

VULNÉRABILITÉ ET RISQUES DE POLLUTION DE LA NAPPE PLIO-QUATERNAIRE DU HAUT ET MOYEN CHELIF.

Larbi CHAÏBI* et Ahmed-Chérif TOUBAL**

RÉSUMÉ

La carte thématique relative à la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère plio-quaternaire de l'oued Chélif est établie à l'aide de la méthode DRASTIC. L'approche permet d'apprécier la sensibilité de l'aquifère à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol, en se basant sur les propriétés physiques du milieu. Les résultats de l'étude sont édifiants : la basse vallée de l'oued Chélif et, partiellement, les vallées secondaires s'avèrent hautement sensibles à la pollution. Plus grave encore, de nombreuses activités humaines potentiellement polluantes se greffent sur les sites hydrogéologiques de vulnérabilité élevée à très élevée. Ces zones coïncident souvent avec les secteurs de potabilité médiocre des eaux souterraines

Mots-clés - Nappe plio-quaternaire - Hydrochimie - Pollution - Vulnérabilité.

VULNERABILITY AND RISK OF POLLUTION OF THE HIGH AND MIDDLE CHELIF PLIO-QUATERNARY AQUIFER.

ABSTRACT

The thematic map of the vulnerability to pollution of the Plio-Quaternary aquifer of the Chelif Wadi is established by using the DRASTIC method. This approach allows the assessment of the aquifer sensibility to any form of pollutant introduced from the surface, based on the physical properties of the environment. The survey results are instructive: the lower valley and partly secondary valleys of the Chelif Wadi are highly sensitive to pollution. Worse, many potentially polluting human activities are located in sites characterized by a high to a very high vulnerability. These areas often correspond with areas where groundwater is not potable.

Keywords - Plio-Quaternary - Aquifer - Hydrochemistry - Pollution - Vulnerability.

*Département de Génie Rural- École Nationale Supérieure Agronomique - 16200 - Hacène Badi - El Harrach Alger. E-mail : chaibilarbi@yahoo.fr

**Département de la Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire - BP. 32 El Alia, Bab Ezzouar, Alger. E-mail : toubal@hotmail.com

- *Manuscrit déposé le 30 Août 2009, accepté après révision le 14 Juillet 2013.*

1. INTRODUCTION

À l'instar de tous les bassins néogènes sub-littoraux d'Algérie, la vallée de l'oued Chélif recèle des potentialités en eau d'origine essentiellement souterraine. De par les aléas climatiques prévalant dans ces régions, cette eau constitue une ressource économique importante et un patrimoine écologique sensible qu'il importe de gérer et de préserver.

Malheureusement dans ces bassins, les eaux de surface et souterraines sont exposées à plusieurs formes de pollution qu'elle soit d'origine urbaine, agricole, industrielle ou simplement accidentelle. Cette pollution constitue un risque permanent de limitation de la ressource. Dans ce contexte, ce travail a pour but d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère afin de préserver la qualité de la ressource. La carte de vulnérabilité obtenue facilitera la prise de décision vis-à-vis de l'aménagement du territoire et de la gestion de la ressource en eau.

2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Encadré au nord par la chaîne de montagne du Bou Maâd et Beni Menacer et au sud par l'Ouarsenis, le site étudié englobe : - la plaine d'El Khémis située dans le Haut Chélif, - la plaine d'El Abadia- Aïn Defla située dans le moyen Chélif (fig. 1) (Achour, 1997; Boulaine, 1957; Kirèche, 1977).

On y distingue des formations datant du Primaire jusqu'à l'Actuel, avec de bas en haut :

- un substratum autochtone, d'âge primaire et secondaire, de nature marno-calcaire, constituant les massifs épimétamorphiques du Doui-Rouina et Temoulga;
- des formations allochtones édifiées au Miocène inférieur;
- des produits de comblement mio-plio-quaternaires mis en place à la faveur d'une transgres-

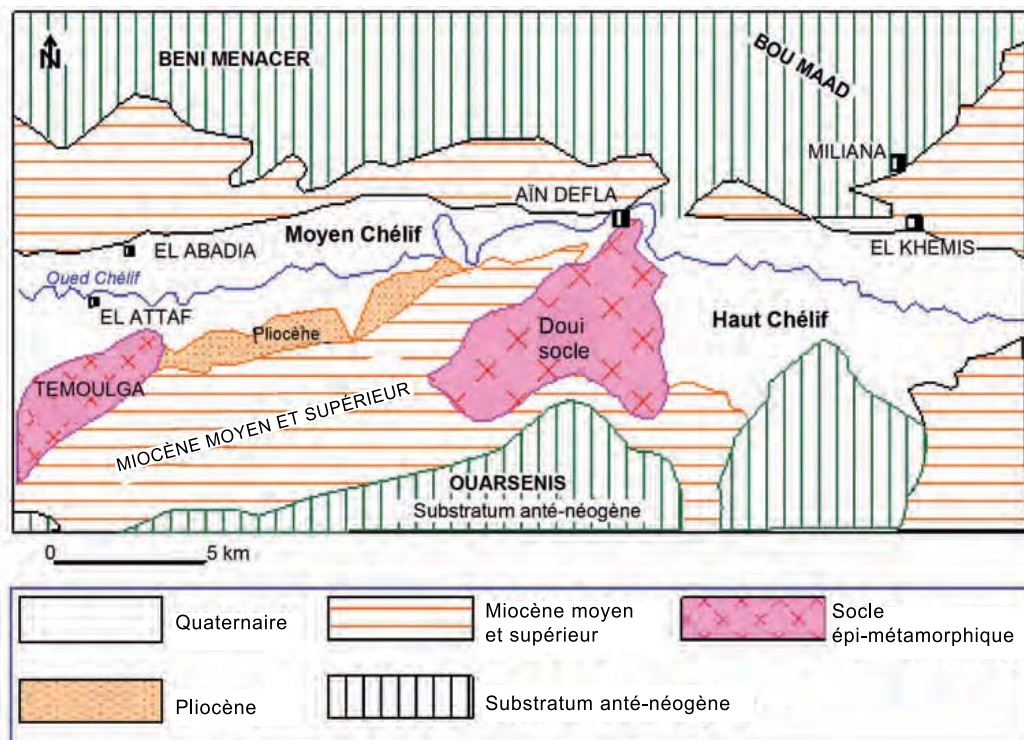


Fig. 1 - Le contexte géologique régional.

The regional geological context.

sion marine datée du Miocène supérieur et du Pliocène.

Les principaux réservoirs aquifères sont représentés par les formations suivantes (figs. 2 et 3) (Pradines, 1971) :

- **le Miocène.** Il se présente sous forme de conglomérats plus ou moins argileux et sableux. Les calcaires du Miocène affleurent le long de la limite sud de la vallée;

- **le Pliocène.** Il affleure dans le moyen Chélif en une bande étroite au nord et à l'ouest de la plaine. Il a été reconnu près de la bordure au Nord d'El Abadia où le niveau statique des eaux circulant dans les grès ou sables du Pliocène, se raccorde bien aux courbes isopièzes des alluvions.

- **les alluvions quaternaires.** Elles forment les plaines du Haut et Moyen Chélif. C'est dans ces plaines et leurs piémonts les plus immédiats qu'a été fait l'inventaire systématique des puits.

3. MÉTHODOLOGIE

La méthode DRASTIC est basée sur des notations (poids et cote) et des coefficients de pondération accordés aux critères choisis pour étudier, classer et représenter sur le plan horizontal le rôle protecteur de l'interface, séparant la ressource en eau de la source de pollution (Aller *et al.*, 1987; Lyakhloufi *et al.*, 1999; Mina, 2007; Suais *et al.*, 1990). Cette méthode permet l'établissement de cartes de vulnérabilité qui constituent la synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région (fig. 4).

