

Evaluation de la vulnérabilité de la nappe libre de la zone des Niayes (Sénégal) par les méthodes DRASTIC, SINTACS et Index de Susceptibilité (SI)

[Assessment of Groundwater Vulnerability by DRASTIC, SINTACS and Susceptibility Index (SI) Methods in the Niayes Area, Senegal]

Pape Babacar Diop Thioune¹⁻³, Saïdou NDAO¹⁻², Mahécor Diouf¹, Mamadou Salif Diallo¹, Abdoulaye Diédhiou¹⁻², and El Hadji Bamba DIAW¹

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE), Ecole Polytechnique de Thiès BPA 10 Thiès, Sénégal

²Ecole Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, corniche Ouest BP 5085 Dakar-Fann, Sénégal

³Université de Thiès, Institut Supérieur Formation Agricole et Rural (ISFAR) BP 54, Bambey, Sénégal

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The Niayes area is home to the Quaternary sands of the northern Senegalese coastline. It offers economic potentialities such as it attracts industry and farmer. Thus, the pressures of anthropogenic origins combined with pejorative climatic conditions, expose it to environmental and social risks, to the extent that the vulnerability of groundwater to pollution calls on researchers and decision-makers. The study presented in this article aims to assess the level of groundwater vulnerability to pollution, using three methods: DRASTIC, SINTACS and SI. The Arc Gis software was used. The parameters used as input data include hydraulic conductivity, static groundwater level, soil type, topographic slope and recharge. Several degrees of vulnerability are identified from south to north ranging from "low" to "high". It is noteworthy that the further away from the coast, the lower the vulnerability and the overall vulnerability of the area, with high-vulnerability areas. To validate our results, we have superimposed a map of nitrate concentration with those of the vulnerabilities to see the most suitable method with this type of pollutant. Comparison of the different results makes it possible to deduce that the SI method is the most appropriate for the assessment of the vulnerability to nitrate pollution, with a 70% coincidence rate between the nitrate concentrations and the different classes of vulnerability.

KEYWORDS: Niayes, coastline, groundwater, vulnerability, pollution, SINTACS, DRATIC, SI.

RÉSUMÉ: La zone des Niayes abrite la nappe des sables quaternaires du littoral nord sénégalais. Elle offre des potentialités économiques telles qu'elle attire industriel et agriculteur. Ainsi, les pressions d'origines anthropiques conjuguées à des conditions climatologiques péjoratives, l'exposent à des risques environnementaux et sociaux, à tel enseigne que la vulnérabilité des eaux de la nappe à la pollution interpelle chercheurs et décideurs. L'étude présentée dans cet article a pour but d'évaluer le niveau de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution à l'aide de trois méthodes : DRASTIC, SINTACS et SI. Le logiciel Arc Gis a permis de faire la cartographie. Les paramètres utilisés comme données d'entrée sont, la conductivité hydraulique, le niveau statique de la nappe, le type de sol, la pente topographique et la recharge. Plusieurs degrés de vulnérabilité sont identifiés du sud au nord allant de « faible » à « élevé ». On note que plus on s'éloigne de la cote, plus la vulnérabilité diminue et que dans l'ensemble, la zone est moyennement vulnérable avec cependant des secteurs à vulnérabilité élevée. Pour valider nos résultats, nous avons superposé une carte de concentration mesurée des nitrates avec celles des vulnérabilités pour voir la méthode la plus adéquate avec ce type de polluant. La comparaison des résultats permet de déduire que la méthode SI est la plus adéquate pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates, avec un taux de coïncidence de 70% entre les concentrations en nitrates et les différentes classes de vulnérabilité.

MOTS-CLEFS: Niayes, littoral, nappe, vulnérabilité, pollution, SINTACS, DRASTIC, SI.

1 INTRODUCTION

L'hydrogéologie du Sénégal se compose de trois (3) grands systèmes aquifères dont le Complexe terminal qui regroupe les nappes moins profondes du continental terminal et du quaternaire qui se superposent. La nappe la plus superficielle dénommée nappe des sables quaternaires du littoral nord, s'étend de Dakar à Saint Louis le long de la cote. Cette région appelée zone des Niayes, riche en ressources naturelles (halieutique, pédologique, géologique et hydrogéologique) présente sur le plan économique, des atouts privilégiés qui l'exposent à des pressions notamment sur ses ressources naturelles et son environnement. En effet, cette zone jadis peu peuplée, attire de plus en plus industriel, agriculteur, pêcheur, touriste et immobilier dont les actions conjuguées perturbent l'écosystème (NDAO, 2012). Cette perturbation s'accroît avec les changements climatiques ou ses effets négatifs qui peuvent fragiliser le littoral, compte tenu de son degré de vulnérabilité.

La détérioration des conditions climatiques notée ces dernières années se manifeste d'une part par une augmentation des températures et par conséquent des besoins en eau des cultures croissant et d'autre part, une diminution de la pluviométrie pouvant entraîner, une diminution de la recharge, une baisse de la piézométrie, une surexploitation et une avancée du biseau salé (MALOU, 2004). Par ailleurs, l'urbanisation galopante de la zone s'accompagne d'actions anthropiques qui se manifestent par une exploitation abusive des sables marins et de la végétation ; accélérant ainsi le processus d'érosion côtière (NDAO, 2012). Ces effets négatifs posent la problématique de la vulnérabilité de la zone face aux changements climatiques et aux actions anthropiques. Dans cet article nous nous interrogeons sur le degré de vulnérabilité des ressources en eaux souterraines du littoral nord qui mérite une réflexion plus poussée pour une meilleure adaptation face aux différentes menaces pouvant impacter les secteurs de l'eau, de l'agriculture et de l'environnement.

Dans ce travail, la vulnérabilité de la nappe a été étudiée avec trois méthodes DRASTIC, SINTACS et SI. Les cartes de vulnérabilité produites grâce au logiciel Arc Gis ont permis de déterminer différentes classes de vulnérabilité sur la zone. Les paramètres hydrogéologiques nécessaires comme données d'entrée sont issus de la base de données de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE) du Sénégal.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone des Niayes s'inscrit administrativement dans les quatre régions bordant la frange maritime du nord du Sénégal notamment Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis (figure 1). Elle s'étend sur une longueur d'environ 180 Km et sur une largeur de 20 à 30 Km en fonction des études (DIAW et al. 2016 ; NDAO, 2012). La figure 1 présente la zone avec les principales communes concernées.

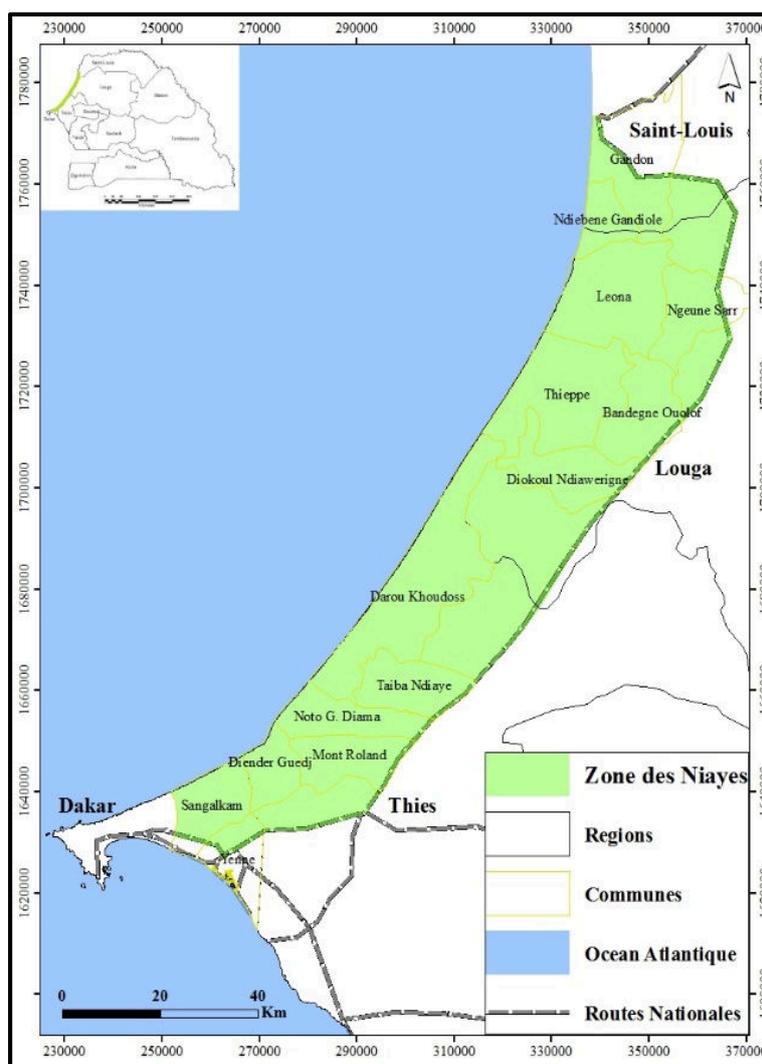


Fig. 1. Carte de la zone des Niayes

Avec la décentralisation, plusieurs communes se sont érigées sur cette bande côtière. Il s'agit de Sangalkam, Diender, Bayakh, Kayar, Notto Gouye Diama, Mboro, Darou Khoudos, Gandon, Léona et Thiéppe toutes à vocation agricole. Les « Niayes » sont des dépressions inter-dunaires fermées à nappe phréatique affleurante ou sub-affleurante et sont caractérisées par une succession de dunes et de dépressions. La zone des Niayes comprend plusieurs unités écologiques et renferme des ressources biologiques et minières très importantes dont l'exploitation mérite une attention particulière.

