



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)

Gabriel Etienne AKE ^{1*}, Hélène Boyossoro KOUADIO ¹, Kouassi DONGO ^{1,2},
Brou DIBI ³, Fernand Koffi KOUAME ¹ et Jean BIEMI ¹

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire). Tel. : (+225) 22-483-803 ; fax : (+225) 22-445-270 ; E-mail : ak_gabe@yahoo.fr ; kbhel@yahoo.fr ; k_dongo@yahoo.fr ; kouamef@yahoo.fr ; jbiemi@yahoo.fr

²Centre Suisse de Recherches Scientifiques (CSRS), 01 BP 1303 Abidjan 01 (Côte d'Ivoire). Tél. : (+225) 23-472-790 ; fax : (+225) 23-451-211 ; E-mail : kouassi.dongo@csrs.ci

³Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 02 BP 801 Abidjan 02, (Côte d'Ivoire). Tel. : (+225) 20-304-266 ; fax : (+225) 20-308-118 ; E-mail : dibrou2003@yahoo.fr

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

RESUME

Le développement des cultures agro-industrielles à forte utilisation des fertilisants chimiques dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), constitue un risque important de contamination des eaux souterraines. La vulnérabilité à la pollution de la nappe de cette région a été étudiée par deux méthodes différentes mais complémentaires : la méthode DRASTIC (qui évalue la vulnérabilité intrinsèque) et la méthode SI (qui évalue la vulnérabilité spécifique). La validation de cette application a été testée en comparant la distribution des nitrates dans les eaux de la nappe de Bonoua et la répartition des différentes classes de vulnérabilités établies. Trois classes de vulnérabilité (moyenne, forte et très forte) ont été identifiées aussi bien par la méthode DRASTIC que par la méthode SI (très faible, élevée et très élevée). Une analyse intégrée révèle que la classe forte avec 66,18% (pour la méthode DRASTIC) et la classe très élevée 52% (pour celle de SI) sont les plus dominantes. En outre, la méthode SI évalue mieux la vulnérabilité à la pollution aux nitrates avec un taux de coïncidence de 81,13% entre les concentrations en nitrates des eaux de la nappe et les différentes classes de vulnérabilité établies contre 77,35% pour la méthode DRASTIC. Ces résultats constituent un guide pour les décideurs en matière de protection des zones jugées sensibles à la pollution aux nitrates et d'identification des sites devant abriter ultérieurement des infrastructures socio-économiques.

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : DRASTIC, SI, Pollution aux nitrates, SIG, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

La région de Bonoua est fortement dominée par les cultures agro-industrielles

utilisant des fertilisants chimiques. Elle présente le taux d'utilisation d'intrants agricoles le plus important (54%) de toute la

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

Côte d'Ivoire (MEMA, 2001). Cette forte demande en produits phytosanitaires constitue une menace pour la qualité des ressources en eau souterraine. Les réserves en eau souterraine estimées à 13,9 milliards de m³ (Aké, 2001), sont considérables et sont actuellement exploitées pour couvrir différents besoins. Elles sont d'ailleurs pressenties pour servir d'appoint aux champs de captage du District d'Abidjan en proie à une démographie galopante avec un taux d'accroissement de 3,8% par an (INS, 2001). La qualité de cette ressource en eau souterraine est sans cesse mise à rude épreuve, à cause de la croissance des sources de pollution tant ponctuelles que diffuses. Pour prévenir les risques de pollution de l'eau souterraine, une des approches adaptées est la connaissance des zones vulnérables à la pollution. La notion de vulnérabilité à la pollution d'un aquifère est définie comme sa susceptibilité intrinsèque à la modification de la qualité et de la quantité d'eau souterraine dans l'espace et dans le temps, à cause des processus naturels et/ou de l'activité anthropique (Civita, 1994).

Les travaux déjà réalisés dans la région de Bonoua (Aké, 2001 ; Effini, 2007), concernent essentiellement la quantité, la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de cette zone. D'autres études (Jourda et al., 2007; Anoh, 2009) se sont intéressées à la protection de cette nappe en étudiant la vulnérabilité à la pollution respectivement par les méthodes DRASTIC et RICPOSTE mais à une échelle réduite. Pour mieux cerner la représentativité ou le mécanisme de la vulnérabilité à la pollution, Aké et al. (2009) se sont intéressés à une zone plus vaste en incluant un espace défini par les conditions naturelles (lagune Aby à l'Est, lagune Potou et Aghien à l'Ouest de la zone). De telles limites reflètent mieux les réalités de cette région. Cependant, aucune de ces études n'a fait cas de l'impact des activités anthropiques sur les ressources en eau souterraine de cette région. Ainsi, la présente étude inclue la méthode SI qui évalue la

vulnérabilité spécifique à la pollution aux nitrates pour mettre en évidence ces impacts. L'approche associe également l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la nappe par la méthode DRASTIC. L'objectif de cette étude est de fournir des informations utiles et nécessaires permettant d'orienter les choix des politiques de prévention et de gestion des risques de pollution des ressources en eau souterraine de cette région dans une perspective de gestion durable.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

La région de Bonoua est située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire à 60 km d'Abidjan, la capitale économique. Elle est comprise entre les latitudes 5°14'N et 5°31'N et les longitudes 3°13'W et 3°51'W (Figure 1). Cette région couvre une superficie de 2209 km² et est dominée par un relief de plaine avec des altitudes inférieures à 200 m caractéristiques du Sud de la Côte d'Ivoire (Géomines, 1982).

La région est traversée par le fleuve Comoé, les rivières Bia et la Mé (Delor et al., 1992). Toutes ces rivières débouchent sur les différentes lagunes qui servent de relais vers l'Océan atlantique.

La zone étudiée appartient au domaine de la forêt dense équatoriale qui a été modifiée par les actions anthropiques notamment le déboisement et la pratique de certaines cultures (Géomines, 1982).

Les cultures sont diverses et variées en fonction du type de sol. Ainsi, sur les sables quaternaires de la côte globalement entre la mer et les lagunes, se trouvent les cocoteraies industrielles. Sur le plateau de sables argileux du tertiaire, les cultures rencontrées concernent essentiellement les avocats, palmiers, ananas, hévéas, kolatiers, caféiers, cacaoyers et bananiers. Ces cultures sont des plantations agro-industrielles dont le développement est favorisé par la proximité de la capitale économique du pays et des voies d'exportation (Géomines, 1982).

La région de Bonoua située en majeure partie dans un bassin sédimentaire, est bien

arrosée avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1710 mm. Cette situation constitue une condition importante pour la recharge de la nappe souterraine (Banton et Bangoy, 1997).

