *TROPICULTURA*, 28 (2010) 50 - 56
- [12] - T. C. SMITH, "Protist phylogeny and the high-level classification of Protozoa", *European Journal of Protistology*, 39 (2003) 338 - 348
- [13] - Unicef, "Etude de faisabilité des forages manuels. Identification des zones potentiellment favorables", in: F.d.N.U.p. l'enfance (Ed.), (2009) 73
- [14] - V. H. SMITH, G. D. TILMAN, J. C. NEKOLA, "Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems", *Environmental pollution*, 100 (1999) 179 - 196
- [15] - M. BERGERON, C. CORBEIL, S. ARSENAULT, "Diagnose écologique du lac Saint-Augustin", Document préparé pour la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures par EXXEP Environnement, Québec, 70 (2002)
- [16] - S. L. NEITSCH, J. G. ARNOLD, J. R. KINIRY, J. R. WILLIAMS, K. W. KING, "Soil and water assessment tool theoretical documentation. Grassland", Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, (2005)
- [17] - T. J.-J. KOUA, "Apport de la modélisation hydrologique et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude du transfert des polluants et des impacts climatiques sur les ressources en eau : cas du bassin versant du lac de Buyo (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (2014) 166
- [18] - O. H. JARAR, A. BENSLIMANE, L. BENAABIDATE, S. EL JAAFARI, "Elaboration d'un SIG pour la gestion des ressources en eau des bassins versants de Ziz et Rhéris", Manuscrit, (2005)

- [19] - D. BROU, "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", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (2008) 164
- [20] - K. J. KOUAMÉ, "Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux souterraine (GIRE) du District d'Abidjan : Outil d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (2007) 217
- [21] - A. GEMITZI, C. PETALAS, V.A. TSIHRINTZIS, V. PISINARAS, "Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques", *Environmental Geology*, 49 (2006) 653 - 673
- [22] - M. N. ALMASRI, J. J. KALUARACHCHI, "Multi-criteria decision analysis for the optimal management of nitrate contamination of aquifers", *Journal of Environmental management*, 74 (2005) 365 - 381
- [23] - T. L. SAATY, "Décider face à la complexité: une approche analytique multicritère d'aide à la décision", *Esf Editeur*, (1984)
- [24] - L. ALLER, J. H. LEHR, R. PETTY, T. BENNETT, "DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings", National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America, (1987)
- [25] - R. SCHOEN, 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", (2001)
- [26] - J. P. JOURDA, "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", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Félix houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (2005) 430
- [27] - G. PANAGOPOULOS, A. ANTONAKOS, N. LAMBRAKIS, "Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS", *Hydrogeology Journal*, 14 (2006) 894 - 911
- [28] - V. MURAT, D. PARADIS, M. SAVARD, M. NASTEV, E. BOURQUE, A. HAMEL, R. LEFEBVRE, R. MARTEL, "Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD", Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, (2003)
- [29] - J. JOURDA, K. KOUAMÉ, M. ADJA, S. DEH, A. ANANI, A. EFFINI, J. BIÉMI, "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, (2007)
- [30] - J. JOURDA, K. KOUAMÉ, M. SALEY, B. KOUADIO, Y. OGA, S. DEH, "Contamination of the Abidjan aquifer by sewage: An

- assessment of extent and strategies for protection", *Groundwater pollution in Africa*, (2006) 293 - 302
- [31] - A. E. EBA, K. J. KOUAMÉ, J. P. JOURDA, G. E. AKÉ, M. B. SALEY, K. A. ANOH, S. K. DEH, "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*, 4 (2013) 1311 - 1320
- [32] - M. SALEY, F. KOUAMÉ, M. PENVEN, J. BIÉMI, B. KOUADIO, "Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire: apport des MNA et de l'imagerie satellitaire", *Téledétection*, 1 (2005) 53 - 67
- [33] - J. JOURDA, M. SALEY, K. KOUAMÉ, B. KOUADIO, J. BIÉMI, M. RAZACK, "Gestion et protection des ressources en eaux souterraines: contribution d'un SIG à la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères fissurés de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) selon la méthode DRASTIC", les Actes de la Conférence francophone SIG, (2005) 16
- [34] - I. SAVANÉ, "Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (1997) 322
- [35] - 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 (Souss, Maroc)", Terre et Environnement Genève, Suisse, (2002) 300
- [36] - A. BENSALD, M. BARKI, O. TALBI, K. BENHANIFIA, A. MENDAS, "L'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision pour la localisation spatiale des zones à forte pression anthropique : le cas du département de Naâma en Algérie", *Revue Télédétection*, 7 (2007) 3 - 4
- [37] - I. S. BABIKER, M. A. MOHAMED, T. HIYAMA, K. KATO, "A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan", *Science of the Total Environment*, 345 (2005) 127 - 140
- [38] - L. ROSEN, "A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions", *Groundwater*, 32 (1994) 278 - 285
- [39] - J. JOURDA, K. KOUAMÉ, N. SORO, K. KOUAMÉ, B. KOUADIO, M. SALEY, K. KOUAMÉ, E. AHOUSSE, "Gestion et protection des eaux souterraines urbaines: 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", Actes de la conférence sur les SIG, (2003)
- [40] - G. A. DOUAGUI, "Evaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du Quaternaire du secteur "Canal de Vridi" (Grand-Bassam) par la méthode DRASTIC", Sciences et Techniques de l'Eau, Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, (2004) 71

