



Available online at <http://www.ifgdg.org>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 18(5): 2022-2040, October 2024

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

**International Journal  
of Biological and  
Chemical Sciences**

**Original Paper**

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

## **Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des d'eaux souterraines d'un environnement minier : cas de la sous-préfecture d'Hire (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire)**

Anowa Evrade Larissa EBA\*, kassi Alexis KOUAME, Serge Kouakou DEH,  
Akissi Anice Emmanuela HOURE et Kouassi Ernest AHOUSI

*Laboratoire des Sciences du Sol de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.*

*\*Auteur correspondant, E-mail: [ebaballiet@gmail.com](mailto:ebaballiet@gmail.com) ; Tel : 00225 07 49 00 36 00.*

---

Received: 29-06-2024

Accepted: 02-10-2024

Published: 31-10-2024

---

### **RESUME**

La sous-préfecture d'Hiré est une zone à forte activité minière qui exerce une pression sur l'environnement et les ressources en eau. En effet, ces activités impactent les ressources en eau en perturbant leur quantité et leur qualité. Cette étude a été effectuée dans le but d'établir une carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution des eaux-souterraines de la zone minière d'Hiré, afin d'apprécier les endroits où les eaux souterraines peuvent être sensibles aux infiltrations de polluants. La méthode DRASTIC appliquée dans cette étude, prend en compte des paramètres intrinsèques de la nappe (niveau statique, recharge, géologie, nature du sol, topographie, zone vadose et conductivité hydraulique). Elle a permis de mettre en évidence sur une carte, trois plages de vulnérabilité. Une vulnérabilité très faible prenant en compte 1% de la superficie de la zone d'étude, une vulnérabilité faible prenant en compte 93% de la surface et une vulnérabilité moyenne de 6% de la surface occupée. Aussi, les faibles taux de nitrate issus des forages coïncident-ils avec les classes de vulnérabilité faible, et permettent de valider la carte de vulnérabilité réalisée. La Sous-préfecture d'Hiré, est donc une zone où la vulnérabilité à la pollution due aux infiltrations est faible de façon générale.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

**Mots clés:** Cartographie, Classe de vulnérabilité, Paramètres DRASTIC, Mine.

## **Assessment of vulnerability to groundwater pollution in a mining environment: case of the sub-prefecture of Hire (Central-West of Côte d'Ivoire)**

### **ABSTRACT**

The sub-prefecture of Hiré is an area with high mining activity which exerts pressure on the environment and water resources. These activities impact quantity and quality of water resources. The aim of this study is to establish an intrinsic vulnerability map to groundwater pollution in the Hiré mining area, in order to assess the places where groundwater may be sensitive to pollutant infiltration. The DRASTIC method applied in this study takes into account intrinsic parameters of the water table (static level, recharge, geology, nature of the soil, topography, vadose zone and hydraulic conductivity). Three ranges of vulnerability are highlighted on a map.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

9718-IJBSC

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v18i5.31>

Low vulnerability covering 1% of the study area, low vulnerability covering 93% of the area and medium vulnerability covering 6% of the area. Also, the low nitrate levels from drilling coincide with the low vulnerability classes, and validate the vulnerability map. The Sub-prefecture of Hiré is therefore an area where vulnerability to pollution due to infiltration is generally low.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

**Keywords:** Cartography, DRASTIC Settings, Vulnerability class, Mine.

## INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'exploitation minière est une activité économique devenue indissociable du développement économique des pays d'Afrique de l'Ouest (Ndela, 2008). En Côte d'Ivoire, déjà la chute des coûts des matières premières agricoles entre 1980 et 1990 ainsi que les découvertes importantes de gisements miniers ont permis à l'État ivoirien de redynamiser le secteur minier en envisageant de faire de l'industrie extractive, le second pilier de son économie (Soro, 2011). C'est pourquoi, le ministère Ivoirien des Mines et de la Géologie, affirme que: « l'économie de la Côte d'Ivoire qui d'antan était essentiellement basée sur le développement du secteur agricole et de sa productivité est depuis quelques décennies tournée vers l'exploitation de ressource minière telle que l'or » (Ministère de l'Industrie et des Mines (MIM), 2013). Ainsi, en 2019 l'économie ivoirienne a enregistré une contribution de 4% au produit intérieur brut.

La sous-préfecture d'Hiré avec son potentiel minier, ne reste pas en marge de cette production. En effet, cette sous-préfecture abrite deux grandes mines aurifères, l'une à Bonikro et l'autre à Hiré. Ces mines sont de véritables moteurs de développement pour l'économie ivoirienne et pour cette sous-préfecture en particulier. Cependant, les activités minières sont considérées comme une source fondamentale de métaux lourds pour l'environnement (Razo et al., 2004). En effet, une activité minière comme toute activité anthropique déverse dans l'environnement des métaux dissous et particules qui peuvent avoir un impact significatif sur les ressources en eaux. L'utilisation de produits chimiques tels que le cyanure et le mercure dans le traitement du minerai constitue un danger pour les eaux souterraines, de surface et de l'environnement. D'ailleurs les travaux menés par Bamba

(2012), Yapi et al. (2014) et Yao et al. (2020) sur la qualité des ressources en eau des sites miniers de la sous-préfecture d'Hiré et ses alentours ont révélé des cas de contamination dans les eaux de surface en éléments traces métalliques, au mercure et au cyanure. De plus, selon Koffi et al. (2014), le service environnement a découvert en 2013 des cadavres de plusieurs poissons dans les environs de la mine d'or de Bonikro. Aussi, La plupart des travaux importants concernant les activités d'extraction d'or ont été réalisés sur les eaux souterraines et les eaux de surface dans les régions de Hiré et de Divo pour l'évaluation environnementale de ces activités (Loko et al., 2013 ; Yao et al., 2020). Face à ces nombreuses observations et à la présence de ces éléments métalliques en surface, les eaux souterraines de la ville d'Hiré sont menacées en cas d'infiltration. Or, aucune étude portant sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines n'a encore été entreprise pour montrer les grandes tendances de la vulnérabilité. C'est donc dans cette perspective que cette étude dont l'objectif a été d'établir une carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution des eaux-souterraines de la zone minière d'Hiré afin d'apprécier les endroits où les eaux souterraines peuvent être sensibles aux infiltrations de polluants, a été menée.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Présentation de la zone d'étude

Situé au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire, dans la région du Lôh-Djiboua (Figure 1), la ville d'Hiré est une petite localité se trouvant sur un bassin versant d'une superficie d'environ 47,10 Km<sup>2</sup> avec une forte activité minière. En effet, on y observe plus d'une dizaine de sites d'orpaillages disséminés un peu partout dans la zone en dehors de la mine industrielle principale autorisée et mise

en service depuis 2013 (Yapi et al., 2014). Sur le plan géologique, les formations sont d'âge protérozoïque. Elles sont constituées de granites, de schistes et de roches vertes (Baka, 2012), au sein desquelles se trouvent trois types de réservoirs superposés (Yao, 2009). En haut, les altérites composées de cuirasse latéritique et sable argileux ; au milieu, des éléments rocheux et de produits d'altération avec présence ou non de nombreuses fissures (souvent, principal réservoir de l'aquifère de socle (SGS, 2006) accentuent la vulnérabilité des eaux souterraines par le transfert des polluants de la surface vers les profondeurs ; en bas, le socle fracturé ou broyé. Quant à la population d'Hiré, estimée à 31 960 habitants en 2014, elle était passée à 78.139 en 2021 (RGHP, 2021). En effet, depuis 2013, avec la construction de la mine d'or, la commune d'Hiré fait face à un flux migratoire massif, d'une part d'employés de la mine, et d'autre part des orpailleurs venus d'autres régions du pays et de pays étrangers.

### **Matériel**

Le matériel de travail utilisé pour cette étude était composé de données multi-sources. Il s'agit, de données cartographiques composées, d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 30m de la zone d'étude, téléchargé via le site <http://www.earth.google.com>, qui a permis d'élaborer la carte des pentes ; d'une carte de l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500000 fournie par les travaux de Perraud et De La Souchère (1971); de la carte géologique du degré carré de Gagnoa à l'échelle 1/200000 (Delor et al., 1992) pour les formations géologiques de la zone d'étude. A ces données, on a ajouté des données pluviométriques fournies par la société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) sur la période de 2009 à 2019, qui ont servi pour le calcul de la recharge; des fiches techniques de forages fournies par la Direction de l'Hydraulique Rurale et Périurbaine (DHRP), sur lesquelles sont consignées les données de profondeurs de forages, de niveaux piézométriques, d'essai de

pompage et de coupes lithologiques qui ont aidé à la réalisation des différentes cartes thématiques.

Le traitement de toutes ces données a été fait essentiellement à l'aide d'outils informatiques équipés du logiciel ArcGIS 10.4.1, qui avec ses fonctionnalités de cartographie avancées ont permis de générer les différentes cartes thématiques, et de les combiner à travers un SIG pour ainsi avoir la carte finale.

