

## Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien.

### Assessment and mapping of the vulnerability to pollution of the groundwater, using the both DRASTIC and GOD methods, in alluvial plain of Guelma, NorthEast of Algeria.

Sabah Latifi<sup>1\*</sup> & Salah Chaab<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de géologie, Université Badji Mokhtar, BP12, Annaba 23000.

<sup>2</sup>Laboratoire de géologie Université Badji Mokhtar Annaba BP.12, Annaba 23000- Algérie.

Soumis le 19/05/2016

Révisé le 18/12/2016

Accepté le 31/01/2017

#### ملخص

تتناول هذه الدراسة قابلية وخطر تلوث المياه الجوفية لسهل قالمة (الجزائر)، المهددة بالعديد من مصادر التلوث (التحضر، الصناعة، الزراعة، النفايات، وما إلى ذلك)، والتي تضاعفت في المنطقة بعيدا عن أي إجراء متخذ لحماية البيئة، وخاصة الموارد المائية.

لهذا السبب أجرينا خريطة توضح مدى قابلية المياه الجوفية للمنطقة للتلوث باستخدام نموذج بين فود و دراستك . حيث تظهر الخرائط ثلاثة مناطق من درجات مختلفة من حيث قابليتها للتلوث، المناطق الضعيفة والمتوسطة تحتل على التوالي نسبة 25 و 30% من المساحة الإجمالية للسهول، في حين تحتل المناطق عالية التأثير نسبة 40% من خلال طريقة فود للمساحة الكلية. ونسبة 45% من خلال طريقة دراستك للمساحة الكلية.

الكلمات المفتاحية: الحساسية للتلوث- تلوث- فود - دراستك - قالمة.

#### Résumé

La présente étude traite la vulnérabilité et les risques de pollution de la nappe de la plaine de Guelma (Algérie), menacée par de nombreux foyers de pollution (urbanisations, industrie, élevages, décharges sauvages, etc.), qui sont apparus dans la région, sans aucune mesure de protection de l'environnement prévue.

Une carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la zone a été réalisée selon deux méthodes (GOD et DRASTIC). Les cartes établies font apparaître trois zones de degrés de vulnérabilité différents. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent respectivement 25 et 30% de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 40% par la méthode GOD et 45% par la méthode DRASTIC de la surface totale.

**Mots clés :** Vulnérabilité, Pollution, GOD, DRASTIC, Guelma.

#### Summary

This study deals with the vulnerability and pollution risk in the Guelma plain aquifer (Algeria). The plain has been threatened by numerous pollution sources (urbanization, industry, farms, dumps, etc.) which have unfortunately increased in the area, due to a lack of environmental protection measures, especially for water resources.

A map of vulnerability of groundwaters of the zone was carried out according to two methods (GOD and DRASTIC). The obtained vulnerability map shows three zones of differing vulnerability degrees: areas of low and medium vulnerability which respectively occupy 25 and 30% of the total area of the plain, while high vulnerability areas occupy 40% by method GOD and covers the remaining 45% by method DRASTIC of the study area.

**Keywords:** Vulnerability, Pollution, GOD, DRASTIC, Guelma.

\* Auteur correspondant : sabah.latifi@gmail.com

## 1. INTRODUCTION

Depuis les années 1970, la détection croissante de contamination dans l'eau souterraine a suscité le développement du concept de vulnérabilité à la pollution des aquifères. La vulnérabilité de l'eau souterraine est souvent définie comme « la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol, jusqu'à atteindre la zone saturée ». Les cartes de vulnérabilité illustrent différents degrés de sensibilité de l'aquifère [1] et fournissent des informations utiles et nécessaires permettant d'orienter les choix des politiques de prévention et de gestion des risques de pollution des ressources en eau souterraine de la région dans la perspective d'une gestion durable [2]. La vulnérabilité des aquifères à la pollution dans une région donnée, résulte d'une combinaison de plusieurs facteurs, à savoir : l'hydrogéologie, la réaction aquifère-contaminant et les sources de pollution [3].

Les méthodes d'études sont nombreuses et souvent redondantes, car prenant en considération les mêmes paramètres [4]. Pour éviter toutes ambiguïtés, nous avons utilisé deux méthodes (GOD et DRASTIC), ce qui nous permettra de comparer les résultats obtenus à partir des deux méthodes.

