

# **Cartographie De La Vulnérabilité À La Pollution Des Aquifères Du Socle Précambrien : Cas De La Région D’oumé (Centre-Ouest De La Côte D’ivoire)**

***Allechy Fabrice Blanchard, MA***

***Lasm Théophile, PhD***

Laboratoire des Sciences et Techniques de l’Eau et de l’Environnement,  
UFR STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d’Ivoire.

***Youan Ta Marc, PhD***

Laboratoire des Sciences et Techniques de l’Eau et de l’Environnement,  
UFR STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d’Ivoire.  
Centre Universitaire de Recherche et d’Application en Télédétection  
(CURAT), Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d’Ivoire

***Yao Kouadio Assemien François, MA***

Laboratoire des Sciences et Techniques de l’Eau et de l’Environnement,  
UFR STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d’Ivoire  
Ecole des Mines d’Alès, 6 Avenue de Clavières, 30319 Alès (France)

***Kouakou Ourapa Suzane, MA***

***Oka Koua Armel Raphaël, MA***

***Baka Derving, PhD***

Laboratoire des Sciences et Techniques de l’Eau et de l’Environnement,  
UFR STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d’Ivoire

***De Lasmé Omer Zephir, PhD***

Departement de Geosciences, UFR des Sciences Biologiques,  
Université Pelefero Gon Coulibaly de Korhogo

doi: 10.19044/esj.2016.v12n20p374 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n20p374](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n20p374)

---

## **Abstract**

Development of agricultural and mining activities and the rapid growth of the population (3.8%) in Oumé’s area, constitute a potential risk of groundwater’s pollutions. This study interested Oumé’s area and aims to elaborate a map of vulnerability to pollution for a better management of groundwaters. The database is constituted by various data in particular, geological, hydrogeological, geomorphological, pluviometric data and satellite image.

Methods DRASTIC and GOD were used in this study. Results of DRASTIC method indicated that 31.86% of study area have a very low vulnerability, 68.12% a low vulnerability and 0.02% a moderate vulnerability. With GOD method, 12.8% of study area have a very low vulnerability, 86.46% a low vulnerability and 0.74% a moderate vulnerability. The chemical analysis of groundwater showed that weaker rates of nitrates (0-14mg/l) registered inside the surely well protected zones. These observations have led to validate some various maps obtained. Result of the test of Kappa revealed that coefficient K is reliable and gave moderate agreement ( $K=0.43$ ) between both methods. This agreement is confirmed by the surface analysis (79.01%). In this study, the DRASTIC method supplied better results and is thus better adapted for the evaluation of vulnerability in the pollution of groundwater of this area.

---

**Keywords:** Vulnerability, pollution, groundwater, DRASTIC, GOD, Oumé

---

### Résumé

Le développement des activités agricoles et minières et l'accroissement rapide de la population (3,8%) dans la région d'Oumé, constituent un risque potentiel de pollution des eaux souterraines. La présente étude a intéressé la région d'Oumé et avait pour objectif d'élaborer une carte de vulnérabilité à la pollution en vue d'une meilleure gestion des eaux souterraines. La base de données est constituée de diverses données notamment, des données géologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, pluviométriques et des images satellites. Les méthodes DRASTIC et GOD ont été utilisées. Les résultats de la méthode DRASTIC ont indiqué que 31,86% de la zone d'étude ont une vulnérabilité très faible, 68,12% une vulnérabilité faible et 0,02% une vulnérabilité moyenne. Avec la méthode GOD, 12,8% de la zone d'étude ont une très faible vulnérabilité, 86,46% une vulnérabilité faible et 0,74% une vulnérabilité moyenne. L'analyse chimique des eaux souterraines a montré que de faibles taux de nitrates (0 à 14 mg/l) sont enregistrés dans les zones assurément bien protégées. Ces observations ont permis de valider les différentes cartes obtenues. Le résultat du test de Kappa a révélé que le coefficient K est fiable et a donné un accord modéré ( $K = 0,43$ ) entre les deux méthodes. Cet accord est confirmé par l'analyse de surface (79,01%). Dans cette étude, la méthode DRASTIC a fourni de bien meilleurs résultats et est donc mieux adaptée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de cette région.

---

**Mots clés :** Vulnérabilité, pollution, eaux souterraines, DRASTIC, GOD, Oumé

## **Introduction**

La pollution des ressources en eau constitue une source d'inquiétudes qui requiert un intérêt universel, surtout à cause de l'accroissement des activités anthropiques. Ceci peut conduire à une altération de la qualité et une diminution de la quantité de l'eau potable. Ainsi les ressources en eau qui constituent un facteur primordial en termes de développement, représentent des réserves limitées, renouvelables mais fragiles, car menacées par de multiples pollutions. Ces pollutions sont la conséquence de la démographie galopante et de l'intensité des activités anthropiques, qu'elles soient industrielles, agricoles ou minières dans les grandes villes de Côte d'Ivoire et notamment à Oumé. En effet, la densité de la population dans cette région (87 habitants/km<sup>2</sup>) entraîne une production accrue d'ordures ménagères, des rejets d'eaux usées domestiques, exposant ainsi les eaux souterraines à la contamination. Aussi avec le développement des cultures agro-industrielles (car située dans la nouvelle boucle du café et cacao) utilisant des fertilisants chimiques, des engrais et les produits phytosanitaires, la pollution pourrait prendre une importante proportion. A ces problèmes existants, s'ajoutent ceux des activités minières. En effet, depuis 2006, deux gisements aurifères ont été découverts dans cette région et mis en exploitation. Le procédé de traitement du minerai par l'utilisation des produits chimiques tel que le cyanure constitue un véritable danger pour l'environnement, les eaux souterraines et même pour les hommes en cas de fuites et de déversements accidentels ou volontaires. Les eaux souterraines de la région d'Oumé se trouvent ainsi confronter de manière récurrente à un risque de pollution lié aux activités anthropiques. Des mesures préventives sont donc nécessaires en vue de protéger les eaux souterraines de cette région de manière efficiente pour les générations à venir. La cartographie des zones vulnérables à la pollution est une des approches d'aide à la protection et à la prévention des eaux souterraines contre la pollution (Champagne et Chapuis, 1993). À l'heure actuelle, aucune étude sérieuse visant à évaluer la vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle pour apprécier le risque sanitaire encouru par ces populations n'a encore été réalisée dans cette région. Il se pose donc un manque d'outil d'aide à la prise de décision en matière d'aménagement pour permettre de tenir compte du risque de pollution des eaux souterraines. L'objectif de cette étude est d'élaborer une carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution des aquifères de la région d'Oumé dans une perspective de gestion durable des eaux souterraines. Cette étude permettra de prévenir les risques de pollution de ces ressources en eau souterraine et de les protéger contre toute pollution.

