

Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

# 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)

Mohamed Hafedh Hamza<sup>a,\*</sup>, Ayed Added<sup>a</sup>, Alain Francés<sup>b</sup>, Ramiro Rodríguez<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire des ressources minérales et environnement, département de géologie, université de Tunis-El-Manar, faculté des sciences de Tunis, 2092, El Manar II, Tunis, Tunisie*

<sup>b</sup> *Dpt Hidrogeologia, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), Estrada Portela Zambujal Alfragide, Apartado 7586 2720–866, Amadoram, Portugal*

<sup>c</sup> *Dpt de Recursos Minerales, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F., Mexique*

Reçu le 8 août 2006 ; accepté après révision le 15 avril 2007

Disponible sur Internet le 5 juillet 2007

Présenté par Ghislain de Marsily

## Résumé

La nappe phréatique côtière de Metline–Ras Jebel–Raf Raf (gouvernorat de Bizerte, côte nord-est de la Tunisie), qui occupe une superficie de 35 km<sup>2</sup>, représente un impératif économique jugé prioritaire, car elle est utilisée dans les domaines de l'irrigation et de la consommation domestique. L'aire de la nappe est occupée essentiellement par des zones agricoles, caractérisées par une utilisation de plus en plus importante des engrais chimiques, qui représentent un risque permanent pour la qualité des eaux souterraines. L'étude de la vulnérabilité à la pollution de cette nappe a été effectuée en appliquant les deux méthodes de vulnérabilité intrinsèques DRASTIC standard et SINTACS, et la méthode de vulnérabilité spécifique à la pollution par les nitrates, SI. Ces différentes méthodes ont été appliquées par les logiciels des systèmes d'information géographique (SIG) ARC/Info et Idrisi. La validité de l'application de ces méthodes à l'étude de la pollution par les nitrates de la nappe en question a été testée, en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la nappe et la répartition des classes de vulnérabilité. Cela a montré que la méthode la plus valide est la méthode SI. *Pour citer cet article : M.H. Hamza et al., C. R. Geoscience 339 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**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).** The phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–Raf Raf (prefecture of Bizerte, northeastern coast of Tunisia), which occupies an area of 35 km<sup>2</sup>, has a great economical importance, because it is used for irrigation and domestic consumption. The area of the aquifer is essentially occupied by agricultural zones, characterised by increasing use of chemical fertilizers. These chemical fertilizers threaten the quality of the groundwaters. The study of the vulnerability to pollution of this aquifer was made by applying two intrinsic vulnerability methods: the generic DRASTIC and the SINTACS methods, and a specific method of vulnerability to nitrate pollution: the SI method. For the application

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [hafedh.hamza@fst.rnu.tn](mailto:hafedh.hamza@fst.rnu.tn) (M.H. Hamza).

of those methods, GIS techniques were used. The validity of the different methods to agricultural pollution by nitrates was verified by comparing the distribution of these species in the groundwater with the distribution of the different vulnerability classes. The comparison demonstrated that the SI method is the most valid method in the studied system. *To cite this article: M.H. Hamza et al., C. R. Geoscience 339 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

*Mots clés :* Vulnérabilité à la pollution ; Nitrates ; DRASTIC ; SINTACS ; SI

*Keywords:* Vulnerability to pollution; Nitrates; DRASTIC; SINTACS; SI

## Abridged English Version

### Introduction

The underground waters represent an important resource exploited for human consumption and for agricultural and industrial use. Those waters are usually contaminated by pollutants of different natures: biological, chemical, or physical. Prevention against the aquifer pollution constitutes an important stage, to which scientists are providing with making an increasing effort, especially by studying the aquifer vulnerability. The studied aquifer is the phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–Raf Raf (prefecture of Bizerte, northeastern coast of Tunisia). It is located in a coastal plain, essentially used for agriculture, with an increasing consumption of chemical fertilizers. Thus, this study aimed at verifying the validity of the following vulnerability methods: the generic DRASTIC method [2] (classification of Engel et al., [11]), the SINTACS method [6], and the SI [25] method. The two first methods are two intrinsic vulnerability ones; however, the last one is a specific vulnerability to pollution by the nitrate method one. These methods consist in systems of numerical quotation based on the consideration of different factors affecting the hydrogeological system. The DRASTIC and SINTACS methods take into consideration the following seven parameters: depth to water, annual efficient recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity of the aquifer. For its part, the SI method takes into account the five following parameters: depth to water, annual efficient recharge, soil media, topography, and land cover type. The last factor, land cover type, which is not considered in the other two methods, makes this method a specific vulnerability one, mainly toward nitrates.

### The used vulnerability methods

- DRASTIC is a parametric method that was developed by the US Environmental Protection Agency (US EPA) for evaluating the intrinsic vertical vulnerability

of groundwater systems on a regional scale [2]. Calculated DRASTIC indexes are roughly representative of the likelihood that contaminants released in a region will reach groundwater, higher scores implying higher likelihoods of contamination. The DRASTIC method includes two versions: the generic (or normal) DRASTIC version, applied in the case of inorganic pollutants (e.g., in the case of nitrates), and the pesticide DRASTIC version, applied in the case of pesticides. The method yields a numerical index that is derived from ratings and weights assigned to the seven model parameters. The significant media types or classes of each parameter represent the ranges, which are rated from 1 to 10, based on their relative effect on the aquifer vulnerability. The seven parameters are then assigned weights ranging from 1 to 5, reflecting their relative importance. The DRASTIC index is then computed applying a linear combination of all factors according to the following equation:

### DRASTIC Index

$$= D_r \times D_w + R_r \times R_w + A_r \times A_w + S_r \times S_w + T_r \times T_w + I_r \times I_w + C_r \times C_w$$

where  $D$ ,  $R$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $T$ ,  $I$ , and  $C$  are the seven parameters, and the subscripts  $r$  and  $w$  are the corresponding rating and weights, respectively. The DRASTIC index values vary from 23 to 226 in the case of the generic version (Engel et al.'s classification, [11]) and fall into four classes, corresponding to four vulnerability degrees (Table 2).

- SINTACS is an intrinsic vertical vulnerability method developed by Civita [6]. It represents an adaptation of the DRASTIC method to the hydrogeological, climatic and impact settings that are typical of the Italian territory and of the Mediterranean basin. The SINTACS method takes into account the same parameters as the DRASTIC method. The specificity of the SINTACS method compared to the DRASTIC one is that it takes into consideration five different scenarios: normal impact, relevant impact, drainage

from surficial network, deep karstified terrain, and fissured terrain. The weights attributed to the different SINTACS parameters are presented in Table 3. The SINTACS index values fall into four classes, corresponding to four vulnerability degrees (Table 4).

