

Vulnérabilité à La Pollution des Eaux Souterraines : Statique ou Dynamique ? Application à la Nappe de R'Mel (Maroc)

[Vulnerability of the Groundwater Pollution: Static or Dynamic? Application of R'Mel's Aquifer (Morocco)]

Hind ES SAOUINI, Mina AMHARREF, and Abdes Samed BERNOUSSI

Equipe Géoinformation et Aménagement du Territoire (GAT),
Faculté des Sciences et Techniques, B.P.416, Tanger, Maroc

Copyright © 2014 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: Vulnerability maps of groundwater pollution are basic tools for land use planning. However, some of the parameters taken into account by the different methods of vulnerability assessment may vary over time such as recharge, rainfall, groundwater level, etc. In the present work, through the application of the DRASTIC method to evaluate the intrinsic vulnerability of the porous aquifer R'Mel (Morocco), and using the data of three different years, we showed that intrinsic vulnerability varies from one year to another, i.e. that it is dynamic. For this we compared the years 2000, 2003 and 2005 selected for their different rainfall. The sensitivity maps obtained are different from one year to the next and the errors margins determined for each map are low and slightly different. Furthermore, the sensitivity analysis showed that the effect of parameters on the final vulnerability index changes from one map to another and that all parameters are necessary to apply the DRASTIC method. Analysis of these maps shows great variability in the spatial distribution of the degree of vulnerability, and that the proportions of areas occupied by the different classes vary also from one year to another. These vulnerability maps developed by the application of the model DRASTIC, are dynamic and therefore they can compromise the protection of resources.

KEYWORDS: Vulnerability, dynamic, DRASTIC, groundwater mapping, R'Mel's aquifer, Morocco.

RESUME: Les cartes de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines sont des outils de base en matière d'aménagement des territoires. Toutefois, certains paramètres pris en compte par les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sont susceptibles de varier dans le temps tels que la recharge, la pluviométrie, le niveau piézométrique, etc. Dans ce travail, à travers l'application de la méthode DRASTIC à l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère poreux de R'Mel (Maroc), et en utilisant les données relatives à trois années distinctes, nous avons montré que la vulnérabilité intrinsèque est variable d'une année à l'autre, c'est-à-dire qu'elle est dynamique. Pour cela nous avons considéré les années 2000, 2003 et 2005 choisies pour leurs pluviométries différentes. Les cartes de vulnérabilité obtenues sont différentes sur les trois années et les marges d'erreurs déterminées sur chacune des cartes sont faibles et légèrement différentes. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité effectuée a montré que l'effet des paramètres sur l'indice final de vulnérabilité change d'une carte à l'autre et que tous les paramètres sont nécessaires pour le modèle DRASTIC. L'analyse de ces cartes montre une grande variabilité de la répartition spatiale des degrés de vulnérabilité. Egalement les superficies occupées par les différentes classes varient sur les trois années. Ces cartes de vulnérabilité élaborées par l'application du modèle DRASTIC, s'avèrent dynamiques et par conséquent elles peuvent compromettre la protection des ressources.

MOTS-CLEFS: Vulnérabilité, dynamique, DRASTIC, eaux souterraines, cartographie, R'Mel, Maroc.

1 INTRODUCTION

Le terme de vulnérabilité intrinsèque est utilisé pour caractériser la sensibilité des eaux souterraines aux pollutions. Il prend en considération les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu naturel indépendamment de la nature du polluant et de l'occupation du sol. La vulnérabilité spécifique, quant à elle, est utilisée pour définir la sensibilité d'un aquifère vis à vis d'un polluant ou d'un groupe de polluants. Il prend donc en considération les propriétés spécifiques des polluants et leurs relations avec les différents facteurs influençant la vulnérabilité intrinsèque [1].

La vulnérabilité intrinsèque d'une eau souterraine est une notion relative du fait qu'elle dépend des caractéristiques du milieu physique naturel qui peuvent changer selon les particularités et les diversités des territoires [2]. Les facteurs intervenants pour sa détermination sont de deux types: ceux qui varient avec le temps (épaisseur de la zone non saturée, occupation des sols, recharge,...) et ceux qui ne varient pas (topographie, type de sol,...).

Plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité ont été élaborées à travers le monde, regroupées dans les trois classes suivantes:

- Les Méthodes analytiques et relations analogiques;
- Les Méthodes cartographiques ou comparatives;
- Les Méthodes à systèmes paramétrés ou méthodes paramétriques (empiriques).

Parmi les méthodes de cartographie à systèmes paramétrés, les méthodes de pondération et d'indexation des critères sont les plus utilisées à l'heure actuelle [3], [2]. Malgré qu'elles soient subjectives et présentent la vulnérabilité intrinsèque de manière qualitative, ces méthodes sont rapides et faciles à mettre en œuvre. Cependant, en l'absence de concept quantitatif basé sur des paramètres ayant une signification physique, la validation des cartes de vulnérabilité élaborées par ces méthodes reste encore problématique. Par ailleurs, la comparaison des cartes obtenues par l'application de plusieurs approches peut être considérée en partie comme technique d'évaluation de leurs fiabilités sachant que l'application de plusieurs approches sur un site donné conduit généralement à des résultats fort contrastés [4], [5].

Les auteurs de la plupart de ces méthodes considèrent que la vulnérabilité est indépendante du temps «statique» et que les conditions de protection naturelle des eaux souterraines ne varient pas [6], [7], [8]. En effet, la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère ne dépend que des facteurs physiques naturels qui assurent sa protection. Ces facteurs ont été jugés peu susceptibles de varier dans le temps [9]. Cependant d'autres paramètres, utilisés dans ces méthodes, sont susceptibles de changer dans le temps tels que l'épaisseur de la zone non saturée, recharge...etc.

