



Evaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates (NO₃) des eaux souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire)

Serge Kouakou DEH^{1*}, Kan Jean KOUAME¹, Mahaman Bachir SALEY^{1,2},
Koua JJ TANOHO¹, Epse Kouakou Abenan ANANI¹, Kouassi Hubert SIGNO¹,
Jean Patrice JOURDA^{1,2} et Jean BIÉMI^{1,2}

¹ Université de Cocody Abidjan (UCA), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), 22 BP. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

² Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) Abidjan, 22 BP. 801 Abidjan 22 Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant, E-mail : deh.serge@yahoo.fr

RESUME

La présente étude traite de la vulnérabilité spécifique aux nitrates des eaux souterraines du District d'Abidjan. La qualité de ces eaux est de plus en plus éprouvée par les diverses sources de pollution qui se sont multipliées dans la région en dehors de toute mesure de protection des ressources en eau. Pour évaluer le degré de protection de cette nappe vis-à-vis des nitrates, la méthodologie a pris en compte les paramètres hydrogéologiques de l'aquifère, les paramètres humains qui sont considérés comme des sources potentielles de nitrates et des caractéristiques physiques et chimiques des nitrates. Ces différents paramètres réunis respectivement sous le vocable de critères de décision (Hydrogéologique, Humain et Physico-chimique) ont été combinés en utilisant conjointement le système d'information géographique et l'analyse multicritère. La carte de vulnérabilité obtenue a permis de distinguer cinq zones de degrés de vulnérabilité différentes (très faible 4%, faible 39%, moyen 22%, élevée 25% et très élevée 10%). La validité de ces résultats a été testée en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux souterraines du District et celle des différentes classes de vulnérabilité. Cela a montré un taux de coïncidence de 80,52% qui justifie la pertinence de ces résultats.

© 2012 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Pollution, analyse multicritère, système d'information géographique.

INTRODUCTION

Les eaux souterraines offrent d'excellentes sources d'approvisionnement en eau potable. A cet égard, l'exploitation des eaux du Continental Terminal pour l'alimentation en eau potable du District d'Abidjan représente 68% de la production d'eau potable nationale et permet d'assurer la

péréquation sur l'ensemble du territoire national (DHH, 2001).

Cependant, l'utilisation intensive de ces ressources en eau et l'accroissement des activités anthropiques ont engendré de sérieux problèmes du fait d'un manque de protection de l'environnement (Matini et al., 2009). Parmi ces problèmes, nous pouvons évoquer

© 2012 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i3.40>

la pollution des ressources en eau (Soro et al., 2009 ; Ahoussi et al., 2010). Ainsi, au niveau du District d'Abidjan, les rejets industriels, les eaux usées domestiques, de même que l'utilisation des pesticides et des engrais sont autant de causes qui ont contribué, au cours de ces dernières décennies, à la détérioration réelle de la qualité des eaux souterraines du Continental Terminal (Dongo et al., 2008 ; Soro et al., 2010 ; Ahoussi et al., 2011). Les résultats des analyses chimiques portant sur les concentrations de nitrates des années 1995, 2000 et 2001 ont montré l'évolution de la pollution du sud vers l'ouest et le nord. Aussi, les eaux de la nappe d'Abidjan présentent-elles par endroit une forte pollution nitratée avec des valeurs atteignant souvent 120 mg.l^{-1} (Soro et al., 2010). Ceci a eu pour conséquence l'abandon de certains ouvrages de production tels que les forages du Plateau, ainsi que certains forages d'Adjamé Nord. Une des approches d'aide à la protection et à la prévention des eaux souterraines contre la pollution, est la cartographie des zones vulnérables à la pollution (Champagne et Chapuis, 1993). Ainsi, la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe du Continental Terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan a été l'objet de plusieurs travaux (Jourda et al., 2003 ; Kouamé et al., 2007).

Mais, dans l'optique d'élaborer un outil d'aide à la décision qui prend en compte certaines propriétés du polluant, cette étude se propose d'évaluer la vulnérabilité spécifique aux nitrates des eaux souterraines de la zone d'étude.

MATERIEL ET METHODES

Présentation générale de la zone d'étude

Le District d'Abidjan sur lequel porte cette étude est situé au Sud de la Côte d'Ivoire et comprend dix (10) communes et trois (3) sous-préfectures (Songon, Bingerville et Anyama). Il est localisé entre les latitudes $5^{\circ}10$ et $5^{\circ}38$ Nord et les longitudes $3^{\circ}45$ et $4^{\circ}21$ Ouest (Figure 1). Il s'étend sur une superficie de $2\,119 \text{ km}^2$ et sur laquelle vit une

population estimée à environ 5 millions d'habitants (INS, 2001). Le District d'Abidjan est limité au Sud, par l'Océan Atlantique; au Sud-Ouest, par la sous-préfecture de Dabou ; au Sud-Est, par la sous-préfecture de Grand-Bassam; au Nord, par les sous-préfectures de Grand-Lahou et d'Agboville; à l'Est, par la sous-préfecture d'Alépé.

La région est sous l'influence d'un climat de type équatorial de transition marqué par quatre saisons dans le cycle annuel, à raison de deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses. Ces saisons sont nettement différenciées par le régime pluviométrique (Tapsoba, 1995). Cette situation est une condition favorable à la recharge de la nappe par l'infiltration des eaux pluviales.

Du point de vue géologique, le District d'Abidjan appartient au bassin sédimentaire côtier d'âge Crétacé-Quaternaire. Il s'étend sur 400 km de long et sur 40 km de large de Fresco à la limite du Ghana. Les formations sédimentaires de ce bassin sont constituées d'argiles et d'argiles sableuses, de sables et de grès, de conglomérats, de sables glauconieux et de marnes (Tastet, 1979). Les caractéristiques hydrodynamiques de toutes ces formations font du District d'Abidjan, une zone qui présente d'énormes potentialités en eaux souterraines constituées par trois niveaux d'aquifères d'inégale importance. L'aquifère du Quaternaire contient une nappe phréatique dont le niveau piézométrique est très proche de la surface du sol et pourrait recevoir directement les polluants d'origines diverses (Aghui et Biémi, 1984). L'aquifère du Continental Terminal d'âge Mio-pliocène constitué du haut vers le bas, de la cuirasse latéritique discontinue coiffant par endroit les formations d'argiles sableuses et de sables argileux, de sable grossier fluvial, de l'argile noire, de sable argileux et de sable graveleux intercalé d'argiles bariolées (Aghui et Biémi, 1984). Ces formations essentiellement constituées de sable à « passé » d'argile pourraient offrir à priori des conditions favorables à la migration des polluants vers les eaux souterraines (Kouamé

et al., 2006). L'aquifère du Maestrichtien est situé à 200 m de profondeur dans les bancs calcaires du Maestrichtien. Cette nappe est constituée de bancs calcaires gréseux, peu fissurés et à gros grains de quartz roulés (Loroux, 1978).

Matériel et données

La cartographie de la vulnérabilité spécifique des eaux souterraines du District d'Abidjan a nécessité des données multi sources. Il s'agit :

- des données piézométriques recueillies en 2001 par le Laboratoire de Télédétection et d'Analyse Spatiale Appliquée à l'Hydrogéologie (LATASAH) en collaboration avec la Société de Distribution de l'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) ;

- de la concentration de nitrates dans 77 échantillons d'eaux souterraines datant de 1995, 2001 et 2006 dont 31 proviennent des puits et 46 des forages ; ont été fournies par la SODECI ;

- des données pluviométriques datant de 1963 à 2000, qui sont collectées auprès de la Société d'Exploitation et de Développement Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM). Elles concernent les stations de Port-Bouët-Aéroport, de Bingerville et d'Adiopodoumé ;

- des fiches techniques de forages de la région d'Abidjan disponibles à LATASAH ;

- la densité de population par commune fournie par l'institut national de statistique (INS) pour l'année 2001 ;

- des données cartographiques constituées de la carte de l'occupation du sol du District d'Abidjan de mars 2008 au 1/25000 disponible à LATASAH et de la carte géologique de la région d'Abidjan réalisée à l'échelle 1/500000 qui a servi pour représenter les couches pédologiques d'Abidjan. Cette carte a été collectée au Centre de Cartographie et de la Télédétection d'Abidjan (CCT) ;

- des images SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de résolution 90 m du Modèle Numérique d'Altitude de la zone d'étude ont été utilisées pour apprécier

l'altimétrie de la zone d'étude et élaborer sa carte de pente. Ces données sont disponibles sur le site : <http://strm.csi.cgiar.org>.