La méthode GOD, plus simple, est basée sur l'évaluation de trois paramètres. Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère. La méthode DRASTIC correspond aux initiales des sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité : profondeur du plan d'eau, recharge efficace de l'aquifère, lithologie de l'aquifère, type de sol, pente topographique du terrain, impact de la zone vadose (zone non saturée) et conductivité hydraulique de l'aquifère [5-6]. Elle est donc plus complète que la précédente.

La ville de Guelma a connue un développement industriel, agricole et urbain important, ce qui s'est répercuté sur son environnement. Notre travail consiste à estimer la vulnérabilité à la pollution de la zone d'étude. L'application des deux méthodes (GOD et DRASTIC) a permis l'élaboration d'un document cartographique, dont la simple lecture permet de localiser les zones où la nappe présente une vulnérabilité élevée, et donc, les zones où des protections soutenues s'imposent.

## 2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La plaine alluviale de Guelma se situe au Nord-Est algérien, dans le bassin versant de l'oued Seybouse. Elle forme une cuvette, entourée par les monts de Houara, Debagh, Mahouna et de Djebel Nador, et est orientée sensiblement Ouest-Est. (Fig. 1). [8].

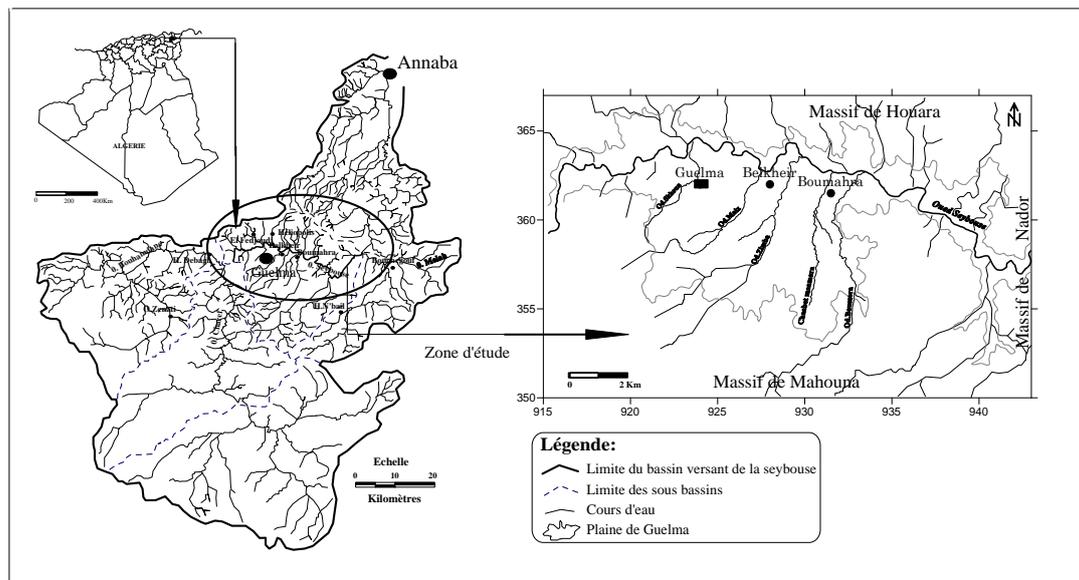


Figure 1. Situation géographique de la plaine de Guelma.

Elle fait partie de la chaîne alpine de l'Algérie orientale [8]. Cette chaîne est constituée par la superposition de plusieurs unités structurales, dont l'histoire géologique s'étale depuis le Trias jusqu'au Pliocène. Cet édifice complexe est partiellement recouvert par une sédimentation Mio-Pliocène et/ou Quaternaire, surtout continentale [7]. La géologie de la région de Guelma peut-être

©UBMA - 2017

divisée en trois grands ensembles : anté-nappe, un ensemble Mio-Pliocène (continental, du bassin de Guelma) et un ensemble récent (Pliocène et Quaternaire). La région de Guelma comprend le domaine Néritique de Djebel Debagh, Héliopolis et le Sud de Guelma. Cette unité à faciès carbonaté Jurassique-Crétacé, plus ou moins karstifiée, est surmontée par plusieurs nappes de charriages et soumise à de grands accidents tectoniques

Entre Nador et Medjez Amar, l’oued Seybouse a déposé des alluvions sur son parcours [9]. Le centre de la plaine représente une zone d’effondrement, comblée par des dépôts miocènes (argiles et marnes à gypse) et quaternaires (alluvions hétérogènes sous forme de terrasses), (Fig. 2). Ces alluvions sont perméables et sont alimentés par les eaux d’infiltrations des pluies et les apports latéraux du bassin versant de l’oued Seybouse. Elle est constituée de trois terrasses distinctes (basse, moyenne et haute) [10].