- SI (susceptibility index method) [25] is a vulnerability method for evaluating the specific vertical vulnerability to pollution originated by agricultural activities, mainly by nitrates. The DRASTIC method has been used as a base, for which four original parameters have been selected (depth to water, annual efficient recharge, aquifer media and topography), and a new one has been introduced: the land cover type (classification used: CORINE Land Cover classification [14], Table 5). These modifications have been effected by taking into consideration the characteristics of common agricultural contaminants, such as the nitrate ion.

#### *Study area*

The phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–Raf Raf (prefecture of Bizerte, northeastern coast of Tunisia) (Fig. 1), which occupies an area of 35 km<sup>2</sup>, is located in a coastal plain between the latitudes north 514.411 and 526.215 and the longitudes east 431.657 and 440.351 (UTM Ref). The watershed has a surface of 50 km<sup>2</sup>. The main towns and villages in the watershed area are Metline, Ras Jebel, Raf Raf, Beni Ata, and Sounine. The annual average rainfall varies between 495 and 638 mm [9] and the annual average temperature is about 18 °C [22]. More than 200 wells are currently exploited in the study area, with a depth to water varying from 2.5 to 26 m. The piezometric map of the aquifer is presented with the directions of the water flow in Fig. 2. The aquifer's area is essentially occupied by agricultural zones characterised by an increasing use of chemical fertilizers, which threatens the groundwaters' quality.

The identification of the hydrogeological units and subunits as well as the assessment of the DRASTIC, SINTACS, and SI parameters requires a good knowledge of the geology, the hydrogeology, the soil media, the topography, the meteorology and land use in the study area. The data used in this study are taken from geological studies [5,10], hydrogeological studies [8,12] geophysical studies [13], climatic studies [9,22], soil studies [3,17,23], and land-use studies [7].

#### *Application of the DRASTIC, SINTACS, and SI methods*

The GIS ARC/Info and Idrisi software were used to apply the different vulnerability methods.

#### *Application of the generic DRASTIC method*

The DRASTIC method was already applied in the study area in its pesticide [20] and in its generic [21] versions. The established generic DRASTIC map (scale 1:50,000) shows three vulnerability classes: low, moderate, and high (Fig. 3). The weakly vulnerable zones occupy 46%, the moderately vulnerable zones occupy 48%, and the highly vulnerable ones occupy 6%.

#### *Application of the SINTACS method*

There are two types of SINTACS scenarios in the study area: the 'normal impact' scenario occupies 7.5% of the total study area surface and the 'relevant impact' scenario occupies 92.5%. The established SINTACS map (scale: 1:50 000) shows three vulnerability classes: low, medium, and high (Fig. 4). The weakly vulnerable zones occupy 19%, the moderately vulnerable ones occupy 80%, and the highly vulnerable ones occupy only 1%.

#### *Application of the SI method*

The four maps related to the parameters depth to water, annual efficient recharge, aquifer media and topography were already prepared in the frame of the elaboration of the DRASTIC map. The preparation of the land-use map was based on that of the prefecture of Bizerte [7]. The obtained SI vulnerability map (scale: 1:50 000) shows three vulnerability classes: low, medium, and high (Fig. 5). The low-vulnerability zones occupy 14%, the moderate-vulnerability ones occupy 74%, and the high-vulnerability ones occupy 12%.

#### *Vulnerability to pollution by nitrates, validity of the used methods*

The validity of the application of the generic DRASTIC [11], SINTACS [6], and SI [25] methods to the study of pollution by nitrates was verified in the studied aquifer by comparing the distribution of nitrates in the groundwater and the distribution of the vulnerability classes. Stigter et al. [27] defined the low nitrate concentrations as the concentrations lower than 50 mg l<sup>-1</sup>, the moderate ones as the ones between 50 mg l<sup>-1</sup> and 150 mg l<sup>-1</sup>, and the high ones as those larger than 150 mg l<sup>-1</sup>. There are 34 nitrate measures available in the study area: 11 for 2003 and 23 for 1993. Bearing in mind that the hydrogeological, climatic, and exploitative conditions did not change a lot since 1993,

we have considered that the 1993 nitrate concentration values were close to the 2003 ones.

Based on Table 2, we deduce that the nitrate concentrations are distributed as follows:

- for the generic DRASTIC map, among the 13 values exceeding  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , five (39% of the values) coincide with the high vulnerability zone, and eight (61% of the values) coincide with the moderate vulnerability one. Among the 14 values situated between 50 and  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , eight coincide with the moderate-vulnerability zone and six with the low-vulnerability one. Finally, among the seven values below  $50 \text{ mg l}^{-1}$ , three coincide with the low-vulnerability zone (43% of the values), and four (57% of the values) with the moderate vulnerability one;
- for the SINTACS map, among the 13 values exceeding  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , only one coincide with the high-vulnerability zone. The other 12 values (92%) coincide with the moderate-vulnerability one. Among the 14 values situated between 50 and  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , 13 (93% of the values) coincide with the moderate-vulnerability zone and only one (7% of the values) with the low-vulnerability one. Finally, among the seven values less than  $50 \text{ mg l}^{-1}$ , two (29% of the values) coincide with the low-vulnerability zone, and five (71% of the values) with the moderate-vulnerability one;
- for the SI map, among the 13 values exceeding  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , 11 (84% of the values) coincide with the high-vulnerability zone, and two (16% of the values) with the moderate vulnerability one. Among the 14 values situated between 50 and  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , 12 (86% of the values) coincide with the moderate vulnerability zone, one (7% of the values) with the low-vulnerability zone, and one with high-vulnerability zone. Finally, among the seven values below  $50 \text{ mg l}^{-1}$ , four (57% of the values) coincide with the low-vulnerability zone, and three (43% of the values) with the moderate-vulnerability one.

### Conclusions

The comparative study of the different vulnerability maps with the available nitrate measures shows that the most valid map for the assessment of the vulnerability to pollution by nitrates is the SI map [25], with a coincidence percentage of 79% between the nitrate concentrations and the different vulnerability degrees (27 values out of 34). This high percentage of coincidence relative to the SI method can be explained by the fact that this method is specific to agricultural pollution, mainly by nitrates. The SI method has been

conceived taking into consideration the chemical properties of nitrates together with the existing relations between this pollutant and the various components considered in the intrinsic vulnerability.