Le traitement de toutes ces données s'est effectué avec le logiciel Arcgis 9.3, à partir duquel elles ont toutes été géoréférencées dans le système de coordonnées UTM WGS 84, zone 30, hémisphère Nord.

Méthodologie

Cette étude a nécessité l'utilisation conjointe du système d'information géographique et de la méthode d'analyse multicritère parce qu'il n'existe pas de méthode standard pour évaluer la vulnérabilité spécifique. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque. En effet, différents auteurs ont développé leur propre méthode adaptée aux conditions et sensibilités locales, en s'inspirant éventuellement des méthodes existantes (Panagopoulos et al., 2006; Bolduc et al., 2006). Au regard de ces travaux, la démarche méthodologique adoptée se résume en trois étapes.

Elaboration des paramètres et assignation des cotes

La vulnérabilité spécifique prend en compte les propriétés physico-chimiques du polluant, leurs relations avec les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère et celles liées aux sources de pollution (Murat et al., 2000). A cet effet, les paramètres influençant le transfert vertical des nitrates vers les eaux souterraines ont été alors recensés. Les paramètres étant mesurés sur des échelles différentes, avec des unités différentes, une standardisation de ceux-ci s'impose pour une bonne analyse multicritère. Ainsi, chacun des paramètres est associé à une échelle entière. Une note variant de 1 à 10 est définie selon la particularité du milieu.

Profondeur de la nappe

La profondeur détermine l'épaisseur de la zone non saturée et conditionne le temps de transfert du polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interaction physico-chimiques avec l'encaissant) et donc sa possible dégradation en cours de transfert. Pour la détermination de ce paramètre, les niveaux statiques d'une centaine de piézomètres et de forages réalisés sur la zone ont été utilisés. Une interpolation de ces données a permis d'élaborer la carte relative à la profondeur. Les cotes allant de 1 à 10 ont été appliquées aux différentes plages de valeurs de profondeur. La cote 10 correspond aux profondeurs inférieures à 1 m et la cote 1 aux profondeurs supérieures à 31 m.

Recharge annuelle

La recharge constitue le véhicule principal de transfert des polluants vers les eaux souterraines. A cet effet, l'estimation de la recharge annuelle s'est faite par la détermination de l'infiltration mensuelle en fonction du type de recouvrement végétal ou urbain grâce à un organigramme, à partir de la pluviométrie mensuelle (1963-2000) recueillie à la station de l'aéroport international Félix Houphouët Boigny.

Cette méthode a été utilisée en 1996 par SOGREAH sur la nappe d'Abidjan ; elle a permis de calculer le taux d'infiltration mensuel à partir de l'équation (1) :

$$P = R + ETR + I \pm RFU \quad (1)$$

- les précipitations mensuelles (P) de la période 1963-2000 ;
- les évapotranspirations mensuelles (ETM) ou (ETP) ;
- le taux de ruissellement mensuel (R) et le coefficient cultural (Kc).

Ces coefficients (R et Kc) varient suivant les types de recouvrement identifiés (Figure 2). Les forêts et palmeraies dont le coefficient de ruissellement annuel moyen est de 1,2% (SOGREAH, 1996) retiennent l'eau

météorique. Le recouvrement est dense et pérenne pendant toute l'année, par conséquent un coefficient cultural de 1 a été appliqué à l'ETP.

Les zones déboisées, les cultures agricoles et les jachères sont beaucoup moins recouvertes. Le coefficient de ruissellement annuel moyen de ces zones est 25% et le coefficient cultural de 0,75. Les agglomérations sont représentées par le grand Abidjan et ses banlieues. Il y a des zones quasi imperméables (Plateau, Cocody) à fort taux de ruissellement et les zones moins imperméables des quartiers Nord et Ouest (Abobo, Yopougon). Les valeurs du coefficient de ruissellement annuel moyen prises en compte ont varié de 50% à 90%. Le coefficient cultural considéré est inférieur à 0,75.

La réserve facilement utilisable du sol (RFU), pour l'ensemble de la zone d'étude a été fixée à 100 mm grâce au caractère sableux des sols et le mois d'avril a été déterminé comme le mois de l'année où les réserves d'eau commencent à se constituer. Ainsi, l'entrée de tous les paramètres décrits précédemment (P, ETP, R et Kc) dans l'organigramme (Figure 3) a permis de calculer les infiltrations annuelles de ces différents types de couvert végétal. Enfin, ces différentes valeurs obtenues ont été interpolées et les cotes 6, 8 et 9 leur ont été attribuées suivant l'ordre de grandeur.

Matériau de l'aquifère

La nature des matériaux de l'aquifère détermine le comportement d'un éventuel contaminant dans cet aquifère. Selon la perméabilité de l'aquifère (granulométrie, fissuration), le temps de transfert d'un contaminant varie de faible à nul dans les terrains à perméabilité d'interstices (sables, grès) mais, il est élevé dans les roches à perméabilité de fissure (calcaires) (Guillemin et Roux, 1991). Pour la détermination de ce paramètre, 54 coupes de forage ont été utilisées. A partir de ces coupes de forage, uniquement les couches captées par ces

forages (équipées d'un tube avec des crépines) ont été prises en compte. En effet, selon Aghui et Biémi (1984), la nappe d'Abidjan, exploitée pour l'alimentation en eau potable, est contenue dans les sables fins et les sables grossiers. Les cotes 6, 7 et 8 ont été attribuées respectivement au sable fin, moyen et grossier.

Type de sol

Les caractéristiques des sols revêtent une importance considérable pour le temps de transfert des polluants depuis la surface du sol vers les eaux souterraines (Macary et al., 2006). La carte géologique de la région d'Abidjan révèle que le sol du District d'Abidjan dans sa grande majorité est de type sablo-argileux (Delor et al., 1992). Par conséquent, le sol a été considéré uniforme sur toute l'étendue de la zone d'étude. La cote moyenne assignée à ce paramètre est égale à 6.

Topographie

La topographie contrôle la probabilité qu'un polluant a, à s'écouler ou à s'infiltrer dans le sol. La topographie de la zone d'étude est caractérisée par la pente obtenue à partir du modèle numérique d'altitude (MNA) issu des images satellitaires SRTM de l'année 2000 avec lesquelles nous avons généré la carte des pentes. Ensuite, la reclassification de ces différentes pentes, nous a permis d'assigner les cotes variant de 1 à 10 respectivement pour les pentes forte et faible.

Impact de la zone non saturée

La zone non saturée correspond à la portion du terrain comprise entre le sol et le niveau supérieur de la nappe souterraine. La texture de cette zone détermine le temps de transfert du contaminant dans l'aquifère. A partir des coupes géologiques de forage obtenues, l'interpolation des données des formations représentatives de la zone non saturée a permis d'élaborer ce paramètre. En l'absence de correspondance entre les formations de la zone non saturée et celles

utilisées pour la classification dans la méthode "DRASTIC", la classification suivante a été adoptée : sable fin argileux : 4 ; sable moyen argileux : 5 ; sable fin : 6 ; sable moyen : 7 ; sable grossier : 8.

