



UTILISATION DE LA GEOSTATISTIQUE DANS L'ETABLISSEMENT DE LA CARTE DE VULNERABILITE INTRINSEQUE D'UNE NAPPE SUPERFICIELLE A UN POLLUANT PAR INFILTRATION VERTICALE. CAS DE LA NAPPE SUPERFICIELLE DE LA PLAINE OUEST D'EL HADJAR. ANNABA. ALGERIE.

N. Zenati, D. Messadi.

Laboratoire de Sécurité Environnementale et Alimentaire,
Université Badji Mokhtar – Annaba, B.P. 12 – 23000, Annaba, Algérie

E Mail : Zenati_nouredine@yahoo.fr d_messadi@voila.fr

Reçu le : 25/07/09

Accepté le : 21/10/09

RESUME

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer comment la vulnérabilité intrinsèque permet de prévoir le transfert vers l'eau souterraine d'un contaminant provenant de la surface. Cette évaluation est basée sur dix (10) critères concernant les caractéristiques du sol, des zones non saturée et saturée.

L'utilisation de la géostatistique (logiciel ISATIS [release 6.0 ; June 2006]) a permis d'analyser la structure et la variabilité spatiale du coefficient de vulnérabilité intrinsèque. Ce dernier est obtenu par la sommation des notations de chacun de ces dix (10) critères.

Une application à la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar : plaine à vocation essentiellement agricole (7980 ha) et entourée par des sources de pollution naturelle « eau saline du lac Fetzara » et anthropiques « industries, décharge, eaux usées,... », donne une carte de vulnérabilité caractérisée par trois types de sensibilité différente. Les deux classes de sensibilité assez forte à forte prédominent la totalité de la superficie de la plaine.

Mots clés : *Vulnérabilité intrinsèque. Nappe. Sol. Pollution. Géostatistique.*

SUMMARY

The main object of this study is to evaluate how the intrinsic vulnerability makes it possible to foresee the transfer towards subterranean water of a contaminant coming from surface. This evaluation is based on 10 criteria concerning the characteristics of the ground, and those of the unsaturated and saturated zones.

The use of geostatistics (software ISATIS [release 6.0; June 2006]) allowed to analyse the structure and the space variability of the intrinsic coefficient of vulnerability. The latter is obtained by summing the individual notation of each the 10 criteria.

This approach was applied to the surface table water of the Western plain of El Hadjar, which primarily vocation is agriculture (7980 ha), and which is surrounded by natural (saline water of the lake Fetzara) and anthropogenic (industries, discharge, waste waters...) sources of pollution; give a chart of vulnerability characterized by three types of different sensitivity. The two classes of rather strong sensitivity to strong prevail the totality of the surface of the plain.

Key words: *Intrinsic vulnerability. Water table. Ground. Pollution. Geostatistics.*

1. INTRODUCTION

La préservation de l'environnement est devenue ces dernières années une priorité nationale. La protection des nappes aux différentes pollutions rend nécessaire l'analyse du pouvoir épurateur des sols.

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution. Cette pollution est maximale dans les plaines alluviales fortement urbanisées et industrialisées.

Les problèmes posés par la protection des nappes sont à l'origine de nombreux travaux destinés à étudier le lessivage de l'azote (Burns, 1976), estimer les reliquats azotés (Malol-Duboin, 1980 ; ITCF, 1985 ; Laurent et Castillon, 1987), analyser les transferts hydriques dans le sol (Morlet, 1990 ; Catherine Cam, 1996), afin de classer les milieux en fonction des risques de lessivage (Sébilotte et Meynard, 1990 ; Delouée, 1988) et de la sensibilité du milieu à l'infiltration (Edeline, 1989, 1990)[4], utilisation du Système d'Information Géographique pour caractériser la vulnérabilité et la sensibilité à la pollution des nappes souterraines[5].

