

**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**

**[Assessment of vulnerability to pollution of aquifers of weathered layer by DRASTIC
and SYNTACS methods: Case of M'Bahiakro city, Central Côte d'Ivoire]**

*Dibi Brou¹, Kouassi Kouakou Lazare¹, Kouamé Kouassi Innocent², Konan Kouakou Seraphin¹,
Soumahoro Moussa³, Konan-waidhet Arthur Brice¹, and Gnakri Dago¹*

¹Departement des Sciences de la Terre,
Université Jean Lorougnon Guedé,
Daloa, Côte d'Ivoire

²Departement de Géosciences et Environnement,
Université Nangui Abrogoa,
Abidjan, Côte d'Ivoire

³Projet d'Aménagement Hydroagricole de la Vallée du N'zi,
ONDR_MINAGRI,
Dimbokro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The prevention against the pollution of groundwater has been over three decades a major concern for the specialists of the field of water. To that purpose, many methods that use intrinsic parameters have been adopted since 1987. For this study, two methods have been adopted to enhance the robustness of results. It is about DRASTIC and SYNTACS who use both the intrinsic features of aquifers. The errors margins have been calculated for both maps so as to appreciate their veracity rate. Finally, these maps have been superposed to translate an infiltration on the salts content map which is supposed to translate an infiltration from superficial origin. The results clearly indicate that whatever the method, three classes of vulnerability have been identified: the strong vulnerability class, the average vulnerability and the low vulnerability classes. Globally, the area remains moderately vulnerable. Whatever the errors margin that was determined shows the respective values: 16,74 % and 18,04 % for the DRASTIC and SYNTACS methods. The superposition of the salts content map shows that the pollutant found in groundwater might have an origin that might not be from a superficial origin infiltration. The use of statistical tests as contribution to this study could lead to determine the origins of these pollutants.

KEYWORDS: Vulnerability, DRASTIC, SYNTACS, weathered layer, M'bahiakro.

RESUME: La prévention contre la pollution des nappes d'eau souterraine est devenue depuis près de trois décennies une préoccupation majeure pour les spécialistes du domaine de l'eau. Plusieurs méthodes ont à cet effet été adoptées depuis 1987. Pour cette étude, deux méthodes ont été adoptées pour renforcer la robustesse des résultats. Il s'agit de DRASTIC et SYNTACS qui utilisent toutes deux les caractéristiques intrinsèques des aquifères. Les marges d'erreur ont été calculées pour les deux cartes pour apprécier leur taux de véricité. Enfin, ces cartes ont été superposées à la carte des teneurs en sels supposée traduire une infiltration d'origine superficielle. Les résultats indiquent que quelque soit la méthode, trois classes de vulnérabilité ont été identifiées. Il s'agit des classes de vulnérabilité forte, moyenne et faibles. La zone reste moyennement

vulnérable. Quelque soit la méthode, cette vulnérabilité reste dominée par les classes moyennes et faibles qui alternent dans les secteurs centre et nord. Quant à la classe forte, elle se retrouve en faible proportion, cloisonnée dans le Sud. La marge d'erreur déterminée indique les valeurs respectives de 16,74 et 18,07 pour les méthodes DRASTIC et SINTACS. La superposition de la carte des teneurs en sels montre que les polluants présents dans les eaux souterraines pourraient avoir une origine autre qu'une infiltration d'origine superficielle. L'utilisation des tests statistiques comme contribution à cette étude pourrait permettre de déterminer ces origines de ces polluants.

MOTS-CLEFS: Vulnérabilité, DRASTIC, SINTACS, Formations altérites, M'bahiakro.

1 INTRODUCTION

Les eaux souterraines sont considérées comme l'une des sources les plus importantes pour l'approvisionnement en eau potable du fait de leur grande capacité de stockage ainsi que de leur faible exposition aux polluants contrairement aux eaux de surface [1]. Cependant, certaines sources de pollution diffuses provenant des activités anthropiques (pratiques agricoles, exploitations des décharges incontrôlées et des systèmes d'assainissement sauvages) menacent ces ressources [2]. Pour leur meilleure gestion, la prévention contre ces polluants apparaît primordiale. Les méthodes de vulnérabilité à la pollution du fait de leurs performances dans la délimitation des périmètres de protection se présentent comme les méthodes les plus appropriées. Au niveau de M'bahiakro, ces pollutions se traduisent par la présence d'un système d'assainissement précaire. En effet, de nombreuses fosses septiques sont positionnées à des distances souvent inférieures à 10 m des puits traditionnels et des dépôts sauvages d'ordures ménagères foisonnent à travers toute la ville. Aussi, les aquifères d'altérites considérés comme très exposés aux phénomènes de pollution constituent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable d'une grande partie de la population de la ville et cela à partir des puits traditionnels dont les profondeurs n'excèdent pas 7 m dans la localité. Tout ceci constitue de réels menaces pour ces aquifères d'altérites. Jusqu'à présent aucune étude visant à évaluer le degré de vulnérabilité à la pollution de ce type d'aquifère pour apprécier le risque sanitaire encouru par ces populations n'a encore été réalisée sur ces puits en Côte d'Ivoire.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des ressources en eau souterraine des aquifères des altérites de la région. Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Il s'agit des méthodes DRASTIC [3], GOD [4], AVI [5], SINTACS [6], EPIK [7], [8], PI [9] et COP [10]. Parmi toutes ces méthodes, celle de DRASTIC reste la plus utilisée. Cependant, pour une meilleure appréciation de cette vulnérabilité, deux méthodes seront adoptées au cours de cette étude pour attester de la robustesse des résultats obtenus et apprécier celle qui est la mieux adaptée aux aquifères d'altérites. Ces résultats feront l'objet d'une validation par la détermination de la marge d'erreur sur les deux cartes obtenues. Il s'agit des méthodes DRASTIC et SINTACS du fait du nombre important de paramètres qu'elles utilisent. Selon [11], le nombre important de paramètres pourrait limiter les erreurs sur les calculs. En plus du nombre de paramètres, DRASTIC a été identifiée comme l'une des méthodes de vulnérabilité intrinsèque la plus utilisée à travers le monde [2]. Quant à la méthode SINTACS, considérée comme adaptée aux régions méditerranéennes, elle a déjà donné des résultats intéressants au Nigéria [12], zone climatique similaire à notre zone d'étude. Pour la validation des résultats, une marge d'erreur sur sera déterminée sur les 2 cartes suivi de la suivie de leur superposition à la carte des teneurs en sels qui témoigne d'une infiltration de polluants depuis la surface [13].