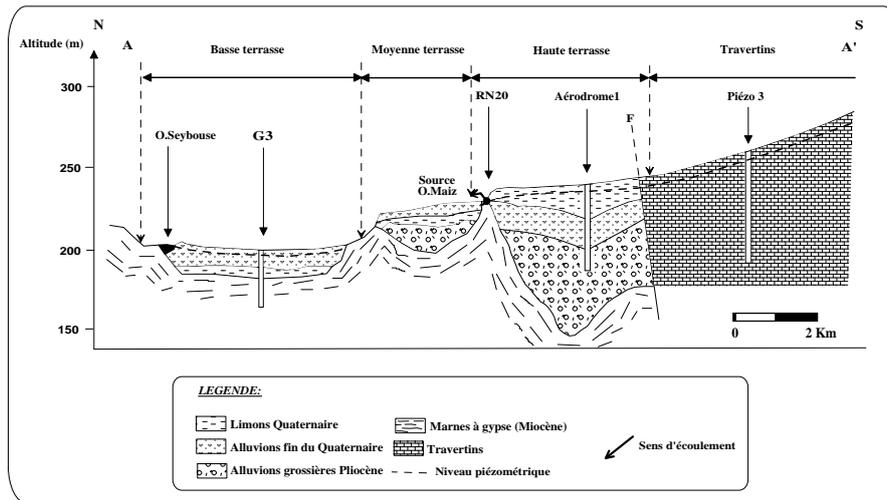


Figure. 2. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma Nord –Sud ( Brahmia N., 2016. modifiée).

D’après la carte piézométrique, établie sur la base des données collectées durant le mois de décembre 2013 (Fig.3) [11], l’écoulement se fait généralement du Sud vers le Nord, en direction de l’Oued Seybouse. L’allure des courbes piézométriques est parallèle à la bordure sud, traduisant une limite perméable, par contre les lignes piézométriques sont perpendiculaires à la limite sud-est, ce qui indique qu’elle est étanche. L’existence de deux lignes de partages des eaux, de direction Sud-Nord, séparant respectivement les écoulements vers l’Oued Maiz, où la nappe de la haute terrasse se fait alimentée latéralement par les travertins, et vers Oued Zimba et Oued Boussourra entre Belkheir et Boumahra.

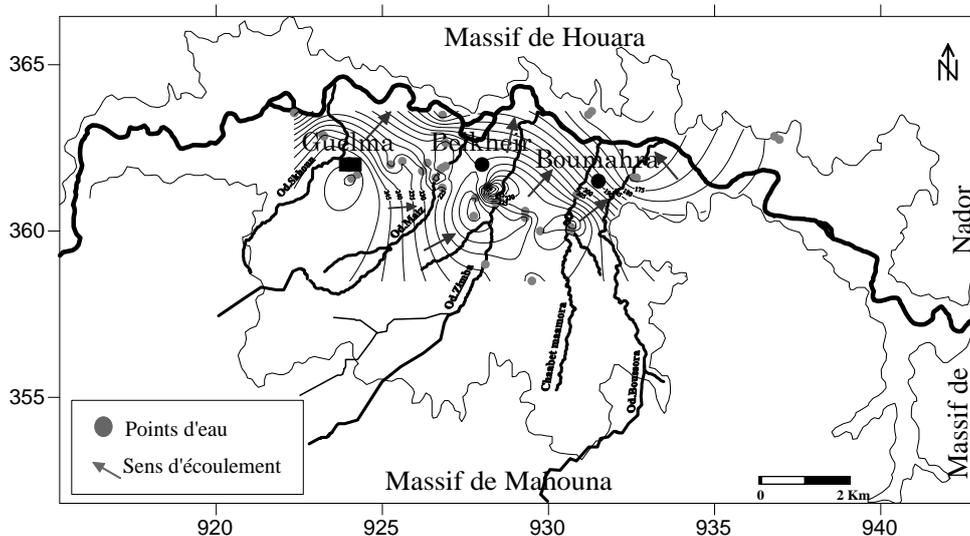


Figure. 3. Carte piézométrique de la plaine de Guelma (décembre 2013)

