

Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe souterraine d'Isiro (Nord-est de la RD Congo) à partir de la méthode DRASTIC

Mokili MBULUYO*, Faidance MASHAURI et Patrick M'PUTU

Université de l'Uélé, Isiro, Faculté des Sciences Géologiques, Rép. Démocratique du Congo

* Correspondance, courriel : mkmraph@sympatico.ca

Résumé

La nappe souterraine de la ville d'Isiro est de type d'aquifère d'altérites. Elle constitue la principale source d'approvisionnement en eau pour la consommation de la population. Elle est de plus en plus exploitée et menacée par le développement des activités humaines (densification de l'espace urbain, construction non contrôlée des rues, des habitations, des latrines et des fosses de déchets ménagers). L'objectif de cette étude est d'élaborer la carte de vulnérabilité globale à la pollution de cette nappe souterraine. La méthode utilisée pour réaliser cette cartographie est la méthode à cotation numérique DRASTIC, exploitant les fonctionnalités du SIG (système d'information géographique) offertes par les logiciels QGIS et SURFER11. Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode ont été groupés en trois classes (faible, moyenne et élevée). Ces résultats montrent que la classe de vulnérabilité moyenne est la plus dominante, avec un pourcentage de 65 % de la zone d'étude. La classe de vulnérabilité faible, qui représente 30 % de la zone, se localise principalement dans les secteurs est, ouest et sud, alors que la classe de vulnérabilité élevée (5 %) est observée au nord et au centre de la ville d'Isiro. Notons que la grande majorité des populations (soit 69 %) de la ville d'Isiro utilisent, pour leur approvisionnement en eau potable, les eaux de la nappe souterraine (puits traditionnels et sources).

Mots-clés : *vulnérabilité, pollution, aquifère des cuirasses semi-confiné, aquifère d'altérites, DRASTIC, Isiro, RD Congo.*

Abstract

Groundwater pollution vulnerability map of Isiro (Northeastern Democratic Republic of the Congo) using the DRASTIC method

The groundwater of the city of Isiro is the main source of water supply for consumption by the city's inhabitants. It is increasingly being exploited and threatened by the growth of human activities (densification of urban space, uncontrolled construction of streets, dwellings, latrines and household waste pits). We conducted this study with an eye to conserving the groundwater resources of this city and improving their management. The objective is to develop an overall groundwater pollution vulnerability map. The method used to create this map is the DRASTIC numerical rating method, using the GIS (geographic information system) functionalities offered by the software programs QGIS and SURFER11. The vulnerability indices obtained using these methods were grouped into three classes (low, moderate and high). The results show that the moderate vulnerability class dominates, as it covers almost the entire sector concerned, for a proportion equivalent to 65 % of the study area. The low vulnerability class represents 30 % of the area and is mainly located in the

eastern, western and southern parts, while the high vulnerability class (5 %) is seen in the northern and central parts of the city of Isiro. Therefore, regular analytical monitoring of this groundwater is necessary, as well as systematic monitoring of the activities conducted at its surface. Note that the vast majority of the inhabitants (i.e., 69 %) of the city of Isiro use groundwater for their source of drinking water (traditional wells and springs).

Keywords : *vulnerability, pollution, groundwater, semi-confined aquifer, DRASTIC, Isiro, D.R. of the Congo.*

1. Introduction

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution [1]. Cette pollution peut être engendrée par une source ponctuelle (décharge, cimetière, rejet d'eau usée domestique ou industrielle, etc.), linéaire (réseau d'eau usée, réseau de drainage agricole, etc.) ou diffuse (engrais chimiques, pesticides, herbicides, épandage des eaux usées domestiques, etc.). Dans la ville d'Isiro, la nappe d'eau souterraine est essentiellement alimentée par les eaux de pluie. Ces ressources en eaux souterraines sont exposées à plusieurs menaces liées notamment à l'absence de la réglementation relative à la gestion et à l'utilisation des eaux souterraines et à la densification de l'espace urbain (habitats). De nombreuses latrines sont positionnées en amont, à une distance inférieure à 15 m des puits traditionnels. Malgré l'existence de ces importantes sources de pollution, les ressources en eaux souterraines de cette nappe sont de plus en plus sollicitées pour couvrir les besoins croissants en eaux de la population urbaine. La protection des eaux souterraines est une question préoccupante tant au niveau de l'exploitation de la ressource qu'à celui des impacts sur la santé humaine. Les maladies d'origine hydrique dues à la consommation de l'eau insalubre représente la première cause de mortalité dans cette ville. Soulignons que les cartes intégrées dans cette étude constituent un véritable outil d'aide à la décision et dont l'interprétation permettra de contribuer à la prescription des mesures de protection de la qualité des eaux souterraines consommées par la population de la ville d'Isiro.

2. Méthodologie

2-1. Contexte physiographique

La ville couvre une superficie de 54 Km² et comprise entre les latitudes 2,7° et 2,8°N et les longitudes 27,5 et 27,6°E (*Figure 1*). Administrativement, la ville est constituée des 11 quartiers, à savoir : Tely, Mambaya, N'Sele, Bazanga, Gossamu, Kongoli, Dingida, Edindale, Madjo, Akpokoma et Zebwandra. La population est estimée à environ 413 533 habitants (Rapport annuel de la ville d'Isiro, 2015). Du point de vue morphologique, Isiro est caractérisé par de vastes plateaux monotones dont l'altitude moyenne varie entre 727 et 770 m. Le plus étendu étant le plateau de Mendambo. Les plateaux sont séparés par des vallées étendues et évasées parfois sans écoulement ou occupées par des rivières Ane et Akpokoma au sud, Mendambo au centre et Tely au nord. Les itabirites forment des chaînes montagneuses (par exemple Mont Ambambula) qui surplombent les plateaux au sud de la ville culminant à 900 m. Rappelons que les paysages physiographiques de la ville d'Isiro correspondent aux modelés de pénéplaines, témoins d'anciennes surfaces d'aplanissement reconnues dans le bassin du Congo [1 - 4]. Le climat de la ville d'Isiro est de type tropical humide caractérisé par deux saisons bien marquées toutefois inégalement réparties. La saison pluvieuse plus longue dure environ 8 mois, allant de mars à novembre; la saison sèche plus courte, soit 4 mois, s'étale de la mi-novembre jusqu'au mois de février. La pluviométrie annuelle varie entre 1600 à 1700 mm / an. La sécheresse hydrologique mensuelle