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La région de M'Bahiakro est localisée dans la partie centrale de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 4°19 et 4°21 W ainsi que les latitudes 7°27 et 7°29 N (Fig.1). Les formations géologiques rencontrées dans la zone sont composées de roches volcano-sédimentaires. Le relief est globalement monotone avec des plaines dont les altitudes varient entre 120 et 137 m impliquant ainsi un réseau hydrographique moins dense. La pluviométrie moyenne annuelle reste relativement faible, soit environ 1000 mm/an, répartie sur 4 saisons. Il s'agit de 2 grandes saisons dont l'une sèche allant de décembre à mars et l'autre pluvieuse allant d'avril à juillet ainsi que de 2 petites saisons sèche et pluvieuses variant respectivement de août à septembre et d'octobre à novembre. Les épaisseurs des formations altérites sont souvent importantes atteignant souvent les 70 m. La recharge reste importante au niveau des aquifères d'altérites où elle dépasse très souvent les 100 mm par saison. La population riveraine est estimée à environ 40 000 habitants.

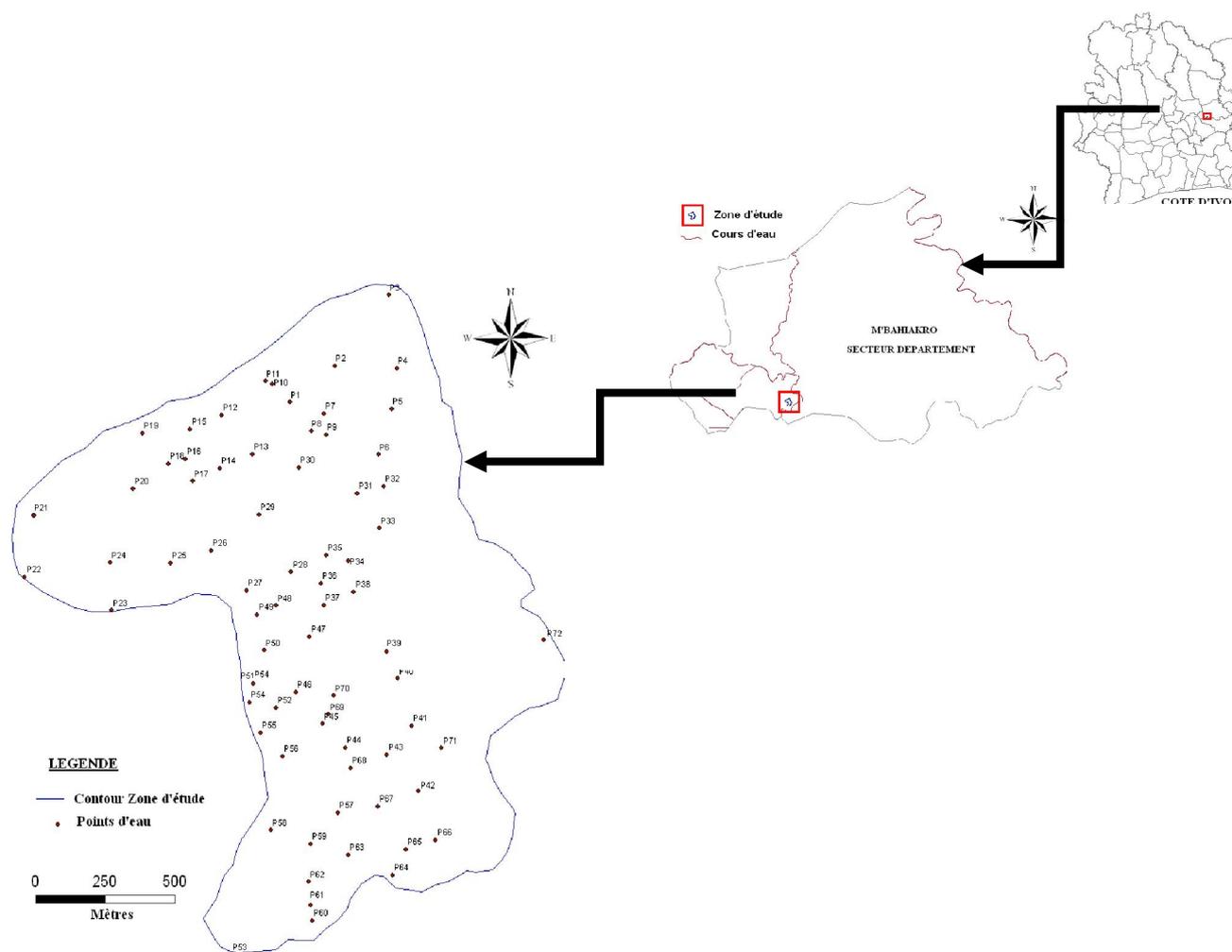


Fig. 1. Présentation de la zone d'étude

2.2 Matériel

Le matériel utilisé se compose d'une sonde piézométrique pour mesurer le niveau d'eau dans les puits. Un GPS, étalonné à partir d'un point géodésique situé dans la cour de la Préfecture, pour relever coordonnées des différents points et leur altitude. Une sonde multiparamètres pour mesurer les paramètres physiques de ces eaux de puits (Fig.2). Les mesures ont été effectuées sur 72 puits bien repartis dans la ville.