Ce travail traite de la vulnérabilité des eaux de la nappe aquifère de Guelma à la pollution, causée par de nombreux foyers de pollution (urbanisation, industrie et agriculture), qui apparaissent dans la région (Fig.4). Le diagnostic établi après, enquête et inspection des lieux, a permis d'identifier et de localiser les zones de pollution qui sont concentrées sur l'axe Guelma-Belkeir-Boumahra, où les rejets se déversent dans les affluents de l'oued Seybouse (Oued Skhoune, Oued Maïz, Oued Zimba et Oued Boussora)

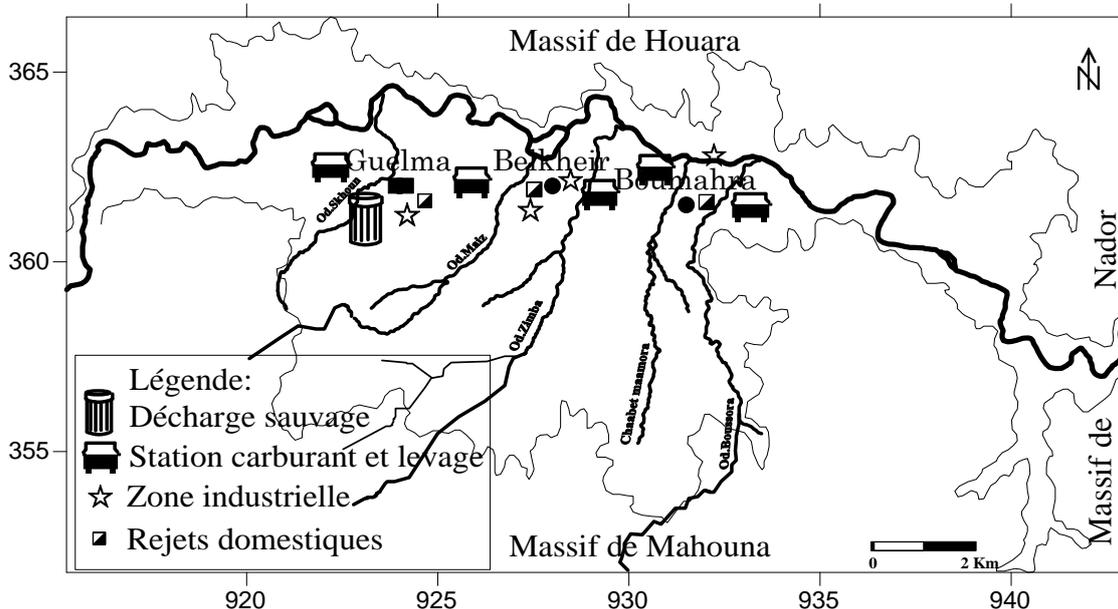


Figure. 4. Carte de localisation des sources de pollution dans la région de Guelma.

### 3. MATERIEL ET METHODES :

Dans la présente étude, l'évaluation des degrés de la vulnérabilité a été faite en appliquant les deux méthodes GOD et DRASTIC, compte tenu de la disponibilité des données relatives aux paramètres requis. L'identification des unités hydrogéologiques et l'évaluation des différents paramètres considérés dans les méthodes DRASTIC et GOD, nécessite une bonne connaissance de la géologie, de l'hydrogéologie, de la pédologie ainsi que la topographie. À cette fin, les documents de la zone d'étude suivants ont été utilisés :

- Cartes géologiques de la région de Guelma au 1/50000 et note explicative (Vila. J.M., 1980);
- Coupes des forages, fournies par la direction de l'Hydraulique de la wilaya Guelma ;
- Carte pédologique, Essai de pompage (DHW Guelma) ;
- Données météorologiques (O.N.MS), station de Guelma ;
- Relevé piézométrique décembre 2013 (Kachi.N 2015) ;

#### 3.1. Méthode du GOD :

Cette méthode est basée sur la combinaison de trois paramètres : type de nappe, facteurs lithologiques et la profondeur de la nappe.

L'estimation de ces paramètres est aisée, car basée sur les informations recueillies par les opérateurs même sur une fiche de forage.

-La détermination de ces facteurs aboutira à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité.

