

ETUDE DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE A LA POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES DE THIAROYE PAR LA METHODE DRASTIC

INTRINSIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF THE THIAROYE SAND AQUIFER: DRASTIC METHOD APPROACH

Madioune D H¹; Faye S C^{1 1}; Faye S¹

Résumé:

La nappe de Thiaroye qui appartient au système hydrogéologique des sables quaternaires de la presqu'île de Dakar est située entre la Patte d'Oie et Kayar sur une superficie d'environ 300 km². L'étude des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe a permis d'obtenir les paramètres d'entrée à l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère par la méthode DRASTIC. La cartographie de l'indice drastic s'est faite par l'utilisation de matrices sous Arc View 3.2 et a permis de délimiter des zones de vulnérabilité modérée à élevée avec des indices variant de 108 à 193. Les zones de forte vulnérabilité ayant des indices compris entre 151 et 193 représentent 14,5% de la surface cartographiée soit 44,5 km² et correspondent aux zones d'agglomération comme les localités de Cambérène, Pikine, Thiaroye, Malika, Boune, Gouye Guéwel. Par contre, la majeure partie de la surface cartographiée soit 85,5% et couvrant 263,5 km² est à vulnérabilité modérée. L'utilisation de matrices de calcul dont les éléments représentent le domaine discrétisé a permis de faire une cartographie rigoureuse de la vulnérabilité à la pollution.

Mots clés : Thiaroye, Cap-Vert, sables quaternaires, Vulnérabilité, DRASTIC.

Abstract:

The Thiaroye aquifer which belongs to the quaternary sands hydrogeologic system of the Dakar peninsula is located between Patte d'Oie and Kayar with an surface area of approximately 300 km². The hydrogeologic characteristics of the aquifer were used as an input to estimate intrinsic vulnerability of the system through the DRASTIC method. The drastic indice was mapped by the use of matrix under Arc View 3.2 and allowed to delineate areas of moderate to high vulnerability with values ranging from 108 to 193. The high vulnerability zones which represent 14,5% of the aquifer surface area exhibit indices between 151 and 193, and encountered in the agglomeration zones such as Cambérène, Pikine, Thiaroye, Malika, Boune, Gouye Guéwel. In the opposite, the major part of the aquifer has been identified as moderately vulnerable with 85, 5% of the investigated surface. The use of matrix which elements represent the discretize domain allow rigorous vulnerability mapping vis à vis to pollution.

Key words: Thiaroye, Cap-Vert, quaternary sands, Vulnerability, DRASTIC.

¹ Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques. Université C.A.D. Dakar-Sénégal.
Correspondant : S.C. FAYE, E-mail : scisse@ucad.sn

1 - Introduction

La nappe des sables quaternaires couvrant une superficie d'environ 300 km², se situe au col de la presqu'île du Cap-Vert entre la Patte-d'Oie et Kayar (figure 1). Son réservoir est constitué de formations essentiellement sableuses du Quaternaire reposant en discordance sur les formations marno-calcaires de l'Eocène qui représentent le substratum de l'aquifère. La nappe est peu profonde surtout dans la banlieue dakaroise (la zone périurbaine).

la qualité de l'eau où de fortes teneurs en nitrates sont observées.

Déjà depuis 1989, des études ont montré l'impact de l'urbanisation sur la qualité des ressources en eau douce dans le secteur. Par une cartographie élémentaire, Collins et Salem [3] ont montré une corrélation entre la densité de la population, le défaut d'assainissement et la détérioration de la qualité des eaux souterraines dans les zones de Thiaroye, Yeumbeul et Malika. Depuis

