

# Apport des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères du bassin versant de l'Abiergué (région de Yaoundé)

EWODO MBOUDOU Guillaume<sup>1,2\*</sup>, OMBOLO Auguste<sup>1</sup>, BON André Firmin<sup>2,3</sup>, NTEP François<sup>2</sup>, BINELI Etienne<sup>3</sup>

## Résumé

Le bassin versant de l'Abiergué, situé à l'Ouest de la ville de Yaoundé présente une occupation anarchique de l'espace. Cette occupation de l'espace associée aux maraichages urbains a un impact sur la qualité de l'eau des aquifères exploitées dans ce bassin. Dans le but de protéger ces aquifères, une étude de la vulnérabilité intrinsèque a été effectuée à partir de trois méthodes que sont DRASTIC, GOD et SI. L'objectif visé par cette étude est de cartographier les zones susceptibles d'être plus à risque de contamination due à une activité provenant de la surface du sol. Quatre classes de degré de vulnérabilité à la pollution ont été mises en évidence par ces méthodes. La classe de degré de vulnérabilité faible est la plus dominante, couvrant les superficies respectivement de 83,57%, 89,57% et 50,21% pour ces méthodes. La forte vulnérabilité et très forte vulnérabilité sont localisées. Ces vulnérabilités forte et très forte coïncident suivant la méthode DRASTIC avec les faibles et très faibles pourcentages de surface à forte teneurs en nitrate et aussi suivant la méthode GOD, par la présence de forte teneur en nitrate dans la zone de vulnérabilité faible. Ainsi, il ressort que le bassin versant de l'Abiergué subit une tendance à la pollution diffuse due à l'activité humaine. De cette analyse, l'approche DRASTIC et GOD reflètent mieux la réalité au sol et pourraient être adéquate pour le traçage de la vulnérabilité dans le bassin versant de l'Abiergué.

**Mots clés :** Vulnérabilité intrinsèque, aquifères, Abiergué, SIG, Yaoundé.

## Abstract

*Contribution of parametric methods drastic, GOD and SI, for evaluation of the intrinsic vulnerability of the aquifers of the Abiergue watershed (Yaounde town)*

The Abiergué watershed, located at West of Yaoundé town presents an anarchistic occupation of space. This occupation of space associated by the urban maraichages has an impact of the quality of the water of the aquifers exploited in this watershed. With an aim of protecting these aquifers, a study of the intrinsic vulnerability was carried out starting from three methods DRASTIC, GOD and SI. The aim sighting by this study is cartography of zones likely to be more at the risk of contamination due to an activity coming from the surface of ground. Four classes of degree of vulnerability to pollution were put to obvious by these methods. The class of degree of vulnerability weak is dominant, covering the surfaces respectively of 83.57%, 89.57% and 50.21% for these methods. The strong vulnerability and very strong vulnerability is confined. These vulnerabilities strong and very strong coincide for method DRASTIC by weak and very weak percentages of surface of strong concentration in nitrate and also for method GOD, by the presence of strong concentration in nitrate in the zone of weak vulnerability. Thus, it results that the Abiergué watershed undergoes a tendency to diffuse pollution due to the human activity. Of this analysis, approach DRASTIC and GOD reflect reality on the ground and could be appropriate for the tracing of the vulnerability in the Abiergué Watershed.

**Keys words:** Intrinsic vulnerability, aquifers, Abiergué, GIS, Yaoundé

<sup>1</sup>Département d'Hydraulique et Maîtrise des Eaux, Institut Supérieur du Sahel, Université de Maroua. B.P. 46 Maroua

<sup>2</sup>Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie, Département de Sciences de la Terre et de l'univers, faculté des sciences, Université de Yaoundé

I. B.P. 812 Yaoundé <sup>3</sup>Département de Climatologie, Hydrologie et Pédologie, Institut Supérieur du Sahel, Université de Maroua. B.P. 46 Maroua

\*Auteur correspondant, E-mail : guillaume\_ewodo@yahoo.fr Tel : (237) 74 18 33 71

## INTRODUCTION

La préservation de la qualité des eaux issues des aquifères est d'autant plus importante du fait que cette ressource, une fois contaminée, devient inappropriée pour la consommation (Jourda *et al.*, 2006). Le processus de contamination est lent, mais ses effets sont très redoutables de la zone non saturée (ZNS) à la zone saturée (ZS) (Baghvand *et al.*, 2010). Une des approches d'aide à la protection et à la prévention des eaux souterraines contre la pollution est la cartographie des zones vulnérables à la pollution (Champagne et Chapuis, 1993). Plusieurs techniques ont été développées pour analyser cette vulnérabilité. Des modèles existent sous forme de superposition des couches par index, des processus basés sur la simulation et des approches statistiques. La littérature montre que ces méthodes ont chacune leur limite (Zhang *et al.*, 1996 ; Tesoriero *et al.*, 1998 ; Foster, 2002 ; Almasri, 2008 ; Hanza *et al.*, 2008 ; Aké *et al.*, 2009 ; Kaur et Rosi, 2011). Néanmoins, les modèles paramétriques sont celle utilisée par

un grand nombre d'auteurs pour définir cette vulnérabilité intrinsèque. Ces modèles sont un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement permettant aux acteurs de l'eau de tenir compte des risques encourus par les eaux souterraines grâce aux informations qu'ils fournissent. La validité de ces modèles paramétriques nécessite une comparaison des résultats issus des différentes méthodes (Gogu, 2000 ; Aké *et al.*, 2009). Le présent travail vise essentiellement à cartographier la vulnérabilité intrinsèque à la pollution aux nitrates des aquifères du bassin versant de l'Abiergué (BVA). Les méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI qui tiennent compte des caractéristiques intrinsèques de l'aquifère ont été utilisées.

## PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

### 1- Site d'étude

Le BVA situé à l'Ouest de la ville de Yaoundé à 3°51'36" - 3°53'40" de latitude Nord et à 11°26'00" - 11°30'00"



### - Profondeur de l'aquifère

La profondeur de l'aquifère est un facteur important dans l'étude de la vulnérabilité, car toute atténuation du polluant s'opère en relation avec la profondeur. La profondeur de l'aquifère dans le BVA a été déduite en fonction de la différence entre le potentiel d'élévation de la surface de la terre (Z) et le potentiel d'élévation de la surface piézométrique (h) (Sanz *et al.*, 2010). La profondeur de la surface des eaux souterraines a été calculée en utilisant le calculateur de raster par soustraction du potentiel d'élévation de la surface du piézométrique (h) converti en format de grille de 10 m x 10 m avec le MNA de la zone d'étude.

Les résultats des profondeurs obtenues varient entre moins de 1 m à plus de 200 m. Pour les méthodes DRASTIC et SI, un recodage et une reclassification ont donné les valeurs allant de 0 à 100 m de profondeur (Tab.1 et 3). La classification de la profondeur suivant la méthode GOD (Foster, 1987) est consignée dans le tableau 5.