Fig. 2. Matériel utilisé : A : GPS utilisé sur un point géodésique + Point géodésique ayant servi à l'étalonnage du GPS; C : Appareil multi paramètres utilisé pour la détermination des paramètres physiques in situ. B : Sonde piézométrique.

2.2 METHODES

Les méthodes utilisées sont celles de DRASTIC et SINTACS. Le choix de DRASTIC se justifie par le fait que cette méthode demeure la plus appliquée et qui a donné les résultats assez importants dans l'évaluation de la vulnérabilité. En Côte d'Ivoire, plusieurs travaux sur l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution ont adopté cette méthode [14]- [17]. Quant à la méthode SINTACS, bien que moins appliquée en Côte d'Ivoire, elle reste l'une des méthodes qui ont toujours donné de meilleurs résultats à travers le monde de façon générale [12], [19], [20]. Ces deux méthodes ont la particularité d'utiliser les mêmes paramètres avec toutefois des notes qui varient d'un paramètre à un autre selon la méthode.

2.2.1 DESCRIPTION DES PARAMETRES

Ces paramètres sont : la profondeur de la nappe, la recharge ou l'infiltration, le type d'aquifère, le type de sol, la topographie, la nature de la zone vadose et la conductivité hydraulique. Une description de ces paramètres se présente comme suit :

2.2.1.1 LA PROFONDEUR DE LA NAPPE

Le nom de ce paramètre varie selon la méthode. Ainsi niveau de DRASTIC, il représente le paramètre D, et au niveau de SINTACS le paramètre S. Il reste l'un des paramètres les plus importants au niveau des deux méthodes. Il donne une idée de la distance que doit parcourir le polluant avant d'atteindre la nappe. Il joue un grand rôle car il permet d'atténuer la pollution lorsque le niveau d'eau dans les nappes augmente [21]. Au cours de cette étude, il a été mesuré sur 72 puits après un temps de repos d'environ 24 heures pour être considéré comme piézomètre. Elle varie en moyenne généralement de 1,16 m à 6,75 m.

2.2.1.2 LA RECHARGE NETTE (RN)

La recharge nette représente la frange d'eau qui s'infiltré dans la terre et atteint la nappe. Elle facilite le transport vertical des polluants vers les nappes. Plus la recharge est importante, plus le potentiel de contamination est important et plus la note qui lui est attribuée est importante. Selon [20], la frange de la précipitation qui participe à la recharge pourrait être estimée entre 30 et 40%. Pour l'estimation de cette recharge, nous avons utilisé des puits tests au niveau desquels nous avons considéré qu'aucun prélèvement n'a été fait. Nous avons donc fait la différence entre les niveaux statiques relevés au niveau de ces forages pendant les saisons sèche (n_1) et pluvieuse (n_2) rapporté à la valeur de recharge la plus élevée (a). Un coefficient (p) a donc été déterminé et multiplié par l'infiltration calculée à partir des données pluviométriques.

$$p = \frac{n_2 - n_1}{a} \quad \text{et} \quad Rn = p \times R$$

avec Rn , la recharge nette calculée et R la recharge déterminée sur l'ensemble de la zone d'étude et qui est homogène et égale à 342 mm.

2.2.1.3 L'IMPACT DE LA ZONE NON SATURÉE ET TYPE D'AQUIFERE

Si la zone non saturée représente la couche au-dessus du niveau statique qui est non saturée ou saturée de façon discontinue. Il est sous l'influence du type de sol et des roches au-dessus du niveau de statique. L'aquifère concerné au cours de cette étude est celui des altérites qui renferme une nappe libre sous-jacente. Ce type d'aquifère se confond à la zone non saturée et donc possède les mêmes caractéristiques.

Dans le cadre de cette étude, la détermination de la nature de la zone vadose tient compte de la perméabilité du sol et du niveau statique. Cette méthode a déjà été adoptée par [21] qui ont estimé que cette zone permet d'évaluer la migration du potentiel polluant vers la nappe.

Impact de la zone vadose = Conductivité Hydraulique + Niveau statique

2.2.1.4 TOPOGRAPHIE

La topographie représente la variabilité de la pente de la surface terrestre. Le degré de cette pente déterminera la puissance d'infiltration des eaux de ruissellement. Cette pente indique si l'eau va ruisseler à la surface, ou si elle va s'infiltrer dans le sol [22]. En effet, plus la pente est forte, plus le ruissellement est fort et moins l'eau parvient à s'infiltrer. La carte des pentes a été générée sous ArcGis 9.3 à partir des relevés GPS sur le terrain. Les données topographiques relevées varient entre 122 m et 139 m. A partir de ces données les valeurs de pente allant de 0 à 6 % ont été déterminées.

2.2.1.5 TYPE DE SOL

Le sol a un impact sur la frange d'eau qui s'infiltré à travers le sol pour atteindre les ressources en eau souterraine et donc la migration verticale des polluants à travers la zone non saturée [23]. Il influence ainsi le temps de migration des contaminants vers la nappe [24]. Dans la zone, 2 types de sol ont été identifiés sur la base des observations faites sur le terrain. En effet, dans les zones de faible altitude variant généralement entre 128 m et 132 m, les sols sont similaires aux sols hydromorphes des bas-fonds. Ils se rencontrent le plus souvent dans la partie sud du secteur d'étude. A partir des altitudes supérieures à 132 m, les sols observés sont semblables aux sols sablo-argileux.