2.1.1 LE CLIMAT

La zone est située en grande parties dans la zone climatique sahélo-soudanienne. Elle est soumise à l'influence des trois vents : l'alizé, l'harmattan, vent chaud et sec et la mousson. Ces vents ont une vitesse moyenne entre Dakar et Saint-Louis de 2 à 5 m/s. Cette vitesse, relativement élevée, rend ces vents responsables de la mise en place et de la mobilité du système des dunes littorales (dunes blanches). Les températures moyennes annuelles se situent entre 23 et 25°C.

2.1.2 LE RELIEF ET LES SOLS

En observant la zone, trois sous zones se dégagent du nord au sud : la frange maritime, la zone intermédiaire appelée Niayes et la zone continentale. En effet une coupe transversale du littoral nord en plusieurs endroits distingue nettement ces trois parties aux caractéristiques distinctes comme l'illustre la figure 2.

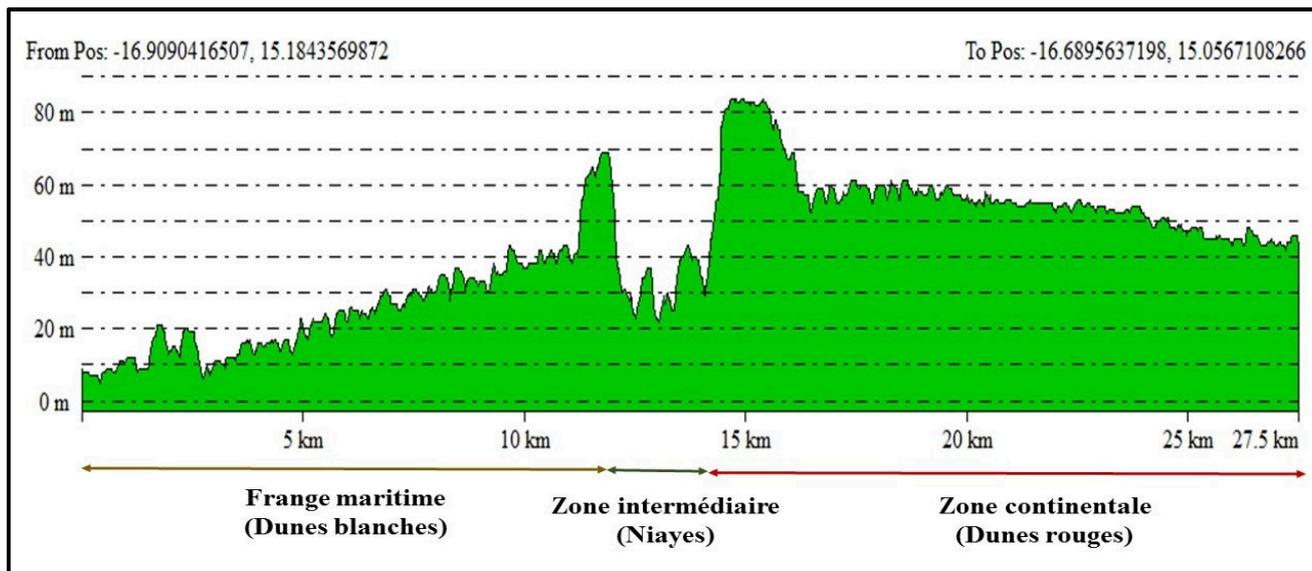


Fig. 2. Coupe transversale de la zone d'étude

Google earth

De nos jours, les vents ont beaucoup rasé les sommets de dunes favorisant ainsi le remblayage des cuvettes.

La zone intermédiaire ou Niayes s'identifie aux sols hydromorphes constitués des sols noirs sableux humifères. C'est une zone de dépressions à mares permanentes ou temporaires. On y retrouve les cuvettes maraîchères et de nombreux bas-fonds. Sur les pentes dunaires, on retrouve essentiellement des plans d'euphorbes qui fixent le sol.

2.1.3 PLUVIOMÉTRIE

Des études récentes ont montré que la pluviométrie a globalement baissé de 35 % en quantité avec une diminution de la durée de la période pluvieuse et une baisse de la fréquence des jours de pluie entre la période 1950-1965 et la période 1970-1995 (Diagne, 2000). En effet dans la zone des Niayes, la pluviométrie a beaucoup diminué comparée aux années humides qu'a connues le Sénégal. Par ailleurs, elle reste variable à tout point de vue comme c'est visible sur les figures 3 et 4.

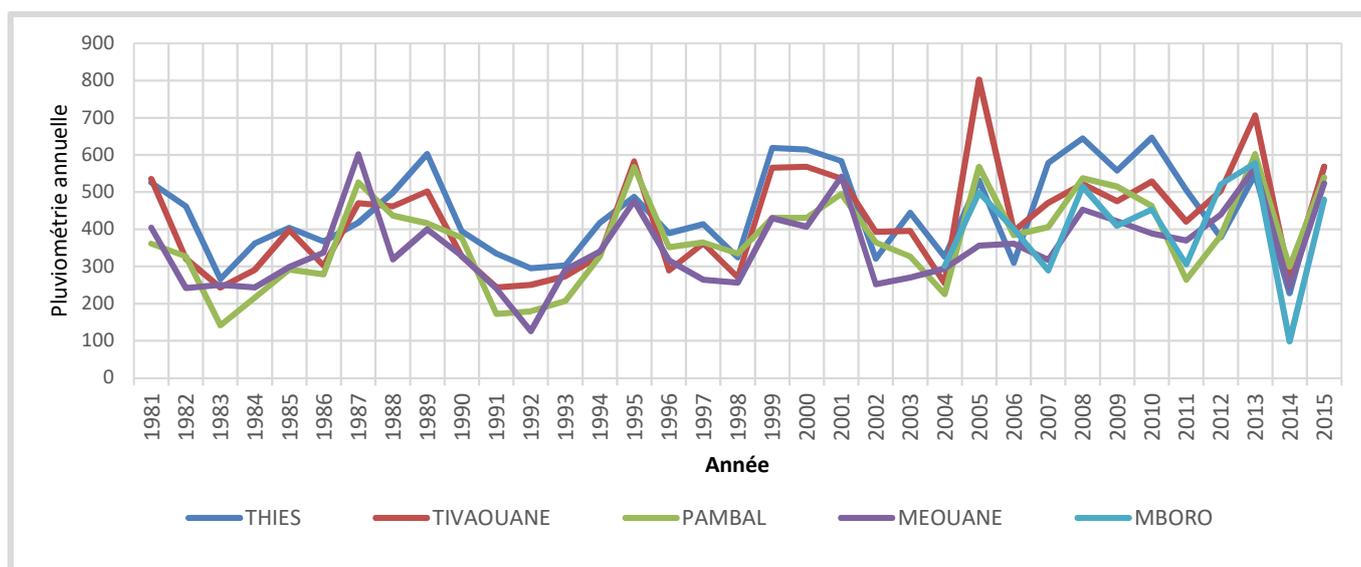


Fig. 3. Pluviométrie moyenne annuelle dans différentes communes de la zone

La figure 3 illustre assez bien la variabilité pluviométrique qui règne dans les différentes communes de la zone des Niayes à l'instar de presque tous les pays sahéliens.

Par ailleurs, le nombre de jour de pluie est très variable comme l'illustre la figure 4 dans plusieurs localités. Le nombre de jour pluvieux est de trente (30) jour en moyenne.