## 1. Contextes géographique, géologique et hydrogéologique

Oumé est situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 6°10' et 6°40' Nord et les longitudes 5°10' et 5°50' Ouest (figure 1). Elle appartient à la région de Gôh avec pour chef-lieu de région Gagnoa. Cette zone d'étude occupe 2 400 km<sup>2</sup>, soit moins de 1% de la superficie de la Côte d'Ivoire.

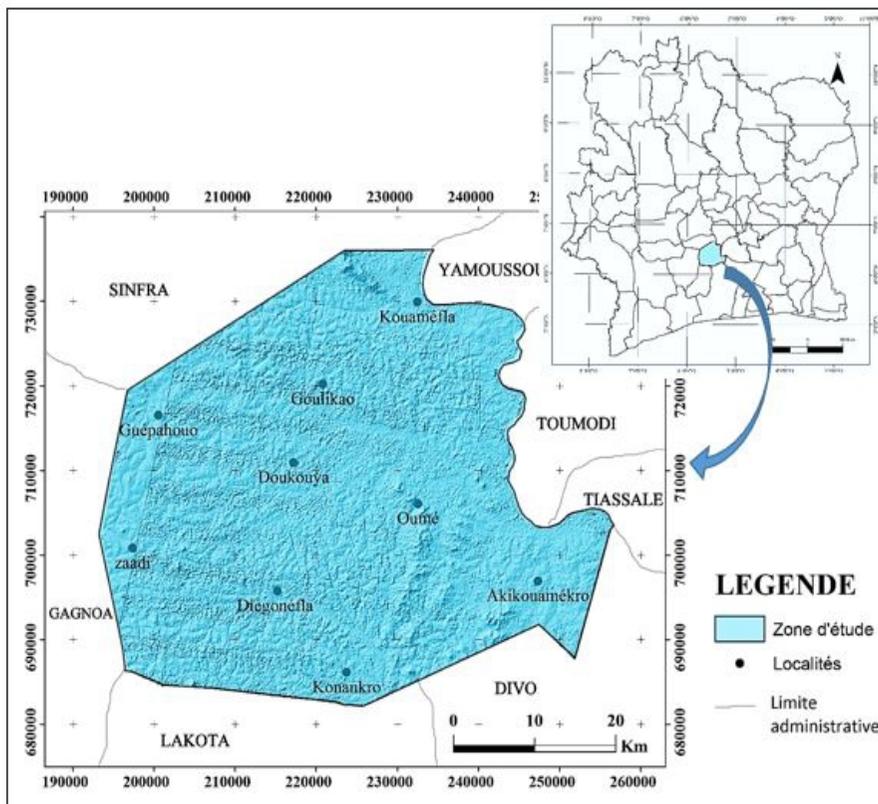


Figure 1 : Carte de localisation géographique de la région d'Oumé

Sa population est estimée à 210264 habitants (INS, 2000), avec un taux d'accroissement de 3,8%. La principale occupation de cette population est la culture du café, cacao, riz, manioc, banane plantain.

La zone d'étude est marquée par trois entités géomorphologiques distinctes : une pédiplaine, la vallée du Bandama et des reliefs «montagneux» (Géomines, 1982). Avec une végétation de forêt dense humide semi-décidue, elle dispose de 5 forêts classées. Son réseau hydrographique est dense et marqué par de grands cours d'eau, dont le principal est le Bandama. La zone d'étude est caractérisée par deux saisons pluvieuses de mars à juin, puis de septembre à octobre et deux saisons sèches de novembre à février et de juillet à août.

L’histoire géologique de la région d’Oumé s’inscrit dans le domaine protérozoïque (Baoulé-Mossi). Les formations de cette région ont été structurées au cours de l’orogénèse éburnéenne. Ces formations peuvent être subdivisées en 2 groupes (figure 2) :

- les volcano-sédimentaires constitués de flyschs, de schistes, de métasédiments et des roches indifférenciées, de métavulcanites (constitués d’amphibolites, d’andésite, de spilites) et de conglomérats avec les grauwackes. On rencontre ce groupe au Sud-Est et au Nord de la région ;

- les granitoïdes constitués majoritairement de granites, de granites hétérogènes à biotite, et quelques intrusions de massifs granitiques, situées presque sur toute la zone d’étude.

Au plan hydrogéologique, la zone d’étude comporte trois types d’aquifères qui se superposent dans bien des cas : altérites, de fissures ou horizon fissuré et de fractures (Wyns *et al.*, 1999 ; Lachassagne *et al.*, 2005).