2.2.1.6 CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

Elle indique la capacité d'un aquifère à se laisser traverser par l'eau. Plus elle est élevée plus les potentialités de contamination de la nappe sont importantes [24]. Elle contrôle le taux de transfert de l'eau souterraine à travers la zone saturée et donc le taux de transfert des polluants [22]. La conductivité hydraulique verticale a été utilisée au cours de cette étude. Dans la ville de M'bahiakro, site de cette étude, les valeurs de conductivité hydrauliques déterminées restent relativement faibles variant entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ m/s et $11,7 \cdot 10^{-3}$ m/s.

2.2.2 METHODE DRASTIC

La méthode DRASTIC, développée par [3] sous l'égide de l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA, est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères, par systèmes paramétriques. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales des sept facteurs déterminant ci-dessus. Ces sept paramètres découpent, de façon schématique, une unité hydrogéologique locale en ses principales composantes, lesquelles influencent, à différents degrés, les processus de transport et d'atténuation des contaminants dans le sol, ainsi que leur temps de transit. La plus petite note représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination. Une valeur numérique, appelée indice de vulnérabilité DRASTIC et notée ID, est déterminée; elle décrit le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la somme des produits des notes par les poids des paramètres correspondants.

2.2.3 METHODE SINTACS

La méthode SINTACS, développée par [7], est la version italienne de la méthode DRASTIC : c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranéennes. Cette méthode de vulnérabilité verticale intrinsèque prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC. La spécificité de cette méthode par rapport à la méthode DRASTIC est qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité : les scénarios « impact normal » et « impact sévère », scénarios relatifs aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, localisés dans des aires à sols épais, avec une profondeur du plan d'eau qui n'est pas très élevée. Les zones relatives au premier scénario correspondent aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées et une utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres urbains très dispersés, tandis que les zones relatives au deuxième scénario correspondent aux régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets. Les trois autres scénarios sont le scénario « drainage important à partir d'un réseau superficiel » relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau, le scénario « terrain très karstifié », concernant les aires caractérisées par une forte karstification, et le scénario « terrain fissuré », correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation. Parmi ces 5 scénarios, seul le scénario impact normal pourrait correspondre aux caractéristiques de cette zone.

2.2.4 DETERMINATION DE LA MARGE D'ERREUR

Pour une meilleure comparaison des différentes méthodes, les incertitudes ont été déterminées sur les différents paramètres suivis du calcul de la marge d'erreur sur chaque carte. Les valeurs obtenues vont être comparées entre elle pour identifier celle qui restitue le mieux l'état de pollution des eaux souterraines dans ces zones. L'incertitude est évaluée à partir de la formule suivante:

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}$$

Avec $\Delta \bar{x}$: incertitude sur la moyenne de chaque série de données, σ : Ecart type, m : nombre de données, x_i : la valeur de chaque paramètre et \bar{x} : la moyenne de chaque série de données.

A partir de l'incertitude déterminée sur chaque paramètre, nous avons calculé la marge d'erreur (Er) sur la base de la formule appliquée par [17] sur chaque carte comme suit :

$$Er = \frac{\sum \Delta x}{Iv}$$

Avec Iv comme la vulnérabilité globale pour chaque méthode.

Pour attester de la robustesse de nos résultats, nous allons superposer les cartes de vulnérabilité qui seront obtenues sur la carte des teneurs en salinité. Selon les travaux de [18], le taux de recharge pourrait donc contribuer à augmenter le taux de sels à partir d'une infiltration depuis la surface. Les nitrates n'ayant pas été analysés, la salinité se présente comme le seul paramètre au niveau des données disponibles susceptibles de provoquer une pollution d'origine superficielle.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 VULNERABILITE A LA POLLUTION

Les différents paramètres décrits dans la partie méthode nous ont permis de d'élaborer les cartes thématiques présentées à la figure 3. L'analyse de l'ensemble de ces cartes thématiques montre que les zones qui présentent les plus grands risques de menaces sont concentrées dans la partie sud de la zone d'étude.