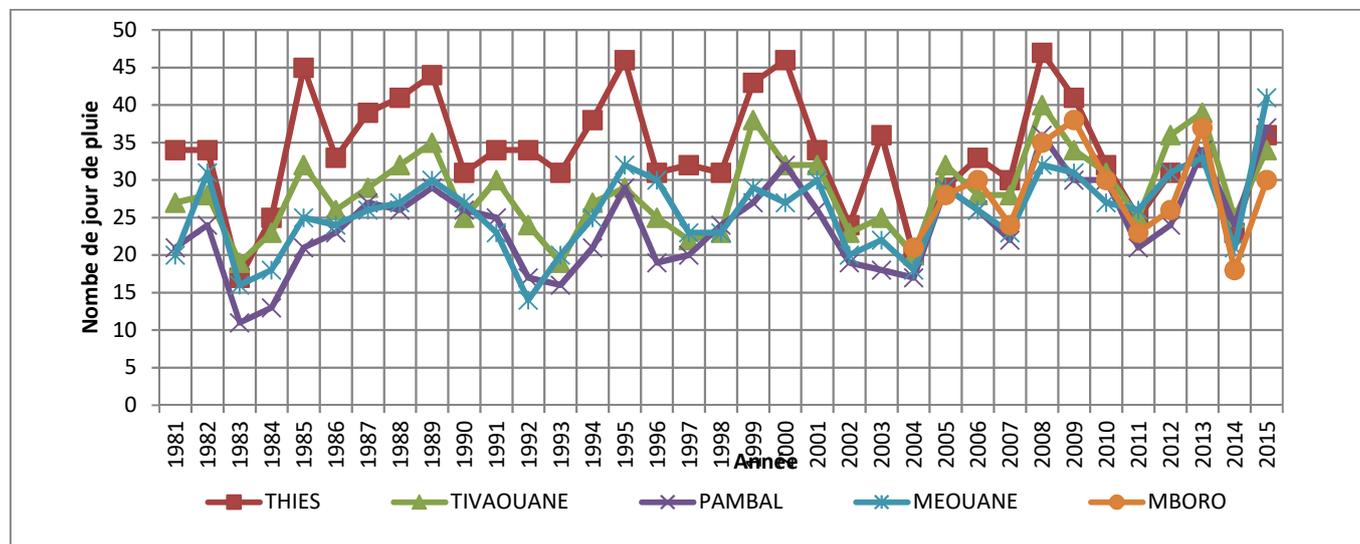


Fig. 4. Variation des jours pluvieux dans quelques localités de la zone des Niayes

2.1.4 ACTIONS ANTHROPIQUES

Durant ces trente dernières années, les terroirs du littoral Nord ont connu de profondes transformations sur les ressources naturelles et les différents écosystèmes. Ces mutations causées par d'intenses phénomènes d'érosion éolienne conjugués aux mouvements des dunes vives maritimes et semi-continentales ont fortement réduit le potentiel agricole des cuvettes qui fournissent l'essentiel de la production maraîchère au Sénégal (Direction de l'horticulture, 2012). Des sols et des puits maraîchers ou « céanes » se sont salinisés suite à la baisse des nappes phréatiques du fait du déficit pluviométrique qui s'est installé dans toute la zone depuis plus de trois décennies et de l'action anthropique sur les ressources naturelles (déboisement, extension des mines et carrières, augmentation des prélèvements d'eau dans la nappe). Depuis 2012, conscient de l'importance de cette zone dans l'économie du pays, le gouvernement du Sénégal, avec l'appui de l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI), a élaboré un Schéma Directeur d'Aménagement de la Grande Côte (SDAGC) qui inclut notre zone d'étude (Direction de l'horticulture, 2013). Cette opportunité a permis la mise en place d'un vaste Programme d'Aménagement et de Développement Economique des Niayes (PADEN) qui est toujours en cours. Son objectif global est de contribuer à la réduction de la pauvreté des populations.

2.2 METHODOLOGIE

Cette évaluation de la vulnérabilité se focalise principalement sur les ressources en eaux souterraines de la nappe du littoral nord. La méthodologie utilisée combine trois méthodes : DRASTIC, SINTACS ET SI.

2.2.1 PRINCIPE DE LA MÉTHODE DRASTIC

Elle a été mise au point par l'EPA (Environment Protection Agency) au Etats Unis en 1985 et Aller et al en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (schnebelen et al, 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept (7) critères :

- D : Profondeur de la nappe. Il correspond au niveau statique dans le cadre d'une nappe libre ;
- R : Recharge de la nappe ;
- A : nature de l'aquifère ;
- S : nature du sol ;
- T : Topographie du terrain ;

I : Impact de la zone non saturée ;

C : Conductivité hydraulique (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec une note (ou index) noté n, allant de 1 à 5.

Un facteur de pondération est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final est la somme pondérée des sept (7) paramètres selon la formule :

$$ID = D_n \times D_p + R_n \times R_p + A_n \times A_p + S_n \times S_p + T_n \times T_p + I_n \times I_p + C_n \times C_p [1]$$

- Avec **n** variant de 1 à 5, qui représente la notation accordée à chaque paramètre ;
- **p** variant de 1 à 10 qui représente le facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Le tableau 1 indique les notations généralement accordées. Plus la note d'un paramètre est grande, plus son degré de vulnérabilité est élevé

Tableau 1. Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (Lallemand – Barrès, 1994)

D : Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée		R : Recharge (pluie efficace)	
Valeurs en mètres	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 - 1,5	10	> 25,5	9
1,5 - 4,5	9	17,5 - 25,5	8
4,5 - 9	7	10 - 17,5	6
9 - 15	5	5 - 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22,5 - 30	2		
> 30	1		
A : Nature de la zone saturée		S : Nature du sol	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grés massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, gré lités, calcaires	4	Limon silteux	4
Métamorphique	3	Limon argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégée et non fissurée	1
T : Topographie, pentes		I : Nature de la zone non saturée	
Valeurs en % de pente	Notation	Calcaire karstique	10
0 - 2	10	Basalte	9
2 - 6	9	Sable et gravier	8
6 - 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	6
12 - 18	3	Calcaire lité, grés, shale	6
> 18	1	Grés	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/Argile	1
C : Perméabilité en m/s			
> 9,4.10-4	10		
4,7.10-4 - 9,4.10-4	8		
32,9.10-5 - 4,7.10-4	6		
14,7.10-5 - 32,9.10-5	4		
4,7.10-5 - 14,7.10-5	2		
4,7.10-7 - 4,7.10-5	1		

La méthode DRASTIC propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol : occupation « standard » ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires. (BRGM, 2002). Le tableau 2 donne les deux systèmes de pondération avec les poids accordés à chaque paramètre.

Tableau 2. Facteurs de pondération des différents paramètres (Lallemand – Barrès, 1994)

Critères	Facteurs de Pondération	
	"Standard"	"Produits Phyto"
D : Profondeur	5	5
R : Recharge	4	4
A : Milieu aquifère	3	3
S : Milieu sol au-dessus de la zone non saturée	2	5
T : Topographie	1	3
I : nature de la zone non saturée	5	4
C : perméabilité de l'aquifère	3	2

L'appréciation de cet indice de vulnérabilité n'est possible que par l'analyse comparative entre différentes unités hydrogéologiques. C'est ainsi que nous subdivisons le littoral nord en trois (3) secteurs (sud, centre et nord). Pour chaque unité, nous déterminons son indice de vulnérabilité (ID). Pour mieux les comparer, nous présenterons les ID en pourcentage par la relation :

$$ID (\%) = (ID - 23) * 100 / 203 \quad [2]$$

Les valeurs de l'indice DRASTIC obtenues représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère, elles varient de 23 à 226 dans le cas de la version standard. D'une part, les valeurs obtenues sont regroupées, selon la classification de ALLER (ALLER *et al.* 1987), en cinq classes dont chacune correspond à un degré de vulnérabilité. D'autre part, ENGEL (ENGEL *et al.* 1996) propose la classification des valeurs en quatre autres classes (Hamza *et al.*, 2008). Le Tableau 3 donne la classification des indices et leur degré de vulnérabilité par la méthode DRASTIC selon ALLER et ENGEL.

Tableau 3. Classification des indices et leur degré de vulnérabilité par la méthode DRASTIC selon ALLER et ENGEL

Méthodes	Indices de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
DRASTIC (ALLER)	< 80	Très faible
	80 - 120	Faible
	121 - 160	Moyen
	161 - 200	Elevé
	> 200	Très élevé
DRASTIC (ENGEL)	< 101	Faible
	101 - 140	Moyen
	141 - 200	Elevé
	> 200	Très élevé

2.2.2 PRINCIPE DE LA MÉTHODE SINTACS

La méthode SINTACS est la version italienne de la méthode DRASTIC. Elle prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC. La spécificité de cette méthode est qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité.