The generic DRASTIC map demonstrates a coincidence percentage of 44% between the nitrate concentrations and the different vulnerability degrees (15 values out of 34). The SINTACS map demonstrates, for its part, a coincidence percentage of 42% between the nitrate concentrations and the different vulnerability degrees (14 values out of 34). The DRASTIC and SINTACS methods are intrinsic vulnerability methods that do not take into consideration neither the nature of pollutants nor the factors managing the specific vulnerability, as the land-use factor.

The validation of the vulnerability maps could be perfected if a more important number of well-distributed nitrate measures were established.

### 1. Introduction

Les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour une utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Ces eaux sont souvent menacées par la contamination par des polluants de natures différentes : biologique, chimique ou physique. La prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante, à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'efforts, notamment en étudiant la vulnérabilité des nappes souterraines. La nappe étudiée ici est la nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf, localisée dans le gouvernorat de Bizerte, dans le Nord-Est de la Tunisie (Fig. 1). Cette nappe est localisée dans une plaine côtière essentiellement exploitée pour l'agriculture, avec une consommation de plus en plus croissante d'engrais chimiques [1]. Ainsi, ce travail a été réalisé dans le but de vérifier la validité des méthodes de vulnérabilité appliquées que sont les méthodes DRASTIC standard [2] (classification d'Engel et al., [11], SINTACS [6] et SI [25]). Les deux premières méthodes sont deux méthodes paramétriques de vulnérabilité intrinsèque, tandis que la dernière est une méthode paramétrique de vulnérabilité, spécifique à la pollution par les nitrates. Ces différentes méthodes se présentent sous forme de systèmes de cotation numérique, basés sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Les méthodes DRASTIC et SINTACS prennent en compte les sept paramètres suivants : la profondeur du plan d'eau, la recharge efficace annuelle de l'aquifère, la lithologie de l'aquifère, les types de sol, la topographie, l'impact de la

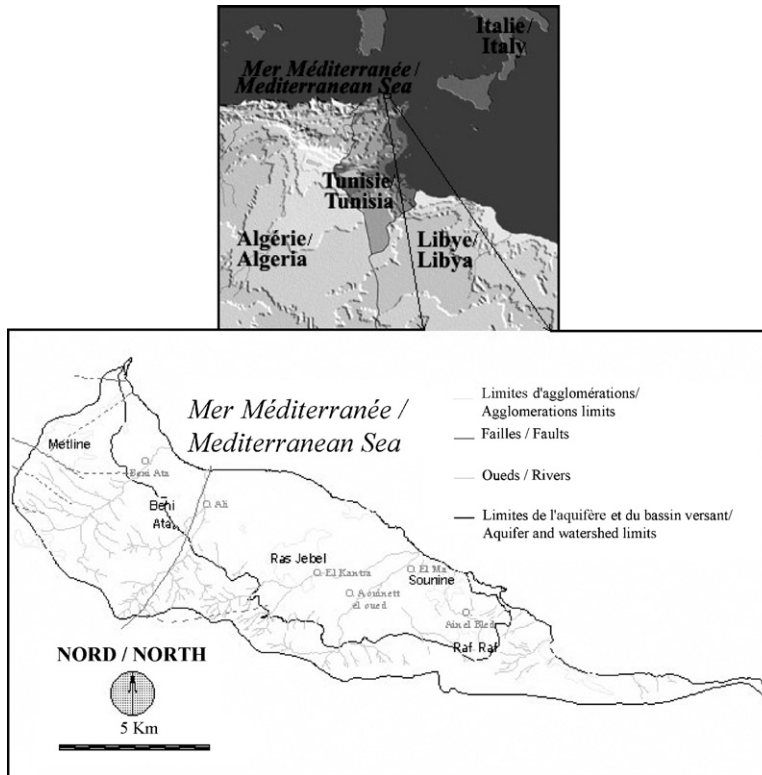


Fig. 1. La nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf.

Fig. 1. The phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–Raf Raf.

zone vadose ou l'effet de l'autoépuration de la zone vadose, ainsi que la conductivité hydraulique de l'aquifère. La méthode SI prend en compte, quant à elle, les cinq paramètres suivants : la profondeur du plan d'eau, la recharge efficace de l'aquifère, les types de sol, la topographie et l'occupation des sols. Ce dernier facteur, qui n'est pas considéré dans les deux autres techniques, fait de celle-ci une méthode de vulnérabilité spécifique, principalement des nitrates.

## 2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité utilisées

### 2.1. Notion de vulnérabilité

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions, selon les caractéristiques du milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique [26]. Le premier terme est utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui

déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Le deuxième est celui utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. La vulnérabilité spécifique prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

### 2.2. Méthodes de vulnérabilité intrinsèque utilisées : les méthodes DRASTIC et SINTACS

#### 2.2.1. La méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC, développée par Aller et al. [2] sous l'égide de l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA, est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères, par systèmes paramétriques ; le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et est affecté d'une cotation numérique croissante, en fonction de son importance dans la vulnérabilité. L'acronyme DRASTIC correspond aux



initiales des sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité : *Depth to water (D)* : profondeur du plan d'eau ; *net Recharge (R)* : recharge efficace de l'aquifère ; *Aquifer media (A)* : lithologie de l'aquifère ; *Soil media (S)* : type de sol ; *Topography (T)* : pente topographique du terrain ; *Impact of vadose zone (I)* : impact de la zone vadose (zone non saturée) ; *hydraulic Conductivity of the aquifer (C)* : conductivité hydraulique de l'aquifère. Les sept paramètres découpent, de façon schématique, une unité hydrogéologique locale en ses principales composantes, lesquelles influencent, à différents degrés, les processus de transport et d'atténuation des contaminants dans le sol, ainsi que leur temps de transit. Une valeur numérique, appelée poids paramétrique, comprise entre 1 et 5, est attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence. Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination. Une valeur numérique, appelée indice de vulnérabilité DRASTIC et notée ID, est déterminée ; elle décrit le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$I_D = D_p \times D_c + R_p \times R_c + A_p \times A_c + S_p \times S_c + T_p \times T_c + I_p \times I_c + C_p \times C_c$$

(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).

