

Mapping of the vulnerability to pollution of aquifers in a mining area : Afema gold mine case (South-eastern Côte d'Ivoire)

Kouadio Assemien François Yao, David Salze, Théophile Lasm, Blaise Koffi Yao, Olivier Belcourt, Miguel Lopez-Ferber, Ernest Ahoussi Kouassi, Marc Youan Ta

▶ **To cite this version:**

Kouadio Assemien François Yao, David Salze, Théophile Lasm, Blaise Koffi Yao, Olivier Belcourt, et al.. Mapping of the vulnerability to pollution of aquifers in a mining area : Afema gold mine case (South-eastern Côte d'Ivoire). International Journal of Innovation and Applied Studies, 2016, 17, pp.682 - 697. hal-02914585

HAL Id: hal-02914585
https://imt-mines-ales.hal.science/hal-02914585

Submitted on 12 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

International Journal of Innovation and Applied Studies
ISSN 2028-9324 Vol. 17 No. 2 Jul. 2016, pp. 682-697
© 2016 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijias.issr-journals.org/

Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères dans une zone minière : cas de la mine d'or d'Afema (Sud-est de la Côte d'Ivoire)

[Mapping of the vulnerability to pollution of aquifers in a mining area : Afema gold mine case (South-eastern Côte d'Ivoire)]

Yao Kouadio Assemien François[1-2], Salze David[2], Lasm Théophile[1], Koffi Yao Blaise[1], Belcourt Olivier[2], Lopez-Ferber Miguel[2], Ahoussi Kouassi Ernest[1], and Youan Ta Marc[1]

[1]Unité de Formation et de Recherche Science de la Terre et des Ressources Minières,
Université Félix Houphouët Boigny,
Abidjan, Côte d'Ivoire

[2]Ecole des Mines d'Alès, Alès, France

Copyright © 2016 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 mining industry is a main sector for economic and social development of a country. However, this industry generates many negative impacts on human and biophysical environments. Located south-east of Côte d'Ivoire, the old gold mine of Afema, operated from 1992 to 1998, was assigned to another mining company for a new operation. Prior to reexploitation, study was conducted in 2013 and involving only environmental impacts study. The aspect of vulnerability to groundwater pollution was not addressed in this study. To overcome this shortcoming and to better know the natural predisposition to pollution, mapping of the intrinsic aquifer vulnerability was carried out. The processing of data from drilling data, chemical data, map and satellite images as well as using the DRASTIC method have established the vulnerability map of Afema area. The mineralized zones were overlaid with the vulnerability map, revealing that the study area is dominated by the classes of high and medium vulnerability. Indeed these classes occupy respectively 53.5 and 45.4% of the study area (850 km^2), while extreme classes (very low and very high) are hardly encountered in the region. Low vulnerability class accounts only for 1.1% of the total area. The high vulnerability class coincides with high mineralization area. This result reflected a high risk of groundwater pollution around the shear zone. This study has enabled to highlight areas vulnerable to pollution involving attention in the future exploitation of the ore.

KEYWORDS: DRASTIC, groundwater, mining, impacts, vulnerability.

RESUME: L'industrie minière constitue un secteur essentiel dans le développement économique et social d'un pays. Cependant, elle génère de nombreux impacts négatifs sur les environnements humains et biophysiques. Située au Sud-est de la Côte d'Ivoire, l'ancienne mine d'or d'Afema, exploitée de 1992 à 1998, a été attribuée à une nouvelle société minière pour une prochaine exploitation. Une étude a été réalisée en 2013 et a concerné uniquement l'étude d'impact environnementale. L'aspect vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines n'a pas été abordé par cette étude. Afin de pallier à cette insuffisance et de mieux connaitre les prédispositions naturelles à la pollution, la vulnérabilité intrinsèque des aquifères de la zone minière a été cartographiée. Le traitement des données chimiques, cartographiques, de forages et d'images satellites ainsi que l'utilisation de la méthode DRASTIC ont permis d'élaborer la carte de vulnérabilité de la zone d'Afema. Les zones minéralisées ont été superposées avec la carte obtenue révélant que la zone d'étude est dominée par les classes de vulnérabilité forte et moyenne. En effet, ces classes occupent respectivement 53,5 et 45,4% de la zone d'étude (850 km^2), alors que les classes extrêmes (très faible et très forte) ne sont guère rencontrées dans la région. La classe de vulnérabilité faible ne représente que 1,1% de la zone d'étude. La classe de forte vulnérabilité coïncide avec des zones minéralisées. Ce

résultat traduit un niveau élevé de risque de pollution des eaux souterraines au droit de la « shear zone ». Cette étude a permis de mettre en lumière les zones vulnérables à la pollution nécessitant une attention particulière lors de l'exploitation future du gisement.

MOTS-CLEFS: DRASTIC, eaux souterraines, exploitation minière, impacts, vulnérabilité.

1 INTRODUCTION

Le secteur agricole a constitué le principal moteur de la croissance de l'économie ivoirienne depuis l'indépendance avec le développement des cultures de rente impulsé par l'État. Ces efforts ont connus des résultats probants plaçant aujourd'hui le pays au rang de premier pays producteur de cacao, deuxième pays producteur de noix de cajou, troisième pour le café (liste est loin d'être exhaustive) [1]. Depuis une dizaine d'années, l'Etat ivoirien a mis en place une politique de diversification des bases de son économie en développant d'autres secteurs comme celui des ressources minières. Ainsi de nombreux permis de recherche et d'exploitation des ressources minières ont été octroyés à des entreprises multinationales. Le projet minier de la zone d'Afema dans le Sud-est de la Côte d'Ivoire s'inscrit dans cette dynamique. L'exploitation minière, comme toute autre activité industrielle d'envergure ne peut se faire sans dommages sur l'environnement [2], [3], [4], [5]. D'où la nécessité de connaitre les prédispositions naturelles afin de mieux évaluer les impacts potentiels de cette activité.

Cette étude se propose de cartographier à l'aide de la méthode DRASTIC les zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines par les différents polluants provenant de la surface. En effet, 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 [6].

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le projet minier se situe dans le Département d'ABOISSO au Sud-est de la Côte d'Ivoire, à 122 km d'Abidjan. La zone d'étude s'étend sur plus de 850 km^2, correspondant à la superficie des 2 bassins versants des cours d'eau Ehania et Noé. Cette délimitation tient compte de la zone d'influence des activités minières sur le milieu naturel. À ces deux cours d'eau principaux, s'ajoutent plusieurs autres cours d'eau non pérennes qui drainent la région (Fig. 1).

Du point de vue géologique, les formations rencontrées se regroupent en deux grands ensembles principaux : les métavulcanites et les métasédiments [7]. Ces ensembles sont essentiellement respectivement dominés par des schistes à chlorites et des schistes tuffacés. La zone de contact de ces ensembles représente la zone minéralisée (shear zone), orientée NE-SW. Des intrusions, notamment de diorites, métadiorites et métatonalites, métagabbros et métadolérites sont aussi observées dans la zone d'étude (Fig. 2). Cette zone est recouverte dans sa partie Sud-ouest par une fine couche sédimentaire constituée de sables, argiles et grès ferrugineux dits des hauts plateaux [8].

La zone minière comporte plus d'une dizaine de fosses, ouvertes et exploitées par la Société des Mines de l'Afema (SOMIAF) de 1992 à 1998 [7]. Seul le minerai oxydé a été exploité par la SOMIAF. Le nouveau permis d'exploitation concernera à la fois le minerai oxydé et le minerai sulfuré qui représente 75% du gisement.