Une étude a été réalisée sur la nappe de la plaine Ouest d'El Hadjar. Cette plaine à vocation agricole est entourée par des sources de pollution naturelle « eau saline du lac Fetzara » et anthropiques « industries, décharge, eaux usées,... ». Cette situation indique un danger territorial élevé avec risque de pollution de la nappe superficielle.

2. PRESENTATION DE LA REGION

2.1. Situation géographique

La plaine Ouest d'El Hadjar, qui s'étend sur une superficie de 7980 ha, est située au sud-ouest de la wilaya de Annaba (Nord-Est de l'Algérie). Elle est bordée au nord par djebel Beliéleta, au sud par le massif gréseux de Ain Berda, à l'ouest par le Lac Fetzara et à l'est par l'oued Seybouse (figure 1).

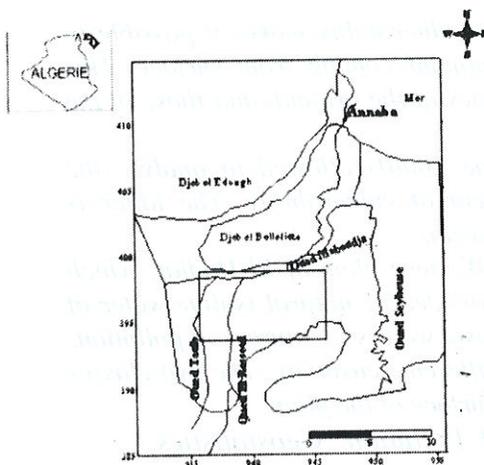


Figure 1. Carte de situation géographique

Elle est connue par sa grande activité agricole (agrosylvo-pastorale) et industrielle : celle-ci se positionne surtout en bordure de l'oued Meboudja (complexe sidérurgique, zone industrielle de Chaiba) (figure 2).

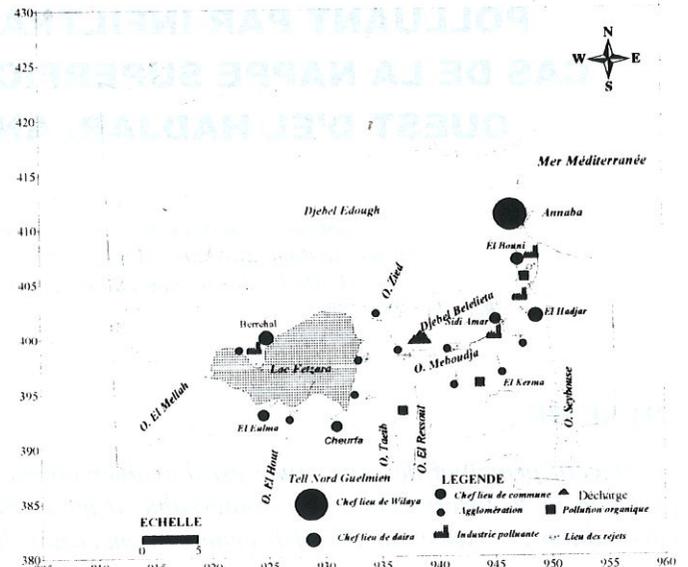


Figure 2. Carte d'inventaire des sources de pollution

2.2. Géologie

La plaine d'El Hadjar fait partie de l'ensemble géologique du Tell d'Algérie Nord oriental. Les affleurements de bordures sont constitués par des formations métamorphiques et éruptives au Nord et par des formations grésos-argileuses au sud. Elles sont relativement de faible potentialité hydraulique, mais constituent des zones d'alimentation pour la nappe. La plaine est caractérisée par des sédiments quaternaires. Ces derniers sont considérés comme des formations potentiellement aquifères [6].

2.3. Climat

La plaine est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par une période humide qui s'étale du mois d'octobre au mois de mai, et une période sèche qui s'étend sur le reste de l'année. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 588 mm, tandis que l'évapotranspiration réelle moyenne, estimée à partir du bilan de Thornthwaite est de 427 mm, alors que l'infiltration efficace moyenne est de 82 mm.