### **Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux-souterraines**

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans le monde. Cependant, dans cette étude, celle qui a été choisie est La méthode DRASTIC. C'est une méthode destinée à la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères. Son choix a été motivé par le fait qu'elle est relativement simple et les paramètres utilisés sont disponibles et faciles à évaluer. Aussi elle fait partie des méthodes les plus utilisées dans le monde pour l'estimation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Au Québec, Murat et al. (2003) l'ont utilisé dans l'étude de la vulnérabilité des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec. En Tunisie, Hamza et al. (2007) et Habib et al. (2010), l'ont utilisé respectivement dans l'étude de la pollution par les nitrates de la nappe de Metline-Ras et la pollution agricole de la nappe de Chaffar. Selon Hamza et al. (2007), bien que souvent modifiée, elle demeure efficace quant à l'estimation de la vulnérabilité. En Côte d'Ivoire, plusieurs auteurs l'ont également utilisé et ont obtenu des résultats satisfaisants. Ce sont, entre autres, Jourda et al. (2007) et Ake et al. (2010) dans la région de Bonoua, Kouamé (2007) dans le District d'Abidjan, etc.

### **Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC**

#### **Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC**

Les conditions de l'utilisation de cette méthode reposent sur quatre hypothèses fondamentales (Osborn et al., 1998) à savoir,

les sources de contamination potentielle se trouvent à la surface du sol, les contaminants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par infiltration, le contaminant a la même mobilité que l'eau souterraine, la zone à évaluer est d'au moins 0.4 km<sup>2</sup>.

**Elaboration d'une base de données**

La méthode DRASTIC nécessite l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) qui sert d'outil pour la gestion des ressources à travers la réalisation d'une base de données thématiques et spatiales. Toutes ces données entrant dans la conception du SIG ont été ramenées dans un référentiel unique, afin d'en faciliter la manipulation et la superposition des couches. L'acronyme DRASTIC tire ses initiales de sept paramètres déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité (Bézélgues et al., 2002). Ce sont: la profondeur de la nappe (D) ; la recharge efficace (R); les matériaux de l'aquifère (A); le type de sol (S); la topographie ou la pente (T); l'impact de la zone vadose ou zone aérée (I) et la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Le récapitulatif des paramètres utilisés pour la base de données est dans le Tableau 1.

**Pondération des paramètres et Système de cotation des sous classes**

A chacun des paramètres DRASTIC, est attribué un poids fixe de multiplication, variant de "1" à "5" selon son importance dans le phénomène de vulnérabilité de l'aquifère à la pollution (Tableau 2). Aussi, des cotes variant de "1" à "10" ont été définies en fonction des sous classes associées. Ainsi chaque sous classe qui a une petite cote implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable et inversement (Abdelaziz, 2008). Le Tableau 2 montre les sous classes et les cotes de chaque paramètre.

**Élaboration des cartes thématiques des différents paramètres DRASTIC**

*Profondeur de la nappe (D)*

Elle est représentée par les niveaux statiques qui indiquent le niveau d'eau dans les aquifères. Pour la déterminer, les niveaux statiques provenant de 13 forages de la zone d'étude ont été interpolés pour établir la carte de profondeur de la nappe (Figure2 A). La

classification des valeurs de profondeur de la nappe selon la méthode DRASTIC (Tableau 2), a permis d'établir la carte thématique de ce paramètre à partir de l'outil "Reclassification" du module "Analyst spatial" sous ArcGIS. Les cotes attribuées aux différentes classes de profondeurs vont de 3 à 9 (figure 2 B) du fait des profondeurs comprises entre 1,74 à 18,46 m,

*Recharge de la nappe(R)*

La recharge est étroitement liée à l'infiltration efficace, qui dépend de la quantité de pluie tombée et de ses pertes par ruissellement et par évapotranspiration. Ce paramètre a été déterminé à partir de l'équation du bilan hydrologique :

$P = ETR + R + I \rightarrow I = P - (ETR + R)$  (1). Avec P: précipitation moyenne annuelle en mm; ETR: évapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm; R : ruissellement moyen annuel en mm; et I : infiltration moyenne annuelle en mm.

*Méthode de Thornthwaite*

Elle permet une estimation globale de l'infiltration (I), et repose sur une estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP); (Equation 2):

$$ETP_{(mm/mois)} = 1,6 \times \left[ \frac{10 \times t}{I} \right]^a \times F(\lambda) \quad (2)$$

t: température mensuelle moyenne en (°C); a: fonction complexe de l'indice thermique I; avec  $a = (6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,49239)$  (3)

I : indice thermique annuel (somme des douze indices thermiques mensuel (i)) calculés par la

formule suivante  $i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1,514}$  (4)

F(λ) : Facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré.

Pour le calcul de l'ETR, la RFU (stocke d'eau dans le sol) a été estimée à 100 mm. La démarche de calcul comporte deux cas de figure :

-Si  $P \geq ETP$ , l'ETR est égale à ETP, et il restera une quantité d'eau (P-ETR) qui servira à la reconstitution des réserves d'eau du sol.

-Si  $P < ETP$ , l'évapotranspiration va se réaliser sur la totalité des pluies, et sur les réserves du sol :  $ETR = P + RFU$ .

Si la RFU épuisée, l'évapotranspiration ne se réalisera que sur les pluies tombées, d'où  $ETR = P$ . Il en résulte un déficit du bilan (ETP-ETR) qui marque, les besoins en eau des plantes.

#### *Écoulement de surface ou ruissellement*

Il représente la part de la pluie qui alimente le réseau de surface.

Sa formule est :  $R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$  (5)

Après calcul, la valeur de recharge obtenue est de 85,04 mm/an sur l'ensemble de la zone d'étude. La cote 3 est donc choisie selon le système de cotation de la méthode DRASTIC.

#### *Matériau de l'aquifère (Lithologie A)*

Selon la carte géologique de la zone d'étude et les logs des forages, il est constitué de granite, de schiste et de roche verte (Figure 3 A). Tenant compte de la cotation de la méthode DRASTIC (Tableau 2), une reclassification de la carte thématique est faite à partir de l'outil "Reclassification" du module "Analyst spatial" du logiciel ArcGIS. On obtient alors deux classes (Granite et schiste) auxquelles on affecte des cotes (Figure 3 B).

#### *Type de sol(S)*

Dans la contrée d'Hiré, les types de sol rencontrés sont les sols ferralitiques moyennement désaturés sur granite, les sols ferralitiques faiblement désaturés sur schiste et la cuirasse (Figure 4 A). D'après la notice explicative de la carte pédologique, les sols ferralitiques moyennement désaturés sont constitués de 45% d'argile, de 8,5% de limon et de 43% de sable, ils ont donc une texture sablo-argileuse ; les sols ferralitiques faiblement désaturés sur schiste quant à eux sont composés de 51,3% d'argile, 20% de limon et de 28% de sable, ils sont de texture argileuse. La cuirasse étant un sol fortement durci, joue un rôle protecteur contre l'érosion. En tenant compte du Tableau 2, une reclassification de la carte thématique du logiciel ArcGIS. On obtient alors deux classes (Sable-argileux et Argile) auxquelles on attribue des cotes de 1 et 6 (Figure 4 B).

#### *Topographie (Pente T)*

Le traitement de l'image MNT de la zone d'étude sous ArcGIS a permis de générer

la carte des pentes (Figure 5). Ce paramètre est représenté par des valeurs de pente qui varient de 0 à 12%. La classification selon DRASTIC (Tableau 2), permet d'attribuer des cotes allant de 5 à 10 (Figure 5).

#### *Impact de la zone vadose ou zone non saturée (I)*

Les fiches techniques de forages présentent deux types de formation dans la zone: l'argile et le sable argileux (Figure 6). Selon la classification (Tableau 2), les cotes attribuées aux formations lithologiques de la zone vadose du bassin versant de la mine d'Hiré sont respectivement 3 et 6 (Figure 6).

#### *Conductivité hydraulique(C)*

Les valeurs de la conductivité hydraulique calculées dans la région d'Oumé par Baka et al. (2011) varient de  $3,46 \cdot 10^{-9}$  à  $8,46 \cdot 10^{-7}$  m/s. Ces valeurs sont attribuées au bassin versant de la mine d'Hiré car, ces localités sont voisines et possèdent les mêmes caractéristiques structurales et lithologiques. Pour ces valeurs de conductivité, la classification selon le Tableau 2, attribue une cote de 1 (Figure 7)

Les cotes et poids attribués aux différents paramètres sont récapitulés dans le Tableau 3.

#### *Calcul et Classification de l'indice DRASTIC (ID)*

Le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC (ID) s'est effectué en faisant la somme des produits de chaque cote par son poids selon l'équation (6) (Osborn et al., 1998):

$$ID = Dc \times Dp + Rc \times Rp + Ac \times Ap + Sc \times Sp + Tc \times Tp + Ic \times Ip + Cc \times Cp \quad (6)$$

p : le poids du paramètre c : la cote associée

Les valeurs des poids des paramètres de la méthode DRASTIC utilisées (Tableau 2) sont celles définies par Aller et al. (1987).