Il existe deux versions de la méthode DRASTIC : la version DRASTIC standard, appliquée dans le cas où les contaminants considérés sont des polluants inorganiques (cas de notre article), et la version DRASTIC « pesticides », appliquée dans le cas où les contaminants considérés sont des pesticides. Les valeurs des poids des paramètres dans la version standard de la méthode DRASTIC sont présentées dans le Tableau 1. 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. Les valeurs obtenues sont classées selon Engel et al. [11], en quatre classes (Tableau 2).

### 2.2.2. La méthode SINTACS

La méthode SINTACS, développée par Civita [6], est la version italienne de la méthode DRASTIC : c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranéennes. Cette méthode de vulnérabilité verticale intrinsèque prend en considération les mêmes para-

Tableau 1

Poids des paramètres dans la version standard de la méthode DRASTIC [2]

Table 1

Generic DRASTIC parameter weights [2]

| Paramètre/Parameter   | Version DRASTIC standard/Generic DRASTIC version |
|---|--|
| <i>D</i> : profondeur du plan d'eau/depth to water                                      | 5  |
| <i>R</i> : recharge efficace/efficient or net recharge                                  | 4  |
| <i>A</i> : matériaux de l'aquifère/aquifer media  | 3  |
| <i>S</i> : type de sol/soil media   | 2  |
| <i>T</i> : pente du terrain/topography  | 1  |
| <i>I</i> : matériaux de la zone non saturée/impact of the vadose zone                   | 5  |
| <i>C</i> : conductivité hydraulique de l'aquifère/hydraulic conductivity of the aquifer | 3  |

mètres que la méthode DRASTIC. Un poids compris entre 1 et 5 est attribué à chacun d'eux, et chaque paramètre est classé en plusieurs classes, dont chacune est associée à une cote variant de 1 à 10.

La spécificité de cette méthode par rapport à la méthode DRASTIC est qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité : les scénarios « impact normal » et « impact sévère », scénarios relatifs aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, localisés dans des aires à sols épais, avec une profondeur du plan d'eau qui n'est pas très élevée. Les zones relatives au premier scénario correspondent aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées et une utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres urbains très dispersés, tandis que les zones relatives au deuxième scénario correspondent aux régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, aux implantations industrielles et urbaines denses, et aux dépôts liquides et solides de déchets. Les trois autres scénarios sont le scénario « drainage important à partir

Tableau 2

Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC [11]

Table 2

Criteria for the evaluation of vulnerability in the DRASTIC method [11]

| Degré de vulnérabilité/<br>Vulnerability degree | Indice de vulnérabilité/<br>Vulnerability index |
|---|---|
| Faible/Low                                      | < 101   |
| Moyen/Moderate                                  | 101–140   |
| Élevé/High                                      | 141–200   |
| Très élevé/Very high                            | > 200   |

Tableau 3

Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode [6]

Table 3

Weights attributed to parameters in the different scenarios of the SINTACS method [6]

| Scénario/ <i>Scenario</i><br>Paramètre/ <i>Parameter</i> | Impact normal/<br><i>Normal impact</i> | Impact sévère/<br><i>Relevant impact</i> | Drainage important/ <i>Drainage</i><br><i>from surficial network</i> | Karst/<br><i>Karst</i> | Terrains fissurés/<br><i>Fissured terrain</i> |
|--|--|--|--|------------------------|---|
| 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 4

Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS [6]

Table 4

Criteria for the evaluation of vulnerability in the SINTACS method [6]

| Degré de vulnérabilité/<br><i>Vulnerability degree</i> | Indice de vulnérabilité/<br><i>Vulnerability index</i> |
|--|--|
| Faible/ <i>Low</i>                                     | < 106  |
| Moyen/ <i>Moderate</i>                                 | 106–186  |
| Élevé/ <i>High</i>                                     | 187–210  |
| Très élevé/ <i>Very high</i>                           | > 210  |

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, le scénario « terrain très karstifié », concernant les aires caractérisées par une forte karstification, et le scénario « terrain fissuré », correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation. Les poids attribués aux différents paramètres dans les versions SINTACS sont présentés dans le Tableau 3.

Quatre classes de vulnérabilité peuvent être extraites, selon les valeurs des indices de vulnérabilité (Tableau 4).

Tableau 5

Principales classes d'occupation des sols et valeurs de LU correspondantes [25]

Table 5

Main soil-occupation classes and corresponding LU values [25]

| Classe d'occupation des sols/ <i>Land-use class</i>   | Valeur du facteur<br>LU/LU rating |
|---|-----------------------------------|
| Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines/ <i>Industrial discharge, landfill, mines</i>  | 100                               |
| Périmètres irrigués, rizières, cultures annuelles irriguées et non irriguées/ <i>Irrigated perimeters, paddy fields, Irrigated and non irrigated annual culture</i> | 90                                |
| Carrière, chantier naval/ <i>Quarry, shipyard</i>   | 80                                |
| Zones artificielles couvertes, zones vertes, zones urbaines continues/ <i>Artificial covered zones, green zones, continuous urban zones</i>                         | 75                                |
| Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)/ <i>Permanent cultures (vines, orchards, olive trees, etc.)</i>  | 70                                |
| Zones urbaines discontinues/ <i>Discontinuous urban zones</i>   | 70                                |
| Pâturages et zones agro-forestières/ <i>Pastures and agro-forest zones</i>  | 50                                |
| Milieus aquatiques (marais, salines, etc.)/ <i>Aquatic milieu (swamps, saline, etc.)</i>  | 50                                |
| Forêts et zones semi-naturelles/ <i>Forest and semi-natural zones</i>   | 0                                 |

### 2.3. Méthode de vulnérabilité spécifique utilisée : la méthode SI

La méthode SI (*Susceptibility Index*) ou méthode d'indice de susceptibilité est une méthode de vulnérabilité verticale spécifique, développée au Portugal par Ribeiro [25] pour tenir compte du comportement des polluants d'origine agricole, principalement les nitrates. Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà pris en compte dans la méthode DRASTIC : la profondeur du plan d'eau (D), la recharge efficace de l'aquifère (R), la lithologie de l'aquifère (A), et la pente topographique du terrain (T). Les cotes attribuées aux différentes classes de ces paramètres dans la méthode DRASTIC ont été conservées. Le cinquième nouveau paramètre introduit est le paramètre « occupation des sols » (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover [14] (Tableau 5). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est

Tableau 6

Poids attribués aux paramètres SI (variant de 0 à 1, du moins au plus important) [25]

Table 6

Weights attributed to SI parameters (varying from 0 to 1, from the least to the most important) [25]

| Paramètre/Parameter | D     | R     | A     | T     | OS    |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Poids/Weight        | 0,186 | 0,212 | 0,259 | 0,121 | 0,222 |

Tableau 7

Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI [25]

Table 7

Criteria for the evaluation of vulnerability in the SI method [25]

| Degré de vulnérabilité/<br>Vulnerability degree | Indice de vulnérabilité/<br>Vulnerability index |
|---|---|
| Faible/Low                                      | < 45  |
| Moyen/Moderate                                  | 45–64   |
| Élevé/High                                      | 65–84   |
| Très élevé/Very high                            | 85–100  |

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. Les valeurs des cotes 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 6). La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices de vulnérabilité (Tableau 7).