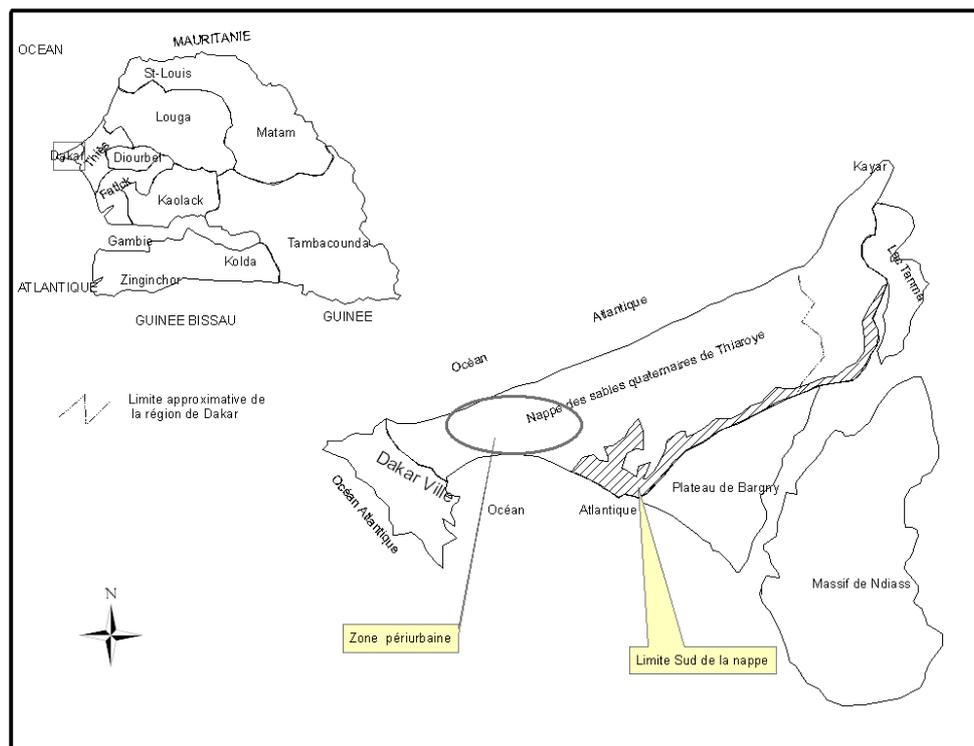


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude

La piézométrie est relativement plane avec des écoulements qui se font du Sud-Est vers le Nord-Ouest; toutefois on observe des fluctuations saisonnières du niveau induites par l'apport des précipitations. L'infiltration des eaux usées domestiques dans la zone d'agglomération contribue également pour une large part à cette recharge. Cette nappe possède un potentiel exploitable estimé à 47.000 m³ j⁻¹[4]; elle assure une partie de l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) de la ville de Dakar à hauteur de 7.000 m³ j⁻¹. Mais son utilisation future est très compromise par la dégradation excessive de

d'autres études, [9], [17], [19], [4], [5] ont révélé l'origine anthropique de cette pollution qui est surtout liée à la forte urbanisation et au déficit d'assainissement.

Les teneurs en nitrates [7], [18], [19], [4] sont excessives et dépassent largement la norme de potabilité établie par l'OMS qui est de 50 mg l⁻¹. Le centre de captage de Thiaroye est le plus affecté, les teneurs maximales sont de l'ordre de 550 mg l⁻¹. Il en résulte un problème de santé publique d'autant plus que les populations locales exploitent directement la nappe par des

puits traditionnels sans aucun contrôle sur la qualité de l'eau.

La présente étude a pour but principal de faire une évaluation quantitative du degré de vulnérabilité de la nappe à la pollution tout en essayant d'identifier et de circonscrire les zones de vulnérabilité. Ces cartes de vulnérabilité ne sont pas des indicateurs de pollution mais elles devraient en principe conditionner les plans d'occupation des sols ou, du moins permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protection devraient être adoptées. Le contexte hydrogéologique et géologique montre un système aquifère très vulnérable à la pollution. En plus du défaut d'assainissement dans les zones d'agglomération, il faut également noter que la nappe est libre sur sa totalité et est très superficielle (moins de 2 mètres) dans la zone péri-urbaine de Thiaroye et que les formations aquifères essentiellement sableuses confèrent au réservoir des valeurs élevées de perméabilité comprises entre $0,5$ et $9.10^{-4} \text{ m s}^{-1}$.

Ce qui pourrait favoriser la propagation de polluants depuis la surface. Les cartes de vulnérabilité obtenues dans cette étude basée sur le modèle DRASTIC couplées avec les cartes d'occupation de sol et celle de la contamination par les nitrates montrent que les zones à vulnérabilité élevée sont identifiées dans les zones d'agglomération de Thiaroye, Pikine, Cambérène, Malika, Boune, Gouye Guéwel augmentant ainsi les risques de pollution de la nappe.

2. Méthodologie de l'étude

Pour cette étude, la méthode DRASTIC [2] a été utilisée pour évaluer la vulnérabilité du système. C'est une méthode empirique qui est basée sur l'évaluation de sept paramètres physiques : profondeur de la nappe (**D**), recharge nette (**R**), milieu aquifère (**A**), type de sol (**S**), topographie (**T**), impact de la zone non saturée (**I**) et conductivité hydraulique (**C**).

Pour chaque paramètre, la plage de valeurs possibles est subdivisée en classes où une cote (*c*) est attribuée à chacune d'elles. La cotation est fonction des conditions hydrogéologiques locales, elle varie de 1 à 10. Les conditions de faible vulnérabilité sont représentées par des cotes faibles tandis que les zones à vulnérabilité élevée ont des cotes élevées.

Chaque paramètre sera également pondéré selon son importance et son impact dans l'évaluation de la vulnérabilité; le poids (*p*) varie de 1 à 5.

L'indice de vulnérabilité **I_{DRASTIC}** est ainsi calculé en additionnant les sept paramètres pondérés selon l'équation :

$$I_{DRASTIC} = DcDp + RcRp + AcAp + ScSp + TcTp + IcIp + CcCp$$

Où

c et **p** représentent respectivement la cote et le poids attribués à chaque paramètre. L'indice **I_{DRASTIC}** est représenté par une valeur numérique qui varie de 23 à 226; il exprime le degré de vulnérabilité.

L'utilisation de la méthode DRASTIC implique la collecte et l'analyse des données, l'évaluation de cartes paramétriques et l'application du modèle. Toutes les cartes paramétriques utilisées sont élaborées en format matriciel, lequel se prête mieux à l'étape finale de superposition des couches [14].

La démarche méthodologique utilisée pour l'établissement des cartes paramétriques et de la carte de vulnérabilité finale selon DRASTIC est représentée dans l'organigramme donné à la figure 2.

