

# VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) : APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC

**Boualem BOUSELSAL<sup>\*et \*\*</sup>, Nacer KHERICI<sup>\*</sup> et Samia HADJ-SAÏD<sup>\*\*</sup>**

## RÉSUMÉ

La nappe libre d'El-Oued représente une importance économique primordiale, car elle est utilisée pour l'irrigation et la consommation domestique. La zone d'étude occupant une superficie de 220 km<sup>2</sup>, est représentée par une aire urbaine dont le réseau d'assainissement est absent et une aire agricole marquée par l'utilisation intensive d'engrais chimiques et de nutriments organiques, qui présentent un risque permanent pour la qualité des eaux souterraines. L'étude de vulnérabilité des eaux de la nappe phréatique à la pollution par la méthode DRASTIC (Engel et *al.*, 1996) montre que 78.66% de la nappe libre présente une vulnérabilité forte, contre 21.34% avec une vulnérabilité moyenne.

Les zones urbaines et les zones agricoles irriguées par des forages captant les nappes profondes, sont les plus vulnérables.

**Mots-clés** - Nappe phréatique - DRASTIC - Risque de pollution - Vulnérabilité.

## VULNERABILITY AND POLLUTION RISK OF EL OUED FREE-WATER TABLE S.E. ALGERIA) : APPLICATION OF DRASTIC METHOD.

### ABSTRACT

The Phreatic aquifer of El Oued represents an economic priority importance, because it is used in irrigation domain and domestic consumption. The study zone occupies an area of 220 km<sup>2</sup>, represented by an urban area with almost absent sanitation and a farm area with an intensive use of chemical fertilizers and organic nutrients, which a permanent risk to the quality of underground waters. The vulnerability study of the shallow water table to pollution, by the DRASTIC method (Engel and *al.*, 1996), shows that 78.66% of the shallow water table presents a strong vulnerability against 21.34% of medium vulnerability. Urban and agricultural areas irrigated by wells capturing deep groundwater are the most vulnerable.

**Keywords** - Phreatic aquifers - DRASTIC - Pollution risk - Vulnerability.

---

\* Laboratoire de Géologie, Département de Géologie, Université Badji Mokhtar Annaba BP. 12, Annaba 23000, Algérie.

\*\* Laboratoire des Réservoirs Souterrains Pétroliers, Gaziers et Aquifères, Ouargla, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Kasdi Merbah Ouargla BP. 511, route Ghardaïa, Ouargla 30000, Algérie.  
boualembouselsal@yahoo.fr

- Manuscrit déposé le 16 Décembre 2014, accepté après révision le 07 Juillet 2015.

**1. INTRODUCTION**

Au Sahara, la rareté des précipitations nécessite le recours aux ressources en eau souterraines, mais l'absence de qualification et les techniques d'exploitation, de distribution, de gestion et de traitement des eaux usées, dégradent avec le temps la qualité de ces ressources (Bouselsal et Kherici, 2014).

Le présent travail a pour but la détermination de la sensibilité à la pollution des eaux de la nappe libre d'El-Oued, par la méthode DRAS-TIC, pour protéger les endroits les plus sensibles et pour une gestion durable et adéquate des ressources en eau dans la région.

ger) limitée par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa au nord, Djelfa au nord-ouest, Ouargla au sud et sud-ouest et la Tunisie à l'est (Boubir et Abdellah, 2009). Elle occupe une superficie d'environ 220 km<sup>2</sup> et se situe entre les coordonnées UTM : X = 290000 E/315000 E, et Y = 3680000 N/3700000 N.

La zone d'étude fait partie de ce qu'on nomme le Grand Erg Oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'origine continentale d'altitudes oscillant entre 64 m et 120 m (Cornet, 1964). Il faut signaler qu'à ces endroits on note l'existence des « ghouts » (entonnoirs artificiels creusés par les habitants pour planter les palmiers et les légumes).

**2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

**2.1. Situation géographique**

La région d'étude (fig.1) fait partie de la wilaya d'El-Oued (Sud-est algérien à 500 km d'Al-

**2.2. Cadre hydrogéologique**

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional (BG, 2002) dont l'extension couvre une superficie de 780 000 km<sup>2</sup>. Ce bassin, constitue une importante dépression

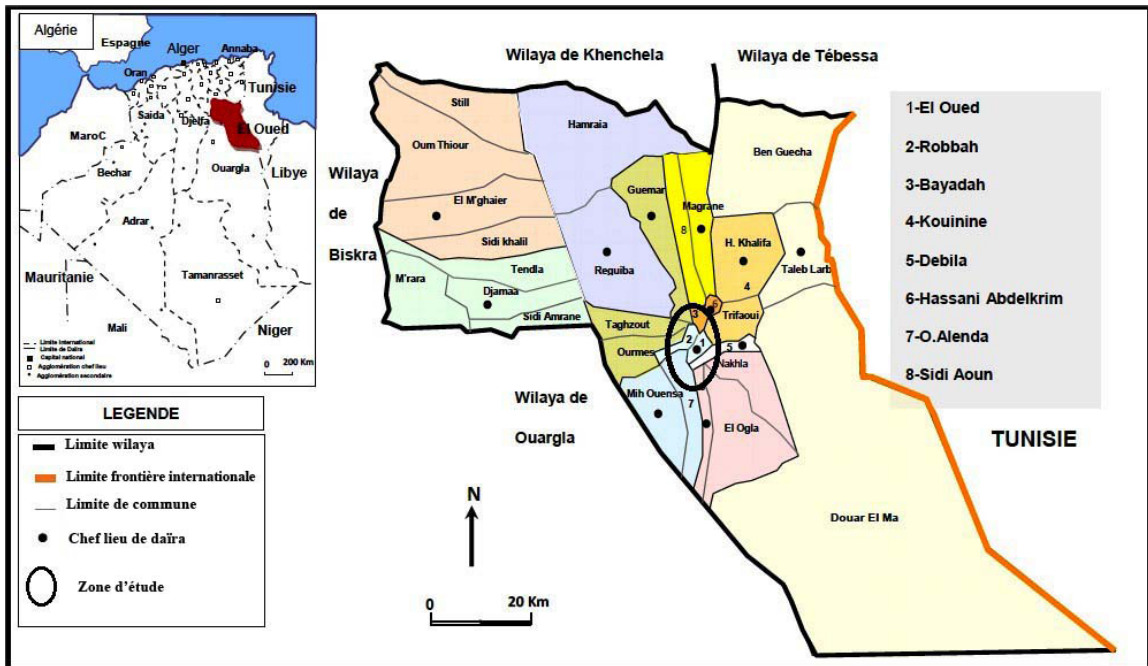


Fig. 1 - Situation géographique de la zone d'étude.

*Geographic location of the study area.*

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques subverticaux. Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au nord-est du bassin (Busson, 1970; Fabre, 1976). Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire essentiellement constitué de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres termine cette série. Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique.

Le système aquifère d'El-Oued (fig.2) est constitué de trois aquifères (UNESCO, 1972; OSS, 2003; Guendouz et al., 2006; Saibi et al.,

2009; Khechana, 2014), un aquifère libre, et deux aquifères captifs: (le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI)).

L'aquifère libre est constitué de formations détritiques d'âge quaternaire et mio-pliocène représentées par des sables, grès, sables argileux et des argiles sableuses avec un substratum argileux. La profondeur du substratum est comprise entre 50 et 90 m (Senoussi et Aouat, 1992; Meziani et al., 2011).

Les aquifères du Complexe Terminal sont très hétérogènes. Ils englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. En fait, il est possible d'y distinguer trois aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces trois aquifères sont représentés par les sables du Mio-Pliocène (1<sup>ère</sup> nappe de sables CT1), par les sables, grès et

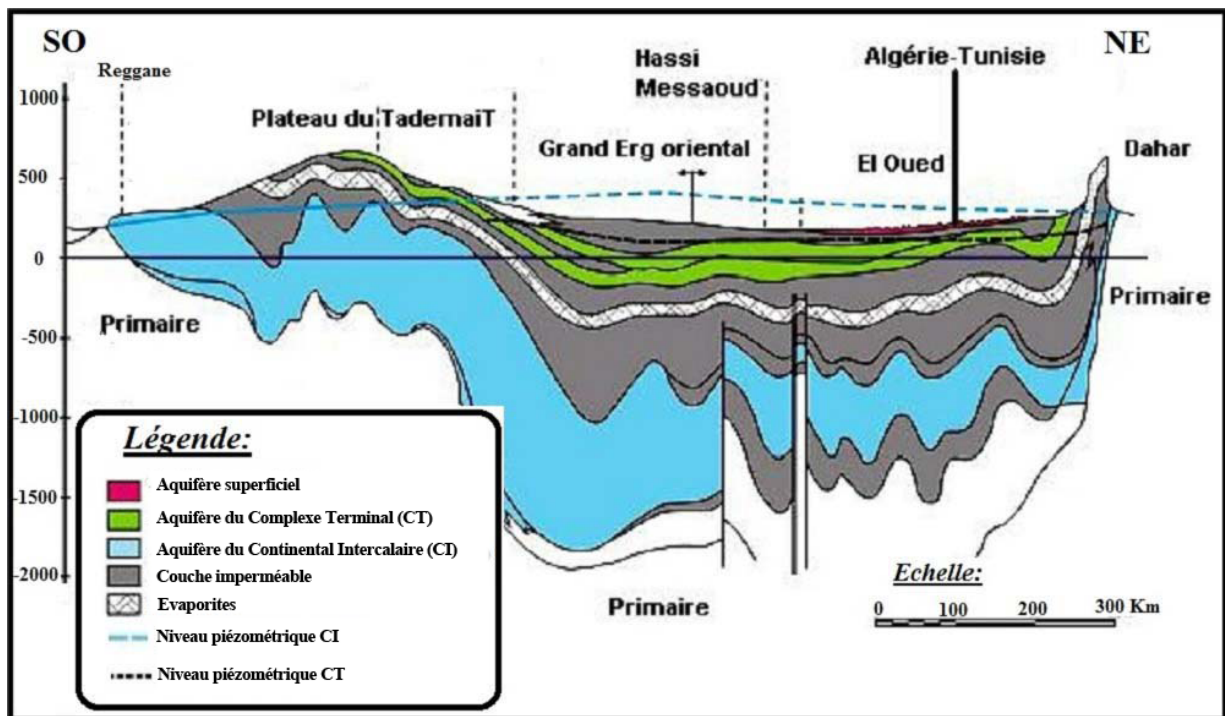


Fig. 2 - Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrional (UNESCO, 1972).  
*Hydrogeological cross-section of the Northern Sahara aquifers (UNESCO, 1972).*

graviers du Pontien (la 2<sup>ème</sup> nappe de sables CT2), et par les calcaires et dolomies du Sénonien et de l'Éocène inférieur (nappe de calcaire CT3). La profondeur du Complexe Terminal (CT) est comprise entre 100 et 600 mètres et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m.