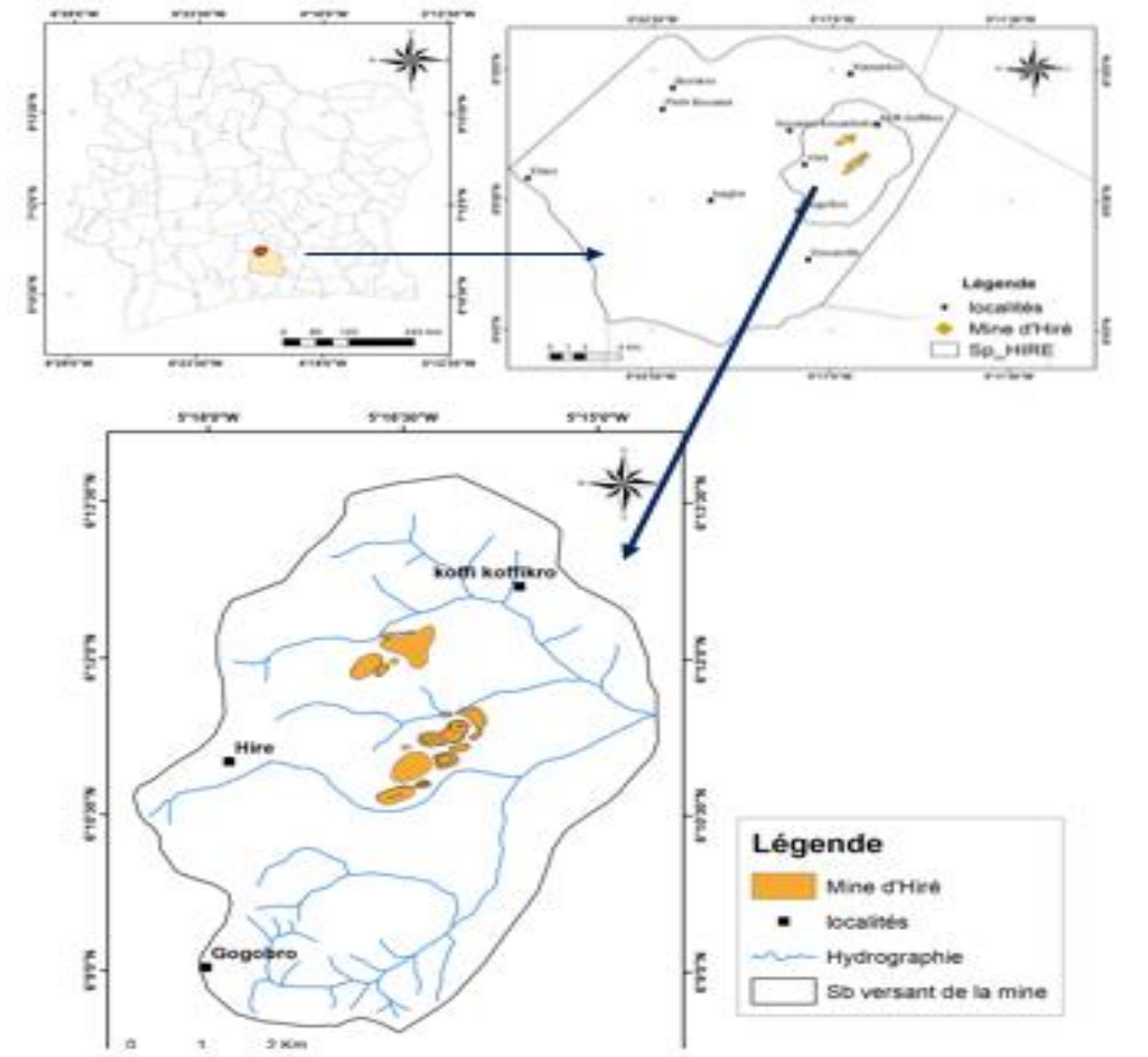
Après le calcul, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'ID. L'équation 7 a permis d'effectuer la conversion des indices DRASTIC en pourcentage (Jourda et al., 2007). Indice en % =  $\frac{ID - 23}{226} \times 100$  (7)

Le Tableau 4 présente les indices DRASTIC et les degrés de vulnérabilité.

**Validation de la carte de vulnérabilité (répartition des teneurs en nitrates)**

De façon général, la validation d'une carte de vulnérabilité est faite à partir des mesures de données chimiques des eaux souterraines. Plusieurs auteurs dont Jourda et al. (2006), Hamza et al. (2007), Aké et al. (2010), ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des

eaux souterraines. Dans cette étude, la validation de la carte de vulnérabilité a été faite en superposant la carte de vulnérabilité obtenue à la carte de répartition des teneurs en nitrates de 13 échantillons d'eau répartis sur l'ensemble du bassin de la mine d'Hiré et fournis par la DHRP. La Figure 7 présente la répartition spatiale des points d'échantillonnages du nitrate.



**Figure 1** : Localisation de la zone d'étude.

**Tableau 1 :** Création de la base de données pour le bassin versant de la mine d’Hiré.

Paramètres	Types de données	Cartes produites
Profondeur de la nappe	Relevé du niveau statique de la nappe	Carte de profondeur de la nappe
Recharge	Données pluviométriques	Estimation de la lame d’eau infiltrée
Type d’aquifère	Carte géologique à 1/200000 et données de forages	Carte de la lithologie de l’aquifère
Type de sol	Carte pédologique à 1/500000	Carte des sols
Topographie	Modèle Numérique de terrain (MNT) de résolution 30m de la zone d’étude	Carte des pentes
Impact de la zone vadose ou zone non saturée	Données de forages	Carte de la zone vadose ou zone non saturée (ZNS)
Conductivité hydraulique	Données de forages	Carte de la conductivité hydraulique
Teneur en nitrates des eaux souterraines	Donnée de nitrates des eaux souterraines	Carte des teneurs en nitrates des eaux souterraines

**Tableau 2:** Classes, cotes et poids attribuées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC.

Paramètres	Classes	Cotes	Cote typique	Poids
D : Profondeur de la nappe (m)	0 – 1,5 m	10		5
	1,5 – 4,5	9		
	4,5 – 9	7		
	9 – 15	5		
	15 – 23	3		
	23 – 30	2		
	> 30	1		
R : Recharge nette (mm)	0 – 50 mm	1		4
	50 – 100	3		
	100 – 175	6		
	175 – 225	8		
	> 225	9		
A : lithologie de l’aquifère	Schistes massifs	1 à 3	2	3
	Métamorphique	2 à 5	3	
	Métamorphique (Altéré – grès)	3 à 5	5	
	Calcaire massif	4 à 9	8	
	Grès massif	4 à 9	6	
	Sable et gravier	4 à 9	8	
	Basalte	2 à 10	9	
	Calcaire karstique	9 à 10	10	
S : Sol	Mince ou absent	10		2
	Graviers	10		
	Sables	9		
	Limons sableux	4		
	Limons	4		

	Limons silteux	3		
	Argiles	1		
T : Topographie (%)	0 – 2 %	10	1	
	2 – 6 %	9		
	6 – 12 %	5		
	12 – 18 %	3		
	> 18 %	1		
I : Zone non saturée	Silt et argile	2 à 6	3	
	Schistes	2 à 6	3	
	Calcaire	2 à 5	3	
	Grès	2 à 7	6	
	Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	6	5
	Sable et gravier	4 à 8	8	
	Basalte	2 à 10	9	
C : Perméabilité (m/s)	Calcaire karstique	8 à 10	10	
	$< 5.10^{-5}$	1		
	$5.10^{-5}$ à $15.10^{-5}$	2		
	$15.10^{-5}$ à $33.10^{-5}$	4		
	$33.10^{-5}$ à $5.10^{-4}$	6	3	
	$5.10^{-4}$ à $9,5.10^{-4}$	8		
	$> 9,5.10^{-4}$	10		