La méthode DRASTIC est basée sur l'estimation de sept paramètres relatifs à la recharge, le sol, la zone non saturée, et l'aquifère : **-(D)**: Depth ou profondeur de la nappe; **-(R)**: Net Recharge; **-(A)**: Aquifer Media ou nature de l'aquifère; **-(S)**: Soil Media ou nature du sol; **-(T)**: Topography; **-(I)**: Impact of vadose media; **-(C)**: Hydraulic conductivity.

L'indice DRASTIC est basé sur l'évaluation des sept (7) paramètres sus-cités. Chacun d'eux

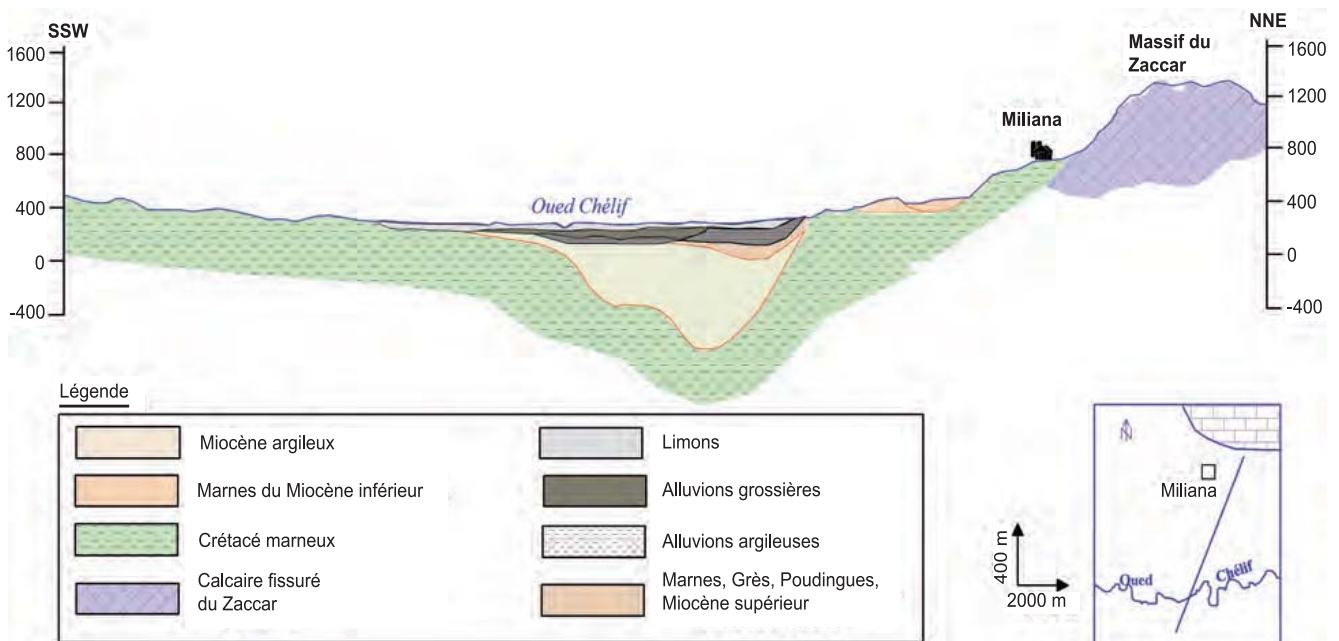


Fig. 2 - Coupe géologique transversale à travers la vallée du Haut Chélif.

Geological cross section through the High Chelif valley.

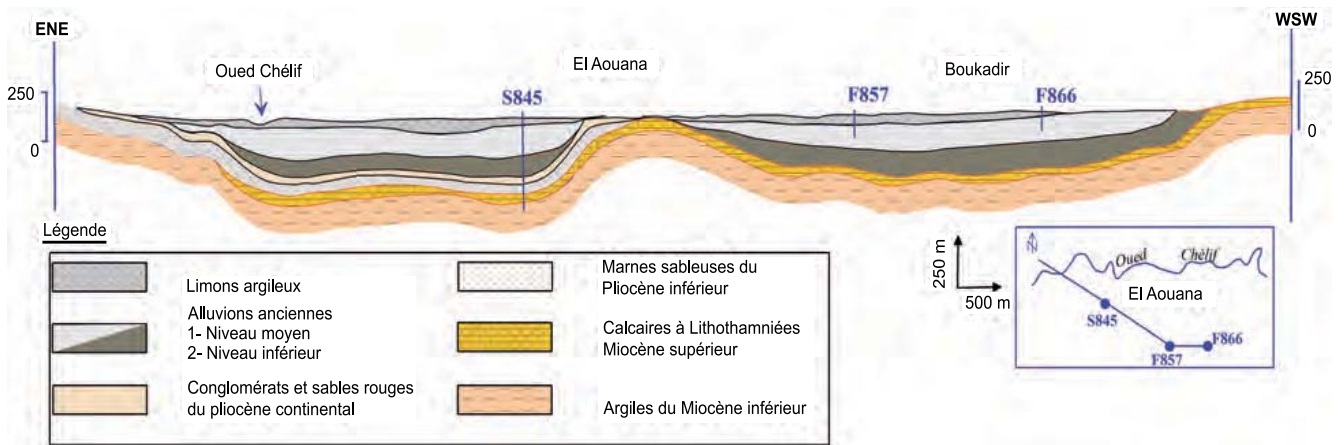


Fig. 3 - Coupe géologique transversale à travers la vallée du Moyen Chélif.

Geological cross section through the Middle Chelif Valley.

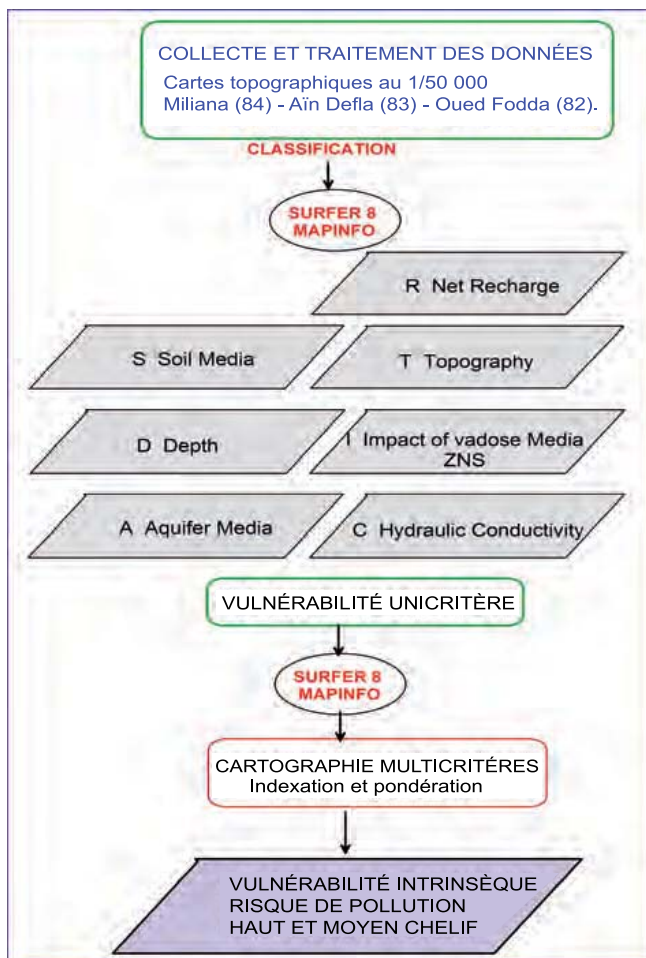


Fig. 4 - Démarche générale de la méthode DRASTIC.