### - Recharge de l'aquifère

Le transport des polluants de la ZNS jusqu'à l'aquifère est produit par la dissolution pendant la recharge en eau. La quantité d'eau qui arrive au niveau de l'aquifère constitue la recharge net, facteur important de la vulnérabilité. Pour l'étude, le facteur recharge est représenté par l'indice de développement et de persistance du réseau (IDPR). Cet IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface (Bézèlques et Des Garets, 2002); Mardhel *et al.*, 2005). Très variable, ce paramètre dépend essentiellement de la lithologie de la formation considérée (Delcaillau, 1997). L'IDPR présente une métrologie de l'écart constaté entre deux réseaux : le réseau théorique des écoulements et le réseau hydrographique naturel effectivement développé. Le réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs. Il s'établit à partir de l'analyse du modèle numérique de terrain (MNT).

En un point donné du secteur d'étude, l'IDPR est calculé par une relation de proportionnalité avec le rapport de la distance de ce point au réseau théorique à la distance de ce point au réseau réel :

$$I = 1000 \frac{D_{\text{réseau\_théorique}}}{D_{\text{réseau\_réel}}} \quad (1)$$

L'IDPR a été calculé à partir du logiciel Grass GIS après un prétraitement de MNT de la zone d'étude qui a permis de traiter les dépressions et les zones planes. Le résultat obtenu a été recodé entre 0 et 100 mm et les différentes zones reclassées (Tab.1).

### - Type d'aquifère

Le facteur milieu aquifère (A) met en relation la capacité des matériaux aquifères à stocker et à transporter les polluants dans les eaux souterraines pendant l'infiltration dans les

couches. Il est basé pour l'étude, sur la superposition de la carte structurale et de la carte des différentes zones aquifères. La carte structurale gouverne l'écoulement d'eau souterraine dont le transfert de polluants. La carte de réseau de fissuration et de fracturation du BVA extraite des travaux de Mvondo *et al.* (2007) a servi pour cette étude. Les différentes zones aquifères ont été déterminées en fonction de la différence entre l'interpolation du potentiel d'élévation de surface piézométrique (h) et celle de profondeur ZNS-niveau d'eau pour le mois d'avril 2006, après avoir converti en format de grille de 10 m x 10 m. Un buffer de 3 m a été affecté aux zones de fracture et la valeur 3 leur a été assigné. Une distinction des surfaces aquifères a été faite. Pour les méthodes DRASTIC et SI, les surfaces correspondant à l'aquifère libre ont été affectées de la valeur de cote 25, celles de l'aquifère semi-libre ont été affectées de la valeur 7, celles de l'aquifère de subsurface et semi captive ont été attribuées les cotes 5 et 3 respectivement (Tab.1 et 3). Pour la méthode GOD, les zones correspondant à l'aquifère libre ont été affectées de la valeur de cote 1. Celles correspondant à l'aquifère semi libre et de subsurface, ont été affectée respectivement des cotes 0,5 et 0,3. L'aquifère semi captive a été affecté de la valeur de cote 0,2 (Tab.4).

### - Sol et occupation de l'espace

Le sol est une propriété hydraulique qui contrôle la recharge lors du processus d'infiltration des eaux. Les travaux d'Ewodo Mboudou, (2012) ont permis de réaliser la cartographie de sol du BVA à partir des résultats de l'analyse granulométrique des différents profils de sondages de sol. La carte des différents affleurements des roches, obtenue à partir de l'image Google Earth de février 2015 par la vectorisation des différentes entités rochers, a été combinée avec la carte de sol à une carte raster.

Pour la méthode DRASTIC, la valeur de cote 9 a été attribuée aux sables argileux avec un peu de gravier et la valeur 7 aux argiles sableuses avec peu de gravier ou un peu de limon. Les zones d'affleurement de roches gneissiques altérées (ou fissurées) ont été attribuées la valeur de cote 4 et celles de roche intact la valeur 3 (Tab.1).

Pour la méthode GOD, les argiles sableuses avec peu de gravier ou un peu de limon ont été affectées de la valeur de cote 0,6 et les sables argileux avec un peu de gravier ont été affectés de la valeur de cote 0,7. Aux formations gneissiques altérées (ou fissurées), la valeur de cote 0,7 leur ont été attribuées et celles de gneiss non altérées (ou non fissurées), la valeur de cote 0,8 (Tab.5).

Pour la méthode SI, l'occupation de l'espace qui est la couverture biophysique de la surface des terres émergées, s'est basée sur la vectorisation des différentes entités (roche, sol nu, habitation et zone humide). Cette vectorisation s'est faite à partir de l'image Google Earth de février 2015. L'ensemble des entités a été combiné à une seule carte raster après avoir indexé chaque entité rasterisée à la grille 10 m x 10 m. Aux zones d'habitation ont été attribuées la valeur de

cote 10. Les valeurs de cote 7 et 6 ont été attribuées aux zones de sol peu épais et épais respectivement. Pour les zones de sol peu hydromorphe et hydromorphe, les valeurs de cote 3 et 2 leur ont été assignées. Les zones de roche affleurant ont été attribuées la valeur de cote 4 (Tab.3).

### - Topographique

La topographie influence le développement du sol qui a un effet sur l'atténuation des contaminants. La topographie de la zone d'étude résulte de la digitalisation de la pente issue de DEM «Digital Elevation Model» de l'image ASTER à résolution 30 m et de coordonnées ASTGTM2\_N03E011. Le résultat de la topographie obtenu a été appliqué pour les méthodes DRASTIC et SI. Le résultat obtenu a été reclassé en concordance avec la recommandation d'Aller et *al.*, (1987) (Tab.1 et 3).

### - Impact de la zone d'infiltrations préférentielles

Les zones d'infiltrations préférentielles représentent le facteur impact. Ces zones jouent un rôle significatif dans le contrôle du transport et d'atténuation des polluants. Elles sont situées au-dessus de surface libre de la nappe. Dans cette zone, la biodégradation, la neutralisation, la filtration mécanique, la dispersion et la volatilisation sont les processus observés. Pour l'étude, les puits d'eau sont les points présentant les zones d'infiltration préférentielle de polluant dans l'aquifère.

Un buffer de 30 m a été affecté à chaque puits recensé (Ewodo Mboudou, 2012) et une valeur de cote 30 leur a été attribuée. La zone n'ayant pas de puits s'est vue attribuée la valeur 1 (Tab.1).