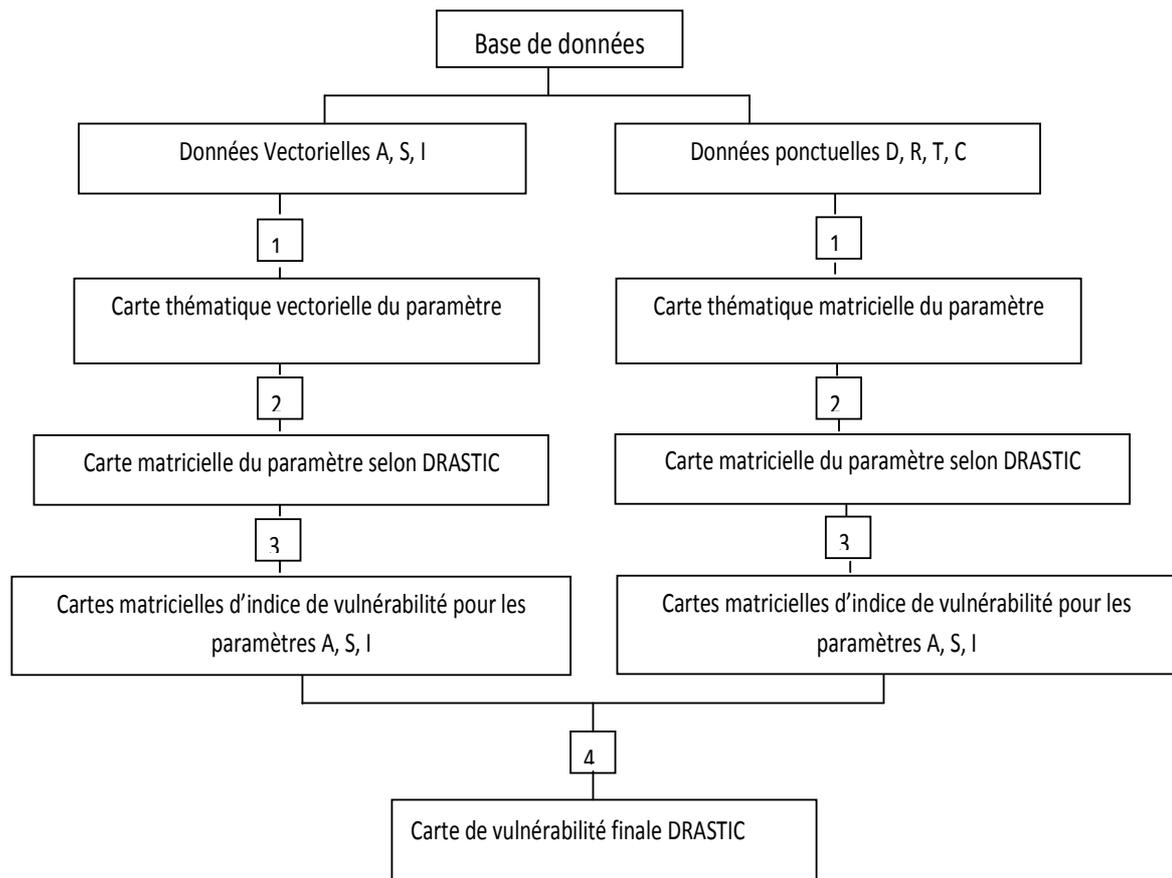


Figure 2 : Organigramme de la démarche méthodologique

(1)= *Discrétisation et Spatialisation des données ponctuelles*

(2)= *Conversion des cartes vectorielles en cartes matricielles ; Classification des pixels selon le modèle DRASTIC*

(3)= *Cotation et calcul d'indices de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC*

(4)= *Superposition des cartes indicielles et calcul de l'indice DRASTIC sur chaque maille*

Pour une meilleure précision sur les cartes établies, nous avons discrétisé le domaine d'étude en matrices carrées de 30 sur 30m.

La carte de vulnérabilité DRASTIC résultera de la superposition des sept cartes indicielles et le calcul de l'indice DRASTIC au niveau de chaque maille.

3. Résultats

3.1- Evaluation paramétrique : cotation et calcul d'indices de vulnérabilité

3.1.1- Profondeur de la nappe (D)

La carte d'indices de vulnérabilité est établie avec les valeurs ponctuelles du niveau statique de Février 2005 [12].

Les profondeurs de la nappe sont comprises entre 0,67 et 15,21 m.

Les zones de grandes profondeurs correspondent aux zones de faible vulnérabilité et les zones de faibles profondeurs à des zones de vulnérabilité élevée.

3.1.2- La recharge nette (R)

Pour évaluer la recharge, nous nous sommes basés sur les travaux de Cissé Faye [4]. Une recharge naturelle a été estimée entre 3,2 et 4,5 cm an⁻¹.

Mais à cette recharge naturelle nous avons ajouté la recharge artificielle due aux eaux usées domestiques utilisées dans la zone d'agglomération. Celle-ci a été estimée à 31,3 cm an⁻¹ [1] et est appliquée à la zone d'agglomération.

3.1.3- Le milieu aquifère (A)

Il correspond aux caractéristiques géologiques de l'aquifère. Les logs lithostratigraphiques des forages, sondages et piézomètres, les coupes géologiques effectuées entre Thiaroye et Beer Thialane [16], celle de Hébrard [11], de même que la carte géologique de l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye [15] ont permis de décrire les caractéristiques lithologiques des formations aquifères étudiées.

On note essentiellement dans le système une présence de faciès sableux intercalés de formations de sable argileux ou d'argile sableuse qui créent des conditions de semi captivité dans certaines zones circonscrites. Ainsi la conversion de la carte vectorielle en carte matricielle, la classification des valeurs selon le modèle DRASTIC et la cotation seront basées sur la présence ou non de faciès argileux, les proportions d'argiles, mais également sur la granulométrie des sables. Ainsi les cotes varient en fonction du degré de perméabilité du réservoir; ce dernier est lié à la consolidation et/ou au confinement du réservoir. Les faciès essentiellement

sableux correspondent dans la terminologie DRASTIC à une seule unité géologique que sont les sables et graviers dont les cotes varient de 4 à 9.