L'aquifère du Continental Intercalaire (CI) est représenté par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé inférieur. C'est un système aquifère multicouche dont la profondeur atteint localement 2000 m et dont la puissance varie entre 200 et 400 m. À El-Oued, il est exploité par des forages artésiens pour l'AEP, le débit des forages existant dans la zone d'étude est de 140 l/s.

### 2.3. Problème de la remontée de la nappe libre

Au cours des 30 dernières années, la région d'El-Oued a connu une remontée des eaux de la nappe phréatique. Les conséquences de ce phénomène sont néfastes pour l'homme et pour l'environnement. Les conséquences sont le noyage des palmeraies et leurs asphyxies, le noyage des fosses domestiques et la propagation de la pollution bactériologique dans la nappe et la contamination des eaux par les nitrates d'origines domestique et agricole. Aussi, la forte minéralisation d'eau provoquée par l'évaporation intense à partir des plans d'eau libre et, la dissolution des sels est à l'origine de l'affaissement des terrains à travers la région d'El-Oued (Bouselsal et Kherici, 2014; ANRH, 1993).

La zone touchée par la remontée des eaux s'étend sur une superficie de 3000 km<sup>2</sup> occupée par 380 000 habitants, qui sont répartis sur 18 communes : Bayadha, Robbah, Kouinine, Guemmar, Taghzout, Hassani Abdelkrim, Debila, Sidi Aoun, Magrane, Hassi Khelifa, Reguiba, Mi-houensa, Oued Alenda, Ogl, Nakhla, Ourmes et Trifaoui.

Les causes de la remontée des eaux de la nappe phréatique sont multiples; le pompage intensif des nappes profondes (CT et CI) à des fins agricoles et d'approvisionnement en eau potable des populations. Ce phénomène est aggravé par l'absence quasi-totale d'infrastructures d'assainissement (le taux de couverture en réseaux d'assainissement est de 10%) dans la wiliya d'El-Oued et par l'absence d'exutoires due à la faiblesse de la pente de relief.

À partir de 1993 jusqu'à 2004, une série d'investigations a été entreprise pour connaître les caractéristiques géométriques et géologiques de l'aquifère, et recenser les forages existants. À la fin des investigations, une série de mesures a été prise: l'arrêt de l'irrigation à partir de nouveaux forages issus des aquifères du CT et du CI, le remplacement des forages par des puits à partir de la nappe phréatique, la réduction de la dotation en AEP des habitants et, une meilleure gestion des programmes d'irrigation. Ces mesures ont eu un impact positif avec une stabilisation ou une baisse du niveau piézométrique dans certaines zones affectées, alors que dans d'autres zones, la nappe continue à monter de 40 à 60 cm par année (BG, 2002; Côte, 2001 et 1993) notamment dans la ville d'El-Oued.

Face à ce problème, la solution adoptée est la réalisation d'un drainage vertical sur l'ensemble de l'aire de l'étude. Ce procédé nécessite rien que pour la région d'El Oued, la mise en place d'un système de drainage et la réalisation d'une batterie de 51 forages équipés de pompes pour un débit d'exploitation global de 348 l/s ainsi que la mise en place d'un réseau de drainage de 34 km indépendant du réseau d'assainissement de la ville. L'ensemble des eaux drainées aboutit à la station de pompage qui, à son tour refoulera plus loin vers le Chott Halloufa situé à 47 km au nord de la ville d'El Oued. Le réseau de drainage est opérationnel depuis 2011, en conséquence on note la stabilité du niveau d'eau à 1m de profondeur sous les zones les plus basses (ghouts).

Depuis la mise en service du projet d'El-Oued (4 ans), le volume d'eau excédentaire extrait de la nappe phréatique (dans le centre ville d'El-Oued seulement) par 51 forages du drainage vertical est de l'ordre de 15 millions de mètres cubes. À cela, il faut ajouter le volume d'eaux épurées par les quatre stations d'épuration, qui est de l'ordre de 28 millions de mètres cubes. Le système d'évacuation des eaux usées a transféré ces eaux vers le rejet final de chott Halloufa. En dépit de ces mesures, le problème de la remontée des eaux n'est pas encore maîtrisé jusqu'à nos jours, car un arrêt de réseau de drainage d'un mois peut provoquer une augmentation du niveau de la nappe phréatique de plus d'un mètre.

### 3. MÉTHODOLOGIE

#### 3.1. Concept de vulnérabilité des eaux souterraines

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été introduit par Margat à la fin des années 60 (Margat, 1968). Il se base sur le fait que les écosystèmes compris entre la surface terrestre et les aquifères protègent naturellement les eaux souterraines contre les pollutions d'origine humaine, animale ou naturelle. Partant de ce postulat, le terme de «vulnérabilité des eaux souterraines» est défini comme étant le contraire de «protection naturelle contre les pollutions». Cette protection est possible grâce à différents mécanismes d'atténuation des pollutions qui peuvent se produire durant le parcours de la substance polluante dans le système. Ces mécanismes sont entre autres la dispersion, la filtration, la sédimentation, la dilution, l'absorption/désorption, la biodégradation, la volatilisation et la dégradation chimique (Vrba and Zaporozec, 1994; Fetter, 1994; Ducommun, 2010; Kherici et al., 2010).

Certaines spécifications sont apportées au terme de vulnérabilité des eaux souterraines. L'expression «vulnérabilité intrinsèque» est utilisée dans les cas où seules les caractéristiques naturelles des écosystèmes sont appréhendées, alors

que le terme de «vulnérabilité spécifique» est utilisé lorsque la nature du polluant et son scénario d'entrée dans le système sont considérés.

De nombreuses méthodes pour l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées. Ces publications se sont généralisées au monde entier dès la fin des années 80. Les plus répandues sont DRASTIC (Aller et al., 1987), SINTACS (Citivà, 1990, 1995 et Citivà et De Maio, 1997), EPIK (Doerfliger et al., 1998), PaPRIKa (Doerfliger et al., 2009), l'Approche Européenne (Daly et al., 2002) et ses méthodes dérivées, COP (Vías et al., 2006), PI (Goldscheider et al., 2000). Mentionnons aussi, quelques-unes des méthodes propres à un pays comme par exemple les méthodes suisses (Doerfliger et al., 2009), la méthode slovène (Ravbar, 2007) ou encore la méthode irlandaise (Shemes, 1999).

#### 3.2. Présentation de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC (Aller et al., 1987; Foster, 1987) est une méthode à paramètres et indices superposables. Elle a été développée par l'Agence de Protection de l'Environnement Américaine (EPA) pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines aux États-Unis. Elle est applicable dans la majeure partie des situations géologiques et climatiques qui peuvent être rencontrées. Cette méthode propose une adaptation du système de pondération des critères pour les pesticides, ce qui permet une appréhension de la vulnérabilité spécifique à ce type de contamination uniquement.

Étant l'une des premières méthodes à avoir été mondialement utilisée, DRASTIC a fait l'objet de nombreuses adaptations en fonction de l'évolution des connaissances informatiques d'une part, et des particularités géographiques des régions étudiées, d'autre part. La méthode DRASTIC considère sept paramètres (fig. 3) pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines (Thüler, 2014):

- la profondeur du toit de la nappe (depth to water) est subdivisée en dix classes de vulnérabilité. Plus la profondeur au toit de la nappe est importante, moins la zone est vulnérable;

- la recharge (net recharge) est exprimée en hauteur d'eau infiltrée dans la nappe sur une année. Elle est divisée en 5 classes. Plus la recharge est élevée, plus la vulnérabilité l'est aussi. Le postulat adapté ici est que, l'importance de la recharge est un facteur aggravant la pollution, car le taux d'infiltration d'eau guide le transport des contaminants dans le sol jusqu'à la zone saturée;

- la lithologie de la roche aquifère (aquifer media) est établie selon neuf grands ensembles lithologiques comme les calcaires massifs, les calcaires karstifiés, les roches métamorphiques, les moraines, les grès, etc. À chaque type de lithologie est attribué un degré de vulnérabilité variable qui est défini par l'expert en fonction de la réactivité de l'aquifère, de sa fracturation et des phénomènes de sorption qui peuvent s'y produire;

- les propriétés du sol (soil media) sont subdivisées en neuf classes en fonction de leur composition, de leur texture et, de leur structure. Plus les sols sont perméables, plus ils sont considérés comme vulnérables car ils favorisent l'infiltration des pollutions;

- la topographie (topography), ou plus précisément le pourcentage de pente, est subdivisé en sept classes. L'hypothèse faite ici est que, plus la pente est faible, plus il y a d'infiltration et plus la zone est vulnérable;

- l'impact de la zone non saturée (impact of the vadose zone media) est divisé en neuf classes d'après les lithologies qui la composent. Comme pour le critère « géologie de la roche aquifère », chaque lithologie a un degré de vulnérabilité variable qui doit être défini en fonction des connaissances du système. Généralement, une lithologie dans laquelle l'eau circule rapidement est considérée comme plus vulnérable qu'une lithologie dans laquelle l'eau circule lentement;

- la conductivité hydraulique de l'aquifère (hydrolic conductivity of the aquifer) est divisée en six classes différentes. Plus elle est élevée, plus le milieu est considéré comme vulnérable car les mécanismes d'atténuation des pollutions ont moins de temps pour se produire. Ce critère est étroitement lié à la géologie de la roche aquifère.