### - Conductivité hydraulique

Le transport et le destin des polluants dans le système des eaux souterraines dépendent des possibilités du système de transfert de masses. La distribution spatiale de conductivité hydraulique est un paramètre clé de l'estimation du temps de transport du polluant. La conductivité hydraulique (K) est directement en relation avec la transmissivité (T) à travers les couches aquifères (b). La valeur moyenne de la transmissivité (T) a été déduite pour BVA (Ewodo Mboudou *et al.*, 2012). L'épaisseur de l'aquifère a été déterminée en fonction de la différence entre l'interpolation du potentiel d'élévation de surface piézométrique (h) et celle de profondeur ZNS-niveau d'eau pour le mois d'avril 2006, après avoir converti en format de grille de 10 m x 10 m. La carte de la conductivité hydraulique est déduite du rapport (T/b) des cartes de transmissivité et de l'épaisseur de l'aquifère. La carte obtenue a été recodée puis reclassée suivant trois classes de perméabilité (Tab.1).

### 3- Évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère du BVA par la méthode DRASTIC (Depth to groundwater table (D), Recharge of the aquifer (R), Aquifer type (A), soil (S), topography (T), vadose zone (I) and hydraulic conductivity (C) of the aquifer)

Notation des critères utilisés pour la méthode DRASTIC		D		R		A		S		T		I		C	
Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation
0 - 2 (m)	10	Infiltration majoritaire	9	Aquifère libre	0-1	25	Argilo-sableuse avec un peu de graviers	7	0-2%	10	P o i n t d'infiltration (puits)	30	Faible	4	
3 - 9 (m)	7	Infiltration moyenne	8	Aquifère semi libre	2-6	7	Sablo argileux avec un peu de graviers	9	2-6%	9	S a b l e argileux avec peu de gravier	9	Moyenne	6	
10-19 (m)	5	Ruissellement égale à infiltration	6	Aquifère subsurface	7-14	5	Gneiss fissuré	4	6-12%	5	A r g i l e sableuse	3	Forte	8	
20-39 (m)	2	Ruissellements moyen	3	Aquifère semi captive	15-20	3	Gneiss intact	3	1 2 - 1 8 %	3					
> 40 (m)	1	Ruissellement majoritaire	1	-	-	-	-	-	>18%	1					
Poids	5		4		3		2		1		5		3		

Cat : catégorie, D : profondeur, R : recharge, A : aquifère, S : texture du sol, T : topographie et fracturation, I : point d'eau et nature de la zone non saturée C : perméabilité

La méthode DRASTIC est un modèle qui repose sur une analyse spatiale classique. Chacun des sept paramètres de l'acronyme DRASTIC a été subdivisé en classe, indexé des cotes variant de 1 à 10 et attribué un

pois numérique comprise entre 1 et 5 en fonction de son degré d'influence (Tab.1). Les valeurs des poids utilisées sont celles de la version standard de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987) qui correspondent à un degré de vulnérabilité (Tab.1). L'indice de vulnérabilité (Iv) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$I_v = D_p \times D_C + R_p \times R_C + A_p \times A_C + S_p \times S_C + T_p \times T_C + I_p \times I_C + C_p \times C_C \quad (2)$$

Avec D, R, A, S, T, I, et C les sept paramètres de la méthode DRASTIC, p le poids du paramètre et c la cote associée.

Cette indice de vulnérabilité mesurée en classe de degré de vulnérabilité représente la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère du BVA (Tab.2 et Fig 2).

**Tableau 2:** Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987)

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
< 80	Très faible
80-160	Faible
161-240	Moyenne
241-320	Forte
321-400	Très forte

**4- Évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère du BVA par la méthode SI (Susceptibility (S) Index (I))**

La méthode SI prend en considération cinq paramètres. Les cotes correspondantes aux différentes classes des paramètres dans la méthode DRASTIC ont été également conservées pour les paramètres similaires (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la topographie). Le cinquième paramètre est l'occupation des sols (OS). Les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres varient de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Quant aux poids attribués aux paramètres SI, ils varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tab.3). L'indice de vulnérabilité (I<sub>SI</sub>) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$I_{SI} = D_p \times D_C + R_p \times R_C + A_p \times A_C + S_p \times S_C + T_p \times T_C + OS_p \times OS_C \quad (4)$$

Avec D, R, A, S, T, et OS les cinq paramètres de la méthode SI, p le poids du paramètre et c la cote associée.

La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (Tab. 4).

**5- Évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère du BVA par la méthode GOD (Groundwater occurrence, Overallithology of aquifer or aquitard (O) and Depth to groundwater table (D))**

La méthode GOD a été développée par Foster (1987). Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la ZNS et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la ZS.

**Tableau 3:** Notation des critères utilisés pour la méthode SI

Poids	D		R		A		T		OS			
	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation		
0,186	0-2 (m)	10	Ruissellement majoritaire	0 - 2 0 (m m)	9	Aquifère libre	0-1(m)	25	0-2 %	10	habitation	70
	3-9 (m)	7	Ruissellements moyen	21-40 (m m)	8	Aquifère semi libre	2 - 6 ( m )	7	2-6%	9	Sol nu et cultivé	7
	10-19 (m)	5	Ruissellement égale à infiltration	41-60 (m m)	6	Aquifère subsurface	7-14 ( m )	5	6-12%	5	Route principale	2
	20-39 (m)	2	Infiltration moyenne	61-80 (m m)	3	Aquifère semi captive	15-20 (m)	3	12 - 18 %	3	Route secondaire	3
	>40 (m)	1	Infiltration majoritaire	81-100 (mm)	1	-	-	-	>18%	1	-	-
0,259	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,121	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cat : catégorie, D : profondeur, R : recharge, A : aquifère, T : topographie et fracturation, OS : occupation du sol

**Tableau 4 :** Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45-64
Elevé	65-84
Très élevé	85-100

Elle utilise une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la ZS, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation des couches sus-jacentes à la ZS. L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres. Le premier réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement ( $C_A$ ). Le deuxième correspond à la lithologie de l'aquifère ( $C_L$ ) et le troisième est défini par la profondeur de la nappe ( $C_D$ ) (Murat et al., 2003). Les cotes attribuées aux classes des différents paramètres (Tab.5) sont inférieures ou égales à "1". L'Indice GOD (IG) qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution est obtenu par la multiplication de ces trois paramètres. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par la méthode GOD a été faite par le calcul de l'Indice GOD (IG) selon l'équation (Murat et al., 2003).

$$I_G = C_A \times C_L \times C_D \quad (3)$$

Avec  $C_A$  : Type d'aquifère ;  $C_L$  : Lithologie de l'aquifère ;  $C_D$  : Profondeur de la nappe.

Les différentes plages d'IG obtenues ont été mises en parallèle avec les classes de vulnérabilité. D'une manière générale, les indices GOD obtenus sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême vulnérabilité" (Tab.6).

## 6- Validation des cartes de vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité doit répondre à deux questions essentielles : la vulnérabilité donne-t-elle des surfaces considérées valide ou non ? Les valeurs obtenues de surface voisine sont-elles différentes significativement ?