- « impact normal » : scénario relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée, localisés dans des aires à sols épais. Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables, de point de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et des périmètres urbains très dispersés ;
- « impact sévère » : correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une occupation des sols intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets ;
- « drainage important à partir d'un réseau superficiel », relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau ;

- «terrain très karstifié», concernant les aires caractérisées par une forte karstification ;
- «terrain fissuré», correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation.

Parmi ces 5 scénarios, seul le scénario 2 (impact sévère) correspond à notre zone d'étude, zone correspondant aux régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets. Le tableau 4 donne les différents scénarios et les poids attribués aux paramètres de la méthode SINTACS et le tableau 5 donne les classes d'indices et leurs degrés de vulnérabilité.

Tableau 4. Les cinq scénarios et les poids attribués aux paramètres de la méthode SINTACS

Paramètre \ Scénario	Impact Normal	Impact Sévère	Drainage Important	Karst	Terrains Fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

Tableau 5. Les classes d'indices SINTACS et leurs degrés de vulnérabilité

Méthode	Indices de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
SINTACS	< 106	Faible
	106 - 186	Moyen
	187 - 210	Elevé
	> 210	Très élevé

2.2.3 PRINCIPE DE LA MÉTHODE SI (SUSCEPTIBILITY INDEX)

La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par RIBEIRO (RIBEIRO, 2000). Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques aux quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC à savoir (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Les cotes correspondantes aux différentes classes de ces paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées. Un cinquième nouveau paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (EUROPEAN COMMUNITY, 1993) (Tableau 6).

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. 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 varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tableau 7).

Tableau 6. Les principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes

Occupation des sols selon la classification CORINE Land Cover	Valeur du facteur d'occupation des sols LU (Land use factor)
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières	90
Carrière, chantier naval	80
Zones artificielles couvertes, zones vertes	75
Cultures permanentes	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agroforestières.	50
Milieus aquatiques (marais, salines, etc.	50
Forêts et zones semi naturelles	0

Tableau 7. Poids attribués aux paramètres SI

Paramètres	D	R	A	T	OS
Poids	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222

La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (tableau 8).

Tableau 8. Les classes d'indices SI et leurs degrés de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45 - 64
Elevé	65 - 84
Très élevé	85 - 100

Il est à signaler que les paramètres, qui ne sont pas pris en compte dans la méthode SI par rapport à la méthode DRASTIC sont les suivants : la conductivité hydraulique de l'aquifère, l'impact de la zone vadose et le type de sol. Cette méthode considère que 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 A (lithologie de l'aquifère) par la considération des caractéristiques granulométriques de l'aquifère. RIBEIRO (RIBEIRO, 2000) minimise également le rôle de la zone vadose en se basant sur les travaux de FOSTER (FOSTER, 1987), et ceux de VRBA et ZOPOROZEC (VRBA et ZOPOROZEC, 1994) qui considèrent également 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 à travers le paramètre occupation des sols.

3 RÉSULTATS

3.1 CARTE DE VULNÉRABILITÉS PAR LA MÉTHODE DRASTIC

Les cartes de vulnérabilité avec la méthode DRASTIC selon ENGEL et ALLER sont présentées successivement sur les figures 5 et 6.

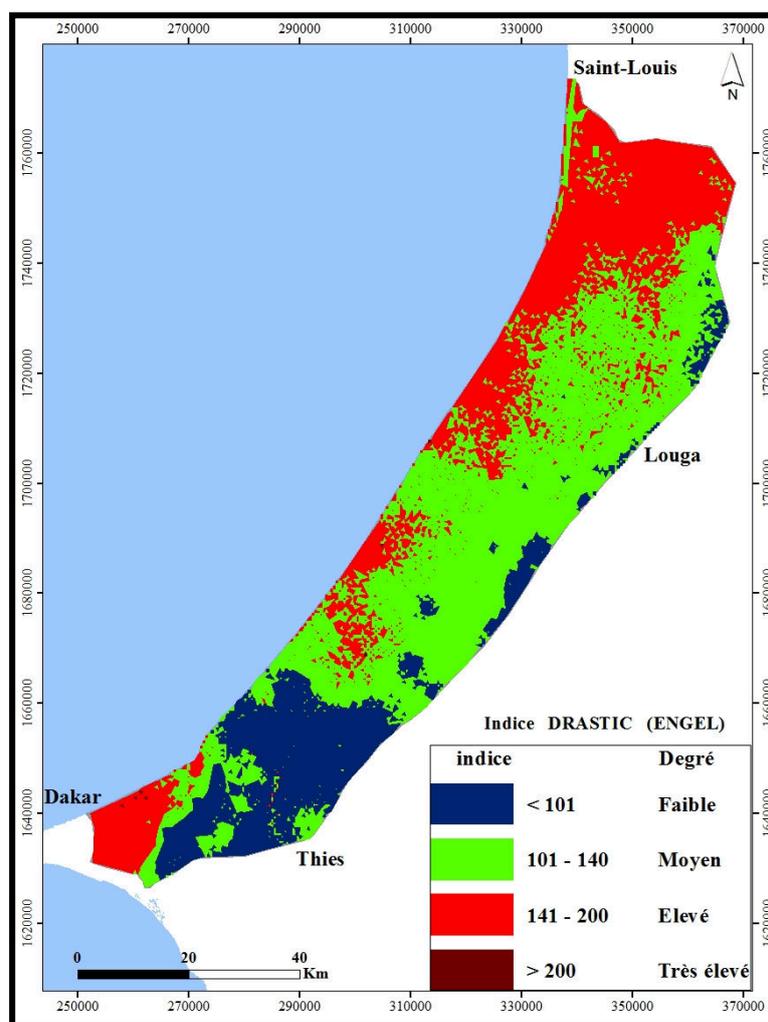


Fig. 5. Vulnérabilité générale de l'aquifère des sables du littoral nord selon Engel

Le DRASTIC selon ENGEL montre :

- Des zones de vulnérabilité élevées le long du littoral ;
- Des zones faiblement vulnérables notamment dans le secteur ouest et dans la partie sud de la zone ;
- Des zones moyennement vulnérables.

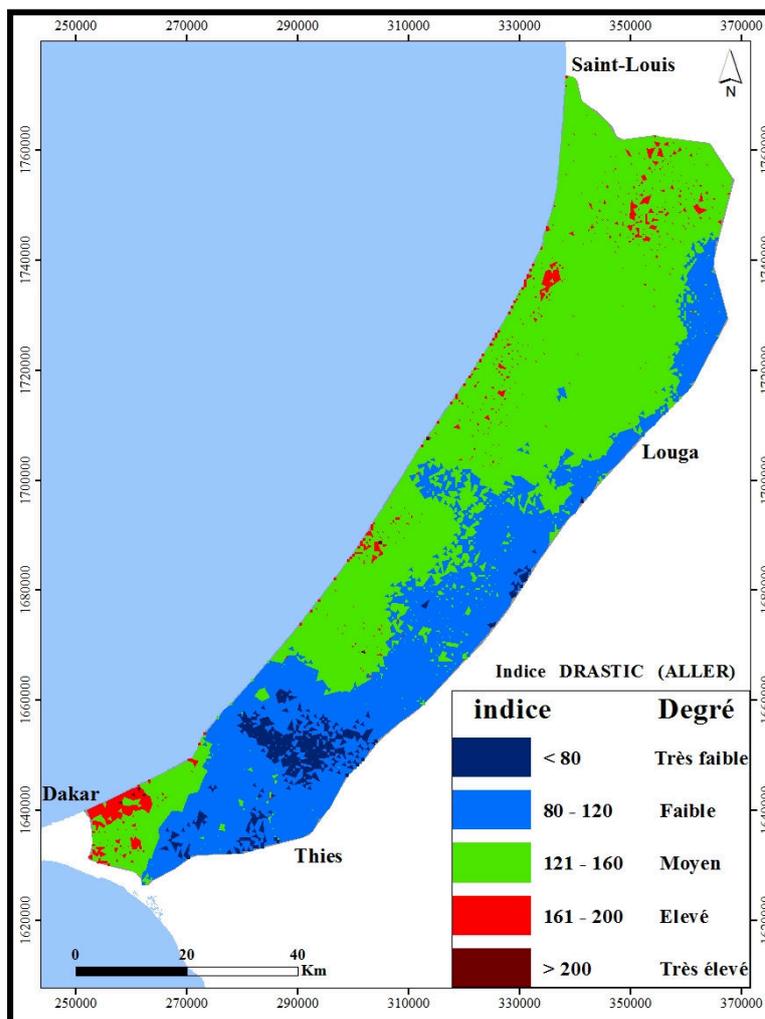


Fig. 6. Vulnérabilité générale de l'aquifère des sables du littoral nord selon Aller

Le DRASTIC selon ALLER révèle nettement quatre classes de vulnérabilité sur cinq :

- Pas de zone à vulnérabilité très élevée ;
- Très peu de zone à vulnérabilité élevée, seulement quelques-unes dans les secteurs ouest et nord ;
- Une vulnérabilité moyenne qui domine le long du littoral et dans le secteur nord ;
- Une vulnérabilité faible qui caractérise la partie sud de la zone.