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (Di) est la somme pondérée des sept paramètres selon l'équation (1):

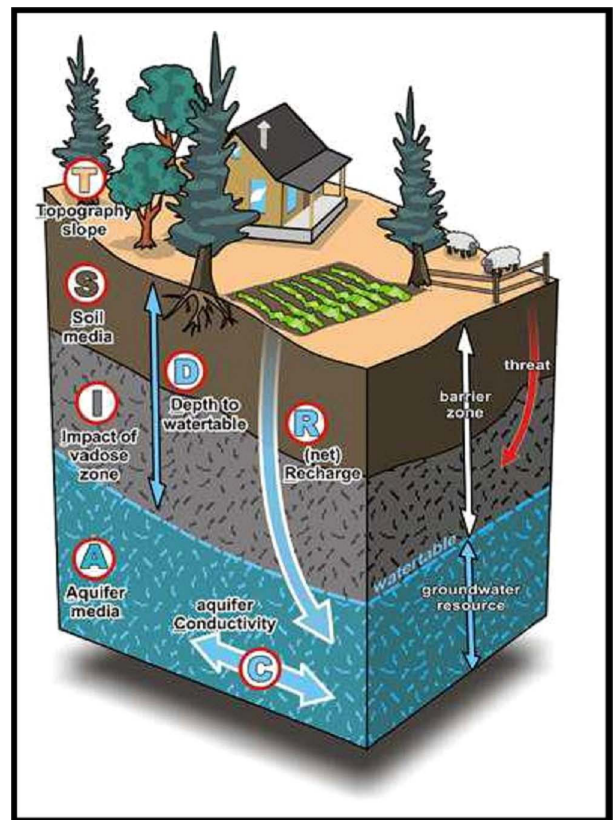


Fig. 3 - Illustration des paramètres DRASTIC (source : GSC, 2009).

**DRASTIC parameters illustration**  
(from : GSC, 2009).

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p; \quad (1)$$

où :

D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités dans le tableau I.

n : notation accordée à chaque paramètre.

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau I. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

**Tableau I** - Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC et leurs pondération (Lallemand-Barrès, 1994).

**Standards assigned ratings for DRASTIC method parameters and their weights (Lallemand - Barrès, 1994).**

Paramètre	Classe	Note	Pondérateur
<b>D</b> Profondeur de la surface de la nappe	Supérieure à 30 m	1	5
	30 à 22.5 m	2	
	22.5 à 15 m	3	
	9 à 15 m	5	
	4.5 à 9 m	7	
	3 à 4.5 m	8	
	1.5 à 3 m	9	
	Inférieure à 1.5 m	10	
<b>R</b> Recharge efficace	0 à 50 mm	1	4
	50 à 100 mm	3	
	100 à 175 mm	6	
	175 à 225 mm	8	
	Supérieure à 225 mm	9	
<b>A</b> Nature de la zone saturée	shale massif	2	3
	Roches métamorphiques	3	
	Roches métamorphiques altérées, grès lités, calcaires	4	
	Shale en séquence	6	
	Grès massif	6	
	Calcaire massif	6	
	Sable et gravier	8	
	Basalte	9	
	Calcaire karstique	10	
<b>S</b> Nature de sol	Argile non agrégée et non fissurée	1	2
	Limon argileux	3	
	Limon silteux	4	
	Limon	5	
	Limon sableux	6	
	Argile, agrégats ou pentes	7	
	Sable	9	
	Gravier	10	
	Peu épais ou absent	10	

**Tableau I (suite) - Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC et leurs pondération (Lallemand-Barrès, 1994)**

**Standards assigned ratings for DRASTIC parameters and their weights (Lallemand - Barrès, 1994).**

Paramètre	Classe	Note	Pondérateur
T Topographie (la pente)	Supérieure à 18 %	1	1
	12 % à 18 %	3	
	10% à 12 %	5	
	8 % à 10 %	7	
	6 % à 8 %	8	
	2 % à 6 %	9	
	0 % à 2 %	10	
I Nature de la zone non saturée	Silt et Argile	1	5
	Shale	3	
	Calcaire	6	
	Grès	6	
	Calcaire lité, grès, shale	6	
	Sable et gravier avec silt et argile	6	
	Sable et gravier	8	
	Basalte	9	
C Conductivité hydraulique (perméabilité)	4,7.10-5 à 4,7.10-5 m/s	1	3
	4,7 .10-5 à 14,7.10-5 m/s	2	
	14,7.10-5 à 32,9.10-5 m/s	4	
	32,9.10-5 à 4,7.10-4 m/s	6	
	4,7.10-4 à 9,4.10-4 m/s	8	
	Supérieure à 9,4.10-4 m/s	10	

Engel *et al.* (1996) propose la classification simple des valeurs de l'indice de vulnérabilité en quatre classes (tabl. II), au lieu de huit classes (de 1 à 8) de vulnérabilité dans la méthode standard, allant de la valeur 23 jusqu'à la valeur 226 (Aller *et al.*, 1987). Cet indice de vulnérabilité ainsi calculé, représente le degré de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache.

### 3.3. Mesures et préparation des données

L'élaboration de la carte de vulnérabilité, demande un certain nombre de données (Rouabhia *et al.*, 2004; Kachi *et al.*, 2007):

#### 3.3.1. La profondeur d'eau de la nappe

Une campagne de mesures piézométriques a été réalisée dans la zone d'étude en avril 2010, pour déterminer la profondeur de la surface de la nappe libre d'El-Oued.

#### 3.3.2. La recharge de la nappe

Pour quantifier la recharge de la nappe, nous avons analysé les données météorologiques de la station de Guemmar, les données d'irrigation recueillies à partir de la direction de l'agriculture d'El-Oued et les données de l'assainissement fournies par l'Office National de l'Assainissement.



VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

**Tableau II** - Classes de la vulnérabilité DRASTIC (Engel et al., 1996).

**Classes of DRASTIC vulnerability (Engel and al., 1996)**

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	Inférieur à 101
Moyen	101 à 140
Fort	140 à 200
Très fort	Supérieur à 200

### 3.3.3. La lithologie de l'aquifère

La campagne géophysique exécutée dans la région (Senoussi et Aouat, 1992) et l'interprétation de 60 logs de forages d'eau, recueillis par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) ont permis d'élaborer des coupes lithologiques de l'aquifère libre d'El-Oued.

### 3.3.4. La topographie d'El-Oued

Une amélioration a été apportée sur l'ancienne carte topographique d'El-Oued au 1/50 000 par l'addition de 2500 points de mesure pour la rendre plus précise et mieux visualiser le relief.

### 3.3.5. La nature de la zone non saturée

Une étude géotechnique a été exécutée dans la région; 30 échantillons de terrain extraits à des profondeurs oscillant entre 50 cm et 3 m sont amenés au laboratoire pour effectuer des analyses granulométriques et géochimiques, afin de déterminer la nature de la zone non saturée.

### 3.3.6. Mesures de perméabilité

L'interprétation des essais de pompage dans 33 puits (BG., 2003) a permis de déterminer la variation des paramètres hydrodynamiques dans l'aquifère libre d'El-Oued.

### 3.4. Cartographie des paramètres de vulnérabilité et comparaison des cartes

Le traitement des données s'est effectué à l'aide du logiciel SURFER10 qui a permis de construire la base de données physique de la zone d'étude. La réalisation des cartes en courbes d'isovaleurs a été déterminée par krigeage linéaire.

Le krigeage est une interpolation qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison de données. La pondération des points est réalisée par une fonction de structure issue des données. Il est donc tenu compte des distances, des valeurs et des corrélations. C'est une technique de calcul de moyennes mobiles utilisant les paramètres d'un variogramme pour obtenir une bonne estimation de la relation entre les points de données. Le variogramme correspond à l'évolution de la semi-variance en fonction du décalage entre les points. L'indice de vulnérabilité générale est calculé pour chaque maille selon l'équation 1. En plus, le nombre de mailles obtenu par classe constitue l'élément de base de comparaison et d'analyse statistique des surfaces pour la carte de vulnérabilité.

Afin de pouvoir valider la carte de vulnérabilité, nous avons comparé la carte de la vulnérabilité à la pollution avec la carte du taux des nitrates dans les eaux souterraines; nous avons représenté les points de mesures de taux des nitrates sur la carte de vulnérabilité, grâce à la bonne répartition des points (82 points de mesures) sur la surface de la carte, il suffit de déterminer le nombre des points

de mesures (avec leurs plage de concentration) dans chaque classe de vulnérabilité.