L'indice de vulnérabilité élevée pour ce paramètre caractérise les zones de Cambéréne et de Boune où les valeurs de cote et d'indice sont respectivement de 9 et 27 (figure 3). L'indice 24 (cote de 8) caractérise la zone côtière qui correspond à une zone de forte vulnérabilité. L'indice 21 caractérise la zone allant de la Patte d'Oie à l'Ouest du système à Keur Matar Ba au Centre-Ouest et la zone de Beer Thialane. Cet indice qui correspond à une vulnérabilité moyenne caractérise aussi les zones Centre et Est du système.

L'indice 18 caractérise la majeure partie du système, tandis que l'indice 15, les zones allant de Kounone jusqu'au delà de Golam. Une partie de la zone de Sangalkam qui présente des faciès argileux avec une cote de 4 et un indice faible de 12 correspond à des conditions de faible vulnérabilité pour ce paramètre.

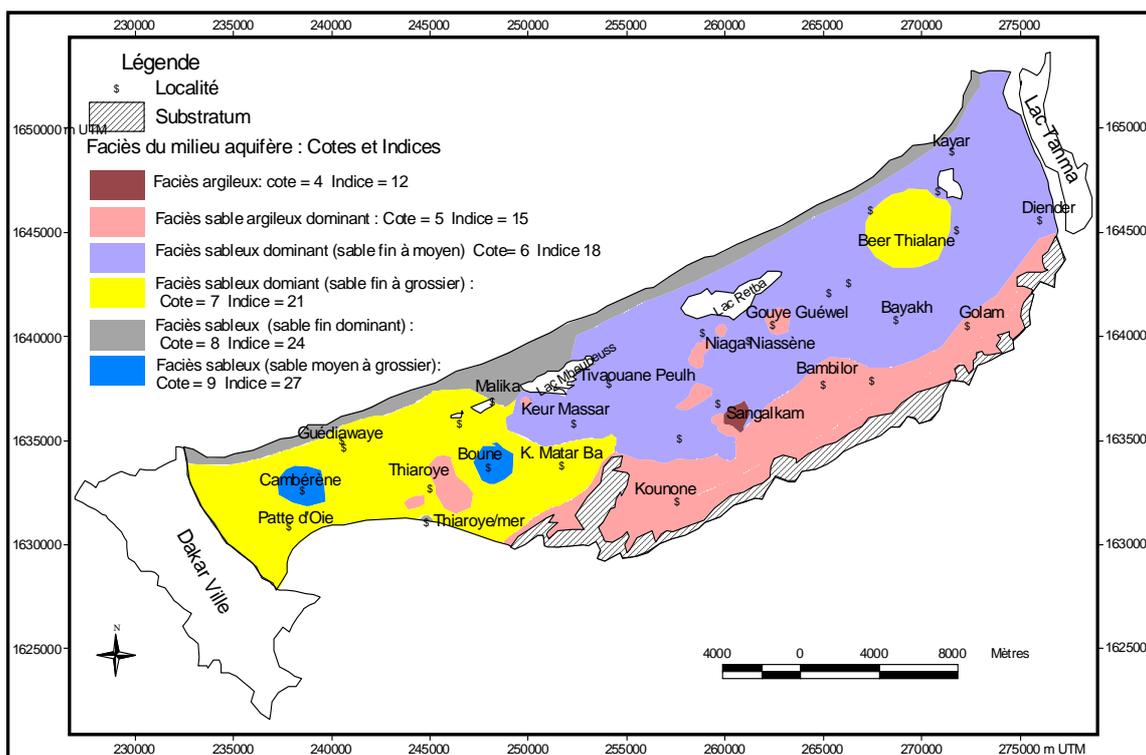


Figure 3 : Carte d'indices de vulnérabilité du paramètre «milieu aquifère».

3.1.4- Type de sol (S)

L'interprétation et la typologie des sols dans la zone d'étude sont essentiellement basées sur les travaux de R. Maignien [13]. La description des différentes unités s'est faite en se basant sur les analyses granulométriques des profils et la texture des sols. La classification selon DRASTIC a permis d'identifier quatre classes pédologiques basées sur la granulométrie, les proportions d'argiles et la texture. Les cotes affectées à ce paramètre sont fonction de son épaisseur, de sa texture mais aussi de sa structure.

Les zones de forte vulnérabilité pour ce paramètre correspondent aux zones constituées de sables grossiers et celles de faible vulnérabilité aux sols sableux fins.

3.1.5- La Topographie (T)

Les données d'entrée ont été obtenues à partir des points cotés relevés sur la carte topographique de la presqu'île du Cap-Vert au 1/50 000. Ces valeurs ont été introduites dans le logiciel de SIG puis traduites en pentes. Celles-ci ont été subdivisées en intervalles selon la méthode DRASTIC et les résultats montrent que les pentes du terrain sont comprises entre 0 et 2,31%.