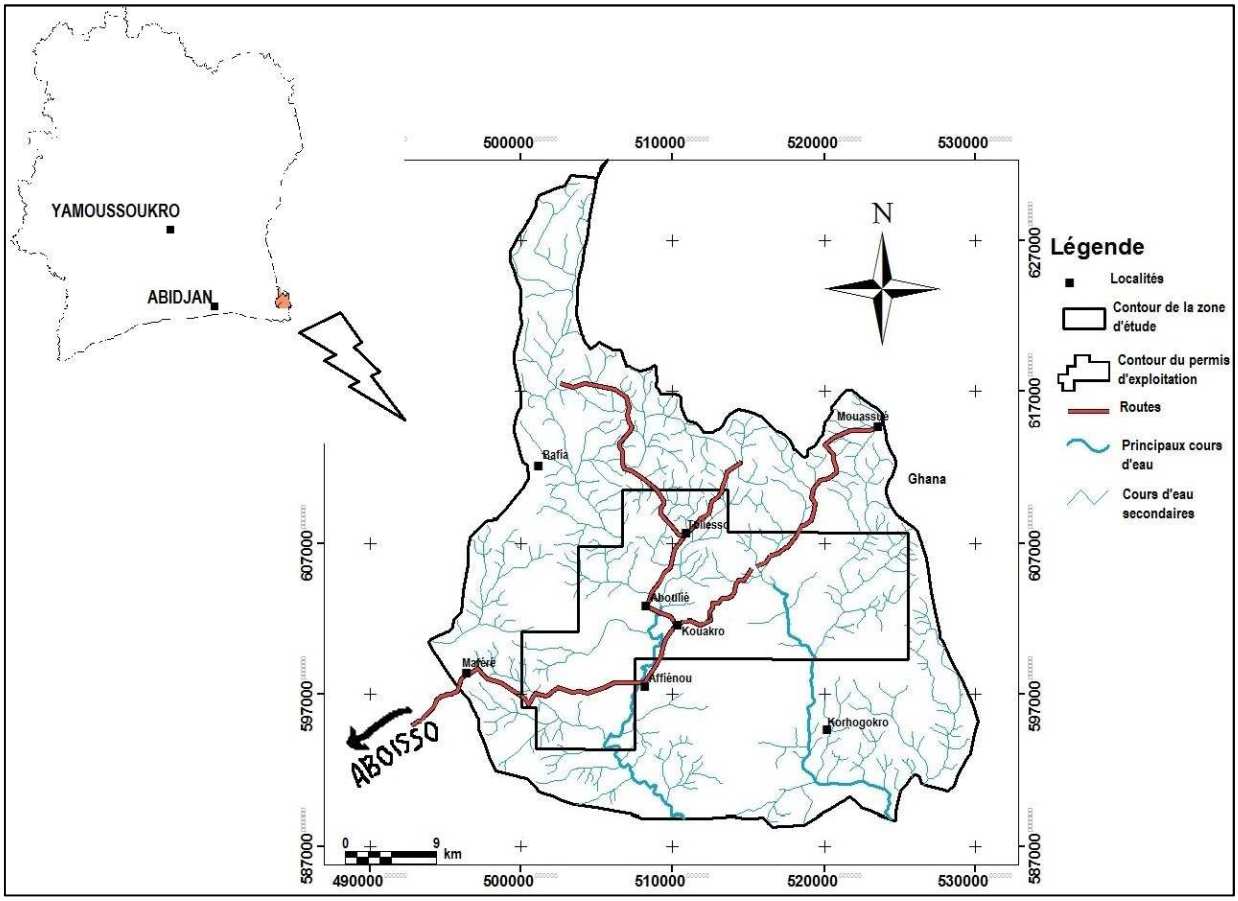


Fig. 1. Situation géographique et réseau hydrographique du secteur d'Afema

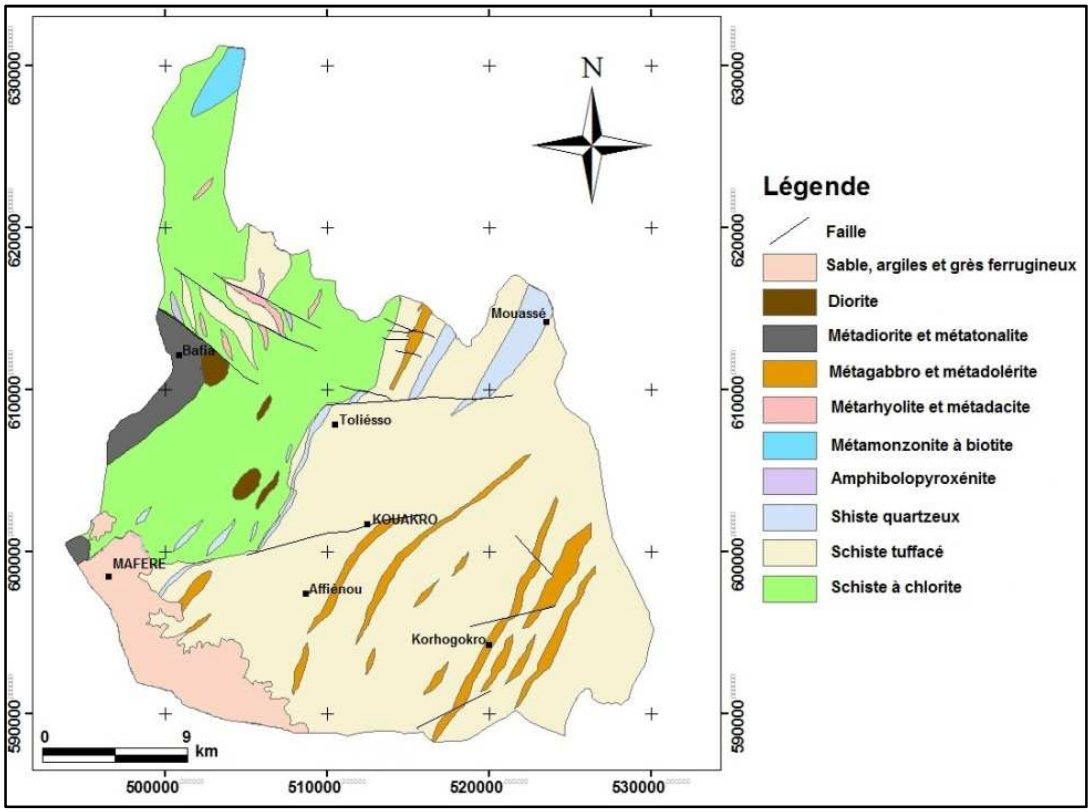


Fig. 2. Carte géologique de la zone d'Afema ([8], modifié)

2.2 MATÉRIEL ET DONNÉES

La base de données pour cette étude est constituée de diverses données : chimiques, cartographiques, de forages et d'images satellites.

Les données de forages concernent les données tirées des fiches techniques des forages. Il s'agit notamment de la profondeur de la nappe (niveau statique), la lithologie de la zone non saturée et de la zone saturée. Ces données ont été acquises auprès de la Direction Régionale de l'Hydraulique d'Aboisso. Les données chimiques concernent essentiellement les teneurs en nitrates (NO_3^-) des eaux souterraines.

Les données images sont constituées d'images SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) avec une résolution de 90 m, et de Landsat 8. Les images satellites de Landsat 8 ont été obtenues sur le site américain *http://earthexplorer.usgs.gov/*. Les fonds cartographiques utilisés se composent de cartes géologique, photogéologique [9], topographique à l'échelle de 1/200 000 fournie par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) et de carte pédologique [10].

Les cartes ont été établies en utilisant plusieurs logiciels notamment : i) Mapinfo Professionnel 11.0 pour la numérisation des différentes cartes (géologiques, topographiques,…) ; ii) Envi 5.1 pour le traitement des images satellites Landsat 8 et la cartographie de la fracturation ; iii) Arcgis 10.2.2 pour l'établissement des cartes thématiques et de la carte de vulnérabilité.

2.3 MÉTHODE

La notion de vulnérabilité des aquifères a été abordée par plusieurs auteurs [11], [12], [13] et [14]. Ainsi, [11] ont montré que la vulnérabilité des eaux souterraines est une notion relative, non mesurable et adimensionnelle, basée sur la supposition que le milieu naturel peut fournir une protection des eaux souterraines contre les impacts anthropiques, en particulier ceux qui sont engendrés par les polluants entrant dans l'environnement souterrain.

En complément de cette idée, [12] estiment que la vulnérabilité évalue la faiblesse de cette protection naturelle. Elle matérialise la facilité avec laquelle la protection peut être rendue caduque par une pollution. En revanche, il est important de noter qu'il existe deux types de vulnérabilité [13], [14] : (i) la vulnérabilité intrinsèque qui fait référence aux particularités

hydrogéologiques de l'aquifère, donc aux caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par des activités humaines et (ii) la vulnérabilité spécifique qui se rapporte aux propriétés hydrogéologiques et à la nature des contaminants potentiels pouvant modifier la qualité de l'eau souterraine. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec divers composants de la vulnérabilité intrinsèque [15].