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Détermination de cote des paramètres de la méthode DRASTIC

#### 4.1.1. Profondeur de la surface de la nappe

La profondeur de la nappe dans la zone d'étude (fig.4) oscille entre 0,65 m et 17,4 m (Bousselsal et Kherici, 2014). Dans les chefs-lieux d'El-Oued et Kouinine, la profondeur de la nappe est inférieure à 1,5 m. La profondeur d'eau dans les autres zones urbaines oscille entre 1,5 m et 9 m. Les plus grandes profondeurs sont localisées à Nakhla, Ogla, les plantations de Mehri et la zone agricole entre El-Oued, Trifaoui et Robbah avec des valeurs oscillant entre 9 m et 17,4 m. Les cotes de profondeur de la nappe varient de 10 à 3.

#### 4.1.2. Recharge de la nappe

La recharge d'un aquifère peut avoir plusieurs origines. Chacune d'entre elles doit être appréhendée séparément pour estimer la recharge (Thomas *et al.*, 2006). Ces origines sont l'apport direct par les précipitations (pluie efficace), la ré-infiltration due à l'irrigation et, la recharge urbaine.

Le bilan hydrique de la région d'El-Oued montre que la réserve facilement utilisable est nulle durant les onze mois de l'année, conséquence d'une faible précipitation et d'une forte évapo-transpiration. On peut donc négliger la recharge par la pluie efficace.

L'examen de la carte piézométrique de juin 2010 (fig.5), montre que la partie haute de la nappe représentée en vert, est située au sud-ouest avec une cote de près de 82 m et une zone basse au nord-est, représentée en bleu, avec une cote de 60 m, l'écoulement de la nappe se fait en général du SO vers le NE.

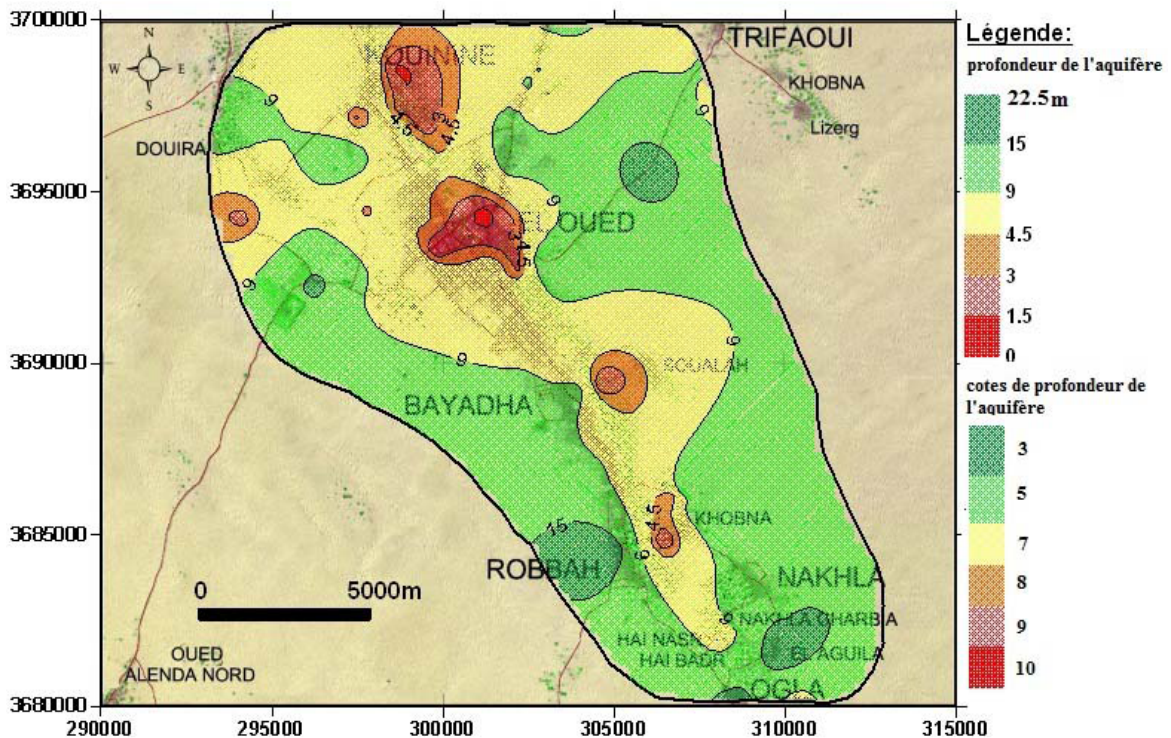


Fig. 4 - Carte des cotes de profondeur du plan d'eau suivant la méthode DRASTIC.

*Spot height depth map of water according to the DRASTIC method*

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

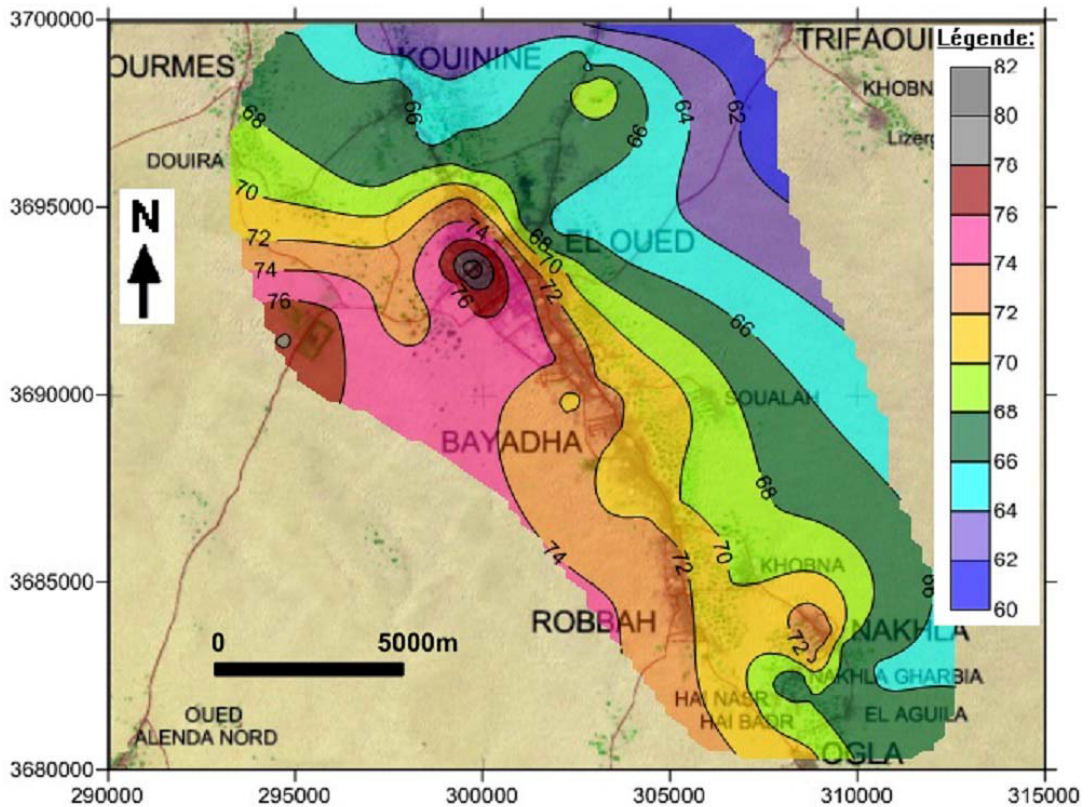


Fig. 5 - Carte piézométrique de la zone d'étude de juin 2010.

*Piezometric map of the study area (june 2010)*

Le gradient hydraulique oscille entre 0.08 et 0.66%. Les centres urbains et les zones agricoles irrigués à partir des nappes profondes, apparaissent sur la carte piézométrique comme des zones de divergence; c'est le cas des plantations de Mahri au NO, Teksebt au centre, Nakhla et Bayada au sud. Par contre, les zones irriguées à partir des puits dans la nappe phréatique, apparaissent sur la carte comme des zones de convergences, c'est le cas de Nakhla Gharbia et Hai Nasr au sud, Sidi Abdelah au nord-est, et à l'ouest de Bayada, on ajoute à cette dernière les zones de dépressions de Chott, hôtel Louss et la zone de rejet d'El-Oued. La carte piézométrique de juin 2010 montre que les centres urbains et les zones agricoles sont les lieux de recharge de la nappe, suite à l'infiltration des eaux d'assainissement et des eaux d'irrigation vers la nappe libre.

Les zones de recharge ont été définies à partir de l'interprétation de l'image satellite et de la carte d'occupation de sol (BG, 2004; Khechana, 2014). Le calcul de la recharge de la nappe par les eaux usées urbaines, repose sur la consommation de l'eau par la population dans les zones urbaines multiplié par 0,8, pour trouver le volume d'eau d'assainissement, selon l'équation 2.

$$R = 1000 \frac{Q_m \times 0.8}{S}; \quad (2)$$

où :

$Q_m$  : débit des forages destinés à l'alimentation en eau potable ( $m^3/an$ );

$R$  : la recharge ( $mm/an$ );

$S$  : la surface urbanisée de la zone d'étude ( $m^2$ ).

La recharge de l'irrigation a été estimée à partir des données fournies par la Direction de l'Agriculture (DA) d'El-Oued.