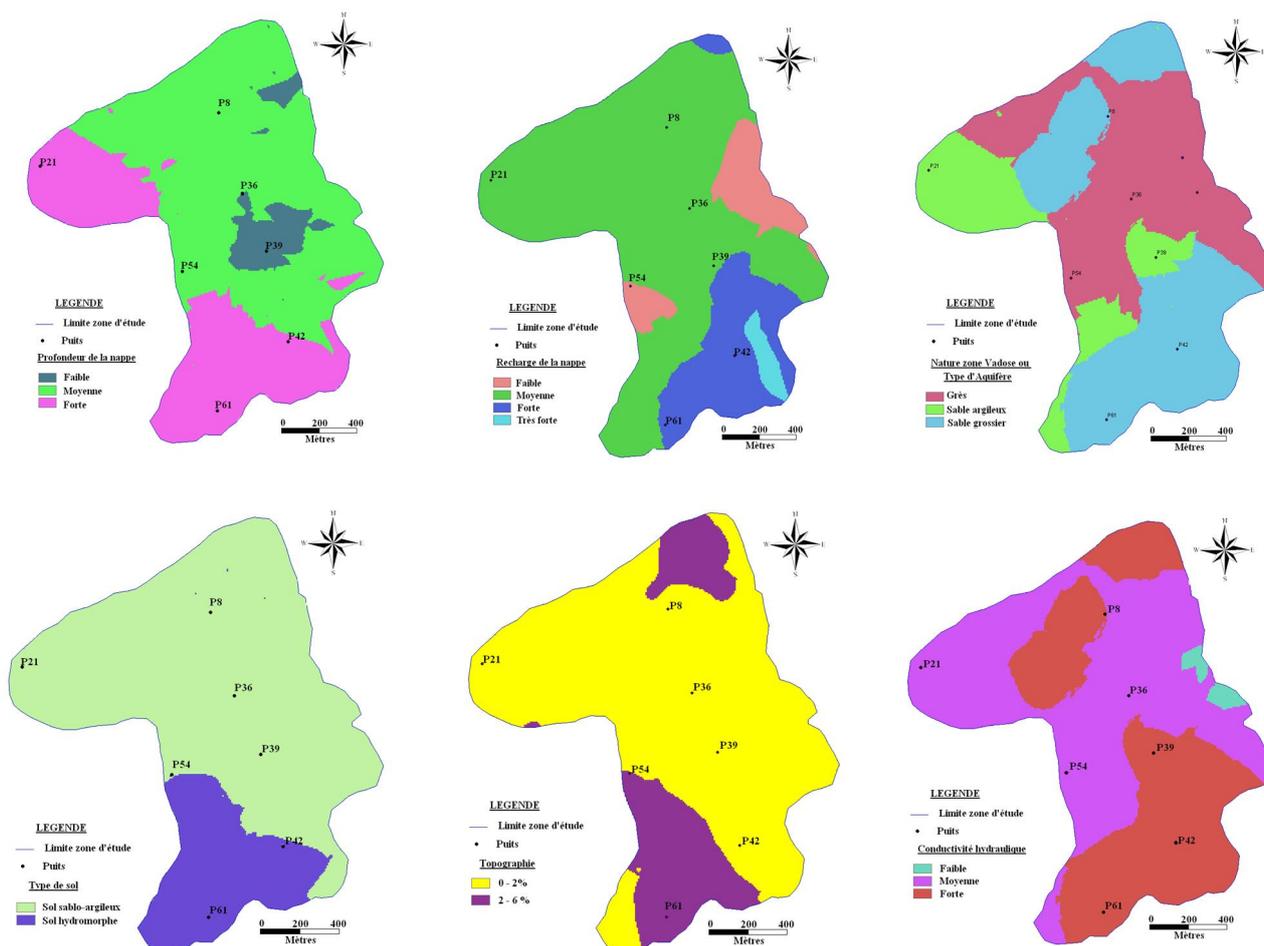


Fig. 3. Présentation des cartes thématiques

La combinaison de l'ensemble de ces paramètres a permis de déterminer les indices DRASTIC et SINTACS qui varient de 103 à 174 pour DRASTIC et de 119 à 200 pour SINTACS. Sur la base de classification [3], 3 classes ont élaborées pour DRASTIC (Fig. 4). Elles couvrent respectivement pour la classe faible, moyenne et forte, 39 %, 50 % et 11% de la zone d'étude.

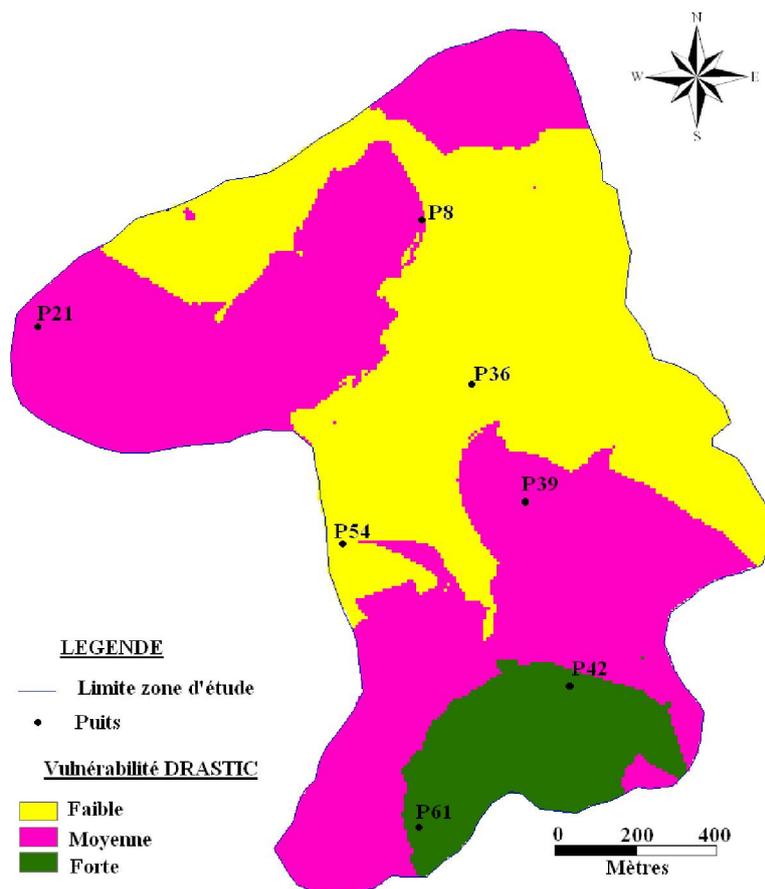


Fig. 4. Carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC

Au niveau de la méthode SINTACS, 3 classes aussi ont été identifiées à partir de ces indices (Fig.5). Il s'agit des classes de vulnérabilité faible (40 %), moyenne (50 %) et forte (10 %). Pour les deux méthodes, les classes de fortes vulnérabilités se rencontrent dans les zones où les sols sont généralement constitués de couches semblables à des sols hydromorphes.