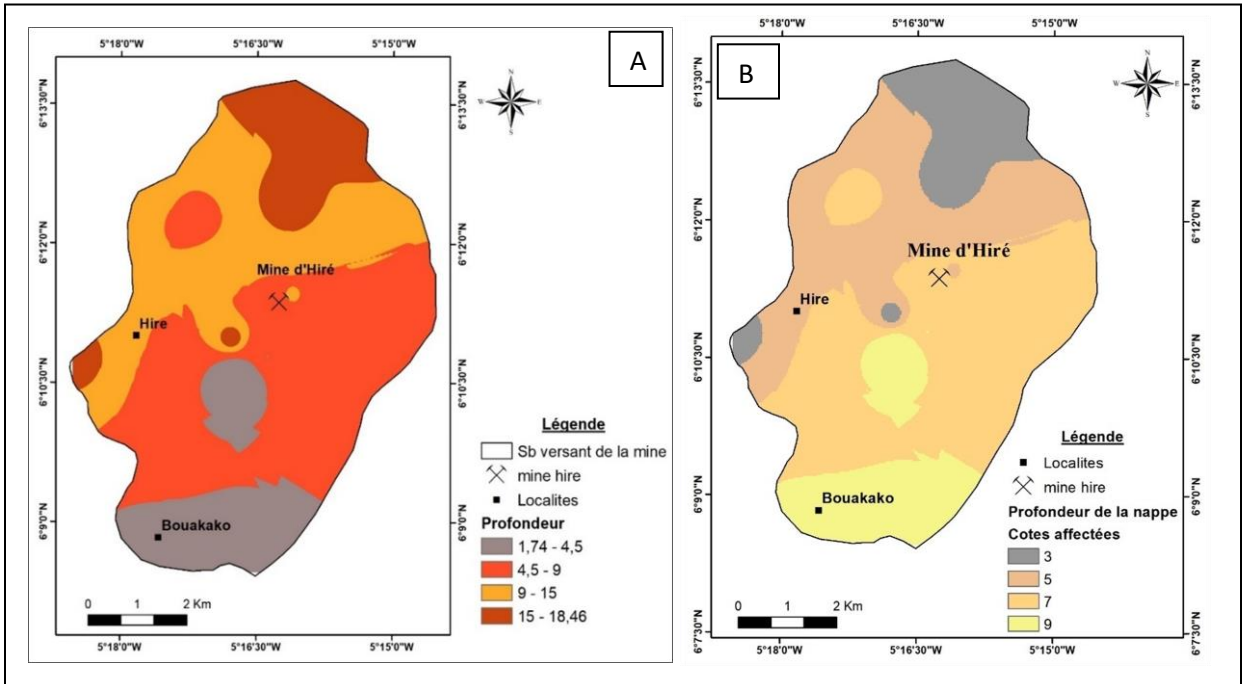


Figure 2: Cartes du paramètre "profondeur" du bassin versant de la mine d'Hiré.



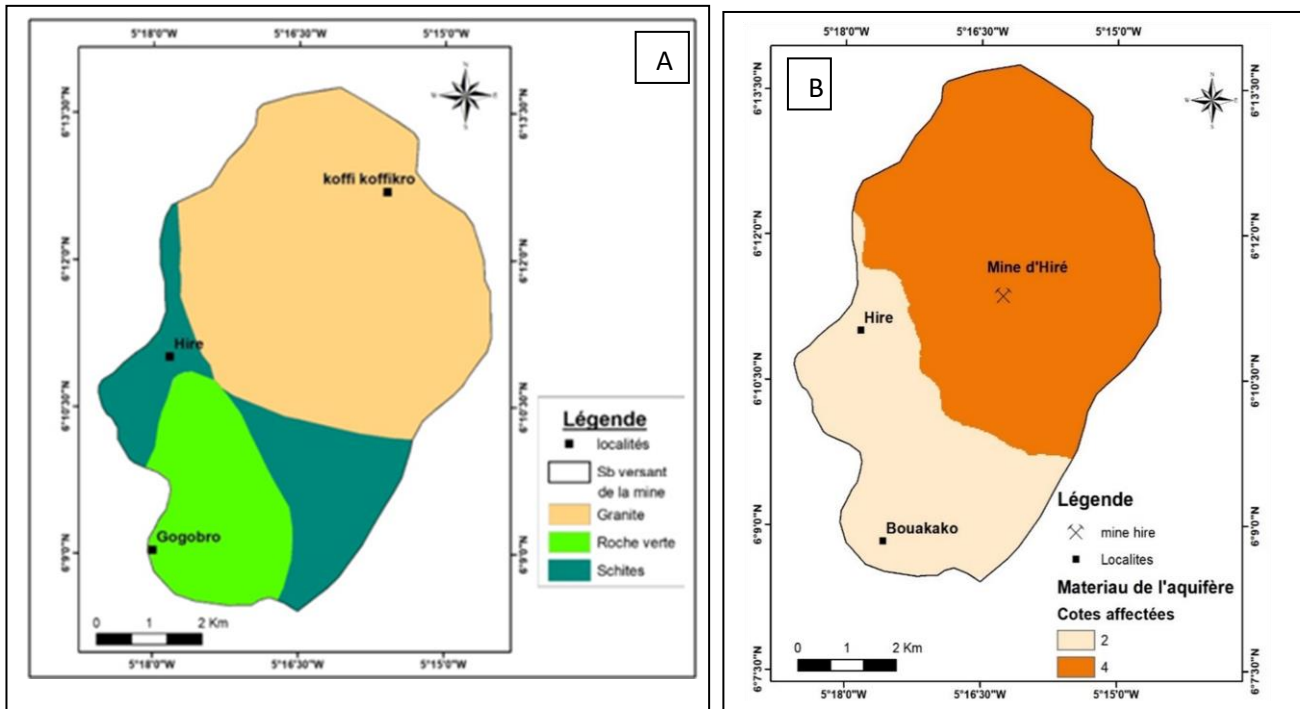


Figure 3: Cartes du paramètre "matériaux de l'aquifère" du bassin versant d'Hiré.

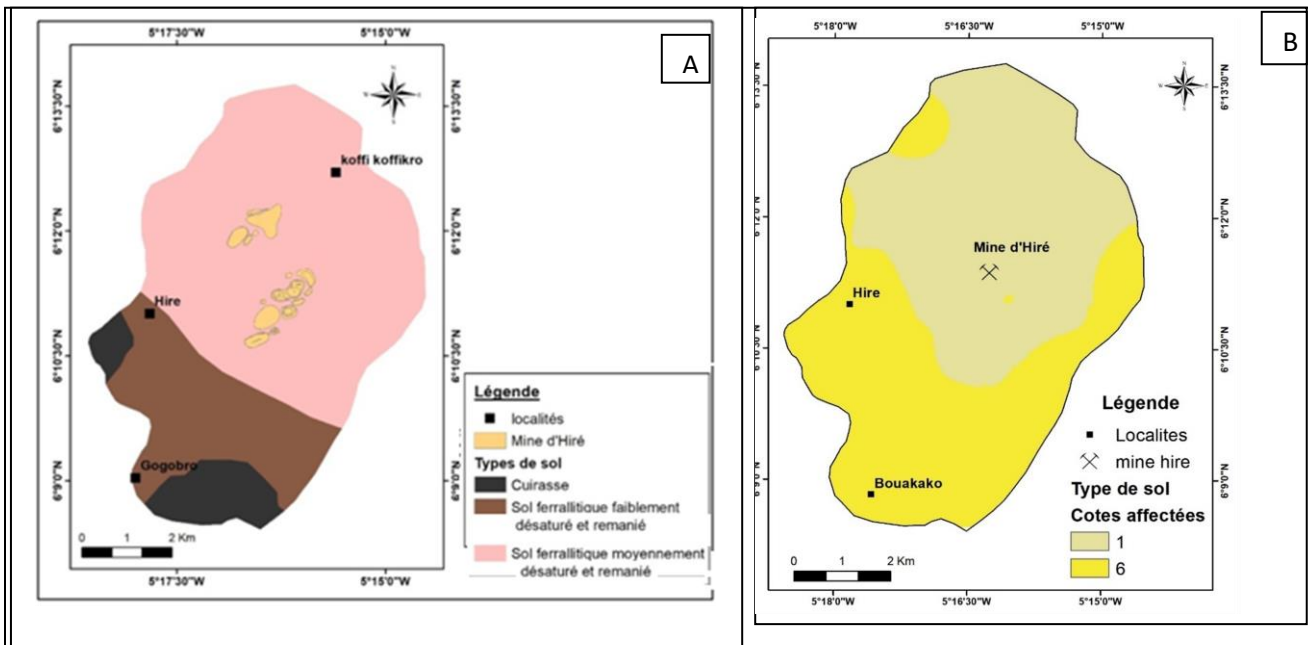


Figure 4: Cartes du paramètre " Type de sol " du bassin versant de la mine.