La carte de recharge (fig.6), montre que la recharge de la nappe varie entre 0 mm et 1304 mm. Les zones urbaines de Bayadha, Robbah, Nakhla et Kouinine présentent une recharge qui dépasse 1m, à cause de l'absence de réseau d'assainissement, les zones agricoles présentent une recharge moyenne de l'ordre de 1m par an, la ville d'El-Oued est dotée d'un réseau d'assainissement partiel (dans les anciens quartiers) qui a réduit la recharge de la nappe à 720 mm et enfin, les zones désertiques occupées par les dunes de sables où la recharge de la nappe est nulle.

D'après la carte de recharge, on constate que ce paramètre dépasse les 225 mm/an ou est égal à 0 mm/an sans valeurs intermédiaires, ce qui nous donne deux cotes de vulnérabilité 1 et 9.

#### 4.1.3. Nature de la zone saturée

Une étude géophysique par sondages électriques verticaux basée sur la mesure de la résistivité des roches a été réalisée, le nombre total des sondages électriques verticaux est 362 SEV (126 SEV destinés à l'exploration de la nappe phréatique) avec longueur de ligne des AB égale à 500 m. Ces études couvrant la région d'El-Oued ont été réalisées par ENAGEO en 1993 sur une zone beaucoup plus grande que la zone d'étude. Trois terrains ont été différenciés : le premier est composé de sables et de grès à forte résistivité, le second d'argiles sa-bleuses et de sables argileux avec une résistivité moins forte et le troisième, avec un substratum argileux de faible résistivité.

Une coupe lithologique (fig.7) a été réalisée sur la base de logs de forages. On constate que la lithologie de la zone saturée est représentée par des sables fins, éoliens avec des passées de gypse de la surface jusqu'à 25 m de profondeur, suivies de grès à ciments gypseux

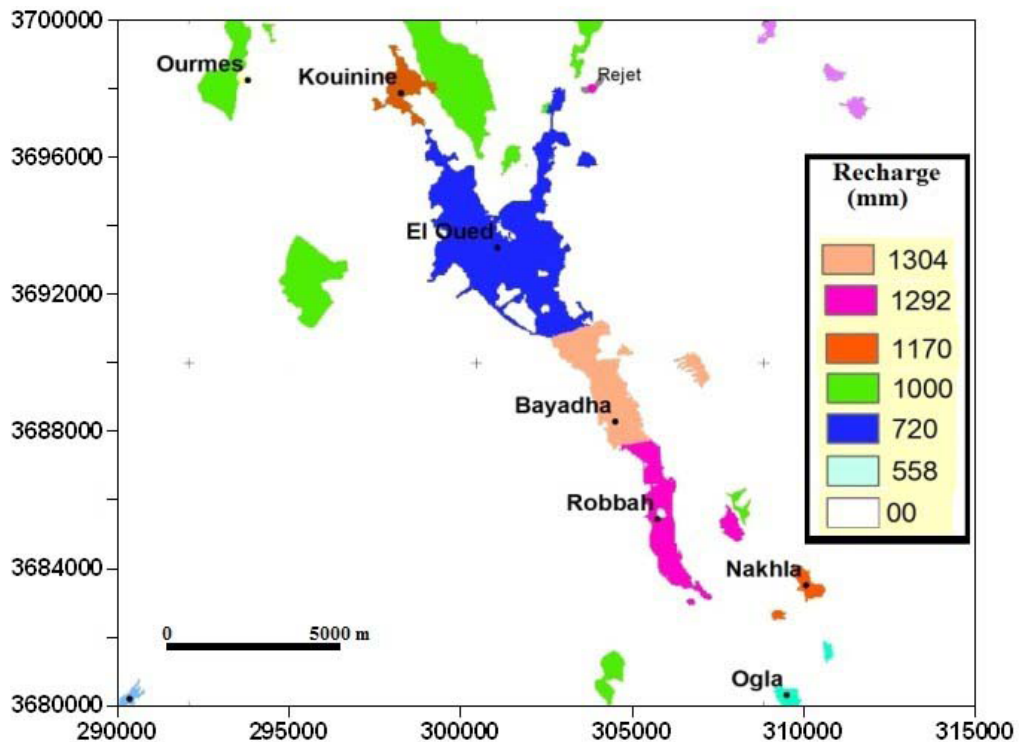


Fig. 6 - Carte de la recharge de la nappe libre d'El-Oued (BG, 2004).

*Free-water table recharge map of El Oued (BG, 2004).*

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

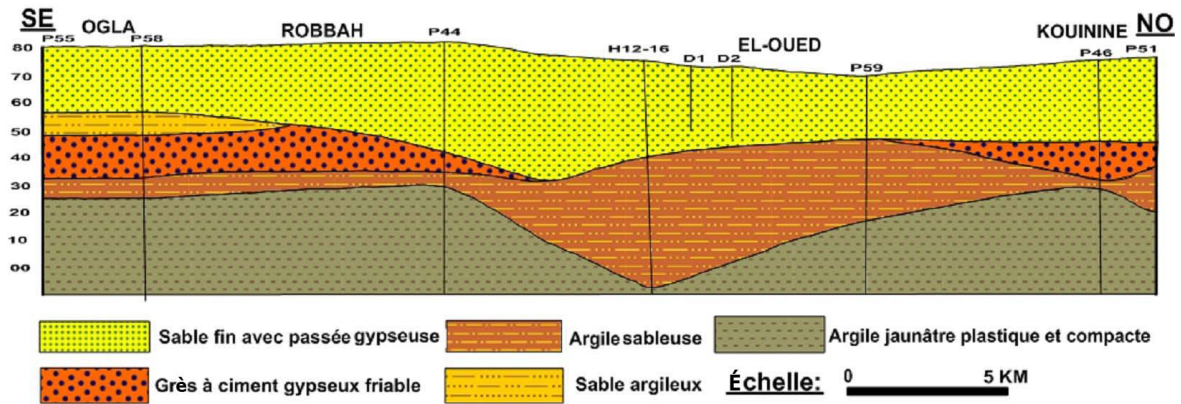


Fig. 7 - Coupe lithologique dans l'aquifère libre d'El-Oued.

*Lithological cross section through the unconfined aquifer of El Oued.*

friables. Par endroits, on remarque l'absence des grès qui ont été remplacés par des argiles sableuses. La couche la plus basse est représentée par des argiles sableuses avec un pourcentage de sable décroissant vers le bas. La profondeur du substratum argileux oscille entre 50 m et 90 m.

Nous avons attribué une valeur de cote de 8 pour la nature de la zone saturée qui correspond aux sables et graviers.

#### 4.1.4. Nature du sol

La couche de sol dans la région d'El-Oued n'existe pas, l'agriculture exercée dans la région se fait sur des dunes de sables aménagées avec un ajout de fumiers de poulaillers provenant des régions du nord (Batna et Biskra) et des engrais. Les terres agricoles s'appauvrissent en nutriments, après quelques années d'exploitation. Les agriculteurs se déplacent alors vers d'autres terres (d'autres dunes) et recommencent à travailler de nouveau. Les terres abandonnées présentent un taux de matière organique faible, dû à la minéralisation de cette dernière sous

un climat aride. La cote attribuée à la nature du sol est 10, correspondant à l'absence du sol, où à une très faible épaisseur.

#### 4.1.5. Topographie d'El-Oued

La zone d'étude située au bas Sahara est caractérisée par un relief plan (fig. 8). Les pentes calculées sur la carte donnent des valeurs très faibles allant de 0.2% à 1.5%. À titre d'exemple, nous donnerons les valeurs de pente dans quelques points sur la carte : (A = 0,8%), (B = 0,2%), (C = 0,75%), (D = 1,5%) et (E = 0,3%).

La cote qui correspond aux paramètres de topographie est 10.

#### 4.1.6. Nature de la zone non saturée

Les études géotechniques effectuées dans la zone d'étude montrent que la zone non saturée est constituée de plus de 90 % de sables et de graviers, la fraction fine (silt et argile) représente un pour-

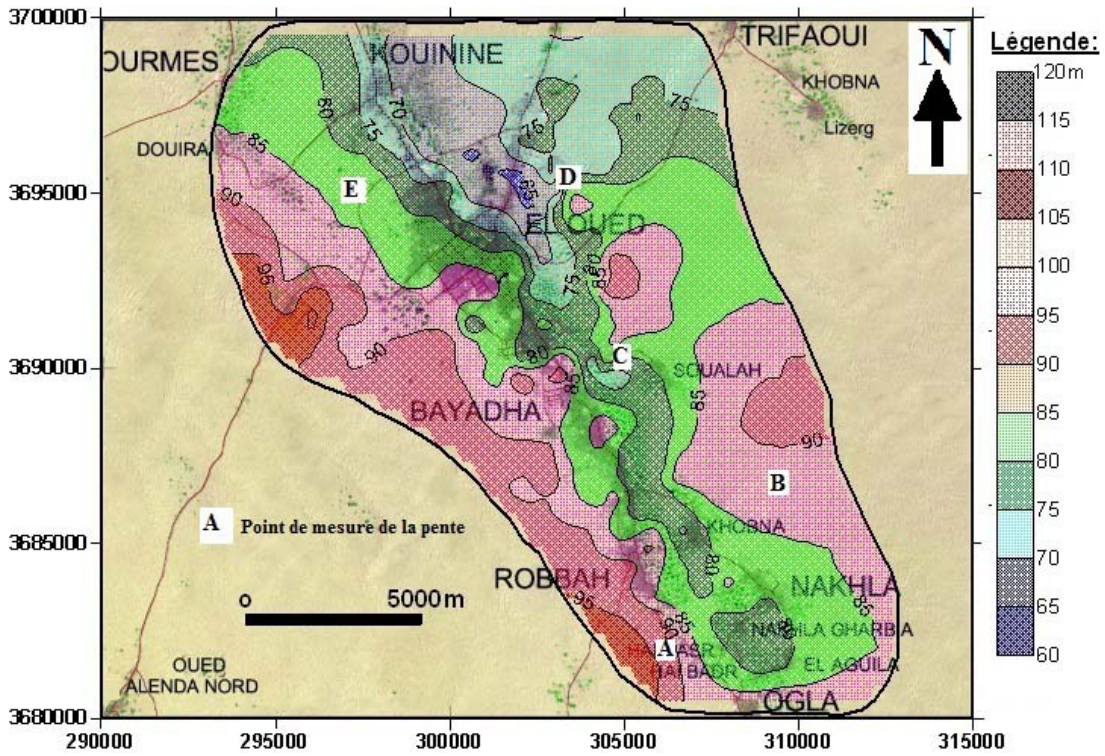


Fig. 8 - Carte topographique de la zone d'étude.