($p < 3$ t, $p =$ Pmm et $t =$ température en $^{\circ}\text{C}$) ne se manifeste qu'à partir de mi-janvier période pendant laquelle certains puits et les sources d'eau tarissent. Notons que le climat de la ville d'Isiro est classé Am, selon les critères de Köppen et Geiger, (tropical à mousson). Ce type de climat constitue la transition entre le climat équatorial (Af) et le climat à saison sèche marqué (Aw). La température moyenne de chaque mois de l'année est supérieure à 18°C . Selon la classification des sols congolais [6, 7] les sols de la région d'Isiro appartiennent aux grands groupes des ferrisols et des ferralsols, au sous ordre des hygrokaolisols et à l'ordre des kaolisols. Les ferrisols et ferralsols caractérisent les plateaux alors que les hygrokaolisols ainsi que les kaolisols occupent les vallées. Cette couche pédologique surmonte la formation indurée constituée de carapaces ou des cuirasses latéritiques et des grenailles latéritiques.

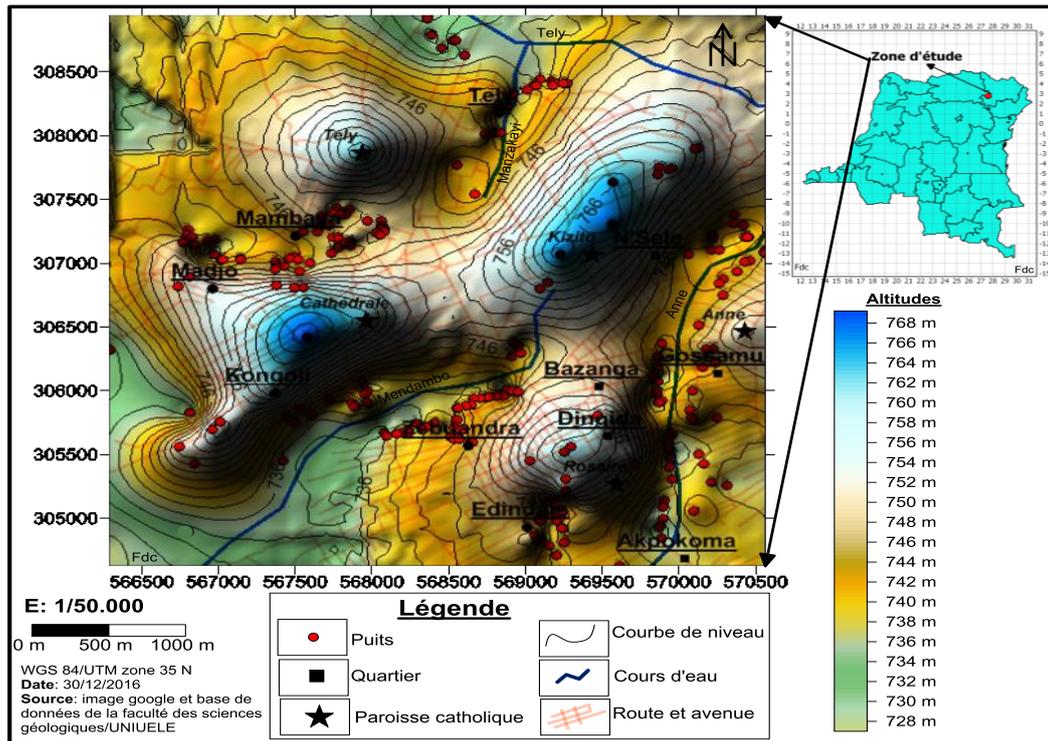


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

2-2. Contexte géologique et caractéristiques hydrogéologiques des nappes souterraines

Sur le plan géologique, la carte géologique de reconnaissance d'Isiro N2 / 27 au 1 / 200 000 (Service géologique du Zaïre, 1979) montre que le soubassement est formé essentiellement des formations archéennes représentées par le Supergroupe du Kibali (KL2). Celui-ci comprend surtout des amphibolites, schistes à actinote, talcschistes, séricitoschistes, schistes albitiques avec des chloritoschistes, schistes à biotite, schistes noirs, roches carbonatées ankéritiques, itabirites et quelques jaspes et quartzites [8]. Une partie des schistes Kibaliennes est faite de laves schistifiées, principalement des spilites et des kératophyres. Le tout est recoupé par des dykes de dolérites, d'âge incertain mais qui appartient à plusieurs venues. Nous distinguons deux couches hydrogéologiques selon leur position topographique.

- 1) Sur les plateaux et les versants, le profil schématique des terrains superficiels, présente deux couches d'origine et de nature différente :
 - La couche pédologique d'environ moins de 1 m d'épaisseur. Elle peut être avec ou sans un horizon A humifère. Les horizons B et C bien développés sont caractérisés par une concentration importante

des éléments argileux particulièrement de la kaolinite reconnue par sa couleur gris-blanchâtre. Cette couche pédologique appartient aux grands groupes des ferrisols et des ferralsols dont les propriétés physico-chimiques sont, un peu partout dans la ville, similaires du point de vue de leur épaisseur, leur apparence plus argileuse, leur texture fine et cohérente, leur grande compacité due aux activités humaines. Ces sols sont relativement moins perméables. Ils constituent une barrière à la circulation d'eau en profondeur ;

- La couche latéritique sous-jacente (10 à 11 m d'épaisseur) est constituée des produits d'altération de la roche en place. Elle présente les faciès suivants :
 - la strate supérieure indurée formée soit de la carapace latéritique friable observée sur le plateau ou soit de la cuirasse latéritique observable sur la pente de versant. C'est la strate des graveleux latéritiques de construction routière largement répandus dans les milieux intertropicaux ;
 - la strate inférieure constituée de saprolite meuble de structure bréchique dans laquelle apparaissent les structures originelles (filonnets fracturés) de quartzite ou de schiste.