L'objectif de ce travail est de montrer que la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère, évaluée par la méthode DRASTIC sur trois années distinctes, est dynamique et change en fonction du temps. Cette application a été réalisée sur l'aquifère poreux de R'Mel (Maroc) pour les années 2000, 2003 et 2005. Cet aquifère côtier, d'environ 245 km² de superficie, constitue la réserve la plus importante en eau souterraine de la partie Nord-Ouest du Maroc. Il se trouve menacé par des pollutions aussi variées que leurs sources du fait que la région a connu une intensification des activités agricoles et industrielles.

2 MATERIEL ET METHODES

La méthodologie suivie dans ce travail s'est basée sur une étude comparative des cartes de vulnérabilité interprétées, pour la nappe de R'Mel, par la méthode DRASTIC sur trois années hydrologiques.

Vu la grande variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique de la zone d'étude, nous avons opté pour la cartographie de la vulnérabilité sur trois périodes choisies pour leurs pluviométries typiques : d'une année sèche (2000), d'une année moyenne (2005) et d'une année humide (2003).

2.1 Description de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC est une méthode multicritère relativement simple d'application peu coûteuse et les paramètres qu'elle emploie sont disponibles et faciles à évaluer. Elle évalue les conditions de transfert selon lesquelles une pollution type peut atteindre la surface de la nappe. Elle se base sur l'évaluation de sept paramètres: **D** : Depth to water (profondeur de la surface piézométrique), **R** : net recharge (infiltration efficace) ; **A** : Aquifer media (formation aquifère); **S** : Soil media (type de sol); **T** : Topography (pente du terrain); **I** : Impact of the vadose zone (incidence de la zone non saturée) et **C** : hydraulic conductivity (conductivité hydraulique de l'aquifère).

Le modèle DRASTIC a été originalement développé aux États-Unis afin de permettre l'évaluation du potentiel de pollution des nappes d'eaux souterraines [10]. Le développement du modèle est basé sur quatre hypothèses majeures:

- Les sources de la contamination potentielles se trouvent à la surface du sol;
- Le contaminant présente la même mobilité que l'eau souterraine (Polluant parfaitement conservatif);
- La nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans la définition de la vulnérabilité (par conséquent, pour évaluer s'il y a un risque qu'une activité contamine l'eau souterraine dans une zone vulnérable, il faut également considérer la nature des contaminants et leur comportement dans l'environnement);
- Le territoire d'application couvre plus de 0,4Km².

L'indice DRASTIC est calculé par la sommation pondérée du produit des côtes et des poids pour chacun des paramètres en appliquant la relation (1) suivante :

$$I_{\text{DRASTIC}} = DnDp + RnRp + AnAp + SnSp + TnTp + InIp + CnCp \quad (1)$$

Où D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut

n : notation accordée à chaque paramètre;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Ce facteur de pondération (de 1 à 5) est attribué à chaque paramètre selon son importance relative dans l'estimation de la vulnérabilité de la nappe (Tab. 1). L'indice DRASTIC final obtenu permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. Il varie entre 23 et 226. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (I_{DRASTIC}) calculé est élevé.

Tableau 1. Poids et mode d'acquisition des sept paramètres de la méthode DRASTIC.

Paramètre	Poids	Type de données	Source de données
D	5	profondeur de la nappe (Janvier 2000, Mars 2003 et Janvier 2005)	ORMVAL et ABHL
R	4	Pluviométries et Températures moyenne mensuelles (2000,2003 et 2005)	ORMVAL et ABHL
A	3	Les données de forages	DGH et ABHL
S	2	Les données des Profils pédologiques	ORMVAL
T	1	Carte Topographique 1/50' 000 (Larache et Lalla Mimouna)	ORMVAL
I	5	Données de forages	DGH et ABHL
C	3	Les essais de pompages	DGH

2.2 Analyse de sensibilité et analyse de la méthode DRASTIC

La Méthode DRASTIC évalue la vulnérabilité en utilisant la somme pondérée de sept paramètres. Plusieurs scientifiques affirment que la subjectivité liée au système de notation et de pondération du modèle DRASTIC peut fortement affecter les résultats des indices de vulnérabilité [11]. D'autres révèlent que la vulnérabilité des eaux souterraines peut être élaborée sans faire appel à tous ces paramètres [12] et [13]. L'analyse de sensibilité fournit des informations précieuses sur l'influence des valeurs de notation et de pondération attribués à chaque paramètre et aide l'analyste à juger de l'importance des éléments subjectifs [3].

Deux tests de sensibilité peuvent être effectués : «the map removal sensitivity analysis» [14] et « the single parameter sensitivity analysis » [11]. Le premier test permet de mesurer la sensibilité de la carte de vulnérabilité, en supprimant successivement un ou plusieurs paramètres. Le second test est utilisé pour évaluer l'impact respectif des sept paramètres sur l'indice de vulnérabilité. Il est basé sur la comparaison entre les poids effectifs attribués aux paramètres et leurs poids théoriques. Le but de ce processus d'analyse est de faire un classement des paramètres les plus importants du modèle et auxquels une attention particulière doit être accordée lors de leur collecte ou de leur détermination sur le terrain.

L'analyse de la méthode DRASTIC à travers les sept paramètres utilisés, nous a permis d'identifier deux paramètres statiques, indépendants du temps, (topographie «T» et le type de sol «S») et cinq paramètres dynamiques, qui changent dans le temps, soit la profondeur de la nappe «D», l'infiltration efficace «R», la formation de l'Aquifère «A», l'Impact de la zone non saturée «I» et la conductivité hydraulique de l'aquifère «C»). En effet, la variation spatio-temporelle de la pluviométrie et de la température entraîne une variation de la lame d'eau infiltrée et par extension du niveau piézométrique. L'augmentation de la lame d'eau infiltrée diminue la profondeur à la nappe et augmente l'épaisseur de la zone saturée et en conséquence la variation des horizons qui la composent (la variation de la lithologie des horizons constituant la zone saturée, car la zone présente une grande hétérogénéité de facies). Cette variabilité engendrera en conséquence des variations dans le temps de ces cinq paramètres.