**Topographic map of the study area.**

centage inférieur à 10% (fig. 9). La cote attribuée à ce paramètre est 8.

**4.1.7. Conductivité hydraulique de l'aquifère libre d'El-Oued**

Les essais de pompage effectués dans la zone d'étude (Kherici et al., 1996; BG, 2003), permettent de tracer la carte de perméabilité (fig. 10) de l'aquifère libre, les valeurs de perméabilité oscillent entre  $1,1 \times 10^{-4}$  m/s et  $2,6 \times 10^{-4}$  m/s.

Les valeurs de perméabilité mesurées correspondent à une valeur de cote égale à 6.

**4.2. Carte de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued**

Les indices évalués par la méthode DRASTIC (Engel et al., 1996) oscillent entre 110 et 195 et

représentent ainsi deux classes qui illustrent la présente carte (fig.11). Ces dernières sont réparties comme suit :

La classe « moyenne » avec un indice de vulnérabilité oscillant entre 110 et 140, se rencontre dans la majeure partie à l'est de la zone d'étude, donne lieu à une pollution moins sévère et représente 21,34 % de la superficie de la zone d'étude. Le degré de vulnérabilité moyen est engendré par la combinaison de profondeurs importantes de la nappe supérieure à 9 m et la recharge nulle de la nappe, dans les endroits isolés influencés seulement par les conditions climatiques extrêmes, sous un climat aride.

La classe « forte » avec un indice de vulnérabilité oscillant entre 140 et 195, s'étend du nord au sud-ouest, en occupant la proportion la plus importante (78.66 %) de la zone d'étude. Le fort degré de vulnérabilité est expliqué par l'associa-

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

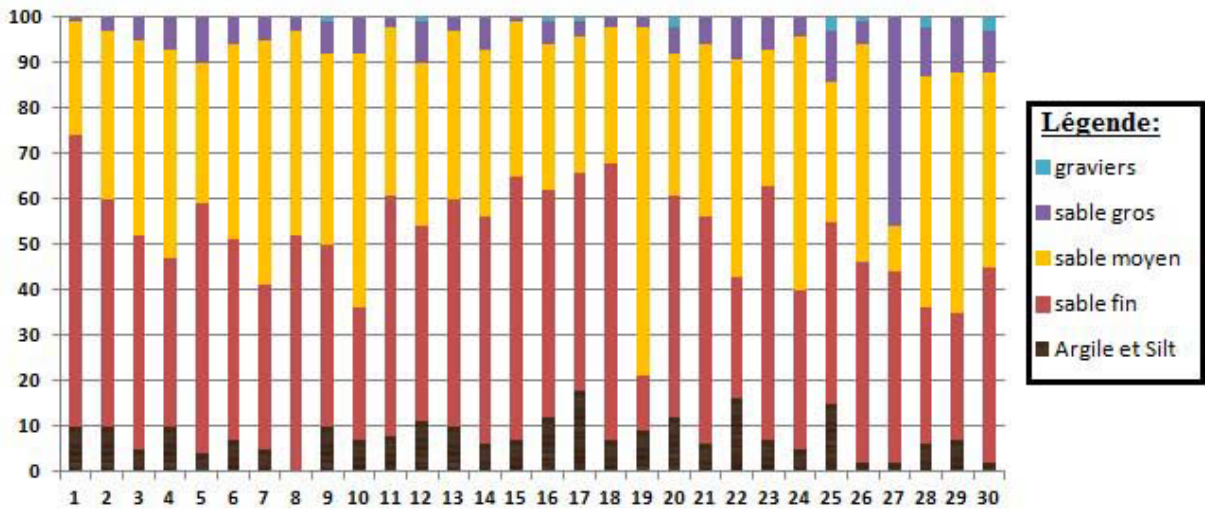


Fig. 9 - Histogramme de la lithologie de la zone non saturée de l'aquifère libre d'El-Oued.  
*Histogram of the unsaturated zone lithology of El Oued free aquifer.*

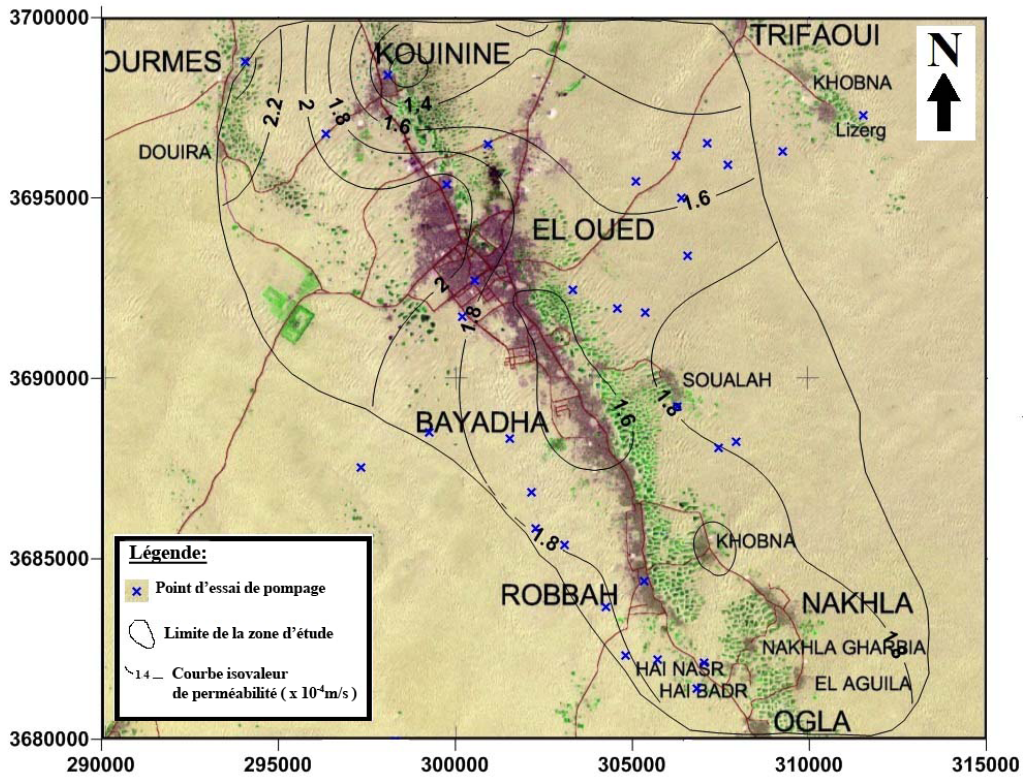


Fig. 10 - Carte des perméabilités de l'aquifère libre d'El-Oued  
*Permeabilities map of El Oued free aquifer.*

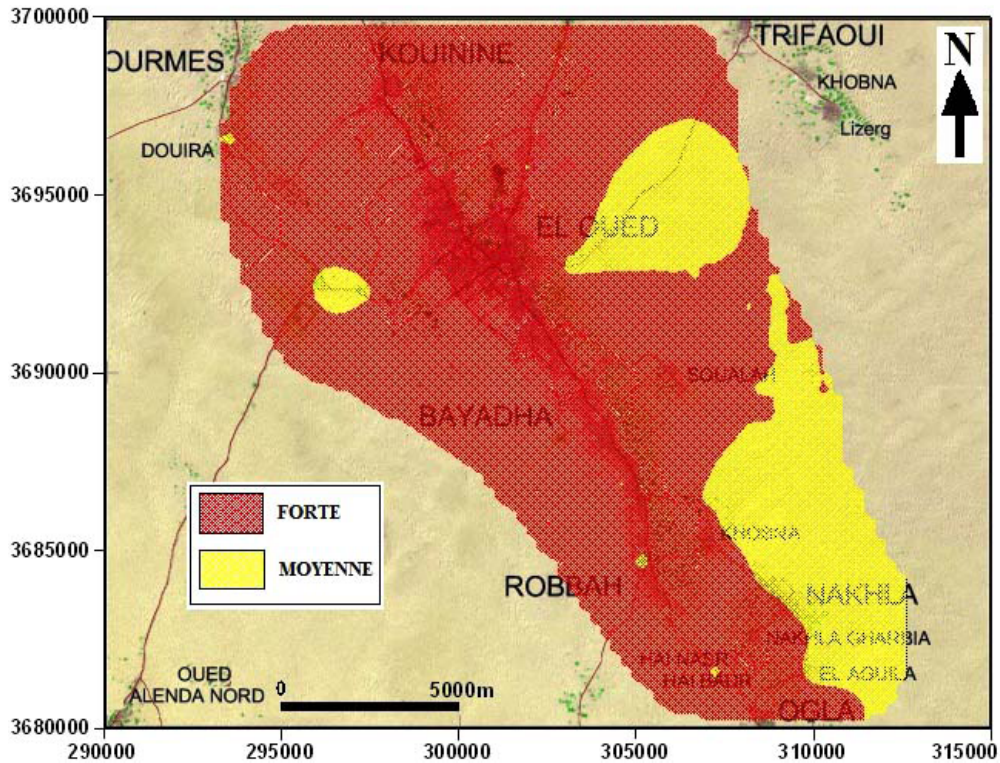


Fig. 11 - Carte de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued.