**Tableau 5** : Classification de la vulnérabilité de la méthode GOD selon (Foster, 1987)

Type d'aquifère

Aquitard	Captive	Semi captive	Sub-surface	Semi libre	libre
0	0,1	0,2	0,3	0,5	1

Type de lithologie

Sol résiduel	Silt et limon	Sable éolien	Sable alluvionnaire	Colluvion et graveleux	Sédiment non consolidé
0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Sol Meuble		sable	Craie		
argile	Silts volcanique	tuff			Roches poreuses consolidées
0,6	0,7		0,9		
Formation ignées et métamorphique et ancien volcanique		Récents niveaux volcaniques		Calcaire et autre roches	Roches denses consolidées
0,5 à 0,8		0,8 à 0,9	0,9 à 1		

Profondeur de l'eau en (zone captive et libre)

>100 m	50-100 m	20-50 m	10-20 m	5-10 m	2-5 m	<2 m
0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

**Tableau 6** : Critère d'évaluation de la vulnérabilité Indice de vulnérabilité final de la méthode GOD

0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Négligeable	Faible		Modéré		forte			Très forte (extrême)		

consisté à la comparaison des cartes de vulnérabilité réalisées par les trois méthodes dans la même surface (Gogu, 2000).

La validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution a été testée par les données de concentration aux nitrates dans les eaux souterraines du BVA. En effet, plusieurs auteurs (Isabel et al., 1990; Champagne et Chapuis, 1993; Mohamed, 2001; Jourda et al., 2006; Hamza et al., 2007 et Kouamé, 2007); ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines. Cette activité a été réalisée en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de l'aquifère du BVA et la distribution des classes de vulnérabilité. Elle a porté sur l'analyse de la concentration des nitrates des eaux souterraines du BVA réalisée sur 62 points d'eau.

## RÉSULTATS

### Niveau de vulnérabilité des aquifères du BVA suivant la méthode DRASTIC

Les valeurs d'indice de vulnérabilité sont respectivement comprises entre 64 et 368. Cinq plages d'indice de vulnérabilité ont été mises en évidence par la méthode DRASTIC (Tab.7). L'analyse de ces plages a révélé cinq classes de degrés de vulnérabilité à la pollution (Fig.2):

- la classe de vulnérabilité très faible localisée au Sud Sud-Ouest suivant une bande et au Nord-Ouest en îlot dans le bassin d'étude. Elle représente 4,42% de la superficie du bassin. Cette classe illustre les zones de couches non saturées constituées d'argile sableuse, d'épaisseur comprise entre 10 et 14 m, et combiné à une perméabilité moyenne comprise entre  $5,10^{-6}$  et  $5,10^{-5}$  m/s ;
- la classe de vulnérabilité faible, elle est majoritaire et

La validation des cartes de vulnérabilité peut se faire seulement après analyse des incertitudes. Pour l'étude, ces incertitudes ont

représente 83,57% de la superficie du bassin. Dans cette zone, le sol est argile sableuse, associé à une perméabilité moyenne

de  $5,10^{-6}$  et  $5,10^{-5}$  m/s. Les niveaux statiques dans cette zone sont généralement compris entre 5 et 10 m ;

- la classe de vulnérabilité moyenne se présente sous forme d'îlots au Nord, au Centre et au Sud-Ouest. Elle représente 11,98% de la superficie du bassin. Dans cette zone, la couche non saturée est constituée de sable argileux combinée à une perméabilité comprise entre  $5,10^{-5}$  et  $5,10^{-4}$  m/s. Cette zone a un niveau statique compris entre 2 et 5 m ;

- la classe de forte vulnérabilité se présente en points dans le bassin et représente 0,02%. Elle représente en générale les ouvrages de captage d'eau souterraine. Dans cette zone, la couche non saturée est constituée de sable argileux. Leur perméabilité est forte avec des valeurs de  $5,10^{-5}$  et  $5,10^{-4}$  m/s. Cette zone a un niveau statique compris entre 1 et 2 m. Cet indice de forte vulnérabilité peut être dû aux puits forcés jusqu'à la nappe d'eau souterraine créant ainsi les zones à forte potentielle de pollution;

- la classe de vulnérabilité très forte est insignifiante avec un pourcentage presque nul.

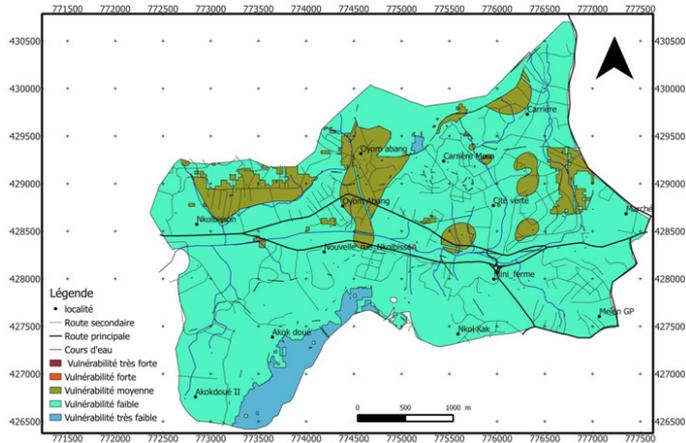


Figure 2 : Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC

**Niveau de vulnérabilité des aquifères du BVA suivant la méthode GOD**

L'indice de vulnérabilité (IG) obtenu varie entre 0,048 et 0,49. Les plages élaborées à partir de l'indice (IG) ont mis en évidence quatre plages de vulnérabilité (Fig.3 et Tab.7) :

- $IG < 0,1$  (vulnérabilité négligeable) ;
  - $0,1 < IG < 0,2$  (vulnérabilité faible) ;
  - $0,3 < IG < 0,4$  (vulnérabilité modérée) ;
  - $0,4 < IG < 0,6$  (vulnérabilité forte).
- la classe de vulnérabilité négligeable se rencontre en îlots au Centre et au Nord. Elle représente 6,73% de la superficie du bassin versant. Cette classe serait due à la grande profondeur de la nappe dans ces zones (10 m à 14 m), à la texture argilo-sableuse et à une perméabilité moyenne comprise entre  $5,10^{-6}$  et  $5,10^{-5}$  m/s ;
  - la classe de vulnérabilité faible est la plus importante et occupe 89,57% de la superficie du bassin. Les niveaux piézométriques dans cette zone sont généralement compris entre 5 m et 10 m. La nature du sol de la ZNS de cette partie

est constituée d'argile limoneuse sableuse, associée à une perméabilité moyenne de  $5,10^{-6}$  et  $5,10^{-5}$  m/s ;

- la classe de vulnérabilité modérée se rencontre en petit îlots au Centre et au Nord-Est du bassin versant. Elle représente 3,04% de la superficie du bassin. Elle serait due à des niveaux piézométriques compris entre 2 m et 5 m, à des ZNS constituées de sable argileux combinés à des perméabilités variant entre  $5,10^{-5}$  et  $5,10^{-4}$  m/s ;

- la classe de vulnérabilité forte se rencontre en îlot au Centre du bassin versant et représente une superficie de 0,66%. Cette vulnérabilité forte serait due aux faibles profondeurs de la nappe oscillant entre 0 et 2 m et à la nature du sol de la ZNS constituée de sable argileux recouvrant un socle gneissique fracturé et altéré dans ce secteur.

