



EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA FRACTURATION DANS LA SUSCEPTIBILITE A LA POLLUTION DES AQUIFERES DE LA ZONE DE CONTACT « SOCLE-BASSIN SEDIMENTAIRE » DU SUD-EST DE LA COTE D'IVOIRE

ASSESSMENT OF FRACTURING INFLUENCE IN THE TOUCHNESS TO THE AQUIFERS POLLUTION OF THE CONTACT ZONE BETWEEN BEDROCK AND SEDIMENTARY BASIN IN THE SOUTHEAST OF CÔTE D'IVOIRE

***KOUDOU A.¹, ASSOMA T.V.², ADIAFFI B.³, YOUAN TA M.^{2,3},
SALEY M. B.^{2,3}, KOUAME K.F.^{2,3}***

¹ Département des Sciences de la Terre, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire)

² Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, Bd de l'Université, CURAT, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³ Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, Bd de l'Université, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

kdaime@yahoo.fr

RESUME

Le constat de la détérioration de la qualité des eaux souterraines amène à agir de façon préventive sur la pollution des aquifères. La présente étude a pour objectif d'évaluer le rôle de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des aquifères de la zone de contact socle-bassin sédimentaire du sud-est de la Côte d'Ivoire. Une cartographie du degré de vulnérabilité à la pollution des aquifères à l'aide du modèle DRASTIC, couplée à la distribution des orientations des fractures et des teneurs en nitrates des forages d'eau a été élaborée. L'analyse de la carte révèle que les vulnérabilités forte (36%) et moyenne (14%) caractérisent le bassin sédimentaire alors que les vulnérabilités faible (21%) et très faible

(29%) caractérisent le socle. Les fractures de socle de directions variées et vectrices d'eau souterraine, sont potentiellement exposées aux pollutions diverses. Celles dont l'une des extrémités est en contact avec le bassin sédimentaire s'y prolongent, justifiant ainsi le fait que les vallées du bassin sédimentaire peuvent être interprétées comme le prolongement sous-jacent des principales discontinuités du socle. La cartographie de ce degré de vulnérabilité amène les gestionnaires de la ressource à être plus sensibles aux dangers de contamination des aquifères et leur permet aussi de prendre des décisions éclairées qui respectent autant que possible l'environnement.

Mots clés : Fracturation, socle, bassin sédimentaire, vulnérabilité, DRASTIC, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The deterioration report of the groundwater quality brings to act in a preventive way on the pollution of the aquifers. The present study aims to evaluate the role of the fracturing in susceptibility to pollution of the aquifers of the contact zone bedrock-sedimentary basin of southeast of Ivory Coast. A mapping of the vulnerability degree to the pollution of the aquifers using the DRASTIC model, coupled with the distribution of the fractures orientations and the nitrates contents of water drillings was elaborate. The analysis of the map reveals that the strong vulnerability (36%) and average vulnerability (14%) characterize the sedimentary basin whereas the weak vulnerability (21%) and very weak vulnerability (29%) characterize the bedrock. The fractures of varied directions and vectors of groundwater are potentially exposed to various pollutions. Those whose one of these ends is in contact with the sedimentary basin prolong there, thus justifying the fact that the valleys of the sedimentary basin can be interpreted like the subjacent prolongation of principal discontinuities of the bedrock. The assessment or the mapping of this vulnerability degree brings administrators of the resource to be more sensitive to dangers of contamination of the aquifers and also allows them to make enlightened decisions which respect as much as possible the environment.

Keywords: Fracturing, bedrock, sedimentary basin, vulnerability, DRASTIC, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

Le sud côtier ivoirien, soumis à un climat équatorial humide caractérisé par d'abondantes pluies en saisons pluvieuses, bénéficie de grandes potentialités en eaux souterraines. Ces eaux contribuent efficacement à l'alimentation de la population de cette vaste zone en eau potable. Elles constituent donc un enjeu de grande importance pour le territoire ivoirien.

Cependant, l'accroissement indéniable de la population dans la zone avec pour corollaire la production d'importante quantité de déchets (solides ou liquides) mal gérés, le développement d'une agriculture utilisatrice de produits phytosanitaires (insecticide, herbicide, fongicide) et la prolifération des décharges sauvages de déchets domestiques et/ou industriels, exposent les ressources en eau et en l'occurrence les eaux souterraines à des contraintes de pollution (Aghui et Biémi, 1984 ; Jourda, 1987 ; Koné et Aka, 1996 ; Kouadio *et al.*, 1998 et 2000 ; Oga, 1998 ; Kouamé *et al.*, 2006 ; Ahoussi, 2008 ; Soro *et al.*, 2010). La pollution la plus alarmante s'observe au niveau du système lagunaire Ebrié à Abidjan où la pollution industrielle est très marquée (Broche et Peschet, 1983). Les eaux usées domestiques et industrielles sont déversées dans la lagune sans avoir été traitées. La catastrophe du déversement de déchets toxiques à Abidjan survenue en août 2006, a contribué à la dégradation de la qualité de l'environnement (Koné *et al.*, 2011). Selon MSHP (2006) et Kouamé (2007), la nappe d'Abidjan est sous la menace d'une contamination par des polluants persistants que sont les éléments organochlorés. Les études menées par Adiaffi (2008) dans le Sud côtier ivoirien révèlent de la présence dans les eaux d'un faciès bicarbonaté sodique et potassique ; ce qui marquerait d'un mélange entre les eaux de l'aquifère du socle non couvert et celles de l'aquifère du Continental Terminal (CT). Par ailleurs, la nappe du CT semble plus influencée par les eaux météoriques et la pollution anthropique (Adiaffi, 2008). En réalité, ce sont les aquifères fracturés du socle et poreux du bassin sédimentaire qui sont sous la menace constante et croissante de la pollution.