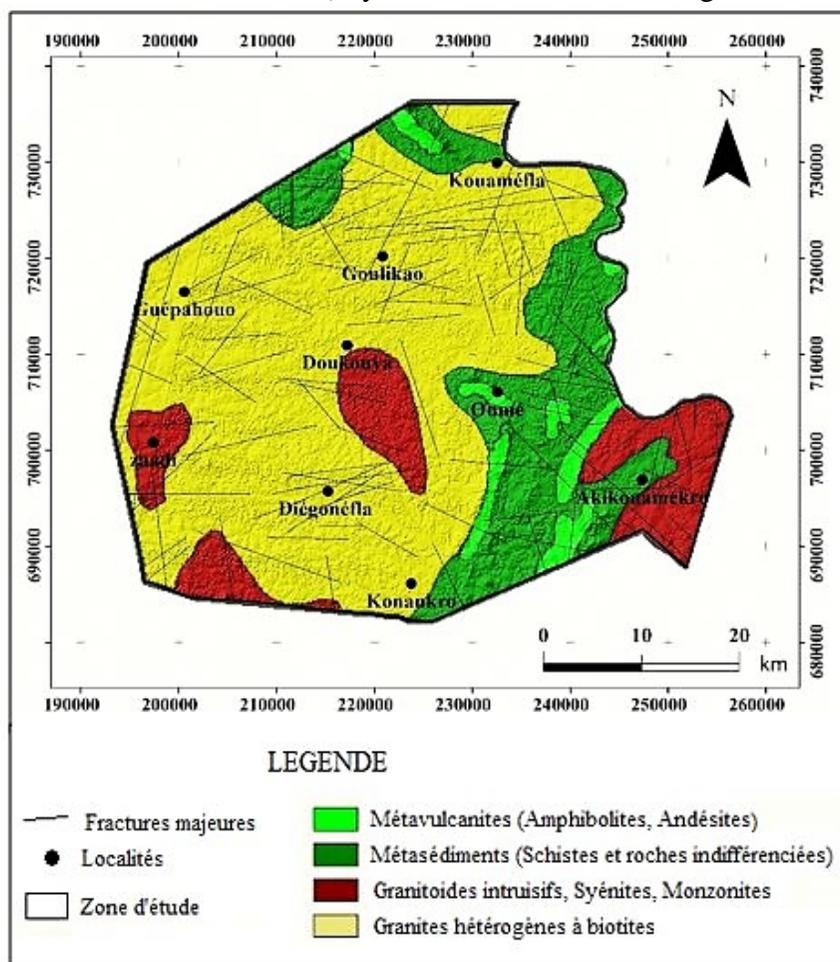


Figure 2 : Carte géologique de la région d’Oumé modifiée (Baka, 2012)

## **2. Matériel et méthodes**

### **2.1. Données et matériel**

Les données utilisées sont de plusieurs types. Elles sont essentiellement constituées :

- d'image satellitaire de type Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de 90 m de résolution, téléchargées *via* le site <http://www.glcf.umiacs.umd.edu> couvrant la zone d'étude ;
- de la carte géologique du degré carré de Gagnoa établie par Géomines (1982) à l'échelle 1/200 000 ;
- de 135 fiches techniques des forages réalisées dans la région d'Oumé, couvrant la période de 1976 à 2000. Ces fiches ont été recueillies auprès de la Direction de l'Hydraulique Rurale et Périurbaine (DHRP) ;
- de données pluviométriques acquises auprès de la Société de Développement et d'Exploitation, Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) sur la période allant de 1941 à 2008.

Le traitement de toutes ces données s'est effectué en utilisant les techniques de numérisation et d'interpolation (IDW) à l'aide des logiciels MAPINFO 11.0 et ARCGIS 10.2.2. Il a permis de constituer la base de données de la zone d'étude.

### **2.2. Méthodes**

Dans cette présente étude, l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque a été faite par l'application de 2 méthodes que sont DRASTIC et GOD, compte tenu de leur complémentarité. La méthode GOD tient compte des facteurs les plus importants dans le processus de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines et la base de données relative à ces paramètres est facilement accessible. Quant à DRASTIC, elle est universellement utilisée et tient compte de 7 paramètres jugés importants dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité.

#### **2.2.1. Méthode DRASTIC**

La méthode DRASTIC a été mise au point par Environmental Protection Agency (EPA) (Agence de Protection et de l'Environnement) aux Etats-Unis en 1987 (Aller *et al.*, 1987). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines à la pollution. La méthode DRASTIC tire son nom de l'acronyme de ses 7 paramètres de vulnérabilité (Bézégues *et al.*, 2002) :

- D : Depth to groundwater (profondeur de la nappe) ;
- R : Recharge (recharge nette ou infiltration efficace) ;

A : Aquifer media (lithologie de l'aquifère) ;

- S : Soil media (type de sol) ;
- T : Topography (topographie ou pente) ;
- I : Impact of the vadose zone (impact de la zone non saturée) ;
- C : Conductivity (conductivité hydraulique ou perméabilité de l'aquifère).

À chacun des paramètres DRASTIC, est attribué un poids fixe de multiplication variant de "1" à "5" selon l'importance du paramètre dans le phénomène de vulnérabilité de l'aquifère à la pollution (tableau I).

**Tableau I :** Poids des paramètres DRASTIC (Aller *et al.*, 1987)

Paramètres	Poids
Profondeur de la nappe	5
Recharge nette ou infiltration efficace	4
Lithologie de l'aquifère	3
Type de sol	2
Topographie ou pente	1
Impact de la zone vadose	5
Conductivité	3

Une cote définie en fonction d'intervalles de valeurs est ensuite associée à chacun de ces paramètres. Elle varie de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Ainsi chaque paramètre qui a une petite cote implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable et inversement.

Pour chaque paramètre DRASTIC, nous avons élaboré une carte thématique en se basant sur les cotes et les poids accordés aux critères.

L'indice de la vulnérabilité DRASTIC (ID) est calculé en faisant la somme des produits de chaque cote par son poids selon l'équation 1 (Osborn *et al.*, 1998) :

$$ID = (D_c \times D_p) + (R_c \times R_p) + (A_c \times A_p) + (S_c \times S_p) + (T_c \times T_p) + (I_c \times I_p) + (C_c \times C_p) \quad (1)$$

avec p : le poids du paramètre et c : la cote associée

La valeur minimum de l'indice est de "23", tandis que la valeur maximum est de "226". L'indice (ID) permet de caractériser ou d'évaluer le degré de vulnérabilité de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice ID calculé est élevé. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices DRASTIC calculés (Tableau II). L'équation 2 permet d'effectuer la conversion des indices DRASTIC en pourcentage (Jourda *et al.*, 2007) :

$$\text{Indice (\%)} = \frac{ID-23}{203} \times 100 \quad (2)$$

**Tableau II** : Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité (Jourda *et al.*, 2007).

Indice DRASTIC en %	Degré de vulnérabilité
24 à 84 (0 à 30%)	Très faible
85 à 114 (31 à 45%)	Faible
115 à 145 (46 à 60%)	Moyen
146 à 175 (61 à 75%)	Elevé
176 à 226 (76 à 100%)	Très élevé

Une nouvelle approche développée en 1995 par le Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ, 1995) consiste à diviser en trois grandes catégories, l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique (Tableau III).

**Tableau III** : Classification des indices DRASTIC sur l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique (Jourda *et al.*, 2007).