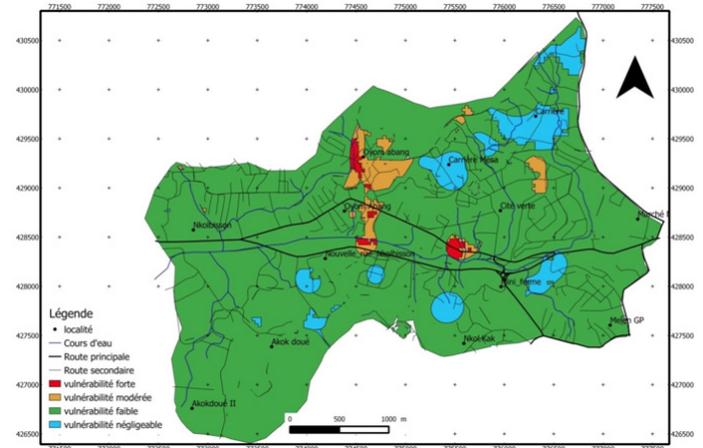


Figure 3 : Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD

**Niveau de vulnérabilité des aquifères du BVA suivant la méthode SI**

Les résultats révèlent que l'indice de valeur de vulnérabilité varie entre 35 et 265. Quatre plages d'indice de vulnérabilité ont été mises en évidence (tableau 7). L'analyse des plages d'indice de vulnérabilité fait ressortir quatre classes de surface de vulnérabilité (Fig. 4):

- la classe de vulnérabilité faible est plus représentée au Sud-Ouest et au Nord-Ouest du bassin. Elle se trouve aussi au Centre du bassin. Cette classe de vulnérabilité représente 50,21% de la superficie soit la moitié du bassin d'étude. Elle serait due aux zones de sol couvert de végétation ou de culture à ruissellement égal à l'infiltration. Cette classe de vulnérabilité faible a des profondeurs de nappe d'eau oscillant entre 10 et 14 m et avec des pentes comprise entre 6 et 12% ;
- la classe de vulnérabilité moyenne est presque nulle dans ce bassin versant.
- la classe de vulnérabilité élevée se présente au Nord, au Sud-est et au Sud. Elle est disséminée au Centre, au Nord-Ouest et au Sud-Ouest. Elle représente 43,99 % de la superficie du bassin d'étude. Cette vulnérabilité élevée serait due à l'occupation du sol par l'habitat combiné à la faible couverture végétale, à des profondeurs de la nappe oscillant entre 2 m et 5 m, à des pentes comprises entre 2 et 6% et au

ruissellement moyen;

- la vulnérabilité très forte se présente sous forme d'îlot au Nord-Ouest et au Centre du bassin. Elle représente 5,8 % de la superficie.

Elle serait due à de faible profondeur d'aquifère (0 à 2 m), associée à des infiltrations moyennes, aux sols peu épais à texture sablo-argileuse, et aux zones de très faible pente (0 à 2%).

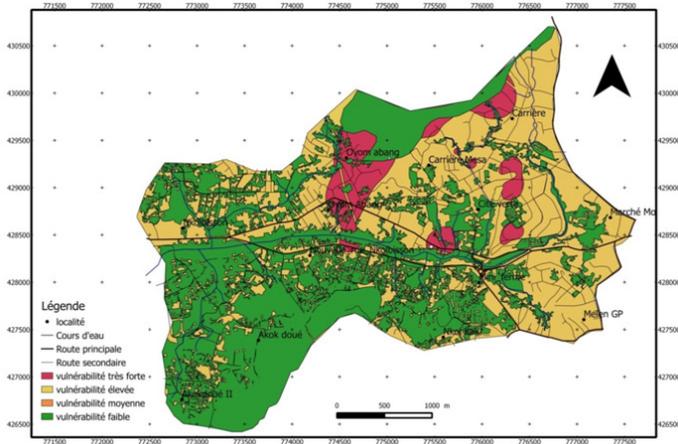


Figure 4 : Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI

**Validation de la carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates de l'aquifère du BVA**

Les concentrations en nitrate contenues dans les eaux souterraines du BVA pour la période d'Avril 2006 sont comprises entre 5,6 et 114,74 mg/l. Quatre plages de concentration de nitrate sont observables (Fig.5) : la plage de concentration de nitrate faible (5-15 mg/l), moyenne (15-30 mg/l), forte (30-49 mg/l) et très forte ( $\geq 50$  mg/l). Les zones de concentration faible en nitrate couvrent 9,79% de la superficie totale du BVA (Tab.8). Ces zones sont percevables de la carrière de Mesa jusqu'à Oyom Abang et Etetak, ainsi qu'à quelques zones de Melen et Akokdoué II. La zone de concentration moyenne en nitrate représente 67,48% de superficie et couvre la majorité de ce BVA (Tab.8). Les zones de concentration forte et très forte en nitrate représentent 22,24% et 0,49% respectivement de la superficie de ce BVA.

Elles s'illustrent par des zones éparées observables à Melen, Mini ferme, Cite verte, Nkolkek, zone nouvelle rue Nkolbisson, Nkolbisson et Akokdoué II.

**Niveau de validité des cartes de vulnérabilité à la pollution POUR LA CARTE DRASTIC**

La carte de validité de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC (Fig. 6 et Tab.9) présente vingt et un (21) valeurs comprises entre 5 et 15 mg/l de nitrate dont seize (16) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité forte. Cinq (05) de ces valeurs correspondent à la zone de vulnérabilité très forte. vingt et six valeurs (26) sont comprises entre 15 et 30 mg/l de nitrate, avec quatre (04) de ces valeurs dans la zone de vulnérabilité moyenne et très forte respectivement et dix-huit dans la zone de vulnérabilité forte. Onze (11) valeurs

sont comprises entre 30 et 49 mg/l de nitrate, soit huit (08) de ces valeurs se situent dans la zone de vulnérabilité forte, trois (03) se situent dans la zone de vulnérabilité très forte. Quatre (04) valeurs supérieures ou égales à 50 mg/l de nitrate se situent dans la zone de vulnérabilité forte.