General approach of the DRASTIC method.

est assigné d'un poids relatif dont la valeur comprise entre 1 et 5 correspond à son importance dans le processus d'atténuation des substances contaminatrices (tabl. I).

Chaque paramètre est ensuite assigné d'une cote pouvant varier de 1 à 10. Une cote 1 correspond aux conditions de moindre vulnérabilité alors qu'une cote de 10 reflète les conditions les plus propices à la contamination. Un indice DRASTIC partiel propre à chaque paramètre est alors déduit en multipliant sa cote par son poids relatif :

Tableau I - Les paramètres DRASTIC et leurs poids relatifs.

DRASTIC parameters and their relative weights.

Symboles	Paramètres	Poids général	Poids pesticide
D	Profondeur de l'eau	5	5
R	Recharge efficace	4	4
A	Milieu aquifère	3	3
S	Matériau du sol	2	5
T	Topographie	1	3
I	Impact de la zone vadose	5	4
C	Perméabilité (conductivité hydraulique)	3	2

$$\text{Indice partiel} = \text{poids} \times \text{cote}$$

L'indice DRASTIC résulte de la somme pondérée des indices partiels correspondant à chaque paramètre :

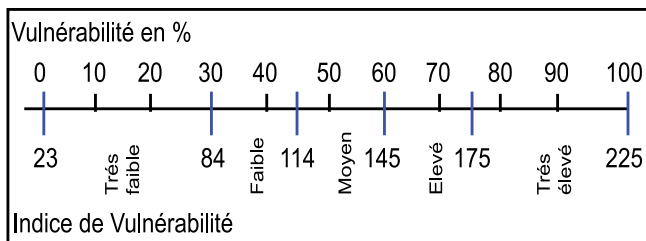
$$\text{Indice DRASTIC général} : (Dc.Dp) + (Rc.Rp) + (Ac.Ap) + (Sc.Sp) + (Tc.Tp) + (Ic.Ip) + (Cc.Cp)$$

c : cote du paramètre considéré ; **Dc** : la cote du paramètre D; **Dp** : son poids.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC représente une évaluation du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Un système de représentation permet aux utilisateurs une visualisation immédiate du degré de vulnérabilité. Le principe consiste à diviser la valeur indicielle de chaque zone par le score maximum pouvant être atteint (226), en le multipliant par 100 afin d'exprimer la vulnérabilité en pourcentage ce qui a permis (tabl. II) de définir cinq classes de vulnérabilité.

Tableau II - Diagramme des classes de vulnérabilité.

Diagram of the of vulnerability classes.



4. ÉVALUATION DES PARAMÈTRES DRASTIC (TABLEAU III)

4.a. La profondeur de l'eau D

C'est un paramètre déterminant dans le contrôle du transfert et de l'atténuation du polluant dans la zone non-saturée. Il est assigné d'un poids maximum de 5 (tabl. IV). Ce paramètre a été évalué à partir des mesures piézométriques effectuées par l'A.N.R.H. au droit de 47 puits d'observation. La période des hautes eaux (avril 2004) a été choisie de façon à obtenir une épaisseur minimale de la zone non-saturée, autorisant un transfert plus ra-

pide du polluant vers la nappe. Cette profondeur varie de 1.14 m (puits W084-131, Aïn Defla) à 25 m (puits W083-120, NE d'El Attaf).

Tableau III - Principales sources d'information.

Main information sources.

Paramètres	Principales sources d'information
D – Profondeur de l'eau	- Coupes de forages - Campagnes piézométriques ANRH, avril 2004
R – Recharge efficace	- Études hydrogéologiques, calculs du bilan hydrologique - Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord
A – Matériau de l'aquifère	- Coupes de forages, Études géologiques
T - Topographie	- Carte des pentes - Cartes topographiques au 1/50 000 et 1/25 000
S – Matériau du sol	- Études agro-pédologiques - Études des sols des plaines du Chélif
I – Impact de la zone non saturée	- Cartes géologiques au 1/50 000 ^{ème} , - Coupes lithologiques des forages, - Études géophysiques, - Études hydrogéologiques
C - Perméabilité	- Études hydrogéologiques - Essais de pompages, - Abaque de Freeze et Cherry, 1970

Tableau IV - Les 7 paramètres DRASTIC et leurs poids relatifs.

The seven DRASTIC parameters and their relative weights.

Symboles	Paramètres	Poids général	Poids pesticide
D	Profondeur de l'eau.	5	5
R	Recharge efficace.	4	4
A	Milieu aquifère.	3	3
S	Matériau du sol.	2	5
T	Topographie.	1	3
I	Impact de la zone vadose.	5	4
C	Perméabilité (Conductivité Hydraulique)	3	2

La figure 5 (carte D) indique la répartition de la profondeur du niveau statique de la nappe selon les intervalles des courbes : [1.5 - 4.5 - 9 - 15 - 22.5 - 25]. Ces valeurs permettent d'obtenir une cote du paramètre « D » qui varie de 2 à 9, soit un indice partiel de vulnérabilité qui varie de 10 à 45 pour un poids pesticide de 5. La figure 5 montre également la répartition par mailles de l'indice « ID » selon les intervalles DRASTIC adoptés.

4.b. Recharge nette R

L'infiltration efficace représente le moyen de transport du polluant vers le milieu aquifère. Son augmentation accroît le potentiel polluant. Pour la nappe du Haut et Moyen Chéelif, ce paramètre a été déduit d'abord, de façon globale, à l'échelle du bassin versant, à partir de formules empiriques qui donnent lieu à une lame d'eau infiltrée, d'une hauteur de 3.21 cm uniformément répartie sur une surface totale de 5496 km². Mais tenant compte du fait que le long des oueds, les crues alimentent de façon substantielle la nappe, les estimations ont été affinées à partir des équations de bilans réalisées par Schrambach *et al.* (1966) de l'ordre de 1848 l/s qui donnent un supplément apporté par les crues le long des principaux oueds.

Ce débit percolerait à travers 154 mailles carrées de 1 km de coté, couvrant les principaux oueds, ce qui donnerait lieu à une tranche d'eau annuellement infiltrée de 37.32 cm uniformément répartie sur les 154 mailles concernées. L'infiltration dont le poids est de 4 serait donc de 40.53 cm le long des oueds où, la recharge de la nappe à partir des eaux de pluie est majorée d'une quantité en provenance des crues, correspondant à une cote de 9 et un indice partiel de $4 \times 9 = 36$. Sur le reste de la région, l'infiltration serait de 3.21 cm, donnant lieu à une cote de 1, soit un indice partiel « IR » de : $4 \times 1 = 4$. La figure 6 montre ainsi deux domaines distincts caractérisés par des indices de vulnérabilité partielle IR différents.

4.c. Le Paramètre « A » nature du matériel aquifère

La zone saturée est le lieu approprié où peuvent être stockées des quantités d'eaux importantes. Son rôle dans l'atténuation du polluant dépend de la nature lithologique et texturale des formations qui le constituent. Le potentiel de pollution est proportionnel au degré de porosité, en particulier la perméabilité des interstices et des fissures.