Ces deux dernières strates de la couche géologique sont plus poreuses et plus perméables que la couche pédologique qui les surmonte. Elles constituent la principale couche hydrogéologique de la ville d'Isiro. Leur recharge se fait plus latéralement que verticalement du fait de la présence d'une couche relativement imperméable au sommet et de la roche en place à la base. Cette disposition rappelle celle d'une nappe semi-captive. L'alignement observé des puits d'eau (*Figure 1*) sur le rebord supérieur des versants dans les quartiers Zebuandra, Bazanga, Dingida et Gossamu peut être expliqué par les caractéristiques de nappe d'altérites semi captive.

- La roche en place formée de quartzite ou de schistes du Supergroupe du Kibali. Elle surmontée par une saprolite relativement meuble formée des éléments autochtones (quartz) de la roche originelle.
- 2) Les vallées et les bas-fonds des rivières sont couverts des dépôts de sables, de graviers et d'argiles. Ces alluvions forment de nappes libres peu profondes (2 à 3 m) caractéristiques des cours d'eaux. Elles constituent la seconde couche hydrogéologique de la ville d'Isiro.

2-3. Collecte et intégration cartographique de données hydrogéologiques

Les jeux de données utilisées dans cette étude proviennent de la Base des Données Hydrogéologiques (BDH) de la faculté des sciences géologiques de l'Université de l'Uélé. La BDH est une base de données géospatiales compilées à partir de travaux de fin de cycle ainsi que des mémoires de licence réalisés entre 2013 - 2016. Au total 253 puits ont été recensés. Pour cette étude, nous avons retenu 202 puits de plus de 5 ans et dont les mesures des paramètres hydrogéologiques ont fait l'objet de traitements statistiques classiques (variabilité de chaque paramètre, corrélations entre paramètres). Les résultats de traitement de données ont montré que les puits sélectionnés présentent des propriétés assez voisines pour que l'on ne puisse pas les différencier par l'analyse statistique. Le matériel de collecte de données se compose d'une sonde piézométrique sonore (Heron Dipper-T Water-Level Meters) pour mesurer le niveau d'eau dans les puits, un GPS Garmin (Etrex 30), étalonné à partir des coordonnées géographiques du point géodésique du bureau des Postes (Rond-point Lumumba), un fil à plomb et un mètre ruban utilisés respectivement pour mesurer la profondeur et le diamètre des puits. L'intégration cartographique de données de puits a été réalisé avec les logiciels QGIS 2.6 et SURFER 11 et en utilisant des fichiers de données numériques de la base de données hydrogéologiques de la faculté des sciences géologiques incluant la topographie, le réseau routier, les dépôts superficiels ainsi que le réseau hydrographique.

2-4. Détermination de la vulnérabilité à la pollution

Dans la littérature, plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution ont été adoptées. Elles vont des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone saturée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant cette vulnérabilité. Il s'agit des méthodes suivantes : DRASTIC [9], GOD [10], AVI [11], SINTACS [12]. Dans le cadre de la présente étude, nous avons utilisé la méthode DRASTIC du fait de la concordance des paramètres à mesurer que l'on trouve dans notre zone d'étude. Cette méthode fait intervenir les paramètres relatifs à la fois à la recharge de la nappe, à la nature du sol, à la pente topographique ainsi qu'aux caractéristiques hydrogéologiques notamment la porosité, la perméabilité et la conductivité hydraulique du milieu considéré. La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et ALLER et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines [13]. Elle fait partie du groupe des méthodes d'évaluation (de la vulnérabilité des aquifères) pondérées, basées sur l'attribution d'une cotation aux différents paramètres utilisés. Une pondération est également attribuée selon l'importance relative de chacun des paramètres utilisés. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales des sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité :

- D : Profondeur de la surface de la nappe, épaisseur de la zone non saturée ;
- R : Recharge (recharge efficace) ;
- A : Aquifère (nature de la zone saturée ou nature lithologique de l'aquifère) ;
- S : Sol (nature du sol : granulométrie et faciès) ;
- T : Topographie (topographie de terrain : pente en %) ;
- I : Nature (impact) de la zone non saturée ou zone vadose ;
- C : Conductivité hydraulique de l'aquifère.

A chacun de ces paramètres correspond un poids (valeur prédéterminée) compris entre 1 et 5, qui traduisent l'importance du paramètre dans les processus de transport et d'atténuation des contaminants. Un paramètre prépondérant est affecté d'un poids égal à 5 alors qu'un paramètre ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant se voit assigner un poids de 1. Les valeurs des poids des paramètres de la méthode DRASTIC utilisées sont celles définies par les Auteurs de [9]. Ces valeurs sont présentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Poids associés aux paramètres de la méthode DRASTIC [9]

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique	5
R	Recharge	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé	4
A	Lithologie de l'aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand	3
S	Type de sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraine est grande	2
T	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible	1
I	Zone non saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable.	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

A chacun des 7 paramètres est associée une cote variant de 1 à 10, définie en fonction d'intervalles de valeurs (classes). La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination. Une fois les différentes classes définies et leurs côtes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (I_d) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (I_d) calculé est élevé. L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la somme des produits des notes (cotes) par les poids des paramètres correspondants selon la **Formule** suivante :

$$I_d = (DcxDp) + (RcxRp) + (AcxAp) + (ScxSp) + (TcxTp) + (IcxIp) + (CcxCp) \quad (1)$$

où, D, R, A, S, T, I, C , sont les paramètres cités plus haut ; c : cotation accordée à chaque paramètre et p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

L'indice ainsi calculé représente une mesure du niveau de risque de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. Ce risque augmente avec la valeur de l'indice. La **Formule (2)** permet d'effectuer la conversion des indices DRASTIC en pourcentage.

$$I_d \text{ en } \% = \left(\frac{I_d - 23}{203} \right) \times 100 \quad (2)$$

I_d étant l'indice de vulnérabilité de l'unité hydrogéologique calculé.