#### *Application à la nappe aquifère de la plaine de Guelma :*

La nappe aquifère est libre et est contenue dans des colluvions et des graviers, se caractérisant par des perméabilités élevées. Sa profondeur reste faible, mais sa valeur peut atteindre un maximum de 25 m, (Fig. 5).

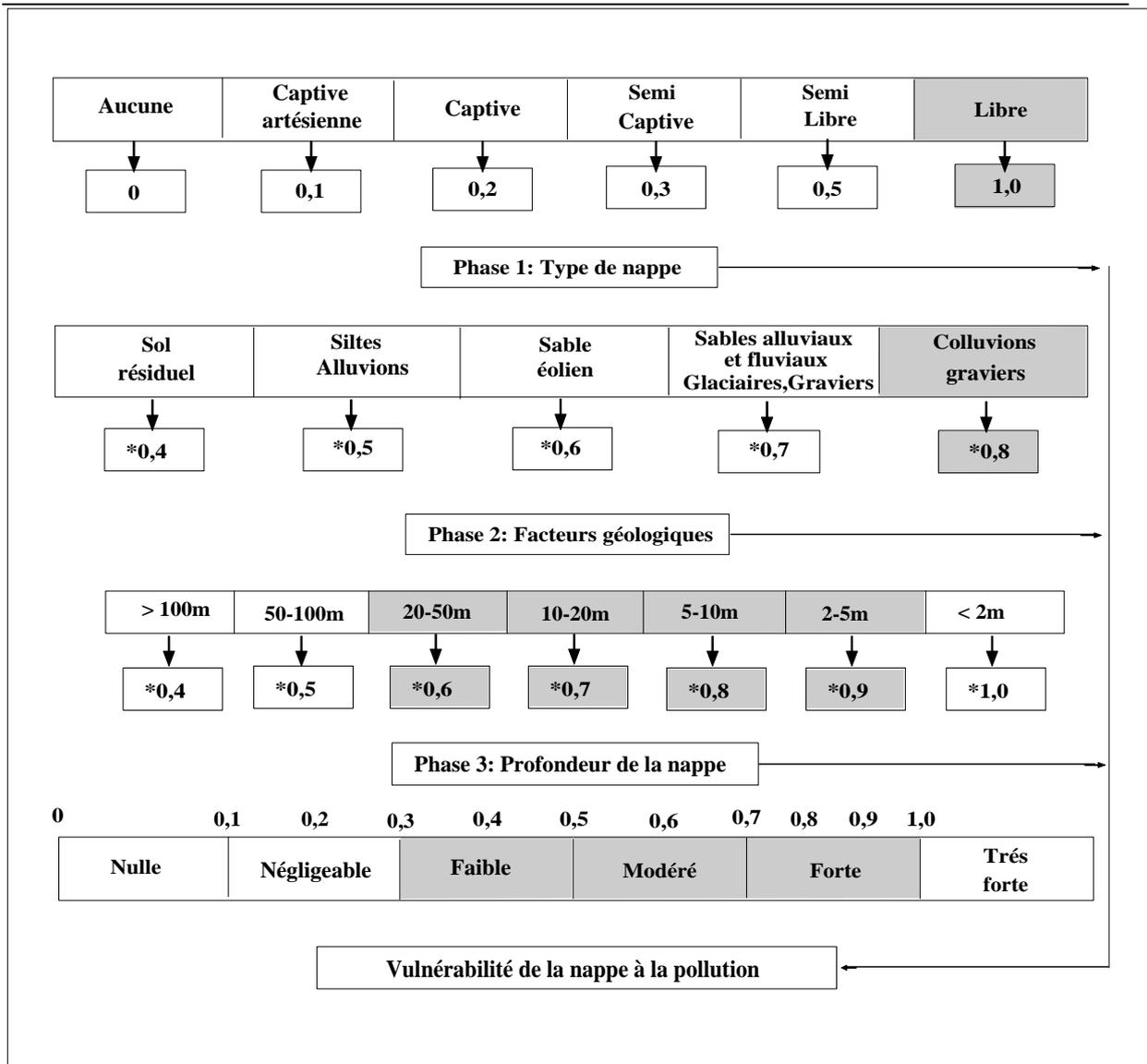


Figure. 5: Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD (d'après Foster, 1987) : Cas de la nappe aquifère de Guelma.

**La carte de la vulnérabilité des eaux à la pollution par la méthode de GOD :**

Cette carte est établie à partir des données de Forages, sa lecture, montre la présence de quatre zones de profondeur différentes.