2.3 APPLICATION À LA NAPPE DE R'MEL

2.3.1 Présentation de la zone d'étude

La nappe de R'Mel est située au Nord Ouest du Maroc, elle fait partie du bassin du Bas-Loukoss au sud de la ville de Larache. Elle s'étend sous une superficie de 240 km² environ. Elle est limitée par l'océan Atlantique à l'Ouest, l'Oued Loukoss à l'Est et par les affleurements marneux Mio-Pliocène au Sud. Elle est drainée par trois Oueds: Sakh-Sokh, Smid El Ma et El Kihel (Fig. 1).

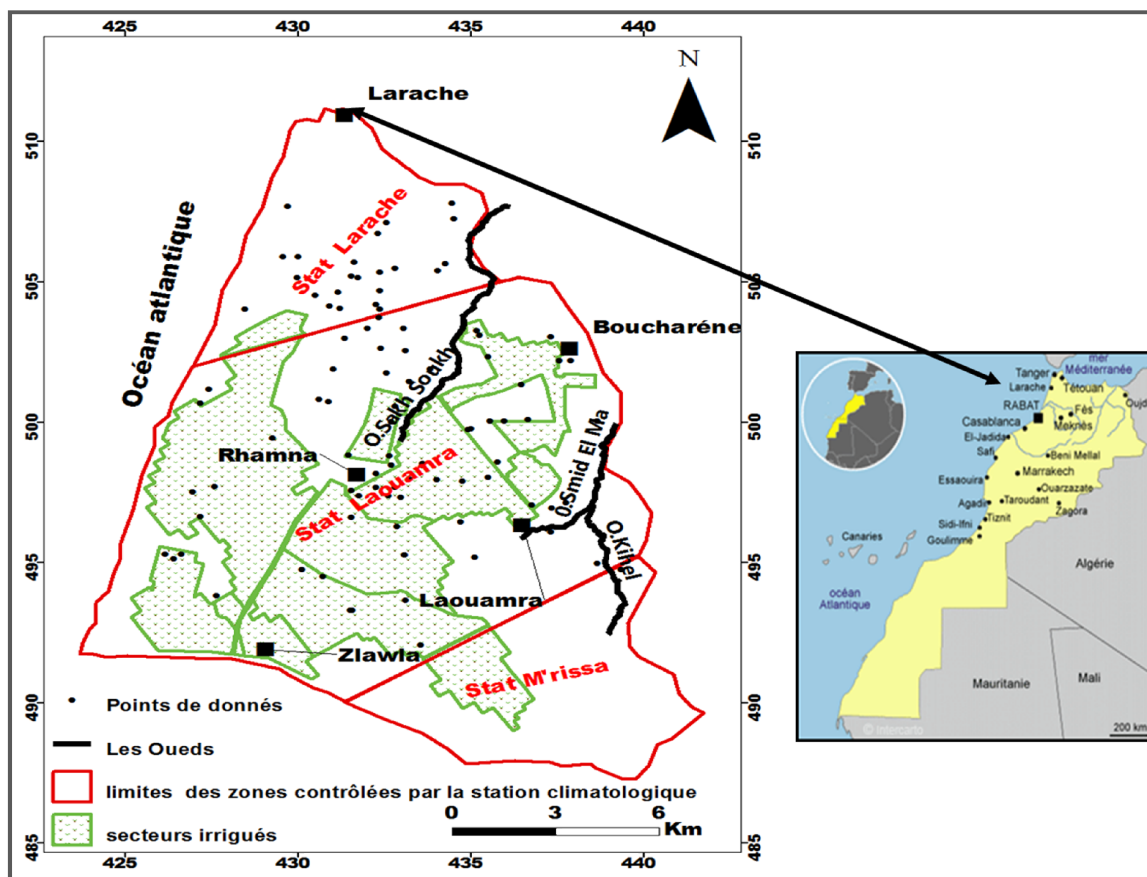


Fig. 1 Localisation de la nappe de R'Mel et la répartition des point de données

La zone d'étude peut être classée dans le domaine du climat méditerranéen subhumide caractérisé par un été chaud et sec et un hiver tempéré et humide. La température moyenne annuelle varie entre 11°C en hiver et 25°C en été et la pluviométrie annuelle moyenne est de 700mm répartie entre octobre et avril [15].

Les résultats des campagnes géophysiques et les données extraites des logs des forages ont mis en évidence deux unités aquifères poreuses constituées essentiellement de sables dunaires du Quaternaire récent, et des grès coquilliers du Plio-Villafranchien. Ces deux unités hydrogéologiques sont généralement séparées par une couche sablo-argileuses ou argileuses

du villafranchien de perméabilité et d'épaisseur variable. Le substratum de la nappe de R'Mel est constitué essentiellement par des marnes bleues du Mio-Pliocène [16].

2.3.2 Cartographie des paramètres DRASTIC

Pour montrer que la vulnérabilité à la pollution d'un aquifère est dynamique, nous avons besoin de données relatives à des périodes caractérisées par une nette variabilité du régime pluviométrique. Pour cette raison nous avons choisi les années 2000, 2003 et 2005. Ces données nous ont été fournies par l'Agence du Bassin hydraulique du Loukkos (ABHL) et l'Office Régionale de la Mise en Valeur Agricole de Loukkos (ORMVAL).

2.3.2.1 Paramètres statiques

➤ *Type de Sol*

Le sol a un impact considérable sur la quantité et la qualité d'eau qui pourra s'infiltrer pour atteindre la nappe et par voie de conséquence sur la migration verticale des polluants à travers la zone non saturée [17]. Il influence ainsi le temps de migration des contaminants vers la nappe [18]. L'étude pédologique des sols du plateau du R'Mel réalisée par l'Office Nationale des Irrigations en 1963, a montré que les sols de la zone étudiée font partie de deux classes selon leur matériau original :

- a- sols peu évolués sur roche-mère complexe, caractérisée en surface par une texture sableuse et la présence à une profondeur variable d'un squelette gréseux assez dense (les formations dunaires anciennes) ;
- b- sols rouges méditerranéens, formés essentiellement de sable fin sur roche mère sableuse non calcaire.