Deux cas de figures se présentent sur le plan hydrogéologique. D'un côté, les aquifères d'altérites observés sur les schistes renferment les aquifères de fissures dans l'extrême nord. De l'autre côté, la partie sud est occupée par les aquifères du Quaternaire et du Continental Terminal. L'aquifère principal assurant l'alimentation en eau potable de la population est celui du Continental Terminal d'âge Mio-Pliocène (Tastet, 1979). C'est un aquifère libre en général et captif en certains endroits en fonction de la lithologie des terrains qui la surmontent.

L'aquifère du Quaternaire est également libre mais contient la nappe la plus vulnérable du bassin sédimentaire ivoirien. Cette nappe phréatique dont le niveau piézométrique est très proche de la surface du sol et qui inonde à chaque saison des pluies les plaines côtières (Aghui et Biémi, 1984) est de ce fait vulnérable aux polluants d'origines diverses.

Matériel

Le matériel de travail se compose de données multi sources. Il s'agit des données piézométriques issues de la campagne piézométrique réalisée en 2001 dans la région (Aké, 2001) et complétées par celles de 2004 de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH).

Des fiches techniques de forages disponibles fournies par les différentes campagnes d'approvisionnement en eau potable ainsi que celles de la Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire (SODECI) ont permis d'utiliser les données de profondeurs de forages, de niveaux piézométriques, de coupes lithologiques et d'essai de pompage. Ces données ont aidé à la réalisation des différentes cartes de vulnérabilités.

A ces données, s'ajoutent des informations cartographiques comportant la carte géologique de la région au 1/200 000 (Delor et al., 1992) et celle de l'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/500 000 fournie par les travaux de Perraud et De La Souchère (1971).

Deux types d'images ont été utilisés : L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtenue au cours d'une mission du 11 au 22 février 2000 de la navette spatiale Endeavour (STS-99), en utilisant l'interférométrie radar et fournie par le site <ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa> pour avoir une idée générale sur la morphologie de la région.

Ainsi, l'image SRTM de coordonnées N05W004 a été utilisée pour la couverture de la région de Bonoua. Son traitement a permis d'établir un modèle numérique d'altitude (MNA) de résolution 90 m et de ressortir la carte des pentes.

L'image Landsat ETM+ (2000) acquise le 2 février 2000 et provenant de la scène 195-56 fournie par le site "<http://glcf.umiacs.umd.edu>" a été utilisée pour la détermination des classes d'occupation du sol.

Le traitement de toutes ces données s'est effectué sur MapInfo 7.5 (pour les traitements cartographiques), ENVI 4.1 (pour le traitement des images satellitaires) et ArcView 3.2 (pour générer la carte des pentes et la combinaison des autres cartes thématiques).

Méthode d'évaluation de la vulnérabilité de la nappe

Deux méthodes différentes mais complémentaires ont été utilisées dans la présente étude; l'une évaluant la vulnérabilité intrinsèque (DRASTIC) et l'autre la vulnérabilité spécifique (SI).

La méthode DRASTIC est une méthode destinée à la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères.

Cette méthode a déjà fait l'objet de plusieurs applications à travers la littérature (Mohamed 2001 ; Murat et al., 2003 ; Jourda

et al., 2006 ; Kouamé, 2007). Bien que souvent modifiée (Hamza et al., 2007), elle demeure efficace quant à l'estimation de la vulnérabilité. C'est pour tester cette capacité qu'elle a été associée à la méthode SI qui constitue l'une de ces variantes.

L'application conjointe des deux méthodes a l'avantage d'assurer une certaine complémentarité dans l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe à la pollution par les nitrates. Ces différentes méthodes se présentent sous forme de système de cotation numérique, basés sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Dans le processus d'évaluation de cette vulnérabilité, quatre paramètres intéressent à la fois les deux méthodes notamment la profondeur de la nappe, la recharge efficace de l'aquifère, les types de sol et la topographie. A ces paramètres, la méthode DRASTIC associe trois autres : l'impact de la zone vadose ou l'effet de l'autoépuration de la zone vadose, la lithologie de l'aquifère et la conductivité hydraulique de l'aquifère. La méthode SI quant à elle se limite à cinq paramètres en ajoutant aux paramètres communs celui de l'occupation du sol, qui tient compte de l'impact des activités anthropiques.

Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

Bien que la méthode DRASTIC ne soit pas initialement conçue pour les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), ce modèle repose sur une analyse spatiale classique largement répandue dans les SIG. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales de sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité (Bézégues et al., 2002) : la profondeur de la nappe (D) ; la recharge efficace (R) ; les matériaux de l'aquifère (A) ; le type de sol (S) ; la topographie ou la pente (T) ; l'impact de la zone vadose ou zone aérée (I) et la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (C).

A chaque paramètre est attribuée une échelle comprenant des intervalles où une cote

est attribuée selon la particularité du milieu. Chaque paramètre a été classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. Chacun des sept paramètres a ensuite été affecté d'un facteur multiplicatif (Dp) fixe variant entre une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui le sont moins.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC notée ID a été déterminé selon l'équation (1) (Osborn et al., 1998) :

$$ID = Dc \times Dp + Rc \times Rp + Ac \times Ap + Sc \times Sp + Tc \times Tp + Ic \times Ip + Cc \times Cp \dots \dots \dots (1)$$

(Où D, R, A, S, T, I, et C sont les sept paramètres de la méthode DRASTIC, "p" étant le poids du paramètre et "c" la cote associée).

Les valeurs des poids des paramètres de la méthode DRASTIC utilisées (Tableau 1) sont celles définies par Aller et al. (1987). Les valeurs références de l'indice DRASTIC utilisées, sont celles fournies par Engel et al. (1996) et représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère. Ces valeurs varient de 23 à 226 et sont classées en quatre classes distinctes.

Evaluation de la vulnérabilité par la méthode SI

La méthode SI (Susceptibility Index) ou indice de susceptibilité est une méthode de vulnérabilité verticale spécifique, développée par Ribeiro (2000) pour tenir compte du comportement des polluants d'origine agricole, principalement les nitrates. Aux paramètres communs aux deux méthodes s'ajoute un cinquième qui est l'occupation du sol (OS). Les cotes attribuées aux quatre paramètres dans la méthode DRASTIC ont été conservées.

Le paramètre "occupation des sols" (OS) a été obtenu par le traitement de l'image Landsat ETM+ 2000. Cette image a été utilisée pour établir une classification thématique de l'occupation du sol. La classification a débuté par l'analyse visuelle des différents indices de télédétection (NDVI, BI, WI) calculés, de la composition colorée

ETM+ 4/5/7 de l'image Landsat ETM+ à l'écran suivi de l'extraction manuelle des thèmes carto-topographiques (réseau hydrographique, routes, habitat, etc.) et la délimitation des autres classes. Pour valider la nomenclature de certaines classes proposées après l'exploitation de la composition colorée et des indices de télédétection, une visite de terrain a été nécessaire. La composition colorée ETM+ 4/5/7 a permis de discriminer neuf classes d'occupation du sol. Fort de toutes ces informations, la classification dirigée de l'image Landsat ETM+ a été effectuée par l'algorithme de classification qu'est le maximum de vraisemblance. Cet algorithme est très utilisé dans les classifications supervisées et est considéré comme le plus performant des algorithmes dans la production des cartes thématiques dans le domaine de l'occupation du sol (Bonn et Rochon, 1992). Les informations recueillies ont été confrontées par la suite aux données de terrain, à la carte du couvert végétal de la zone et à la matrice de confusion.