**Carte des profondeurs de la nappe phréatique de la plaine de Guelma :**

La carte réalisée indique que les zones les plus profondes se localisent au Sud Ouest, au niveau de la haute terrasse (nappe des travertins). Les parties les moins profondes sont juxtaposées au Sud Est dans la moyenne terrasse, où on retrouve les profondeurs intermédiaires ; tandis que les faibles profondeurs recouvrent la basse terrasse au Nord de la ville de Guelma, au Nord-Est de Boumahra et même jusqu'à Nador. Cette répartition nous a permis de déterminer quatre indices allant de 0,6 à 0,8, ce qui nous a permis de calculer les indices afin d'établir la carte de vulnérabilité (Fig. 6).

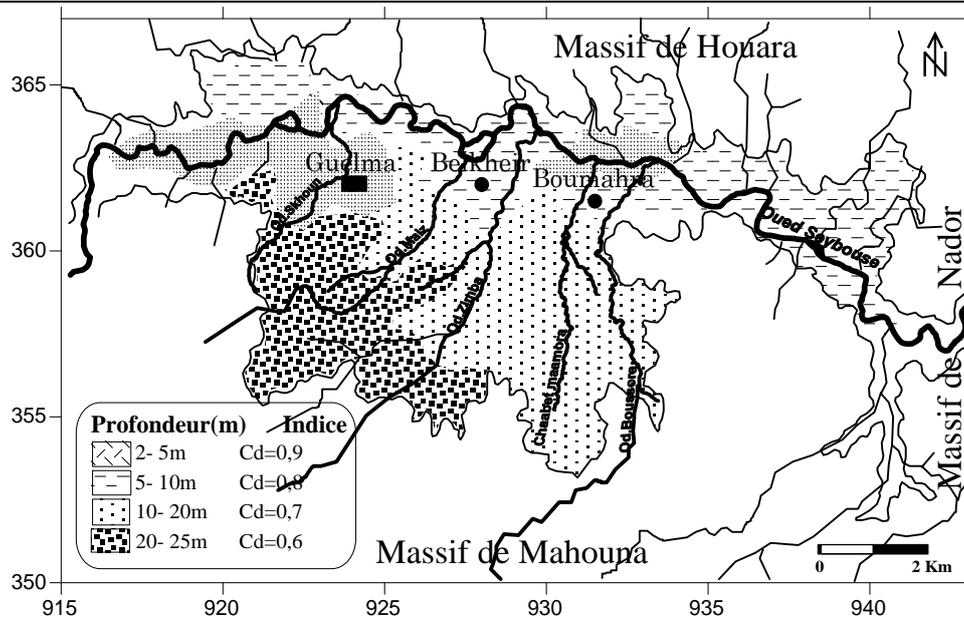


Figure. 6 : Carte des valeurs de l'indice de la profondeur de la nappe aquifère de la plaine de Guelma

**Calcul des indices globaux ou carte de vulnérabilité :**

Indice GOD (IG) =  $C_a \times C_l \times C_d$  (eq. 1)

Où C : désigne la cote du paramètre,  $C_a$  : Type d'aquifère ;  $C_l$  : Lithologie de l'aquifère ;  $C_d$  : Profondeur du niveau d'eau dans la nappe.

Les indices calculés aboutissent à la carte de vulnérabilité (fig.7), l'observation de cette dernière montre trois classes de vulnérabilité d'inégales extensions.