3.1.6- La zone non saturée (I)

Dans le cadre de ce travail, les caractéristiques lithologiques des logs de forages, des piézomètres ou des sondages de même que les profils de zone non saturée dans la zone de Niaga effectuées par Gaye [10] et les coupes hydrogéologiques [16] ont été étudiées. L'élaboration de la carte thématique de la zone non saturée s'est faite en se basant sur la prédominance des faciès sableux par rapport aux sables argileux. Les faciès de la zone non saturée sont identifiés donc en fonction de leur degré de confinement.

3.1.7- La conductivité hydraulique (C)

En partant des valeurs ponctuelles de perméabilités (comprises entre $0,4 \cdot 10^{-4}$ et $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$) obtenues par pompages

d'essai Géohydraulique [8] nous avons élaboré la carte matricielle d'indices de vulnérabilité de ce paramètre après spatialisation, classement suivant la terminologie DRASTIC, cotation et calcul d'indices. Ainsi cinq intervalles de valeurs ont été différenciés (tableau 1).

Tableau I. Valeurs de conductivité avec cotes et indices

Conductivité hydraulique en m/s	Cote	Indice
$0,4 \cdot 10^{-4}$	1	3
$4,7 \cdot 10^{-5} - 1,4 \cdot 10^{-4}$	2	6
$1,4 \cdot 10^{-4} - 3,3 \cdot 10^{-4}$	4	12
$3,3 \cdot 10^{-4} - 4,7 \cdot 10^{-4}$	6	18
$4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$	8	24

3.2- Calcul de l'indice DRASTIC Résultats et interprétation de la carte de vulnérabilité de la nappe de Thiaroye

La carte de vulnérabilité finale selon la méthode DRASTIC est le résultat de la superposition des sept cartes indicelles issues des sept paramètres précédemment décrits. L'indice $I_{DRASTIC}$ en chaque maille du système est la somme des sept indices calculés pour chaque paramètre.

La représentation spatiale des indices drastic calculés a été réalisée grâce au module « Spatial Analyst » de Arc view 3.2.

Les résultats obtenus qui donnent des indices de vulnérabilité compris entre 108 et 193 ont été calés sur l'échelle Mc Cormack où trois classes de vulnérabilité sont définies [2] :

$I < 100$: vulnérabilité faible

$100 < I < 150$: vulnérabilité modérée

$I > 150$: vulnérabilité élevée

Toutefois, dans l'optique d'une interprétation plus détaillée et d'une cartographie plus fine de la zone, les 1413 valeurs d'indices drastic obtenues ont été réparties en pas de 10 suivant douze

classes allant de 1 à 12. Les classes 1 et 12 ne présentent pas de valeurs (tableau 2).

Tableau II. Intervalles de valeurs de l'indice drastic au niveau de la nappe de Thiaroye et classes correspondantes

Intervalles de valeurs de l'indice drastic	Classes DRASTIC
23 - 107	12
108 - 110	11
111 - 120	10
121 - 130	9
131 - 140	8
141 - 150	7
151 - 160	6
161 - 170	5
171 - 180	4
181 - 190	3
191 - 200	2
200 - 226	1

La classification de ces indices suivant un pas de 10 a permis d'avoir une carte très représentative avec une variabilité spatiale plus nette des classes de vulnérabilité (figure 4).

Les classes de vulnérabilité modérée et élevée représentent respectivement 85,5% de la surface cartographiée (soit 263,5 km²) et 14,5% (soit 44,5 km²).

Les zones Centre, Sud-Est, Nord-Est et Est présente une vulnérabilité modérée avec des indices compris entre 108 et 150.

Pour une représentation plus fine, ces indices ont été subdivisés en sous classes de vulnérabilité graduelle (M1 à M5) qui est surtout liée aux conditions hydrogéologiques locales. La classe M1 est considérée comme la plus élevée dans la zone à vulnérabilité modérée.

Dans cette zone, les indices compris entre 108 et 130 (vulnérabilité modérée M5, M4 et M3) caractérise la zone allant de Niaga Peulh à Sangalkam et toute la partie Sud-Est entre Sangalkam et Diender. Celle-ci englobe les localités de Bambilor, Gorom

et Golam. Ces indices caractérisent aussi une partie de la localité de Guédiawaye et de la Patte d'Oie. Le poids de ces indices est surtout lié d'une part aux caractéristiques lithologiques de la zone non saturée et du milieu aquifère (réservoir constitué de faciès argileux ou de sable argileux dominant) et d'autre part à la profondeur de la nappe qui est élevée dans ces zones (Diender 15,2 m ; Guédiawaye 14,03 m).

Toutefois ce sont les caractéristiques lithologiques du milieu aquifère (constitué de sable dominant) et de la zone non saturée (constituée uniquement de sable) qui différencient cette zone de la précédente. Les valeurs d'indices allant de 141 à 150 (vulnérabilité modérée M1) ont été calculées le long du littoral Nord entre Malika et Boune. Ces indices caractérisent également la zone allant de Wayambam à Gouye Guéwel et qui englobe les pourtours du lac Retba. La zone allant de Kayar à Mbawane est caractérisée par cette vulnérabilité modérée M1. Les fortes perméabilités et les faibles profondeurs de la nappe dans ces zones seraient à l'origine de ces indices élevés.

L'indice de vulnérabilité élevée caractérise principalement la zone d'agglomération.

Les valeurs sont comprises entre 151 et 170 (vulnérabilité élevée E5 et E4); elles caractérisent les zones de Guédiawaye-Cambérène- Thiaroye sur mer qui incluent aussi la zone allant de Pikine à Thiaroye. Des valeurs d'indice comprises entre 151 et 160 (vulnérabilité E5) sont aussi notées à Malika et à Gouye guéwel; elles sont plus élevées (171 et 180 : vulnérabilité E3) dans la zone de la Patte d'Oie à Cambérène et une partie du centre de captage de Thiaroye.