2.3.1 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DRASTIC

La méthode DRASTIC a été développée par l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement [16]. DRASTIC est une méthode empirique de cotation numérique qui utilise sept paramètres pour évaluer la vulnérabilité verticale intrinsèque de l'aquifère. De plus, pour chaque paramètre, une cote allant de 1 à 10 est attribuée par classe préalablement définie en fonction de la particularité de la zone étudiée et des données disponibles. Les sept paramètres dont les initiales donnent l'acronyme DRASTIC sont :

- **D** : « **D**epth to groundwater » qui désigne la profondeur de la nappe;
- **R** : « **R**echarge » pour la recharge efficace de la nappe;
- **A** : « **A**quifer media » pour le type d'aquifère;
- **S** : « **S**oil media » pour la nature du sol;
- **T :** « **T**opographie » pour la topographie ou la pente;
- **I** : « **I**mpact of the vadose zone » pour l'impact de la zone non saturée;
- **C** : « **C**onductivity » pour la conductivité hydraulique.

Chaque paramètre est pondéré par un facteur multiplicateur variant de **1** à **5** selon son importance. Un paramètre prépondérant est affecté d'un poids égal à "**5**" alors qu'un paramètre ayant moins d'influence sur le devenir d'un contaminant se voit assigner un poids de "**1**". Les propriétés de chaque paramètre et le poids qui lui est attribué sont représentés dans le Tableau 1.

En outre, la classification et la cotation des paramètres DRASTIC tenant compte de la particularité du milieu sont présentées dans le Tableau 2. Après avoir défini les différentes classes pour chacun des paramètres susmentionnés, il est alors possible de calculer l'indice de la vulnérabilité DRASTIC (ID). Il s'agit de faire la somme des couches DRASTIC obtenues pour chacun des sept paramètres pondérés par les coefficients respectifs de ces derniers selon l'équation qui suit :

$$ID = Dp \times Dc + Rp \times Rc + Ap \times Ac + Sp \times Sc + Tp \times Tc + Ip \times Ic + Cp \times Cc$$

Avec D, R, A, S, T, I, C, les paramètres cités plus haut ;

c : cotation accordée à chaque paramètre ;
p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

DRASTIC repose sur les trois hypothèses de base suivantes :

- les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
- de la surface du sol, les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme d'infiltration efficace ;
- la nature des contaminants potentiels n'est pas prise en compte dans le calcul des indices.

DRASTIC génère un indice (ID) pour le potentiel de pollution des ressources en eaux souterraines qui évolue de 23 à 226. L'indice permet d'évaluer le degré de vulnérabilité de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. La reclassification des indices DRASTIC telle que proposée par [17] a été adoptée. Elle conduit à cinq classes de vulnérabilité (Tableau 3).

Si les données concernant les autres paramètres ont été extraites des fiches techniques de forages, des cartes géologiques et des sols, celles caractérisant la conductivité hydraulique sont issues du traitement des images satellites de Landsat 8. La carte linéamentaire résultant des différents traitements a été ensuite validée afin d'attribuer à l'ensemble des linéaments cartographiés, une valeur de fracture. Cette importante phase a été effectuée à partir des travaux de [18] dans le département d'Aboisso, qui comprend la présente zone d'étude. En effet, les réseaux linéamentaires issus des deux travaux ont été analysés et les rosaces directionnelles correspondantes ont été comparées. Enfin, la carte de fracturation ainsi obtenue a été discrétisée en mailles carrées de 5 × 5 km^2. À l'intérieur de chaque maille, la perméabilité induite par les fractures a été calculée par la méthode de Franciss. Les détails de cette méthode et des techniques de traitement des images satellites sont bien connus dans la littérature et ne seront pas présentés ici. Cependant, pour de plus amples informations, le lecteur est renvoyé aux travaux de [14], [19], [20].

Tableau 1. Propriétés et le poids de chaque paramètre DRASTIC [14]

Paramètres	Symbole	Propriétés	Poids
Profondeur de la nappe	**D**	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps pour atteindre la surface piézométrique	5
Recharge de la nappe	**R**	Vecteur principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
Lithologie de l'Aquifère	**A**	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus cette granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	**3**
Sol	**S**	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante et plus la protection des eaux souterraines est grande.	**2**
Topographie	**T**	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**
Zone non saturée	**I**	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 (graviers, sable grossiers).	**5**
Conductivité	**C**	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide	**3**

2.3.2 VALIDATION DE LA CARTE VULNÉRABILITÉ

La validation des différents résultats obtenus apporte une crédibilité au travail effectué et montre que les cartes thématiques produites reflètent mieux la sensibilité du terrain. Le critère d'évaluation choisi pour valider un indicateur donné doit être indépendant (n'ayant pas servi à la réalisation de cet indicateur) et provenir exclusivement de la zone d'étude.

Plusieurs auteurs [14], [17], [18], [20], [21], [22], [23], [24], et [25] ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines. Au regard des résultats satisfaisants de ces auteurs, la carte de vulnérabilité de la zone minière d'Afema a été validée à partir des teneurs en nitrates (NO_3^-) des eaux souterraines. Les nitrates constituent l'une des principales sources de pollution d'origine superficielle en raison de l'existence de nombreuses plantations de palmiers, et d'hévéa. L'utilisation des intrants agricoles peut conduire à la contamination des eaux souterraines en nitrates. Cette validation a été réalisée en établissant une comparaison entre la répartition spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe et la distribution des classes de vulnérabilité établies.

Les échantillons prélevés sont au nombre de 19, repartis sur l'ensemble de la zone d'étude en fonction de l'existence ou non d'ouvrages de captage. Ces échantillons concernent les eaux des ouvrages de types Hydraulique Villageoise (HV), Hydraulique Villageoise Améliorée (HVA) et puits (zone rurale). Les teneurs en nitrates ont été déterminées à partir de la Méthode 8171 sur Hach DR 6000 au Laboratoire Central de l'Environnement du Centre Ivoirien Antipollution (CIAPOL).

Tableau 2. Classification et cotation des paramètres DRASTIC du secteur minier d'Afema

Paramètres	Classe	Cote
D : Profondeur de la nappe	0 - 1,5 m	10
	1,5 - 4,4	9
	4,4 – 8,9	7
	8,9 – 14,6	5
	14,6 – 22,8	3
	22,8 – 28,62	2
	> 28,62	1
R : Recharge	360	10
A : Lithologie de l'Aquifère	Roches métamorphiques et ignées	4
	Schistes	6
	Sable et gravier	8
S : Sol	Sols ferralitiques sur roches basiques, Sols ferralitiques sur granite Sols ferralitiques sur schistes	10
	Sols ferralitiques sur sables tertiaires	8
	Sols hydromorphes	4
T : Topographie	0 – 2 %	10
	2 – 6 %	9
	6 – 12 %	5
	12 – 18%	3
	>18%	1
I : Zone non saturée	Roches métamorphiques et ignées	4
	Schistes	6
	Sable et gravier	8
C : Conductivité	$< 5.10^{-5}$	1

Tableau 3. Indice DRASTIC reclassé et degré de vulnérabilité [17]

Indice DRASTIC (ID)	Degré de vulnérabilité
23 à 84	Très faible
85 à 114	Faible
115 à 145	Moyen
146 à 175	Fort
176 à 226	Très fort

3 RÉSULTATS

3.1 CARTOGRAPHIE DE LA FRACTURATION ET PERMÉABILITÉ INDUITE

3.1.1 RÉSEAU LINÉAMENTAIRE DE LA ZONE D'AFEMA

Les différentes techniques de traitement ont a conduit à la cartographie du réseau de linéaments de la zone d'Afema (Fig. 3). La carte du réseau de linéaments comporte de nombreuses discontinuités, environ 1219 linéaments, dont la taille varie de 190 m à 15,22 km. Ces tailles s'échelonnent sur deux ordres de grandeur. La densité est variable d'un secteur à un autre. En effet, elle est importante à l'ouest que dans les autres parties de la zone d'étude.