En l'absence d'une carte pédologique de toute la zone d'étude, une carte des sols a été élaborée par interpolation IDWA (Inverse Distance Weighted Averaging) en tenant compte des données pédologiques au niveau des seize profils types choisis dans la zone. La carte obtenue montre que le sol peu évolué est le plus représenté : il occupe 78% de la superficie totale et recouvre la majeure partie de l'aquifère. Le sol méditerranéen (sable fin) ne couvre que 22%, et se localise au Nord et au Nord Est de la plaine entre les oueds Sakh Soukh et Smid El Ma.

➤ *Topographie*

La digitalisation des courbes de niveau et des points cotés, que nous avons réalisée et à partir des cartes topographiques aux 1/50'000 de Larache et de Lalla Mimouna, a servi à la génération du modèle numérique de terrain (MNT), au pas de 88 m (sous le format TIN). La carte obtenue montre que la quasi-totalité de la région est caractérisée par une très faible pente comprise entre 0 et 6% (Fig. 2).

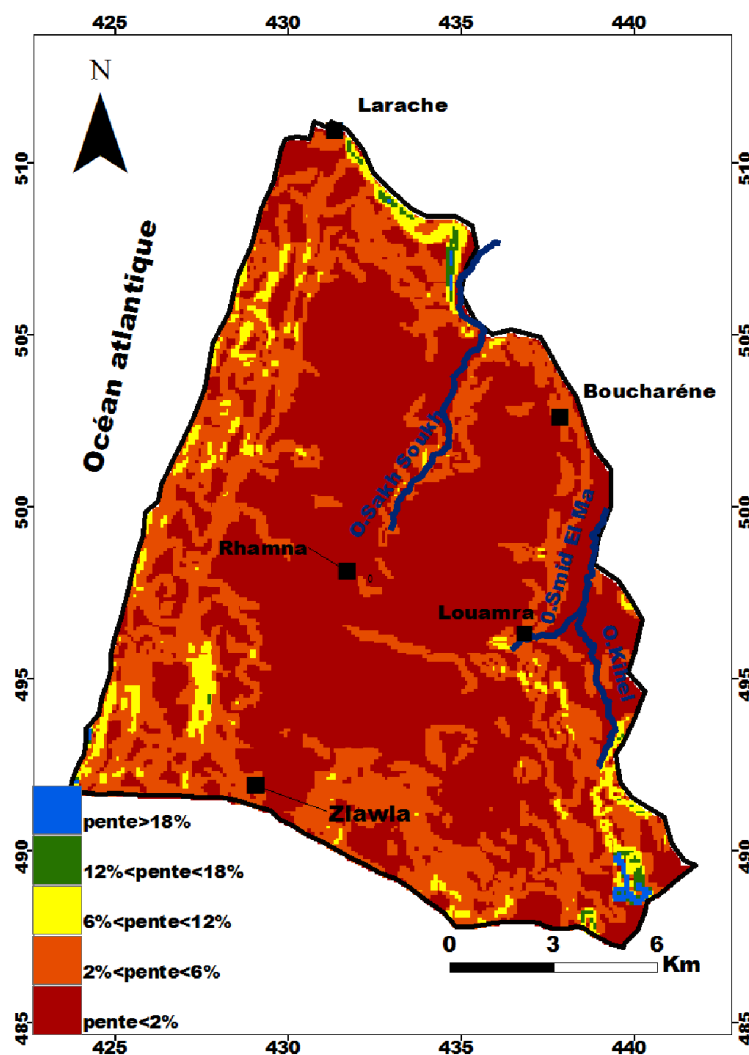


Fig. 3. Carte de pente de la nappe de R'Mel

2.3.2.2 Paramètres dynamiques (dépendants du temps)

Pour les cinq paramètres dépendants du temps, nous avons élaboré pour chaque paramètre trois cartes correspondant aux trois années hydrogéologiques choisies : 2000, 2003 et 2005.

➤ *Profondeur de la nappe (épaisseur de la zone non saturée)*

Le paramètre profondeur de la nappe représente la distance verticale traversée par un contaminant depuis la surface du sol jusqu'à la nappe ; il correspond à l'épaisseur de la zone non saturée. Ce paramètre a été obtenu par interpolation des données mesurant la profondeur du niveau de l'eau en période des hautes eaux sur les trois années (janvier 2000, Mars 2003 et Janvier 2005). La variation spatio-temporelle de ce paramètre est représentée, selon sept classes avec les pourcentages de leurs superficies, dans le Tab. 2.

➤ *Recharge*

La recharge de la nappe s'opère principalement par l'infiltration des précipitations et des eaux d'irrigation. Elle est déterminée par le bilan hydrique sur une année hydrologique (de septembre à Aout). Pour ce faire, nous avons utilisé les données de trois stations climatologiques (Larache, Laouamra et M'rissa) (Fig. 1) correspondant aux trois années choisies (2000, 2003 et 2005). Ce bilan fait intervenir la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle et réelle (calculée par la méthode de Thornthwaite) et la réserve facilement utilisable (RFU), estimé par la formule de Hallaire. Il convient de noter

que le ruissellement de surface a été négligé en raison de la nature sableuse du sol et des faibles valeurs de pentes de la nappe de R'Mel. Les cartes de recharge de la nappe ont été obtenues par interpolation IDWA des valeurs d'infiltration efficace estimées en chacun des points de données. Les retours des eaux d'irrigation n'ont pas été pris en compte dans cette partie de l'étude, car nous n'avons pas pu obtenir de données fiables pour chacune des années considérées dans cette étude. Les cartes de recharge obtenues pour les trois années ne sont pas similaires et les superficies occupées par les différentes classes de la recharge diffèrent d'une année à l'autre (Tab. 2 et Fig. 3).