La plaine est traversée par l'Oued Meboudja qui draine une superficie de 203 km² et constitue le collecteur des eaux du bassin versant du lac Fetzara (515 km²) ; et du bassin versant d'Oued El Ressoul (103 km²) ; il rejoint Oued Seybouse à 8 kilomètre de son embouchure dans la mer Méditerranée.

2.4. Pédologie

La plaine d'El Hadjar qui constitue le prolongement de la plaine ouest de Annaba, s'étend sur une superficie de 7980 ha.

Du point de vue pédologique, la zone d'étude est caractérisée par une homogénéité lithologique où les sédiments du quaternaire (récents) constituent la quasi-totalité des terrains avec prédominance de sables, limons et galets [6].

La couverture pédologique prospectée permet d'avancer que la plaine d'El Hadjar présente une fertilité moyenne à bonne [6], avec :

- des sols peu évolués: d'origine non climatique (3042 ha),
- des vertisols (1331 ha),
- des sols hydromorphes (482 ha),
- des sols halomorphes (684 ha),
- des sols calcimagnésiques (1437 ha),
- et des sols minéraux bruts (372 ha).

2.5. Hydrogéologie

La lithologie de la nappe superficielle est constituée par des alluvions récentes et actuelles (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse. Elle est caractérisée par des valeurs de transmissivité oscillant entre $2,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Elle représente la seule ressource en eau pour l'irrigation.

La carte piézométrique (figure 3) montre des courbes isopièzes divergentes, donc à concavité orientée vers djebel Belieléta (amont). L'une au niveau de Hadjar Eddisse avec un espacement faible des courbes. Ceci indique un écoulement rapide, expliqué par une pente forte et une faible perméabilité. L'autre située au niveau de Bergougga, avec un espacement plus grand, est due à une perméabilité moyenne et une faible pente.

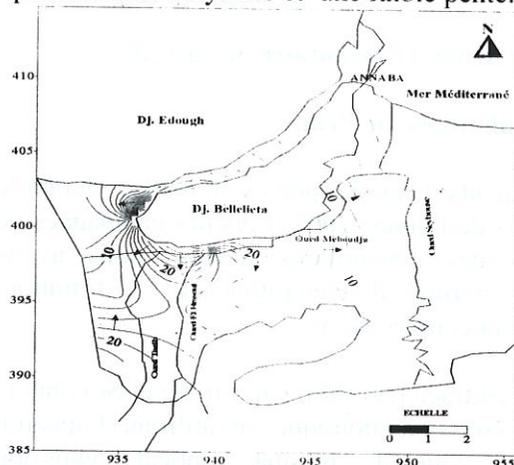


Figure 3. Carte piézométrique – Janvier 2007

Les lignes piézométriques coupent perpendiculairement l'axe de l'oued Meboudja avec une convergence vers l'oued dans la partie Sidi Amar – Pont Bouchet, ce qui révèle une alimentation de l'oued par la nappe. Entre Hadjar Eddisse et Derradji Redjem, oued Meboudja provoque un resserrement local des courbes isopièzes. On remarque un écoulement rapide qui peut être engendré par les apports latéraux et la relation mixte qui existe entre la nappe et l'oued Meboudja. Vers pont Bouchet, oued Meboudja joue le rôle, jusqu'à la confluence avec l'oued Seybouse, d'axe de drainage. La relation de la nappe avec les deux affluents d'oued Meboudja est non identifiée, du fait que les deux oueds sont temporaires et présentent de très faibles débits.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. Méthodologie

La protection des nappes face aux différents déchets, des effluents d'élevage, des rejets industriels, aux apports des engrais et des pesticides, rend nécessaire l'analyse du pouvoir épurateur des sols. A partir de l'analyse bibliographique la plus récente en matière de cartographie à la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines, dix paramètres sont retenus, chacun estimant une composante de l'infiltration verticale. Ces paramètres sont liés aux critères relatifs au sol, à la zone non saturée, ainsi qu'aux critères communs au sol, aux zones saturée et à la zone non saturée. L'importance relative de chaque facteur est évaluée par un coefficient, en donnant plus d'importance aux paramètres mesurés qu'à ceux estimés (tableau 1).