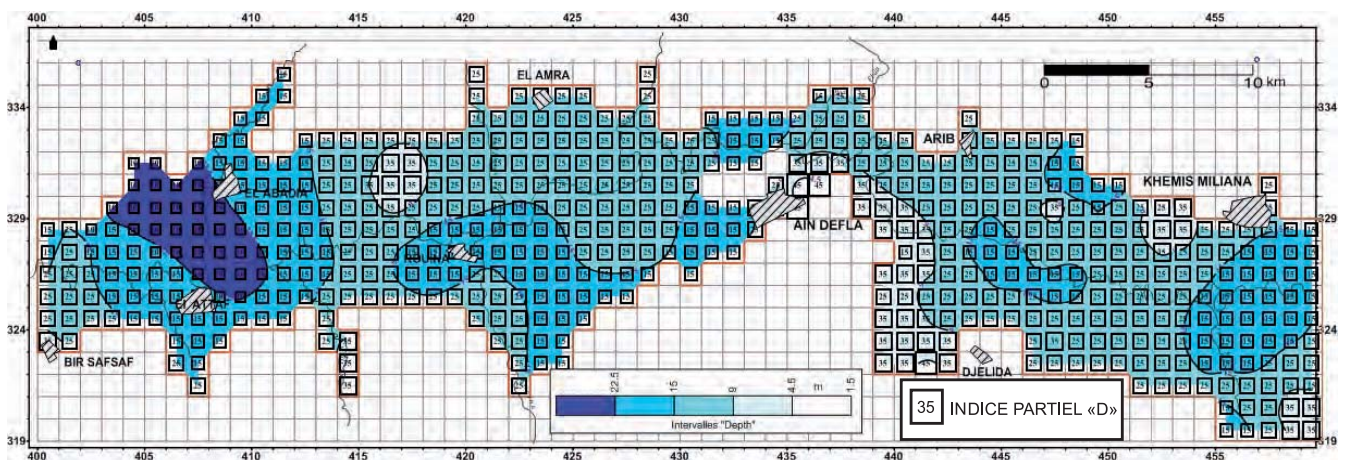


Fig. 5 - Carte de la Profondeur de la nappe plio-quaternaire et de l'indice partiel D.

Plio-Quaternary aquifer Depth and partial index D map.

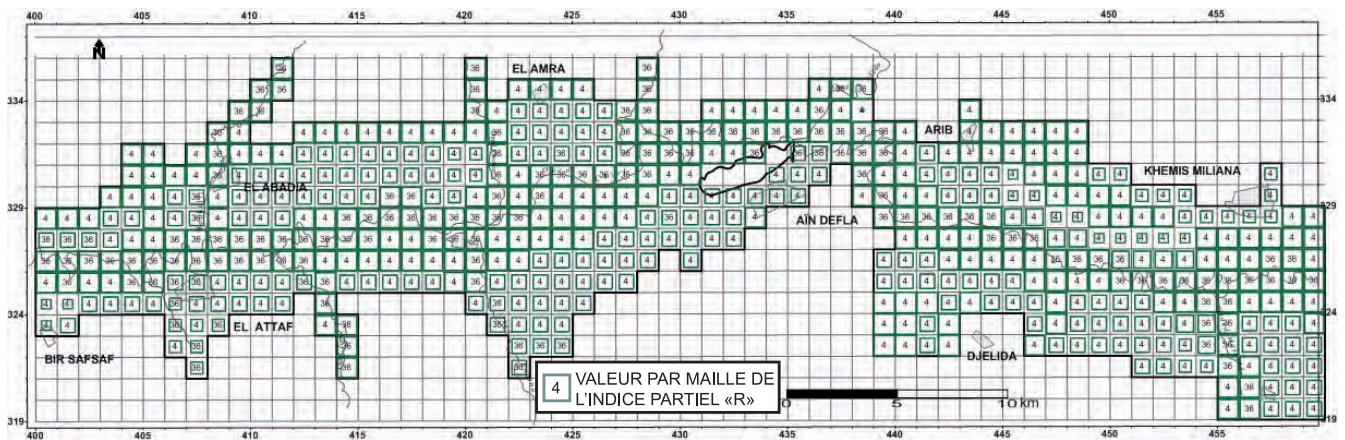


Fig. 6 - Carte de l'indice partiel "R" - Recharge Annuelle.

Map of the partial index "R" – Annual Recharge

Les concepteurs de la méthodologie DRASTIC ont établi une liste de neuf types de formations aquifères de natures lithologiques différentes (fig. 7).

Pour des considérations de simplification des descriptions lithologiques conformément à la classification DRASTIC, on a proposé un modèle sédimentologique composé de deux termes (fig.8):

- au centre de la plaine, l'aquifère composé de matériel généralement grossier (galets et graviers), auquel on attribue une cote égale à 9 et un indice $IA = 3 \times 9 = 27$. Le milieu reflèterait ici, les conditions d'une haute vulnérabilité;
- au nord et sud de la plaine, aquifère du type alluvionnaire de granulométrie moins grossière (graviers, galets+graviers+argile, graviers+sables...), bénéficiant d'une cote égale à 6, et donc d'un indice $IA = 3 \times 6 = 18$; Le potentiel de pollution serait ici, moins important.

Ces deux types de matériau aquifère sont inclus dans l'intervalle-cote [6–9] correspondant à un poids pesticide de 3.

4.d. Le paramètre « S » nature du sol

Le SCS « Soil Conservation Service » a établi en 1984, une classification des sols sur la base du

potentiel de pollution décroissant. Une cote élevée, reflétant des conditions de haute vulnérabilité, est ainsi attribuée aux sols caractérisés par des particules grossières.

La description des sols constituant la plaine de Chélif a été réalisée à partir des cartes de sol établies par J. Boulaine en 1957. Ces cartes ont mis en évidence quatre classes pédologiques. L'utilisation des tables de cotation DRASTIC a permis de classer les sols en fonction de leur texture et d'attribuer à chaque type la cote correspondante.

La figure 9 montre la répartition des indices partiels « S » correspondant à un poids pesticide de 5. Dans le lit majeur de l'oued, ce sont les sols sableux qui prédominent avec une cote de 9 et indice partiel « IS » de $9 \times 5 = 45$. En s'éloignant de l'oued, il y a prédominance de la fraction limoneuse dotée d'une cote de 5 et d'un indice partiel « IS » de $5 \times 5 = 25$. Les cotes 1 et 3 correspondant aux argiles et limons argileux ainsi que la cote 10 attribuée à l'absence de sol occupent des superficies réduites.

4.e. Le paramètre « T » topographie

La variation de la pente des terrains contrôle la possibilité d'infiltration des polluants.

La carte des pentes de la région a été établie sur la base des cartes topographiques (1/50 000 et 1/25 000). La figure 10 reproduit les valeurs par mailles de la pente exprimées en %. Ces valeurs sont limitées par des courbes en isovaleurs selon les intervalles : [2-3-6-12-18-30], avec des cotes correspondantes de (10-9-5-3-1). Elle montre également la répartition des indices partiels «IT» variant de 3 à 30.

4.f. Le paramètre « I » zone non-saturée

Elle constitue souvent le siège des processus de biodégradation, de filtration, de précipitation, de volatilisation, de dispersion et d'atténuation du polluant. Ces processus sont d'autant plus importants que la perméabilité des terrains de la zone non-saturée est faible. Cette perméabilité est étroitement liée à la nature lithologique, à la granulométrie et au degré de fissuration des différents terrains.