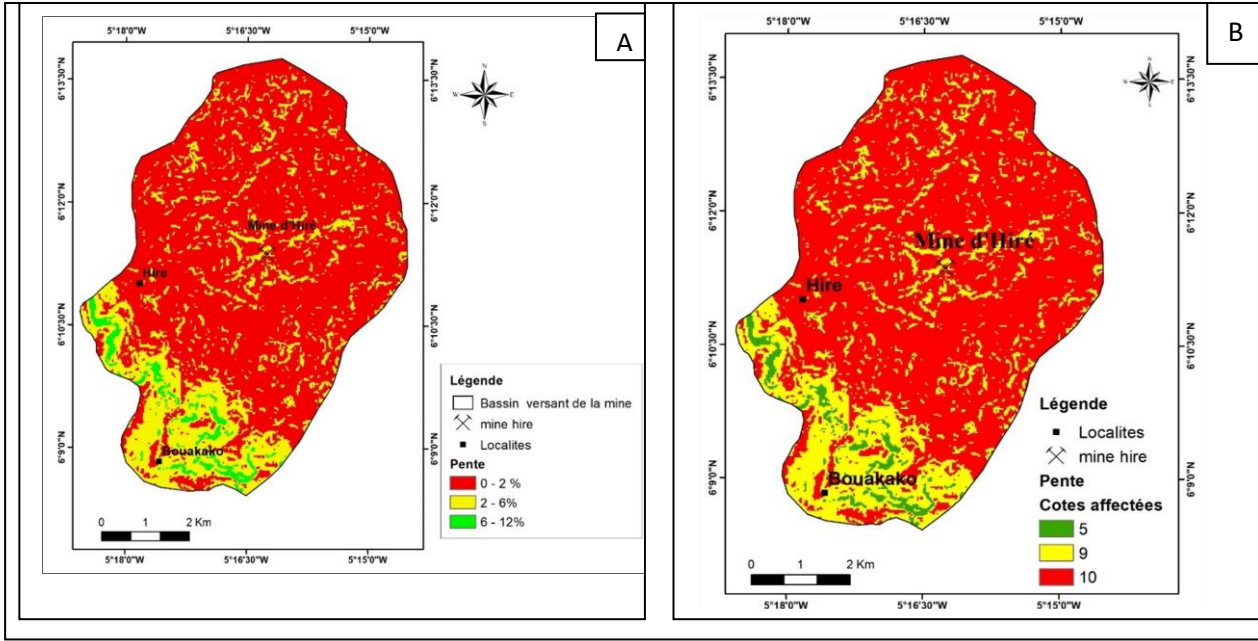


Figure 5: Cartes du paramètre "Pente" du bassin versant de la mine d'Hiré.

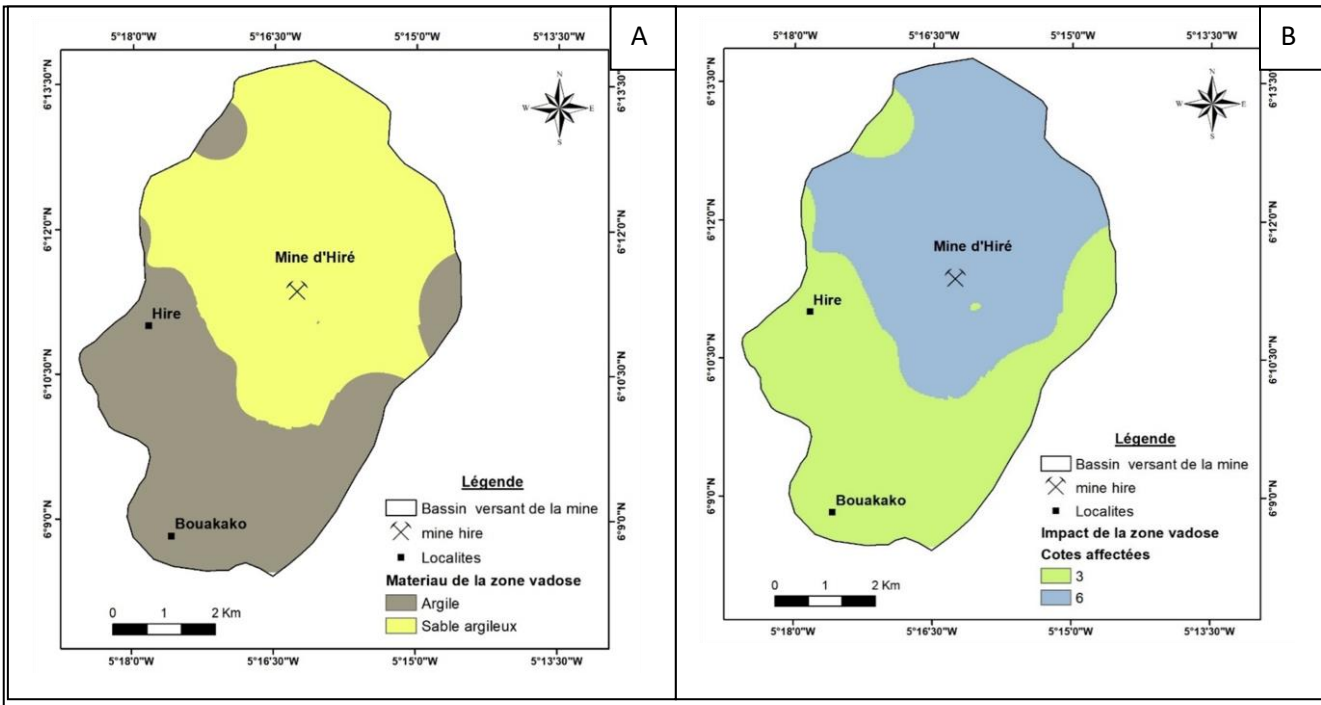


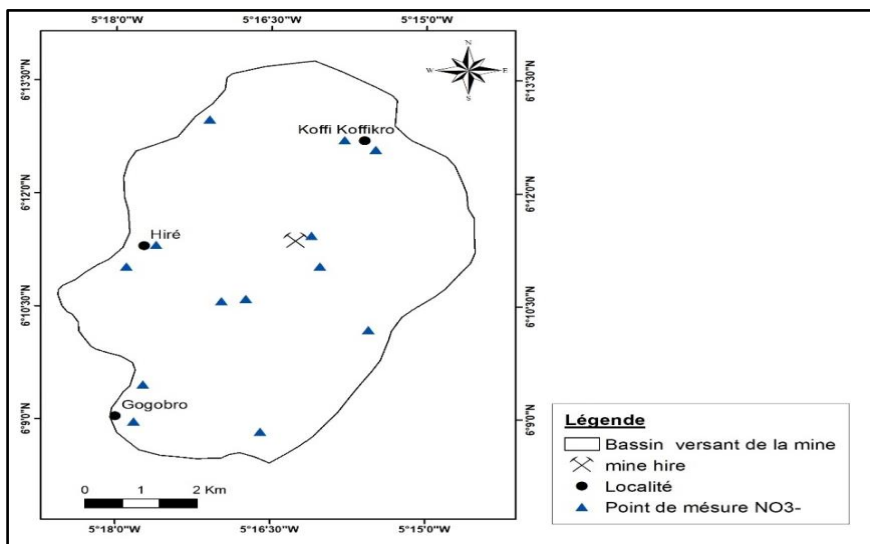
Figure 6: Carte du paramètre zone non saturée ("zone vadose") du bassin de la mine d'Hiré.

**Tableau 3:** Récapitulatif des côtes et poids des différents paramètres de la zone d'étude.

Zone d'étude	Sous-bassin versant			
Paramètre	Classe (m)	Cotes	Poids	Poids × Cotes
Profondeur de La nappe	1,5 - 4,5	9		45
	4,5 - 9	7	5	35
	9 - 15	5		25
	15 - 23	3	5	15
Recharge	85,04	3	4	12
Matériau des aquifères	Granite	4		12
	Schistes	2	3	6
Type de sol	Sable argileux	6		12
	Argile	1	2	2
Topographie (Pente)	0-2	10		10
	2-6	9	1	9
	6-12	5		5
Impact de la Zone vadose	Argile	3		9
	Sable argileux	6	3	18
conductivité hydraulique	$< 5.10^{-5}$	1	3	3

**Tableau4:** Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité.

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



**Figure 7:** Points des mesures du nitrate du bassin versant de la mine d'Hiré.

## RESULTAT

### Carte de vulnérabilité à la pollution du bassin versant de la mine d'Hiré

La Figure 9 présente la carte des indices DRASTIC du bassin versant de la mine d'Hiré. Cette carte a révélé cinq classes d'indices dont les valeurs oscillent entre 80 (valeur minimale) et 121 (valeur maximale). Ces valeurs représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère du bassin versant de la mine d'Hiré et se situent dans la gamme des valeurs théoriques selon la classification de Jourda *et al.* (2007). Les valeurs les plus élevées (106 à 121) ont été observées dans la partie Sud et Est de la zone d'étude. Les valeurs les plus faibles (80 à 90), dans l'extrême Nord et Ouest. Quant aux indices moyens (91 – 106), ils ont été observés au Nord-ouest, Nord-est et au Centre.

#### Analyse des classes de vulnérabilité obtenues

Une seconde classification a permis de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de les convertir en degrés de vulnérabilité à la pollution. Ainsi, trois classes évidentes ont été ressorties: la classe très faible, la classe faible et la classe moyenne (Figure 8).

La classe "très faible" occupe seulement 1% de la zone d'étude et se rencontre à l'extrême Ouest en îlot. Cette classe illustre les zones de couches non saturées constituées d'Argile combinée à la grande profondeur du niveau statique du secteur (supérieur à 15 m) et la forte pente (supérieur à 6%).