3.2 CARTE DE VULNÉRABILITÉS PAR LA MÉTHODE SI

La figure 7 présente la vulnérabilité de l'aquifère avec la méthode SINTACS

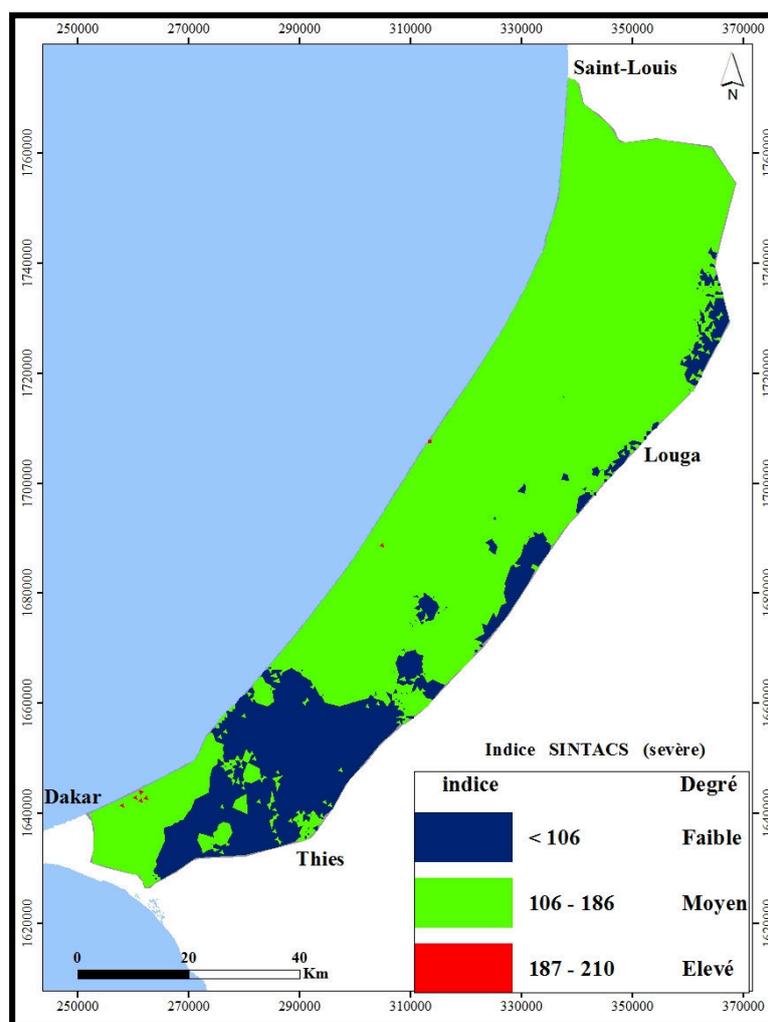


Fig. 7. Vulnérabilité générale de l'aquifère des sables du littoral nord selon la méthode SINTACS

Par la méthode SINTACS, l'on voit que la zone d'étude est moyennement vulnérable dans son ensemble. La partie sud est faiblement vulnérable comme l'illustre les méthodes précédentes.

3.3 CARTE DE VULNÉRABILITÉS PAR LA MÉTHODE SI

Cette méthode nécessite au préalable l'établissement d'une carte d'occupation des sols qui permet d'estimer la valeur du facteur d'occupation des sols « LU » (Land use factor). La figure 8 présente la carte d'occupation des sols.

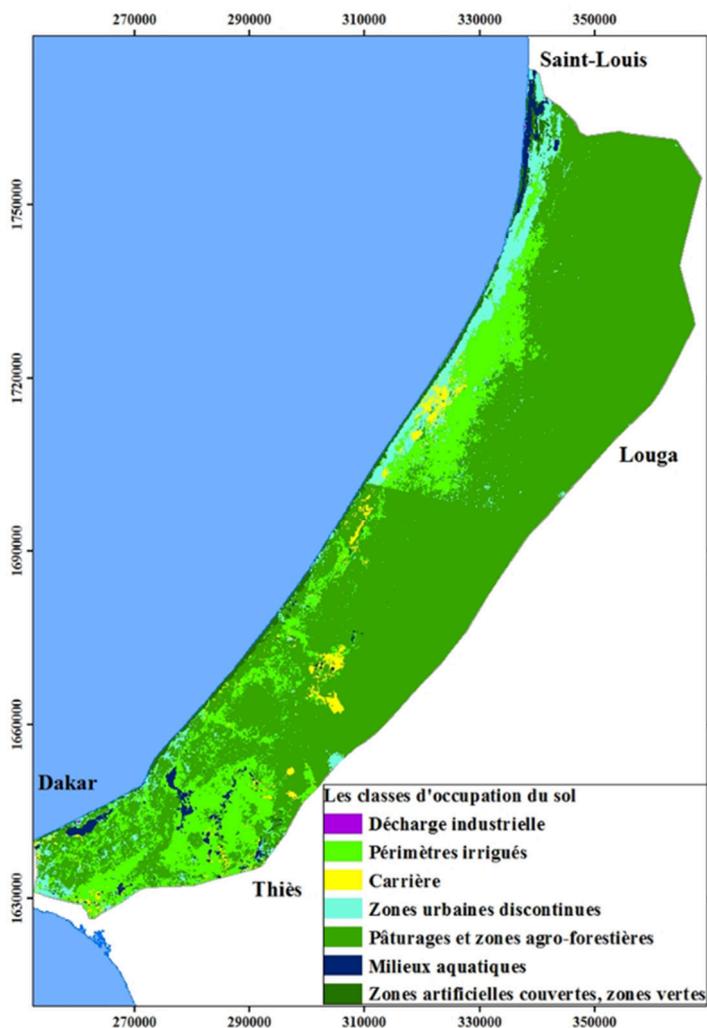


Fig. 8. Carte d'occupation des sols

Cette carte révèle sept (7) classes d'occupation des sols dont les superficies sont indiquées dans le tableau 9

Tableau 9. Différentes classes d'occupation de sol avec leurs superficies

Occupation sol	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Décharge industrielle	17	0,4
Périmètres irrigués	1539	32,9
Carrière	96	2,0
Zones urbaines discontinues	285	6,1
Pâturages et zones agro-forestières	2670	57,0
Milieus aquatiques	39	0,8
Zones artificielles couvertes, zones vertes	37	0,8
Superficie totale	4683	100

La plus dominante est celle occupée par le pâturage et les zones agro-forestières. Cependant les périmètres irrigués occupent une place non négligeable.

La figure 9 présente la carte de vulnérabilité avec la méthode SI.

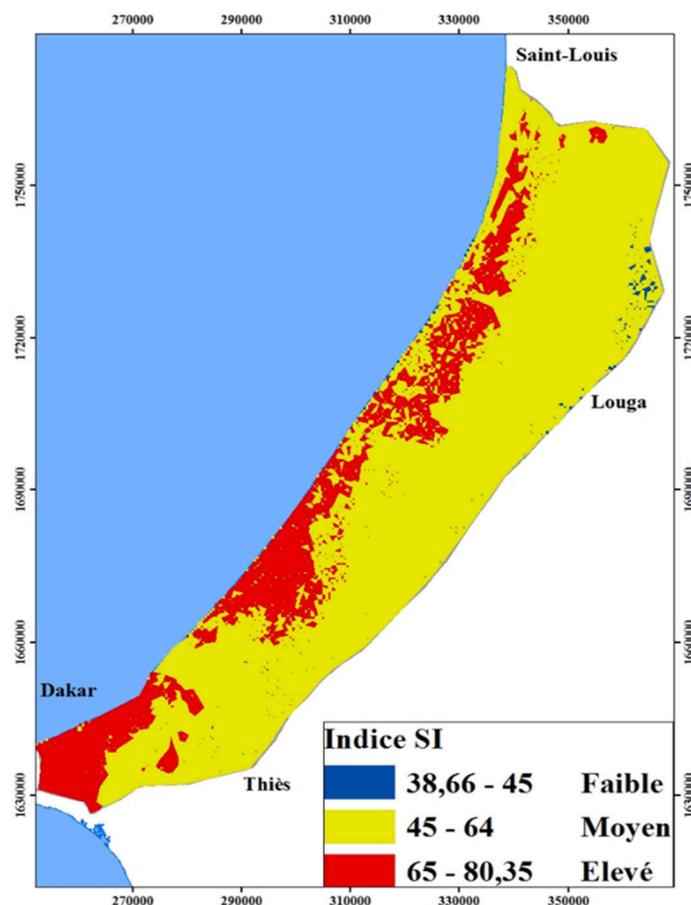


Fig. 9. Carte de la vulnérabilité par la méthode SI

Cette méthode met en exergue deux classes distinctes de vulnérabilité. Une vulnérabilité élevée tout le long du littoral occupant 21% de la superficie considérée et une vulnérabilité moyenne sur toute la partie sud occupant 77% de la superficie. Le tableau 10 ci-dessous représente une comparaison des superficies occupées par les degrés de vulnérabilité des différentes méthodes.