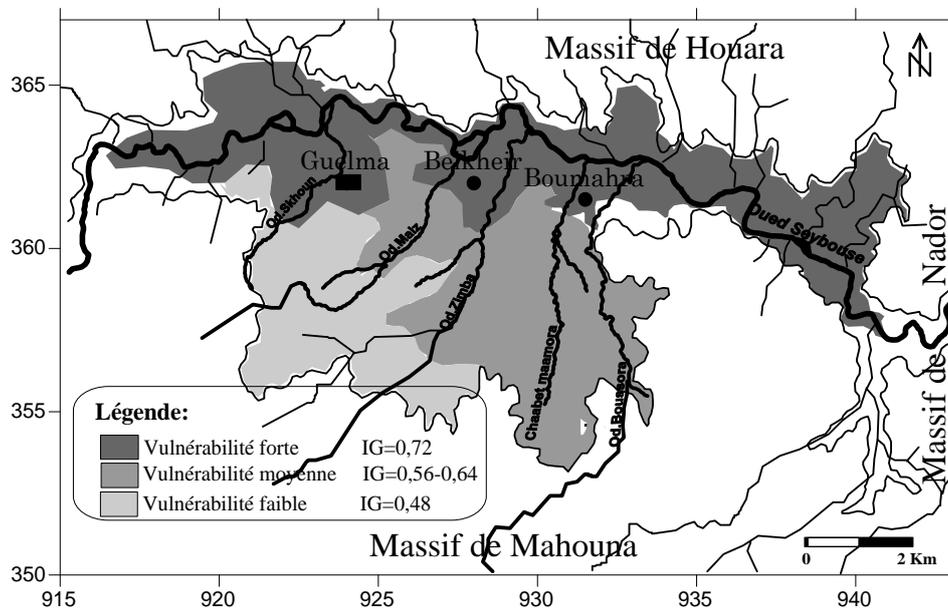


Figure. 7 : Carte de vulnérabilité de la nappe aquifère de la plaine de Guelma selon la méthode de GOD.

Les indices obtenus oscillent entre 0.48 et 0.72. L'observation de la carte montre trois catégories de vulnérabilités : la première, dont les indices atteignent 0.72, indique une très forte vulnérabilité et se

localise au niveau de la ville de Guelma et Belkheir jusqu'à Nador, où elle couvre la surface totale de la basse terrasse. Le deuxième des valeurs de l'indice varie de

0.56 à 0.64, et occupe une grande partie de la moyenne terrasse dans sa partie Sud Est. La partie Sud Ouest est caractérisée par des indices de l'ordre de 0.48, indiquant une vulnérabilité modérée. La méthode du GOD, nous a permis d'avoir une première idée sur la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe aquifère de la région de Guelma.

### 3.2. Méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines [12].

Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept facteurs.

L'importance relative de chaque facteur est évaluée par un poids fixe variant d'une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui le sont moins [13] (Tab. 1). Chaque paramètre se voit attribuer une cote variant entre 1 et 10 en fonction des conditions locale: les conditions favorables procurent des cotes basses et les conditions défavorables (celles qui augmentent la vulnérabilité) procurent des cotes élevées.

Tableau. 1. Les paramètres DRASTIC et leur poids respectif (Aller et al, 1987)

F	Paramètres	Poids
1	D :Depth to water/(Profondeur de l'eau)	5
2	R :Net recharge /(Recharge efficace)	4
3	A :Aquifer media/(Milieu aquifère)	3
4	S :Soil media/(Type de sol)	2
5	T :Topography/(Pente de terrain)	1
6	I : Impact of the vadose zone/(Impact de la zone vadose)	5
7	C :Hydraulic Conductivity/(Perméabilité)	3

La vulnérabilité des eaux de la nappe alluviale de Guelma est évaluée au moyen de l'indice DRASTIC qui est un indice numérique représentant la somme pondérée des 7 cotes correspondant aux 7 paramètres définis ci dessus. L'indice local est obtenu en multipliant la cote de chaque paramètre par son poids relatif et en faisant la somme de ces produits:

Indice DRASTIC=Dc.Dp+Rc.Rp+Ac.Ap+Sc.Sp+Tc.Tp+Ic.Ip+Cc.Cp (eq. 2)

Où : les indices 'c' et 'p' correspondent respectivement à la cote et au poids du paramètre

L'indice ainsi calculé représente une évaluation du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Ce risque augmente avec les valeurs de l'indice [13].

#### 3.2.1. Les cartes thématiques :

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 [14]. Les cartes thématiques ont été établies grâce aux données géologiques, topographiques, hydrogéologiques, pédologiques, hydrodynamiques et hydroclimatologiques ce qui a permis de définir :

- le bassin versant de l'Oued Seybouse et le bilan hydrique;
- le type, la géométrie, la structure et la perméabilité l'aquifère ;
- la distribution des charges piézométriques et la profondeur du niveau des eaux souterraines dans l'aquifère ;
- la nature du sol et de la zone d'aération;

La distribution des valeurs indicelles pour chaque paramètre (poids x cote) est représentée sur une carte. Les zones, où le risque de pollution est élevé, ont des cotes fortes et celles moins exposées avec une valeur faible.

La carte de synthèse de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère est obtenue en faisant la somme pondérée des valeurs indicelles des sept paramètres DRASTIC.