Jusqu'ici, les zones de recharge de sensibilité bonne à excellente des aquifères de la zone de contact « socle-bassin sédimentaire » du Sud-Est de la Côte d'Ivoire sont parfaitement cartographiées et couvrent un peu plus de la moitié du territoire (Assoma *et al.*, 2012). Les zones à potentialité aquifère bonne et excellente du socle du Sud-Est ont aussi été mises en évidence et couvrent une superficie de 80% (Koudou *et al.*, 2014a). La fracturation dans cette partie du territoire a par ailleurs été caractérisée. Les fractures estimées à environ 190 sont distribuées de façon hétérogène sur le territoire (Koudou *et al.*, 2014b). Il

se pose cependant dans cette partie du territoire ivoirien, une estimation de l'influence de la fracturation dans la possible pollution des aquifères. En effet la fracturation des formations géologiques, qui détermine la formation des réservoirs en zone de socle et demeure la voie privilégiée d'accès aux ressources en eau souterraine, est un paramètre physique naturel qui conditionne malheureusement l'acheminement d'une pollution de surface (Ouandaogo-Yaméogo, 2008). En certaines régions de la zone de contact socle-bassin sédimentaire, des cartes thématiques définissant les zones de vulnérabilité à la pollution ont certes été établies (Anani, 2006 ; Kouamé, 2007 ; Dibi *et al.*, 2007 ; Dibi, 2008 ; Aké *et al.*, 2009). Néanmoins, la présente étude a pour objectif d'estimer le rôle éventuel de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des deux principaux aquifères côtiers en probable contact hydraulique et lithologiquement différents : l'aquifère du socle et l'aquifère du Continental Terminal. Il est nécessaire d'estimer les sites potentiels des aquifères susceptibles de recevoir et de transporter les pollutions.

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC, couplée à la distribution des orientations des fractures et des teneurs en nitrates des forages d'eau de la zone de contact « socle-bassin sédimentaire » du Sud-Est de la Côte d'Ivoire devrait permettre d'estimer le rôle de la fracturation dans la pollution des aquifères.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Située entre les latitudes 5°05' et 5°48' N et les longitudes 2°40' et 4°38' O et limitée au Sud par l'Océan Atlantique, la zone d'étude qualifiée de "zone de contact socle-bassin sédimentaire " (Figure 1) appartient au climat équatorial de transition caractérisé par deux saisons des pluies d'avril à juillet et d'octobre à novembre et, de deux saisons sèches d'août à septembre et de décembre à mars. Son couvert végétal très hétérogène, passe au début du XX^{ème} siècle, des forêts denses humides sempervirentes en accord avec une pluviométrie moyenne annuelle excédant 1700 mm (Leneuf, 1959 ; Guillaumet et Adjanohoun, 1971) à une végétation actuelle de type savane, caractéristique des régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1300 mm. Les principaux cours d'eau qui drainent cette zone et qui coulent du Nord vers le Sud sont l'Agnéby, la Mé, la Comoé, la Bia et le Tanoé. A cela s'ajoutent les lagunes côtières qui sont les anciennes vallées entaillées dans les bas plateaux ou plateaux quaternaires ayant une altitude qui varie entre 8 et 12 m et rangés en bandes massives séparées par des zones basses marécageuses, des bras lagunaires ou des lacs orientés suivant des directions Nord-Sud ou Est-Ouest.

Evaluation de l'influence de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des aquifères de la zone de contact « socle-bassin sédimentaire » du Sud-Est de la Cote d'Ivoire

La zone de contact socle-bassin sédimentaire comprend le socle Précambrien au Nord et la couverture sédimentaire d'âge Crétacé supérieur-Quaternaire au Sud. Dans le socle, l'aquifère d'altérites est juxtaposé dans le plan vertical et lié par un phénomène de drainance à un aquifère de fissures ou de fractures, qui se révèle à la fois plus fiable et plus productif pour son alimentation permanente en eau potable (Berger *et al.*, 1981 ; Biémi, 1992 ; Lasm, 2000). Dans le bassin sédimentaire côtier, les niveaux aquifères assez homogènes et très perméables, se développent dans les dépôts d'âge Quaternaire, du Continental Terminal (CT) et du Crétacé Supérieur ou Maestrichtien. Seule la nappe du Continental Terminal encore appelée « nappe d'Abidjan » est exploitée par les différents champs captant, et constitue l'aquifère principal exploité pour l'alimentation en eau potable.

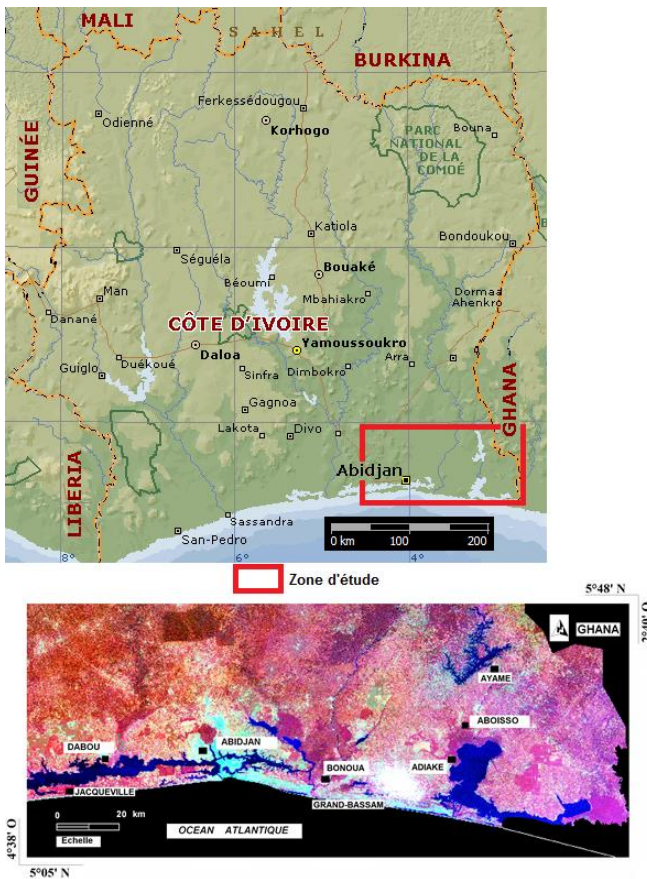


Figure 1 : Localisation de la zone de contact socle-bassin sédimentaire

MATERIEL ET METHODOLOGIE

Données utilisées

Les principales données utilisées sous format numérique sont :