Conductivité hydraulique de l'aquifère

La conductivité hydraulique est une caractéristique physique qui représente la facilité qu'a un matériau à permettre le transfert de fluide au travers d'un réseau connecté (Urgelli, 2000). Pour générer ce paramètre, les données de conductivité hydraulique (perméabilité) déterminées au niveau de la nappe d'Abidjan par Guérin (1962) et SOGREAH (1996) ont été utilisées. Les valeurs de la conductivité hydraulique collectées sont comprises entre $4,70.10^{-5}$ et $6,5.10^{-4}$ m.s⁻¹ et les cotes assignées vont de 2 à 8 suivant le système de cotation DRASTIC.

Type d'occupation de sol

L'occupation du sol peut être définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées. C'est l'ensemble des activités pratiquées à la surface du sol et susceptibles d'engendrer des polluants. Ce paramètre a été obtenu à partir de la numérisation de la carte d'occupation du sol éditée en 2008 par LATASAH. Des cotes sont attribuées aux principales activités de la zone d'étude en tenant compte de leur capacité à générer les nitrates dans la nature. La cote 1 est affectée aux forêts et les cotes 3, 4 et 5 respectivement aux activités génératrices de nitrates comme les agglomérations dont le taux d'assainissement ne dépasse pas 50%, les cultures industrielles, les cimetières et les abattoirs.

Densité de la population

La densité de la population est considérée comme l'un des paramètres importants dans la cartographie de la vulnérabilité spécifique aux nitrates des aquifères en milieux urbains. A cet effet, les données de populations nous ont permis d'établir la carte de la densité de la population

du District d'Abidjan. La sensibilité à la pollution de ce paramètre est exprimée à travers cinq classes. Les agglomérations qui enregistrent une forte densité ont été assignées par des cotes 5 et 4. Les autres avec leur densité relativement faible, contribuent à un degré moindre à la pollution avec des cotes 3, 2 et 1 pour les zones quasiment inhabitées.

Taux de raccordés au réseau d'assainissement collectif

Le fort taux d'urbanisation que connaît la ville d'Abidjan ne s'accompagne pas souvent de la réalisation d'infrastructures d'assainissement. Les habitants, pour évacuer leurs eaux usées, se dotent des systèmes d'assainissement individuels qui représentent une menace pour l'aquifère. A partir des différents taux de raccordés au réseau d'assainissement collectif fournis par l'étude réalisée par le bureau national d'étude technique et de développement en novembre 1996, ce paramètre a été élaboré. La classification du taux de raccordé au réseau d'assainissement collectif montre quatre (4) classes. Les cotes 1 et 5 ont été respectivement appliquées pour les taux supérieurs à 40% et inférieurs à 10%.

Adsorption

L'adsorption représente la capacité qu'ont les nitrates à se fixer sur le sol. Elle est le résultat des actions physico-chimiques eau/roche. En effet, plus l'adsorption est importante, moins le polluant est lessivé et donc la nappe est moins vulnérable. Les formations géologiques de la région d'Abidjan montrent que la quasi-totalité de la zone d'étude est favorable à la mobilité des polluants. Mais elles indiquent à quelques endroits des classes modérées d'adsorption dues aux lambeaux de formations argileuses rencontrées dans la zone non saturée. A cet égard, les cotes assignées aux différentes classes varient de 10 pour les sables grossiers à 5 pour les sables fins.

Solubilité

La solubilité des nitrates exprime leur aptitude à se dissoudre dans l'eau. Les Nitrates étant très solubles dans l'eau, ils sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration (Ballerrini et al., 1998). La solubilité a été considérée uniforme sur toute l'étendue de la zone d'étude et une note forte égale à 9 a été attribuée à ce paramètre.

Après l'élaboration des paramètres et l'assignation des cotes, la détermination du poids de chaque paramètre est une autre étape importante dans l'évaluation de la vulnérabilité spécifique des nitrates du District d'Abidjan.

Détermination des poids des paramètres et des critères utilisés

La démarche utilisée pour déterminer les poids des paramètres est la méthode d'analyse multicritère (Analytic Hierarchy Process (AHP)) de Saaty. Cette méthode permet de prendre des décisions efficaces relatives à des problèmes complexes par la simplification et l'accélération des processus de prise de décision (Saaty, 1980). Cette démarche se résume en trois grandes parties.

Elaboration de la hiérarchie

Pour l'élaboration de la hiérarchie, la méthode simplifie le problème à résoudre selon une structure hiérarchique, puis donne une importance relative à chaque élément de chaque niveau. Ainsi, les paramètres élaborés sont regroupés en un ensemble homogène et disposés en différents niveaux (Figure 4).

Les différents niveaux de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) sont (Anonyme, 1990):

- le niveau 0 correspond à l'objectif principal à atteindre. L'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates des eaux souterraines du District d'Abidjan a été choisie dans cette étude.
- le niveau 1 exprime les critères de décision ou d'analyse. Dans le cas de la présente étude, le critère Hydrogéologie, le

critère Humain et le critère Physico-chimie ont été retenus.

- le niveau 2 traduit les caractéristiques des critères. Les caractéristiques des critères dans cette étude sont les différents paramètres influençant le transfert vertical des polluants vers les eaux souterraines.

Combinaison binaire

La combinaison binaire consiste à comparer l'importance relative de tous les paramètres pris deux à deux de chaque critère de décision, ensuite, comparer les critères en fonction de l'objectif principal. L'importance relative des paramètres tient compte, de leur aptitude dans l'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates et se fait sur la base de l'échelle numérique de 9 niveaux élaborée par El Morjani (2002) (Tableau 1).

La combinaison a abouti respectivement à la configuration des trois premières matrices carrées relatives aux critères de décision (Hydrogéologie, Humain et Physico-chimique). Enfin, la considération des importances relatives des critères de décision ci-dessus dans l'évolution des nitrates a généré une quatrième matrice qui permet l'évaluation de la vulnérabilité spécifique.

Calcul des poids

Pour déterminer les poids au niveau de chaque matrice, les vecteurs propres (V_p), les coefficients de pondération (C_p) et le ratio de cohérence (R_c) sont calculés suivant les formules:

$$V_p = \sqrt[k]{W_1 \times \dots \times W_k} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{V_p}{V_{p1} + \dots + V_{pk}} \quad (3)$$

$$R_c = \frac{I_c}{I_a} \quad (4)$$

Avec : I_c : Indice de cohérence, I_a : indice aléatoire, k : le nombre de paramètres comparés,

W_k : principales notes attribuées aux paramètres.

Mais à priori, la vérification de la cohérence des jugements à travers le calcul du Ratio de cohérence (R_c) est nécessaire. A ce titre, le ratio de cohérence (R_c) doit toujours être inférieur ou égale à 10%. Si non, les appréciations peuvent être reconsidérées.

Pour illustrer la démarche méthodologique employée, la conception de la matrice de comparaison des paramètres hydrogéologiques a été utilisée comme exemple. En effet, la profondeur de la nappe a une influence plus importante que les autres paramètres dans le transfert des polluants. A cet égard, des cotes relativement élevées (5 ; 6 ; 7) lui ont été attribuées par rapport à chaque paramètre tandis que les inverses de ces valeurs (1/5 ; 1/6 ; 1/7) ont été affectés aux autres (Tableau 2).

Pour produire des coefficients de pondération de chaque paramètre, la procédure a besoin du vecteur propre de la matrice de comparaison. Les valeurs de ces vecteurs sont déterminées en calculant leur moyenne géométrique par ligne. Par exemple, en considérant la première ligne du Tableau 2, la valeur du vecteur propre est $\sqrt[7]{1 \times 4 \times 4 \times 6 \times 7 \times 3 \times 5}$ soit 3,73.

Ainsi, le coefficient de pondération pour chaque paramètre est déduit par standardisation du vecteur propre en divisant chaque vecteur propre par leur somme.