La rosace directionnelle du réseau de linéaments illustrée à la figure 4 montre qu'aucune direction ne dépasse les 10% en fréquence aussi bien pour la distribution en nombre que pour celle en longueurs cumulées de linéaments, indiquant ainsi l'homogénéité du réseau linéamentaire (2 à 6% et 1 à 6% respectivement pour la distribution en nombre et en longueurs cumulées de linéaments). Cependant, certaines directions se démarquent de l'ensemble avec des fréquences (notamment)

en nombre oscillant entre 6 et 10% qui constituent les familles dominantes. Il s'agit des directions N0-10, N20-30, N30-40, N40-50, N50-60 et N60-70.

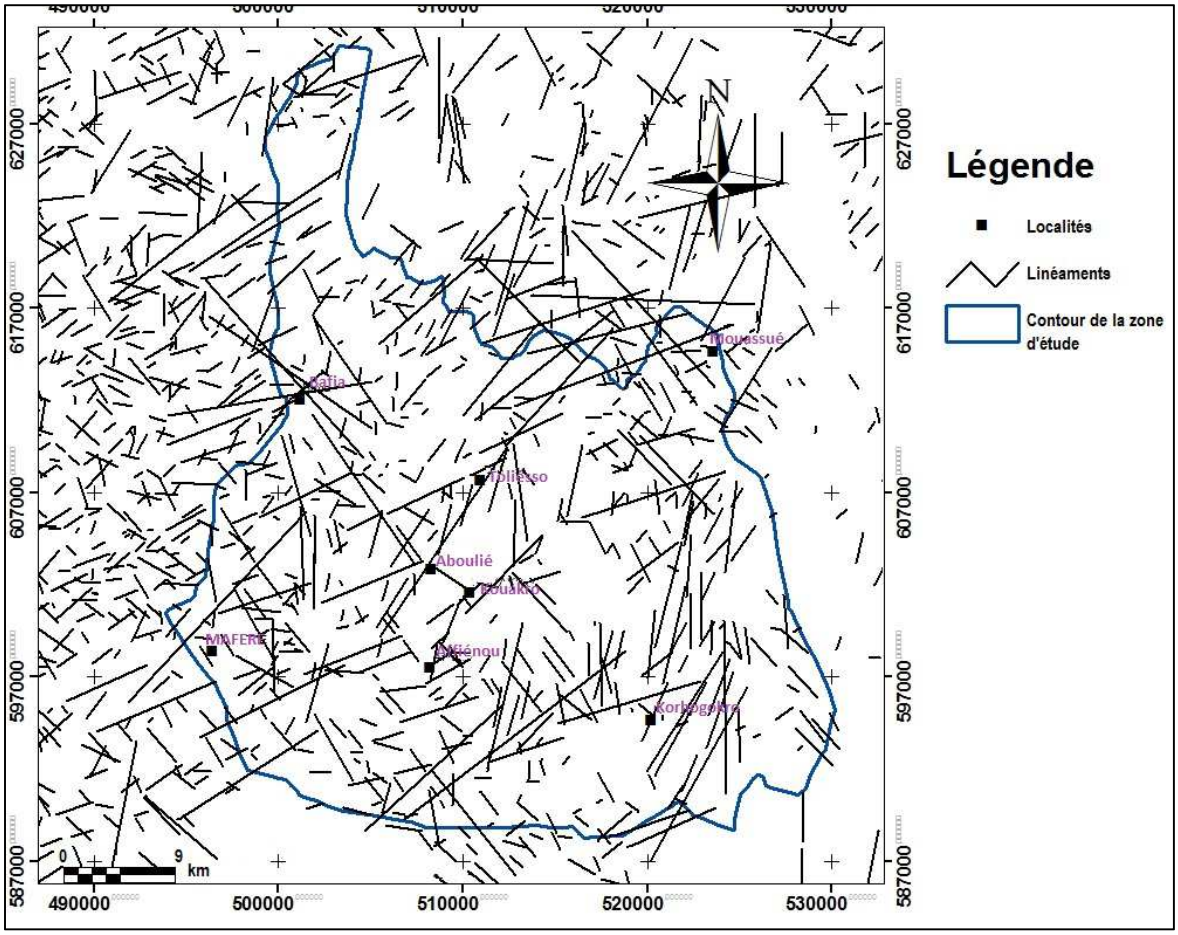


Fig.3. Carte linéamentaire de la zone d'Afema

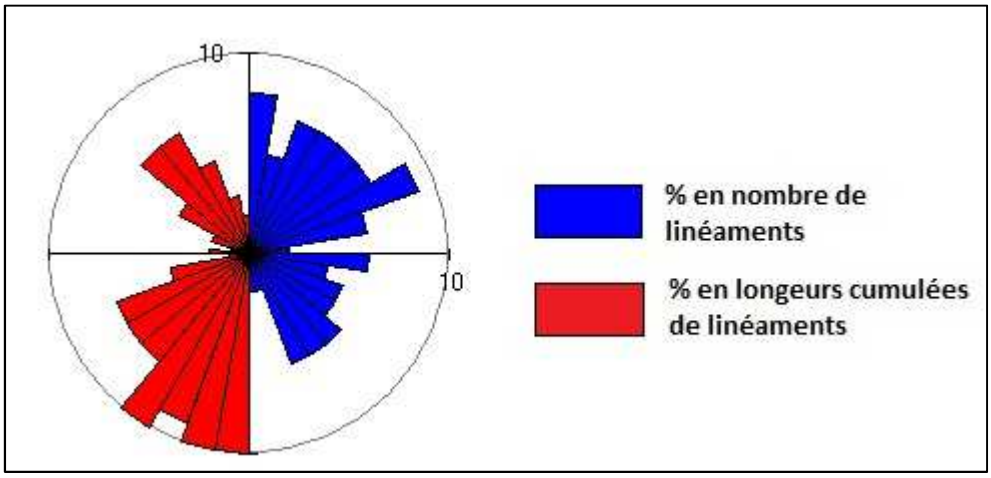


Fig.4. Rosace directionnelle des linéaments cartographiés

3.1.2 VALIDATION DE LA CARTE DU RÉSEAU DE LINÉAMENTS ET PERMÉABILITÉ INDUITE PAR LES FRACTURES

Afin de donner une signification aux linéaments cartographiés, la carte linéamentaire a été comparée à celle obtenue par [18]. La figure 5 représente la distribution statistique des linéaments cartographiés par cet auteur. Sur cette rosace, seules les directions N0-10, N90-100 et N150-160 ont une fréquence supérieure à 6%. Ainsi, l'analyse comparative des deux rosaces montre que la direction N0-10 a été identifiée dans les deux études comme une direction qui se dégage de l'ensemble. Cependant pour la présente étude, la direction N0-10 représente 8% du nombre de linéaments tandis que [18] a obtenu 9%. De plus, le nombre de linéaments suivant la direction N60-70 représente respectivement 9% et 6% dans cette étude et dans celle de [18]. De même, la direction N150-160 représente 6% dans la présente étude et 7% des fractures cartographiées par [18]. Ces différentes observations indiquent que les deux supports fournissent les mêmes résultats d'un point de vue statistique. Les quelques différences observées s'expliquent par la taille de la zone d'étude et aussi du nombre de discontinuités pris en compte. Au niveau de la précédente étude, la zone d'intérêt est beaucoup plus vaste et le nombre de discontinuité est important comparativement à la présente étude. En effet, dans la zone d'Afema seulement 1219 fractures ont été identifiées et cartographiées tandis que le réseau de fractures établi par [18] comporte plus de 2000 fractures. Ces résultats permettent de valider les réseaux de linéaments cartographiés. Les linéaments ont donc une valeur de fracturation. Rappelons qu'au cours de la phase de validation, tous les linéaments cartographiés qui n'ont pas une origine tectonique ont été supprimés.

Les fractures ainsi cartographiées ont permis de calculer les perméabilités induites par les fractures de la zone étudiée. Les valeurs de perméabilité induites par les fractures oscillent entre $1{,}15.10^{-8}$ et $8{,}91.10^{-7}$ $m.s^{-1}$. Ces valeurs obtenues dans la zone minière d'Afema ont été regroupées dans une seule classe au regard de la classification illustrée dans le Tableau 3. La cote 1 a donc été affectée à ces valeurs de perméabilité induite.