Il est à signaler que les paramètres qui ne sont pas pris en compte dans la méthode SI par rapport aux méthodes DRASTIC et SINTACS sont les paramètres : conductivité hydraulique de l'aquifère, impact de la zone vadose, et type de sol. En effet, Ribeiro [25] 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 lithologie de l'aquifère (A), et cela par la considération des caractéristiques granulométriques de l'aquifère. Ribeiro [25] minimise également le rôle de la zone vadose, en se basant sur les travaux de Foster [16] et ceux de Vrba et Zoporozec [28], 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 le méthode SI à travers le paramètre « occupation des sols ». Plusieurs applications de cette méthode ont été effectuées [4,15,19,27]. Ces études ont montré une bonne corrélation entre les zones considérées vulnérables par cette méthode et les zones réellement contaminées.

### 3. Caractéristiques du site d'étude

La nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf est située dans une plaine côtière du Nord-Est tunisien, entre les latitudes 514,411 et 526,215 nord et les longitudes 431,657 et 440,351 est (UTM Ref). Cette nappe, qui couvre environ 35 km<sup>2</sup>, est localisée entre les cotes 0 et 60 m (Fig. 1). Les hauteurs des bordures montagneuses du bassin hydrogéologique, qui occupe une superficie de 50 km<sup>2</sup>, excèdent rarement les 300 m. Les principales villes et villages du bassin versant sont Metline, Ras Jebel, Raf Raf, Beni Ata et Souline.

La pluviométrie annuelle varie selon les zones du bassin versant de 495 mm à 638 mm [9], la température moyenne annuelle étant de l'ordre de 18 °C [22]. Plus de 200 puits sont actuellement exploités au niveau de la nappe, avec une profondeur du plan d'eau variant de 2,5 à 26 m. La lithologie de l'aquifère varie, selon les zones, entre l'argile sablo-gréseuse, le sable argileux, le grès ou le sable. La carte piézométrique de la nappe associée aux lignes de courant est représentée sur la Fig. 2.

Les ressources de cette nappe sont menacées par l'utilisation, de plus en plus importante, d'engrais chimiques dans le domaine agricole, ainsi que par les rejets domestiques et les rejets de la zone industrielle, bien que des stations d'épuration aient été annexées aux différentes usines au cours de ces dernières années, et que trois nouvelles stations d'épuration doivent entrer en fonction en 2007 dans les régions de Metline, de Ras Jebel et de Raf Raf. Par ailleurs, un début d'intrusion marine a commencé à intéresser la partie ouest de la basse plaine de Beni Ata et la dépression côtière de la région de Ras Jebel, à la suite d'une exploitation intensive de la nappe dans ces zones où le substratum imperméable se situe en dessus du niveau zéro de la mer [13], bien que ce problème commence à être résolu après l'installation d'un périmètre irrigué dans cette zone à partir des eaux provenant de l'oued Mejerda, situé en dehors du bassin versant.

L'identification des unités et des sous-unités hydrogéologiques, ainsi que l'évaluation des différents paramètres considérés dans les méthodes DRASTIC, SINTACS et SI, requièrent une bonne connaissance de la géologie, de l'hydrogéologie, de la pédologie, de la topographie, ainsi que de la météorologie. Les travaux effectués dans la zone d'étude, dans le domaine climatique [9,22], ont servi au calcul de la recharge nette de la nappe ; quant aux données lithologiques de la zone vadose et de la zone saturée, elles ont été extraites en se basant sur les données géologiques [5,10], hydrogéologiques [8,12] et de prospection électrique [13]. La combinaison des données lithologiques issues



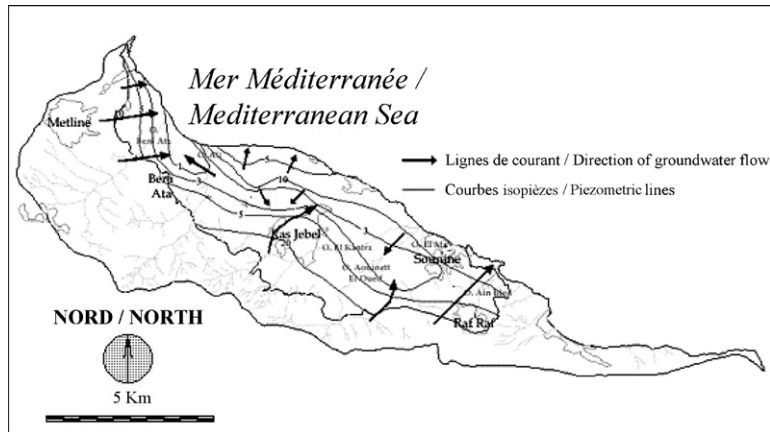


Fig. 2. Carte piézométrique de la nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf.

Fig. 2. Piezometric map of the phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–Raf Raf.

des logs stratigraphiques existant pour la zone d'étude avec les données des sondages électriques a permis une meilleure vision de la lithologie de la zone vadose et de la zone saturée [18]. Les données piézométriques ont permis de déterminer les données de profondeur du plan d'eau ; quant aux cartes des types de sols, les données pédologiques [3,17,23] ont permis de les déterminer. La carte des pentes a été extraite à partir des cartes topographiques couvrant la zone d'étude [24]. Enfin, la carte d'occupation des sols de la région d'étude [7] a permis de déterminer la carte spécifique d'occupation des sols relative à la méthode SI.

#### 4. Application des méthodes DRASTIC, SINTACS et SI

Les systèmes d'information géographique (SIG) représentent l'outil le plus adéquat pour l'application de ces méthodes paramétriques. Les deux logiciels ARC/

Info et Idrisi ont été utilisés dans le cadre du présent travail.