La sommation des notations de chacun de ces critères est établie sur 160 points. Chaque paramètre se voit attribuer une note variant en fonction des conditions locales, les conditions de moindre vulnérabilité verticale procurent des notes faibles, tandis que celles qui l'augmentent procurent des notes élevées.

La cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale. La géostatistique (Logiciel ISATIS [release 6.0 : June 2006]) est une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale du coefficient de vulnérabilité ; elle fournit également une méthode d'interpolation : le krigeage.

L'approche comporte deux étapes :

- définir la structure du variable, les traitements statistiques permettant la description de la distribution des données, et leur dispersion.

- La variable analysée est considérée comme une variable régionalisée, c'est-à-dire qu'elle présente un aspect aléatoire et aspect structure (Gascuel-Odoux et al, 1995).

Tableau 1. Notation des paramètres du coefficient de vulnérabilité

<i>Critères relatifs au sol</i>		
	<i>Paramètre</i>	<i>Notation</i>
<i>Texture</i>	<i>Graviers</i>	20
	<i>Sables</i>	18
	<i>Limons sableux</i>	12
	<i>Limons</i>	08
	<i>Limons silt eux</i>	06
<i>Epaisseur du sol en cm</i>	> 120	00
	80-119	05
	40-79	10
	< 40	15
<i>Réserve utile en mm</i>	150	05
	100-149	07
	50-99	11
	< 50	15
<i>Profondeur d'enracinement en cm</i>	0-10	02
	10-20	07
	20-40	10
	40-60	13
	> 60	15
<i>Perméabilité du profil en cm/h</i>	0,010-0,036	01
	0,10-0,6	06
	1-10	12
	100-300	20
<i>Critères communs au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée</i>		
	<i>Paramètre</i>	<i>Notation</i>
<i>Recharge nette en mm</i>	> 25,5	15
	17,7-25,5	13
	10-17,7	08
	5-10	04
	0-5	02
<i>Pente en %</i>	0-2	10
	2-6	09
	6-12	05
	12-18	03
	> 18	01
<i>Présence d'un plancher imperméable</i>	<i>Présence d'un plancher</i>	05
	<i>Plancher discontinue ou intermittent</i>	10
	<i>Absence de plancher</i>	20
<i>Vitesse de percolation dans le substrat</i>	<i>Rapide</i>	10
	<i>Moyenne</i>	5
	<i>Lente</i>	2
<i>Critères relatifs à la zone non saturée</i>		
	<i>Paramètre</i>	<i>Notation</i>
<i>Profondeur de la nappe en m</i>	0-1,5	20
	1,5-4,5	18
	4,5-9	14
	9-15	10
	15-23	06
	23-31	04
	> 31	02

Six classes d'amplitudes variables sont définies. Le tableau 2 récapitule la structure de la méthode, l'utilisation et la combinaison des données disponibles.

Tableau 2. Classement des unités Cartographiques [4, complétée par nous]

<i>Nombre des points</i>	<i>Classe</i>	<i>Sensibilité à l'infiltration</i>
< 48	1	<i>Très faible</i>
48 - 70	2	<i>Faible</i>
71 - 94	3	<i>Moyenne</i>
95 - 110	4	<i>Assez forte</i>
111 - 126	5	<i>Forte</i>
> 126	6	<i>Très forte</i>

3.2. Echantillonnage du sol

L'échantillonnage des sols a été réalisé à partir de 71 fosses pédologiques de profondeur 1.50 m (figure 4). La densité d'observation est en moyenne d'une observation tous les 65 hectares. Les prélèvements ont été opérés au printemps de l'année 2006 dans la période comprise entre les mois de mars et avril.