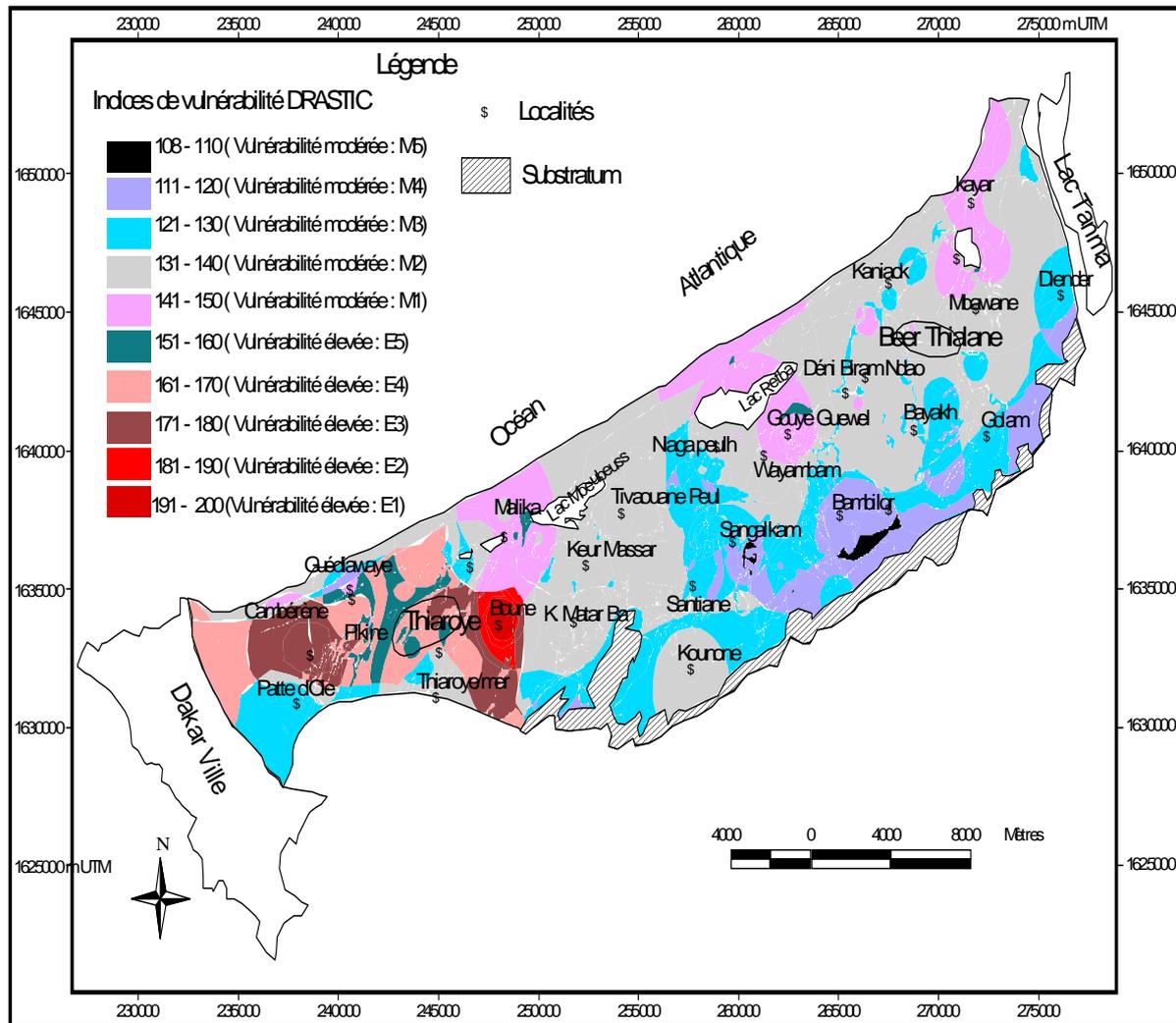


Figure 4: Carte de vulnérabilité de la nappe de Thiaroye par la méthode DRASTIC

Les classes de vulnérabilité E2 et E1 avec les valeurs comprises entre 181 et 200 ne s'observent que dans la zone de Boune et environs. Ces fortes valeurs sont liées à la faible profondeur de la nappe, à la nature sableuse du réservoir et à l'infiltration rapide. La recharge indirecte joue également un rôle très important surtout au niveau des zones d'agglomération.

En résumé, les zones où la vulnérabilité est modérée correspondent soit aux zones de grandes profondeurs comme à Diender, Santiane, Bayakh soit aux zones où le réservoir est sablo-argileux dominant mais également les zones où les valeurs de conductivités sont relativement faibles et la zone non saturée présente des faciès sablo

argileux (Sangalkam, Bambilor Gorom, Kounone).

Validation des résultats

Dans l'optique d'une évaluation de la fiabilité des résultats obtenus à partir de cette méthode, nous avons tenté une comparaison avec le degré de pollution de la nappe par la distribution des teneurs en nitrates et l'occupation du sol (figure 5).

Il ressort de ces observations que les cartes de vulnérabilité ne sont pas des indicateurs de pollution. Mais cette observation peut être biaisée par le fait que les cartes ne sont pas obtenues à la même période.