- 53 forages d'eau de 1995 à 2000 de la zone de contact socle-bassin sédimentaire provenant de la Direction de l'Hydraulique Humaine d'Abidjan et comportant les paramètres niveaux statiques, lithologie, profondeur totale, profondeur du socle, débit d'exploitation, etc. Les teneurs en NO_3^- proviennent de l'analyse des échantillons d'eau de forages ;
- le MNT de la zone de contact socle-bassin sédimentaire d'où est extraite la valeur des pentes ;
- des valeurs d'infiltration de la zone de socle et du bassin sédimentaire provenant de la littérature (Rose, 1981 cité par Faillat, 1990 ; Adiaffi, 2008 ; Assoma, 2013) ;
- des cartes géologiques des degrés carrés d'Abidjan et de Grand-Bassam (Délor *et al.*, 1992) d'où est extraite celle de la zone de contact socle-bassin sédimentaire ;
- la carte de fracturation de la zone de socle provenant d'images ASAR Envisat ;
- des logs hydrogéologiques représentatifs des forages de la zone de contact socle-bassin sédimentaire ;
- la carte des principales vallées du bassin sédimentaire et des lagunes (Adiaffi, 2008).

Méthodologie

Constitution de la base de données

L'étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères de la zone de contact socle-bassin sédimentaire est réalisée à partir de la méthode D.R.A.S.T.I.C. qui repose sur quatre hypothèses fondamentales (Osborn *et al.*, 1998) :

- 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 de l'infiltration efficace ;
- le contaminant présente la même mobilité que les eaux souterraines ;

- la nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans la définition de la vulnérabilité.

Cette méthode de cotation numérique empirique prend uniquement en compte sept paramètres hydrogéologiques qui influent sur la vulnérabilité. Les sept paramètres hydrogéologiques de la zone d'étude mis à contribution sont :

La Profondeur de la nappe (D). Elle correspond à la distance (en mètre) de la surface topographique au niveau statique mesuré dans les ouvrages couvrant la zone d'étude. Les niveaux d'eau statique des 53 ouvrages de captages des eaux souterraines déterminés lors des campagnes de terrain ont été interpolés dans l'environnement de ArcGis 10.0 pour déterminer ce paramètre. Pour une profondeur d'eau faible, la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution est forte.

La Recharge efficace (R). Ce paramètre représente la quantité d'eau qui s'infiltre à travers le sol et atteint la nappe postérieurement à toutes les influences subies par l'eau de surface. La recharge est l'agent vecteur des contaminants. Dans la zone de contact socle-bassin sédimentaire, la valeur de l'infiltration est estimée à 90 mm dans le socle et fluctue entre 240 mm et 500 mm sur le bassin sédimentaire (Assoma *et al.*, 2012).

La Lithologie de l'aquifère (A). Elle se rapporte à la nature des roches issues des formations géologiques et qui intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Elle est déterminée à partir de la carte géologique et des logs de forages de la zone d'étude. Dans la zone de contact socle-bassin sédimentaire, les principaux aquifères prennent naissance dans les schistes, les gneiss et les granitoïdes en milieu de socle. La nappe du bassin sédimentaire est contenue dans les sables fins et les sables grossiers (Aghui et Biémi, 1984 ; Sombo, 2006).

Le Type de sol (S). Il désigne la formation superficielle au-dessus de la zone non saturée, résultant de l'altération sur place de la formation rocheuse grâce à l'action conjuguée de l'eau, l'air et les êtres vivants et de son mélange à une proportion variable de matière organique. Ce paramètre correspond approximativement au premier mètre de dépôts à partir de la surface du sol (Rasmussen et Rouleau, 2003). Les granitoïdes et les gneiss donnent un matériau d'altération où dominent les sables grossiers (grains de quartz). Les matériaux issus de l'altération des roches schisteuses sont souvent riches en graviers et en quartz. Les sols sont riches en éléments fins argileux et la fraction sableuse est à dominance de sables fins. La zone de socle étant exclusivement cristalline et cristallophyllienne, le sol qui dérive de l'altération, en milieu équatorial humide, de ces types de roches d'épaisseurs est faible (inférieur à 3

m) obtenues par l'interprétation des coupes de forages. Les sols du bassin sédimentaire sont caractérisés par un faciès de type **sablo-argileux** ou sable argileux (Fofana, 2005 et Anani, 2006) d'une capacité d'infiltration moyenne (Cougny, 1986).

La Topographie (T). Elle reflète la géomorphologie de la surface terrestre. Elle permet de contrôler la probabilité qu'un polluant a de s'écouler ou de s'infiltrer dans le sol. Quand les pentes sont faibles, il y a infiltration et le risque de la pollution est grand. Réciproquement, quand les pentes sont fortes ou raides, la capacité de l'écoulement est grande et le risque de pollution de l'eau souterraine est faible. Les valeurs de pentes de la zone socle-bassin sédimentaire sont issues du MNT (Assoma *et al.*, 2012).

L'Impact de la zone vadose (I). Ce paramètre représente la zone non saturée au-dessus du niveau de l'eau. Elle correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol (premier mètre à partir de la surface) et le niveau supérieur de la nappe souterraine. Les différentes coupes géologiques de forage utilisées ont permis de déterminer ce paramètre. Il se rapporte à la nature des matériaux présents. Il s'agit des granitoïdes et des gneiss en zone de socle, tous appartenant aux roches métamorphiques et ignées et des schistes. Dans le bassin sédimentaire, le type de zone vadose dans le bassin sédimentaire appartient à la classe « sable – gravier ».