Une amélioration de la classification par un filtre médian 3x3 a été utilisée et a permis l'élaboration de la carte d'occupation du sol de 2000 de la région de Bonoua, support indispensable participant à l'intégration des informations.

Ainsi le paramètre "occupation du sol" a subi une classification, spécifiquement celle de Corine land Cover (1993) telle que représentée au Tableau 2.

Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Ainsi, la valeur 0 correspond aux forêts et zones semi naturelles tandis que la valeur 100 est attribuée aux décharges industrielles, décharges d'ordures et aux mines.

Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs des cotes varient par conséquent de 0

à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable.

Les poids attribués aux paramètres SI varient quant à eux, de 0 à 1 selon l'importance du paramètre en termes de vulnérabilité (Tableau 2). Le calcul de l'Indice SI peut être résumé par la formule :

$$ISI = Dc \times Dp + Rc \times Rp + Ac \times Ap + Tc \times Tp + OSc \times OSp \dots \dots \dots (2)$$

Selon Ribeiro (2000), le paramètre conductivité hydraulique de l'aquifère est difficile à évaluer dans l'espace. De plus, ce dernier paramètre a été déjà pris en compte indirectement dans le paramètre lithologie de l'aquifère (A), et cela par la considération des caractéristiques granulométriques de l'aquifère. Il minimise également le rôle de la zone vadose, en se basant sur les travaux de Foster (1987) et ceux de Vrba et Zoporozec (1994), qui considèrent que les processus d'atténuation relatifs au paramètre "type de sol" sont sans grand effet sur la vulnérabilité, bien que ce paramètre soit indirectement pris en considération dans la méthode SI à travers le paramètre "occupation des sols".

En s'inspirant de la classification du Tableau 2, une autre classification qui tient compte des réalités de la région de Bonoua, a été effectuée pour adapter la méthode SI au contexte de la zone d'étude (Tableau 3).

Il a été possible d'établir une correspondance entre les classes d'indices SI et celles de degré de vulnérabilité (Tableau 4). Dans cette procédure, en s'inspirant des travaux de Jourda et al. (2007), la cote minimal qu'un paramètre est susceptible d'avoir dans le secteur étudié est 1 et la cote maximal est 23. L'équation de la conversion des indices SI en pourcentage est alors :

$$ISI = \frac{(ISli - IS\ Im\ in) \times 100}{IS\ Im\ ax - IS\ Im\ in} \dots \dots \dots (3)$$

Avec ISli = indice SI à identifier, ISimin = 1 et ISimax = 23.

En remplaçant les différentes valeurs, l'équation 3 devient :

$$ISI = \frac{(ISli - 1) \times 100}{22} \dots \dots \dots (4)$$

Validation des cartes de vulnérabilité

En général, l'élaboration d'une carte de vulnérabilité est testée et validée par des mesures sur le terrain et l'analyse des données chimiques des eaux souterraines. Plusieurs auteurs dont Mohamed (2001), Jourda et al. (2006), Hamza et al. (2007), Kouamé (2007), Aké et al. (2009), ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines.

La validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe par les méthodes DRASTIC et SI a été testée par la mesure de la pollution des teneurs en nitrates dans les eaux. Cette activité a été réalisée en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la nappe et la distribution des classes de vulnérabilité. La validation des cartes de vulnérabilité obtenues a porté sur l'analyse du taux de nitrates contenu dans les eaux souterraines de la région de Bonoua. Ces analyses d'eaux souterraines concernent 53 échantillons répartis de façon homogène sur la zone d'étude.

RESULTATS

Niveau de vulnérabilité de la nappe de Bonoua selon DRASTIC

La méthode DRASTIC a permis d'obtenir 9 classes d'indices de vulnérabilité pour la région variant de "101" (valeur minimale) à "209" (valeur maximale). Ces valeurs représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère et se situent dans la gamme des valeurs théoriques selon la classification de Engel et al. (1996).

Une seconde classification a permis de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices. Ainsi, trois degrés de vulnérabilité à la pollution ont été mis en évidence : la classe moyenne, la classe forte et la classe très forte (Figure 2).

La classe "moyenne" se rencontre dans les parties nord, en îlot au Nord-Ouest, au

Nord-Est et Centre-Est de la zone d'étude. Elle couvre le tiers (33,34 %) de la région. Cette situation s'explique par une grande majorité de niveau statique supérieure à 23 m rencontrée dans ces zones donc à un éloignement de la nappe.

Dans ces secteurs de la nappe, la zone vadose est constituée de couche de sable moyen argileux, sable argileux et même d'argile en certains endroits avec une perméabilité inférieure à $0,5 \cdot 10^{-4}$ m/s ou comprise entre $0,5 \cdot 10^{-4}$ m/s et $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ainsi, une contamination de la nappe due à une pollution superficielle est négligeable, car le polluant aura des difficultés à traverser le sable argileux.

La classe "forte" se localise dans les parties sud, ouest, nord-ouest et centre-est de la zone d'étude. Elle représente les 2/3 de la région.

Le degré fort de la vulnérabilité se justifie par le fait que dans ces zones, les niveaux statiques sont généralement compris entre 0,6 m et 11,8 m. La zone non saturée est essentiellement constituée de sable moyen argileux et de sable grossier à certains endroits, associé à des perméabilités comprises entre $5,8 \cdot 10^{-4}$ m/s et $13 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Enfin, la classe "très forte" est confinée dans l'extrême sud-est de la zone d'étude et représente moins de 1% de la zone étudiée. L'indice très fort de vulnérabilité est dû à une faible profondeur de la nappe comprise entre 0,6 m et 8 m avec une pente inférieure à 2%. La zone vadose est essentiellement constituée de sable grossier pouvant faciliter la circulation des polluants associés à des perméabilités qui oscillent entre $8,7$ et $13 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ces conditions favorisent l'infiltration de tout polluant présent à la surface. Ces deux dernières classes révèlent des vulnérabilités intrinsèques importantes qu'il faut protéger de toutes sources de pollution comme les plantations agro-industrielles d'ananas, de bananes et d'hévéas etc. présentes dans le secteur.

Niveau de vulnérabilité de la nappe de Bonoua selon SI

A Bonoua, la carte de vulnérabilité SI obtenue à l'issue du calcul des indices SI indique 9 classes qui varient de 3,23 (minimum) à 23,03 (maximum). Ces indices ont été répartis en trois degrés de vulnérabilité à la pollution (Figure 3) : très faible, élevée et très élevée.