Pour le paramètre, profondeur (D) du Tableau 2, le coefficient de pondération est

$$\frac{3,73}{3,73+1,26+1,26+0,41+0,26+2,32+0,68}$$

soit 0,37. A l'instar de la matrice de comparaison des paramètres hydrogéologiques, les différentes matrices de décision ont été générées en affectant des notes en fonction de l'importance relative des paramètres de chaque critère de décision d'une part et d'autre part des critères pris deux à deux (Tableaux 3, 4 et 5).

Evaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates

L'agrégation complète a été utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates dans cette étude. Elle consiste à multiplier chaque couche-facteur par son coefficient de pondération respectif et ensuite additionner ces résultats pour produire un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10, car la somme des coefficients de pondération des critères générés par la méthode développée par Saaty (1980) vaut 1. L'approche utilisée peut être résumée par la formule suivante :

$$S = \sum_{i=2}^n W_i X_i \quad (5)$$

Avec : S : le résultat ; W_i : le poids du critère i ; X_i : la valeur standardisée du critère de facteur i .

En effet, les indices des différents critères de décision sont obtenus suivant les formules (6, 7 et 8):

$$\text{Indice Hydrogéologique} = 0,37 \times D + 0,13 \times R + 0,13 \times A + 0,04 \times S + 0,03 \times T + 0,23 \times I + 0,07 \times C \quad (6)$$

$$\text{Indice Humain} = 0,61 \times L + 0,27 \times N + 0,12 \times P \quad (7)$$

$$\text{Indice Physico-chimique} = 0,20 \times \text{Adsorption} + 0,80 \times \text{Solubilité} \quad (8)$$

L'établissement de la carte de chaque critère de décision a consisté à reporter dans l'espace, les différentes valeurs issues de la somme des produits des valeurs standardisées (cotes) et pondérées (poids) des paramètres constitutifs dudit critère.

Ensuite, les indices de la vulnérabilité spécifique aux nitrates sont calculés à partir de la formule ci-après :

$$I_{VSN} = 0,54 \times I_{\text{Hydrogéologie}} + 0,30 \times I_{\text{Humain}} + 0,16 \times I_{\text{Physico-chimie}} \quad (9)$$

Cet indice ainsi calculé représente une mesure du niveau de risque de contamination

de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. En effet, l'indice de vulnérabilité spécifique aux nitrates (I_{VSN}) permet d'évaluer le degré de vulnérabilité spécifique aux nitrates de la zone d'étude. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice I_{VSN} calculé est élevé. L'équation (10) établie par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (1995) permet d'effectuer la conversion des indices de vulnérabilité spécifique en pourcentage afin de mieux appréhender la classification des degrés de vulnérabilité (Tableaux 6 et 7).

$$I_{VSN} \% = \frac{I_{VSNi} - I_{VSN \text{ min}}}{I_{VSN \text{ max}} - I_{VSN \text{ min}}} \times 100 \quad (10)$$

Avec I_{VSNi} = indice de vulnérabilité spécifique aux nitrates à déterminer ;

$$I_{VSN \text{ min}} = 3,202 \text{ et } I_{VSN \text{ max}} = 7,518$$

En remplaçant les différentes valeurs, l'équation (10) devient :

$$I_{VSN} \% = \frac{I_{VSNi} - 3,202}{4,316} \times 100 \quad (11)$$

Validation de la carte de la vulnérabilité spécifique aux nitrates

La validité de la carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates élaborée a été testée par les concentrations des nitrates des années 1995, 2001 et 2006 recueillies sur presque toute l'étendue de la zone d'étude. Ainsi, plusieurs auteurs, en l'occurrence Hamza et al. (2007) ; Kouamé 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. Ces données partielles tendent à valider les méthodes en tant qu'indicateur de la vulnérabilité des eaux souterraines.

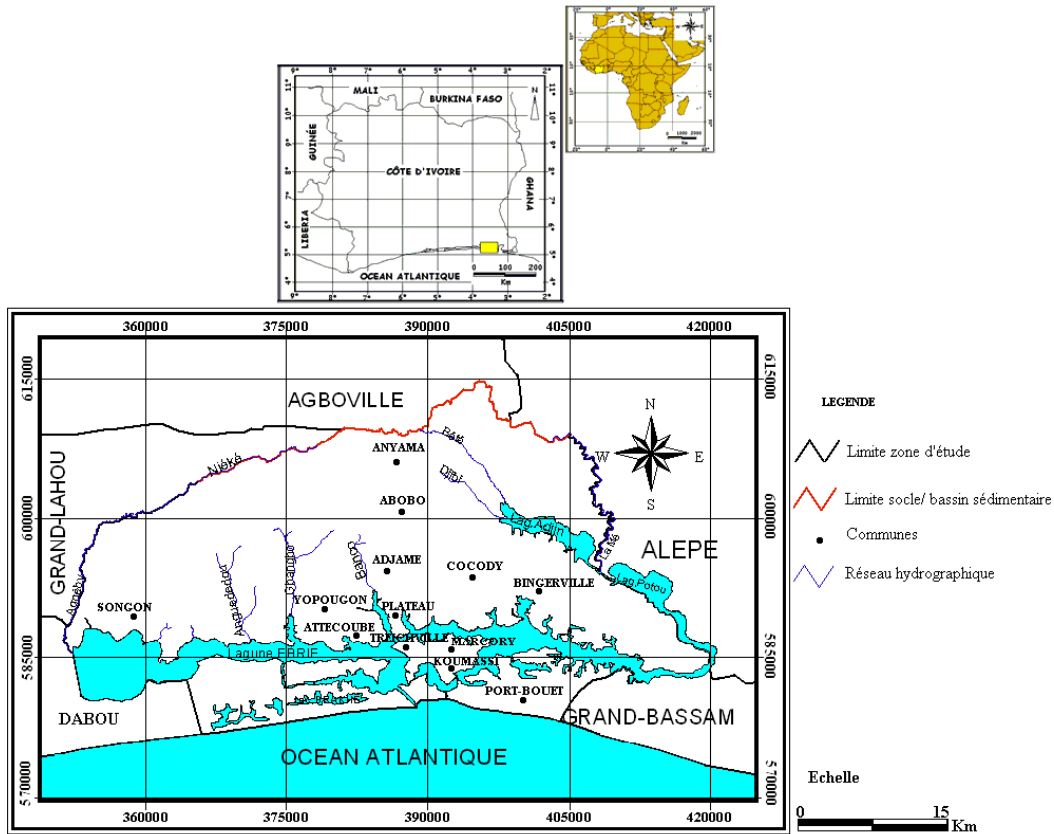


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

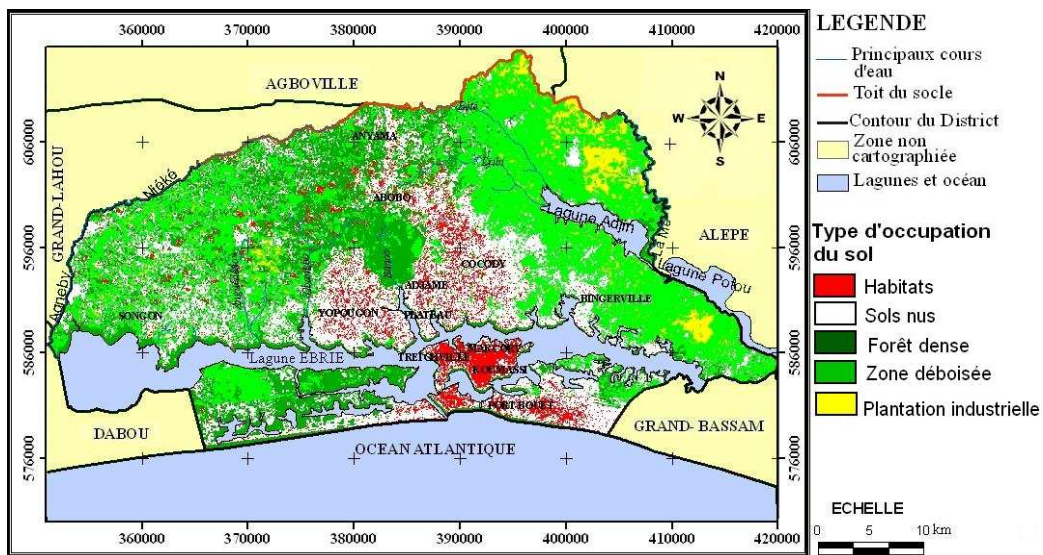


Figure 2: Carte d'occupation de sol du District d'Abidjan (LATASAH, 2008).