##### 4.1. Application de la méthode DRASTIC standard

La méthode DRASTIC a été déjà appliquée dans sa version « pesticides » [20] et dans sa version standard [21] dans la zone d'étude. La carte de vulnérabilité DRASTIC standard élaborée est basée sur la classification d'Engel et al. [11] ; elle est à l'échelle 1 :50 000 et montre l'existence des degrés de vulnérabilité suivants : faible, moyen, élevé (Fig. 3) avec 46 % des territoires à vulnérabilité faible, 48 % à vulnérabilité moyenne et 6 % à vulnérabilité élevée.

##### 4.2. Application de la méthode SINTACS

La zone d'étude se subdivise en deux parties, dont l'une coïncide avec le scénario « impact normal » et

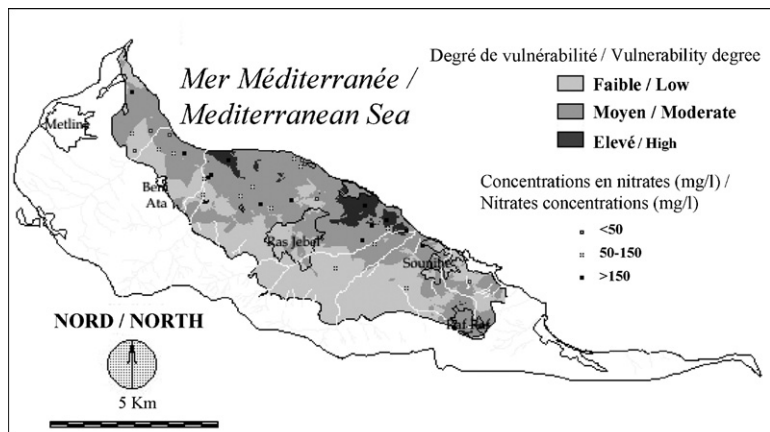


Fig. 3. Carte de vulnérabilité DRASTIC standard (classification d'Engel et al., [11]).

Fig. 3. Generic DRASTIC vulnerability map (classification of Engel et al., [11]).

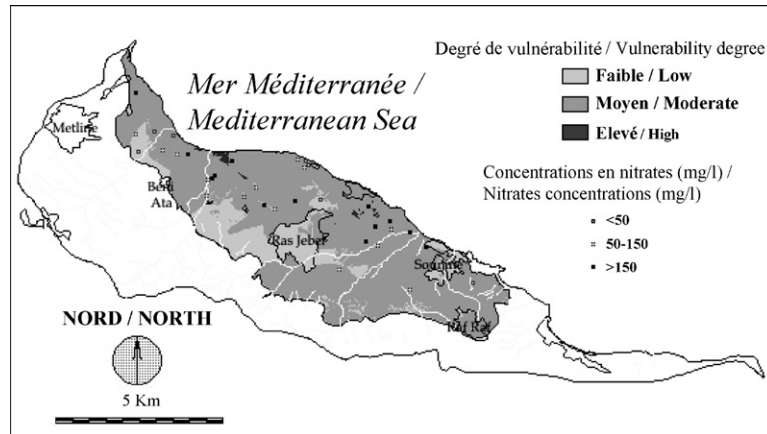


Fig. 4. Carte de vulnérabilité SINTACS.

Fig. 4. SINTACS vulnerability map.

l'autre avec le scénario « impact sévère » de la méthode SINTACS. Le premier scénario ne couvre que 7,5 % de la superficie totale de la nappe ; quant au deuxième, il occupe 92,5 % de la superficie totale. La carte de vulnérabilité finale obtenue (Fig. 4), à l'échelle 1:50 000, montre l'existence de trois degrés de vulnérabilité : faible, moyen et élevé. Les zones à faible vulnérabilité occupent 19 % de la surface totale de la nappe, celles à vulnérabilité moyenne occupent 80 %, et celles à vulnérabilité élevée n'occupent que 1 %.

#### 4.3. Application de la méthode SI

Les cartes relatives aux quatre paramètres *D* (profondeur du plan d'eau), *R* (recharge efficace de l'aquifère), *A* (lithologie de l'aquifère) et *T* (pente topographique du terrain) ont été déjà préparées lors de l'élaboration de la carte DRASTIC. La carte relative au

paramètre occupation des sols (OS) – la carte du facteur d'occupation des sols LU – a été préparée en se basant sur la carte numérique d'occupation des sols du gouvernorat de Bizerte [7]. La carte de vulnérabilité SI obtenue (Fig. 5), à l'échelle 1:50 000, montre l'existence de trois degrés de vulnérabilité dans la zone d'étude : faible, moyen et élevé, avec 14 % des territoires à vulnérabilité faible, 74 % à vulnérabilité moyenne et 12 % à vulnérabilité élevée.

#### 5. Vulnérabilité à la pollution par les nitrates, validité des résultats

La validité des méthodes de vulnérabilité DRASTIC standard [11], SINTACS [6] et SI [25], à la pollution par les nitrates, a été testée dans la nappe, en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la nappe et la distribution des classes de

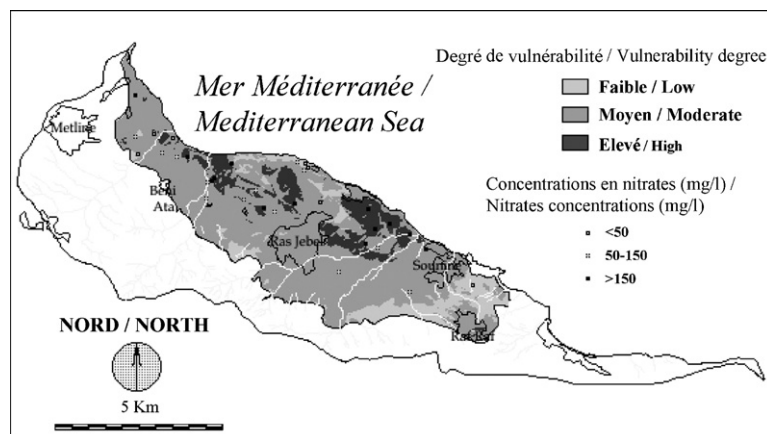


Fig. 5. Carte de vulnérabilité SI.

Fig. 5. SI vulnerability map.