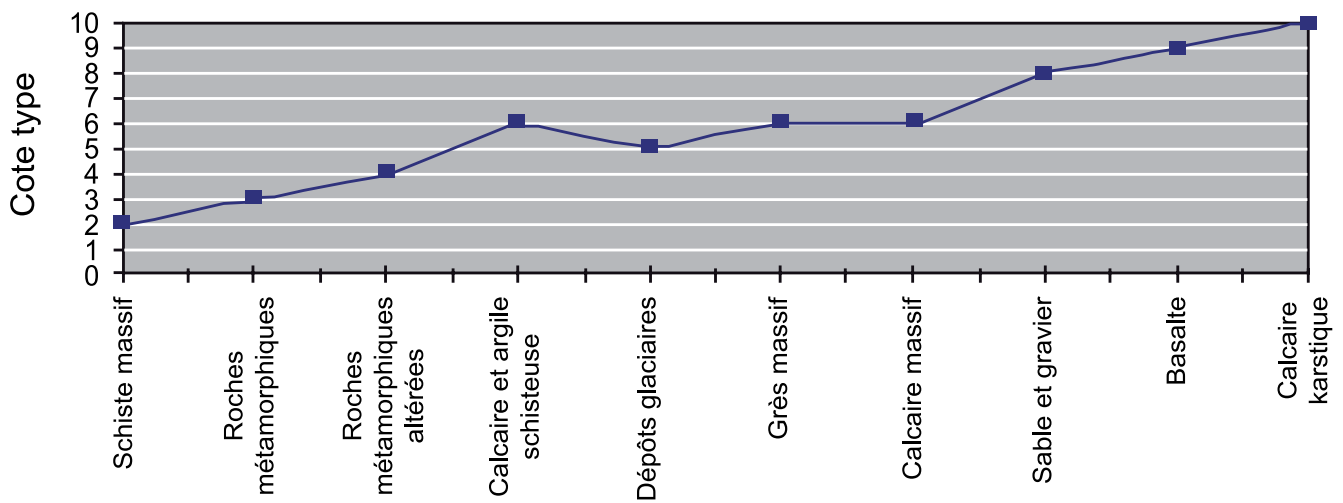


Fig. 7 - Représentation graphique de la variation de la cote en fonction des caractéristiques du milieu aquifère (Aller et al., 1987).

Graphic representation of the variation of the accord on the aquifer characteristics (Aller and al., 1987).

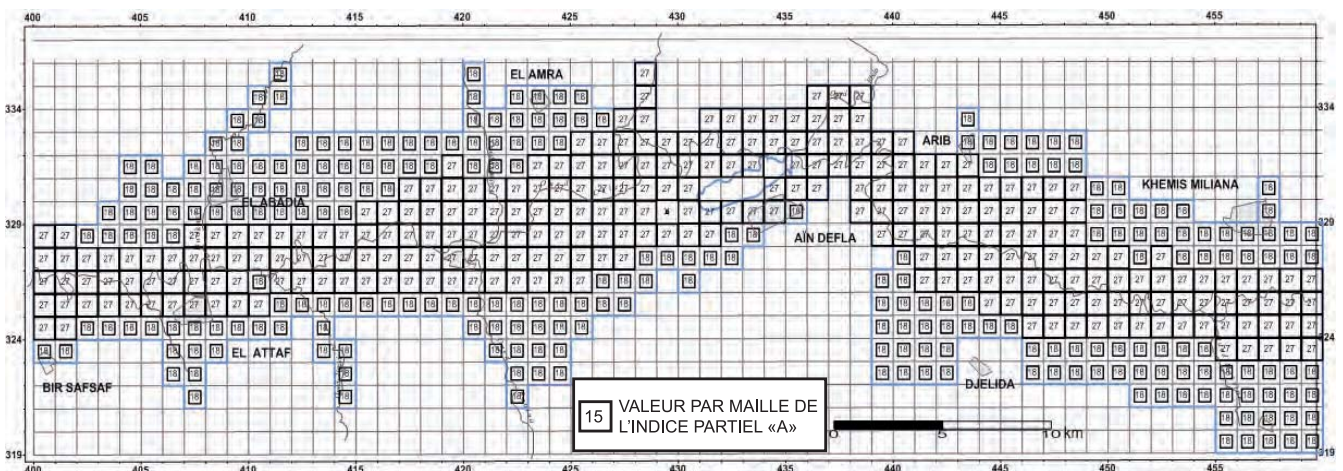


Fig. 8 - Carte de l'indice partiel "A" - nature du matériau aquifère.

Map of the partial index "A"- type of the aquifer deposit.

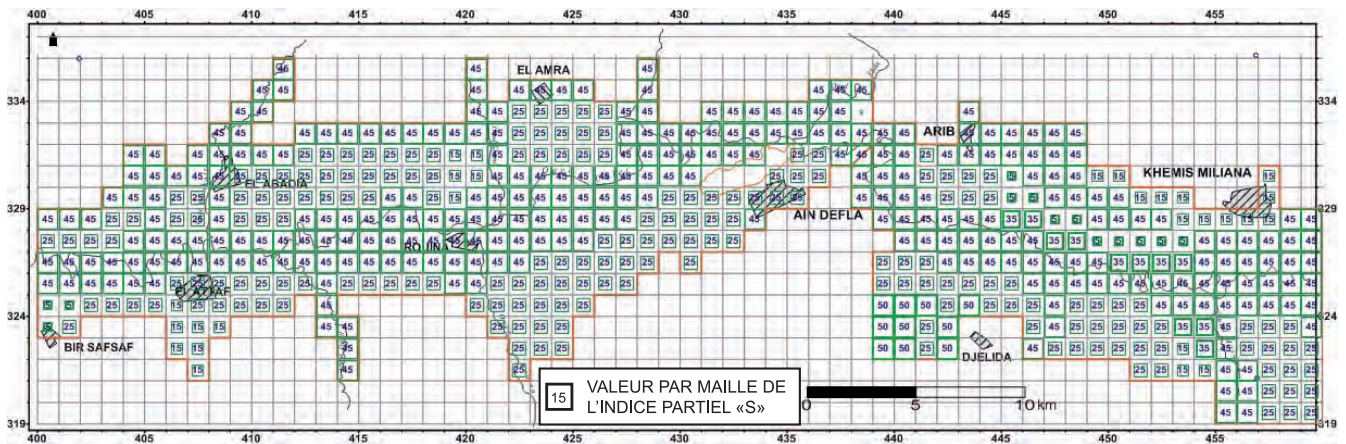


Fig. 9 - Carte de l'indice partiel "S".

Map of the partial index "S".

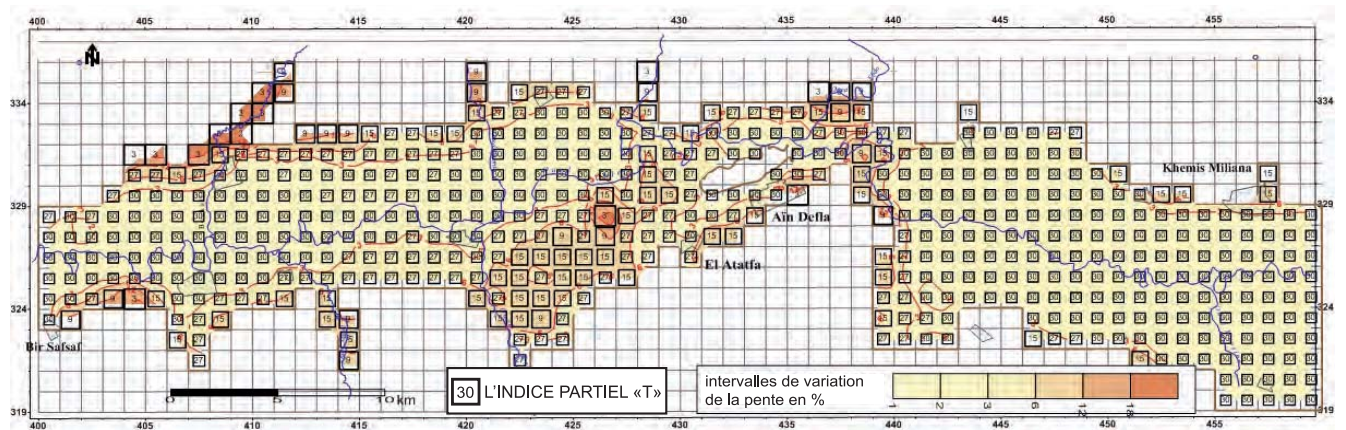


Fig. 10 - Carte des pentes et de l'indice partiel "T".