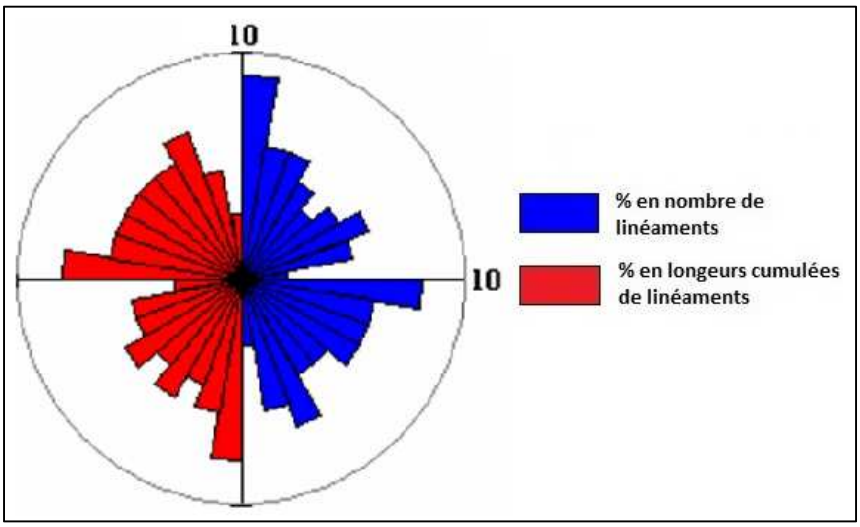


Fig. 5. Rosace directionnelle de la fracturation de [18]

3.2 VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

Les valeurs des indices DRASTIC obtenues représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique des aquifères de la zone d'Afema. Ces valeurs sont comprises entre 111 et 168. Conformément à la méthode adoptée, ces indices ont été regroupés en cinq classes (Tableau 3) : très faible, faible, moyenne, forte et très forte. Les résultats révèlent que la zone d'étude est dominée par les classes de vulnérabilité forte et moyenne. En effet, ces classes occupent respectivement 53,5 et 45,4% de la zone d'étude (Fig. 6 et Fig.7). Alors que les classes extrêmes (très faible et très forte) ne sont guère rencontrées dans la région, la classe de vulnérabilité faible ne représente que 1,11% de la surface étudiée.

La classe « vulnérabilité forte », qui, est prépondérante (53,5%) se rencontre à l'Est, au Centre et s'étend jusqu'à l'Ouest du secteur étudié, avec quelques lambeaux au Nord et au Nord-ouest. Cette classe de vulnérabilité est globalement orientée NE-SW, soit dans la direction de la zone de cisaillement (zone minéralisée). Le fort degré de la vulnérabilité peut s'expliquer par le fait que les niveaux statiques y sont généralement inférieurs à 5 m de profondeur auquel on associe la présence de sable tertiaire.

La classe « vulnérabilité moyenne » se rencontre essentiellement au Sud et au Nord de la zone d'étude. Quelques "poches" sont aussi identifiées à l'Ouest dans les environs de Maféré et à l'Est du secteur étudié. La présence de cette classe de vulnérabilité pourrait s'expliquer par des valeurs de niveaux statiques qui oscillent entre 7 et 14,6 m de profondeur dans des formations essentiellement constituées de schistes. Par ailleurs, les valeurs de pente observées dans ces zones sont relativement faibles (3 à 12%) et pourraient également justifier la vulnérabilité moyenne rencontrée.

La classe « vulnérabilité faible » qui est la moins importante (1,11% de la zone étudiée) est rencontrée au Sud du village d'Affiénou. Elle serait due aux fortes profondeurs de la nappe et surtout à l'existence de points hauts. Le sol est de type hydromorphes.

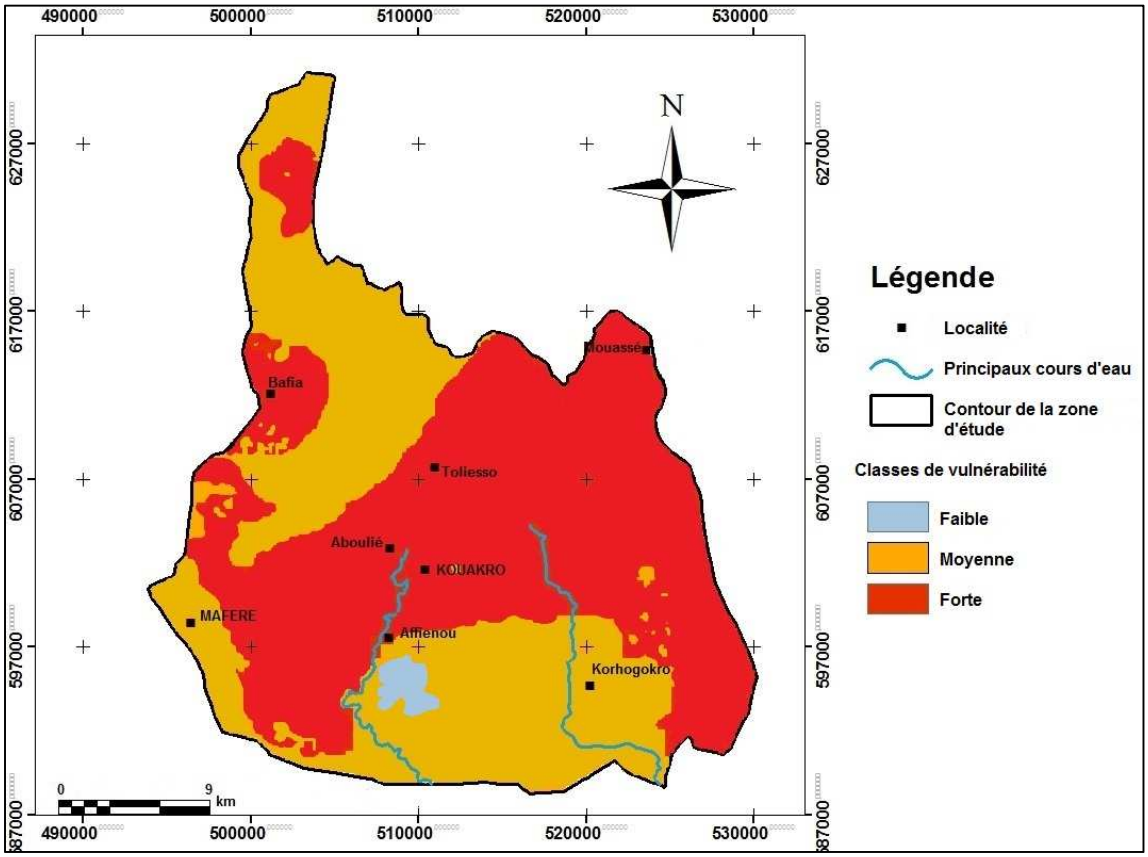


Fig.6. Carte de vulnérabilité à la pollution de la zone d'étude

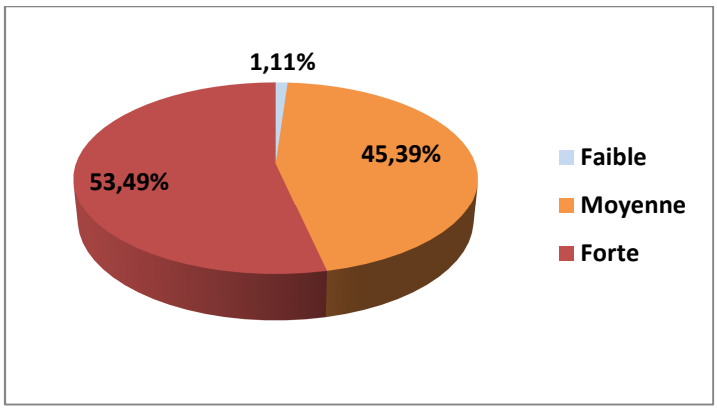


Fig. 7. Diagramme de répartition des classes de vulnérabilité

Par ailleurs, la superposition des zones minéralisées (shear zone), avec cette carte de vulnérabilité (Fig. 8) a montré que ces zones coïncident avec la classe de vulnérabilité forte traduisant ainsi un risque élevé de pollution des eaux souterraines.