Ce pourcentage peut prendre la valeur maximale de 100 (226) et une valeur minimale de 0 (23) (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité

Indice DRASTIC (I_d)	Degré de vulnérabilité
23 à 84 (0 à 30 %)	Très faible
85 à 114 (31 à 45 %)	Faible
115 à 145 (46 à 60 %)	Moyenne
146 à 175 (61 à 75 %)	Elevée
176 à 226 (76 à 100 %)	Très élevée

2-5. Description des paramètres DRASTIC

Il s'agit ici de présenter les différentes données utilisées pour l'évaluation des différents paramètres hydrogéologiques. Ces données seront classifiées et se verra attribuée une note qui variera selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité verticale.

2-5-1. Profondeur de la nappe (D)

La profondeur est l'un des paramètres hydrogéologiques le plus important de la méthode DRASTIC. Elle donne une idée de la distance que doit parcourir le polluant avant d'atteindre la nappe. Pour cette étude, les données sur la variation de niveau d'eau proviennent des observations moyennes mensuelles de deux années hydrologiques de novembre 2013 (début de la saison sèche) à mi-janvier 2015. Une année hydrologique de la région correspond à la période commençant en mi-janvier (début de la saison des pluies) et se terminant en mi-novembre (début de la saison sèche). Les données moyennes mensuelles des niveaux d'eau ont été interpolées spatialement par la méthode de Krigeage [14]. À partir de 202 niveaux d'eau, l'interpolation a permis de produire des estimations de niveaux d'eau de la ville d'Isiro. Durant de cette période de deux ans, la profondeur de la nappe d'Isiro varie généralement de 0,5m à 13,75 m. En se basant sur la définition des classes de la profondeur de la nappe (D) selon [15], nous avons retenu les classes suivantes récapitulées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : *Classes, poids, cote et indice du paramètre D (profondeur de la nappe d'Isiro)*

Classe D (m)	Cote (c)	Indice D	Poids
0.5 - 1.5	10	50	5
1.5 - 4.5	9	45	
4.5 - 9	7	35	
9 - 15	5	25	

2-5-2. Recharge efficace

La recharge efficace représente la quantité d'eau qui s'infiltre 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. Elle dépend du climat (précipitations et évapotranspiration), de la topographie et de la nature des formations. Selon [16], la frange des précipitations qui participe à la recharge pourrait être estimée entre 30 et 40 %. L'estimation de la recharge est difficile à déterminer du fait qu'elle est discontinue. Pour estimer 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 statique relevés au niveau de ces puits pendant la saison 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. Cette méthode a déjà été adoptée par les Auteurs de [17].

$$p = \left(\frac{n_2 - n_1}{a} \right) \text{ et } Rn = pxR \tag{3}$$

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

La définition des classes de la recharge (R) a été basée selon la notation accordée par [15]. Les classes ainsi retenues pour le paramètre « D » sont récapitulées dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : *Classes, poids, cote et indice du paramètre R (Recharge de la nappe d'Isiro)*

Classe R (mm)	Cote (c)	Indice R	Poids
17.5 - 25.5	8	32	4
10 - 17.5	6	24	
5 - 10	3	12	
0 - 5	1	4	

2-5-3. Milieu aquifère (A)

Le paramètre milieu aquifère désigne la lithologie de l'aquifère et il dépend de la granulométrie des terrains saturés. Ce paramètre intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Les données collectées sur les logs et les coupes lithologiques de forages et puits réalisés dans la zone d'étude donnent une idée plus ou moins détaillée sur ce paramètre. L'analyse de ces données a illustré que le matériau aquifère de la nappe d'Isiro est constitué essentiellement de cuirasse et gravillon latéritique, d'argile, sable et gravier, et du mélange argile -sable. Les indices correspondant à ce paramètre ont été estimés selon la notation illustrée dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Classes, poids, cote et indice du paramètre A (milieu aquifère de la nappe d'Isiro)

Classe	Cote	Indice A	Poids
Cuirasse et gravillon latéritique	8	24	3
Argile, sable et gravier	7	21	
Argile et sable	6	18	

2-5-4. Nature du sol (S)

Le type de 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 saturé [18]. Il influence ainsi le temps de migration des contaminants vers la nappe [19]. Les informations recueillies à partir des observations faites sur le terrain ont permis de définir la nature du sol dans la ville d'Isiro. Les valeurs indiciaires ont été déterminées selon les classes signalées dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 : Classes, poids, cote et indice du paramètre S (Type de sol d'Isiro)

Classe	Cote	Indice S	Poids
Mince ou absent	10	20	2
Argilo-sablonneux	4	8	
Argile	1	2	

2-5-5. Topographie (T)

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. En effet, plus la pente est forte, plus le ruissellement est fort et moins l'eau parvient à s'infiltrer. Par contre, une zone à faible pente a une tendance à retenir l'eau pendant une longue période, cela permet un plus grand potentiel de migration des contaminants. Le modèle numérique de terrain a été utilisé pour calculer la pente en tous points dans la zone d'étude. Ce modèle a été généré à l'aide de l'extension « Analyse de terrain » du QGIS 2.6. Les valeurs de pente allant de 0 à 7 % ont été déterminées. La définition des classes de pente (T) a été basée selon la notation accordée par [15]. Les classes ainsi retenues pour le paramètre « T » sont récapitulées dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 : Classes, poids, cote et indice du paramètre T (Pentes des terrains d'Isiro)

Classe (en %)	Cote (c)	Indice T	Poids
0 à 2	10	10	1
2 à 6	9	9	
6 à 12	5	5	

2-5-6. Impact de la zone vadose (I)

La zone vadose est une zone insaturée située entre la couche de sol et la nappe d'eau. La nature de cette zone constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants vers l'aquifère. L'influence de cette zone dans la pollution potentielle de l'aquifère dépend essentiellement de sa perméabilité et de sa capacité d'atténuation. Le processus de calcul et de cartographie du thème « I » est le même que celui de la zone saturée (milieu aquifère A). Dans le cadre de

cette étude, la nature de la zone vadose était déterminée par interpolation et corrélation des données de puits d'observation (logs). L'interpolation des notations relatives à ce paramètre a permis de distinguer 3 classes de zones, à degrés de vulnérabilité différents (**Tableau 8**).