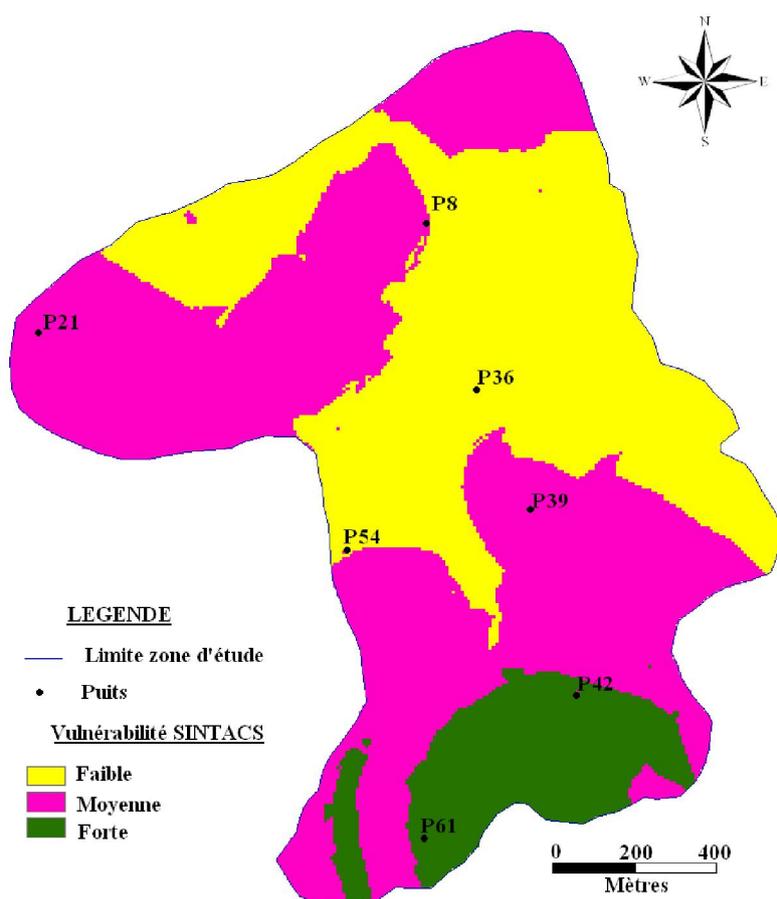


Fig. 5. Carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode SINTACS

Quelque soit la méthode utilisée, la classe de vulnérabilité la plus importante est la classe moyenne suivie de la classe faible. Ces deux classes s'alternent dans les zones centre et nord où le type de sol est généralement constitué de sable argileux. Quant à la classe de forte vulnérabilité qui fait ressortir les zones menacées par la pollution, elle couvre respectivement 11 et 10 % pour DRASTIC et SINTACS. Les zones couvertes par ces classes au niveau de la méthode DRASTIC sont sensiblement identiques à celles observées au niveau de la méthode SINTACS. La faible différence obtenue entre les deux zones pourrait se justifier par le type de sol qui est plus important au niveau de SINTACS avec une note de 4 contre 2 pour DRASTIC. La présence de ces fortes vulnérabilités pourrait se justifier par l'existence des zones de fortes recharges auxquelles il faut associer les secteurs de faibles profondeurs de la nappe. L'importance de la profondeur des nappes dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution a déjà été soulignée par [2]. Toutefois, le paramètre qui influence fortement cette vulnérabilité est le type de sol. En effet, l'analyse de cette carte montre que, plus de la moitié des zones de fortes vulnérabilités se rencontre dans les secteurs où le type de sol est constitué de vases jugées très perméables et donc présentant des menaces réelles sur la qualité des ressources en eau souterraines. L'importance du type de sol a été soulignée par [19], qui a indiqué que la présence d'un sol très perméable associée à une faible profondeur de la nappe et à une forte recharge serait une condition propice pour accroître la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Quant aux classes de vulnérabilités moyenne et faible qui s'alternent dans les parties centrale et nord couvrant à elles seules près de 90 % de la zone d'étude, quelque soit la méthode adoptée, elles se rencontrent dans les zones où la recharge reste forte. A ces zones de fortes recharges, il faut ajouter la nature de la zone vadose ou du type d'aquifère. En effet, l'analyse de cette carte montre que quelque soit la méthode adoptée, les zones de faibles vulnérabilités sont observées généralement dans les secteurs où le type d'aquifère ou zone vadose est constitué de grès qui sont des formations imperméables. Les zones de vulnérabilité moyennes se rencontrent quant à elles globalement au niveau des sables argileux avec quelques rares apparitions de sables grossiers comme on le constate dans la partie centre-nord.

3.2 RESULTATS DE LA MARGE D'ERREUR

Les résultats de la marge d'erreur déterminés sont respectivement de 16,74 % pour la méthode DRASTIC et 18,07 % pour la méthode SINTACS (Tab.1). Ces valeurs restent légèrement faibles par rapport celle déterminée à partir de DRASTIC au niveau d'Aboisso qui était de 22 % [17]. Cette différence pourrait s'expliquer par la qualité des données. Aussi, ces marges d'erreurs restent –elles sensiblement identiques. Toutefois, celle déterminée par DRASTIC reste légèrement supérieure. Elle pourrait être considérée comme la méthode la mieux adaptée pour cette zone. Cette importance relative de la méthode DRASTIC pourrait se justifier par l'inadaptation de la méthode SINTACS aux zones tropicales. En effet, SINTACS constitue une adaptation de la méthode DRASTIC aux zones méditerranéennes. A l'inverse, DRASTIC est conçue pour être applicable à tous types de formation comme le traduisent les notes attribuées aux différents couches aquifères et de la zone non saturée.