Catégories	Indice de vulnérabilité en %	Conclusion
Catégories 1	0 à 35	Assurément bien protégé Protection hydrogéologique incertaine
Catégories 2	Compris entre 35 et 75	Assurément vulnérable
Catégories 3	75 à 100	

### 2.2.2. Méthode GOD

La méthode GOD a été développée par Foster en Angleterre en 1987. Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Elle permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité (Murat *et al.*, 2003) et prend en compte trois paramètres qui sont :

- G : Groundwater occurrence (type de nappe) ;
- O : Overall aquifer class (lithologie de l'aquifère) ;
- D : Depth to groundwater table (profondeur de la nappe).

Des cotes inférieures ou égales à 1 sont attribuées aux classes des différents paramètres GOD selon la particularité du milieu. L'indice GOD (IG) qui permet d'évaluer la vulnérabilité se fait par la multiplication de ces trois paramètres selon l'équation 3 suivante (Murat *et al.*, 2003) :

$$IG = C_a \times C_1 \times C_d \quad (3)$$

avec  $C_a$  : cote du type d'aquifère ;  $C_1$  : cote de la lithologie et  $C_d$  : cote de la profondeur de la nappe.

L'indice GOD (IG) a pour valeur minimum « 0 » et valeur maximum « 1 ». La vulnérabilité augmente avec l'indice. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices obtenues répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême" (Tableau IV).

**Tableau IV** : Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes de vulnérabilité (Murat *et al.*, 2003)

Intervalles	Classes GOD
0 - 0,1	Vulnérabilité très faible
0,1 - 0,3	Vulnérabilité faible
0,3 - 0,5	Vulnérabilité modérée
0,5 - 0,7	Vulnérabilité forte
0,7 - 1	Vulnérabilité extrême

La vulnérabilité est fonction de l'indice calculé. En tenant compte de ce fait, la classification des différents indices doit tenir compte des intervalles définis par la méthode GOD. Les valeurs limites des intervalles des indices GOD sont relatives. En effet, si les indices calculés n'oscillent pas entre les extrêmes fixés (0, valeur minimum ; 1, valeur maximum), une autre classification adaptée à l'étude est effectuée. Cette autre classification permet de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices. Ce fut le cas des travaux réalisés par Navalur et Engel (1997), Murat *et al.* (2000), Mohamed (2001), Murat *et al.* (2003), Jourda *et al.* (2005), Kouamé (2007).

### 2.3. Validation des cartes de vulnérabilité

L'élaboration d'une carte de vulnérabilité est testée et validée par des mesures sur le terrain et l'analyse des données chimiques des eaux souterraines.

Plusieurs auteurs dont Mohamed (2001), Jourda *et al.* (2006), Hamza *et al.* (2007), Kouamé (2007), Aké *et al.* (2009) ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines (taux de nitrates). Les différentes cartes de vulnérabilité, dans le cas de la présente étude, ont été testées par la répartition des taux de nitrates (72 échantillons) des eaux souterraines de la région d'Oumé (Goné *et al.*, 2014). Pour que la carte soit validée, il faut que la plupart des échantillons de teneurs en nitrates très faibles ou quasi inexistant soit rencontrée dans les zones « assurément bien protégées ». Cependant, une zone vulnérable peut également avoir un faible taux de nitrates, car 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 (Kouamé, 2007).

### 2.4. Test de corrélation entre les méthodes

Ce test a pour objectif de comparer les résultats obtenus par les méthodes DRASTIC et GOD afin de déterminer les zones de similarité et les variations d'évaluation de la vulnérabilité dans l'espace. L'analyse de

surface et le test de conformité (coefficient de Kappa) ont été utilisés pour parvenir à la réalisation de cette comparaison dans le cas de cette étude. Ces 2 méthodes utilisent le nombre de pixels par classe de vulnérabilité pour faciliter la comparaison entre elles.

#### 2.4.1. Analyse de surface

L'analyse de surface permet de voir dans quelle mesure les cartes diffèrent les unes des autres et les zones où les indices diffèrent et de combien ils diffèrent (Murat, 2000). Ce test permet de calculer la surface de chaque variation d'indice d'une méthode à l'autre et ainsi de déterminer la fréquence d'accord et de désaccord observée. Cette surface, occupée par chaque classe de vulnérabilité est calculée et transformée en pourcentage. La démarche consiste d'abord à ramener les échelles de classification de vulnérabilité des 2 méthodes à une échelle commune aux 2 méthodes. Ensuite, faire une soustraction de la carte DRASTIC à celle de GOD après les avoir classées. À cet effet, des indices sont affectés à chaque classe de vulnérabilité suivant le tableau V.

**Tableau V:** Indices affectés aux différentes classes de vulnérabilité

Classes de vulnérabilité	Faible	Moyenne	Forte
Indices	1	2	3

Après classification, on procède à la soustraction au moyen du menu "calculatrice raster" du logiciel ArcGIS. Soit A, représentant la méthode DRASTIC et B la méthode GOD. Trois cas peuvent se présenter après l'opération (tableau VI).

**Tableau VI :** Principe de l'analyse de surface

Résultat attendu	Interprétation
$A - B > 0$	DRASTIC surévalue la vulnérabilité par rapport à GOD
$A - B < 0$	DRASTIC sous évalue la vulnérabilité par rapport à GOD
$A - B = 0$	Les deux méthodes DRASTIC et GOD sont identiques

#### 2.4.2. Test de conformité

Le test de conformité permet de vérifier la concordance des classes de vulnérabilité évaluées par les 2 méthodes. Cette concordance a été établie par le calcul du coefficient de Kappa en prenant comme référence la méthode DRASTIC. Le coefficient de Kappa (K) représente l'indice statistique qui mesure le degré de concordance ou d'accord d'une mesure entre deux ou plusieurs observateurs ayant à juger le même phénomène. Les valeurs du coefficient de Kappa varient de « -1 » à « 1 ». Elles sont d'autant plus élevées que la valeur du coefficient K est proche de 1.

À part ces valeurs seuils, il est possible que le coefficient de Kappa prenne d'autres valeurs. Une échelle d'interprétation de Kappa a été proposée

par Landis et Koch (1977). Elle détermine le taux d'accord en fonction de la valeur observée de Kappa (Tableau VII).