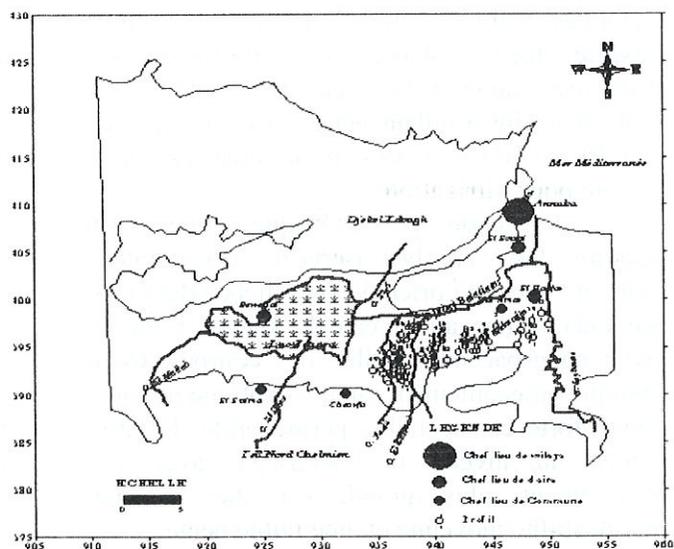


Figure 4. Carte d'inventaire des profils

3.3. Echantillonnage de l'eau

Les prélèvements d'eau des puits sont réalisés durant le mois de mars de l'année 2007. Lors des campagnes de prélèvement des échantillons d'eaux, nous avons respecté les normes d'échantillonnages « filtration, acidification et conservation ».

Les métaux en trace (As, Mn, Cu, Zn, Fe et Se) ont été dosés par émission atomique en utilisant l'appareil "Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy" (ICP-OES) » (Perkin Elmer).



L'échantillon est transformé en aérosols par nébulisation. Il est ensuite transporté jusqu'à la torche à plasma. Suite à leur excitation, les éléments émettent un spectre polychromatique. Les spectres sont captés par un photomultiplicateur qui transforme le signal lumineux en une différence de potentiel caractéristique de l'élément ; la limite de détection est de 10 ppb.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Une fois le variogramme expérimental établi, il faut lui caler un modèle qui lui convient le mieux parmi ceux proposés (linéaire, sphérique, exponentiel et gaussien). Les statistiques de base calculées par le logiciel ISATIS [release 6.0 ; June 2006] pour le coefficient de vulnérabilité sont réunies dans le tableau 3.

Tableau 3. Paramètres statistiques du coefficient de vulnérabilité

Variable	Nombre d'échantillons	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart type	Variance
Coefficient de vulnérabilité	73	130	90	111.81	7,63	58,21

Dans notre cas l'ajustement se fait graphiquement en se basant sur la validation croisée qui permet de comparer l'impact du choix du modèle sur les résultats de l'estimation. Cette technique permet notamment :

- d'étudier la sensibilité des estimations aux paramètres du modèle géostatistique,
- d'évaluer l'ordre de grandeur des erreurs par l'estimation ponctuelle :
- * la moyenne d'erreur qui doit être voisine de zéro,
- * la variance de l'erreur standardisée, qui doit se rapprocher de 1.

Le variogramme exponentiel est le mieux ajusté à notre variogramme expérimental (tableaux 4 et 5), il est représenté sur la figure 5.

Tableau 4. Caractéristiques du variogramme ajusté

Modèle	Nombre d'échantillons	Pas (km)	Nombre de pas	Tolérance angulaire (degré)
Exponentiel	73	0,76	10	90
Tolérance sur la distance	Effet de pépite	Portée (km)	Palier	
0,38	29	2,5	23	

Tableau 5. Validation du variogramme ajusté

Paramètre	Nombre d'échantillons	Valeurs non estimées	Les types d'erreur	Moyenne	Variance
Coefficient de vulnérabilité	71	5,33 %	Erreur	0,38977	44,95135
			Erreur standardisée	0,064461	1,10788

Une fois la structure spatiale du coefficient de vulnérabilité à étudier par le biais du variogramme réalisée, l'interpolation par le krigeage ordinaire peut avoir lieu. La carte de la variabilité spatiale du coefficient de vulnérabilité est représentée sur la figure 5.