Tableau 1. Estimation des incertitudes sur les paramètres DRASTIC / SINTACS

	D	R	A	S	T	I	C	Tot_Id
N_DRASTIC	5	4	3	2	1	5	3	23
Idm	40	18	18	11	9,5	30	9	135,5
Inc-DRASTIC	2,89	6,22	1,73	5,00	0,50	2,89	3,46	22,69
	S	I	N	T	A	C	S	Tot_Is
N_SINTACS	5	4	5	4	3	3	2	26
Ism	40	18	30	22	9	18	19	156
Inc-SINTACS	2,89	6,22	2,89	10,00	3,46	1,73	1,00	28,19

- N_DRASTIC / N_SINTACS : Notes attribuées aux paramètres DRASTIC / SINTACS
- Idm / Ism : Indice DRASTIC Moyen / DRASTIC Moyen
- Inc-DRASTIC / Inc-SINTACS : Incertitude sur le paramètre DRASTIC / SINTACS
- Tot_Id / Tot_Is : Total Indice DRASTIC / SINTACS

La superposition de la carte de salinité (Fig. 6), susceptible d'indiquer une pollution d'origine anthropique, aux cartes de vulnérabilité obtenues révèle que le taux de coïncidence entre les zones de vulnérabilités fortes et celles des teneurs élevées en salinité reste relativement peu élevé.

Cela pourrait se justifier par l'existence de sources de pollution autres que celles provenant de la surface. En effet, dans la localité, le type d'assainissement utilisé est celui des latrines qui existent à proximité de la plupart des puits à une distance comprise généralement entre 4 et 15 m selon les observations faites sur le terrain. Or, ces latrines ont des profondeurs sensiblement identiques à celles des puits. Une communication latérale entre ces deux ouvrages pourrait en partie expliquer ce fait. Les travaux de [14] ont montré que l'enrichissement en sels tels que les sulfates et les chlorures pourrait se justifier par la présence des évaporites et des substratums marnogypsifères et/ou à une contamination d'origine agricole. Cela s'expliquerait par une infiltration à partir de la surface des eaux d'irrigation ou de ruissèlement chargées en sels fertilisants. Ainsi, en absence de gybsite et d'exploitation agricole dans notre zone, ces teneurs élevées de sels dans ces eaux souterraines pourraient témoigner de la présence des déchets humains.

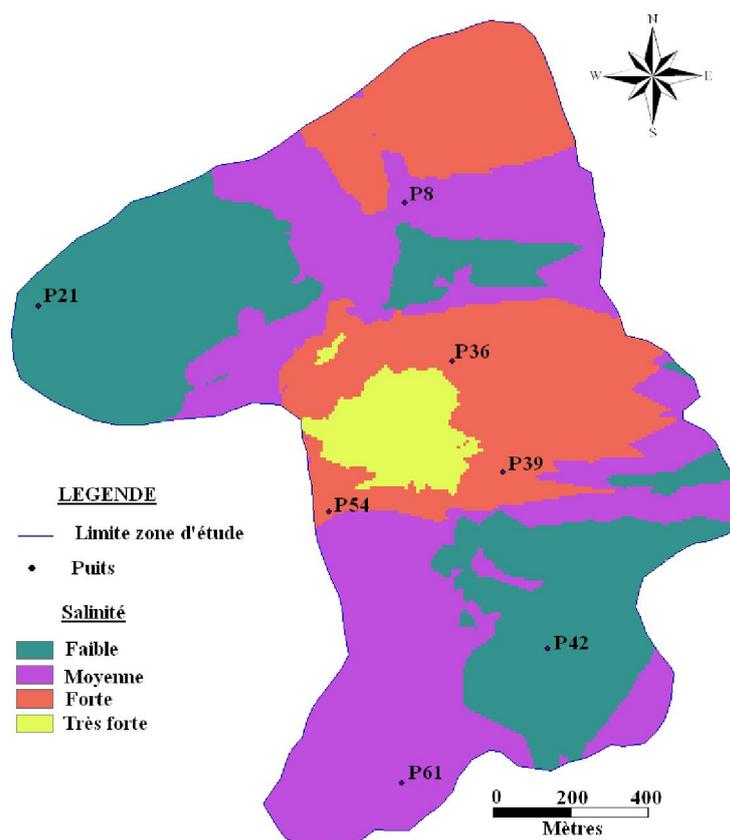


Fig. 6. Carte des teneurs en sels

De plus, les travaux de [25] ont, dans la localité de M'bahiakro montré que la présence des sels dans les eaux souterraines n'est pas d'origine superficielle mais issue d'une minéralisation qui pourrait provenir probablement des latrines en proximité des fosses septiques confirmant ainsi les résultats obtenus.

4 CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons évalué la vulnérabilité à la pollution à partir de 2 méthodes que sont les DRASTIC et SINTACS. Les résultats font ressortir 3 classes de vulnérabilité qui se rencontrent à quelques exceptions dans les mêmes zones. Ce sont les classes de vulnérabilité faible, moyenne et forte. Les classes de faibles vulnérabilités qui alternent avec celles de vulnérabilité moyenne qui se rencontrent dans les parties centrale et nord du secteur d'étude. Ces 2 classes couvrent les zones où la recharge est moyenne, le sol est de type hydromorphe avec un aquifère constitué de grès et une profondeur de nappe moyenne. Les classes de vulnérabilités fortes occupent la partie sud où le sol est de type hydromorphe.

Les marges d'erreur calculées pour apprécier le taux de véracité des cartes obtenues donnent des valeurs respectives de 16,74 % et 18,07 % pour DRASTIC et SINTACS. Ces résultats révèlent que bien que ces valeurs soient sensiblement identiques, la méthode DRASTIC reste la mieux adaptée.

La superposition à ces deux cartes de la carte de teneurs en sels qui témoigne d'une infiltration d'origine superficielle, révèle un taux de coïncidence relativement peu élevé traduisant le fait que la pollution observée au niveau dans les puits pourrait avoir une source autre que l'origine superficielle.