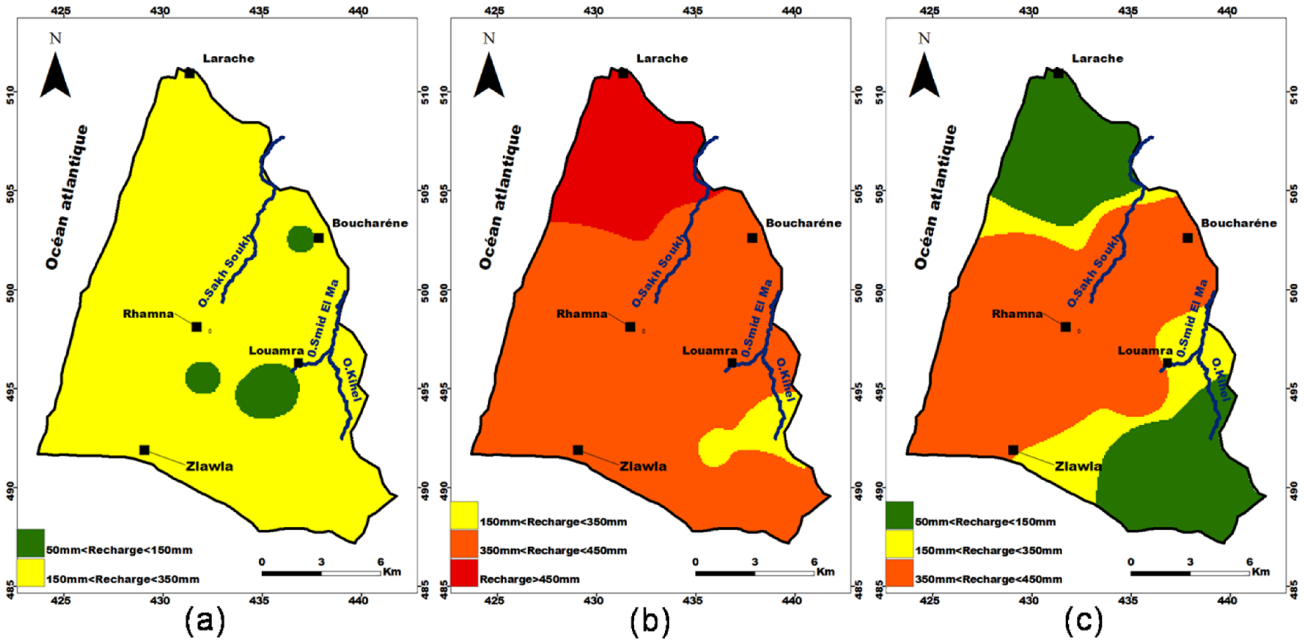


Fig. 3 Cartes de recharge de la nappe de R'Mel (a) : en 2000 ; (b) : en 2003 et (c) : en 2005

➤ **Impact de la zone non saturée et de la formation aquifère**

Ces deux paramètres ont été obtenus par corrélation et interpolation IDWA des données lithologiques de 98 forages et des niveaux d'eau des piézomètres réalisés dans la zone d'étude. Le calcul de la note finale accordée à ces deux paramètres résulte de l'application de la relation (2) suivante:

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{(Ni \times Ei)}{Et} \tag{2}$$

N : notation finale donnée à un forage;

Ni : notation de la formation i par la méthode DRASTIC;

n : nombre de couches de la zone saturée;

Ei : épaisseur de la formation i;

Et : épaisseur totale de la zone saturée;

➤ **Conductivité hydraulique**

Ce paramètre dépend de la nature et de la texture des matériaux composant l'aquifère. Plus un réservoir comporte d'éléments détritiques grossiers, plus sa perméabilité est élevée et par conséquent la pollution peut se propager plus facilement dans l'aquifère [19]. Toute variation du niveau piézométrique engendrera une variation dans la lithologie de l'aquifère et de son épaisseur. Par conséquent, la conductivité hydraulique de l'aquifère pourrait changer en fonction du temps. Toutefois, nous ne disposons pas de données assez représentatives pour les trois années choisies pour pouvoir élaborer une carte significative de ce paramètre. Par ailleurs, l'interpolation IDWA des données ponctuelles de tous les essais

de pompage réalisés dans cette zone d'étude, nous a permis d'obtenir une répartition spatiale moyenne de la conductivité hydraulique de la nappe de R'Mel (paramètre «C» de DRASTIC). Ces essais donnent des valeurs de conductivité comprises entre 3.10^{-6} et $3,7.10^{-4}$ m/s [20].

3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Cartes de vulnérabilité de la nappe de R'Mel

Les cartes de vulnérabilité élaborées sur les trois années (2000, 2003 et 2005), par la combinaison des sept cartes thématiques conformément à l'application de la méthode DRASTIC montrent qu'il y a un changement dans la répartition spatiale des classes de vulnérabilité de la nappe d'une année à l'autre (Fig. 4 ; Tab. 2).