Tableau 10. Superficies occupées par les degrés de vulnérabilité des différentes méthodes

METHODES	Indices de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
DRASTIC (ALLER)	< 80	Très faible	128,84	2,75
	80 - 120	Faible	1542,78	32,95
	121 - 160	Moyen	2826,78	60,37
	161 - 200	Elevé	183,56	3,92
	> 200	Très élevé	1,23	0,03
DRASTIC (ENGEL)	< 101	Faible	798,01	17,04
	101 - 140	Moyen	2265,15	48,38
	141 - 200	Elevé	1617,91	34,55
	> 200	Très élevé	1,24	0,03
SINTACS	< 106	Faible	987,72	21,09
	106 - 186	Moyen	3693,65	78,89
	187 - 210	Elevé	1,18	0,03
	> 210	Très élevé	0,00	0,00
SI	< 45	Faible	36,21	0,77
	45 - 64	Moyen	3651,89	77,96
	65 - 84	Elevé	995,90	21,27
Total			4683	

Ces cartes présentent plusieurs classes de vulnérabilité. Tous les secteurs (sud, centre et nord) de la zone d'étude présentent par endroit des zones de vulnérabilité élevée. En tout état de cause On note que plus on s'éloigne de la cote, plus la vulnérabilité diminue et que dans l'ensemble, la zone des Niayes est moyennement vulnérable avec cependant des secteurs à vulnérabilité élevée lesquels doivent attirer l'attention des décideurs avec l'intensification des cultures et l'exploitation minière qui affecte la nappe et l'expose à différents polluants dont les nitrates. En effet la croissance incontrôlée, de ces dernières décennies, a abouti à une urbanisation massive de cette zone. Grâce à son climat frais et à la présence d'une nappe d'eau souterraine peu profondeur, cette région assez peuplée, fournit près de 95% de la production horticole et la plus grande partie de la production maraîchère du Sénégal.

Du fait de la nécessité de satisfaire les besoins du marché local et étranger, les paysans s'adonnent à une politique d'intensification de la production agricole. Cela nécessite l'utilisation de certaines substances comme l'engrais, les pesticides ou des eaux usées brutes très riches en nitrate pour l'arrosage des plantes (DIAW et al. 2016). La vulnérabilité de la nappe face à ce polluant (nitrate) mérite alors d'être étudiée. Nous avons ainsi procédé à une superposition des cartes de vulnérabilité avec la carte de concentration des nitrates et résultats sont présentés à travers les figures 10, 11, 12, 13 et 14 ci-dessous.

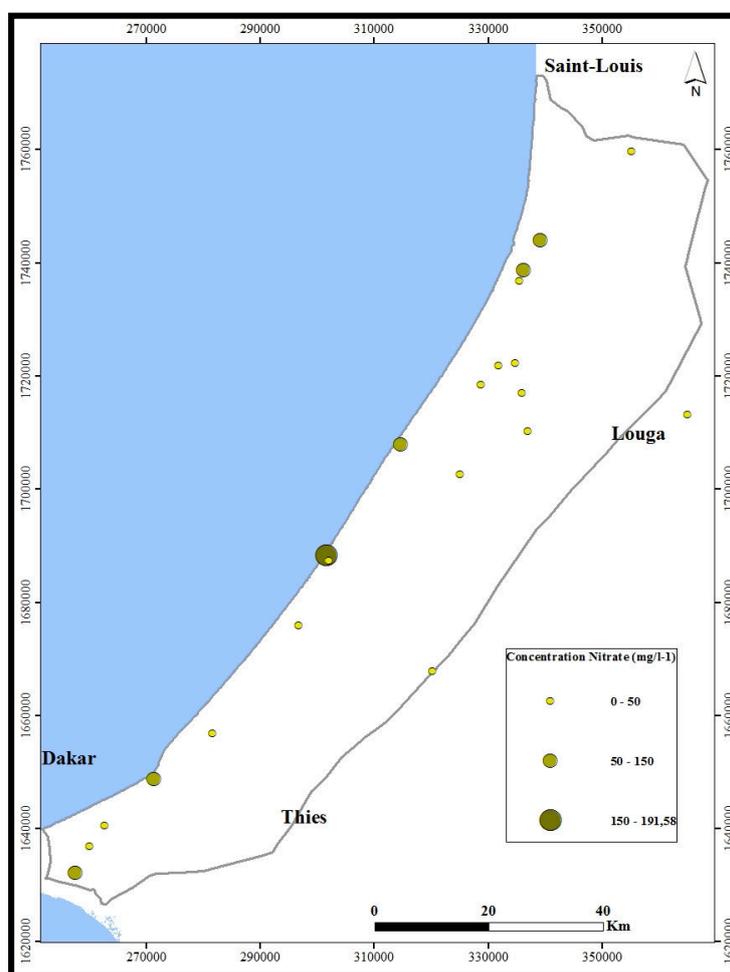


Fig. 10. Répartition des différents 21 points de prélèvement

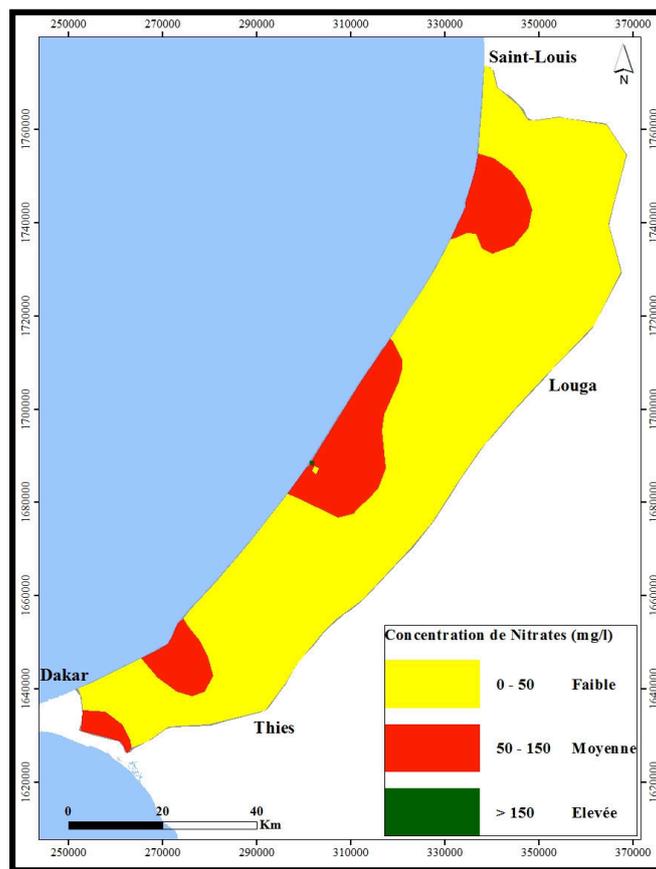


Fig. 11. Carte de la répartition des concentrations en nitrate en mg/l

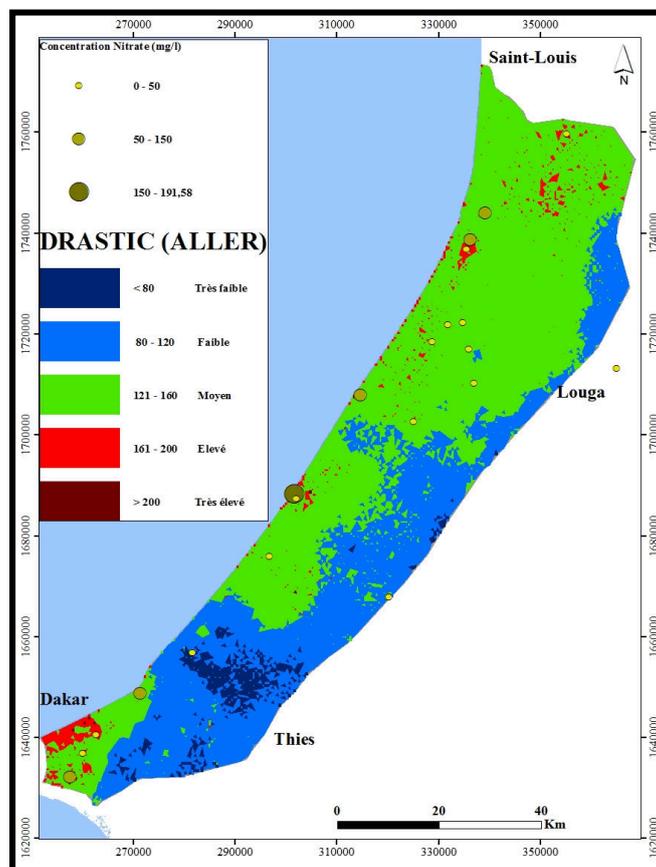


Fig. 12. Superposition des cartes (DRASTIC ALLERL/Nitrate)