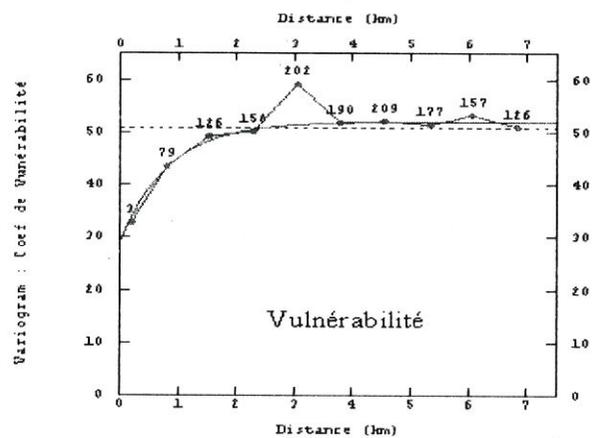


Figure 5. Variogramme ajusté du coefficient de vulnérabilité

L'observation de la carte fait ressortir une nappe dont la vulnérabilité et la sensibilité de pollution s'étalent entre deux classes assez forte à forte (figure 6).

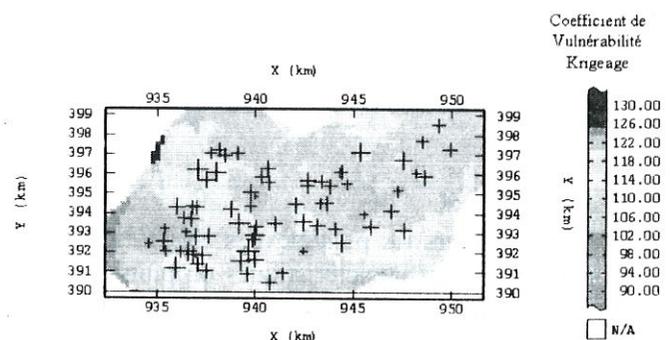


Figure 6. Variabilité spatiale du coefficient de vulnérabilité

La vulnérabilité assez forte est localisée au centre de la plaine, alors que la forte est observée près des oueds. La très forte sensibilité qui est observée au niveau de la région d'El Ghantra, s'explique par la texture sableuse du sol.

Un dispositif piézométrique au niveau de la plaine Ouest d'El Hadjar (figure 7) permet d'acquérir une idée sur la répartition de certaines concentrations de métaux lourds (As, Mn, Cu, Zn, Fe et Se) dans les eaux de la nappe superficielle, dont l'objectif est la validation de la carte de vulnérabilité obtenue par l'utilisation de la géostatistique

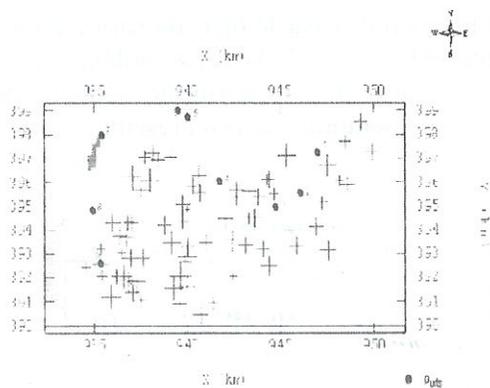


Figure 7. Carte d'inventaire des puits

Le degré de contamination des eaux souterraines dépend de plusieurs facteurs, dont l'éloignement du milieu aquifère, le type de contaminant et la source du contaminant.

Une variation de concentration des métaux lourds est observée au cours de l'analyse des résultats des analyses des eaux de différents puits de la nappe (tableau 6). Les fortes concentrations ont été enregistrées au niveau des puits 1, 2 et 3 à l'est de la plaine.