La Perméabilité (C). La perméabilité ou conductivité hydraulique reflète la vitesse à laquelle l'eau s'écoule horizontalement à travers un aquifère. Elle se définit comme étant l'aptitude d'un milieu à laisser circuler l'eau à travers ses éléments constitutifs. Elle dépend à la fois du fluide et du milieu qui le contient. Une conductivité élevée entraînerait donc une forte vulnérabilité de l'aquifère. En zone de socle, la perméabilité est déterminée à partir de la carte des linéaments structuraux détaillés relevés sur les images ASAR ENVISAT du sud-est de la Côte d'Ivoire. Une méthodologie propre aux milieux fissurés pour la détermination des perméabilités induites par les fractures a été proposée par Franciss (1970), puis utilisée et améliorée par Savadogo (1984), Biémi (1992), Savané (1997), Kouamé (1999) et Jourda (2005). La carte des linéaments structuraux de la zone d'étude est discrétisée en mailles régulières de 5×5 km². Les variables (nombre total de fractures, longueur et orientation des fractures de chaque maille), extraites de la carte de fracturation sont associées aux paramètres de coefficient de proportionnalité C_i ($3,8 \cdot 10^{-3}$) et de conductivité hydraulique K_f ($3,51 \cdot 10^{-5}$ m/s) estimés par Biémi (1992) dans la région de la Marahoué qui présente des similitudes sur le plan géologique que la zone d'étude. Tous ces paramètres sont intégrés au programme EVC pour la

détermination des valeurs de perméabilités induites par les fractures de la zone d'étude. A partir de la synthèse des travaux réalisés (Guérin-Villeaubreil, 1962 ; Loroux, 1978, Tastet, 1979 ; Jourda, 1987 ; Kouamé, 2007) sur la nappe du Continental Terminal, la conductivité hydraulique (perméabilité) des couches de sables grossiers est estimée entre 4.10^{-4} et 6.10^{-4} m/s et de sables fins entre 10^{-4} et 3.10^{-4} m/s.

Ces sept paramètres hydrogéologiques sont évalués et intégrés dans la base de données relationnelle préparée dans le sphéroïde WGS 84 du système UTM zone 30N.

Modélisation DRASTIC des systèmes aquifères

Chaque paramètre hydrogéologique est attribué d'un poids en fonction de son importance relative sur la vulnérabilité de l'eau souterraine. L'attribution du facteur de pondération appliqué aux différents paramètres permet de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en classes représentant soit un milieu particulier, soit un intervalle de valeurs. Les différentes classes sont cotées en fonction de leur influence particulière sur la vulnérabilité de la nappe. La cote 1 correspond au degré de vulnérabilité plus faible et la cote 10, au degré de vulnérabilité plus élevée. Une fois les différentes classes définies et leurs cotes attribuées, la méthode détermine l'Indice DRASTIC (Id) suivant l'équation (1).

$$\text{Indice DRASTIC} = DwDr + RwRr + AwAr + SwSr + TwTr + IwIr + CwCr \quad (1)$$

avec w = poids attribué à chaque paramètre et r = cote (valeur de l'intervalle) attribué à chaque paramètre.

L'Indice DRASTIC permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de l'aquifère. L'établissement de la carte thématique consiste à reporter dans l'espace, les différentes valeurs d'Indice DRASTIC subdivisées en intervalles, et faire correspondre ces plages d'indice à des classes de vulnérabilité. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'Indice DRASTIC (Id) calculé est élevé.

Les poids proposés par Vrba et Zaporozec (1994), classes et notes attribués aux paramètres DRASTIC (selon Aller *et al.*, 1987) de la zone de contact « socle-bassin sédimentaire » sont illustrés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Poids, classes et notes attribués aux paramètres DRASTIC de la zone de contact « socle-bassin sédimentaire »

Paramètres	Poids	Classes (m)	Notes
D : Profondeur de la nappe (m)	5	0-1,5	10
		1,5-4,5	9
		4,5-9	7
		9,0-15,0	5
		15-23	3
		23-31	2
R : Recharge nette (mm)	4	>31	1
		50-100	3
		> 225	9
A : Lithologie de l'aquifère	3	Granitoïdes	4
		Gneiss	5
		Schistes	6
		Sable (fin et grossier)	8
S : Type de sol	2	Sol mince ou absent	10
		Sable argileux	9
T : Topographie (%)	1	0 – 2	10
		2 – 6	9
		6 – 12	5
I : Nature de la zone non saturée	5	Schistes	3
		Roches métamorphiques et ignées	4
		Sable argileux	6
		$1,35 \cdot 10^{-9}$ - $7,65 \cdot 10^{-6}$	1
C : Perméabilité (m/s)	3	Sables fin et grossier	6
		$/1.10^{-4}$ - 5.10^{-4}	
		Sable grossier	8
		5.10^{-4} - 6.10^{-4}	

Stratégie d'évaluation du rôle de la fracturation dans la pollution

Pour apporter d'une part plus de crédibilité à la carte de vulnérabilité à la pollution et d'autre part mettre en évidence le rôle de la fracturation dans la possible pollution des aquifères et l'influence de la structure du socle sur le sens de l'écoulement de la nappe du CT, plusieurs opérations ont été réalisées sous ArcGIS 10.0. D'abord, la carte de vulnérabilité à la pollution de la zone de contact socle-bassin sédimentaire a été validée. La technique de validation a consisté à superposer l'ensemble des forages de teneur en nitrates connue à la carte de vulnérabilité, puis à établir une relation entre les classes de vulnérabilité et la teneur en nitrates des forages. Ensuite, les linéaments structuraux ont été superposés à la carte de vulnérabilité à la pollution validée. Finalement, un lien a été dressé entre les grandes discontinuités du socle mises

en évidence par la fracturation et les principales vallées du bassin sédimentaire de la zone d'étude.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats

Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution

L'Indice Drastic de la zone de contact socle-bassin sédimentaire varie de 77 à 192. La classification de celui-ci permet de mettre en évidence quatre classes de vulnérabilité à la pollution différentes : très faible, faible, moyenne et forte (Figure 2).