Tableau 2. *Variation des classes de la Profondeur de la nappe, de la recharge et des pourcentages des superficies occupées par les différentes classes de la nappe de R'Mel pour chaque année*

Classes de la profondeur de la nappe	Superficies en %			Classes de recharge	Superficies en %			Valeur de l'Indice DRASTIC	Classe de Vulnérabilité	Superficies en %		
	2000	2003	2005		2000	2003	2005			2000	2003	2005
< 1,5 m	34%	12%	18%	50 – 150	5%	–	32%	ID < 120	Faible	5%	4%	12%
1,5 à 4,5m	23%	33%	28%	150 - 350	95%	4%	15%	120 < ID < 140	Moyenne	28%	17%	32%
4,5 à 9m	15%	21%	15%	350 – 450	–	78%	53%	140 < ID < 160	Forte	66%	61%	47%
9 à 15m	18%	16%	21%	450 - 650	–	18%	–	ID > 160	Très Forte	1%	18%	9%
15 à 22m	5%	11%	9%									
22 à 30m	3%	1%	3%									
> 30m	2%	6%	6%									

Les zones de forte à très forte vulnérabilité occupent la majorité de la superficie de la plaine avec 79% pour l'année 2003 (l'année humide) (fig. 4 (b)). Elles gouvernent principalement le centre, le Sud-Est, le Sud-Ouest et l'extrême Nord de la plaine. Cependant, pour les deux autres années, ces classes se serrent pour n'affecter que 67% et 56% de la surface totale de la nappe respectivement en 2000 et 2005 (fig. 4 (a) et (c)). Les zones de faible et de moyenne vulnérabilité occupent respectivement 33%, 21% et 44% de la superficie totale de la nappe pour les années 2000, 2003 et 2005. Pour la carte de 2005 (fig. 6 (c)), ces zones occupent une large superficie au Nord de la plaine dans la zone située entre Boucharéne, Larache et la zone côtière, et une faible superficie située au Sud-Est en limite de la nappe d'Ouled-Ogbane. Toutefois, ces deux classes (faible et moyenne) régressent au profit de la classe de forte vulnérabilité pour les deux autres années 2000 et 2003.

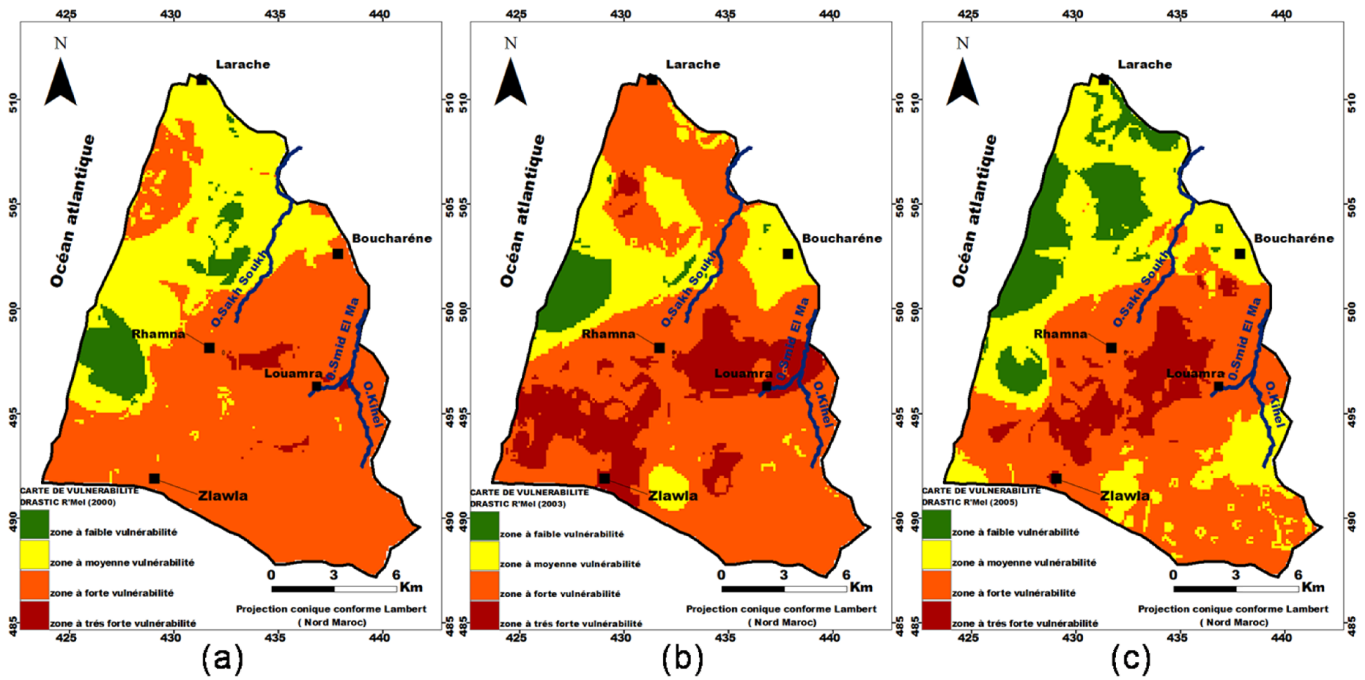


Fig. 4. : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la nappe de R'Mel par la méthode DRASTIC (a) : 2000 ;(b) : 2003 et (c) : 2005

Les incertitudes sur les cartes de vulnérabilité ont été estimées en se basant sur le rapport des sommes des incertitudes des sept paramètres sur l'indice moyen de DRASTIC [21]. Les marges d'erreur déterminées pour chacune des cartes sont faibles et légèrement différentes d'une année à l'autre (Tab. 3). Elles varient entre 3,3 %, 3,8% et 4,1% pour les cartes réalisées respectivement en 2000, 2003 et 2005.