Tableau 6. Concentrations (mg/l) des métaux lourds dans les neuf puits de la nappe

N° des Puits	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l	As mg/l	Se mg/l
1	0,009	0,022	0,018	0,382	0,102	0,222
2	0,006	0,014	0,006	0,233	0,099	0,097
3	0,001	0,012	0,086	0,061	0,125	0,179
4	0,001	0,002	0,001	0	0,039	0,151
5	0	0,002	0,002	0,025	0,016	0,086
6	0	0,001	0,002	0	0,104	0,18
7	0,001	0,002	0,031	0,023	0,11	0,138
8	0,001	0,001	0,002	0	0,09	0,229
9	0	0,056	0,032	0	0,06	0

Les teneurs les plus élevées en Cu, Fe, Zn, As et Se sont les caractéristiques du puits 1. Ceci est expliqué par sa présence dans la zone de forte vulnérabilité.

Ainsi, des concentrations assez élevées sont notées au niveau des puits 2 et 3 : ce qui montre leur appartenance à une zone de vulnérabilité assez forte.

Probablement ces concentrations plus élevées au niveau du groupe de puits précités sont dues :

- au rapprochement de la source de la pollution,
- au sens d'écoulement des eaux souterraines au niveau de la source de pollution qui diverge vers les puits 1, 2 et 3 :

- à la relation mixte existant entre la nappe et l'oued Meboudja (milieu récepteur des rejets).

5. CONCLUSION

La carte de sensibilité des sols à l'infiltration est destinée à informer sur l'incidence de la couverture pédologique, sur la qualité des eaux des nappes superficielles en relation avec les risques de lessivage d'éléments indésirables.

Elle apporte des indications sur le comportement du sol et sur les circulations de l'eau : elle permet de visualiser des secteurs plus ou moins sensibles (Catherine Cam et al.1996).

La caractérisation de la vulnérabilité verticale des nappes libres est basée sur les paramètres relatifs à la recharge du sol et des zones non saturée et saturée.

L'utilisation de la géostatistique (Logiciel ISATIS [release 6.0 ; June 2006]) donne une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale du coefficient de vulnérabilité ainsi que son estimation.

La carte de sensibilité des sols obtenue met en évidence trois zones de sensibilité différente. Elle montre que la totalité de la nappe de la plaine Ouest d'El Hadjar est caractérisée par une sensibilité verticale assez forte à forte, tandis que, la très forte sensibilité est limitée dans la région d'El Ghantra. Cette carte est validée par l'analyse de certains métaux lourds (As,Mn,Cu,Zn, Fe et Se).

Elle a été appliquée à la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, qui s'étend sur une superficie de 7980 ha, circulant dans des alluvions récentes et actuelles, d'une importance capitale pour l'agriculture de la région.

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Rouabhia, et al. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). *Sécheresse*, n°2, vol 15, 2004, pages 347 – 352.
2. A. Zerouali, et al. Elaboration de la vulnérabilité moyennant la méthode DRASTIC et le Système d'Information Géographique (SIG). Cas de la nappe de Souss-Chtouka. Guide on mapping groundwater vulnerability, *IAGI*, vol 16, 1994, 131 p.
3. B. Glass. La gestion des eaux dans les pays du pourtour méditerranéen. *Bull. du conseil du GREF n°50*, 1998, pages 61-66.
4. C. Catherin, et al. Représentation cartographique de la sensibilité des sols, 3, 2, 1996, pages 97 – 112.
5. M Sinan, et al. Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc. 2 *FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, décembre 2-5, 2003*, 15 p.
6. N Zenati. Relation nappe – lac. Confirmation par l'hydrochimie. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar – Lac Fetzara. Nord-Est Algérien. *Mémoire de magister, université d'Annaba*, 1999, 152 p.
7. S Bézélgues, et al. Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande – Terre et de Marie – Galante (Guadeloupe). Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité. *Document BRGM*, 2002, 44 p.
8. S Hadj-Said. Etat d'influence marine et vulnérabilité à la pollution chimique des eaux de la région de Guerbès, Nord – Est Algérien. *Mémoire de magister, Université d'Annaba*, 2001, 79 p.