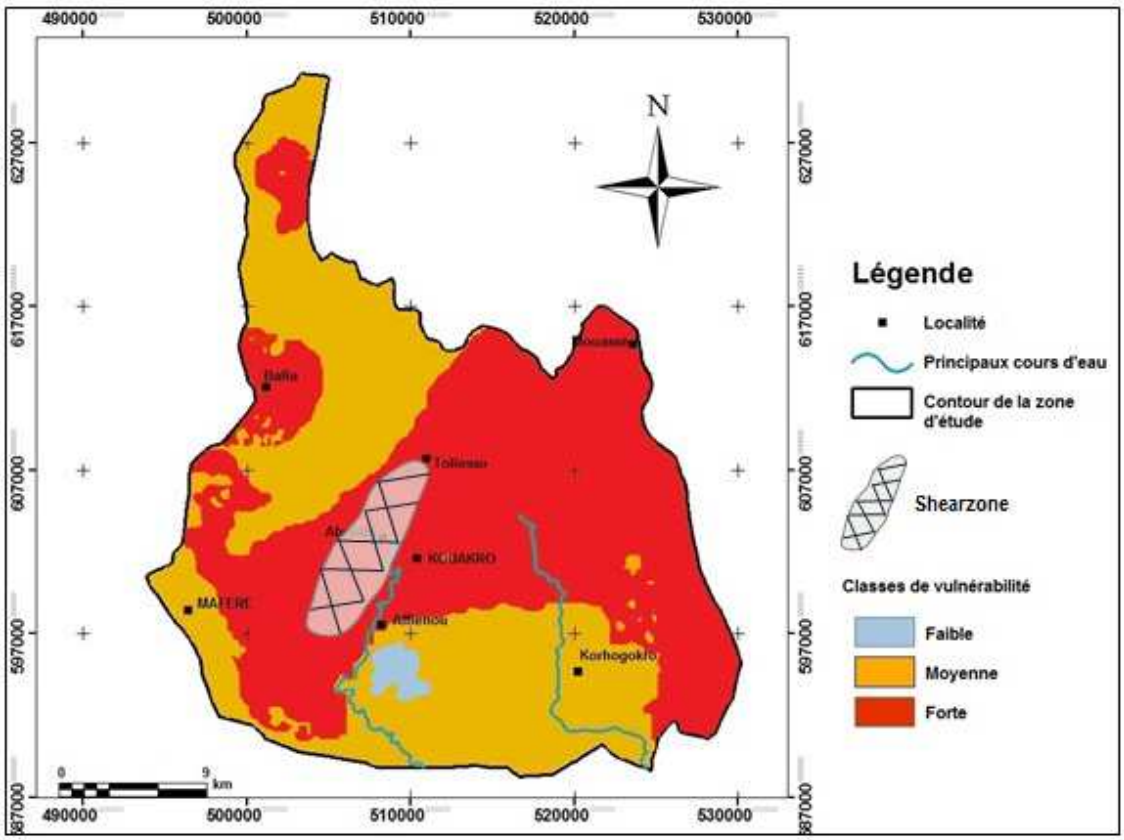


Fig. 8. Superposition de la zone minéralisée avec la carte de vulnérabilité

3.3 VALIDITE DE LA CARTE DE VULNERABILITE

La carte de vulnérabilité à la pollution a été validée grâce aux teneurs en nitrates (NO_3^-) contenues dans les eaux souterraines. Les concentrations sont comprises entre 0 et 10 mg/L. Ces teneurs sont en dessous de la valeur seuil (50 mg/L) proposée par l'OMS, pour les eaux de boisson. Par conséquent, aucune pollution en nitrates n'a été pour le moment constatée dans la zone d'étude. La répartition spatiale de ces teneurs sur l'ensemble de la zone associée à la carte de vulnérabilité est illustrée à la figure 9. Pour cette carte, 3 valeurs des teneurs en nitrates sont comprises entre 0 et 4,5 mg/L et coïncident toutes avec la zone de vulnérabilité forte (Tableau 4). Les 3 valeurs ayant des concentrations comprises entre 4,5 et 5,5 mg/L coïncident toutes avec la zone de vulnérabilité forte. Les teneurs qui oscillent entre 5,5 et 6,5 mg/L sont au nombre de 5 dont une coïncide avec la zone de vulnérabilité faible et une autre coïncide avec la zone de vulnérabilité moyenne. Les 3 autres valeurs (60%) sont localisées dans la zone de vulnérabilité forte. Enfin, 75% des valeurs dépassant les 6,5 mg/L coïncident avec la zone de vulnérabilité forte et 15% avec la zone de vulnérabilité moyenne.

Tableau 4. Coïncidence entre les concentrations en nitrates et les classes de vulnérabilité établies

	Nombre de valeurs de nitrates comprises entre			
Teneurs en nitrate(mg/L) / Classes de vulnérabilité	[0 - 4,5[	[4,5 - 5,5[	[5,5 - 6,5[	≥ 6,5
Faible	0	0	1	0
Moyenne	0	0	1	2
Forte	3	3	3	6
Total	3	3	5	8

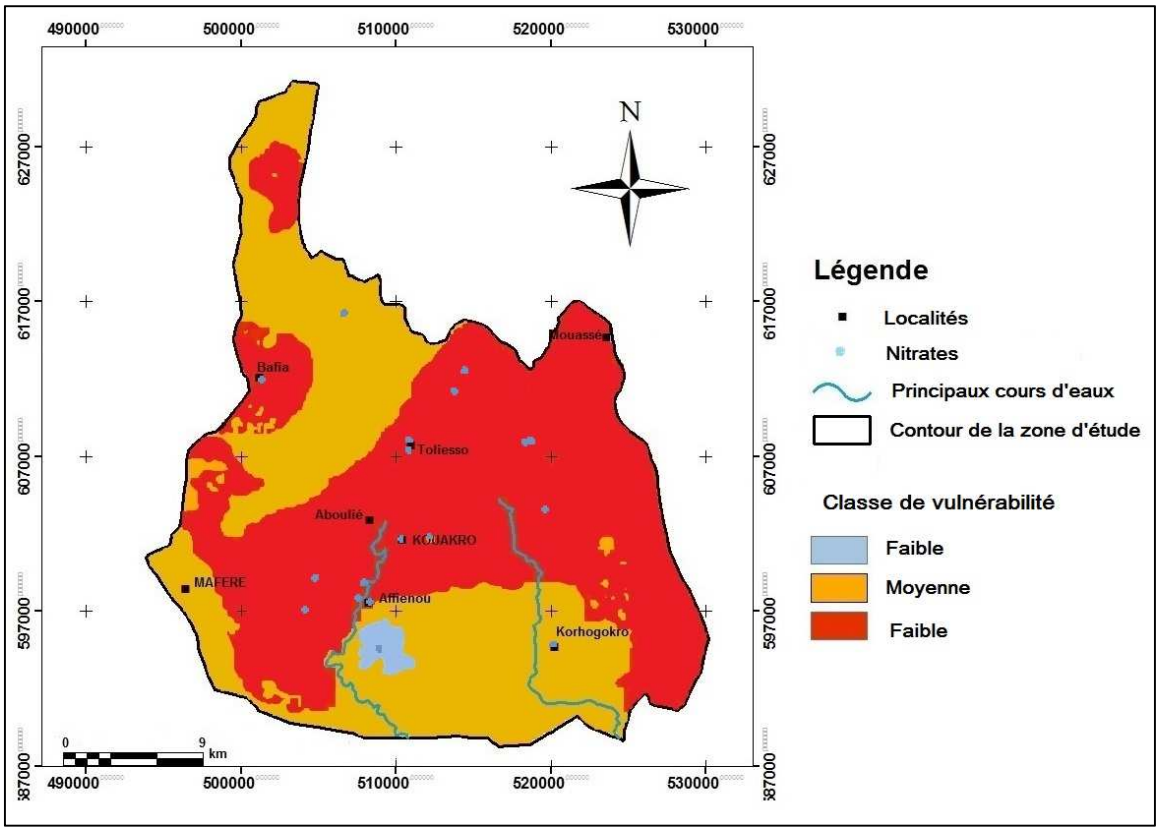


Fig. 9. Superposition de la répartition spatiale des points de prélèvement avec la carte de vulnérabilité

L'analyse de la carte de répartition des teneurs en nitrates (Fig.10) montre que les valeurs supérieures à 6,5 mg/L sont enregistrées dans des zones où la vulnérabilité à la pollution a été estimée forte. Il s'agit des secteurs Centre, Est, et Sud-est de la zone étudiée. Ce résultat est aussi observé à l'Ouest aux alentours du village de Bafia. De même, des teneurs de nitrates de 4,5 à 6,5 mg/L ont été obtenues au Nord et au Sud, zones où la méthode DRASTIC a donné une vulnérabilité moyenne. Ces résultats permettent de conclure que la carte de vulnérabilité obtenue est valide et reflète la réalité du terrain.