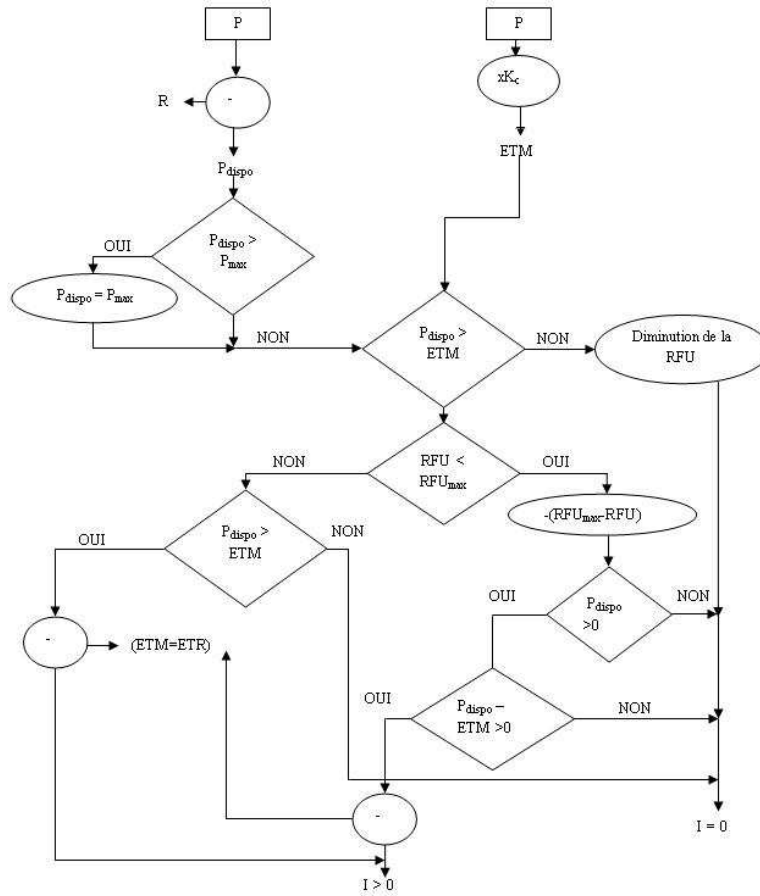


Figure 3 : Organigramme de calcul de l'infiltration mensuelle (SOGREAH, 1996).

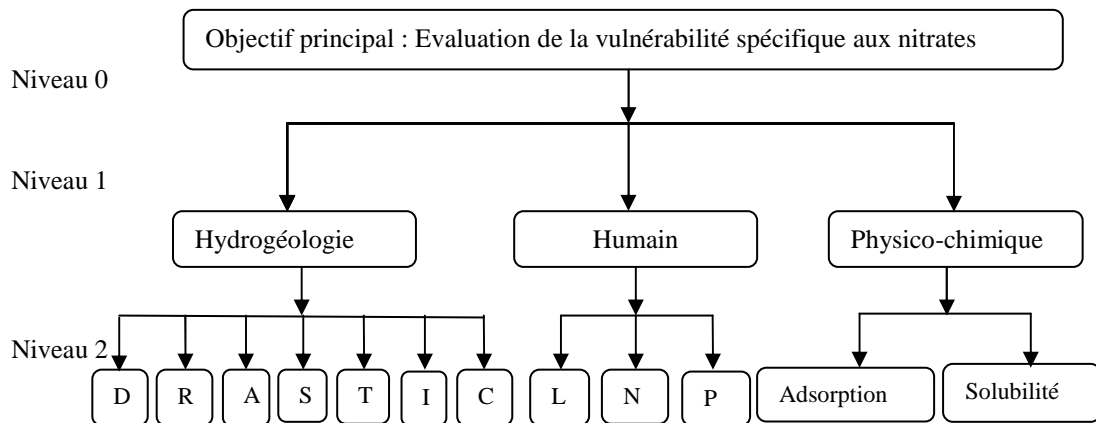


Figure 4 : Structure hiérarchique du problème à résoudre.

RESULTATS

Carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates du District d'Abidjan

La carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates obtenue à partir de l'équation (8) indique 9 classes dont les indices varient de 3,73 à 6,78 (Figure 5). Cette carte révèle une croissance des indices du Nord vers le Sud. Ce qui reflète qualitativement la tendance générale des activités anthropiques productrices des polluants (nitrates) et aussi les prédispositions naturelles de protection de la nappe au niveau du District d'Abidjan.

A partir de la classification adaptée à cette étude comme ce fut le cas des travaux réalisés par Murat et al. (2000), Mohamed (2001), Murat et al. (2003) et Jourda et al. (2005), cinq (5) classes de vulnérabilité ont été déterminées en fonction des indices obtenus. La carte issue de cette classification (Figure 6), montre les degrés de vulnérabilité spécifique aux nitrates des eaux souterraines du District d'Abidjan. La classe de vulnérabilité « Très faible » représente 4% du territoire et se trouve sous forme d'îlot dissimulé au Centre et à l'Est du District d'Abidjan. La classe de vulnérabilité « Faible » est la plus représentée dans le District avec 39%. Elle se localise majoritairement au Nord de la lagune Ebrié de façon générale et particulièrement dans les secteurs Nord, Nord-Est, Nord-Ouest et Centre de la nappe d'Abidjan. Elle garantit une protection plus ou moins grande de la nappe. La classe de vulnérabilité « Moyenne » se rencontre essentiellement au centre de la nappe et sous forme de lambeaux au Sud-Est, Sud-Ouest, Nord et Nord-Est. Elle couvre 22% de la superficie de la nappe et présente une protection hydrogéologique incertaine. La classe de vulnérabilité « Elevée » est représentée par des îlots dispersés sur toute l'étendue de la zone d'étude. Elle couvre 25% de la superficie de la nappe et caractérise

majoritairement les zones utilisées pour les cultures agro-industrielles (hévée, palmier à huile...), les décharges et les cimetières. Enfin, la classe de vulnérabilité « Très élevée » couvre 10% de la zone d'étude. Elle est majoritairement représentée au Sud de la lagune Ebrié. Toute la zone Sud d'Abidjan (Treichville, Marcory, Koumassi, Port-Bouët) est concernée.

Pour mettre en relief l'importance de chaque classe, les pourcentages ont été représentés dans un diagramme circulaire (Figure 7). La carte de vulnérabilité obtenue est un outil d'aide à décision. Il est donc nécessaire qu'elle soit validée après leur établissement par des paramètres n'ayant pas servi à leur réalisation afin de les rendre plus fiables.