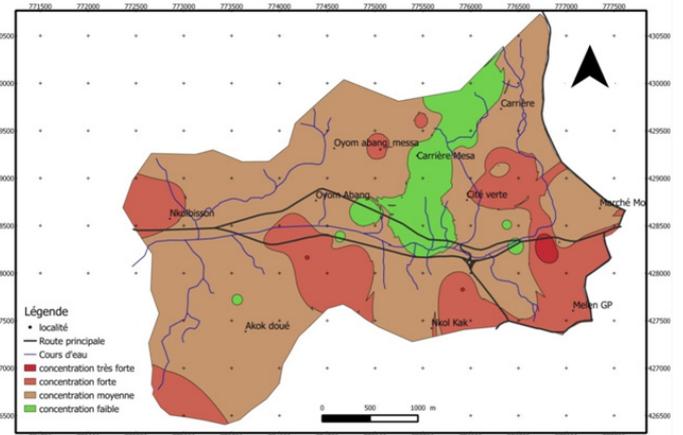


Figure 5 : Validation de la carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates de l'aquifère du BVA

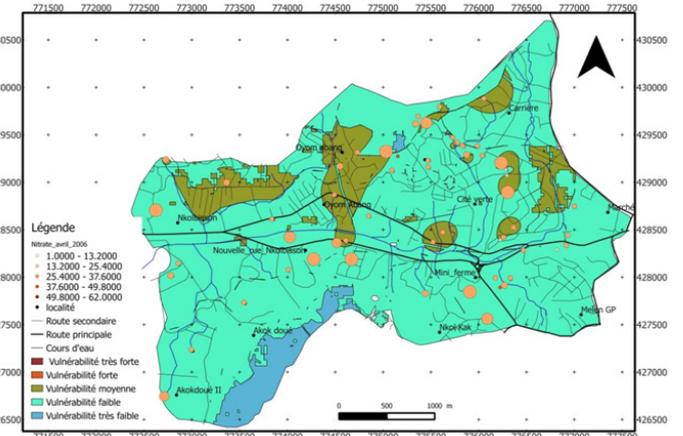


Figure 6 : Niveau de validité de la carte de vulnérabilité aux nitrates, méthode DRASTIC

En fonction de classe de concentration en nitrate des eaux et des zones de vulnérabilité définies pour une classe, il ressort que, sur soixante et deux (62) points de valeurs de concentration en nitrate, douze (12) valeurs coïncident avec les zones définies par la concentration en nitrate (Tab.9). Dont, quatre (04) points de concentration moyenne en nitrate coïncident avec la classe de vulnérabilité moyenne, huit (08) points de concentration forte en nitrate coïncident avec celle de vulnérabilité forte (Tab.9). La zone de vulnérabilité forte présente quarante et huit (48) soit 74,19% points, dont 16 points ayant les valeurs comprises entre 5 et 15 mg/l. Dix-huit (18) de ces points renferment les valeurs comprises entre 15 et 30 mg/l. Huits (08) de ces points disposent les valeurs comprises entre 30 et 49 mg/l et quatre (04) possèdent les valeurs supérieures ou égales à 50 mg/l.

**POUR LA CARTE GOD**

Sur la carte de validité de la vulnérabilité à la pollution (Fig. 6 et Tab.9), vingt et un (21) valeurs sont comprises entre 5-15 mg/l de nitrate, dont trois (03) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité négligeable (ou très faible). Quinze

(15) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité faible. Deux (02) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité moyenne et une (01) de ces valeurs coïncide avec la zone de vulnérabilité forte. Vingt et six (26) valeurs sont comprises entre 15-30 mg/l de nitrate, dont quatre (04) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité négligeable (ou très faible). Dix-huit (18) de ces valeurs correspondent avec la zone de vulnérabilité faible. Trois (03) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité moyenne et une (01) valeur correspond à la zone de vulnérabilité forte. Onze (11) valeurs sont comprises entre 30 et 49 mg/l, avec une (01) de ces valeurs qui coïncide avec la zone de vulnérabilité négligeable (ou très faible) et moyenne respectivement. Neuf (09) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité faible. Quatre (04) valeurs sont comprises dans la zone des concentrations en nitrate supérieur ou égale à 50 mg/l se trouvent dans la classe de vulnérabilité faible. En fonction de degré de concentration en nitrate des eaux et les classes de vulnérabilité définies, il ressort que quarante et six (46) valeurs sur soixante et deux (62) soit 74,19% de ces valeurs de concentration en nitrate des eaux mesurées coïncident avec la zone vulnérabilité faible (Tab.9). Les teneurs en nitrate supérieures à 50 mg/l (norme de qualité de l'eau de boisson de l'OMS) sont presque toutes regroupées dans les zones de vulnérabilité faible.

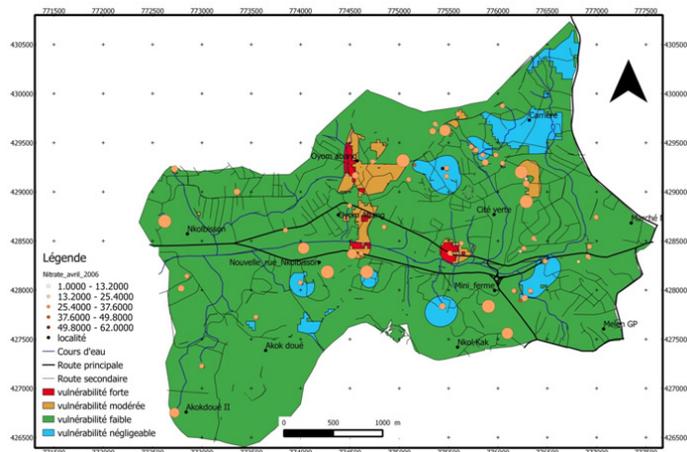


Figure 7 : Niveau de validité de la carte de vulnérabilité aux nitrates, méthode GOD

### POUR LA CARTE SI

S'agissant de la carte de validité de la vulnérabilité par la méthode SI, (Fig. 7 et Tab.9), vingt et un (21) valeurs sont comprises entre 5-15 mg/l de nitrate, dont quatre (04) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité faible. Douze (12) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité forte et cinq (05) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité très forte. Vingt et six (26) valeurs sont comprises entre 15-30 mg/l de nitrate, dont onze (11) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité faible. neuf (09) de ces valeurs correspondent avec la zone de vulnérabilité forte (ou élevée) et six (06) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité très forte. Onze (11) valeurs sont comprises entre 30 et 49 mg/l dont cinq (05) de ces valeurs concordent avec la zone de vulnérabilité faible. Trois (03) de ces valeurs

correspondent aux zones de vulnérabilité moyenne (ou modérée) et forte (ou élevée) respectivement.

Quatre (04) valeurs sont comprises dans la zone des concentrations en nitrate supérieur ou égale à 50 mg/l, dont trois (03) de ces valeurs se trouvent dans la zone de vulnérabilité faible et une (01) de ces valeurs coïncide avec la zone de vulnérabilité forte. Il ressort de l'analyse des différentes valeurs et de leurs positions sur la carte de vulnérabilité, que les teneurs en nitrate supérieures à 50 mg/l (norme de qualité de l'eau de boisson de l'OMS) sont presque toutes regroupées dans les zones de vulnérabilité faible et forte. La majorité de valeurs de concentration en nitrate se regroupe dans les zones de vulnérabilité faible (37,10%) soit vingt et trois (23) valeurs sur soixante et deux (62) et forte (40,32%) soit vingt et cinq (25) valeurs sur soixante et deux (62).