Les classes "faible" et "moyenne" sont inexistantes sur la carte de vulnérabilité spécifique.

La classe "très faible" représente 16% de la région de Bonoua et se rencontre à l'Ouest, à l'Est et au Sud de la zone étudiée.

Dans ces zones, les paramètres intrinsèques de la nappe considérée sont favorables à une pénétration de polluant. En effet, les profondeurs d'eau ont des cotes variant de 5 à 9. La lithologie est constituée de sols hydromorphes dans les parties Ouest et Est et de sables quaternaires où les pentes sont en majorité faibles et l'état de surface est par contre dominé par les forêts denses représentant les forêts classées de "N'guechié", "Toumanguié" et "N'ganda-N'ganda". Ainsi, les activités anthropiques menées sur ces parties sont moins intenses et induisent par conséquent une vulnérabilité spécifique quasi inexistante pour le moment.

Quant à la classe "élevée", elle représente 32% de la zone majoritairement localisée au Nord-Ouest dans la zone d'Alépé. Toutefois, des îlots isolés de cette classe se rencontrent dans les parties ouest, sud-ouest, centre, sud et est de la zone d'étude.

Dans ces zones, le facteur dominant est la mosaïque de forêt culture ayant une utilisation relativement peu importante d'intrant agricole.

Enfin, la classe "très élevée" couvre 52% de la zone de Bonoua. Cette classe occupe un peu plus de la moitié de la zone et par conséquent a une répartition spatiale assez homogène sur toute l'étendue de la région avec une dominante dans les parties nord, centre et est.

Elle est caractérisée au niveau des paramètres intrinsèques par des sols sablo-argileux ou sables marins ; des pentes assez élevées. Les états de surface sont majoritairement constitués de mosaïque cultures jachères, des cultures industrielles 1 (hévéa), cultures industrielles 2 (palmier à huile) et les cultures industrielles 3 (cocoteraie) utilisatrices d'engrais. Cette classe traduit le comportement anthropique de la région orienté de plus en plus vers l'exploitation de cultures agro-industrielles. Elle est liée aux caractéristiques de la zone étudiée et reflète qualitativement la tendance des activités anthropiques locales. Elle permet de définir les sensibilités SI de la région de Bonoua en rapport avec la pollution par les nitrates. Tout comme la méthode DRASTIC l'a montré, ces zones méritent une attention particulière de protection.

Validation des cartes de vulnérabilité à la pollution

Les concentrations de nitrates contenus dans les eaux souterraines de la région de Bonoua varient de 0,4 à 24,3 mg/l (Figure 4). Ces concentrations sont inférieures à 50 mg/l (norme OMS) et révèlent 4 pôles principaux : (i) le pôle Nord-Ouest (Ahoutoué, Akouré et Memni) ; (ii) le pôle Sud-Ouest (Mondoukou et Bonoua) ; (iii) le pôle Nord (Bongo 2 et Ono village) et (iv) le pôle Sud-Est (Assinie Mafia et Adiaké). Les concentrations croissent de manière générale du Nord-Est vers les autres parties de la zone.

Les Figures 5 et 6 montrent les cartes de vulnérabilité à la pollution DRASTIC et SI associées à la répartition des quatre classes de concentrations en nitrates. Le Tableau 5 montre la répartition des valeurs de concentration en nitrates selon la méthode. Partant de ce tableau, les valeurs des concentrations en nitrates se répartissent comme suit :

En s'intéressant à la carte de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC, on se rend compte que, 31 valeurs sont comprises dans l'intervalle (0 – 6 mg/l), dont 22 (soit

70,96% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité forte et 9 (soit 29,03% de ces valeurs) avec la zone de vulnérabilité moyenne.

Sept (7) valeurs ont des concentrations comprises entre (6 – 12 mg/l) avec 5 (soit 71,42% de ces valeurs) qui coïncident avec la zone de vulnérabilité forte et 2 (soit 28,57% de ces valeurs) avec la zone de vulnérabilité moyenne. Quatorze (14) valeurs ont des concentrations oscillant entre (12 – 18 mg/l) dont 1 (soit 7,14% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité moyenne et 13 (soit 92,85% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité forte.

Une valeur (23,8 mg/l) est comprise entre (18-24 mg/l) soit 100% et coïncident avec la zone de vulnérabilité moyenne. Il n'y a pas de valeur de nitrates qui coïncide avec la zone de vulnérabilité forte.

On observe pour la carte de vulnérabilité spécifique SI que, parmi les 31 valeurs comprises dans l'intervalle (0 – 6 mg/l) 3, (soit 9,67% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité très faible ; 5, (soit 16,12% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité élevée et 23 (soit 74,19% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité très élevée. Parmi les dix valeurs comprises entre 6 – 12 mg/l, une (soit 10% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité élevée et neuf (soit 90% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité très élevée.

Onze valeurs de nitrates sont comprises entre 12-18 mg/l et une (soit 9,09% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité très faible et dix (soit 90,90% de ces valeurs) coïncident avec la zone de vulnérabilité très élevée. Une seule valeur (23,8 mg/l) de nitrate est située dans l'intervalle 18–24 mg/l, soit un taux de coïncidence de 100% avec la zone de vulnérabilité très élevée.

Lorsqu'on analyse en détails les taux de coïncidence globaux, on remarque que la carte de vulnérabilité DRASTIC montre un taux de coïncidence de 77,35% (41 valeurs sur 53),

répartie comme suit : un taux de coïncidence de 70,96% entre les concentrations de nitrates comprises entre (0 – 6 mg/l) et les zones à vulnérabilité forte, une coïncidence de 71,42% entre les concentrations de nitrates comprises entre (6 – 12 mg/l) et les zones à vulnérabilité forte, une autre coïncidence de 92,85% entre les concentrations de nitrates comprises entre (12 – 18 mg/l) et les zones de vulnérabilité forte et enfin un taux de coïncidence de 100% entre les concentrations de nitrates comprises entre (18 – 24 mg/l) et les zones de vulnérabilité moyenne.

La carte de vulnérabilité SI indique quant à elle un taux de coïncidence de 81,13% (43 valeurs sur 53) répartie comme suit : un taux de coïncidence de 74,19% entre les concentrations en nitrates comprises entre (0 – 6 mg/l) et les zones à vulnérabilité très élevée, un taux de coïncidence de 90% entre les concentrations en nitrates comprises entre (6 – 12 mg/l) et les zones à vulnérabilité très élevée, un taux de coïncidence de 90,9% entre les concentrations en nitrates comprises entre (12 – 18 mg/l) et les zones de vulnérabilité très élevée et un taux de coïncidence de 100% entre les concentrations en nitrates comprises entre (18 – 24 mg/l) et les zones de vulnérabilité très élevée.