Tableau 8 : *Classes, poids, cote et indice du paramètre I (Impact de la zone vadose de la nappe d'Isiro)*

Classe	Cote	Indice I	Poids
Cuirasse et gravillon latéritique	7	35	5
Argile, sable et gravier	4	20	
Argile et sable	2	10	

2-5-7. Conductivité hydraulique de l'aquifère (C)

La conductivité hydraulique contrôle la vitesse de propagation de polluant dans l'aquifère. Elle dépend de la lithologie de l'aquifère. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide. Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour calculer les degrés de vulnérabilité sont celles mesurées lors des essais de perméabilité. Trois classes de conductivité hydraulique ont été distinguées et indexées selon le modèle DRASTC.

Tableau 9 : *Classes, poids, cote et indice du paramètre C (Conductivité hydraulique de l'aquifère de la nappe d'Isiro)*

Classe (10^{-5})	Cote	Indice C	Poids
14,7.10 ⁻⁵ à 32,9.10 ⁻⁵	4	12	3
4,7.10 ⁻⁵ à 14,7.10 ⁻⁵	2	6	
0,47.10 ⁻⁵ à 4,7.10 ⁻⁵	1	3	

Le développement du modèle est basé sur quatre hypothèses majeures : 1) les sources de la contamination potentielles se trouvent à la surface du sol; 2) le contaminant présente la même mobilité que l'eau souterraine; 3) la nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans la définition de la vulnérabilité ;4) le territoire d'application couvre plus de 0,4 Km² [20].

3. Résultats et discussion

L'une des difficultés de l'application de la méthode DRASTIC est les limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres hydrogéologiques. En effet, les limites de classe standard ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes. Ainsi, l'assignation des cotes n'est pas toujours identique à celle définie par la méthode. C'est le cas du paramètre, type d'aquifère [21]. En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité intrinsèque établie par la méthode DRASTIC est fiable. Elle permet d'avoir une idée sur les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte lors de l'aménagement du territoire [22]. Les différents paramètres décrits dans la partie méthode nous ont permis d'élaborer les cartes thématiques. Sur chacune de ces cartes (**Figure 2**), sont délimitées les zones caractérisées par un indice de vulnérabilité partiel du paramètre correspondant. Il faut signaler que les critères type d'aquifère et zone vadose sont représentés par la même carte.