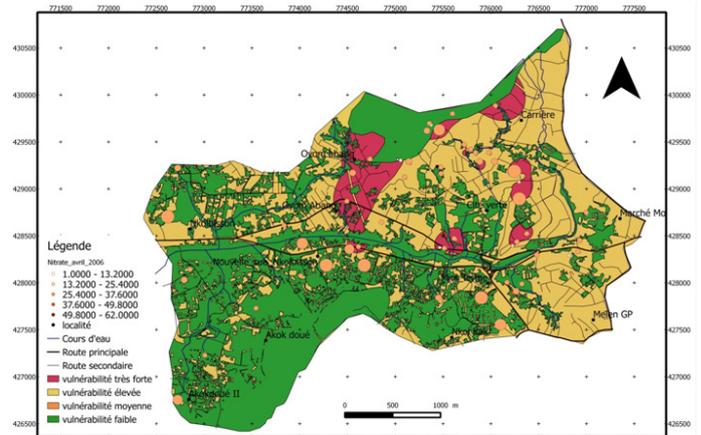


Figure 8 : Niveau de validité de la carte de vulnérabilité aux nitrates, méthode SI

### DISCUSSION

Les trois méthodes d'approche utilisées pour comprendre le mécanisme et la représentativité de la vulnérabilité à la pollution aux nitrates dans le BVA permettent de distinguer quatre classes de degré de vulnérabilité significative (Tab. 7).

La différence entre les classes suivant les méthodes se situe à l'absence de la classe de degré de vulnérabilité très faible dans le cas de la méthode SI et l'absence de la classe de vulnérabilité très élevée (ou très forte) dans le cas des méthodes DRASTIC et GOD. Le degré de vulnérabilité faible a la plus grande superficie pour ces trois méthodes, soit 83,57% pour la méthode DRASTIC, 89,57% pour la méthode GOD et 50,21% pour la méthode SI, illustrant que le BVA est dominé par une vulnérabilité intrinsèque faible.

Ce résultat a été aussi relevé par Ewodo Mboudou *et al.* (2015) dans le bassin versant de la Mingsosso, par Aké *et al.* (2009) dans la région de Bonoua en Côte d'Ivoire et par Boufékane et Saighi (2013) dans la région de Jijel, au Nord Est de l'Algérie. La forte vulnérabilité et la très forte vulnérabilité sont ponctuelles. Celles-ci sont justifiées pour la méthode DRASTIC par les faibles et très faibles pourcentages de surface à forte teneurs en nitrate et aussi pour la méthode GOD, par la présence de forte teneur en nitrate dans la zone

Tableau 7 : Pourcentage de surface de degré de vulnérabilité

	<b>DRASTIC</b>	<b>GOD</b>	<b>SI</b>
<b>Classe de degré de vulnérabilité</b>	<b>superficie (%)</b>	<b>superficie (%)</b>	<b>superficie (%)</b>
Vulnérabilité très faible (ou négligeable)	4,42	6,73	
Vulnérabilité faible	83,57	89,57	50,21
Vulnérabilité moyenne (ou modérée)	11,98	3,04	0
Vulnérabilité forte (ou élevée)	0,02	0,66	43,99
Vulnérabilité très forte	0		5,8

Tableau 8: Pourcentage de surface de concentration en nitrate en fonction de classe

Concentration en nitrate	Superficie en %
faible	9,79%
moyenne	67,48%
forte	22,24%
très forte	0,49%

	<b>vulnérabilité aux nitrates</b>																	
	<b>DRASTIC</b>						<b>GOD</b>						<b>SI</b>					
	[5-15]	[15-30]	[30-49]	[50>	Np	(%)Np	[5-15]	[15-30]	[30-49]	[50>	Np	(%)Np	[5-15]	[15-30]	[30-49]	[50>	Np	(%)Np
Vulnérabilité très faible (ou négligeable)	0	0	0	0	0	0	3	4	1	0	8	12,9						
Vulnérabilité faible	0	0	0	0	0	0	15	18	9	4	46	74,19	4	11	5	3	23	37,1
Vulnérabilité moyenne (ou modérée)	0	4	0	0	4	6,45	2	3	1	0	6	9,68	0	0	3	0	3	4,84
Vulnérabilité forte (ou élevée)	16	18	8	4	46	74,19	1	1	0	0	2	3,23	12	9	3	1	25	40,32
Vulnérabilité très forte	5	4	3	0	12	19,35					0	0	5	6	0	0	11	17,74
total	21	26	11	4			21	26	11	4			21	26	11	4		
(%)	33,87	41,94	17,74	6,45			33,87	41,94	17,74	6,45			33,87	41,94	17,74	6,45		

de vulnérabilité faible. Ainsi, il ressort que le BVA subit une tendance à la pollution diffuse due à l'activité humaine telle que les habitations associées aux latrines à fonds perdues, à canon et des WC avec fosses septiques qui sont des sources potentielles de pollution diffuse de nitrates vers les aquifères (Kouam Kemogne, 2012). La différence dans le nombre de valeurs coïncidant avec la classe de degré de vulnérabilité est liée au fait que les frontières et les dimensions de classe qui sont assignées à différents paramètres ne sont pas absolues (Akéet *al.*, 2009). Ceci implique que les limites de classe standard peuvent ne pas refléter la réalité au sol où une classe peut entourer les unités hydrogéologiques différentes. Un bon nombre des paramètres utilisés comme la recharge, la zone d'impact ou l'occupation de sol et la topographie sont approximatives ou produit par extrapolation en graduation différente. Ces derniers peuvent expliquer des erreurs pendant le processus d'évaluation lors de la validation utilisant les valeurs de concentration en nitrate observées des eaux souterraines. Car ces valeurs ne seront que fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimitées par les données

ponctuelles (Jourda *et al.*, 2006). La validation de la carte de vulnérabilité aurait été plus représentative, si les mesures de concentration en nitrate en grand nombre et répartie dans tout le BVA avaient été effectuées. Avec un taux de degré de vulnérabilité faible de 83,57% pour la méthode DRASTIC et de 89,57% pour la méthode GOD. Ces méthodes reflètent mieux la réalité au sol et pourrait être adéquate pour le traçage de la vulnérabilité dans le BVA.

### Conclusion

La vulnérabilité intrinsèque des aquifères du BVA, déterminée par les méthodes DRASTIC, GOD et SI, révèle une tendance à la vulnérabilité faible. La présence des valeurs de forte teneur en nitrate dans les classes de vulnérabilité très faible, faible et moyenne prouve que les aquifères du BVA sont susceptibles d'être menacés localement par l'infiltration des polluants. D'une manière générale, cette tendance à la vulnérabilité faible est suivie par celle de vulnérabilité forte. Il est donc souhaitable de contrôler les zones et les

sources de pollution et de faire le suivi des paramètres de pollution, afin de caractériser la sensibilité de l'aquifère car cette vulnérabilité peut évoluer par les effets conjugués de l'homme et des années pluviales.