**DRASTIC vulnerability map of El Oued free aquifer.**

tion des profondeurs de la surface piézométrique qui sont faibles voire nulles et, la recharge très importante de la nappe sous les principaux centres urbains d'El-Oued (El-Oued, Kouinine, Teksebt, Université d'El-Oued, Bayadha, Robbah et Ogl) et, dans les zones agricoles fortement irriguées par des forages captant les nappes profondes, comme le cas de Soualah, Nakhla Gharbia, Khobna et Douira.

#### 4.3. Validation de la carte de vulnérabilité

La validité de la méthode de vulnérabilité DRASTIC, 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 vulnérabilité (Ake *et al.*, 2009; Hamza *et al.*, 2007 et 2008; Mohamed, 2001; Elwathaf et El Mansouri, 2011; Layachi *et al.*, 2011).

Les mesures des nitrates ( $\text{NO}_3$ ) disponibles dans la nappe libre d'El-Oued sont au nombre de 82, mesurés pendant la campagne de mai 2012. Parmi 82 forages et puits, qui ont fait l'objet d'analyses chimiques, 71,95% des points d'eau dépassent largement la limite admissible par l'OMS (50 mg/l) (WHO, 2006; WCCR, 1991).

La carte des taux de nitrates de mai 2012 (fig. 12) (Bouselsal et Kherici, 2014), montre que le niveau des nitrates dans la nappe varie entre 1 et 250 mg/l. Les endroits où le taux de nitrates est inférieur à 50 mg/l sont : les plantations Mahri, Sud de Kouinine, Bayada, Soualah et au Nord et à l'Ouest d'Ogla, dus à la dilution des eaux de nappe libre par l'eau des nappes profondes, dans les ghouts inondés recouverts de roseaux (suite de leur utilisation par les plantes) et dans les zones anaérobies comme le rejet de la ville d'El-Oued, où l'oxygène nécessaire à certaines réactions



VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

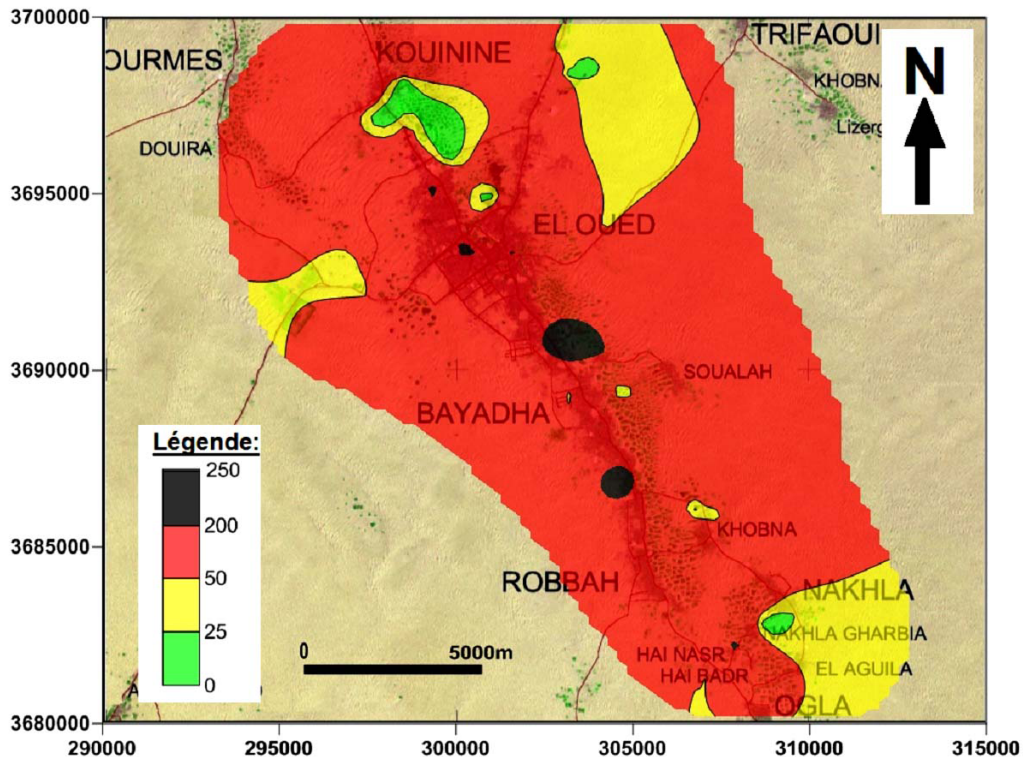


Fig. 12 - Carte des taux de nitrate dans la nappe phréatique en mai 2012.

*Nitrate concentrations map of the phreatic water in May, 2012.*

chimiques n'est plus apporté par l'oxygène mais par la dénitrification des nitrates. Les valeurs les plus élevées sont mesurées aux forages de; Tek-sabt, Chott, Sahenne et hôtel Louss, ils proviennent essentiellement des eaux usées et des fosses perdues, dans les zones urbaines (BG, 2002; Djidel, 2008), surtout au sud-est de la région à l'Est de Bayadha, El-Oued et Robbah, et des activités agricoles dans d'autres régions comme la plantation de Ogla, Nakhla et Khobna.

Pour valider la carte de vulnérabilité, nous avons défini les concentrations faibles en nitrates comme étant celles inférieures à 25 mg/l, les concentrations moyennes comme étant celles comprises entre 25 et 50 mg/l, les concentrations fortes comme étant celles comprises entre 50 et 200 mg/l et les concentrations très fortes comme étant celles supérieures à 200 mg/l (WCCR, 1991).

Nous pouvons déduire à partir des données du tableau III que les valeurs des concentrations en nitrates se répartissent comme suit :

Parmi les 70 valeurs réparties sur la surface de la carte marquée par une vulnérabilité forte, 8 valeurs (soit 11,43% de ces valeurs) sont supérieures à 200 mg/l, 50 valeurs (soit 71,43% de ces valeurs) sont comprises entre 50-200mg/l, 1 valeur (soit 1,43% de ces valeurs) est comprise entre 25-50 mg/l et, 11 valeurs (soit 15.71% de ces valeurs) sont inférieures à 25 mg/l.

Parmi les 12 valeurs réparties sur la surface de la carte marquée par une vulnérabilité moyenne, 11(soit 91,66% de ces valeurs) sont comprises entre 25-50 mg/l et 1(soit 8,34 % de ces valeurs) est comprise entre 50-200 mg/l.

**Tableau III - Coïncidence entre les concentrations en nitrates et les différentes classes de vulnérabilité de la méthode DRASTIC.**

***Coincidence between nitrate concentrations and the DRASTIC method vulnerability different classes.***

Classe de vulnérabilité DRASTIC	Nombre de puits où [NO <sub>3</sub> ] est inférieur à 25mg/l	Nombre de puits où [NO <sub>3</sub> ] est compris entre 25 et 50 mg/l	Nombre de puits où [NO <sub>3</sub> ] est compris entre 50 et 200 mg/l	Nombre de puits où [NO <sub>3</sub> ] est supérieur à 250mg/l	Total
Vulnérabilité moyenne	0	11	1	0	12
Coïncidence entre les [NO <sub>3</sub> ] et les classes de vulnérabilité moyenne	0%	91,66%	8,34 %	0%	100%
Vulnérabilité forte	11	1	50	8	70
Coïncidence entre les [NO <sub>3</sub> ] et les classes de vulnérabilité forte	15,71%	1,43%	71,43%	11,43%	100%
Total	11	12	51	8	82

## 5. CONCLUSION

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe libre d'El-Oued, réalisée par la méthode DRASTIC révèle une tendance de vulnérabilité à la pollution moyenne à forte. Dans la zone d'étude, 78,66% de la nappe libre présente une vulnérabilité forte contre 21,34% de vulnérabilité moyenne. Ce sont les zones urbaines et les zones agricoles irriguées par des forages captant les nappes profondes qui sont les plus vulnérables à la pollution.

La comparaison de la carte de vulnérabilité avec les teneurs en nitrates dans les eaux de la nappe, montre que la carte de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued est valide. Le taux de coïncidence entre la concentration moyenne en nitrates et la classe de vulnérabilité moyenne est de 91,66 % et le taux de coïncidence entre la concentration forte en nitrates et la classe de vulnérabilité forte est de 71,43 %.

## BIBLIOGRAPHIE

- AKE, G.-E., DONGO, K., KOUADIO, B.-H., DIBI, 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*, vol.31, n°1, pp. 157-171.
- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.-H., PETTY, R.-J. AND HACK, G. 1987. A standardized 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)*, 177p.
- ALWATHAF, Y. AND EL MANSOURI, B. 2011. Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and ARC-GIS methods: a case study of the Sana'a Basin (Yemen). *Journal of Water Resource and Protection*, 3, pp. 845-855.
- ANRH (AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES). 1993. Étude hydrogéologique de la région d'El-Oued: contribution au problème de la remontée des eaux de la nappe phréatique. *Rap. Tech. ANRH, Ouargla*, 47p.
- BG (BUREAU D'ÉTUDE BONARD ET GARDEL). 2002. Vallée du Souf : Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission II. 3<sup>ème</sup> campagne de mesures hydrogéologiques (2002). *Rapport technique final du Ministère des Ressources en Eau, Alger*, 65p.
- BG (BUREAU D'ÉTUDE BONARD ET GARDEL). 2003. Vallée du Souf : Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission II A. Rapport sur les essais de pompes dans la nappe phréatique de Souf. *Rapp. tech. final du Ministère des Ressources en Eau, Alger*, 96p.