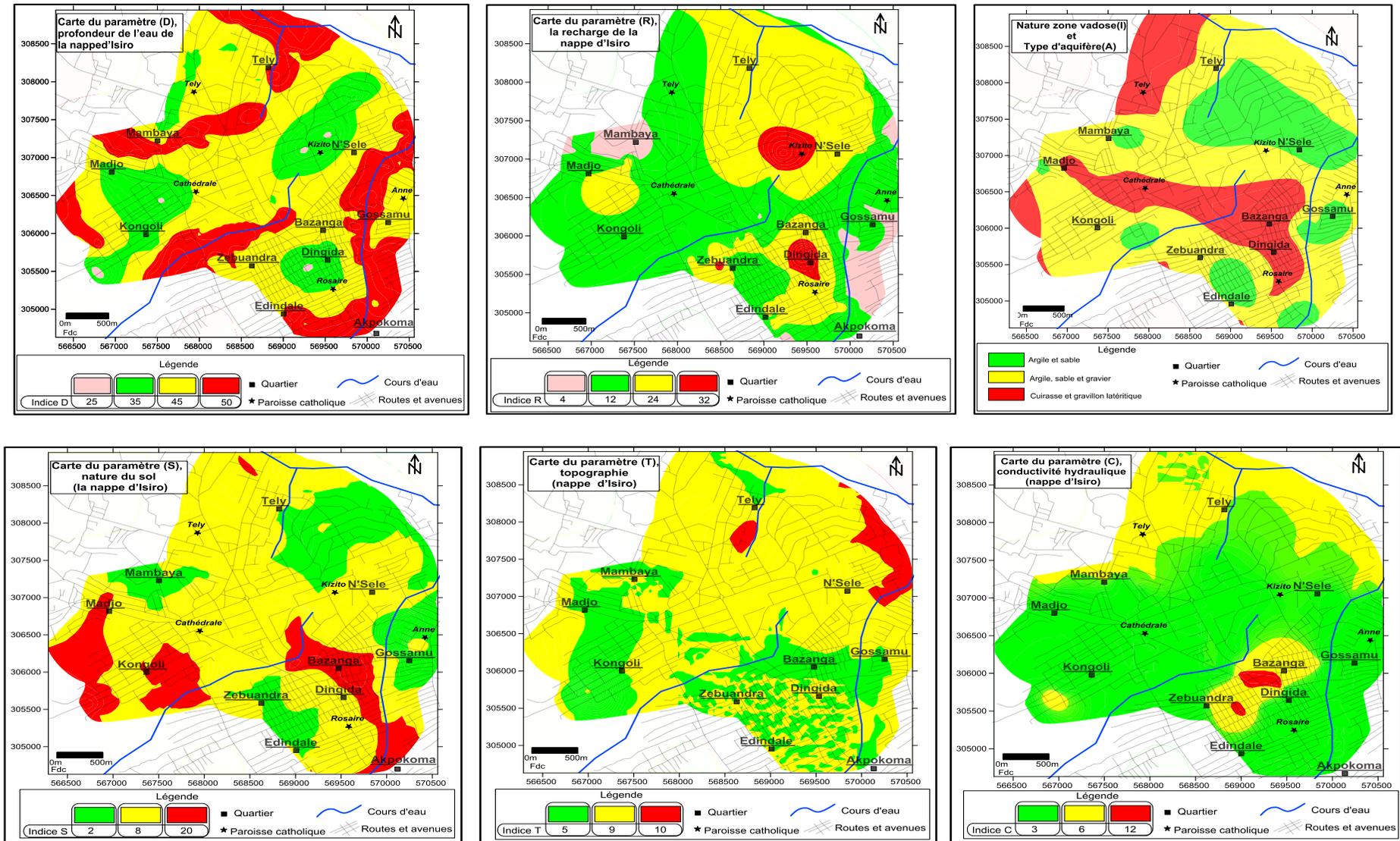


Figure 2 : Présentation des cartes thématiques

La combinaison des différents paramètres évalués a permis d'élaborer la carte des indices DRASTIC (**Figure 3**). Les différents indices ont été classifiés selon les plages adoptées par [21] en tenant compte des caractéristiques de la zone d'étude. Le calcul des pourcentages de vulnérabilité à l'aide de la formule 2 et à partir des indices DRASTIC obtenus a permis d'obtenir une classification en trois domaines de vulnérabilité : (1) faible, (2) moyenne, (3) élevée. Ces trois classes sont ainsi indiquées dans le **Tableau 10**.

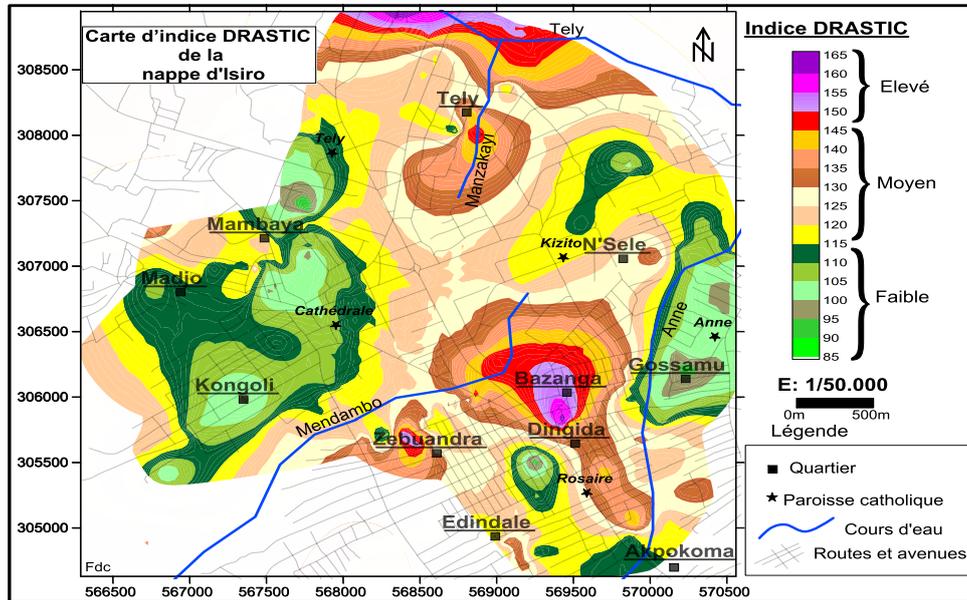


Figure 3 : Carte d'indice DRASTIC

Tableau 10 : Classification de vulnérabilité des eaux souterraines dans la ville d'Isiro

Valeur de l'indice DRASTIC (Id)	Degré de vulnérabilité	Id en %	Superficie en %
85 - 114	Faible	31 à 45 %	30 %
115 - 145	Moyenne	46 à 60 %	65 %
146 - 165	Elevée	61 à 70 %	5 %

Cette classification des pourcentages des indices DRASTIC a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la nappe d'Isiro (**Figure 4**). L'analyse de cette carte montre une dominance des aires à vulnérabilité faible et moyenne dans la majorité de la nappe d'Isiro.

Trois degrés de vulnérabilité à la pollution sont mis en évidence sur cette carte. Il s'agit de :

1. la classe de vulnérabilité faible : elle ne représente que 30 % des zones cartographiées (**Figure 5**). Cette classe traduit une vulnérabilité faible à la pollution. La vulnérabilité faible dans cette zone peut s'expliquer par la profondeur relativement importante du plan d'eau (supérieur à 9 m) et la nature du sol, de l'aquifère, ainsi que de la zone vadose caractérisée par une texture fine. Cette classe se localise essentiellement dans les secteurs est et ouest de la ville d'Isiro, avec quelques poches isolées dans le sud.
2. la classe de vulnérabilité moyenne occupant presque la totalité de la zone d'étude soit 65 % des zones cartographiées. Cette partie de la ville correspond aux surfaces planes où la pente topographique est très faible. L'indice moyen de vulnérabilité observé peut s'expliquer par le fait que la nappe possède dans cette partie de la ville une profondeur moyenne comprise entre 1,5 et 4,5 m. La nature du sol constituée des sols tassés, imperméables.