La classe "faible" couvre pratiquement toute la zone d'étude (93%). Cette vulnérabilité faible s'expliquerait par le fait que, la zone se trouve en milieu cristallin fracturé où la plupart des paramètres ne favorisent pas les infiltrations. La profondeur d'eau est comprise entre 4,5 et 18 m (Figure 2), la zone non saturée (zone vadose) est constitué d'argile et de sable argileux, avec des types de sol constitués de cuirasses de sol ferrallitiques et le tout couronné par une perméabilité très faible variant de  $3,46.10^{-9}$  à  $8,46.10^{-7}$  m/s. Une contamination de la nappe due à une pollution superficielle reste

négligeable, car le polluant aura des difficultés à traverser les formations subjacentes à la nappe.

La classe de vulnérabilité « moyenne » présente une proportion de 6% de la zone d'étude. Elle s'accroît en îlot au centre de la zone d'étude et dans la zone sud en bande. Bien que la perméabilité sur toute la zone soit faible, cette classe de vulnérabilité moyenne s'explique par la présence de sable argileux à ces endroits, mais surtout une profondeur d'eau faible comprise entre 1,7 et 4,5 m (Figure 2).

#### Teneur en Nitrate des eaux souterraines de la zone d'étude

La Figure 10 présente la carte de répartition de la concentration en nitrates des eaux souterraines de la zone étudiée. Les valeurs de concentrations varient de 0,38 mg/l à 29,82 mg/l, avec une moyenne de 11,27 mg/l  $\pm$  7,78 mg/l. Ces valeurs ont été classées en trois plages. Les valeurs plus faibles comprises entre 0,38 et 7,78 mg/l, celles plus élevées comprises entre 11,27 à 29,82 mg/l, et les valeurs moyenne comprises entre 7,78 mg/l et 11,27 mg/l. En effet, les valeurs les plus faibles ont été observées vers le centre, le nord, l'Est et l'Ouest où la profondeur de l'eau est importante (plus de 15 m). En outre, la partie sud de la zone d'étude où, le niveau piézométrique des eaux est faible, a présenté les valeurs de concentration les plus élevées. Les valeurs moyennes quant à elles ont été également déterminées au sud et au Nord-Ouest. Toutes ces valeurs étaient inférieures à la norme OMS qui est de 50 mg/l.

La superposition des Figures 9 et 10 a montré que les zones à très faibles valeurs de concentration de nitrate, coïncident avec les zones de vulnérabilité faible et celles de valeurs élevées de concentration se retrouvaient en grande partie dans les zones de vulnérabilité moyenne (Figure 11). A l'observation, et à l'analyse, le taux de coïncidence peut être évalué à plus de 80%. Cette superposition a permis de dire que les cartes établies reflètent la réalité du terrain.

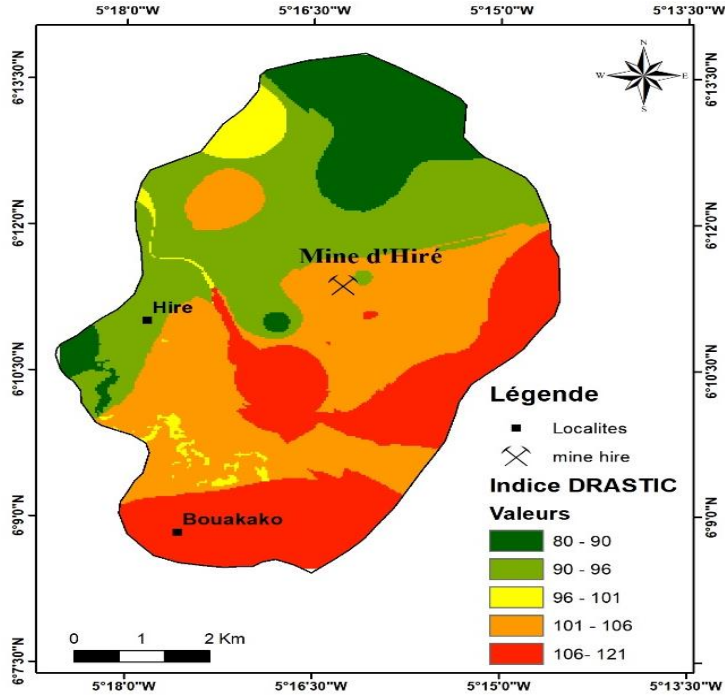


Figure 8: Carte des indices DRASTIC du bassin versant de la mine d'Hiré.

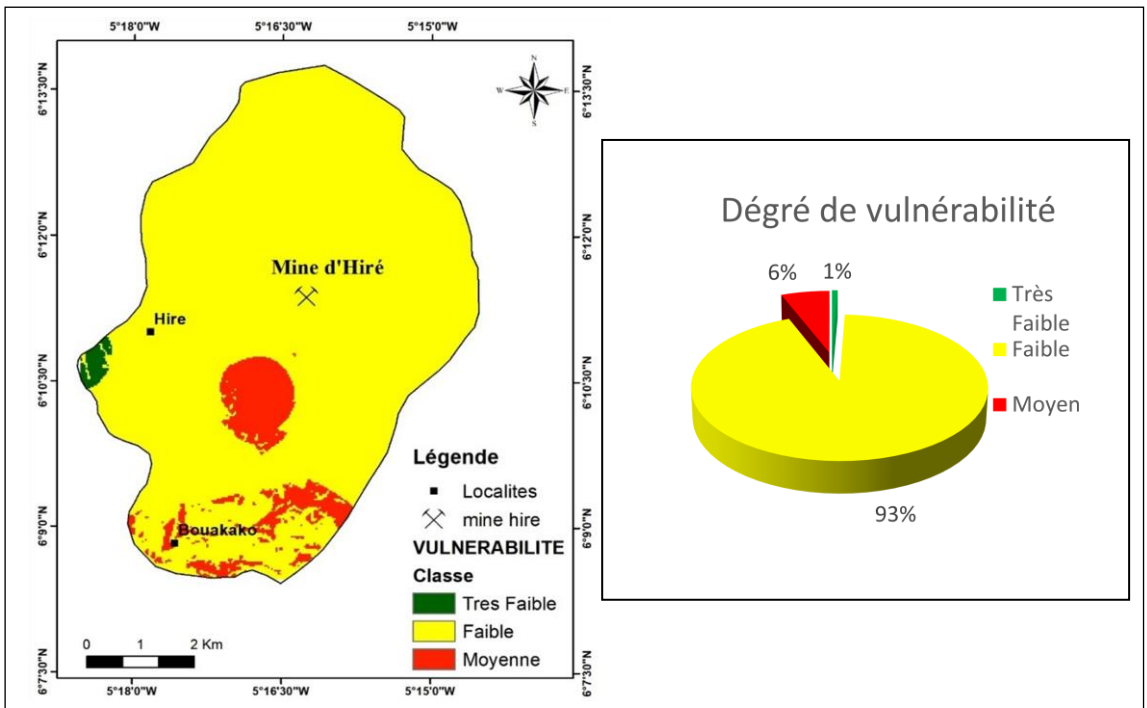
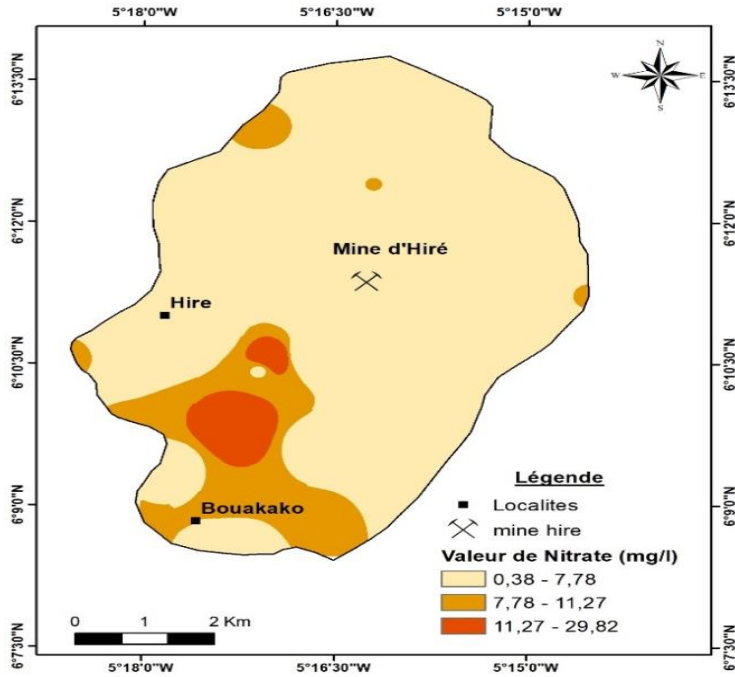
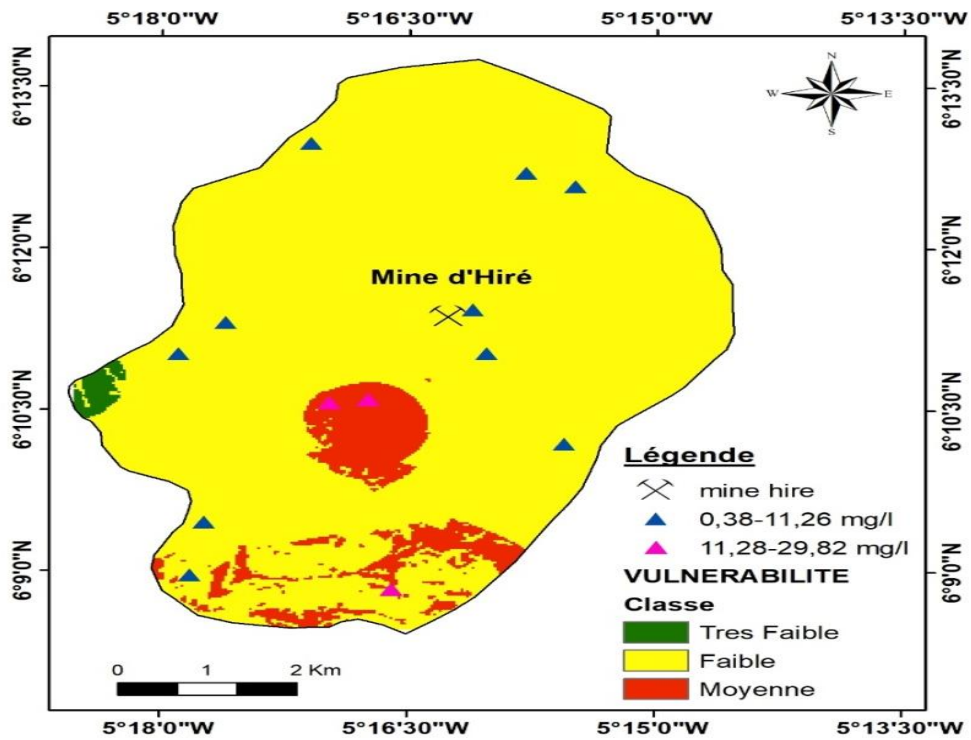