Validation de la carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates de la nappe

Les concentrations en nitrate des eaux souterraines du District d'Abidjan sont comprises entre 2,8 et 196,2 mg.L⁻¹. La validation s'est opérée en comparant la répartition spatiale des nitrates dans les eaux souterraines et la distribution des classes de vulnérabilité spécifique des nitrates établies (Figure 8). Cette répartition s'est effectuée sur la base du nombre des concentrations de chaque catégorie. Il ressort de l'analyse des différentes valeurs et de leurs positions sur la carte de vulnérabilité, que les teneurs de nitrate supérieures à 50 mg.L⁻¹ (norme de qualité de l'eau de boisson de l'OMS) sont presque toutes regroupées dans les zones de forte à très forte vulnérabilité aux nitrates. Il s'agit notamment des communes du Plateau, Attécoubé, Adjamé, Yopougon, Cocody, Marcory, Koumassi et Port-Bouët. Les teneurs comprises entre 13,5 et 50 mg.L⁻¹ se localisent dans des zones de vulnérabilité très forte et celles de vulnérabilité moyenne et faible. Quant aux teneurs inférieures à 13,5 mg.L⁻¹,

elles s'observent plutôt dans les zones à vulnérabilité moyenne, faible et très faible.

Pour bien percevoir cette corrélation entre les classes de la vulnérabilité spécifique déterminées et les différentes concentrations des nitrates recueillies, nous avons établi le Tableau 6.

Au regard de l'analyse du Tableau 6, il transparaît un taux de coïncidence élevé de 80,52% entre les différentes classes de vulnérabilité et les concentrations des nitrates des eaux souterraines de la zone d'étude (62 valeurs sur 77). Cette valeur (80,52%) a été déterminée en additionnant les taux de coïncidence respectifs entre :

- des zones à vulnérabilité très élevée et élevée et les concentrations supérieures à 50 mg.L⁻¹ (21 valeurs sur 24) soit 87,5% ;

- des zones à vulnérabilité moyenne et les concentrations comprises entre 13,5 et 50 mg.L⁻¹ (10 valeurs sur 21) soit 12,99% ;

- des zones à vulnérabilité faible et très faible et les concentrations inférieures à 13,5 mg.L⁻¹ (31 valeurs sur 32) soit 96,87%.

Ce taux de coïncidence élevé (80,52%) s'explique par le fait que les investigations qui ont permis la réalisation de cette carte ont tenu compte des sources probables des nitrates à travers le critère de décision «Occupation de sol». Ainsi, la carte de la vulnérabilité spécifique établie par la méthode d'analyse multicritère reflète la réalité du terrain.

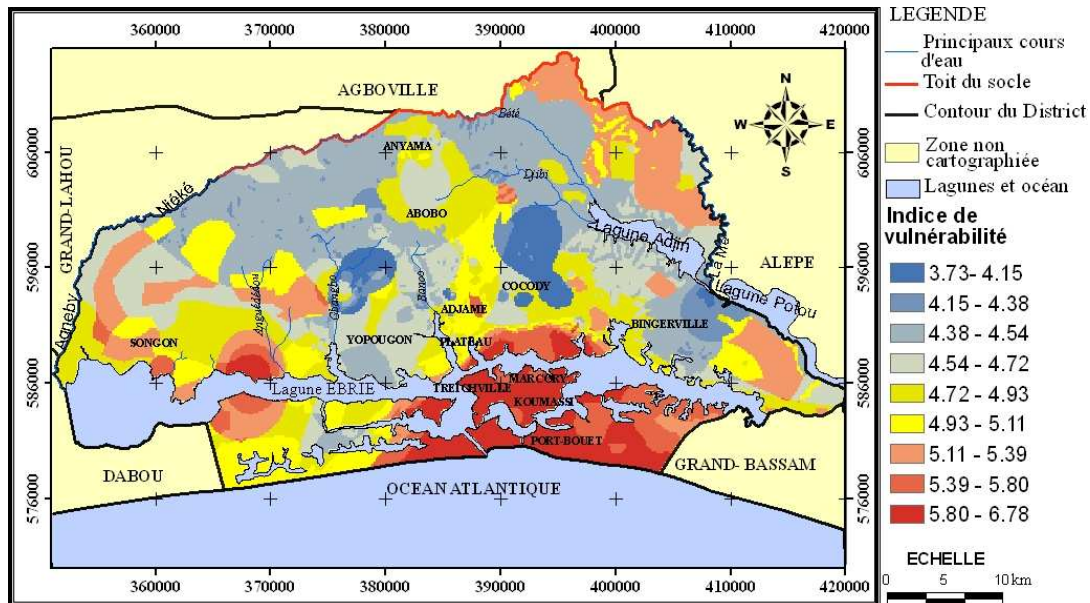


Figure 5 : Carte des indices de vulnérabilité spécifique aux nitrates.

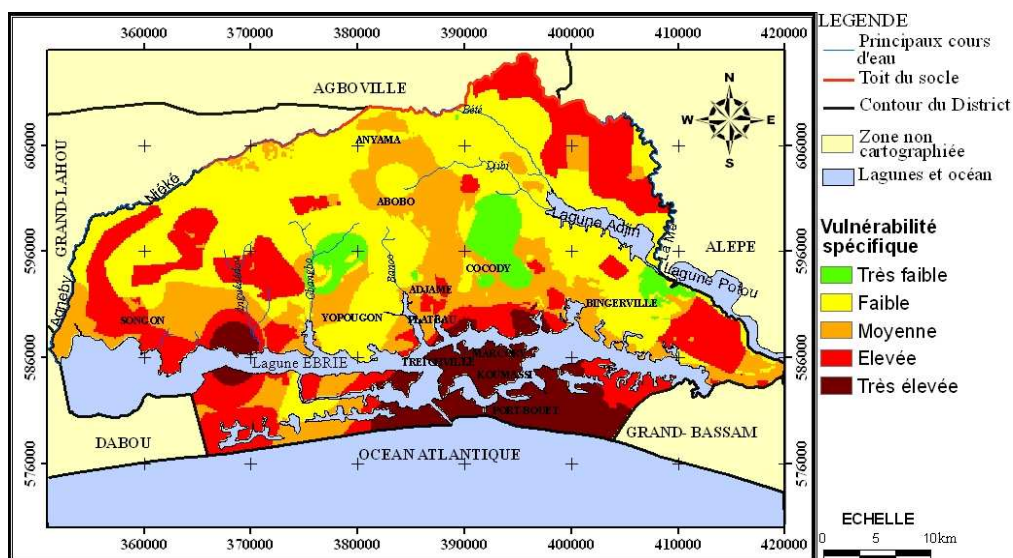


Figure 6: Carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates du District d'Abidjan.

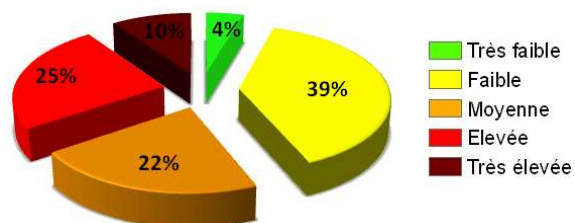


Figure 7: Répartition des proportions des indices de vulnérabilité spécifique aux nitrates.

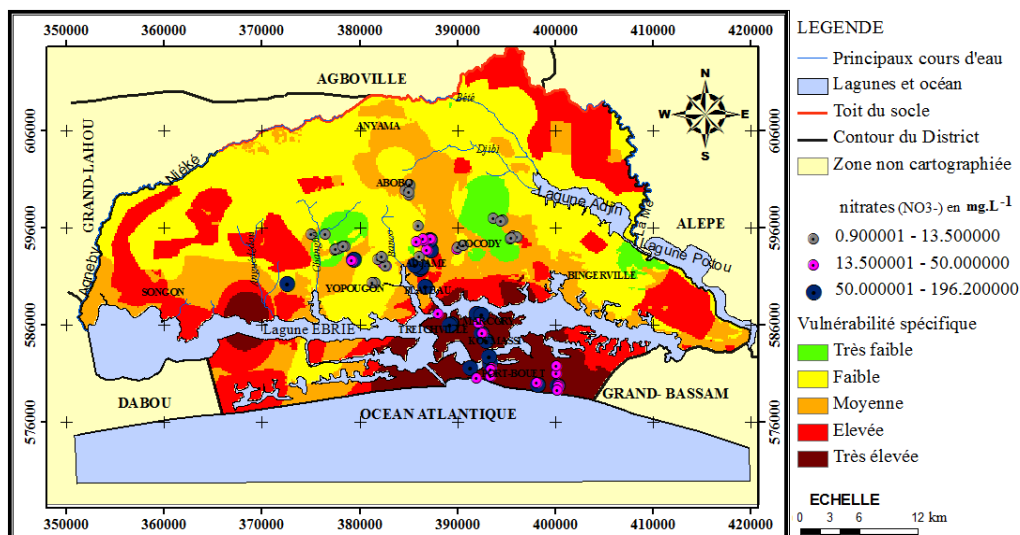


Figure 8 : Représentation des forages dans l'espace de la zone d'étude.