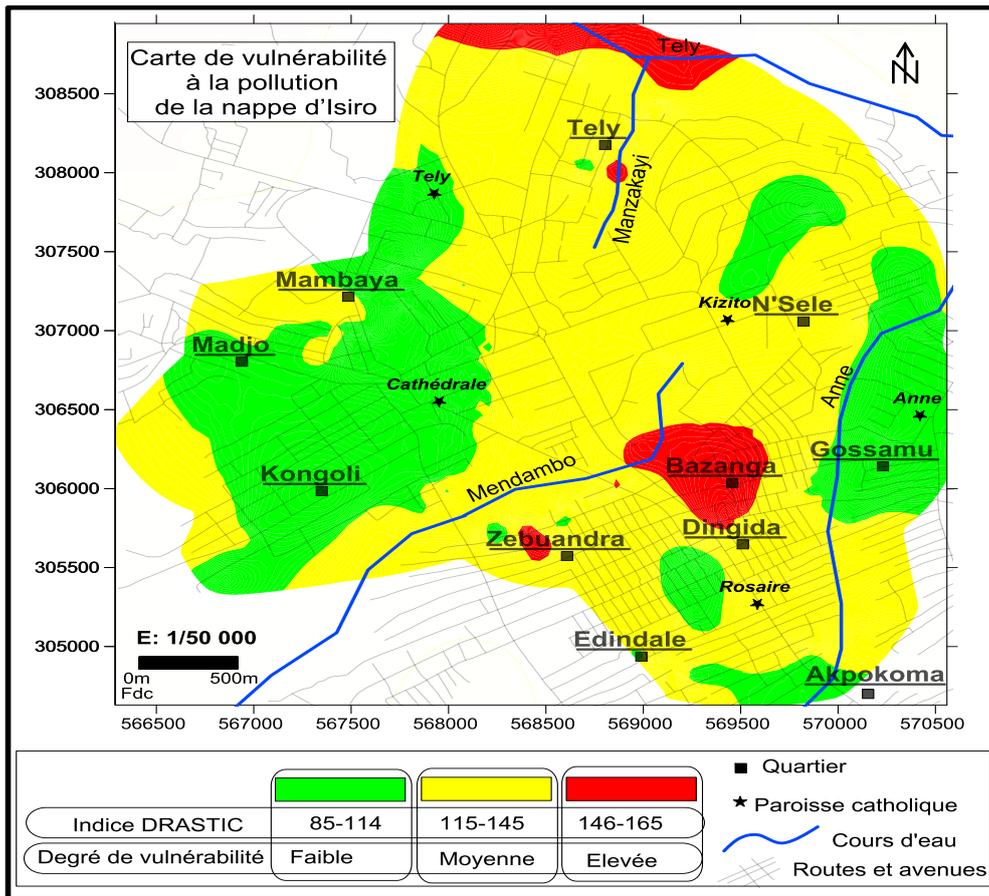


Figure 4 : Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'Isiro

- la classe de vulnérabilité élevée occupant 5 % de la zone d'étude. C'est la zone de vallées caractérisé par le système aquifère alluvionnaire. Ce degré de vulnérabilité peut s'expliquer par la faible profondeur de la nappe, variant entre 0,5 et 1,5 m associée à la faible pente de terrain (inférieur à 6 %). Ces conditions favorisent l'infiltration de tout contaminant présent à la surface. Aussi, notons que l'augmentation du degré de vulnérabilité dans ces zones est liée à la nature de la zone vadose et de l'aquifère qui sont constitués de cuirasse et gravillon latéritique, d'argile, sable et gravier, et du mélange argile-sable, pouvant faciliter la circulation des polluants.

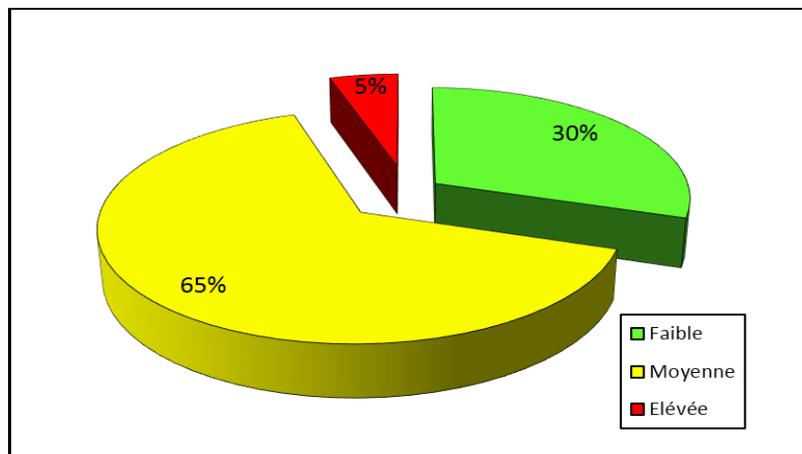


Figure 5 : Répartition spatiale des degrés de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'Isiro

La vulnérabilité évaluée bien qu'ayant une tendance moyenne reste élevée en tenant compte de l'indice DRASTIC qui varie de 85 à 165. Ce qui donne une moyenne de 125. Cette valeur reste supérieure à celle déterminée dans la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) qui est de 117 [21] sur généralement des formations magmatiques et métamorphiques ou des gneiss avec une profondeur de la nappe comprise entre 2,3 et 64 m. Cet écart d'indice observé entre les deux régions pourrait se justifier par le type d'aquifère (nature lithologique de la zone saturée) qui est constitué au niveau de la ville d'Isiro de cuirasse et gravillon latéritique, d'argile, sable et gravier, et du mélange argile-sable. La nappe possède dans cette ville une faible profondeur qui varie entre 0,5 et 13,75 m. La présence des zones couvertes par la classe de vulnérabilité élevée pourrait se justifier par l'existence des zones de faibles profondeurs de la nappe auxquelles il faut associer les secteurs de faibles pentes et de fortes recharges. L'importance de la profondeur des nappes dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution a déjà été soulignée par [23]. Toutefois, le paramètre qui influence fortement cette vulnérabilité est l'impact du sol. En effet, l'analyse de la carte de vulnérabilité montre que, les zones de vulnérabilités élevées se rencontrent dans les secteurs où le sol est absent (mince couche de sol) ou aux endroits où il est argilo-sablonneux et donc présentant des menaces réelles sur la qualité des ressources en eau souterraines. L'importance du type de sol a été soulignée [24], 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.