**Tableau VII** : Echelle d'interprétation de Kappa (K) (Landis et Koch, 1977)

Valeurs observées de Kappa	Interprétation
< 0	Accord quasi-inexistant
0 - 0,20	Faible accord
0,21 - 0,40	Accord passable
0,41 - 0,60	Accord modéré
0,61 - 0,80	Accord important
0,81 - 1,00	Accord presque parfait

### 3. Résultats

#### 3.1. Carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC

Les indices évalués par la méthode DRASTIC oscillent entre 65 et 119. Convertis en pourcentage, ils ont permis d'obtenir la classification suivante en fonction des plages de vulnérabilité établies :

- $ID < 30\%$  : vulnérabilité très faible ;
- $31 < ID < 45\%$  : vulnérabilité faible ;
- $46 < ID < 60\%$  : vulnérabilité moyenne.

Une telle classification tient compte des classes standards définies par Aller *et al.* (1987) et a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle de la région d'Oumé (figure 3).

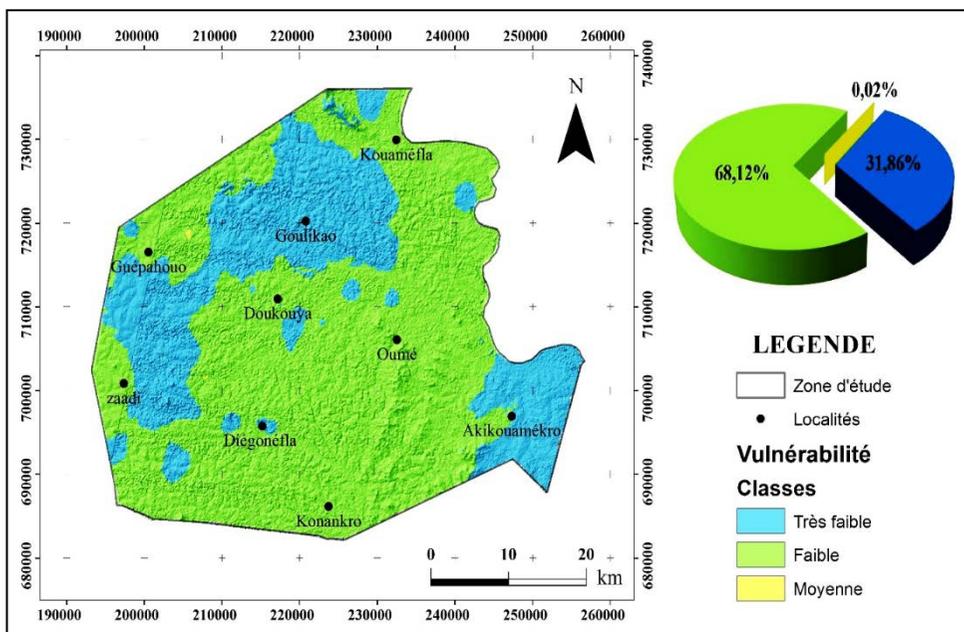


Figure 3 : Carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC

Trois classes de vulnérabilité sont mises en évidence sur cette carte. Il s'agit de :

- la classe « Très faible » occupant 31,86% de la zone d'étude. Elle traduit une vulnérabilité très faible à la pollution. Cette classe se rencontre en grande partie à l'Ouest, à l'Est et au Nord. Le très faible indice de vulnérabilité peut s'expliquer par une grande profondeur de la nappe (supérieur à 15 m), le secteur qui est couvert de sable argileux et de roches métamorphiques et ignées ;
- la classe « Faible » avec un pourcentage de 68,12% de la zone d'étude, est caractérisée par une vulnérabilité faible à la pollution. Cette classe couvre plus de la moitié de la région. L'indice faible de vulnérabilité peut être lié aux profondeurs moyennes des nappes (9 à 15 m), aux sables argileux se trouvant dans ce secteur et des pentes oscillant entre 2 et 6% ;
- la classe « Moyenne » représente une vulnérabilité moyenne à la pollution avec un pourcentage très faible, voire négligeable (0,02%). Elle se rencontre au Centre-Ouest et à l'Ouest de la zone d'étude. L'indice moyen de vulnérabilité peut s'expliquer par le fait que ce secteur est constitué en majorité des couches de sables argileux, les nappes sont peu profondes (3,5 à 8,7 m) avec des pentes comprises entre 3 à 12%.

En considérant l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique, la classe très faible appartient à la catégorie 1 qui correspond à une zone «assurément bien protégée». Les classes faible et moyenne, appartiennent à la catégorie 2 correspondant à «une protection hydrogéologique incertaine».

### **3.2. Carte de vulnérabilité à la pollution selon GOD**

Les valeurs des indices obtenus dans cette étude varient de 0,15 à 0,3. La classification adoptée utilise les plages de vulnérabilité suivantes :

- $IG < 0,2$  : vulnérabilité très faible ;
- $0,2 < IG < 0,25$  : vulnérabilité faible ;
- $IG > 0,25$  : vulnérabilité moyenne.

Une telle classification tient compte des valeurs minimum et maximum d'indices obtenus et non des classes standards définies par Murat *et al.* (2003). La carte de vulnérabilité issue de cette classification est illustrée à la figure 4.

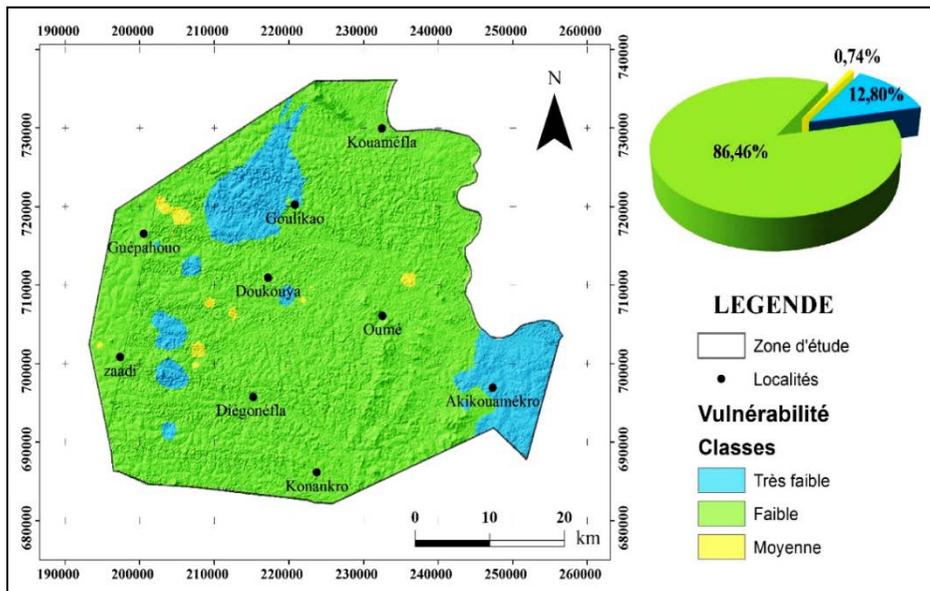


Figure 4 : Carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode GOD

La zone d'étude est caractérisée également par trois classes de vulnérabilité inégalement réparties qui sont :