Slopes and partial index "T" map.

La figure 11 établie à partir de l'analyse des dizaines de coupes de forages montre deux zones distinctes;

- une zone centrale à couverture essentiellement pélitique, avec un indice partiel de $1 \times 4 = 4$;
- deux zones périphériques, nord et sud, où la tranche de terrain non-saturée de texture plus grossière (argilo-sableuse), présente un indice partiel « I » de $2 \times 4 = 8$.

4.g. Le paramètre «C» conductivité hydraulique

La perméabilité d'un aquifère est contrôlée par la texture granulométrique, le degré de fracturation et par les caractéristiques de l'écoulement dans les nappes (débits, vitesses, gradients hydrauliques).

La perméabilité déterminée par essais de pompage atteint la valeur $1.22 \cdot 10^{-3}$ m/s (forage Arrib). La perméabilité a été également estimée à partir de l'abaque de Freeze et Cheery (1979) qui donne une valeur minimale de 10^{-3} m/s.

Ce qui, pour une cote pesticide de 2, permet de déduire pour la région d'étude un indice de vulnérabilité partielle maxima : $IC = 2 \times 10 = 20$ (fig. 12).

5. ÉTABLISSEMENT ET INTERPRÉTATION DE LA CARTE DE VULNÉRABILITE.

La carte de vulnérabilité montre trois zones principales déterminant chacune une unité hydrogéologique distincte (figs. 13, 14 et 15) :

- l'unité hydrogéologique 1B, de couleur vert foncé, caractérisée par une vulnérabilité faible (90 à 115);
- l'unité hydrogéologique 1C, de couleur vert clair, caractérisée par une vulnérabilité moyenne (114 à 145);
- l'unité hydrogéologique 1D, de couleur jaune, caractérisée par une vulnérabilité élevée (145 à 175);

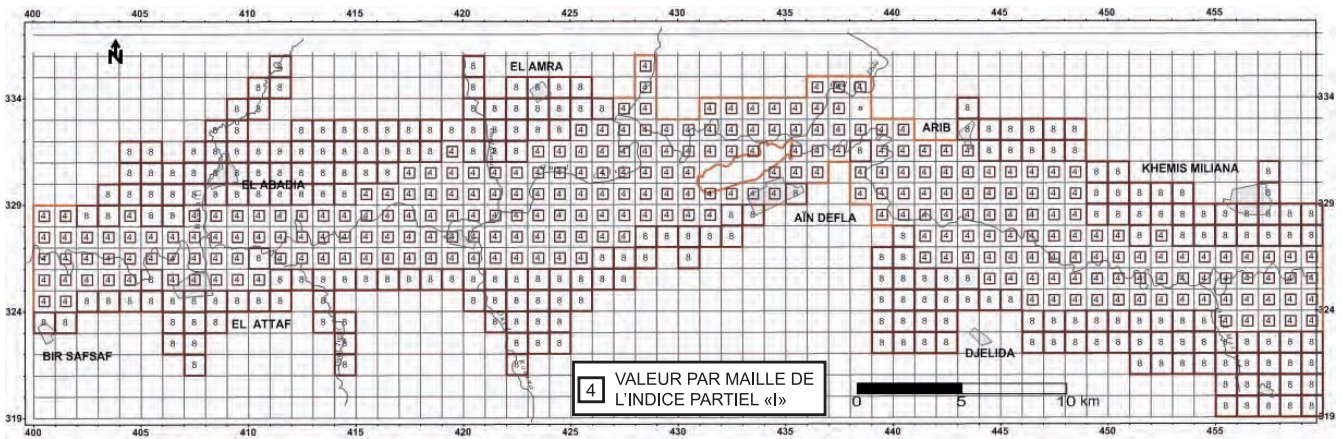


Fig. 11 - Carte de l'indice partiel "I" - Impact de la zone non saturée.
Map of the partial index "I" - Impact of the vadose zone.

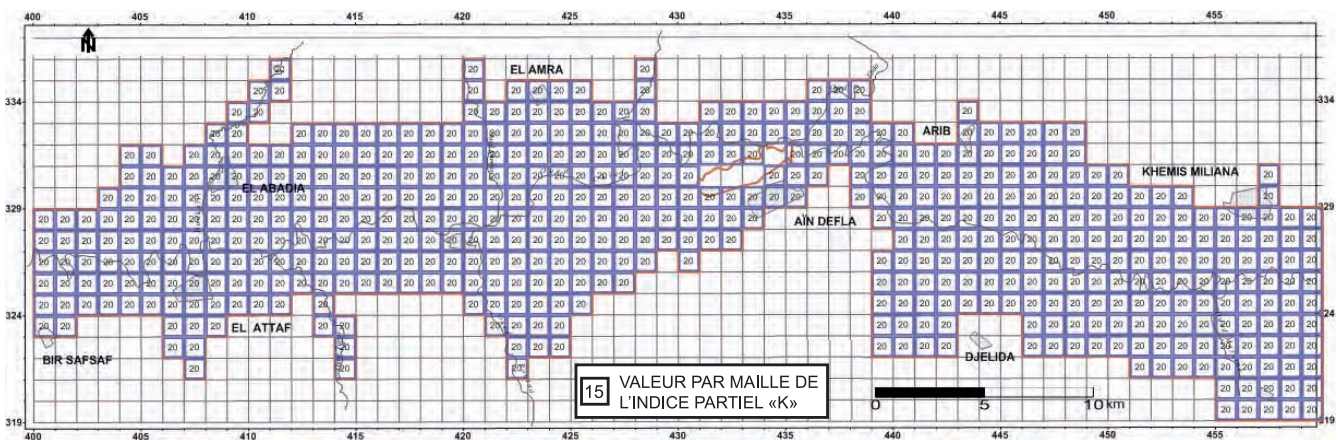


Fig. 12 - Carte de l'indice partiel "C" - Perméabilité de l'aquifère.
Map of the partial index "C" - Permeability of the aquifer.

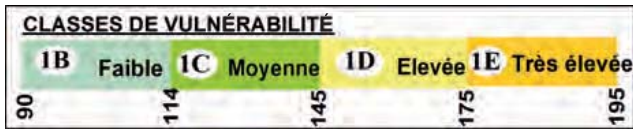


Fig. 13 - Diagramme et classes de vulnérabilité de la nappe plio-quaternaire.

Diagram and classes of the Plio-Quaternary aquifer vulnerability.

- l'unité hydrogéologique 1E, de couleur orange, caractérisée par une vulnérabilité très élevée (175 à 195).

Au nord et au sud de la plaine, les unités 1B (vert foncé) et 1C (vert clair), de faible à moyenne vulnérabilité, sont caractérisées par la présence d'une couverture limono-argileuse coiffant les limons et argiles de la zone vadose. La prédominance de la fraction pélitique dans les terrains de couverture, diminue l'infiltration efficace et amoindrit la propagation des polluants vers la profondeur. L'aquifère du type alluvionnaire, mais de granulométrie très variée (graviers, galets + graviers + argile, graviers+sables...) présente de ce fait un potentiel de pollution moins important.