Les fortes valeurs marge d'erreur obtenues ouvrent les perspectives de la révision des notes des différents paramètres de vulnérabilité pour l'adapter à la zone d'étude.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent à IFS pour le soutien apporté au cours de la réalisation de cette étude. Nous remercions aussi la population riveraine de M'bahiakro pour leur contribution dans la réalisation de cette étude.

REFERENCES

- [1] US EPA, "Environmental Protection Agency. DRASTIC: a standard system for evaluating groundwater potential using hydrogeological settings, Ada, Oklahoma" WA/EPA Series; 163, 1985.
- [2] I. S. Babiker, A. A. Mohamed, T. Hiyama, K. Kato, "A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan." *Science of the Total Environment* 345 (2005) 127– 140, 2005.
- [3] L. Aller, J. H. Lehr, R. Petty and T. Bennett, "DRASTIC: A standardized system to evaluate Groundwater Pollution using Hydrogeologic setting". *Jour. Geol. Soc. India*, 29(1), pp. 23-37, 1987.
- [4] S. Foster, "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG (eds) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*". Committee on Hydrological Research, The Hague, pp. 69–86, 1987.
- [5] D. Van Stempvoort, L. Ewert and L. Wassenaar, "Aquifer vulnerability index (AVI): a GI compatible method for groundwater vulnerability mapping." *Canadian Water Resources Journal* 18:25–37, 1993.
- [6] M. Civita, *Le carte della vulnerabilit'a degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica [Contamination vulnerability mapping of the aquifer: theory and practice]*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Pitagora, Italy. 1994.
- [7] N. Doerfliger and F. Zwahlen, "Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK): application to Groundwater Protection Zones". Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, Switzerland, DOI 10.1007/s11270-007-9433-x, 1998.
- [8] N. Doerfliger, P. Y. Jeannin and F. Zwahlen, "Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)". *Env Geol* 39(2):165–176, 1999.
- [9] N. Goldscheider, M. Klute, S. Sturm and H. Hotzl, "The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers." *Z Angew Geol* 46 (3):157–166, 2000.
- [10] J. M. Vias, B. Andreo, M. J. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo and P. Jimenez, "Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in southern Spain." *Hydrogeol J* 14:912–925, 2006.
- [11] B. M. Evans and W. L. Myers, "A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC". *Journal of Soil and Water Conservation* 29:242–245, 1990.
- [12] A. K. Mustafa, A. El-Naqa and H. Nezar, "Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area." *Jordan Environ Geol* (2006) 50: 651–667, DOI 10.1007/s00254-006-0239-8, 2006.
- [13] C. Fehdi, A. Boudoukha, A. Rouabhia et E. Salameh, "Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tebessa, Sud-Est algérien) ". *Afrique Science*, 5(2), pp 217 – 231, 2009.
- [14] J. P. R. Jourda, M. B. Saley, K. J. Kouamé, B. H. Kouadio et M. Razack, "Gestion et protection des ressources en eaux souterraines : contribution d'un SIG à la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères fissures de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) selon la méthode DRASTIC". *Actes de la conférence Francophone, SIG 2005 du 5 – 6 octobre 2005, Paris*, 21p, 2005.
- [15] B. Dibi, D. Inza, K. Koffi, N. Soro, K. J. Kouame et I. Savane, "Evaluation et Cartographie de la Vulnérabilité à la Pollution en Aquifère Confiné Selon La Méthode DRASTIC: Cas de La Région d'Aboisso, Sud-Est de La Côte d'Ivoire". *European Journal of Scientific Research*, ISSN: 1450-216X Volume 18, No 3, pp 500 – 513, 2007.
- [16] I. Doumouya, B. Dibi, K. I. Kouame, B. Saley, J. P. Jourda I. Savane and J. Biemi "Modelling of favourable zones for the establishment of water points by geographical information system (GIS) and multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Cote d'Ivoire) ". *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-012-1622-2, 2012.
- [17] R. Houria "Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région de Din Ben Noui Biskra". *Mémoire Master*, 83p, 2007.
- [18] M. H. Hamza, A. Added, A. Frances and R. Rodriguez, "Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf ." *CR Geosci* 339:493–505, 2007.
- [19] J. A. Mejia, R. Rodriguez, A. Armienta & E. Mata and A. Fiorucci, "Aquifer Vulnerability Zoning, an Indicator of Atmospheric Pollutants Input? Vanadium in the Salamanca Aquifer, Mexico." *Water Air Soil Pollut* 185:95–100, 2007.
- [20] H. Baalousha, "Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC." *Env Geol* 50:405–414, 2006.

- [21] K. Srinivasamoorthy K. Vijayaraghavan : M. Vasanthavigar : R. Rajivgandhi : S. Chidambaram : P. Anandhan : R. Manivannan, "Assessment of groundwater vulnerability in Mettur region, Tamilnadu, India using drastic and GIS techniques." Arab J Geosci. DOI 10.1007/s12517-010-0138-x, 2010.
- [22] A. A. Ahmed (2009) "Using generic and pesticide DRASTIC GISbased models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt." Hydrogeol J. doi:10.1007/s10040-009- 0433-3, 2009.
- [23] E. Sener, S. Sener and A. Davraz, "Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey)." Hydrogeology Journal 17(8):2023–2035, 2009.
- [24] A. H. Al Hallaq. and. B. S. A. Elaish, "Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip—Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment. " Arab J Geosci DOI 10.1007/s12517-011-0284-9, 2011.
- [25] K. I. Kouamé, K. S. Konan, K. L. Kouassi, B. Dibi, M. Soumahoro, I. Savane and D. Gnakri (2012). "Assessment of wells water quality and their suitability for drinking in M'bahiakro city (Côte d'Ivoire)." IJCS, ISSN: 2067-533X, Volume 3, Issue 4: 289-300, 2012.