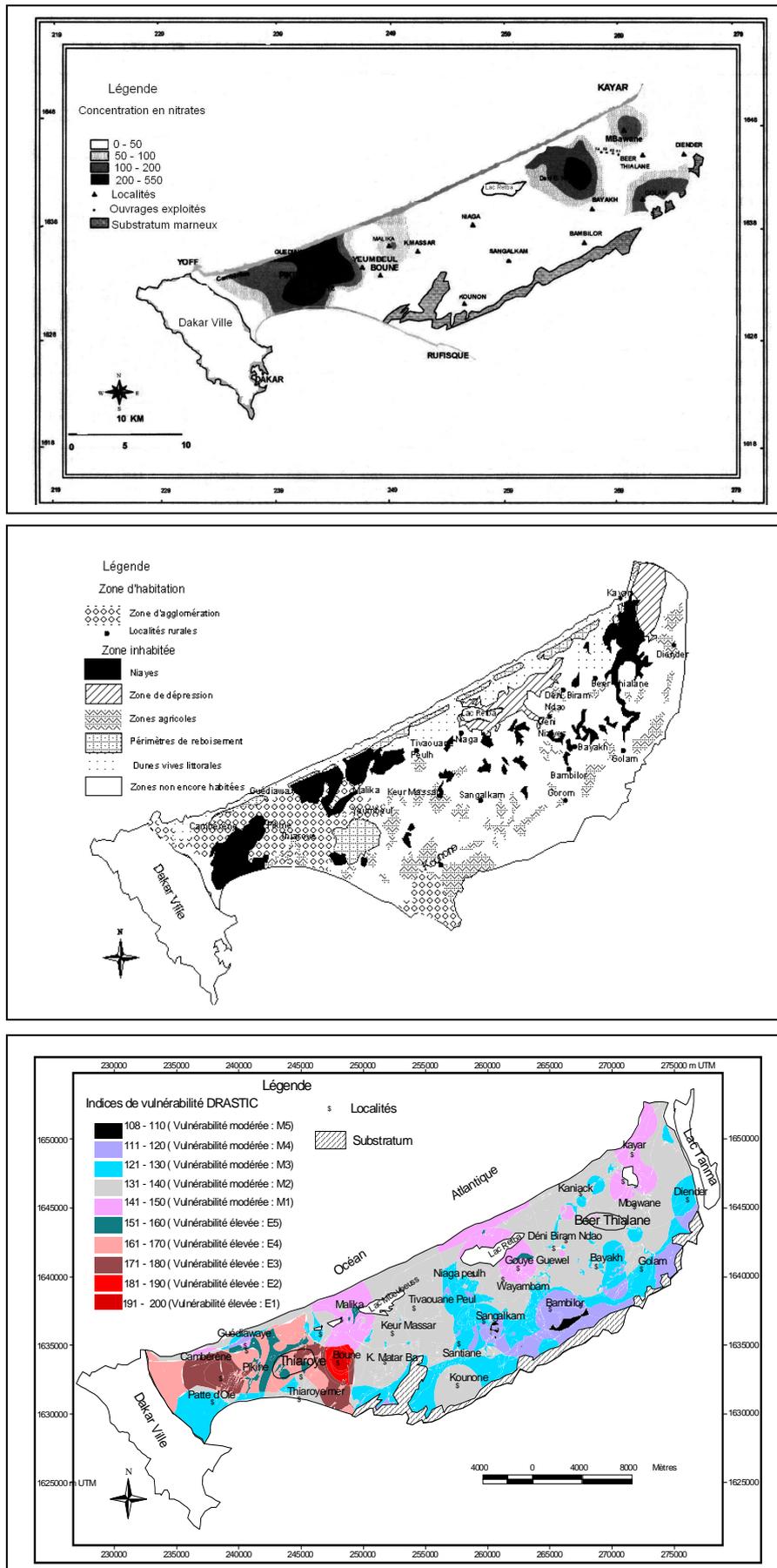


Figure 5 : Corrélation entre les teneurs en nitrates, le type d'occupation des sols et les zones de vulnérabilité

4. Conclusion

Les résultats obtenus à partir du calcul des indices de vulnérabilité qui varient de 108 à 193 sont présentés sous forme cartographique.

Les zones de vulnérabilités élevées sont localisées à l'Ouest du système dans la zone d'agglomération mais également vers le Nord-Ouest et l'Est au niveau de la zone rurale. Ces zones correspondent aux localités de Cambérène, Pikine, Thiaroye, Malika, Boune, Gouye Guéwel. La majeure partie de l'aquifère présente une vulnérabilité modérée. On remarque que les zones à teneurs en nitrates élevées correspondent souvent aux zones de vulnérabilité élevée (zone d'agglomération). Par contre à Déni Biram Ndao et à Golam on a noté des teneurs élevées en nitrates de l'ordre de 250 à 550 mg l⁻¹ pourtant ces zones sont à vulnérabilité modérée.