Les unités hydrogéologiques 1D et 1E de vulnérabilité élevée à très élevée, couvrent la majeure partie de la vallée du Chéelif, débordant latéralement surtout le long des thalwegs transversaux. Ces unités sont caractérisées par l'existence d'une couverture argileuse et parfois limoneuse à argilo-sableuse, plus ou moins continue, coiffant un aquifère de nature généralement grossière (galets et graviers). Le milieu reflèterait ici les conditions d'une haute vulnérabilité. La recharge de la nappe est par ailleurs, facilitée par l'infiltration à travers le lit majeur de l'oued Chéelif et de ses affluents, d'où une plus grande sensibilité de la nappe vis-à-vis d'éventuels polluants.

En définitive, la carte ainsi établie montre que tout le long de l'oued Chéelif et de ses affluents, la nappe est particulièrement vulnérable vis-à-vis des polluants.

6. RISQUES DE POLLUTION AGRICOLE, INDUSTRIELLE ET URBAINE

L'étude de l'évolution spatiale des nitrates (supposés d'origine agricole), permet d'apprécier les risques de pollution essentiellement agricole (Hamza *et al.*, 2007; Kouassi *et al.*, 2009). À cet égard, nous n'oublions pas que les nitrates peuvent également provenir de rejets industriels ou urbains.

La carte (fig.14) a permis d'identifier des activités agricoles potentiellement polluantes implantées sur les sites jugés vulnérables. Les concentrations en nitrates varient de 0 à 84 mg/l avec une moyenne de 32.5 mg/l. La courbe à 50 mg/l représentant la concentration limite recommandée, entoure une zone de fortes valeurs s'étendant depuis la ville d'Aïn Defla jusqu'à la localité de Rouina à l'ouest. Cette zone polluée empiète largement sur les unités 1D et 1E de vulnérabilité respectivement élevée et très élevée. À l'Ouest de Rouina au niveau du domaine Djermouni, les valeurs sont également élevées (79 mg/l au point 41/83). Là aussi, la sensibilité de la nappe est élevée. Au Nord d'El Attaf, une tendance à la hausse se dessine également en direction d'El Cheurfa à l'ouest d'El Abadia, mais là, le risque est moindre puisque nous nous situons sur l'unité 1C à vulnérabilité moyenne.

En définitive, les fortes valeurs de nitrates coïncident souvent avec les zones de vulnérabilité élevée de la nappe. Les risques de pollutions industrielles et urbaines sont approchés à travers la combinaison des cartes de vulnérabilité et de la qualité chimique des eaux représentée par leur conductivité électrique, auxquelles s'ajoute la répartition des principales sources de pollutions industrielles et urbaines (fig. 15).

La conductivité électrique, qui est proportionnelle à la minéralisation de l'eau, présente une valeur moyenne de 1972 μ Siemens/cm. La carte montre trois zones conductrices circonscrites à la courbe à 2000 μ Siemens/cm (résistivité de 5 Ω .m) re-

présentant la limite de potabilité des eaux souterraines.

1) La première plage parcourt la vallée de l’oued Chélif depuis Khemis Miliana à l’est jusqu’au massif du Doui à l’ouest, avec des valeurs qui s’échelonnent entre 2000 et 3450 μ Siemens/cm. Dans ce secteur, les courbes en isovaleurs, parallèles à l’axe de la vallée, montrent une augmentation graduelle de la minéralisation de l’eau depuis les massifs septentrionaux du Zaccar au nord vers la plaine de Khemis Miliana au sud. Cette zone chevauche dans sa partie méridionale, les zones

1 E et 1D de vulnérabilité élevée et très élevée. Dans ce secteur, les points de pollution représentés par les décharges publiques, les rejets d’eaux usées, les activités de transport (SNTR/ SNTV) et autres industries polluantes (laiterie) sont d’autant plus nocives qu’elles se rapprochent de la zone orange de vulnérabilité très élevée.

2) La deuxième plage conductrice occupe la partie centrale de la plaine (El Amra gare), avec des valeurs variant de 2000 à 2990 μ Siemens/cm, caractéristiques d’une eau souterraine chargée. Cette plage englobe dans sa totalité une plage de très

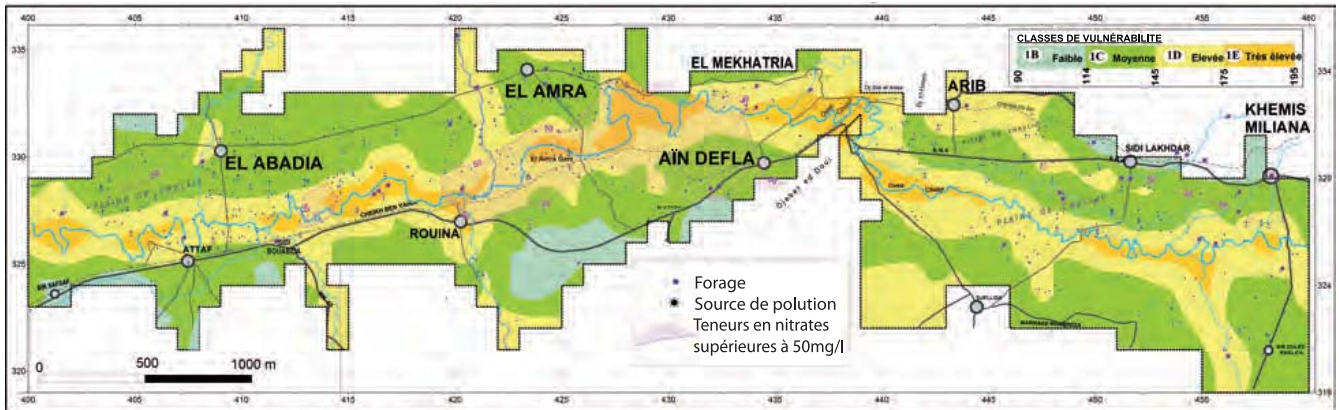


Fig. 14 - Carte de la vulnérabilité de l’aquifère plio-quatenaire du Haut et Moyen Chélif et répartition de la teneur en nitrates des eaux souterraines - Octobre 2004.

Plio-Quaternary aquifer of High and Middle Chelif vulnerability map and the distribution of ground-water nitrate concentration - October 2004.

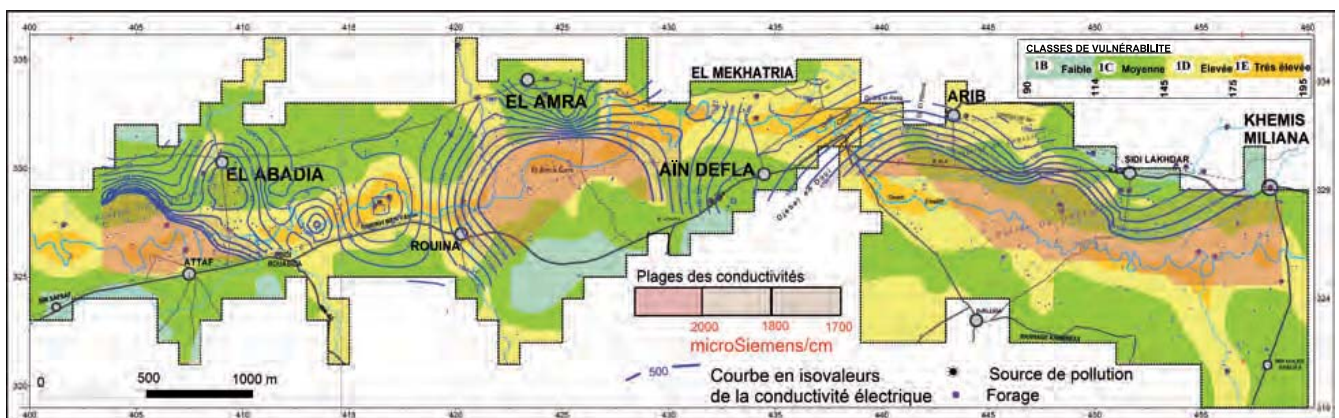


Fig. 15 - Carte de la vulnérabilité de l’aquifère plio-quatenaire du Haut et Moyen Chélif et évolution de la conductivité électrique des eaux souterraines- Octobre 2004.