4. Conclusion

La carte de vulnérabilité intrinsèque de la nappe d'Isiro réalisée à partir de la méthode DRASTIC et à l'aide du logiciel SURFER 11a révélé une tendance de la vulnérabilité à la pollution. Trois grandes classes de vulnérabilité ont été mises en évidence (faible, moyenne et élevée). Même si la zone dont le degré de vulnérabilité est élevé ne représente que 5 % de la surface cartographie, le risque est important vu la présence de plusieurs sources de pollution dans la ville d'Isiro, à savoir : décharge, rejet d'eau usée domestique, construction anarchique des latrines. La classe la plus dominante est la classe moyenne qui présente 65 % de la zone d'étude. La vulnérabilité de cette classe peut augmenter lors des années pluviales et par les effets conjugués de l'homme. Malgré les difficultés soulevées dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC, n'altère en rien sa fiabilité, elle permet toujours de se faire une idée assez précise sur les zones vulnérables d'une région donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Dr. Dibi, Maître de conférences Cames de l'Université J. Lorougnon Guedé (Côte d'Ivoire) pour ses critiques constructives et son soutien à la réalisation de cette recherche. L'étude a bénéficié de l'appui financier de Kugamisana / Canada.

Références

- [1] - M. R. SINAN, MASLOUHI et M. RAZACK, Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc, (2003)
- [2] - J. LEPERSONNE, Les aplanissements d'érosion du Nord-Est du Congo Belge et des régions voisines. *Mém. Acad. Roy. Sc. Cl. Sc. Nat. Méd.*, 4 (1956) 1 - 108
- [3] - J. MOEYERSONS, Les surfaces d'aplanissement et les cycles géographiques dans le Nord du Zaïre. *Annales de la société Géologique de Belgique*, 98 (1975) 439 - 448
- [4] - M. MBULUYO, Géomorphologie de l'Ituri Orientale (Nord-Est du Zaïre). Analyse morphologique et structurale des effets d'une réactivation Rift Albertin, Thèse, Faculté des sciences, Université de Liège, Belgique, (1993) 303 p.
- [5] - G. MILLOT, Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux, tropicaux et désertiques. *Mémoire hors série de la Société Géologique de France*, 10 (2005) 295 - 305
- [6] - C. SYS, Carte des sols du Congo Belge et du Rwanda-Burundi. Echelle : 1/500 000. Notices explicatives. INEAC, Bruxelles, (1960) 84 p.
- [7] - G. G. SMITH, C. SYS, A. VAN WAMBEKE, Application of Soil Taxonomy to the soils of Zaire (Central Africa), *Pedologie*, 25 (1975) 5 - 54
- [8] - J. LAVREAU et D. LEDENT, Etablissement du cadre géochronologique du Kibalien (Zaïre). *Annales de la société géologique de Belgique*, 98 (1975) 197 - 212
- [9] - L. ALLER, T. BENNET, J. H. LEHR, R. PETTY et G. HACKETT, DRASTIC : A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S Epa-600/2-87-035, (1987) 622 p.
- [10] - S. S. D. FOSTER, Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. RIVM. *TNO Committee on Hydrological Research*, (1987) 69 - 86
- [11] - D. VAN STEMPVOORT, L. EWERT and L. WASSERNAAR, AVI :Aquifer Vulnerability Index : A Gis Compatible Method for Groundwater Vulnerability mapping, *Canadian Water Journal*, D.O.I :10.4296/cwr/1801025, (1992) 4 - 14
- [12] - B. DIBI, K. I. KOUASSI, KONAN-WAIDHET, A. B., ISSIAKA, S. J. BIEMI, V. NEDEFF, G. LAZAR, Impact of agriculture on the quality of groundwater resources in peri-urban zone of Songon (cote d'Ivoire). *Environnement Engineering and Management Journal*, 11-12 (2012) 2173 - 2182
- [13] - N. SCHNEBELEN, J. P. PLATEL, Y. LENINDRE, et D. BAUDRY, Gestion des eaux souterraines en aquitaine année 5, opération sectorielle, protection de la nappe de l'oligocène en région Bordelaise. Rapport BRGM/ Rp-5 78, France, SI : BRGM, (2002)
- [14] - Y. GRATTON, Lekrigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, (2002)
- [15] - A. LALLEMAND, et A. BARRES, Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions, BRGM-R37928, (1994) 17 p. (inédit)
- [16] - H. BAALOUSHA, Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC. *EnvGeol*, 50 (2006) 405 - 414
- [17] - B. DIBI, K. L. KOUASSI, K. I. KOUAMÉ, K. S. KONAN, M. SOUMAHORO, A. B. ONAN-WAIDHET et D. GNAKRI, 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*, ISSN 2028-9324, Vol. 2, N° 4 (2013) 464 - 476
- [18] - E. SENER, S. SENER et 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) (2009) 2023 - 2035

- [19] - AL HALLAQ et B. ABU ELAISH, Determination of groundwater vulnerability zones to contamination in Khanyounis Governor, Gaza Strip, using the DRASTIC model within GIS, *Journal of Social Sciences*, Umm Al-Qura University, Vol. 4-1 (2011) 55 p.
- [20] - H. ES SAOUINI, M. AMHARREF et A. S.BERNOUSSI, Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : statique ou dynamique ? Application à la Nappe de R'Mel (Maroc), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324, Vol. 6-4 (2014) 929 - 940
- [21] - J. P. JOURDA, K. J. KOUAME, M. G. ADJA, S. K.DEH, A. TANANI, A. TEFFINI, J. BIEMI, 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, Conférence Francophone ESRI, 10-11 Octobre, Versailles, (2007) 15 p. URL : http://www.esrifrance.fr/sig2007/cocody_jourda.htm (consultation juin 2016)
- [22] - 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, Paris, (2005) 21 p.
- [23] - V. MURAT, D. PARADIS, M. M. SAVARD, M. MASTER, É. BOURQUE, A. HAMAL, R' LEFEBVRE et R. MARTEL, Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturées au sud-ouest du Québec, évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD, Commission géologique du Canada, Recherche en cours, 2003 -D3, (2003) 16 p.
- [24] - R. LEFEBVRE, Y. MICHAUD, R. MARTEL et N. FAGNAN, La carte hydrogéologique régionale. Un outil. Essentiel à l'inventaire des ressources en eaux. Mémoire de Centre géo-scientifique du Québec, Octobre 1999, (1999) 16 p.