Ce taux de coïncidence élevé relatif à la méthode SI peut être expliqué par le fait que cette dernière est spécifique de la pollution agricole et qu'elle a été conçue en prenant en compte les propriétés chimiques des nitrates, ainsi que les relations qui existent entre ce polluant et les divers composants déjà considérés dans la vulnérabilité intrinsèque. La méthode DRASTIC quant à elle, est une méthode de vulnérabilité intrinsèque qui ne tient compte, ni de la nature des polluants, ni des facteurs régissant la vulnérabilité spécifique, telle que l'occupation des sols. Toutefois, les taux de coïncidence sont satisfaisants pour les deux méthodes utilisées avec au moins 75% et prouvent leur efficacité à cartographier la vulnérabilité à la pollution. Cependant, la méthode SI évalue mieux la vulnérabilité par les nitrates.

Tableau 1 : Poids des paramètres et des indices de vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987 ; Engel et al., 1996).

Paramètres	Version DRASTIC	Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
D : profondeur du plan d'eau	5	Faible	< 101
R : recharge efficace	4	Moyen	101 – 140
A : matériaux de l'aquifère	3	Forte	141 – 200
S : type de sol	2	Très forte	> 200
T : pente du terrain	1		
I : impact de la zone non saturée	5		
C : conductivité hydraulique	3		

Tableau 2 : Classification de l'occupation des sols selon Corine land Cover (1993) et poids des paramètres (SI).

Classes d'occupation des sols	Valeur du facteur (LU)				
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100				
Périmètres irrigués, rizières, cultures annuelles irriguées et non irriguées	90				
Carrière, chantier naval	80				
Zones artificielles couvertes, zones vertes, zones urbaines continues	75				
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)	70				
Zones urbaines discontinues	70				
Pâturages et zones agro-forestières	50				
Milieux aquatiques (marais, salines, etc.)	50				
Forêts et zones semi-naturelles	0				
Paramètres	D	R	A	T	OS
Poids	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222

Tableau 3 : Classes et notes attribuées aux classes d'occupation du sol SI de la région de Bonoua.

Classes d'occupation des sols	Valeur du facteur (LU) modifié
Cultures permanentes 1 (<i>Café, Cacao, Hévéa et Palmier</i>)	70
Cultures permanentes 2 (<i>Cultures et / ou jachères</i>)	60
Cultures permanentes 3 (<i>cultures indus.3, cocoteraie</i>)	50
Zones urbaines discontinues (<i>Sols nus et zones urbaines</i>)	70
Milieux aquatiques (<i>marais, salines, etc.</i>) (<i>Eau</i>)	50
Pâturages et zones agro-forestières (<i>Mosaïque forêt culture</i>)	50
Forêts et zones semi-naturelles (<i>Forêt dense</i>)	0

Tableau 4 : Indices SI et degré de vulnérabilité (Jourda et al., 2007).

Indice SI	Degré de vulnérabilité
0 – 30 %	Très Faible
30 – 45 %	Faible
45 – 60 %	Moyenne
60 – 75 %	Elevée
75 – 100 %	Très Elevée

Tableau 5 : Coïncidence entre les concentrations en nitrates et les différentes classes de vulnérabilité des méthodes DRASTIC et SI.

	Degré de Vulnérabilité	Nombre de valeurs de NO ₃ ⁻ [18-24] mg/l	Nombre de valeurs de NO ₃ ⁻ [12-18] mg/l	Nombre de valeurs de NO ₃ ⁻ [6-12] mg/l	Nombre de valeurs de NO ₃ ⁻ [0-6] mg/l
Carte de vulnérabilité DRASTIC	Très forte	0	0	0	0
	Forte	0	13	5	22
	Moyenne	1	1	2	9
Total		1	14	7	31
Carte de vulnérabilité SI	Très élevée	1	10	9	23
	Elevée	0	0	1	5
	Très faible	0	1	0	3
Total		1	11	10	31

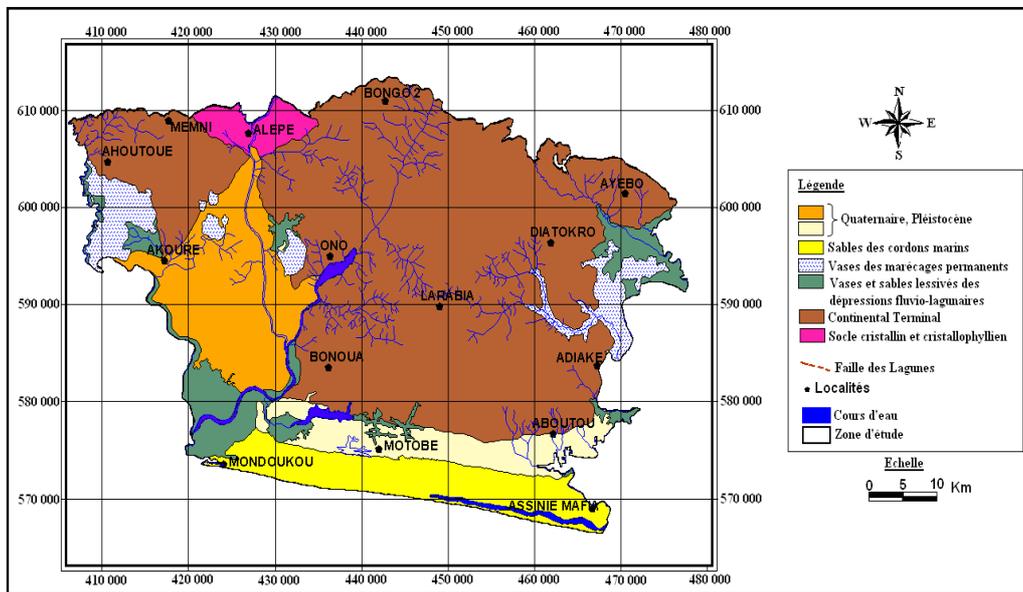


Figure 1 : Carte géologique de la région de Bonoua extraite de la carte géologique du degré carré de Grand Bassam au 1/200 000 (Delor et al., 1992).