### Remerciement

La collecte des données hydrauliques et le suivi hydrodynamique ont pu se réaliser grâce au soutien de « International Foundation for Science (IFS) » dans le cadre de l'attribution de la bourse Réf : W/4856-1. Nous tenons à remercier l'IFS pour leurs supports financiers et matériels. Nous remercions aussi la CUD et nos formateurs de Stage (SIG) de l'IGEAT de l'ULB de Belgique.

### REFERENCES

**Aké G.E., Dongo K., Boyossoro H.K., Dibi B., Sale M.B., Biemi J. (2009)** : Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la côte d'Ivoire). *European Journal of scientific Recherche*. Vol.31 N°1 PP157-171.

**Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J. et Hackett G., (1987)** : DRASTIC : A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings, US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 p.

**Almasri M. N. (2008)**: Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *J Environ Manage* 88:577-593

**Baghvand A, Nasrabadi T, Nabibidhendi G, Vosough A, Karbassi A, Mehradadi N (2010)** : Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert. *Desalination* 260(3):264-275.

**Bézègues S. et Des Garets E. (2002)** : Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase I- Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité, Rapport BRGM-51783-FR, 41 p.

**Boufekane A. et Saighi O. (2013)**: Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria). DOI: 10.5897/AJEST2013.1428Vol. 7(10), pp. 949-960

**Champagne L. et Chapuis R.P. (1993)** : Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. *Rev. Sc. Tech. Eau*;26 ; pp. 76 -169.

**Delcaillau B. (1997)** : Les fronts de chaîne active - Genèse des reliefs et relations tectonique -érosion-sédimentation, Thèse, Université de Caen, 300 pages, 1997

**Ewodo Mboudou G., (2012a)**:Caractérisation et

fonctionnement des aquifères de sub-surface en zone de socle cristallin et de climat intertropical humide : cas des bassins versants de la Mingosso et de l'Abiérgué (Région de Yaoundé -Cameroun).Université de Yaoundé I. Thèse d'Hydrogéologie, 209p.

**Ewodo Mboudou G., Ombolo A., Fouépé Takounjou A., Bon A. F., Ekodeck G. E. (2012b)** : Etude des Paramètres hydrauliques des aquifères de sub-surface du bassin versant de la Mingosso, région de Yaoundé”, *Rév. CAMES-Série A*, Vol.13, pp 123-127

**Ewodo Mboudou G., Ombolo A., Kouame Kan J., Bon A.F., et Bineli E., (2015)** : Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères du bassin versant de la Mingosso (région de Yaoundé) par les méthodes paramétriques DRASTIC, SI et GOD. *International Journal of Innovation and Applied Studies (IJIAS)*. Vol. 12 No. 1, pp. 266-286

**Foster S. S. D., (1987)**: Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy – Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, RIVM, TNO Committee on Hydrogeological Research, pp. 69-86.

**Foster S. S. D., (2002)** : Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: a critical overview, in: Robins, N.S. (Ed.), *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability* Geological Society, London, Special Publications, 130: 7-22.

**Gogu R. C, Pandele A. Lonta A. Lonescu C., (1996)**: Ground water vulnerability analysis using a low geographical information system. MIS/UDMS conference. Well-GIS workshop's Environmental information system for regional and Municipalplanning. Prague, pp 35-49

**Gogu R.C. (2000)**: Advances in ground water protection strategy using vulnerability mapping and hydrogeological GIS dabase. Ph.D thesis.University of Liège. Belgium. 153P.

**Hamza M.H., Added A., Francès A., Rodriguez R., Ajmi M. et Abdeljaoued S., (2008)**:Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau/journal of water science*. Vol.21, n°1 pp75-86.<http://id.erudit.org/iderudit/017932ar>

**Hamza M. H., A. Added, R. Rodriguez, S. Abdeljaoued, A. Ben Mammou (2007)**: A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-RafRaf aquifer, Northern Tunisia). *J. Environ. Manage.*, 84, 12-19, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.004>

**Isabel D., Gelinat P. et Aubre F. (1990)** : Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. *Rev. Sc. Tech. Eau*, 23p.

**Jourda J. P., Saley M. B., Djagoua E. V., Kouamé K. J., Biémi J. et Razack M. (2006)** : "Utilisation des données

ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation". *Revue de Télédétection*. Vol.5, n°4, pp. 339-357

**Kaur R and Rosi K. G. (2011)**: Ground Water Vulnerability Assessment – Challenges and Opportunities. <http://www.cgwb.gov.in/documents/papers/incidpapers/Paper%2012-%20R.%20Kaur.pdf>. Accessed 12 May 2011

**Kouam Kenmogne G. R. (2013)**: Vers une gestion rationnelle de l'eau dans une situation complexe d'urbanisation anarchique dans un pays en développement : cas du bassin versant de l'Abiergue (Yaoundé-Cameroun). Thèse de Doctorat. Univ. Liège. 272P

**Kouamé 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 Unique de Doctorat. Université de Cocody, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 250p.*

**Mardhel V., Pinson S. et Gravier A (2005)**: Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais. Rapport BRGM/RP-54238-FR. 113 p

**Martel R. (2003)**: Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : Evaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. *Ressources naturelles Canada, Commission, Géologique, 16p.*

**Mohamed R. M. (2001)**: Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et changement planétaires / sécheresse,*

*vol. 12, n°2, pp. 95-101*

**Mvondo H., Owona S., Mvondo Ondo J. and Essono J. (2007)**: "Tectonic evolution of the Yaounde segment of the Neoproterozoic Central Orogenic Belt in southern Cameroun", *Can. J. Earth Sci.*, 44, 433-444.

**Mvondo, H., (2003)**: Analyse structurale et pétrogéochimique des roches de la région de Yaoundé nord; arguments contribuant à la connaissance de l'évolution géotectonique de la chaîne panafricaine au Cameroun. Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I, 188 p.

**Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, Lefebvre R, Martel R. (2003)**: Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec : Evaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. *Ressources naturelles Canada, Commission Géologique, p. 16.*

**Sanz D, Castaño S, Cassiraga E, Sahuquillo A, Gómez-Alday J.J., Peña S, Calera A (2010)**: Modeling aquifer river interactions under the influence of groundwater abstractions in the Mancha Oriental System. *Hydrogeol J.* doi:10.1007/s10040-010-0694-x

**Suchel J.B., (1988)**: Les climats du Cameroun. *Thèse Univ. Saint-Étienne, 1188 p.*

**Tesoriero A. J. Inkpen E. L. et Voss F. D. (1998)**: Assessing ground-water vulnerability using logistic regression. *Proceedings for the Source Water Assessment and Protection 98 Conference, Dallas, TX: 157-65*

**Zhang R, Hamerlinck J. D., Gloss S. P. et Munn L (1996)**: Determination of non point-source pollution using GIS and numerical models. *J Environ Qual* 25:411-418.