- la classe « Très faible » : qui se rencontre dans la partie Est, Nord-Ouest et en petits îlots à l'Ouest. Elle est caractérisée par une vulnérabilité très faible à la pollution. L'indice très faible de vulnérabilité peut s'expliquer par le fait que la profondeur de la nappe est très grande (supérieure à 20 m) dans cette partie. La répartition spatiale révèle que 12,80% de la zone d'étude appartiennent à cette classe ;
- la classe « Faible » prédomine et couvre la quasi-totalité de la zone d'étude avec un pourcentage de 86,46%. Cette classe traduit une vulnérabilité faible à la pollution. L'indice faible de vulnérabilité peut être lié à la profondeur de la nappe dans ce secteur qui est peu profonde (10 à 20 m) et a une abondance de roches ignées et métamorphiques ;
- la classe « Moyenne », occupe 0,74% de la zone d'étude et est caractérisée par une vulnérabilité moyenne à la pollution. L'indice moyen de vulnérabilité peut s'expliquer par la profondeur de la nappe qui est moins élevée (inférieure à 2 m) avec une prédominance de roches ignées et métamorphiques. Cette classe se localise à l'Ouest, au Centre-Ouest et à l'Est de la zone d'étude.

### 3.3. Validation des cartes de vulnérabilité

Les taux de nitrates contenus dans les eaux souterraines de la zone d'étude sont bas dans l'ensemble et sont compris entre 0 et 15 mg/l pour près de 98,6% des 72 échantillons. Cependant un seul point est enregistré dans la zone à faible vulnérabilité où la valeur est relativement élevée (Bonikro ; 68,44 mg/l) et dépasse le guide seuil de l'OMS (50 mg/l) pour la qualité des eaux de consommation. Les zones assurément bien protégées sont localisées au Nord, Nord-Ouest, à l'Ouest et à l'extrême Est. Les concentrations en nitrates augmentent de l'Ouest vers l'Est. Ainsi, la superposition de ces deux types de carte (vulnérabilité et taux de nitrates) (figures 5 et 6) montre que les échantillons à très faibles taux de nitrates (0 à 15 mg/l) coïncident à 98,6% avec les zones « assurément bien protégées ». Cette superposition permet de dire que les cartes élaborées reflètent la réalité du terrain. Ce résultat valide et confirme donc la carte de vulnérabilité intrinsèque de la région.

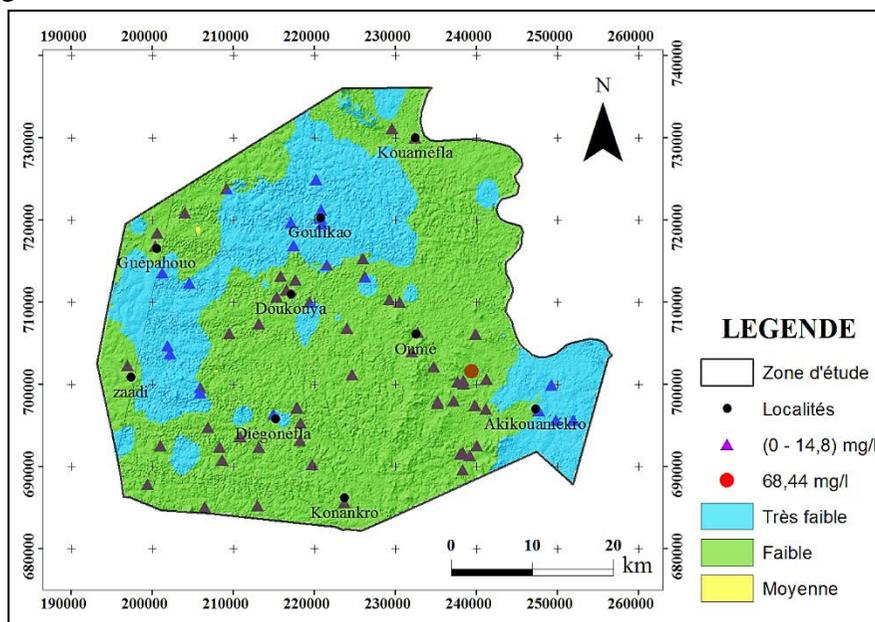


Figure 5 : Superposition de la carte de vulnérabilité DRASTIC à la répartition spatiale du taux de nitrates de la région d'Oumé.

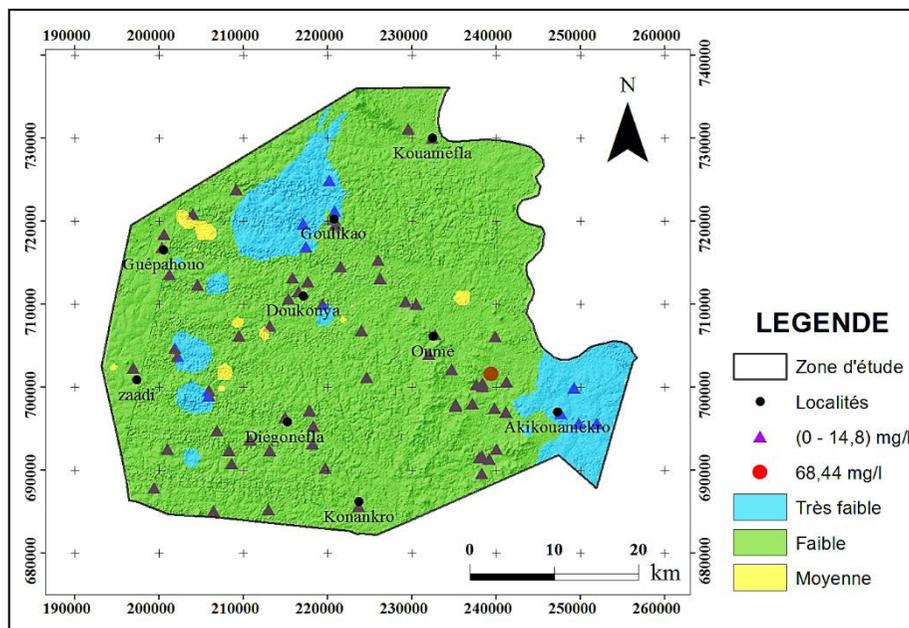


Figure 6 : Superposition de la carte de vulnérabilité GOD à la répartition spatiale du taux de nitrates de la région d’Oumé