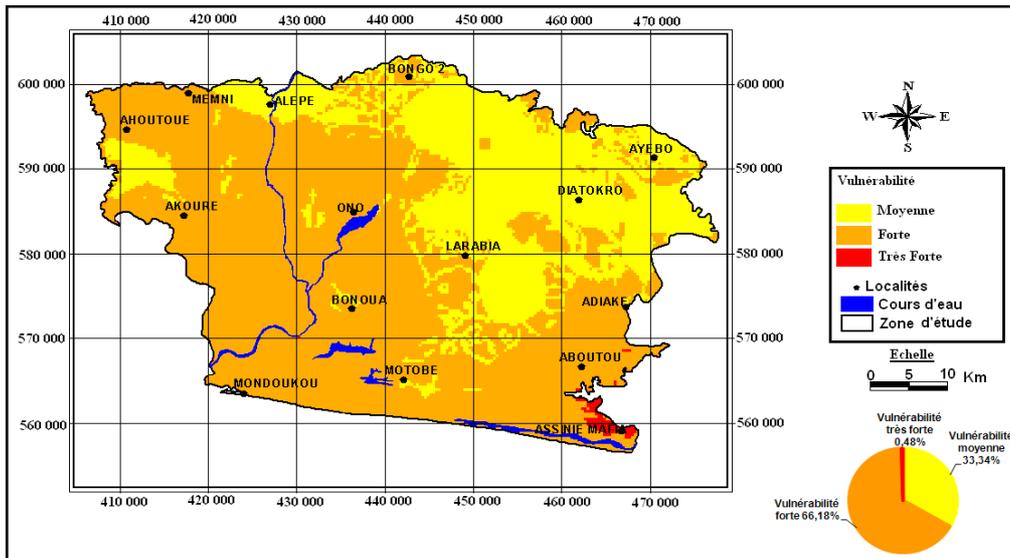


Figure 2 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Bonoua par la méthode DRASTIC.

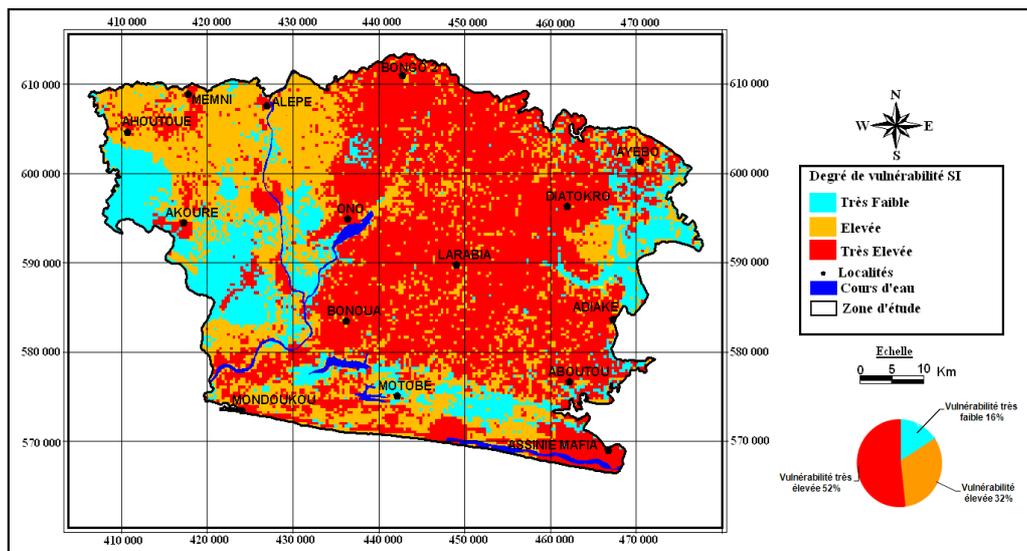


Figure 3 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Bonoua par la méthode SI.

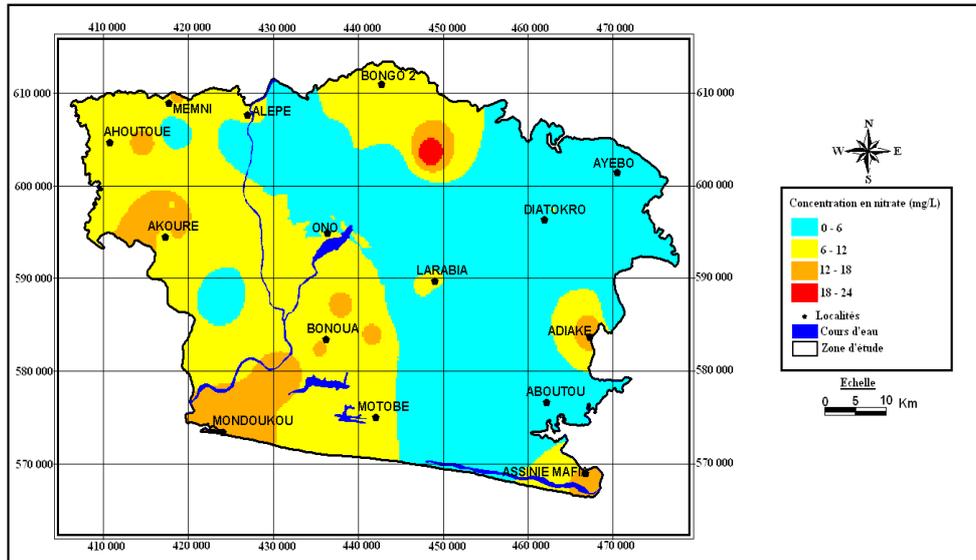


Figure 4 : Répartition spatiale des concentrations en nitrates des eaux souterraines de la région de Bonoua.

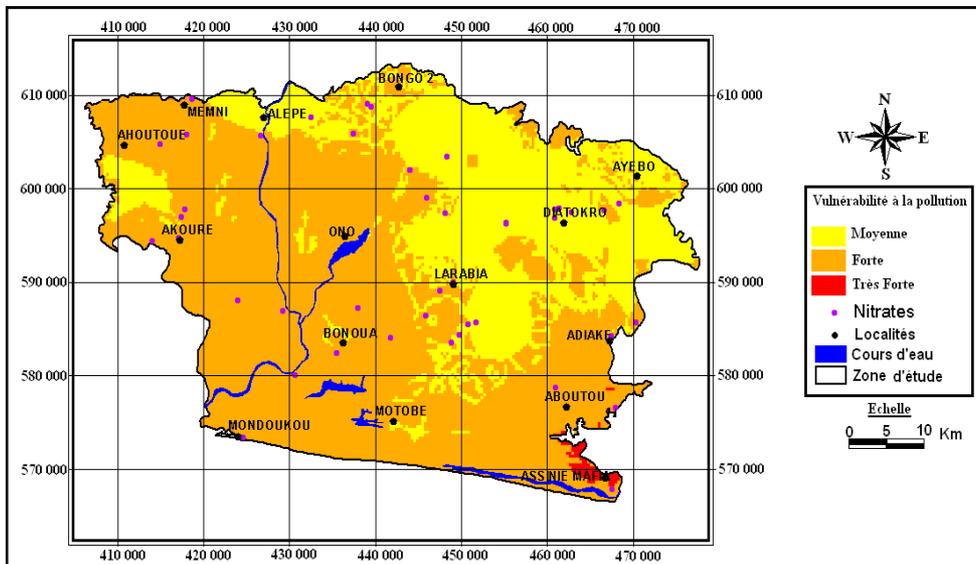


Figure 5 : Répartition spatiale des concentrations en nitrates des eaux souterraines de la région de Bonoua et vulnérabilité à la pollution par la méthode DRATIC.