Figure 9: Répartition des surfaces de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du bassin versant de la mine d'Hiré.



**Figure 10:** Répartition spatiale de la concentration en nitrates des eaux souterraines du bassin versant de la mine d’Hiré.



**Figure 11:** Superposition de la carte de vulnérabilité à la carte du taux de nitrate.

## DISCUSSION

Les eaux souterraines du bassin de la mine d'Hiré semblent être protégées contre les sources de pollution d'origines diverses (activités minières, orpaillage, activité agricole etc..) selon les résultats obtenus à parti de la méthode DRASTIC. En effet 93% de la zone d'étude a présenté une vulnérabilité faible et 6% une vulnérabilité moyenne. Cela pourrait être imputé à la nature des formations géologiques rencontrées ainsi que la profondeur élevée par endroits du niveau piézométrique (plus de 15 m), car la partie présentant une vulnérabilité moyenne à un niveau piézométrique faible qui vari de 1,7 à 4,5 m. Ces résultats sont corroborés avec ceux de Mba et al. (2019) dans la ville de Dschang au Cameroun, qui ont déterminé des vulnérabilités moyennes sur les granitoïdes et élevées sur les basaltes. En plus, ils soutiennent que ces vulnérabilités moyennes étaient aussi dues au fait que, les puits prélevés avaient de faibles profondeurs (5 à 9 m). Aussi, contrairement à nos résultats qui présentent de façon générale une vulnérabilité faible (93%), les travaux de Jourda et al. (2007) et d'Aké et al. (2010) à l'aide de la même méthode dans la région de Bonoua ont révélé respectivement 76,76% et 66,18% de vulnérabilité élevée.

Les valeurs de l'indice DRASTIC obtenues dans cette étude varient de 80 à 121. Elles se différencient à quelques détails près de celles obtenues par Mba et al. (2019) à Dschang, au Cameroun (100) et de plusieurs auteurs en Côte d'Ivoire: Youan Ta (2008) au niveau du socle précambrien de Bondoukou (81 à 136), Dibi et al. (2013) à M'Bahikro (103 à 174), Allechy et al. (2016) dans la région d'Oumé (65 à 119) etc. Cette différence pourrait s'expliquer par la diversité géologique des terrains. De telles caractéristiques n'excluent pas cependant, une contamination de la nappe en ces lieux car un site avec un indice faible n'est pas à l'abri d'une contamination, mais est moins susceptible à la contamination par rapport à un site ayant un

indice de vulnérabilité à la pollution élevé (Osborn et al., 1998). Dans le cas de la zone d'Hiré, il faudra donc tenir compte de la possibilité de pollution par les travaux de terrassement de la mine qui expose la nappe aux hydrocarbures des véhicules et engins lourds, les huiles de vidange, les déchets ménagers, les eaux vannes, la lixiviation des sédiments et au drainage acide minier. La pollution au cyanure et au mercure redoutée est moins perceptible car la mine d'Hiré est un site d'extraction de minerai pour l'approvisionnement en matière première de l'usine de Bonikro. Le traitement de minerai ne se fait pas sur le site donc pas d'utilisation de produits chimiques dangereux. Cependant l'existence d'orpaillers clandestins qui utilisent ces produits chimiques aux alentours de la mine n'est pas à négligée, car selon Kouadio (2016) la pratique de l'orpaillage reste un facteur déterminant dans la zone d'Hiré à cause de son avantage économique en terme de revenu, par rapport à l'agriculture.

La réalisation de la carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC a nécessité l'utilisation de sept (07) paramètres dont la fiabilité dépend des données utilisées pour leur réalisation. Or par manque de données couvrant toute la zone d'étude, les données ponctuelles utilisées dans cette étude (recharge, piézométrie, conductivité hydraulique) ont été interpolées, assignant ainsi des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue. L'interpolation utilisée peut donc entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres (Jourda et al., 2006). Aussi, la difficulté de l'application de la méthode DRASTIC est la limite des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres (Murat, 2000). En effet, les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes (Lobo-Ferreira et al., 2003). Dans ces conditions, l'agrégation des cotes n'est pas toujours identique à celle définie par la

méthode, de même que les indices de vulnérabilité. Les limites des différentes classes ne sont donc pas des valeurs absolues, mais relatives (Jourdaet *al.*, 2006). Ces limites peuvent alors varier d'une étude à une autre comme d'une région à une autre. Les travaux de Murat (2000), Murat et al. (2003), Kouamé (2007), et Aké (2010) dans des contextes différents ont donné les mêmes résultats.

Les tendances de vulnérabilité citées plus haut ont été confrontées aux teneurs en nitrates des forages de la zone d'étude ; des teneurs qui sont toutes en dessous de la norme OMS (50 mg/l) pour les eaux de boisson. Les valeurs les plus élevées et faibles de nitrates coïncident à plus de 80% (Figure 11) respectivement avec les zones de vulnérabilité moyenne et faible. Cette concordance a permis de valider la carte de vulnérabilité et de dire que la carte établie reflète la réalité du terrain. Toutefois, les travaux de Lobo et Oliveira (2004), Hamza et al. (2007) et Deh et al., (2012) abordant le sujet, ont montré que la vulnérabilité par les nitrates est mieux exprimée par une méthode de vulnérabilité spécifique par rapport à une méthode de vulnérabilité intrinsèque.

Malgré les différentes limites soulevées, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité obtenue est fiable. Murat et al. (2003) sont arrivés également à une cette conclusion. Cette carte permet d'avoir une idée sur les zones sensibles à prendre en compte lors de l'aménagement du territoire.

### Conclusion

La cartographie des surfaces de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la mine d'Hiré par la méthode DRASTIC, a permis de mettre en évidence trois classes de vulnérabilité (très faible, faible et moyenne). La tendance est dominée par la classe de vulnérabilité faible qui occupe 93% de la zone d'étude. Les indices de vulnérabilité obtenus quant à eux varient de 80 à 121. Aussi, le taux de coïncidence entre les concentrations

en nitrates et les classes de vulnérabilité est-il satisfaisant, puisqu'il peut être évalué à plus de 80%. Nous pouvons alors retenir de cette étude que, face à une pollution issue de l'exploitation minière, les eaux qui sont profondes et bien protégées auront leur qualité qui sera faiblement impactée contrairement à celles qui sont plus proche de la surface. Et, aussi, que, malgré leurs limites, les modèles DRASTIC sont des outils utiles, d'aide à la décision, mais qui sont certainement perfectibles.

### CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts pour ce manuscrit.

### CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

AELE a initié ce travail et a participé à toutes les étapes de sa réalisation. AAEH a participé à la rédaction du manuscrit. KAK et SKD ont apporté leur assistance dans la conception et l'analyse des cartes. KEA a assuré la supervision générale des travaux effectués.

### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Direction de l'Hydraulique Rurale et Périurbaine (DHRP) pour la mise à disposition des fiches techniques des forages et des données de nitrate issues des analyses physico-chimiques des eaux couvrant la zone d'étude.

### REFERENCES

- Abdelaziz B. 2008. Réalisation d'une Carte de Vulnérabilité des Nappes Phréatiques de la Région de Saïda en Algérie, à l'aide des Systèmes d'Information Géographique. Mémoire de Maitrise en Etude de l'Environnement, Université de Moncton, Moncton, p. 95.
- Ake GE, Kouadio BH, Dongo K, Dibi B, Kouame KF, Biemi J. 2010. Application des Méthodes DRASTIC et SI pour l'Etude de la Vulnérabilité à la Pollution par les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) de la nappe de Bonoua (Sud -Est de la Côte d'Ivoire).



- Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(5): 1676-1692.  
DOI:  
<http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v4i5.65557>
- Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RTJ, Hackett G. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential using Hydrogeology Settings. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600&2-878-036
- Allechy FB, Lasm T, Youan Ta M, Yao KAF, Kouakou OS, Oka KAR, Baka D, De Lasm OZ. 2016. Cartographie De La Vulnérabilité À La Pollution Des Aquifères Du Socle Précambrien : Cas De La Région D'oumé (Centre-Ouest De La Côte D'ivoire). *European Scientific Journal*, **12**(20): 1857–7881. DOI: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n20.374>.
- Baka D, Lasm T, Oga MS, Youan TA M, DeLasm O, Kouakou SO, Ettien FE. 2011. Characterization of Transmissivity in the Fractured Reservoirs in the Oumé area (Centre of Côte d'Ivoire). *American Journal of Scientific and Industrial Research*, **2**(2): 310-322. DOI: <http://dx.doi:10.5251/ajsir.2011.2.2.310.322>
- Baka D. 2012. Géométrie, Hydrodynamisme et Modélisation des Réservoirs Fracturés du Socle Protérozoïque de la Région d'Oumé (centre-ouest de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Cocody, p. 249.
- Bamba Y. 2012. Evaluation Des Impacts De L'exploitation De La Mine D'or De Bonikro (Côte D'ivoire) sur les Ressources en Eau. Mémoire de Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement ; Option : Environnement, Formation 2ie (Ouagadougou), p. 55.
- Bézèlgues S, Garets E, Mardhel V, Dörfliger N. 2002. Cartographie de la Vulnérabilité de Grand-Terre et de Marie-Galatie (Guadeloupe). Phase 1: Méthodologie de détermination de la vulnérabilité, rapport, p. 45.
- Deh SK, Kouame KJ, Saley MB, Tanoh KJJ, Anani EKA, Signo KH, Jourda JP, Biemi J. 2012. Evaluation de la Vulnérabilité Spécifique aux Nitrates (NO<sub>3</sub>) des Eaux Souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **6**(3): 1390-1408. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i3.40>
- Delor C, Diaby I, Simeon Y, Yao B, TastetJP, Vidal M, Chiron JC, Dommanget A. 1992. Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200000. Feuille de Gagnoa. Mémoire de la Géologie de Côte d'Ivoire, n°4.
- Dibi B, Kouassi KL, Kouamé KI, Konan K S, Soumahoro M, Konanwaidh AB, Gnakri D. 2013. Evaluation de la Vulnérabilité à la Pollution des Aquifères des Formations Altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS : Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, **2**(4): 464-476. URL : <https://ijias.issr-journals.org/abstract.php?article=IJIAS-13-031-02>
- Habib S, Chohri A, Moncef Z, Hamed BD. 2010. Cartographie des Zones Vulnérables à la Pollution Agricole par la Méthode DRASTIC couplé à un Système d'Information Géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (Sud de Sfax, Tunisie). *Sciences et Changements Planétaires Secheresse* **21**(2): 131-146. DOI : <http://.doi:10.1684/sec.2010.0246>
- Hamza MH, Added A, Frances A, Rodriguez R. 2007. Validité de l'Application des Méthodes de Vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Nappe Phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien). *Comptes Rendus. Géoscience*,

- 339(7): 493-505. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.crte.2007.05.003>
- RGHP 2021. Recensement Générale des Habitats et de la Population. Résultats globaux p.37.
- Jourda JP, Kouamé KJ, Saley MB, Kouadio BH, Oga YS, Deh S. 2006. Contamination of the Abidjan Aquifer by Sewage. In *An Assessment of Extent and Strategies for Protection. Groundwater Pollution in Africa*. Yong XX, Brent U (eds). Taylor and Francis : Balkema, Great-Britain ; 291-300.
- Jourda JP, Kouame KJ, Adja MG, Deh SK, Anani AT, Effini AT, Biemi J. 2007. Evaluation du degré de Protection des Eaux Souterraines : Vulnérabilité à la Pollution de la Nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la Méthode DRASTIC. Acte de Conférence Francophone SIG 2007/ 10 au 11 Octobre 2007, Versailles-France, p. 11. URL : [www.esrifrance.fr/SIG2007/Cocody\\_Jourda.htm](http://www.esrifrance.fr/SIG2007/Cocody_Jourda.htm).
- Koffi YB, Ahoussi K.E, Kouassi AM, Biemi J. 2014. Ressources Minières, Pétrolières et Gazières de la Côte d'Ivoire et Problématique de la Pollution des Ressources en Eau et des Inondations. *Geo-Eco-Trop.*, **38**(1): 119-136. URL : [http://geocotrop.be/uploads/publications/pub\\_381\\_12.pdf](http://geocotrop.be/uploads/publications/pub_381_12.pdf)
- Kouadio KN. 2016. Exploitation Minière, Facteur De Recompositions Socio-Economiques Dans La Sous-Préfecture De Hiré (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, **12**(17): 287-304. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n17p287>
- Kouamé KJ. 2007. Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'Aide à la Décision pour la Prévention et la Protection des Eaux Souterraines contre la Pollution. Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody, Cocody, p. 225.
- Mba FF, Temgouaep KD, Kamhoua SN. 2019. Vulnérabilité des Eaux Souterraines à la Pollution dans la ville de Dschang, Ouest-Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **13**(5): 39-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i5.3S>
- Ministère de l'Industrie et des Mines. 2013. Programme National de Rationalisation de l'Orpaillage en Côte d'Ivoire (PNRO), p. 3.
- Murat V. 2000. Etude Comparative des Méthodes d'Evaluation de la Vulnérabilité Intrinsèque des Aquifères à la Pollution : Application aux Aquifères Granulaires du Piémont LAURENTIEN. Mémoire de Maîtrise, INRS–Géosciences, Québec, p. 127.
- Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, Lefebvre R, Martel R. 2003. Vulnérabilité à la Nappe des Aquifères Fracturés du Sud-Ouest du Québec : Evaluation par les Méthodes DRASTIC et GOD. Rapport Ressources Naturelles Canada, Commission Géologique, p. 16.
- Ndela KJ. 2008. Les activités minières et la fiscalité : Cas de la République Démocratique du Congo. Thèse de Doctorat en Droit, Administration et Secteur Public. Université Paris I Panthéon - Sorbonne, Sorbonne, p. 500.
- Loko S, Ahoussi KE, Koffi YB, Kakou NF, Kouassi AM, Biemi J. 2013. Microbiological and physico-Chemical quality of Groundwater From Artisanal Sites of Mining Exploitation in the South-West of Côte d'Ivoire : case of the area of Hiré. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **4**(9): 567-574. URL : <http://www.ijser.org>
- Lobo F, Oliveira M. 2004. Groundwater Vulnerability Assessment in Portugal. *Geofis. Int.*, **43**(4): 541–550. URL :

- <https://www.redalyc.org/pdf/568/56843403.pdf>
- Osborn NBI, Eckenstein E, Koon KQ. 1998. Vulnerability Assessment of Twelve Major Aquifers in Oklahoma. Oklahoma Water Resources Board Technical Report 98-5, p. 34.
- Perraud A, De La Souchere P. 1971. Carte de l'Esquisse Pédologique de la CI au 1/500 000.
- Razo I, Carrizales L, Castro J, Díaz-Barriga F, Monroy M. 2004. Arsenic and Heavy Metal Pollution of Soil, Water and Sediments in a Semi-arid Climate Mining area in Mexico. *Water Air Soil Pollution.*, **152**(1): 129-152. DOI: 10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c1
- SGS. 2006. Projet Aurifère de Bonikro, Étude d'Impact Environnemental, Projet B-309, Rapport final, juillet 2006.
- Soro B. 2011. Agriculture et Matières premières en Côte d'Ivoire : Le Cacao, le Café, le Coton, l'Or, le Sucre (...) en Chute Libre / La Crise Financière Internationale Sévit, Le Mandat, Article de presse. URL : <https://news.abidjan.net/articles/411773/>. Consulté le 28 06 2024
- Yapi YHA, Dongui BK, Trokourey A, Barima YSS, Essis Y, Atheba P. 2014. Evaluation de la Pollution Métallique des Eaux Souterraines et de Surface dans un Environnement Minier Aurifère à Hiré (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **8**(3): 1281-1289. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i3.41>
- Yao KT. 2009. Hydrodynamisme dans les Aquifères de Socle Cristallin et Cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : Cas du Département de Soubré : Apports de la Télédétection, de la Géomorphologie et de l'Hydrogéochimie. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Cocody, p. 284.
- Youan-Ta M. 2008. Contribution de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques à la Prospection Hydrogéologique du Socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Cocody, p. 237.