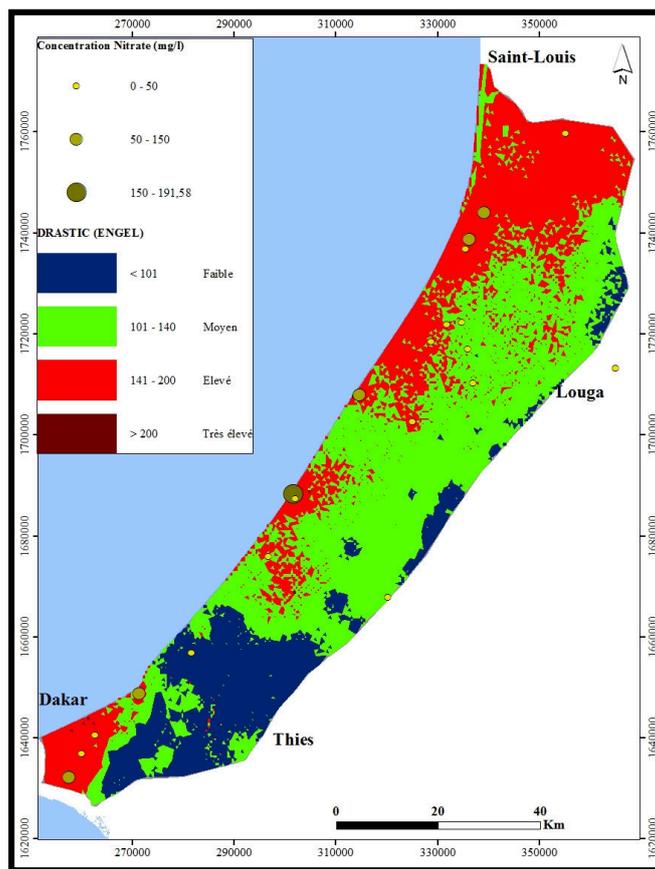


Fig. 13. Superposition des cartes (DRASTIC ENGEL/Nitrate)

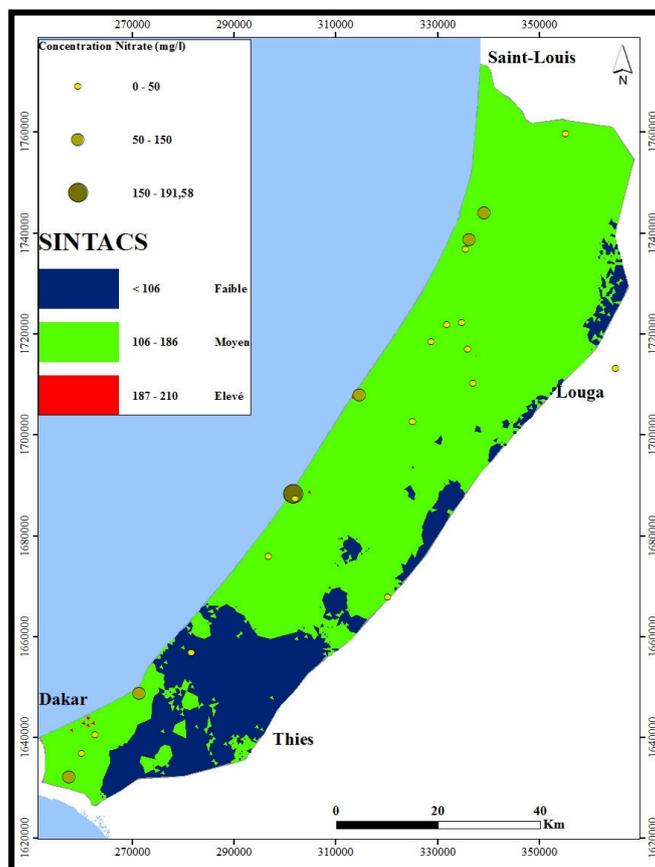


Fig. 14. Superposition des cartes (SINTACS/Nitrate)

Le tableau 11 ci-dessous la répartition des points par classe de concentration et par degrés de vulnérabilité

Tableau 11. Répartition des points par classe de concentration et par degrés de vulnérabilité

METHODES	Degré de vulnérabilité	Classification des concentrations de Nitrate (mg/l)		
		< 50 mg/l	50 à 150 mg/l	> 150 mg/l
		Nombre de points/classe de concentration		
DRASIC (ALLER)	Très faible	0	0	0
	Faible	1	0	0
	Moyen	9	3	0
	Elevé	4	2	1
	Très élevé	0	0	0
DRASTIC (ENGEL)	Faible	1	0	0
	Moyen	6	0	0
	Elevé	7	5	1
	Très élevé	0	0	0
SINTACS	Faible	1	0	0
	Moyen	13	5	1
	Elevé	0	0	0
SI	Faible	0	0	0
	Moyen	6	0	0
	Elevé	8	5	1
TOTAL		14	5	1

3.4 RESULTATS DE LA SUPERPOSITION

3.4.1 DRASTIC SELON ALLER

- On note **une** seule valeur supérieure à 150 mg/l. Elle coïncide à 100% avec la zone à vulnérabilité élevée ;
- Il y a cinq valeurs comprises entre 50 et 150 mg/l. Parmi celles-ci, les **trois** (soit 60%) coïncident avec la zone à vulnérabilité moyenne et les deux autres (40%) coïncident avec la zone à vulnérabilité élevée ;
- Il y a quatorze valeurs inférieures à 50 mg/l parmi lesquelles une (soit 7,1%) coïncide avec la zone à vulnérabilité faible, **neuf** (64,3%) avec la zone à vulnérabilité moyenne et quatre (28,6%) coïncident avec la zone à vulnérabilité élevée.

Donc, nous avons un taux de coïncidence de **65 %** entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité (soit 13 valeurs sur 20). Ce taux de coïncidence peut être détaillé comme suit, un taux de coïncidence de 100 % entre les concentrations élevées en nitrates (supérieures à 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée ; un taux de coïncidence de 60 % entre les concentrations moyennes (comprises entre 50 et 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité moyenne ; et un taux de coïncidence de 7,1 % entre les concentrations faibles (inférieures à 50 mg/l) et les zones à vulnérabilité faible.

3.4.2 DRASTIC SELON ENGEL

- On note **une** seule valeur supérieure à 150 mg/l. Elle coïncide à 100% avec la zone à vulnérabilité élevée ;
- On note **cinq** valeurs de concentration de nitrate comprises entre 50 et 150 mg/l. Elles coïncident à 100% avec la zone à vulnérabilité élevée ;
- Pour les quatorze valeurs inférieures à 50 mg/l, une (7,1%) coïncide avec la zone à vulnérabilité faible, six (42,9%) coïncident avec la zone à vulnérabilité moyenne et **sept** (50%) coïncident avec la zone à vulnérabilité élevée.

Donc, nous avons un taux de coïncidence de **65%** entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité (soit 13 valeurs sur 20). Ce taux de coïncidence peut être détaillé comme suit, un taux de coïncidence de 100 % entre les concentrations élevées en nitrates (supérieures à 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée ; un taux de coïncidence de 100 % entre les concentrations moyennes (comprises entre 50 et 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée ; et un taux de coïncidence de 50% entre les concentrations faibles (inférieures à 50 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée.