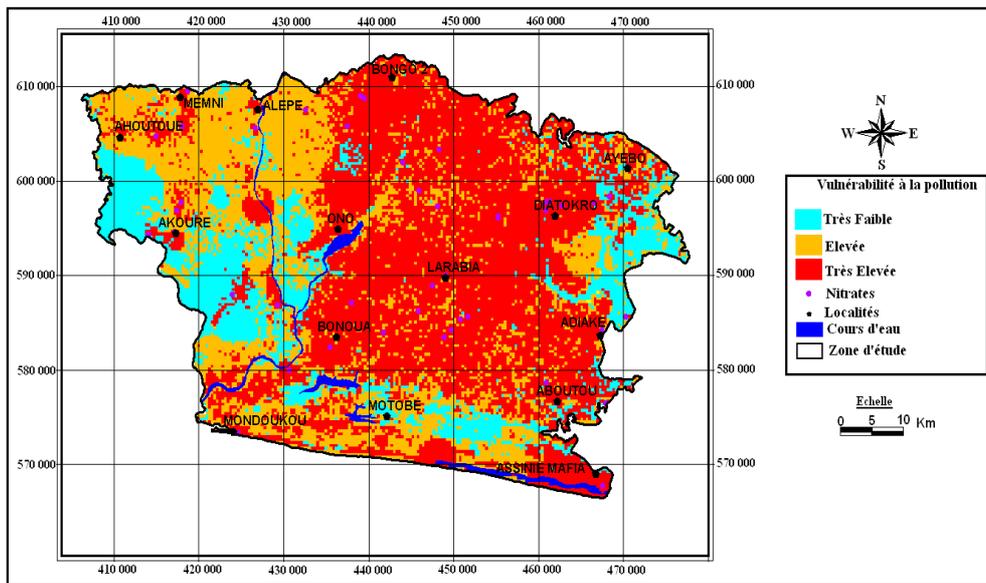


Figure 6 : Répartition spatiale des concentrations en nitrates des eaux souterraines de la région de Bonoua et vulnérabilité à la pollution par la méthode SI.

DISCUSSION

L'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe de Bonoua indique des risques potentiels de contamination. Cette information est révélée différemment par les deux méthodes utilisées.

En effet, la méthode DRASTIC a montré que la région reste dominée par la classe de forte vulnérabilité qui occupe 66,18% de la zone étudiée.

Cette proportion en terme de vulnérabilité révélée dans le cadre de cette étude reste tout de même inférieure à celle mise en évidence par Jourda et al. (2007) qui ont signalé l'importance de la vulnérabilité élevée dans la région et singulièrement dans la ville de Bonoua et ses environs avec 76,76%.

La réalisation des cartes de vulnérabilité par les deux méthodes nécessite l'utilisation de paramètres suivant un processus d'interpolation dont la fiabilité dépend des données utilisées pour leur réalisation.

L'interpolation utilisée pourrait entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimitées par les données ponctuelles (Jourda et al., 2006). Une autre difficulté de l'application de la méthode DRASTIC est également les limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres.

En effet, les limites des classes standard ne correspondent pas souvent à la réalité de la zone étudiée car, ces classes peuvent toujours regrouper en leur sein des entités différentes (Lobo-Ferreira et al, 2003). Les limites des différentes classes ne sont donc pas des valeurs absolues, mais plutôt des valeurs relatives (Jourda et al., 2006). Elles peuvent alors varier d'une étude à une autre et d'une région à une autre.

Toutes ces difficultés soulevées dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution par cette méthode intrinsèque, révèlent des résultats interprétables et

satisfaisants à même de donner une idée du niveau de pollution.

Plusieurs travaux réalisés dans différents contextes ont vérifié et soutenus cette conclusion (Murat, 2000 ; Murat et al., 2003 ; Kouamé, 2007).

En ce qui concerne la cartographie de la vulnérabilité à la pollution par la méthode SI, les indices calculés varient de 3,23 (minimum) à 23,03 (maximum) et sont loin des classes SI définies par Ribeiro (2000). Cette situation pourrait s'expliquer par l'adaptation faite sur les paramètres prenant en compte les réalités locales propres au contexte de Bonoua.

En effet, les classes : décharge industrielle, décharge d'ordures, mines ; périmètre irrigué, rizières, cultures annuelles irriguées et non irriguées ; carrières, chantier naval et les zones artificielles couvertes, zones vertes, zones urbaines continues n'ont de correspondance pour le moment dans la région de Bonoua. Or, ces classes ont les cotes LU les plus élevées car variant de 100 à 75 et l'adaptation qui a été faite avec les réalités de la région de Bonoua ne permet pas d'avoir la gamme des classes de Ribeiro. Par conséquent, la conversion des indices SI en pourcentage selon Jourda et al. (2007) a permis d'obtenir trois (3) classes de vulnérabilité SI qu'il convient de relativiser : très faible (16%) ; élevée (32%) et très élevée (52%).

Cette vulnérabilité par la méthode SI associe 4 paramètres intrinsèques de la nappe de Bonoua et un paramètre extrinsèque : l'occupation du sol, qui rend compte de l'impact des activités anthropiques qui constituent une réelle menace pour la zone d'étude.

La combinaison de ces différents paramètres (intrinsèques et extrinsèques) exprime ainsi l'orientation actuelle des activités anthropiques menées dans la région dominées par l'agriculture et reflète qualitativement la réalité du terrain. En effet, ces zones sont majoritairement occupées par

les cultures agro-industrielles (ananas, hévéa, banane, palmier à huile etc.) de la région.

Le taux de coïncidence entre les concentrations en nitrates disponibles des eaux de la nappe et les différentes classes de vulnérabilité établies est de 81,13% avec la méthode SI contre 77,35% avec la méthode DRASTIC. Ces taux de coïncidence sont satisfaisants pour les deux méthodes utilisées. Cependant, la méthode spécifique SI évalue mieux la vulnérabilité par les nitrates.

Plusieurs travaux abordant le sujet ont abouti à des résultats similaires. En effet, les études de Frances et al. (2002), Batista (2004), Lobo et Oliveira (2004), Stigter et al. (2006), Hamza et al. (2007) et Aké (2010) ont montré que la vulnérabilité par les nitrates est mieux exprimée par la méthode de vulnérabilité spécifique SI.

Dans tous les cas, les zones réellement contaminées correspondent à celles où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés.