5. Recommandations

Compte tenu des résultats obtenus, l'objectif de ce travail ne serait atteint sans formuler quelques recommandations qui pourront bien aider à la prise de décision pour l'aménagement de cette zone fortement urbanisée. Il faut protéger les zones identifiées comme étant fortement vulnérables et qui ne sont pas encore polluées. Il s'agit des localités de Boune qui présente l'indice de vulnérabilité le plus élevé, Keur Massar, Tivaouane Peulh, Gouye géwel. Dresser des périmètres de protection autour des forages du centre de captage de Beer Thialane qui se trouve dans une zone de vulnérabilité modérée M2 avec des indices compris entre 131 et 140. Les plans d'urbanisation et d'occupation des sols au niveau des localités de Keur Massar, Tivaouane Peulh, Niaga Peulh, Wayabam, Déni Niayes, Déni Biram Ndao, Kaniack, Gouye géwel, Bayakh, Kounone, Beer Thialane, Kayar et tout le littoral Nord depuis Malika jusqu'à Kayar doivent tenir compte des caractéristiques physiques de l'aquifère qui montrent de forts indices de

vulnérabilité allant de 131 à 150. L'occupation des sols doit se faire avec une urbanisation contrôlée et un assainissement adéquat pour éviter que la pollution de la nappe ne se généralise.

6. Références Bibliographiques

- [1] ANTEA-SENAGROSOL (2003) Projet eau à long terme Etude d'impact de l'arrêt des forages de Thiaroye sur les zones basses. Modélisation de la nappe. Phase A Rapport technique. A 27499/C. 77p.
- [2] Aubre, F., Isabel, D., Gelinis, P. (1990) Revue de littérature sur les méthodes d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines. Rapt GGL-90-21. Dpt. de Géol. Univ Laval. Québec. 109 p.
- [3] Collin, J. J., Salem, G. (1989) Pollution des eaux souterraines par les nitrates dans les banlieues non assainies des pays en développement. Le cas de Pikine (SN). Note tech. n°089/ 27/BRGM/SNG/3E. 11 p.
- [4] Cisse Faye, S. (2001) Nappe libre des sables Quaternaires Thiaroye/Berr Thialane (Dakar, Sénégal). Etude de la contamination par les nitrates sur la base d'un Système d'Information Géographique (PC ARC/INFO). Thèse docteur 3^{ème} cycle. Dept Géol. FST. UCAD. 194 p.
- [5] Cisse Faye, S., Faye S., Wohnlich S., Gaye C.B. (2004) An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Sénégal). Environmental Geology, 45, 3, pp. 312-322.
- [6] DEH, (1987) Contrôle piézométrique et hydrochimie des nappes de la presqu'île du Cap-Vert, de Thiès et du littoral Nord : Note d'information annuelle PNUD/OPE - Projet

- Sen/81/003 (Dakar-Sénégal)
ressources en eau. 39 p.
- [7] **Fall, C. (1991)** Pollution azotée de la nappe phréatique de Thiaroye : causes et propositions de solutions. Mem. DEA, ISE/FST/UCAD/Dakar – Sénégal.
- [8] **Geohydraulique, (1972)** Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la presqu'île du Cap-Vert. Géoh. 388. Rapport final 65p.
- [9] **Gaye, C. B., Faye, A., Gelin, P. J., Therrien, P. (1989)** Analyse de l'intrusion saline dans les aquifères de la presqu'île du Cap-Vert. Analyse des processus de minéralisations et de dégradations de la qualité de l'eau dans les nappes infrabasaltiques et des sables quaternaires. Rapt GGL – 89 – CRDI, Univ LAVAL et UCAD. 29 p + annexes.
- [10] **Gaye, C.B. (1990)** Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire des aquifères sous climat aride au Nord du Sénégal. Thèse de Docteur-es-sciences. Dept. Géol., Fac. Scien. UCAD. 280 p + annexes.
- [11] **Hebrard, L. (1966)** Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la Presqu'île du Cap-Vert. Feuille Thiaroye Sénégal. Rapt n° 16. Lab. Géol. Fac. Scien. univ. Dakar, 75 p.
- [12] **Madioune, D. H. (2005)** Etude de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la nappe libre des sables quaternaires de Thiaroye par les méthodes DRASTIC et GOD. Mem DEA Hydrogéologie FST/Univ Cheikh Anta Diop 129p + annexes.
- [13] **Maignien, R. (1959)** Les sols de la presqu'île du Cap-Vert. Rapport technique Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) Dakar-Hann. 163 p.
- [14] **Murat, V., Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M., Bourque, E., Hamel, A., Lefebvre, R., Martel, R. (2003)** Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Doc. Tech. Commission géologique du Canada. <http://www.rncan.gc.ca/cgc/bookstore>
- [15] **Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique (MDRH) /OMS (1972)** Approvisionnement en eau et assainissements de Dakar et ses environs. Etude des eaux souterraines. Nappe des sables quaternaires (17° 05' - 17°25'). Projet Sénégal 3201 (EX 22). Tome II.
- [16] **Seck, A.A. (1988)** Synthèse hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires. Géométrie et structure du réservoir. Mem DEA Univ Dakar 48 p + annexes.
- [17] **SONEES (1989)** Note sur la teneur en Nitrates des eaux de la nappe de Thiaroye et de ses environs. Labor. D'analyse SONEES, DK, SN, 8 p.
- [18] **Tandia, A. A., Gaye, C.B., Faye, A. (1997)** Origine des teneurs élevées en Nitrates dans la nappe phréatique des sables quaternaires de la région de Dakar, Sénégal. Cahiers sécheresse, Vol. 8, N°4, pp 291-294.
- [19] **Tandia, A.A. (2000)** Origine, évolution et migration des formes de l'azote minéral dans les aquifères situés sous environnement périurbain non assaini : cas de la nappe des sables quaternaires de la région de Dakar (Sénégal). Thèse Docteur-es-Sciences. 215p.