Tableau 8

Coïncidence entre les concentrations en nitrates et les différentes classes de vulnérabilité des méthodes DRASTIC, SINTACS et SI

Table 8

Coincidence between nitrate concentrations and the different vulnerability classes of the DRASTIC, SINTACS and SI methods

|   |  | Nombre de valeurs<br>élevées de $[\text{NO}_3^-]$<br>( $> 50 \text{ mg l}^{-1}$ )/Number<br>of high values of<br>$[\text{NO}_3^-]$ ( $> 50 \text{ mg l}^{-1}$ ) | Nombre de valeurs<br>moyennes de $[\text{NO}_3^-]$<br>(comprises entre 50 et<br>$150 \text{ mg l}^{-1}$ )/Number of<br>moderate values of<br>$[\text{NO}_3^-]$ (stated between<br>50 and $150 \text{ mg l}^{-1}$ ) | Nombre de valeurs<br>faibles de $[\text{NO}_3^-]$<br>( $< 50 \text{ mg l}^{-1}$ )/<br>Number of low<br>values of $[\text{NO}_3^-]$<br>( $> 150 \text{ mg l}^{-1}$ ) |
|---|--|---|--|---|
| Carte de vulnérabilité<br>DRASTIC standard/<br>Generic DRASTIC<br>vulnerability map | Vulnérabilité élevée/<br>High vulnerability      | 5   | 8  | 0   |
|   | Vulnérabilité moyenne/<br>Moderate vulnerability | 0   | 8  | 6   |
|   | Vulnérabilité faible/<br>Low vulnerability       | 0   | 4  | 3   |
| Carte de vulnérabilité<br>SINTACS/SINTACS<br>vulnerability map                      | Vulnérabilité élevée/<br>High vulnerability      | 1   | 12   | 0   |
|   | Vulnérabilité moyenne/<br>Moderate vulnerability | 0   | 13   | 1   |
|   | Vulnérabilité faible/<br>Low vulnerability       | 0   | 5  | 2   |
| Carte de vulnérabilité<br>SI/SI vulnerability<br>map                                | Vulnérabilité élevée/<br>High vulnerability      | 11  | 2  | 0   |
|   | Vulnérabilité moyenne/<br>Moderate vulnerability | 1   | 12   | 1   |
|   | Vulnérabilité faible/<br>Low vulnerability       | 0   | 3  | 4   |

vulnérabilité. Stigter et al. [27] ont défini les concentrations faibles en nitrates comme étant celles inférieures à  $50 \text{ mg l}^{-1}$ , les concentrations moyennes comme étant celles comprises entre  $50$  et  $150 \text{ mg l}^{-1}$  et les concentrations élevées comme étant celles supérieures à  $150 \text{ mg l}^{-1}$ . Les mesures de  $\text{NO}_3^-$  disponibles dans la nappe de Ras Jebel sont au nombre de 34, dont 11 sont relatives à l'année 2003 et 23 à l'année 1993. Il est à noter que nous avons considéré que les valeurs de concentration en nitrates relatives à 1993 sont voisines des valeurs de 2003, car les conditions hydrogéologiques, climatiques et d'exploitation de la nappe, ainsi que l'occupation des sols, n'ont pas beaucoup changé depuis 1993. Les Figs. 3–5 représentent respectivement les cartes de vulnérabilité à la pollution DRASTIC standard, SINTACS et SI, associées à la répartition des trois classes de concentrations en nitrates.

Nous pouvons déduire des données du Tableau 8 que les valeurs de concentration en nitrates se répartissent comme suit :

- pour la carte DRASTIC standard, 13 valeurs sont supérieures à  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , dont cinq (soit 39 % de ces valeurs) coïncident avec la zone à vulnérabilité élevée et huit (soit 61 % de ces valeurs) avec la zone à

moyenne vulnérabilité. Quatorze valeurs sont comprises entre  $50$  et  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , dont huit coïncident avec la zone à vulnérabilité moyenne et les six autres avec la zone à vulnérabilité faible. Sept valeurs sont inférieures à  $50 \text{ mg l}^{-1}$ , parmi lesquelles trois coïncident avec la zone à vulnérabilité faible (soit 43 % de ces valeurs) et quatre (soit 57 % de ces valeurs) avec la zone à vulnérabilité moyenne ;

- pour la carte SINTACS, parmi les 13 valeurs supérieures à  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , une seule coïncide avec la zone à vulnérabilité élevée. Les 12 valeurs restantes (soit 92 %) coïncident avec la zone à moyenne vulnérabilité. Parmi les 14 valeurs comprises entre  $50$  et  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , 13 (soit 93 % de ces valeurs) coïncident avec la zone à moyenne vulnérabilité et une seule (soit 7 % de ces valeurs) avec la zone à vulnérabilité faible. Enfin, parmi les sept valeurs inférieures à  $50 \text{ mg l}^{-1}$ , deux (soit 29 % de ces valeurs) coïncident avec la zone à faible vulnérabilité et cinq (soit 71 % de ces valeurs) avec la zone à vulnérabilité moyenne ;
- enfin, pour la carte SI, parmi les 13 valeurs supérieures à  $150 \text{ mg l}^{-1}$ , 11 (soit 84 % de ces valeurs) coïncident avec la zone à vulnérabilité SI élevée et deux (soit 16 % de ces valeurs) avec la zone à vulnérabilité moyenne. Pour les 14 valeurs comprises entre  $50$  et

150 mg l<sup>-1</sup>, 12 (soit 86 % de ces valeurs) coïncident avec la zone à moyenne vulnérabilité, une seule valeur coïncidant avec la zone à vulnérabilité faible et une autre avec la zone à vulnérabilité élevée. Parmi les sept valeurs inférieures à 50 mg l<sup>-1</sup>, quatre (soit 57 % de ces valeurs) coïncident avec la zone à faible vulnérabilité, et les trois autres (soit 43 % de ces valeurs) avec la zone à vulnérabilité moyenne.