Tableau 1 : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères (El Morjani, 2002).

Expression d'un critère par rapport à un autre	Note
Même importance	1
Modérément important	3
Fortement important	5
Très important	7
Extrêmement important	9
Modérément moins important	1/3
Fortement moins important	1/5
Moins important	1/7
Extrêmement moins important	1/9

Tableau 2: Matrice de comparaison par paire déterminant le coefficient de pondération des paramètres hydrogéologiques.

	D	R	A	S	T	I	C	Vp	Cp	
D	1	4	4	6	7	3	5	3,73	0,37	
R	¼	1	1	4	5	1/3	3	1,26	0,13	
A	¼	1	1	4	5	1/3	3	1,26	0,13	
S	1/6	1/4	1/4	1	3	1/5	1/3	0,41	0,04	
T	1/7	1/5	1/5	1/3	1	1/6	¼	0,26	0,03	
I	1/3	3	3	5	6	1	4	2,32	0,23	
C	1/5	1/3	1/3	3	4	1/4	1	0,68	0,07	
Total								9,91	1,00	
	IC= 0,087					RC= 0,066				

Tableau 3: Matrice de comparaison par paire déterminant le coefficient de pondération des paramètres du critère «HUMAIN».

	L	N	P	Vp	Cp
L	1	3	4	2,289428	0,61
N	1/3	1	3	1	0,27
P	1/4	1/3	1	0,436790	0,12
Total				3,726218	1,00
IC= 0,037					RC= 0,06

Tableau 4: Matrice de comparaison par paire déterminant le coefficient de pondération des paramètres du critère «PHYSICO-CHIMIQUE».

	Adsorption	Solubilité	Vecteur propre	Cp
Adsorption	1	¼	½	0,20
Solubilité	4	1	2	0,80
Total		2,5		1,00
	IC = 0		RC = 0	

Tableau 5 : Matrice de comparaison par paire déterminant des poids des critères de décision.

	Hydrogéologie	Humain	Physico-chimie	V p	Cp
Hydrogéologie	1	2	3	1,817	0,54
Humain	1/2	1	2	1	0,3
Physico-chimie	1/3	½	1	0,550	0,16
Total					1,00
	IC = 0,0046		RC = 0,79%		

Tableau 6: Distribution des concentrations de nitrates en fonction des classes de vulnérabilité spécifique aux nitrates.

Classes de vulnérabilité	Intervalle (mg.L⁻¹) de NO₃			
	[NO₃] < 0,9	0,9 ≤ [NO₃] < 13,5	13,5 ≤ [NO₃] < 50	[NO₃] > 50
Très faible	0	13	0	0
Faible	0	10	5	0
Moyenne	0	8	5	3
Elevée	0	0	0	6
Très élevée	0	1	11	15
Total	0	32	21	24

DISCUSSION

La carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates établie par l'utilisation d'un SIG combiné aux méthodes d'analyse multicritère a révélé cinq classes de vulnérabilité dont les indices correspondant varient de 0 à 10, contre quatre classes de vulnérabilité mise en place par la méthode DRASTIC. Ce résultat est confirmé par les travaux de Hamza et al. (2007) qui ont prouvé que la vulnérabilité à la pollution par les nitrates est mieux exprimée à travers la méthode de vulnérabilité spécifique. Les zones ayant des degrés de vulnérabilité très élevés sont localisées au Sud du District d'Abidjan caractérisés par une prédisposition naturelle favorable à la pollution (Aghui et Biémi, 1984). Par comparaison à l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique, les travaux de Kouamé et al. (2009) ont montré que plus de 90% des eaux souterraines du District d'Abidjan bénéficient d'une protection hydrogéologique incertaine, contre 61% (faible 39%, moyenne 22%) révélés par cette étude. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle, la vulnérabilité intrinsèque a tendance à surestimer le degré de vulnérabilité (Jourda et al., 2006).

Cependant, tant d'éloges pour le SIG et l'analyse multicritère ne doit pas nous faire perdre de vue les multiples difficultés liées à la qualité, au nombre souvent insuffisant des données, à leur interpolation et la répartition spatio-temporelle de ces données pour la réalisation d'une bonne étude. En effet, la difficulté dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution réside dans le nombre de critères de décision à prendre en compte. Plusieurs paramètres ont été produits par interpolation. L'interpolation utilisée dans cette étude peut entraîner des erreurs dans l'élaboration des paramètres, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. Par manque de données couvrant toute la zone d'étude, toutes les données ponctuelles utilisées dans cette étude (recharge, conductivité hydraulique, la profondeur à la nappe, l'impact de la zone vadose) ont été interpolées, assignant ainsi des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue. C'est un avantage de la méthode d'interpolation (Kouamé al., 2007).

L'une des difficultés de l'application de la méthode est aussi les limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres (Murat, 2000). Le choix des limites de classe s'opère en fonction d'une part, de la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement et d'autre part, des valeurs des critères (Jourda et al., 2005).

Enfin, bien qu'elle soit relativement performante, la méthode AHP utilisée pour la pondération des critères présente des difficultés. Une des difficultés de cette méthode concerne le choix de l'échelle des notes allant de 1 à 9 avec leur correspondance réciproque. Le choix de la note correspondant à un critère est subjectif et peut influencer le calcul du poids du critère considéré. Ce qui justifierait le faible taux de coïncidence enregistré au niveau de la zone de vulnérabilité moyenne et les concentrations des nitrates comprises entre 13,5 et 50 mg.L⁻¹ (10 valeurs sur 21) soit 12,99%.

En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement de la carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates par la méthode d'analyse multicritère, la carte de vulnérabilité spécifique obtenue demeure fiable. En outre, pour en être rassuré, les cartes de vulnérabilité spécifique aux nitrates obtenues à partir des méthodes "DRATIL" (Panagopoulos et al., 2006), et "SI" (Mohamed, 2007 ; Aké, 2010) respectivement dans les régions de Trifilia (Grèce), dans le Metline-Ras Jebel-Raf Raf au Nord-Est de la Tunisie et au Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Bonoua) ont été validées à partir des concentrations de nitrates. Partant de ce principe, la validité de la carte de vulnérabilité spécifique aux nitrates a été prouvée en comparant la répartition des différentes proportions des nitrates des eaux souterraines de la nappe d'Abidjan à la distribution des classes de vulnérabilité. Un taux de coïncidence de 80,52% obtenu pour ces travaux contre 79% et 81,13% pour les cartes de vulnérabilité spécifique à la pollution par les nitrates réalisées respectivement dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf au Nord-Est de la Tunisie et la région de Bonoua avec la méthode SI. Ceci vient

confirmer la performance de la méthode de l'analyse multicritère dans la réalisation des études environnementales et surtout la qualité des résultats obtenus. Ainsi, cette méthode favorise incontestablement la bonne gestion des ressources en eau souterraine et les prises de décision en vue d'un aménagement contrôlé du territoire. Cette carte de vulnérabilité permet donc de délimiter les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte lors de l'aménagement du territoire.