Tableau 3. Estimation des incertitudes sur les paramètres et les cartes DRASTIC en 2000, 2003 et 2005

	D	R	A	S	T	I	C	TOT
coefficient de pondération	5	4	3	2	1	5	3	23
Incertitude_des paramètres_DRASTIC en 2000	1,35	0,68	0,249	1,12	0,1	0,65	0,57	4,719
ID_DRASTIC_2000_Moyen	38,45	19,6	18,45	16,68	9,36	34,9	6,84	144,28
Incertitude_Carte_DRASTIC_2000								3,27%
Incertitude_des paramètres_DRASTIC en 2003	2	1,08	0,252	1,12	0,1	0,6	0,57	5,722
ID_DRASTIC_2003_Moyen	34,4	29,04	18,45	16,68	9,36	35,05	6,84	149,82
Incertitude_Carte_DRASTIC_2003								3,82%
Incertitude_des paramètres_DRASTIC en 2005	1,45	1,88	0,198	1,12	0,1	0,5	0,57	5,818
ID_DRASTIC_2005_Moyen	33,8	21,64	18,42	16,68	9,36	34,7	6,84	141,44
incertitude_Carte_DRASTIC_2005								4,11%

L'analyse des surfaces par classes d'indice de vulnérabilité, faite par comparaison des cartes deux à deux, a révélé que les deux cartes 2000 et 2003 et les deux cartes 2005 et 2003 ont été évaluées par un indice identique sur 55% de la superficie totale de la nappe. Alors que les deux cartes de 2000 et 2005 présentent un indice identique sur 60% de la surface. La proportion d'accord entre les trois cartes a été évaluée par le test de Kappa [22]. Ce test a montré que les valeurs d'accord observées indiquent un degré d'accord modéré entre les trois cartes (faite deux à deux). Tandis que les valeurs d'accord non dues au hasard (coefficient de Kappa) sont faibles pour les deux cartes 2003 et 2000 (k=0,17) et moyenne pour les deux cartes 2003 et 2005 (k=0,29) et les deux cartes 2000 et 2005 (k=0,31).

3.2 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité réalisée par la suppression à chaque fois d'un paramètre, a révélé que généralement ce sont les paramètres profondeur à la nappe, impact de la zone non saturée et conductivité hydraulique qui affectent le plus la variation de l'indice de vulnérabilité pour les années 2000 (année sèche) et 2005 (année moyenne). Pour l'année humide 2003, c'est la suppression des paramètres conductivité hydraulique, profondeur à la nappe et recharge qui cause une grande variation de l'indice de vulnérabilité. En revanche, le modèle DRASTIC est sensible à la suppression du paramètre «Topographie» pour les trois cartes. Ce résultat est dû au fait que ce paramètre est statique et son effet est identique pour les trois années. La suppression du paramètre formation de l'aquifère «A» affecte moins la variation de l'indice de vulnérabilité pour les deux cartes de 2003 et 2005 avec des indices de variation moyenne respective de 0,34 et 0,37. Toutefois, pour la carte réalisée en 2000 (année sèche), c'est le paramètre recharge de la nappe «R» qui affecte moins la variation de l'indice de vulnérabilité avec une valeur moyenne de 0,19 (Tab. 4).

Tableau 4. Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis »

Paramètre supprimé	Moyenne en 2000	Moyenne en 2003	Moyenne en 2005
D	1,96	1,52	1,62
R	0,19	0,99	0,75
A	0,32	0,34	0,37
S	0,5	0,62	0,47
T	1,3	1,41	1,25
I	1,7	0,79	1,92
C	1,5	1,61	1,46

La suppression successive, un par un, des paramètres ayant une faible influence sur la variation de l'indice de vulnérabilité n'a montré aucune cohérence dans la tendance des moyennes de l'indice de variation (Tab. 5). Ce qui montre que les sept paramètres sont nécessaires dans le modèle DRASTIC, comme il a été signalé dans certaines études antérieures [11], [23], [24], [25], [26], [27].

L'application du test "the single parameter sensitivity analysis" a montré que les paramètres profondeur à la nappe, impact de la zone non saturée, type de sol et topographie, sont les paramètres qui influencent plus la vulnérabilité. En effet, leurs poids effectifs moyens sont supérieurs à leur poids théoriques (Tab. 6). D'autre part, le poids effectif (19,59%) du paramètre recharge, pour l'année humide (2003), est supérieur à son poids théorique (17,39%).

Tableau 5. Les statistiques du test « Map removal sensitivity analysis »

Les paramètres utilisés	Moyenne 2000	Les paramètres utilisés	Moyenne 2003	Les paramètres utilisés	Moyenne 2005
D, A, S, T, I et C	0,19	D, R, S, T, I et C	0,34	D, R, T, I, C et S	0,37
D, T, I, C et S	0,53	D, R, T, C et I	0,98	D, T, I, C et R	0,92
D, I, C et T	1,31	D, T, C et R	1,3	D, I, C et T	1,35
D, I et C	4,14	D, C et T	3,69	D, I et C	3,39
D et C	10,7	D et C	3,39	D et I	9,17
D	10,57	C	12,76	I	9,33

Tableau 6. Les statistiques du test « the single parameter sensitivity analysis »

Paramètre	Poids Théorique	2000		2003		2005	
		Moyenne	Standard Déviation	Moyenne	Standard Déviation	Moyenne	Standard Déviation
D	21,73%	26,07%	7,23	22,39%	7,74	23,21%	8,54
R	17,39%	13,72%	1,83	19,59%	3,27	15,68%	4,9
A	13,04%	12,89%	1,72	12,43%	1,75	13,19%	2,24
S	8,69%	11,64%	2	11,20%	1,88	11,94%	2,25
T	4,34%	6,53%	1,04	6,29%	1	6,67%	1,09
I	21,73%	24,34%	2,73	23,56%	2,86	24,77%	3,27
C	13,04%	4,81%	2,56	4,57%	2,21	4,91%	2,52

4 CONCLUSION

Dans ce travail nous avons réalisé des cartes de vulnérabilité de la nappe de R'Mel par l'application de la méthode DRASTIC sur trois années différentes 2000, 2003 et 2005. Ces années ont été choisies principalement pour leur régime pluviométrique contrasté. L'analyse des cartes obtenues pour la nappe de R'Mel a montré une grande variabilité de la répartition spatiale des degrés de vulnérabilité d'une année à une autre. La carte de vulnérabilité élaborée pour l'année humide paraît la plus sécurisante.