Plio-Quaternary aquifer of High and Middle Chelif vulnerability map and the evolution of ground- water electrical conductivity - October 2004.

haute vulnérabilité (1E en orange) et s'étale largement sur la zone de vulnérabilité élevée (1D en jaune) qui longe l'oued Chéelif.

3) Une troisième plage conductrice se situe à l'extrémité occidentale de la plaine, à proximité des localités d'El Attaf et El Abadia, avec une valeur extrême de 10230 μ Siemens/cm. Cette dernière plage qui englobe l'extrémité ouest des zones très sensibles 1D et 1E, comporte de nombreuses décharges publiques et rejets d'eaux usées.

7. CONCLUSION GÉNÉRALE

L'intensification des activités industrielles et agricoles, associée à l'urbanisation très rapide de la vallée de l'oued Chéelif, ont abouti à une nette augmentation de la demande en eau. Cette demande s'est malheureusement accompagnée d'une pollution parfois importante des oueds et nappes d'eaux souterraines. À cet égard, nous avons pu distinguer trois zones caractérisées par une eau de mauvaise qualité (figs. 14 et 15):

- la première zone s'étale depuis Khemis Miliana à l'est jusqu'au massif du Doui à l'ouest;
- la deuxième zone occupe la partie centrale de la plaine (El Amra gare);
- la troisième zone se situe à l'extrémité ouest de la plaine, à proximité des localités d'El Attaf et El Abadia.

Pour pallier à ces effets, et afin d'apprécier la vulnérabilité du milieu souterrain de la façon la plus réaliste possible, nous avons choisi d'utiliser la méthode DRASTIC qui prend en compte les facteurs hydrogéologiques qui influent sur la vulnérabilité.

La carte de vulnérabilité obtenue, montre que la région d'étude est caractérisée par une vulnérabilité faible dans certains secteurs (unité 1B) et très élevée dans d'autres (unité 1E). Ce sont essentiellement la basse vallée de l'oued Chéelif et

partiellement les vallées secondaires de ses affluents qui constituent les zones les plus sensibles à la pollution (unités 1D+1E). Ces zones coïncident souvent avec les secteurs de potabilité médiocre des eaux souterraines.

Par ailleurs, l'étude a pu rendre compte de l'emplacement de nombreuses activités humaines potentiellement polluantes sur des sites hydrogéologiques de vulnérabilité élevée (1D) à très élevée (1E). À cet égard, la délimitation de périmètres de protection à la lumière des données récemment acquises devient indispensable.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHOUR, F. 1997.** Conditions hydrologiques et disponibilité en eau en région semi-aride : application de méthodologies nouvelles au bassin de Chéelif. *Thèse de Doct. Univ. de Franche Comté, France*, 255p.
- ALBINET, M. ET MARGAT, J. 1970.** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. *Bull. BRGM* (2) 1970; section III (4), pp. 13-22.
- ALLER, I., BENETT, T., LEHR, J.-H., PETLY, R.-J. AND HACHETTE, G. 1987.** A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. *U.S EPA-600/2-87-035*, 455 p.
- BOULAIN, J. 1957.** Étude des sols des plaines du Chéelif. *Thèse d'Etat, Univ. Alger*, 582 p.
- CHAMPAGNE, L. ET CHAPUIS, R.-P. 1993.** Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de MONTCALM selon la méthode DRASTIC. *Rev. Sc. et Tech. de l'Eau*, 26 (3), pp. 169-176.
- DAVIS, S.-N. AND DEWIEST, R.-J. 1966.** Hydrogeology. *John Wiley and sons, USA*, (13), 463 p.
- DJABRI, L. 1996** Mécanisme de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. *Thèse de Doct. d'Etat, Univ. d'Annaba*, 128p.

- DOERFLIGER, N. ET ZWAHLEN, F. 1998.** Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). *Offi-ce Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysage (OFEFP)*, guide Pratique, Berne, Suisse, 56p.
- DRAÏAÏA, L. ET MAOUNI, DJ. 2000.** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution. Application à l'aquifère plio-quaternaire du bas et moyen Chéelif occidental. *Mém. Ing. État. IST. USTHB. Alger*, 215p.
- HAMZA, M.-H., ADDED, A., FRANCÉS, A. ET RODRIGUEZ, R. 2007.** 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). *Géosciences*, 33, pp. 493-505.
- ISABEL, D., GELINAS, P. ET AUBRE, F. 1990.** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. *Rev. Sc. et Tech. de l'Eau*, 23 (3), pp. 255-258.
- KHERICI, N. 1993.** Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine d'Annaba– la Mafragh, Algérie. *Thèse de Doctorat–ès–sciences, Université d'Annaba*, 170p.
- KIRÈCHE, O. 1977.** Etude géologique et structurale des bassins néogènes à schistosité du Chéelif. *Thèse Doctorat, USTHB*, 260 p.
- KOUASSI, D., BOYOSSORO, H.- K., GABRIEL, E., DIDI, B., SALEY, M.-B. ET BIEMI, J. 2009.** Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à L'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, vol. 31 n°1, pp. 157-171.
- LYAKHLOUFI, S., ER. ROUANE, S., OUAZZANI, N. ET EL HEBIL, A. 1999.** Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech (Maroc). *Hydrogéol.*, n°3, pp. 43-52.
- MENANI, M.-R. 2001.** Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Pub. Revue Sécheresse*, France, vol.12, n°2, pp. 95-101.
- MINA, A. 2007.** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : application à la plaine du Gharb (Maroc). *Revue des Sciences de l'eau / Journal of Water Science. Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)*. ISSN : 1718-8598, vol. 20, n° 2, 2007, pp. 185-199.
- PRADINES, P. 1971.** Étude hydrogéologique du haut et moyen Chéelif. Etude n° 13. 11/RN/SHYG. *D.E.M.R.H* 115p.
- ROUABHIA, A. 2007.** Vulnérabilité des eaux souterraines d'une région semi-aride d'Algérie. Cas de la plaine d'El Ma El Abiod. *Thèse de Magister, Université d'Annaba*, 150p.
- SAÏD, R. 1999.** Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines. Méthodologie et cartographie. (Application aux aquifères du moyen Sébaou et de la Mitidja centrale). *Thèse de Magister, IST/USTHB/Alger*, 366p.
- SCHRAMBACH, B., MARIANI, L. MOSTEFA, G.-L. ET LEFORT, M. 1966.** Exploitation et conservation des nappes souterraines des plaines du Haut, Moyen et Bas Cheliff et de la Mina inférieure. *Étude SES n° A4/DH.1 Génie Rural, Mostaganem*.
- SUAIS, M.-F., VINATIER, J.-M. ET BARAT, A. 1990.** Vulnérabilité des aquifères. Recherche de critères cartographiques pertinents – Essai de cartographie automatique sur la plaine alluviale entre Rhône et Aïn. *Rap. BRGM*, 110 p., 13 cartes.