Conclusion

La conjonction du SIG à l'analyse multicritère a permis la réalisation de la carte de la vulnérabilité spécifique aux nitrates du District d'Abidjan. La carte vulnérabilité obtenue présente cinq (5) classes de vulnérabilité (très faible (4%), faible (39%), moyenne (22%), élevée (25%) et très élevée (10%)) qui décrivent les différents degrés de protection de la nappe d'Abidjan vis-à-vis des nitrates. Enfin, un taux de coïncidence de 80,52% entre les données de nitrates des eaux de la nappe et les différentes classes de la vulnérabilité spécifique a permis de prouver la fiabilité de la carte élaborée. Cette carte de vulnérabilité a circonscrit les zones sensibles à la pollution. A cet égard, elle représente un outil d'aide à décision qu'il va falloir prendre en compte lors de l'aménagement du territoire.

REFERENCES

- Aghui N, Biémi J. 1984. Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination. *Annales Université Nationale Côte d'Ivoire, série c (Sciences)*, **20**: 313-347.
- Ahoussi KE, Oga YMS, Koffi YB, Kouassi AM, Soro N, Biémi J. 2011. Caractérisations hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **5**(5): 2114-2132.
- Ahoussi KE, Soro N, Kouassi AM, Soro G, Koffi YB, Zadé GPS. 2010. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(5): 1753-1765.
- Aké GE, Kouadio HB, Dongo K, Dibi B, Kouamé FK, Biémi J. 2010. Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO_3^-) de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(5): 1675-1692.
- Anonyme. 1990. Analyse multicritère : Optimisation et analyse de faisabilité. p.24.
- Ballerini D, Gatelier C, Vogel T. 1998. *Techniques de Traitement par Voies Biologiques des Sols Pollués*. ADEME : p. 246.
- Bolduc S, Larocque M, Prichonnet G. 2006. Vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination par les nitrates sur le bassin versant de la rivière Noire (Montérégie, Québec). *Rev. Sci. Tech. Eau*, **19**(2): 87-99.
- Champagne L, Chapuis RP. 1993. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode Drastic. *Rev. Sci. Tech. Eau*, (26): 76-169.
- Delor C, Diady I, Simeon Y, Yao B, Tastet JP, Vidal M, Chiron JP, Dommanget A. 1992. Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000, Feuille Grand-Bassam. Mémoire de la Direction de la géologie de Côte d'Ivoire, n°4, Abidjan, Côte d'Ivoire, p. 30.
- DHH (Direction de l'Hydraulique Humaine. 2001. Hydraulique humaine en Côte d'Ivoire. Ministère des Infrastructures Economiques, Direction de l'hydraulique Humaine, Abidjan, p. 66.
- Dongo K, Kouamé KF, Koné B, Biémi J, Tanner M, Cissé G. 2008. Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain à Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire. *Vertigo*, **8**(3): 1-11.
- 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.

- Guillemin C, Roux JC. 1991. Pollution des eaux souterraines en France. Bilan des connaissances, impacts et moyens de prévention. Manuels et méthodes, n°23, éd. par BRGM, p. 262.
- Hamza HM, Added A, Francés A, Ridriguez R. 2007. Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien). *C. R. Géoscience*, **339**: 493-505.
- INS. 2001. Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH) 1998. Données socio-démographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités, région des lagunes (Côte d'Ivoire), vol. III, tome 1. INS, p. 43.
- Jourda JP, Kouamé KF, Soro N, Kouamé KJ, Kouadio BH, Saley MB, Kouamé K, Ahoussi E. 2003. Gestion et protection des eaux souterraines urbaines : apports d'un système d'information géographique à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe du continental terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan. Dans les Actes de la conférence francophone SIG 2003, Paris, p. 18.
- Jourda JP, Saley MB, Kouamé KJ, Kouadio BH, Biémi J, Razack M. 2005. Gestion et protection des ressources en eaux souterraines : contribution d'un SIG à la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères fissurés de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) selon la méthode DRASTIC. Dans les Actes de la Conférence francophone SIG 2005, du 5 au 6 octobre 2005, Paris, p. 16.
- Jourda JP, Kouamé KJ, Saley MB, Kouamé KF, Kouadio BH, Kouamé K. 2006. A new cartographic approach to determine the groundwater vulnerability of the Abidjan aquifer. In *Groundwater Pollution in Africa*, Xu Y, Usher B (eds). Taylor & Francis/Balkema: Leiden; 103-114.
- Kouamé KI, Goné GL, Savané I, Kouassi AE, Koffi K, Goula BTA, 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). *Afr. Sci.*, **2**(1): 39-56.
- 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 de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, p. 226.
- Kouamé KJ, Deh SK, Anani AT, Jourda JP, Biémi J. 2007. Gestion des déchets solides dans le District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Apports d'un SIG et des méthodes d'analyse multicritère. Actes de la conférence francophone SIG 200, du 10 au 11 octobre 2007, Versailles-France.
- Kouamé KJ, Jourda JP, Adja MG, Deh SK, Anani AT, Effini AT, Biémi J. 2008. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères en milieu poreux : application aux eaux souterraines du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Eur. J. Sci. Res.*, **20**(4): 772-787.
- Kouamé KJ, Jourda JP, Deh SK, Anani AT, Effini AT, SIGNO KH, Biémi J. 2009. Evaluation du degré de protection d'un aquifère en milieu poreux : vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. *Afr. Géoscience Rev.*, **16**(2): 89-102.
- Loroux BFE. 1978. Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Bordeaux I, France, p. 93.
- Macary F, Balestrat M, Puech C, Saudubray F. 2006. Méthode d'estimation d'un risque potentiel de la contamination des eaux de surface par les intrants agricoles à différentes échelles spatiales. Application sur les coteaux de Gascogne, p. 20.
- Matini L, Moutou JM, Kongo-Mantono MS. 2009. Evaluation hydrochimique des eaux

- souterraines au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afr. Sci.*, **5**(1): 82-98.
- (MAPAQ) Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 1995. Guide d'application. Examen des projets de distribution au Québec d'eau embouteillée importée. Centre québécois d'inspection des aliments et de santé animale, p. 29.
- Mohamed RM. 2001. Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et Changement Planétaires/Sécheresse*, **12**(2): 95-101.
- Murat V, Martel R, Michaud Y, Therrien R. 2000. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont Laurentien, Québec, AIH-CNC et SCG, p. 411-418.
- 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. Ressources naturelles Canada, Commission Géologique, p. 16.
- Panagopoulos GP, Antonakos AK, Lambrakis NJ. 2006. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeol. J.*, **14**: 894-911.
- Saaty TL. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Mc Graw-Hill: New York; 19.
- SODECI. 2001. Campagne de relevé piézométrique réalisée au niveau du District d'Abidjan. Rapport de synthèse, p. 10.
- SOGREAH. 1992. Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant l'alimentation en eau potable d'Abidjan. Etude sur modèle mathématique. Proposition d'études, offre technique. Ministère des Infrastructures Economiques, Direction et Contrôle des Grands Travaux (DCGTX), p. 51.
- SOGREAH. 1996. Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant l'alimentation en eau potable d'Abidjan. Etude sur modèle mathématique. Rapport de phase 2 : Présentation du modèle mathématique et des résultats du calage. Ministère des Infrastructures Economiques, Direction et Contrôle des Grands Travaux (DCGTX), p. 30.
- Soro G, Metongo SB, Soro N, Ahoussi KE, Kouamé KF, Zadé SGP, Soro T. 2009. Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **3**(6): 1408-1427.
- Soro N, Ouattara L, Dongo K, Kouadio KE, Ahoussi KE, Soro G, Oga MS, Savané I, Biémi 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.*, **4**(2): 364-384.
- Tapsoba. 1995. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de Côte d'Ivoire) : Hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 200.
- Tastet JP. 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, p. 181.
- Urgelli B. 2000. Perméabilité des roches et Loi de Darcy. Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, p. 5.