À travers cette application, ce travail a l'originalité de montrer que la vulnérabilité d'un aquifère est dynamique : elle est variable dans le temps. Ceci s'explique par le fait que certains paramètres pris en compte par la méthode DRASTIC évoluent aussi avec le temps (profondeur à la nappe, recharge, impact de la zone non saturée, lithologie de l'aquifère et conductivité hydraulique). Ces variations peuvent être dues en l'occurrence aux variations du régime pluviométrique qui est lié aux conditions climatiques. Pour cela, les cartes de la vulnérabilité, élaborées par des méthodes dont certains paramètres sont susceptibles de varier dans le temps, doivent être utilisées avec beaucoup de prudence, car elles peuvent compromettre la protection des ressources en eaux.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Office Régionale de Mise en Valeur Agricole du Loukkos (ORMVAL) Ksar El Kbir, Maroc, suite à une convention entre la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger et L'ORMVAL.

REFERENCES

- [1] D. Daly, A. Dassargues, D. Drew, S. Dunne, N. Goldscheider, S. Neale, I.C. Popescu and F. Zwahlen, " Main concepts of the European approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping", *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 340-345, 2002.
- [2] J. Vrba and A. Zaporozec, *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. IAH, Vol. 1, 131p, 1994
- [3] R.C. Gogu and A. Dassargues, "Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods", *Environnement Geology*, 39(6): 549-59, 2000.
- [4] R. C. Gogu, and A. Dassargues, "Intrinsic vulnerability maps of a karstic aquifer as obtained by five different assessment techniques: comparison and comments", *7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, Besançon, France, pp. 161-166, 2001.
- [5] R.C. Gogu, V. Hallet and A. Dassargues, "Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques: Application to the Néblon river bassin (Belgium)", *Environmental Geology*, 44: 881-892, 2003.
- [6] D. Allier, B. Vittecoq et V. Mardhel, *Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique*, BRGM/RP-56283-FR, 2008.
- [7] J.C. Martin, *Vulnérabilité intrinsèque des aquifères et des zones humides de la région Centre*. Note de synthèse, Rapport BRGM/RP-54299-FR, 21 p., 13 ill, 2005.

- [8] N. Schnebelen, J. P. Platel, Y. Lenindre et 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, France, SI : BRGM, 2002.
- [9] J.J. Seguin et D. Baudry, Cartographie de la vulnérabilité des systèmes aquifères de l'Aquitaine, Rapport BRGM/RP-52042-FR, 53 p, 2002.
- [10] L. Aller, T. Bennet, J.H. Lehr, R. Petty et G. Hackett, DRASTIC: Standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S Epa-600/2-87-035, 455 P, 1987.
- [11] P. Napolitano et A.G. Fabbri, Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment DRASTIC & Sintacs. Hydro Gis 96: application of geographic information systems in hydrology and water resources management, Vienna, No. 235, pp. 559-566, 1996.
- [12] C. Barber, L.E. Bates, R. Barron et H. Allison, " Assessment of the relative vulnerability of groundwater to pollution: a review and background paper for the conference workshop on vulnerability assessment" *Austral Geol & Geophys*, 14 (2/3), 147-154, 1993.
- [13] J.W. Merchant, "Gis-based groundwater pollution hazard assessment a critical review of the DRASTIC model", *Photogrammetry & Remote Sensing*, 60(9), 1117-1127, 1994.
- [14] W.A. Lodwick, W. Monson et L. Svoboda, " Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis", *International Journal Of Geographical Information Systems*, 4(4), pp 413-428, 1990.
- [15] ORMVAL- Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Loukkos (ORMVAL) (2004). Bulletin de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Loukkos, Altopress, Tanger.
- [16] M. Messaoud, Rapport hydrogéologique du bassin du Bas-Loukkos. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 111 pages, 1963.
- [17] E. Sener, S. Sener and A. Davraz, "Assessment of aquifer vulnerability based on Gis and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey)", *Hydrogeology Journal*, 17(8):2023–2035, 2009.
- [18] A. H. al Hallaq et B.S.A. Elaihs, " Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip-Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment", *Arabian Journals of Géosciences*, DOI 10.1007/s12517-011-0284-9, 2011.
- [19] A. Alassane, Étude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle, Thèse de Doctorat, Université Dakar, Sénégal, 185p, 2004.
- [20] DGH- Direction Générale D'hydraulique (DGH), Étude Hydrogéologique de La Nappe de R'Mel (Région de Larache). 87/DRH/003/ SHG, 1987.
- [21] B. Dibi, K.L. Kouassi, K.I. Kouamé, K.S. Konan, M. Soumahoro, A.B. Konan-Waidhet et D. Gnakri, " Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS: Cas de la ville de M'Bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2, no. 4, pp. 464-476, April 2013.
- [22] P. Bernard, Théorie et application du coefficient de Kappa. Thèse de Doctorat, Université Laval, Canada, ISBN: 0-315-85514-2, 1993.
- [23] A. Aït Sliman, A. Fekri, N. Laftouhi et K. Taj Eddine, "Utilisation des systèmes d'information géographique et du modèle DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans la plaine de Berrechid, Maroc", *Géographia Technica*, no. 2, pp. 81-93, 2009.
- [24] I.S. Babiker, A.A.M. Mohamed, T. HIYAMA and K. KATO, " A Gis-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan", *Science of the Total Environment*, 345:127–140, 2005.
- [25] F. Hasiniaina, J. ZHOO and L. GUOYI, "Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamtsag basin, Mongolia using DRASTIC model", *Journal of American Sciences*, 6(11), 2010.
- [26] A. Rahman, "A Gis DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India", *Applied Geography*. Vol. 28(1), pp. 32-53, 2008.
- [27] R. Taaki, M. Khayat Kholghi et E. Roushani, "Sensitivity analysis for drastic overlay index method in groundwater vulnerability process (case study: Ghazvin plain)", *Journal of Range and Watershed Management*, 62(3): 362-355, 2009.