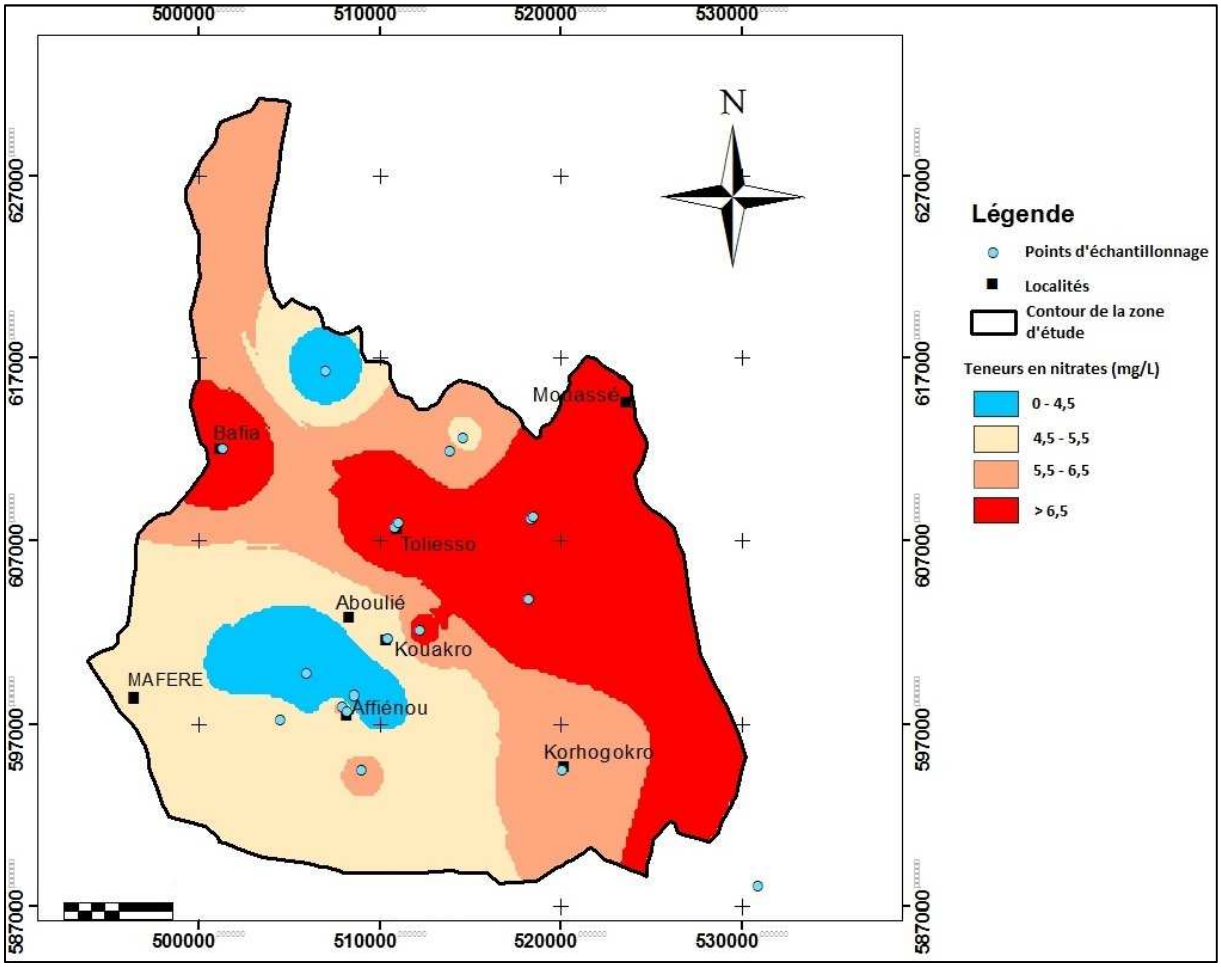


Fig. 10. Répartition spatiale des teneurs en nitrates

4 DISCUSSION

L'étude de la vulnérabilité des aquifères par la méthode DRASTIC a révélé 3 classes : faible, moyenne et forte occupant respectivement 1,1; 45,4 et 53,5% de la zone d'étude. La classe « forte vulnérabilité » est la plus représentée. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les niveaux statiques y sont généralement inférieurs à 5 m de profondeur auquel on associe la présence de sables tertiaires. L'importance du type de sol a été soulignée par [26], 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 accroitre la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Des résultats similaires montrant 3 classes de vulnérabilité ont été obtenus par d'autres auteurs [14], [27]. Dans le département de M'BAHIAKRO (Centre de la Côte d'Ivoire), [27] a obtenu une distribution avec 39% de la surface de la zone d'étude dans la classe faible, 50% dans la classe moyenne et 11% dans la classe forte. C'est aussi le cas de [14] qui, a obtenu à Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire), les mêmes classes faible, moyenne, forte occupant respectivement 13, 64 et 23%. La différence constatée au niveau des surfaces occupées par les classes de vulnérabilité d'une région à une autre pourrait être due aux spécificités locales (natures et qualité des données). La méthode DRASTIC a donné de bons résultats à travers le monde comme l'ont montré [6], [12], [14], [16], [23]. Cependant, quelques limites dans son application méritent d'être relevées. La première difficulté est liée au nombre de facteurs hydrogéologiques pris en compte [14]. En effet, les valeurs de certains facteurs comme la recharge ou encore la conductivité hydraulique ont été obtenues par extrapolation de données parfois de sources différentes. La deuxième limite de DRASTIC provient de la précision au niveau de l'estimation de la profondeur des nappes. Cette précision est fonction de l'intervalle des isobathes de niveau de la profondeur de la nappe. Plus les intervalles sont larges, moins précise est l'estimation et cela entraine un problème de continuité des données [28]. Cependant, pour cette étude les profondeurs ont été directement obtenues à partir des logs de forages. Un autre point de discussion dans l'application de la méthode DRASTIC, se situe au niveau du choix du type de coefficient de pondération et au niveau des limites des classes. En effet, bien qu'une classification soit proposée,

le choix des limites des intervalles est laissé à l'appréciation de l'opérateur en fonction des données disponibles et des spécificités de la zone étudiée. En d'autres termes les limites des différentes classes ne sont pas des valeurs absolues mais plutôt des valeurs relatives.

En dépit de ces quelques limites, la méthode DRASTIC reste une approche fiable et offre des résultats assez proches de la réalité du terrain. D'ailleurs, les résultats obtenus dans cette étude ont été confortés par les teneurs en nitrates contenues dans les eaux souterraines de la région quoi qu'elles ne soient pas encore alarmantes, c'est-à-dire en dessous du seuil guide proposé par l'OMS qui est de 50 mg/L. Les faibles teneurs en nitrates pourraient laisser entrevoir un milieu fermé. Ce qui signifierait que les teneurs enregistrées sont d'origine naturelle. Or d'après [29], le bruit de fond naturel des nitrates n'excède pas 5 mg/L. On peut donc conclure qu'il y'a bien eu apport de nitrates d'origine anthropique (utilisation des engrais azotés par exemple ; en faible proportion). De plus, une zone vulnérable peut aussi avoir une faible teneur en nitrate étant donné que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuelle, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle, si rien n'est entrepris pour les protéger [24]. Dans tous les cas, dans cette étude les zones réellement contaminées correspondent à celles où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés.