### 3.4. Comparaison des méthodes DRASTIC et GOD

Le nombre de pixels obtenu par classe selon les méthodes est consigné dans le tableau VIII. Ce tableau indique que le nombre de pixels de la zone d’étude est égal à 31 779. La forte valeur est observée par la classe de vulnérabilité faible des 2 méthodes.

**Tableau VIII** : Répartition des nombres de pixels par classe et par méthode

Vulnérabilité	DRASTIC	GOD
Très faible	10 126	4058
Faible	21 464	27 484
Moyenne	7	237
Total pixel	31 779	31 779

#### 3.4.1. Analyse de surface

Les cartes issues de l’application des méthodes DRASTIC et GOD sont identiques sur 79% de la zone d’étude. Les zones où la méthode DRASTIC sous et sur évalue la vulnérabilité par rapport à celle de GOD représentent respectivement 20,41 et 0,59%. D’une manière générale, la méthode GOD surévalue la vulnérabilité par rapport à la méthode DRASTIC. Nous pouvons dire qu’il y a une parfaite similitude entre les 2 méthodes malgré quelques différences d’indice. Les deux cartes de vulnérabilité sont donc presque semblables. L’analyse de surface seule, ne

suffit pas pour mieux comparer les résultats des 2 méthodes. Un autre test (coefficient de kappa) est nécessaire pour pouvoir se prononcer.

### 3.4.2. Test de conformité

Le calcul du coefficient de Kappa (K) montre que le test est fiable car la valeur de Kappa est positive donc interprétable. Le coefficient K est compris entre 0,40 et 0,60 en se référant à l'échelle d'interprétation de Kappa. Il correspond à un "accord modéré" entre les méthodes ; tandis que l'accord est bon avec  $H_0$  qui est égal à 0,79. Cet accord confirme la différence d'indice observée au niveau des cartes de vulnérabilité.

## 4. Discussion

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle dans la région d'Oumé a permis d'obtenir trois classes de vulnérabilité identique

avec les deux méthodes utilisées : une classe de vulnérabilité très faible et une classe de vulnérabilité faible où la nappe semble être protégée ; et une classe de vulnérabilité moyenne qui mérite une surveillance particulière. Ces caractéristiques n'excluent pas cependant, une contamination de la nappe en ces lieux car un site avec un indice faible n'est pas à l'abri d'une contamination, mais un tel site est moins susceptible à la contamination par rapport à un site ayant un indice de vulnérabilité à la pollution élevé (Osborn *et al.*, 1998 in Jourda, 2005). Les valeurs de l'indice DRASTIC obtenues dans cette étude varient de 65 à 119. Elles s'apparentent à celles obtenues par Jourda *et al.* (2005) au niveau du socle précambrien de Korhogo (77 à 158), Youan Ta (2008) à Bondoukou (81 à 136), et Dibi *et al.* (2013) à M'Bahikro (103 à 174). Les tendances de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région d'Oumé ont été confirmées par le taux de nitrates des forages de la zone d'étude. En effet, les concentrations de nitrates augmentent, globalement, de l'Ouest vers l'Est, et on observe aussi une parfaite superposition entre les zones de très faibles concentrations de nitrates et les zones où l'indice DRASTIC est faible (zones assurément bien protégées). Cette carte de répartition spatiale du taux de nitrates permet ainsi de valider la carte de vulnérabilité à la pollution. La complexité dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC est liée aux 7 facteurs hydrogéologiques pris en compte. Plusieurs paramètres comme la recharge, la conductivité hydraulique, la profondeur de la nappe, l'impact de la zone, ont été produits par interpolation, assignant ainsi des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue ou n'existe. L'interpolation utilisée dans cette étude peut entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles (Jourda *et al.*, 2006). L'une des

difficultés de l'application des méthodes DRASTIC et GOD est aussi les limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres (Murat, 2000). En effet, les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes (Lobo-Ferreira *et al.*, 2003). Dans ces conditions, l'agrégation des cotes n'est pas toujours identique à celle définie par la méthode (DRASTIC ou GOD) de même que les indices de vulnérabilité. Les limites des différentes classes ne sont donc pas des valeurs absolues, mais relatives (Jourda *et al.*, 2006). Ces limites peuvent alors varier d'une étude à une autre comme d'une région à une autre. Les travaux de Murat *et al.* (2000), Mohamed (2001), Murat *et al.* (2003), Jourda *et al.* (2005), Kouamé (2007), Youan Ta (2008), Aké (2010) dans des contextes différents ont donné des résultats similaires. La comparaison des cartes de vulnérabilité à partir du test de Kappa et de l'analyse statistique a montré que le coefficient d'accord (coefficient K) est fiable et a donné un accord modéré ( $K = 0,43$ ) entre les 2 méthodes. Ce résultat s'apparente à celui obtenu par Kouamé (2007) dans le district d'Abidjan ( $K = 0,418$ ). Quant à l'analyse de surface, elle a montré un accord excellent (79%). Cet accord est en phase avec les conclusions de Kouamé (2007) qui a obtenu un accord de 65%. Les résultats de l'analyse de surface confirment ceux du test de Kappa dans ces deux études. Les cartes de vulnérabilité sont donc semblables à quelques différences près. Il y a alors une parfaite association entre les deux méthodes malgré les différences soulignées au niveau d'un indice. L'association entre ces méthodes a été déjà confirmée par les travaux de Kimmeier (2001) et Kouamé (2007).