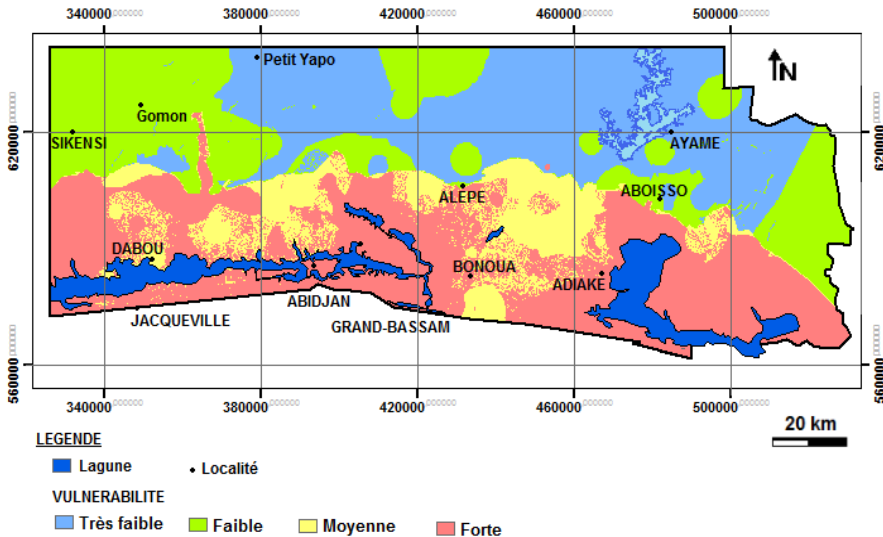


Figure 2 : Carte de vulnérabilité à la pollution de la zone de contact socle-bassin sédimentaire

Les zones à vulnérabilité très faible et faible caractérisent le domaine de socle. La vulnérabilité très faible occupe la partie centrale à dominance gneissique alors que la vulnérabilité faible occupe les extrémités Est et Ouest du socle. Quelques poches de vulnérabilité faible se trouvent dans la partie centrale et marquent la transition entre le socle et le bassin sédimentaire. Les zones à vulnérabilité moyenne et forte caractérisent le bassin sédimentaire. La

vulnérabilité moyenne se rencontre principalement au Nord du bassin sédimentaire, dans les localités d'Alépé, de Bonoua et au Nord de Dabou. La vulnérabilité forte domine exclusivement l'extrême Sud du bassin sédimentaire où les sédiments sont constitués de sables très fins et où le système lagunaire est très dense.

La répartition des superficies couvertes des degrés de vulnérabilité à la pollution (Figure 3) montre que la classe de vulnérabilité forte occupe la plus forte proportion (36%) à côté des classes de vulnérabilité très faible (29%), faible (21%) et moyenne (14%).

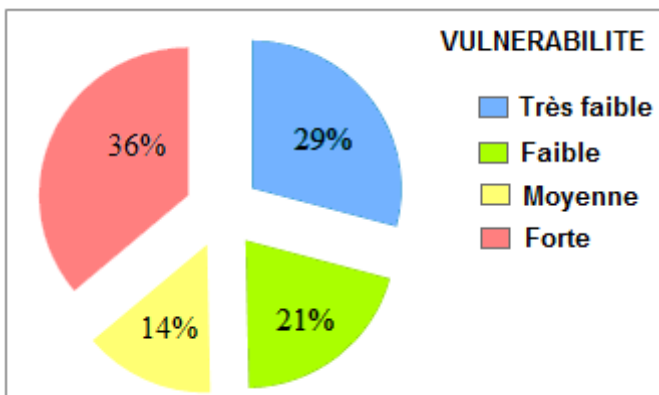


Figure 3 : Répartition des superficies couvertes des degrés de vulnérabilité à la pollution

Validation de la carte de vulnérabilité à la pollution et rôle de la fracturation dans la pollution

Les teneurs en NO_3^- dans les eaux souterraines de la zone de contact socle-bassin sédimentaire varient de 0 mg/L à 51 mg/L. Environ 28% des échantillons d'eau de forages analysés ne possèdent pas de traces de nitrates (0 mg/L). Les 72% restants des échantillons d'eau analysés ont des teneurs en nitrates inférieures ou égales à 51 mg/L. Ces différentes teneurs se superposent indifféremment aux classes de vulnérabilité très faible, faible, moyenne et forte (Figure 4). La teneur en nitrates de la totalité des points d'eau de la zone de contact socle-bassin sédimentaire reste largement en deçà de la norme admissible par l'O.M.S (50 mg/L). Cependant, un forage de teneur de 51 mg/L dans la région d'Aboisso a été mis en évidence. Ce dernier se superpose à la classe de vulnérabilité forte.

Evaluation de l'influence de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des aquifères de la zone de contact «socle-bassin sédimentaire» du Sud-Est de la Cote d'Ivoire

Le couplage de la carte de fracturation à la carte de vulnérabilité à la pollution validée, met en évidence des fractures de directions diverses sur les classes de vulnérabilité faible et très faible. Certains forages s'alignent sur des fractures ou sont proches des différentes fractures. Ces fractures sont potentiellement ouvertes et vectrices d'eau souterraine. Par ailleurs, elles sont prédisposées aux pollutions chroniques ou accidentelles, diffuses ou ponctuelles de la zone d'étude.

L'orientation optimale suivant laquelle s'ordonnent quatre fractures ouvertes donc perméables, sont celles nommées (1), (2), (3) et (4) qui se prolongent sous le bassin sédimentaire. Les vallées du bassin sédimentaire peuvent de ce fait être interprétées comme le prolongement sous-jacent des principales discontinuités du socle (Figure 4). Elles sont des zones où passent certains grands fleuves, certains grands cours d'eaux et les étendues d'eau lagunaire de direction transéquatoriale. Il s'agit de la vallée de l'Agnébi située dans la région de Dabou, la vallée des lagunes Adjin et Potou dans la région d'Abidjan, la vallée de la lagune Ono et la vallée de la lagune Abi.