## 6. Conclusions

La comparaison des différentes cartes de vulnérabilité avec les mesures de nitrates disponibles dans les eaux de la nappe permet de montrer que la carte la plus valide quant à l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates est celle donnée par la méthode de vulnérabilité spécifique SI [25], avec un taux de coïncidence de 79 % entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité (27 valeurs sur 34). Ce taux de coïncidence peut être détaillé comme suit : un taux de coïncidence de 84 % entre les concentrations élevées en nitrates (supérieures à 150 mg l<sup>-1</sup>) et les zones à vulnérabilité élevée, un taux de coïncidence de 86 % entre les concentrations moyennes (comprises entre 50 et 150 mg l<sup>-1</sup>) et les zones à vulnérabilité moyenne, et un taux de coïncidence de 57 % entre les concentrations faibles (inférieures à 50 mg l<sup>-1</sup>) et les zones à faible vulnérabilité. 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. Pour la carte de vulnérabilité DRASTIC standard, elle montre un taux de coïncidence de 44 % (15 valeurs sur 34), détaillé comme suit : un taux de coïncidence de 39 % entre les concentrations élevées en nitrates et les zones à vulnérabilité élevée, un taux de coïncidence de 58 % entre les concentrations moyennes et les zones à vulnérabilité moyenne, et un taux de coïncidence de 43 % entre les concentrations faibles en nitrates et les zones à faible vulnérabilité. La carte de vulnérabilité SINTACS montre, quant à elle, un taux de coïncidence de 42 % (14 valeurs sur 34) détaillé comme suit : un taux de coïncidence de 8 % entre les concentrations élevées en nitrates et les zones à vulnérabilité élevée, un taux de coïncidence de 93 % entre les concentrations moyennes et les zones à vulnérabilité moyenne, et un taux de coïncidence de 29 % entre les concentrations faibles et les zones à faible vulnérabilité. Les méthodes DRAS-

TIC et SINTACS sont des méthodes de vulnérabilité intrinsèque qui ne tiennent compte, ni de la nature des polluants, ni des facteurs régissant la vulnérabilité spécifique, tels que l'occupation des sols.

Les résultats de la validation des cartes de vulnérabilité pourraient être plus complets si un nombre plus important de mesures de nitrates bien réparties sur la superficie de la nappe étudiée était effectué, ce qui nécessiterait une nouvelle campagne de mesure dans les eaux de la nappe. Par ailleurs, une campagne de mesures d'autres polluants serait également nécessaire dans le but de vérifier la validité des cartes de vulnérabilité établies face à ceux-ci.

## Références

- [1] A. Added, M.H. Hamza, Evaluation of the vulnerability in Metline aquifer (Northeast of Tunisia), ESRI user conference. San Diego, USA, 1999.
- [2] L. Aller, T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Petty, G. Hacket, 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), 1987.
- [3] Arrondissement des sols de Bizerte (ASB), Comptes rendus d'études pédologiques établis à Metline, Ras Jebel et Raf Raf, 1997–2000.
- [4] S. Batista, 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, 2004.
- [5] P.-F. Burollet, Étude géologique des bassins mio-pliocènes du Nord-Est de la Tunisie, Ann. Mines Géol. n°7, 1951 (82 p. + annexes + cartes 1:50 000).
- [6] M. Civita, La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e Pratica. Pitagora editrice, Bologne, Italie, 1994 (325 p.).
- [7] Commissariat régional du développement agricole de Bizerte (CRDA), Carte numérique d'occupation des sols du gouvernorat de Bizerte au 1:25 000, 1999.
- [8] Direction générale des ressources en eau (DGRE), Annuaire piézométrique de la Tunisie, 2002.
- [9] Direction générale des ressources en eau (DGRE), Annuaire pluviométriques de la Tunisie, 1982–2002.
- [10] A. El Ghali, N. Ben Ayed, Carte géologique au 1:50 000 de Metline, Publications du Service géologique de Tunisie, 2000.
- [11] B.A. Engel, K.C.S. Navulur, B.S. Cooper, L. Hahn, Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale, Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ. 235 (1996) (1996) 521–526.
- [12] M. Ennabli, Étude hydrogéologique de la plaine de Ras Jebel, rapport interne DGRE, réf 7/57, 1969 (134p. + annexes).
- [13] F. Essayeh, Apport de la méthode de prospection électrique à l'étude des problèmes d'intrusion marine dans la plaine de Metline Ras Jebel Raf Raf. DEA, université Tunis-2, FST, 1996 (100 p. + annexes).
- [14] European Community, CORINE Land cover-Guide technique, Office des publications officielles des Communautés européennes, 1993.

- [15] A. Francés, E. Paralta, J. Fernandes, L. Ribeiro, in : L. Ribeiro (Ed.), 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, Portugal, (2002), pp. 35–44.
- [16] S.S.D. Foster, Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in : W. van Duijvenbooden, H.G. van Waegeningh (Eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, 38, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, The Netherlands, 1987, pp. 69–86.
- [17] A. Fournet, A. Mouri, Reconnaissance pédologique des périmètres d'irrigation de Beni Ata et de Chaab Eddoud, rapport interne, direction des Sols de Tunisie, 1990.
- [18] M.T. Hussein, H.S. Awad, Delineation of groundwater zones using lithology and electric tomography in the Khartoum basin, central Sudan, C. R. Geoscience 338 (2006) 1194–1202.
- [19] J.-P. Lobo Ferreira, M.M. Oliveira, Groundwater vulnerability assessment in Portugal, Geofis. Int. 43 (4) (2004) 541–550.
- [20] M.H. Hamza, A. Added, A. Ben Mammou, S. Abdeljaoued, R. Rodríguez, 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, La Houille blanche, Revue internationale de l'eau (5) (2004) 86–94.
- [21] M.H. Hamza, A. Added, R. Rodríguez, S. Abdeljaoued, A. Ben Mammou, A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline–Ras Jebel–Raf Raf aquifer, Northern Tunisia), J. Environ. Manage. 84 (1) (2007) 12–19.
- [22] Institut de la météorologie nationale (INM), Tableaux climatologiques mensuels, station de Bizerte–Sidi Ahmed, 1993–2003.
- [23] H. Mansour, Carte pédologique de Beni Ata, Ras Jebel et Raf Raf au 1:12 500, Publ. direction des Sols de Tunisie, 1988.
- [24] Office de la topographie et de la cartographie (OTC), Carte topographique de la Tunisie au 1:25 000, feuilles de Metline S.O., Metline S.E., Ghar El Melh N.E., 1981.
- [25] L. Ribeiro, Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação, Nota interna (não publicada), ERSHA-CVRM, 2000.
- [26] N. Schnebelen, J.-P. Platel, Y. Le Nindre, D. Baudry, 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, 2002.
- [27] T.Y. Stigter, L. Ribeiro, A.M.M. Carvalho Dill, 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) (2006) 79–99.
- [28] J. Vrba, A. Zoporozec, Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, IAH International Contribution for Hydrogeology, Int. Assoc. Hydrol., Hannover, Germany, 1994 (131 p.).