3.4.3 SINTACS

- L'**unique** valeur supérieure à 150 mg/l coïncide à 100% avec la zone à vulnérabilité moyenne ;
- Les **cinq** valeurs comprises entre 50 et 150 mg/l, coïncident à 100% avec la zone à vulnérabilité moyenne ;
- Parmi les quatorze valeurs inférieures à 50 mg/l, une (7,1%) coïncide avec la zone à vulnérabilité faible, **treize** (92,9%) avec la zone à vulnérabilité moyenne.

Donc, nous avons un taux de coïncidence de **95%** entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité (soit 19 valeurs sur 20). Ce taux de coïncidence peut être détaillé comme suit, un taux de coïncidence de 100 % entre les concentrations élevées en nitrates (supérieures à 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité moyenne ; un taux de coïncidence de 100% entre les concentrations moyennes (comprises entre 50 et 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité moyenne ; et un taux de coïncidence de 92,8% entre les concentrations faibles (inférieures à 50 mg/l) et les zones à vulnérabilité moyenne.

3.4.4 SI

- L'**unique** valeur supérieure à 150 mg/l coïncide à 100% avec la zone à vulnérabilité élevée ;
- Les **cinq** valeurs comprises entre 50 et 150 mg/l, coïncident à 100% avec la zone à vulnérabilité élevée ;
- Parmi les quatorze valeurs inférieures à 50 mg/l, aucune ne coïncide avec la zone à vulnérabilité faible, six (42,9%) coïncident avec la zone à vulnérabilité moyenne et **huit** (57,1%) coïncident avec la zone à vulnérabilité élevée.

Donc, nous avons un taux de coïncidence de **70%** entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité (soit 14 valeurs sur 20). Ce taux de coïncidence peut être détaillé comme suit, un taux de coïncidence de 100% entre les concentrations élevées en nitrates (supérieures à 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée ; un taux de coïncidence de 100% entre les concentrations moyennes (comprises entre 50 et 150 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée ; et un taux de coïncidence de 57,1% entre les concentrations faibles (inférieures à 50 mg/l) et les zones à vulnérabilité élevée.

4 DISCUSSION

La méthode SINTACS donne le plus grand taux de coïncidence 95%, mais cette valeur exprime le taux coïncidence entre les concentrations en nitrate et les zones à vulnérabilité moyenne. Contrairement à la méthode SI qui donne un taux de coïncidence de 70% entre les concentrations en nitrate et les zones à vulnérabilité élevée. La méthode SINTACS 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. C'est une vulnérabilité invariante dans le temps (schnebelen et al., 2002). Alors que la méthode SI traite d'une vulnérabilité spécifique liée aux sources de pollution et prend en compte les propriétés des polluants et les divers composants déjà considérés dans la vulnérabilité intrinsèque (AKE et al., 2009). C'est donc une vulnérabilité évolutive plus adaptée à la zone d'étude. En effet cette dernière subit sans cesse des pressions d'origines anthropiques dont les actions néfastes conjuguées à des conditions climatologiques péjoratives, l'exposent à des risques environnementaux et sociaux. Par conséquent la méthode SI évalue mieux la vulnérabilité à la pollution par les nitrates des eaux souterraines des Niayes.

Toutefois, les taux de coïncidence sont satisfaisants pour les trois méthodes utilisées avec au moins 65% ce qui prouvent leur efficacité à cartographier la vulnérabilité à la pollution des nappes.

5 CONCLUSION

La vulnérabilité à la pollution de la nappe libre de la zone des Niayes est évaluée dans cette étude avec les méthodes DRASTIC, SINTACS et SI. Les résultats montrent plusieurs classes de vulnérabilité qui se rencontrent aussi bien au nord, au centre qu'au sud de la zone d'étude. Dans tous les secteurs de littoral nord du Sénégal, on relève des classes de faible et de forte vulnérabilité. Cela témoigne d'un autre point de vue des caractéristiques variables de cette bande côtière qui subit une pression anthropique sans cesse croissante.

Une superposition des cartes de vulnérabilité générale avec une carte de concentration des nitrates a permis de montrer la méthode la plus adéquate avec ce type de polluant. La comparaison des différents résultats montre que la méthode SI est la plus adéquate quant à l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates, avec un taux de coïncidence de 70% entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité notamment élevée.

Les limites de cette étude sont à trouver au niveau du nombre limité de points de prélèvement de mesure de concentration de nitrate et au niveau de l'estimation de la recharge de la nappe, paramètre déterminant et très difficile à quantifier.

REFERENCES

- [1] AKE, G. E., DONGO, K., KOUADIO, B. H., DIBI, B., SALEY, M. B., BIEMI, J., 2009. Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450- 216X, Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171.
- [2] ALLER L., BENNET T., LEHR J., PETTY R., HACKETT G., (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. EPA- 600/2-87-035, 455 p.
- [3] BEZELGUES S. et E des Garets avec la collaboration de V Mardhel et N. Dörfliger (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grand-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1. Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité. Rapport BRGM – 51783-FR, 41 p., 7 fig. 7 tab.
- [4] BROU D., LAZARE K. K., INNOCENT K. K., SERAPHIN K. K., MOUSSA S., BRICE K. A., DAGO G. (2013). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SiNTACS : Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324 Vol. 2 No. 4 Apr. 2013, pp. 464-476
- [5] DIAGNE M., 2000 Vulnérabilité des productions agricoles au changement climatique au Sénégal. Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés- Programme d'Assistance des Pays-Bas sur les Changements Climatiques N.C.C.S.A.P. Ministère de la Jeunesse, de l'Environnement et de l'Hygiène Publique, Sénégal. 36p.
- [6] DIAW El hadji Bamba, Mamadou Lamine Lo, Mamadou Wade, Seydou Ndao, Ablaye Diallo, and Grégoire SISSOKO : Modélisation numérique du transport de solutés : prévision des risques de contamination de la nappe des Niayes (Sénégal) par les pesticides ; ISSN 2028-9324 Vol. 17 No. 4 Sep. 2016, pp. 1358-1372
- [7] Direction de l'horticulture (2013). Recensement de l'horticulture et mise en place d'un système permanent de statistiques horticoles dans la zone des Niayes. Groupe Syscom. 38p
- [8] ENGEL B.A., K.C.S. NAVULUR, B.S. COOPER, L. HAHN (1996). Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. *Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, 235. 521-526.
- [9] EUROPEAN COMMUNITY (1993). *Corine land cover*. Guide technique. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, Série environnement, sécurité nucléaire et protection civile, 144 p.
- [10] FOSTER S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Dans : *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, 38, W. VAN DUJVENBOODEN, H.G. VAN WAEGENINGH (Éditeurs) TNO Committee on Hydrological Research, La Hague, Pays-Bas, pp. 69–86.
- [11] Hamza, M.H., Added, A., Francés, A., Rodriguez, R., 2007, Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf (northeastern Tunisia). *Comptes Rendus Geoscience*, 339, 493–505. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2007.05.003>
- [12] HAMZA M.H., A. ADDED, A. BEN MAMMOU, S. ABDELJAOUED, R. RODRÍGUEZ (2004). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle par les pesticides, de la nappe côtière alluvionnaire de la plaine de Metline-Ras Jebel-Raf Raf, Nord-Est tunisien, selon la méthode DRASTIC appliquée par les systèmes d'information géographique. *Houille Blanc*. 2004,
- [13] LALLEMAND A., BARRES A., (1994). Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. BRGM-R37928, 17 p,
- [14] MALOU Raymond : Impact du climat sur les ressources en eau souterraines en zone soudano-sahélienne (2004). Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles de Géologie Appliquée. UCAD, 143p
- [15] NDAO Mariétou: Dynamique et gestion environnementale de 1970 à 2010 des zones humides du Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès et Saint Louis). Géography. Université Toulouse le Mirail – Toulouse II, 2012, 302 p
- [16] RIBEIRO L. (2000). Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação, Nota interna, (não publicada), ERSHA-CVRM, 8 p.
- [17] RIBEIRO, L., Serra, E., Paralta, E., Nascimento, J., 2003, Nitrate pollution in hardrock formations: Vulnerability and risk evaluation by geomathematical methods in SerpaBrinches aquifer (South Portugal). In: Krasny, J., Hrkal, Z., and Bruthans, J. (eds.) *Proceedings of IAH International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, pp. 377–378. Prague, Czech Republic, IHP-VI, Series on Groundwater no. 7, UNESCO, Paris.
- [18] SCHNEBELEN N., L., PLATEL JP., Le NINDRE Y., et BAUDRY, avec la collaboration de HOARAU A., DUFOUR P., BENHAMMOUDA S. (2002). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'oligocène en région bordelaise. Rapport BRGM / RP-51178-FR
- [19] VRBA J., A. ZOPOROZEC (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, in international contributions to hydrogeology, 16, I. A. HYDROGEOLOGISTS, 131 p.