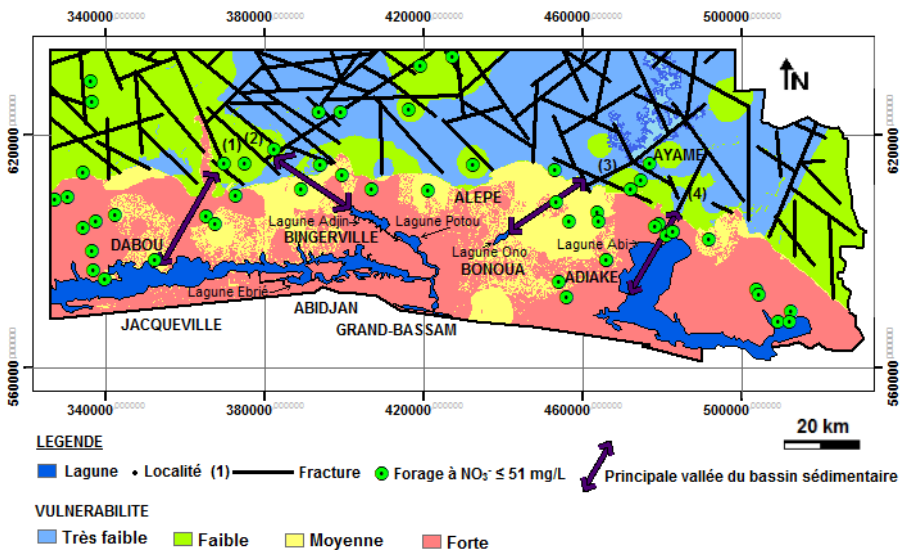


Figure 4 : Couplage forages à NO₃⁻ ≤ 51 mg/L, fracturation et zones vulnérables à la pollution

Discussion

L'évaluation spatialisée de la vulnérabilité à la pollution révèle dans cette étude que le bassin sédimentaire est plus vulnérable à la pollution que le socle. La vulnérabilité mise en évidence dans l'étude est loin d'être absolue. Il s'agit plutôt d'une vulnérabilité relative dont le but est de faciliter la comparaison des différents secteurs du sud-est. Elle évalue lequel des secteurs est plus ou moins vulnérable que l'autre. Ainsi, si des sites de stockages de déchets doivent être implantés dans la zone, il est convenable qu'ils le soient dans une zone où la vulnérabilité des eaux souterraines est plus faible plutôt que dans un secteur où la vulnérabilité est plus forte.

La validation des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution se base généralement sur des données chimiques des eaux souterraines (Isabel *et al.*, 1990 ; Champagne et Chapuis, 1993 ; Mohamed, 2001 ; Douagui, 2004 ; Jourda, 2005 ; Anani, 2006 ; Jourda *et al.*, 2006a ; Bouchemal et Achour, 2015). Dans la validation de la carte de vulnérabilité à la pollution de la zone de contact socle-bassin sédimentaire, les forages à teneur en nitrates élevée doivent se superposer aux zones les plus vulnérables. Cette technique de validation n'a pas suffisamment été élucidée dans le cadre de cette étude vu que les teneurs en nitrates de la zone utilisées sont faibles et largement inférieures à la norme de l'OMS (50 mg/L). Par ailleurs, les mesures de nitrates ne sont pas suffisamment représentatives et bien réparties de manière homogène sur toute l'étendue de la zone d'étude. Toutefois, une zone vulnérable peut également avoir une faible teneur en nitrates ou vice-versa. La notion de vulnérabilité n'est donc 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.

Malgré tout, en certaines régions de la zone d'étude, la vulnérabilité très élevée a été mise en évidence. C'est le cas au niveau du District d'Abibjan où les rejets industriels, les eaux usées domestiques, l'utilisation des pesticides et des engrais, et le déversement de déchets toxiques ont contribué au cours de ces dernières décennies à la détérioration réelle de la qualité des eaux souterraines du Continental Terminal (Sané, 1999 ; Kouamé, 2007 ; Soro *et al.*, 2010). Les différents résultats d'analyses chimiques se rapportant aux concentrations de nitrates des eaux souterraines des années 1995, 2000 et 2001 ont prouvé l'évolution de la pollution du Sud vers le Nord. Par endroits dans la nappe d'Abidjan, des eaux à forte pollution nitratée ont été mises en évidence et atteignent parfois 120 mg/L (Soro *et al.*, 2010). Le constat de la contamination de ces eaux souterraines provoque souvent la mise à l'arrêt de l'exploitation des ouvrages de captage voire l'abandon des forages, du moins ceux destinés à

l'usage domestique. Ce fut le cas des forages du Plateau, ainsi que certains forages d'Adjamé Nord (Jourda *et al.*, 2006b).

Des cartes de simulation des piézométries élaborées par Guérin-Villeaubreil (1962) et Kouamé (2007) ont pu rendre compte de plusieurs sens d'écoulement de la nappe du CT vers les grandes vallées et les lagunes. Les directions principales de l'écoulement des eaux souterraines se dessinent vers les lagunes Ebrié et Adjin, les fleuves de l'Agnéby et de la Mé. Par ailleurs, il est connu que la morphologie du bassin sédimentaire est dépendante de celle du socle (Adiaffi, 2008). Donc toutes les fractures de la zone de socle, dont l'une des extrémités est en contact avec le bassin sédimentaire, pourraient constituer un indice de l'influence de l'écoulement de la nappe du socle sur la nappe du CT et donc vulnérables à la pollution de ces aquifères.

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour faciliter l'implantation du modèle DRASTIC, la mise en évidence du caractère cartographique du processus de modélisation et l'intégration nécessaire des données multisources, a été démontrée dans cette étude. La carte de vulnérabilité des ressources en eau à la pollution élaborée représente un outil important et largement utilisé pour la protection des eaux souterraines et pour la prise de décisions pour l'aménagement du territoire (Bahri *et al.*, 2007 ; Sliman *et al.*, 2009 ; El Hanini *et al.*, 2013 ; Elfarrak *et al.*, 2014 ; Hassan *et al.*, 2015 ; Djabri *et al.*, 2015 ; Drias et Toubal, 2015).

CONCLUSION

Cette étude qui avait pour objectif l'évaluation du rôle éventuel de la fracturation dans la possible pollution des aquifères, donc des eaux des nappes côtières du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, a mis en évidence des résultats probants.

La vulnérabilité à la pollution est de degré variable sur les aquifères de la zone de contact socle-bassin sédimentaire du sud-est de la Côte d'Ivoire. Les principales superficies couvertes montrent que la vulnérabilité forte (36%) et moyenne (14%) caractérisent le bassin sédimentaire alors que la vulnérabilité faible (21%) et très faible (29%) caractérisent la zone de socle. Les aquifères du bassin sédimentaire sont plus vulnérables à la pollution que ceux du socle. Les fractures de directions diverses présentes dans le socle sont ouvertes et vectrices d'eau souterraine. Par ailleurs, elles sont potentiellement vulnérables aux pollutions chroniques ou accidentelles, diffuses ou ponctuelles de la zone d'étude. Celles dont l'une des extrémités est en contact avec le bassin

sédimentaire s'y prolongent, justifiant ainsi le fait que les vallées du bassin sédimentaire peuvent être interprétées comme le prolongement sous-jacent des principales discontinuités du socle.