Les résultats de cette étude permettent d'avoir une idée sur les zones sensibles et ainsi d'en tenir compte dans l'exploitation de celles-ci. L'étude a montré que les zones minéralisées se situent dans les zones de forte vulnérabilité. L'exploitation minière concernera environ 75% les minerais sulfurés puisque l'essentiel du minerai oxydé a déjà été exploité. Le potentiel de génération du Drainage Minier Acide (DMA) serait alors élevé dans la zone d'étude. En effet, le DMA se forme lorsque les sulfures sont exposés à l'eau (atmosphère humide) et à l'oxygène provenant généralement de l'atmosphère. L'exploitation minière contribuera d'une part à la mise en surface des sulfures et d'autre part au contact de ceux-ci avec les eaux d'infiltration aux travers des galeries et autres ouvrages miniers. De fait, l'acidité des eaux du milieu résultant de l'oxydation des sulfures facilitera le relargage des métaux et métalloïdes dans le milieu environnant et surtout dans les eaux souterraines. L'utilisation de techniques appropriées de prévention du DMA comme le recouvrement avec des résidus miniers neutres, le recouvrement de type couverture à effets de barrières capillaire (CEBC) [31] et le traitement actif avec neutralisation chimique à la chaux est alors recommandée afin d'inhiber la production du Drainage Minier Acide.

5 CONCLUSION

L'application de la méthode DRASTIC a permis d'établir la carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution des aquifères de la zone minière d'Afema. Trois classes de vulnérabilité ressortent de l'analyse de cette carte : faible, moyenne et forte couvrant respectivement 1,1 ; 45,4 et 53,5%. La méthode DRASTIC reste une approche fiable qui donne des résultats assez proches de la réalité. En outre, les résultats obtenus ont été confortés par les teneurs en nitrates contenues dans les eaux souterraines. Cette étude a ainsi permis de mettre en lumière les prédispositions naturelles de la zone d'Afema face à une pollution se produisant à la surface du sol. Afin d'inhiber la production probable du Drainage Minier Acide, des techniques de prévention ont été recommandées à l'entreprise minière.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à traduire leur gratitude à l'endroit du Centre Universitaire de Recherche et Application en Télédétection (CURAT), à la Direction Régionale de l'Hydraulique d'Aboisso et à l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) pour toute leur aide et la mise à disposition des différentes données et matériels. Les auteurs remercient également toutes les personnes physiques ou morales ayant contribué à la l'amélioration de ce travail.

REFERENCES

[1] Ministère de l'agriculture de Côte d'Ivoire, 2016. [En ligne] Disponible : http://agriculture.gouv.fr (18 Février 2016)

[2] US. EPA, "Wastes from the extraction and beneficiation of metallic ores, phosphate rock, asbestos, overburden from uranium mining and oil shale", *EPA Report to Congress*, pp. 4–49, 1985.

[3] A. Azapagic, "Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry", *Journal of Cleaner Production,* vol. 12, pp. 639–662, 2004.

[4] Y. Li, Y. Wang, X. Gou, Y. Su, G. Wang, "Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China", *Journal of Environment Sciences* Vol. 18, no. 6, pp. 1124-1134, 2006.

[5] K. A. Hudson-Edwards, M. G. Macklin, and H. E. Jamieson, "The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Nos Agrio-Guadiamar, Amalcó Ilar, Spain", *Appl Geochem*, vol. 18, pp. 221–239, 2003.

[6] US EPA, "Environmental Protection Agency. DRASTIC: a standard system for evaluating groundwater potential using hydrogeological settings, Ada, Oklahoma" WA/EPA Series; 163, 1985.

[7] K. E. Assié, "Lode gold mineralization in the Paleoproterozoic (Birimian) volcano-sedimentary sequence of Afema gold district, southeastern Côte d'Ivoire", Doctoral thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences Technical University of Clausthal, Germany, 198 p., 2008.

[8] C. Delor, Y. Diaby, Y. Simeon, J-P. Tastet, M. Vidal, J-V. Chiron et A. Dommanget, "Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille Grand-Bassam", Mémoire de la Direction de la Géologie de Côte d'Ivoire, Abidjan no. 4, 30 p., 1992.

[9] Geomines, "Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise", Cahier no. 26, carte Abengourou, DCH, 24 p., 1982.

[10] A. Perraud et P. De la Souchère Carte de l'Esquisse Pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500 000. Feuille Sud-Est", Ministère de l'Agriculture, 1971

[11] A. Zaporozec et J. Verba, "Classification and review of groundwater and Vulnerability maps", *Groundwater vulnerability*, vol. 10, pp. 19–21, 1994.

[12] S. Bezelgues, E. Des Garets, V. Mardhel et N. Dörfliger, "Cartographie de la vulnérabilité de Grand-Terre et de Marie-Galatie (Guadeloupe)", Phase 1: méthodologie de détermination de la vulnérabilité, 45 p., 2002.

[13] N. Schnebelen, J.P. Platel, Y. Le Nindre, D. Baudry, A. Hoarau, P. Dufour, et S. Benhammouda, "Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de nappe de I 'Oligocène en région bordelaise" *ERIC Document Reproduction* Service no. ED 98-01, 2002.

[14] J.P. Jourda, "Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale: Cas des zones tests de la Côte d'Ivoire", Thèse de doctorat ès sc. nat., Université de Cocody Abidjan, 429 p., 2005.

[15] V. Cloutier, R. Lefebvre, M. Savard et T. Therien, "Analyse statistique multivariable de l'hydrogéochimie régionale des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec" *54th Canadian Geotechnical Conférence*, Calgary, pp. 1068–1076, 2001.

[16] L. Aller, T. Bennett, J.H. Lehr, R. Petty and G. Hackett, "DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution in potential using hydrogeological settings", *Jour. Geol. Soc. India*, 29 (1), pp. 23-37, 1987.

[17] J.P. Jourda, M.B. Saley, K. J. Kouamé, B. H. Kouadio, J. Biemi 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", Acte de la Conférence Francophone SIG, Paris, 21p., 2005.

[18] B. Dibi, "Cartographie des sites potentiels d'implantations des points d'eau dans le département d'Aboisso (sud-est de la Côte-d'Ivoire): Apport du SIG et de l'analyse multicritère", Thèse unique de doctorat, université d'Abobo-Adjamé, 164 p., 2008.

[19] J. Biémi, "Contribution à l'étude Géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsaheliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire)", Thèse de doctorat ès sciences naturelles, Université Nationale d'Abidjan, 493 p., 1992.

[20] M. Youan Ta, "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 unique de Doctorat, Université de Cocody Abidjan, 260 p., 2008.

[21] R. M. Mohamed, "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* / sècheresse, vol. 12, no. 2, pp. 95–101, 2001.

[22] I. Savané, B. T. Goula, G. A. Doua et K. I Kouamé, "Vulnérability assessment of the Abidjan Quaternary Aquifer using the DRASTIC method", *Ground water pollution in Africa*, pp. 115–124, 2006.

[23] M. H. Hamza, A. Added, A. Frances et R. Rodriguez, "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, 2007.

[24] K. J. Kouamé, "Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire): Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution" Thèse unique de doctorat, Université de Cocody Abidjan, 225 p., 2007.

[25] G. E. Aké, "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 unique de Doctorat. Université de Cocody Abidjan. 260 p., 2010.

[26] 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: pp. 95–100, 2007.

[27] B. Dibi, K. L. Kouassi, K. I. Kouamé, K. S. Konan, M. Soumahoro, A. B. Konan-waidhet, and D. Gnakri, "Assessment of vulnerability to pollution of aquifers of weathered layer by DRASTIC and SYNTACS methods: Case of M'Bahiakro city, Central Côte d'Ivoire", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2 no. 4, pp. 464-476, 2013.

[28] K. J. Kouamé, J. P. Jourda , M. B. Saley, S. K. Deh, A. T. Anani and J. Biémi, "Mapping of groundwater vulnerability zones to pollution in various hydrogeological environments of Côte d'Ivoire by DRASTIC method", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, pp. 918–923, 2013.

[29] E. Gilli, C. Mangan, J. Mudry, *Hydrogéologie: Objet, méthodes, applications,* 3e Ed. Dunod, 2012.

[30] M. Aubertin, E. Cifuentes, V. Martin, S. Apithy, B. Bussière, J. Molson, R.P. Chapuis and A. Maqsoud, "An investigation of factors that influence the water diversion capacity of inclined covers with capillary barrier effects", Geotechnical Special Publication n° 147, pp. 613-624, 2006.