En conclusion, la méthode DRASTIC apparait la mieux indiquée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par rapport à la méthode GOD. La méthode GOD n'est pas pertinente dans cette étude. En effet, la carte thématique du paramètre "profondeur de la nappe" étant quasiment la même pour les deux méthodes. De plus, les 2 autres cartes thématiques (type d'aquifère et lithologie de l'aquifère) ayant une seule classe chacune, n'influencent pas la carte de vulnérabilité selon GOD. La méthode GOD évalue donc la vulnérabilité à la pollution à partir d'un seul paramètre (la profondeur de la nappe) sur ses trois paramètres dans cette étude. En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution par les méthodes intrinsèques, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité intrinsèque est fiable. Murat (2000) et Murat *et al.* (2003) sont arrivés également à une cette conclusion. Elle permet de se faire une idée sur les zones sensibles qui doivent être prises en compte lors de l'aménagement du territoire (Jourda, 2005).

## Conclusion

La carte de la vulnérabilité à la pollution des aquifères du socle de la région d'Oumé réalisée par les méthodes DRASTIC et GOD, met en évidence trois classes de vulnérabilité dont la répartition est la suivante :

- pour la méthode DRASTIC, 31,86% de la zone d'étude ont une vulnérabilité très faible, 68,12% une vulnérabilité faible et 0,02% une vulnérabilité moyenne ;
- pour la méthode GOD, 12,8% de la zone d'étude ont une très faible vulnérabilité, 86,46% une vulnérabilité faible et 0,74% une vulnérabilité moyenne.

Ces cartes de vulnérabilité ont été validées avec la carte de répartition spatiale du taux de nitrates car les méthodes ont montré que les plus faibles taux de nitrates coïncident avec les zones assurément bien protégées. L'analyse de surface et le test de Kappa ont été utilisés pour comparer les cartes de vulnérabilité. Les résultats révèlent que le coefficient K est fiable et a donné un accord modéré ( $K = 0,43$ ) entre les deux méthodes. Quant à l'analyse de surface, elle montre un accord parfait (79%). La méthode DRASTIC apparaît la mieux indiquée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par rapport à la méthode GOD qui a tendance à la surévaluer.

## References:

- Aké G. E. (2010). *Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, 200p.
- Aké G. E., Dongo K., Kouadio B. H., Diby B., Saley 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 Research*, 31(1), pp. 157-171.
- Aller L., Bennett T., Lehr J. H., Petty R. J., Hackett G. (1987). DRASTIC: A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA, Ada, Oklahoma, 622p.
- Baka D. (2012). *Géométrie, hydrodynamisme et modélisation des réservoirs fracturés du socle protérozoïque de la région d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire), 246p.
- Bézèlgues S., Des Garets E., Mardhel V., Dörfliger N. (2002). *Cartographie de la vulnérabilité de Grand-Terre et de Marie-Galatie (Guadeloupe)*. Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité. Rapport BRGM-51783-FR, 41p.

- Champagne L., Chapuis R. P. (1993). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode Drastic. *Revue science et technique de l'eau*, 26, pp. 76-169.
- Dibi B., Kouassi K. L., Kouamé K. I., Konan K. S., Soumahoro M., Konan-waidhet A. B., Gnakri D. (2013). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS : Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2(4), pp. 464-476.
- Goné D. L., Douagui A. G., Bai, L., Kamagaté B., Ligban, R. (2014). Using Graphical and multivariate statistical methods for geochemical assessment of groundwater quality in Oumé Department (Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, 5, pp. 1255-1265.
- Hamza M. H., Added A., Frances A., Rodriguez R. (2007). Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien). *Géoscience*, 339, pp. 493-505.
- Ins (2000). Recensement général de la population et de l'habitation 1998. Région du Fromager, 30p.
- Jourda J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430p.
- Jourda J. P., Saley M. B., Kouame K. J., Kouadio B. H., Biemi J., Razack M. (2005). 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. Actes de la conférence francophone SIG 2005, du 5 au 6 octobre, Paris, 16p.
- Jourda J. P., Saley M. B., Djagoua E. V., Kouame K. J., Biemi J., 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 le test de validation. *Revue de télédétection*, 5(4), pp. 339-357.
- Jourda J. P., Kouamé K. J., Adja M. G., Deh S. K., Anani A. T., Effini A. T., Biemi J. (2007). Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Actes de la Conférence Francophone ESRI. SIG 2007/ 10 au 11 Octobre 2007, Versailles-France, 11p.
- Kimmeier F. (2001). 3-D Groundwater flow modelling in heterogeneous geologic media: Integrated approach using spatial and temporal database,

geostatistics and GIS. Thesis presented to the faculty of sciences of the Neuchâtel University, 223p.

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 de doctorat, Université de Cocody, 225p.

Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B. (2005). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova* 30, pp. 145-161.

Landis J. R., Koch G. G. (1977). The measurement of observer for categorical data, *Biometrics*, pp. 159-179.

Lobo-Ferreira J. P., Diamantino C., Leitão T. E., Oliveira M. M., Moinante M. J., Artuso E., Zakharova T. (2003). Projecto FCT Valorização e Protecção da Zona Costeira Portuguesa: Avaliação e Estudo da Vulnerabilidade de Sistemas Aquíferos Costeiros (Componente 11). Relatório 265/03-NAS, LNEC, Lisboa, 189p.

MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation du Québec), 1995. Guide d'application. Examen des projets de distribution au Québec d'eau embouteillée importée. Guide d'application; Centre québécois d'inspection des aliments et de santé animale. 29p.

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*, 12(2), pp. 95-101.

Murat V., Martel R., Michaud Y., Therrien R. (2000). Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application aux granulaires du Piémont Laurentien, Québec, AIH-CNC et SCG, pp. 411-418.

Murat V., Paradis D., Savard M. M., 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*, 16p.

Navalur K. C. S., Engel B. A. (1997). Predicting spatial distribution of vulnerability of Indiana state Aquifer system to nitrate leaching using a GIS, 18p.

Osborn N. B. I., Eckenstein E., Koon K. Q. (1998). Vulnerability Assessment of Twelve Major Aquifers in Oklahoma (Oklahoma Water Resources Board Technical Report 98-5), 34p.

Wyns R., Gourry, J.C., Baltassat J.-M., Lebert F. (1999). Caractérisation multi paramètres des horizons de subsurfaces (0-100 m) en contexte de socle altéré. 2<sup>ème</sup> colloque GEOFCAN BRGM IRD UMPC, Orléans, France, pp. 105-110.

Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat. Université de Cocody. Abidjan (Côte d'Ivoire), 237p.