Toutefois, une zone vulnérable peut également avoir un faible indice de vulnérabilité du fait que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuelle, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle, si rien n'est entrepris pour les protéger (Kouamé, 2007). Les zones de forte vulnérabilité (Bongo, Ono, Bonoua, Adiaké, etc.) mises en évidence dans cette étude méritent par conséquent une attention particulière de protection. Par ailleurs, les résultats de la validation des cartes de vulnérabilité établies pourraient être plus représentatifs si un nombre plus important de mesures de nitrates bien réparties sur toute l'étendue de la région de Bonoua était effectué, ce qui nécessiterait une nouvelle campagne de mesures dans les eaux de la nappe.

Conclusion

L'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates de la nappe de Bonoua a permis de mettre en évidence aussi bien trois grandes classes de vulnérabilité

(moyenne, forte et très forte) par la méthode DRASTIC que par la méthode SI (très faible, élevée et très élevée).

Le risque de contamination de la nappe de Bonoua est important puisque la vulnérabilité à la pollution par les nitrates est dominée par les classes "forte" et "très élevée" mise en évidence par les deux méthodes. Ces classes occupent les proportions respectives de 68,18% pour la méthode DRASTIC et 52% pour la méthode SI.

Le taux de coïncidence entre les concentrations en nitrates disponibles des eaux de la nappe et les différentes classes de vulnérabilité établies est de 81,13% avec la méthode SI contre 77,35% par la méthode DRASTIC. Ces taux de coïncidence sont satisfaisants pour les deux méthodes utilisées. Cependant, la méthode spécifique SI évalue mieux la vulnérabilité par les nitrates.

Les cartes de vulnérabilité établies par les deux méthodes constituent une importante source d'informations indispensable en ce sens qu'elles permettent de se faire une idée assez précise sur les zones sensibles à la pollution de cette région en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

Au demeurant, les eaux souterraines de cette nappe sont exemptes de pollution car les teneurs actuelles des concentrations en nitrates ne sont pas alarmantes comparées aux normes en vigueur.

REFERENCES

- Aghui N, Biemi J. 1984. Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination. *Ann. Univ. Nat. de Côte d'Ivoire*, série C (sciences), **20** : 313-347.
- Ake GE. 2001. Evaluation des ressources en eau souterraine de la région de Bonoua. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Cocody, p.72.
- Ake GE, Dongo K, Kouadio BH, Dibi B, Saley MB, 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*, **31**(1): 157-171.
- Ake GE. 2010. Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Cocody, p.200.
- Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RJ, Hackett G. 1987. DRASTIC: A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency Report, (EPA/600/2-87/035).
- Anoh KA. 2009. Évaluation de la vulnérabilité spécifique aux intrants agricoles des eaux souterraines de la région de Bonoua. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Cocody, p.68.
- Batista S. 2004. Exposição da água subterrânea a pesticidas e nitratos em ecossistemas agrícolas do Ribatejo e Oeste e da Beira Litoral. Tese de doutoramento em engenharia agrónomica, Instituto superior de agronomia, Lisboa, p.19.
- Bezelgues S, Des Garets E, Mardhel V, Dörfliger N. 2002. Cartographie de la vulnérabilité de Grand-Terre et de Marie-Galatie (Guadeloupe). Phase 1 : Méthodologie de détermination de la vulnérabilité.
- Bonn F, Rochon G. 1992. *Précis de Télédétection, Principe et Méthode*, (vol. 1). Presse Univ. du Québec, AUPELF-UREF.
- Civita M. 1994. *La Carte Della Vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento: Teoria e Pratica*. PITAGORA (Editeurs): Bologna.
- Corine land cover. 1993. European Community, Guide technique. Office des publications Officielles des Communautés Européennes. Série

- environnement, sécurité nucléaire et protection civile, Bruxelles.
- Delor C, Diaby I, Simeon Y, Yao B, Tastet JP, Vidal M, Chiron JC, Dommanget A. 1992. Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200 000. Feuille de Grand-Bassam. Mémoire de la Géologie de Côte d'Ivoire, n°4, Abidjan.
- Effini AT. 2007. Evaluation de la qualité chimique et bactériologique de la nappe de Bonoua et contribution à la protection de la nappe. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Cocody, p.73.
- Engel BA, Navulur KCS, Cooper BS, Hahn L. 1996. Estimating groundwater vulnerability to non point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale, *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publi.*, **235**: 521-526.
- Frances A, Paralta E, Fernandes J, Ribeiro L. 2002. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index, FGR'01, Third Int. Conf. on Future Groundwater Resources at Risk CVRM publ., Lisbon, 35-44.
- Foster SSD. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In *Vulnerability of Soil and Grandwater to Pollutants*, W van Duijvenbooden, HG van Waegeningh (Eds). TNO Committee on Hydrological Research: The Hague, The Netherlands; 69-86.
- Geomines. 1982. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Grand-Bassam, cahier n°31, annexe 1.
- Hamza MH, Added A, Frances A, Rodriguez 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). *Geoscience*, **339**: 493-505.
- Ins. 2001. Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 1998. Données socio-démographiques et économiques des localités. Résultats définitifs par localités, région des lagunes, vol. III, tome 1.
- Jourda JP, Saley MB, Djagoua EV, Kouame KJ, Biemi J, Razack M. 2006. 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. *Revue de Télédétection*, **5**(4): 339-357.
- Jourda JP, Kouame KJ, Adja MG, Deh SK, Anani AT, Effini AT, Biemi J. 2007. Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Actes de la Conférence Francophone. SIG 2007/ 10 au 11 Octobre 2007, Versailles-France, 11p. www.esrifrance.fr/SIG2007/Cocody_Jourda.htm.
- Kouame 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, Université de Cocody, Cocody, p.250.
- Lobo-Ferreira JP, Novo EM, Oliveira MM. 2003. Groundwater vulnerability mapping: Application to the Minho watershed in Northern Portugal's Celtic Region. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon.
- Lobo F, Oliveira M. 2004. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofis. Int.*, **43**(4): 541-550.
- Mema. 2001. Recensement national de l'agriculture, analyse des données, niveau national. Direction des Statistiques, de la Documentation et de l'Informatique.
- 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. 2000. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont LAURENTIEN. Mémoire de maîtrise, INRS – Géosciences, Québec, p.127.
- Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, Lefebvre R, Martel R. 2003. Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : Evaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources Naturelles Canada, Commission Géologique.
- Osborn NI, Eckenstein E, Koon KQ. 1998. Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma. Oklahoma Water Resources Boards, Technical Report.
- Perraud A, De La Souchere P. 1971. Carte de l'Esquisse Pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500 000, (feuille Sud-Est, Ministère de l'Agriculture).
- Ribeiro L. 2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação, Nota interna, ERSHA-CVRM.
- Stigter TY, Ribeiro L, Carvalho DAM. 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeol. J.*, **14**(1-2): 79-99.
- Tastet JP. 1979. Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du Littoral du Golfe de Guinée. (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, n°621, Bordeaux, p.181.
- Vrba J, Zoporozec A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability, IAH International Contribution for Hydrogeology. Int. Assoc. Hydrol. : Hannover.