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

- BG (BUREAU D'ÉTUDE BONNARD ET GARDEL). 2004.** Vallée du Souf : Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Investigation des essais de pompage et bilans d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau. *Rapp. tech. du Ministère des Ressources en Eau, Alger*, 111p.
- BOUBIR, H.-M.-N. ET ABDALLAH, F. 2009.** Le rôle des services et des investissements dans l'hypertrophie de la ville d'El Oued au bas Sahara algérien. *Environnement Urbain / Urban Environment*, vol. 3, 18p.
- BOUSELSAL, B. ET KHERICI, N. 2014.** Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-est Algérie). *Afrique Science*, vol.10, n°3, pp. 161-170.
- BUSSON, G. 1970.** Le Mésozoïque saharien. 2<sup>ème</sup> partie: Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. *Edit. Paris, «Centre Rech. Zones Arides», Géol.; Ed. C.N.R.S.*, 811p.
- CIVITA, M.-V. 1990.** La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento [Assessment of aquifer vulnerability to contamination]. Proc. 1<sup>st</sup> Conv. Naz. «Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Technologie e Obiettivi». *Maranosol Parano*, vol. 3, pp. 39-86.
- CIVITA, M.-V. 1995.** A methodology for delineation and design of spring protection area system. *GNDCI-CNR Publ.*, n°. 159, task unit 4.1.
- CIVITA, M.-V. AND DE MAIO, M. 1997.** Assessing ground water contamination risk using ARC/INFO via GRID function. In : proceedings of 1997 ESRT, User Conference, S. Diego (California). *Publi. GNDCI*, pp. 8-11.
- COLLISON, E.-J., RIUTTA, T. AND SLADE, E.-M. 2013.** Macrofauna assemblage composition and soil moisture interact to affect soil ecosystem functions. *Acta ecologica*, 47, pp. 30-36.
- CORNET, A. 1964.** Introduction à l'hydrogéologie saharienne. *Géographie Physique et Géologie Dynamique*, vol.VI, fasc. 1, pp.5-72.
- CÔTE, M. 1993.** Une région saharienne malade de trop d'eau. *Le Souf. Rapport*, 17p.
- CÔTE, M. 2001.** Souf 2001. L'agriculture peut-elle résoudre le problème de la remontée de la nappe. *Rapport technique*, 111p.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S. AND GOLDSCHIEDER. 2002.** Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10, pp. 340-345.
- DJIDEL, M. 2008.** Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). *Th. Doctorat, (2008), Univ. d'Annaba*, 208 p.
- DOERFLIGER, N., PLAGNES, V., KAVOURI, K. ET GOUIN, J. 2009.** Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PAPRIKA. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France.* 105p.
- DU COMMUN, R. 2010.** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain. *UNINE, Neuchâtel, Suisse*, 310p.
- ENAGEO. 1993.** Rapport d'étude géophysique dans la vallée du Souf, 16p.
- ENGEL, B.-A., NAVULUR, K.-C.-S., COOPER, B.-S. AND HAHN, L. 1996.** Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. *Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, 235, pp. 521-526.
- FABRE, J. 1976.** Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. *SNED, Alger*, 421p.
- FETTER, C.-W. 1994.** Applied geology. Third edition, chapter 9: Geology of ground water occurrence. *Prentice Hall. Englewood cliffs? New Jersey*, 691p.
- Bull. Serv. Géol. de l'Alg. Vol. 26 n° 1-2. 2015*

- FOSTER, S. 1987.** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H.(eds). Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. *TNO Committee on Hydrological Research, The Hague*, pp. 69–86.
- FUTTER, M.-N., RING, E., HÖGBOM, L., ENTENMANN, S. AND BISHOP, K.-H. 2010.** Consequences of nitrate leaching following stem-only harvesting of Swedish forests are dependent on spatial scale. *Environmental Pollution*, 158, pp. 3552-3559.
- GOLDSCHIEDER, N. AND KLUTE, M.-S.-H. 2000.** The PI Method - a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 46,3, pp. 157-166.
- GUENDOZ, A., MOULLA, A.-S., REMINI, B. AND MICHELOT, J.-L. 2006.** Hydrochemical and isotopic behaviour of a Sahara phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (Case of Oued Souf region, Algeria). *Hydrogeol. J.*, 14, pp. 955-968.
- HAMZA, M.-H., ADDED, A., FRANCES, A. AND RODRIGUEZ, R. 2007.** 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. *CR Geoscience*, 339, pp. 493–505.
- HAMZA, M.-H., ADDED, A., FRANCES, A., RODRIGUEZ, R., AJMI, M. ET SAÂDI, A. 2008.** Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 21, n° 1, pp. 75-86.
- KACHI, S., KHERICI, N. AND KACHI, N. 2007.** Vulnerability and Pollution Risks in the Alluvial Aquifer of Tebessa-Morsott; *American Journal of Environmental Sciences*, 3 (4), pp. 218-223.
- KHECHANA, S. 2014.** Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-est algérien). *Th. Doct., Univ. d'Annaba*, 148 p.
- KHERICI, N., ZOUINI, D. ET KHERICI, H. 1996.** Origine de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf (Nord-est du Sahara septentrional algérien). *Association Espanola de Hidrologia-Subterranea. Hidrogeologia*, 12, pp. 49-59.
- KHERICI, N., KHERICI-BOUSNOUBRA, H., DERRADJI, E.-F., ROUABHIA, A.-K. AND FEHDI, C. 2010.** A new graphic for the determination of the vulnerability and risk groundwater pollution. *Geographic Technica*, n°1, pp. 17-24.
- LALLEMAND-BARRÈS, A. 1994.** Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions; étude documentaire préliminaire. *Rapport BRGM/ R37928*, 38p.
- LAYACHI, G., GOUNAIDIA, L., BOUDOUKHA, A., DJABRI, L. ET GUEFAIFIA, O. 2011.** Évaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). *Secheresse 2011*, 22, pp. 5-42.
- MARGAT, J. 1968.** Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater vulnerability to contamination) (in French). Base de la cartographie. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France*, 12p.
- MEZIANI, A., DRIDI, H. AND KALLA, M. 2011.** The Aquifer System of the Souf Valley Algerian Northern Sahara. *European Journal of Scientific Research*. vol. 65, n°3, pp. 416-423.
- MOHAMED, R.-M. 2001.** Évaluation 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. *Sciences et Changement Planétaires / Sécheresse*, 12(2), pp. 95-101.
- OSS (OBSERVATOIRE SAHARA ET SAHEL). 2003.** Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. *Rapport de synthèse OSS*, Tunisie.
- RAVBAR, N. 2007.** The Protection of Karst Waters: A Comprehensive Slovene Approach to Vulnerability and Contamination Risk Mapping. *Inštitut za raziskovanjejekrasa ZRC SAZU*, 254p.

VULNÉRABILITÉ ET RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE D'EL-OUED (S-E ALGÉRIE) :  
APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.

- REEMTSMA, T., ALDER, L. AND BANASIAK, U. 2013.** Emerging pesticide metabolites in groundwater and surface water as determined by the application of a multimethod for 150 pesticide metabolites. *Water Research*, 47, pp. 5535-5545.
- ROUABHIA, A., BAALI, F., KHERICI, N. ET DJABRI, L. 2004.** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). *Sécheresse*, 15 (4), pp. 347-3520
- SAIBI, H., SEMMAR, A., MESBAH, M. AND EHARA, S. 2009.** Variographic analysis of water table data from the Oued-Souf phreatic aquifer, Northeastern part of the Algerian Sahara. *Arabian Journal of Geosciences*, 2, pp. 83-93.
- SENOUSSI, M. ET AOuat, M.-A. 1992.** Étude géophysique par sondages électriques de la région de Souf. *Rapport ENAGEO*, 40p.
- SHEMES, G.-P. 1999.** Department of the Environment and Local Government. *E.P.A.a.G.S.o.I. Dublin Ireland*, 24.
- THOMAS, A. AND TELLAM, J.-H. 2006.** Modelling of recharge and pollutant fluxes to urban groundwaters. *Sc. Tot. Env.*, 360, pp. 158-179.
- THÜLER, L. 2014.** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. *Th. Doctorat, Université de Neuchâtel*, 183p.
- UNESCO. 1972.** Étude des Ressources en Eau du Sahara septentrional (7 vols. et annexes). *UNESCO, Paris, France*.
- VÍAS, J.-M., ANDREO, B., PERLES, M.-J., CARRASCO, F., VADILLO, I. AND JIMÉNEZ, P. 2006.** Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers. *The COP method. Hydrogeology Journal*, 14, pp. 912-925.
- VRBA, J. AND ZAPOROZEC, A. 1994.** Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, Hannover, Netherlands. *International contributions to hydrogeology*, vol. 16, heis, 131p.
- WATER CONTAMINATION CONTROL REGULATIONS (WCCR). 1991.** Official Paper. Ankara, n° 19919. World Health Organisation (WHO), Guides lines for Drinking water Quality. *Recommendations*, 3<sup>rd</sup> edition, vol. 1, WHO JSBN 924 15 46964, 595p.
- World Health Organisation (WHO). 2006.** Guidelines for Drinking-water Quality. *Recommendations*, 3<sup>rd</sup> edition, vol. 1. WHO, ISBN 92 4 154696 4, 595p.