La transcription cartographique de ces résultats permet de mieux comprendre et de mieux cibler les actions à mettre en place (contrôle, prévention, sensibilisation, modification des pratiques...) sur la zone de contact socle-bassin sédimentaire. Cette méthode de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines a ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la ressource en eau souterraine.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment toute leur reconnaissance aux réviseurs pour leurs nombreux commentaires, critiques et suggestions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADIAFFI B. (2008). Apport de la Géochimie isotopique, de l'Hydrochimie et de la Télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "Socle-Bassin sédimentaire" du Sud-est de la Côte d'Ivoire". Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 230 p.
- AGHUI, N., BIEMI, J. (1984). Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination. Annales de l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, série c, tome 20.
- AHOUSSE K.E. (2008). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 255 p.
- AKE G.E., DONGO K., KOUADIO B.H., DIBI B., SALEY M.B., BIEMI J. (2009). Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, n°31, pp.157-171.
- ALLER L., BENNETT T., LEHR J.H., PETTY R.J., HACKETT G. (1987). DRASTIC : A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 p.

Evaluation de l'influence de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des aquifères de la zone de contact «socle-bassin sédimentaire» du Sud-Est de la Côte d'Ivoire

- ANANI A.T. (2006). Évaluation et cartographie des zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines au niveau du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) par les méthodes DRASTIC et GOD. Mémoire de DEA, Université de Cocody, 71 p.
- ASSOMA T.V., ADIAFFI B., KOUDOU A. (2012). Contribution of Remote Sensing, Multicriteria Analysis and GIS for Mapping Recharge Areas of the Coastal Aquifers in Southeast Ivory Coast. American Journal of Scientific Research, Issue 80, pp.112-125.
- ASSOMA T.V. (2013). Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire : apport des outils statistiques, de la modélisation et de la télédétection optique et radar. Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan – Cocody, 196 p.
- BAHRI H., REBAI N., ZAIER, A. (2007). Apport de la Télédétection et des SIG pour l'estimation du rôle de la fracturation dans la contamination de la nappe du Maastrichtien comme suite à une exploitation des réserves phosphatées de la partie occidentale de Sra-Ouertane (Tunisie). Geo-Eco-Trop, N°31, Tome 1-2, pp.43-56
- BERGER J., CAMERLO J., FAHY J.C., HAUBERT M. (1981). Etudes des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin : la boucle du cacao (Côte d'Ivoire). Bull. BRGM, section III, 2^e série, n°4, pp.273-291.
- BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens 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, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 493 p.
- BOUCHEMAL F., ACHOUR S. (2015). Qualité physico-chimique et paramètres de pollution des eaux souterraines de la région de Biskra. Larhyss Journal, n°22, pp.197-212.
- BROCHE J., PESCHET J.L. (1983). Enquête sur les pollutions actuelles et ponctuelles en Côte d'Ivoire. Réseau National d'observation de la qualité des eaux marines et lagunaires en Côte d'Ivoire. ORSTOM et Ministère de l'Environnement, Paris, 451 p.
- CHAMPAGNE L., CHAPUIS R.P. (1993). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode Drastic, Revue des Sciences et Techniques de l'Eau, n°26, pp.76 -169.
- COUGNY G. (1986). Carte géotechnique d'Abidjan, éd. par le LBTP-département recherche, Echelle 1/50.000
- DELOR C., DIABY I., TASTET J.P., YAO B., SIMEON Y., VIADAL M., DOMMANGET A. (1992). Notice explicative de la carte géologique, feuille de Grand Bassam et d'Abidjan, Echelle 1/200 000.
- DIBI B., INZA D., KOFFI K., SORO N., KOUAME K.J., SAVANE I. (2007). Évaluation et Cartographie de la Vulnérabilité à la Pollution en Aquifère Confiné

- Selon La Méthode DRASTIC: Cas de La Région d'Aboisso, Sud-Est de La Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, n°18, pp.500-513.
- DIBI B. (2008). Cartographie des sites potentiels d'implantation 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 de Cocody, 165 p.
- DJABRI L., HANI A., CHAFFAI H., HABES S., DJOUAMAA M.C. (2015). Etude de la vulnérabilité des eaux à la pollution un gage pour l'élaboration d'une GIRE : cas de la plaine alluviale de Tebessa. *Larhyss Journal*, n°22, pp.25-34.
- DOUAGUI A. (2004). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du Quaternaire du secteur "Canal de Vridi" – Grand-Bassam par la méthode DRASTIC. Mémoire de DEA, Université d'Abobo-Adjamé, 71 p.
- DRIAS T., TOUBAL A.C. (2015). Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (bassin versant de l'Oued Ksob) extrême est algérien, *Larhyss Journal*, n°22, pp.35-48.
- ELFARRAK H., HAKDAOUI M., FIKRI A. (2014). Development of Vulnerability through the DRASTIC Method and Geographic Information System (GIS) (Case Groundwater of Berrchid), Morocco. *Journal of Geographic Information System*, n°6, pp.45-58.
- EL HANINI A., ADDED A., ABDELJAOUED S. (2013). A GIS-Based DRASTIC Model for Assessing Phreatic Aquifere of Bekalta (Tunisian Sahel). *Journal of Geographic Information System*, n°5, pp.242-247.
- FAILLAT J.P. (1990). Origine des nitrates dans les nappes de fissures de la zone tropicale humide-exemple de la Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, n°113, 231-264.
- FOFANA F. (2005). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe d'Abidjan selon les méthodes DRASTIC et GOD. Mémoire de DEA, Université d'Abobo-Adjamé, 68 p.
- FRANCISS F.O. (1970). Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Thèse de Doctorat, Université Grenoble I, 108 p.
- GUERIN-VILLEAUBRIEL G. (1962). Hydrogéologie en Côte d'Ivoire. Bulletin de la direction de la géologie et de la prospection minière (DGPM), n°2, 40 p.
- GUILLAUMET J.L., ADJANOHOUN E. (1971). Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Végétation de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris, n°50, pp.161-261.
- HASSAN MD. S., MAHMUD-UL-ISLAM S., RAHMAN M.T. (2015). Integration of Remote Sensing and GIS to Assess Vulnerability of Environmental Degradation in North-Western Bangladesh. *Journal of Geographic Information System*, n°7, pp.494-505.
- ISABEL D., GELINAS P., AUBRE F. (1990). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. *Revue des Sciences et Techniques de l'Eau*, 23 p.