- [41] - A. T. ANANI, "Évaluation et cartographie des zones vulnérables à la pollution de la nappe du Continental Terminal au niveau du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire), par les méthodes DRASTIC et GOD", Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, (2006) 71
- [42] - P. NAPOLITANO, A. FABBRI, "Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS", *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 235 (1996) 559 - 566
- [43] - W. A. LODWICK, W. MONSON, L. SVOBODA, "Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis", *International Journal of Geographical Information System*, 4 (1990) 413 - 428
- [44] - A. EL-NAQA, N. HAMMOURI, M. KUISI, "GIS-based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan", *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 23 (2006) 277 - 287
- [45] - G. H. AKBARI, M. RAHIMI-SHAHRBABA, "Sensitivity analysis of water at higher risk subjected to soil contaminations", *Comp. Meth. Civil Eng*, 2 (2011) 83 - 94
- [46] - M. SAMAKE, Z. TANG, W. HLAING, N. INNOCENT, K. KASEREKA, W. O. BALOGUN, "Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer in Linfen Basin, Shanxi Province, China using DRASTIC model", *Journal of Sustainable Development*, 4 (2011) 53
- [47] - B. DIBI, K. I. KOUAME, A. B. KONAN-WAIDHET, I. SAVANE, J. BIEMI, V. NEDEFF, G. LAZAR, "Impact of agriculture on the quality of groundwater resources in peri-urban zone of Songon (Cote D'ivoire)", *Environmental Engineering and Management Journal*, 11 (2012) 2173 - 2182
- [48] - G. A. DOUAGUI, "Risques de pollution de la nappe du Quaternaire de la zone sud du District d'Abidjan : cas du secteur Canal de Vridi-Grand-Bassam (Côte d'Ivoire)", Sciences et Techniques de l'Eau, Nangui Abrogoua Côte d'Ivoire, (2012) 188
- [49] - I. DOUMOUYA, B. DIBI, K. I. KOUAME, B. SALEY, J. P. JOURDA, I. SAVANE, J. BIEMI, "Modelling of favourable zones for the establishment of water points by geographical information system (GIS) and multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire)", *Environmental Earth Sciences*, 67 (2012) 1763 - 1780
- [50] - I. K. KOUAME, A. G. DOUAGUI, K. KOFFI, B. DIBI, L. K. KOUASSI, I. SAVANE, "Modeling of Quaternary Groundwater Pollution Risk by GIS and Multicriteria Analysis in the Southern Part of Abidjan District (Côte d'Ivoire)", *Journal of Environmental Protection*, 4 (2013) 1213 - 1223
- [51] - J. E. DJEMIN, J. K. KOUAMÉ, K. S. DEH, A. T. ABINAN, J. P. JOURDA, "Contribution of the sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessing using the DRASTIC method: application to groundwater in Dabou region (southern of Côte d'Ivoire)", *Journal of Environmental Protection*, 7 (2016) 129

- [52] - K. J. KOUAMÉ, J. P. JOURDA, S. K. DEH, A. T. ANANI, A. T. EFFINI, K. H. SIGNO, J. BIÉMI, "Evaluation du degré de protection d'un aquifère en milieu poreux : Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du district d'abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) par la méthode drastic", *Africa Geoscience Review*, 16 (2009) 89 - 102
- [53] - R. PALIS, G. OKWACH, C. ROSE, P. SAFFIGNA, "Soil erosion processes and nutrient loss. II. The effect of surface contact cover and erosion processes on enrichment ratio and nitrogen loss in eroded sediment", *Soil Research*, 28 (1990) 641 - 658