Evaluation de l'influence de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des aquifères de la zone de contact «socle-bassin sédimentaire» du Sud-Est de la Côte d'Ivoire

- JOURDA J.P. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université scientifique, technique et médicale de Grenoble, 319 p.
- JOURDA J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p.
- JOURDA J.P., SALEY M.B., DJAGOUA E.V., KOUAMÉ K.J., BIÉMI J., RAZACK M. (2006a). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation, Télédétection, n°5, pp.339-357.
- JOURDA J.P., KOUAME K.J., SALEY M.B., KOUADIO B.H., OGA Y.S. (2006b). Contamination of the Abidjan aquifer by sewage: An assessment of extent and strategies for protection, Dans Groundwater pollution in Africa, pp.293-302.
- KONE B.A., TIEMBRE I., DONGO K., TANNER M., ZINSSTAG J., CISSE G. (2011). Impact socio-économique du déversement de déchets toxiques à Abidjan en 2006 à l'échelle des ménages, Bulletin Soc. Pathol. Exot. Vol. 104, Issue 1, pp.14-19
- KONE M., AKA K. (1996). Les lagunes d'Abidjan asphyxiées par la pollution. Africa Geosciences Review, n°3, pp.461-470.
- KOUADIO G, DONGUI B., TROKOUREY A. (2000). Détermination de la pollution chimique des eaux de la zone de la décharge d'Akouédo-Abidjan, (Côte d'Ivoire), Revue des Sciences et Techniques, n°1, pp.33-41.
- KOUADIO L.P., ABDOULAYE S., JOURDA P., LOBA M., RAMBAUD A. (1998). Conséquences de la pollution urbaine sur la distribution d'eau d'alimentation publique à Abidjan. Cahier de l'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé, n°3, pp.41-44.
- KOUAME I.K., GONE D., SAVANE I., KOUASSI E.A., KOFFI K., GOULA B.T.A., DIALLO M. (2006). Mobilité relative des métaux lourds issus de la décharge d'Akouédo et risque de contamination de la nappe du Continental Terminal (Abidjan - Côte d'Ivoire) Afrique SCIENCE, n°2, pp.39-56.
- KOUAME K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologiques à référence spatiale. Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université de Cocody, 196 p.
- KOUAME K.J. (2007). Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévision et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody-Côte d'Ivoire, 255 p.

- KOUDOU A., ADIAFFI B., ASSOMA T.V., SOMBO A.P., AMANI E.M.E., BIEMI J. (2014a). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, *Geo-Eco-Trop.*, n°37, pp.211-226.
- KOUDOU A., ASSOMA T.V., ADIAFFI B., YOUAN TA, M., KOUAME K.F., LASM T. (2014b). Analyses statistique et géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie ASAR ENVISAT du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, n°20, pp.147-166.
- LASM T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitiers, 272 p.
- LENEUF N. (1959). L'altération des granites calco-alcalins et des garnodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Paris, France, 227 p.
- LOROUX B.F. (1978). Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle ; Université de Bordeaux I, France, n°1429, 93 p.
- MOHAMED R.M. (2001). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et changement planétaires / sécheresse*, n°12, pp.95-101.
- MSHP (2006). Rapport relatif aux déchets toxiques déversés sur la ville d'Abidjan. Ministère de la Santé et de l'Hygiène Publique de Côte d'Ivoire, 3 p.
- OGA Y.M.S. (1998). Ressources en eau souterraines dans la région du grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approches hydrochimique et isotopique. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 290 p.
- OSBORN N.I., ECKENSTEIN E., KOON K.Q. (1998). Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma, Oklahoma water resources boards, Technical report, 14 p.
- OUANDAOGO-YAMEOGO S. (2008). Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso. Qualité et vulnérabilité, Thèse de Doctorat de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France, 254 p.
- PERON G., GUIRAUD R. (1976). Relations entre les orientations du réseau hydrographique et les éléments structuraux dans le socle précambrien du Centre-Nord de la Côte d'Ivoire. 4^{ème} Réunion. *Annales des Sciences de la Terre*, Paris, 324 p.
- RASMUSSEN H., ROULEAU A. (2003). Guide de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captage d'eaux souterraines. Centre d'étude sur les ressources minérales, Université de Québec à Chicoutimi, contrat du ministère de l'environnement du Québec, 182 p.

Evaluation de l'influence de la fracturation dans la susceptibilité à la pollution des aquifères de la zone de contact «socle-bassin sédimentaire» du Sud-Est de la Côte d'Ivoire

- SANE Y. (1999). Une ville face à ses déchets ; une problématique géographique de la pollution à Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat Université Laval, Québec, 290 p.
- SAVADOGO A.N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta - Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350 p.
- SAVANE I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information d'hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université d'Abidjan, 395 p.
- SLIMAN A.A., FEKRI A., LAFTOUHI N., TAJ-EDDINE K. (2009). Utilisation des systèmes d'information géographique et du modèle DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans la plaine de Berrechid, Maroc, *Geographia Technica*, n°2, pp.81-93.
- SOMBO A. (2006). Modélisation hydrodynamique de la nappe du Continental Terminal d'Abidjan. Mémoire de DEA, Université de Cocody, 67 p.
- SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO E.K., AHOUSSE E.K., SORO G., OGA M.S., SAVANE I., BIEMI J. (2010). Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire: sources potentielles de pollution des eaux souterraines, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol.4, n°6, pp.2203-2219.
- TASTET J.P. (1979). Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse de Doctorat d'Etat ès sciences, Université de Bordeaux 1, France, 211 p.
- VRBA J., ZAPOROZEC A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, *International association of hydrogeologists*, Vol. 16, 131 p.