**Profondeur de l'eau (D)**

La profondeur du niveau d'eau dans la nappe est un paramètre important, il détermine l'épaisseur des matériaux de la zone d'aération à travers laquelle un contaminant percole avant d'atteindre le niveau piézométrique. Généralement, la capacité d'atténuation augmente avec la profondeur du plan d'eau [15], le poids attribué est de l'ordre de cinq (5) et le système de cotation, affecté à cette profondeur, est représenté au tableau 2.

Tableau 2. Cotation du paramètre profondeur de l'eau.

Profondeur de la nappe en (m)			
Intervalle	D <sub>C</sub>	D <sub>P</sub>	D <sub>C</sub> .D <sub>P</sub>
0-1.5	10	5	50
1.5-4.5	9	5	45
4.5-9	7	5	35
9-15	5	5	25

Les indices ainsi calculés permettent de dresser la carte correspondante (Fig. 8). Elle fait ressortir de forts indices aux endroits de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma. La moyenne terrasse est caractérisée par des indices dont la valeur varie de 35 à 45. Par contre les zones, où l'indice est le plus faible, se situent dans la haute terrasse et surtout dans la nappe des travertins à l'Ouest avec des valeurs qui sont comprises dans l'intervalle 25-35.

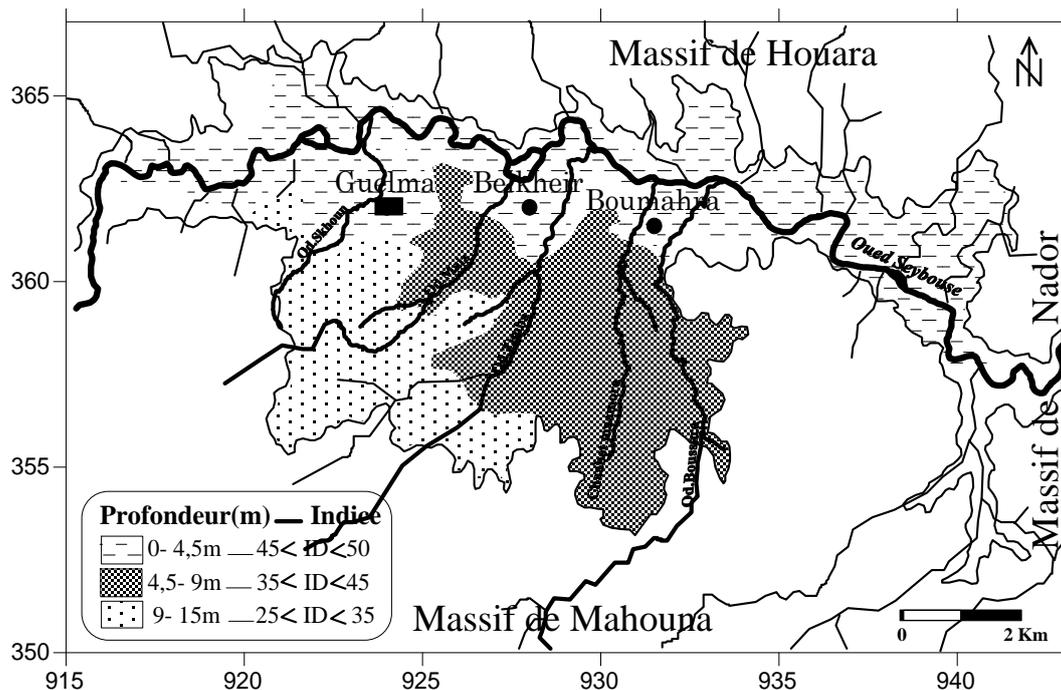


Figure. 8. Carte de répartition des valeurs de l'indice de la profondeur d'eau dans l'aquifère.

**Recharge efficace (R)**

La recharge de la nappe provient principalement de l'infiltration directe des eaux de précipitation à travers les sédiments grossiers des bordures et des eaux de ruissellements, où des crues dans les lits des affluents de l'oued principal [16] (notamment l'oued Seybouse). La recharge correspond à la quantité d'eau franchissant la surface du sol pour renouveler les stocks d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain dans les formations aquifères. L'observation de la carte de recharge (Fig. 9) montre que l'infiltration est la même sur toute la plaine de Guelma. Le calcul du bilan hydrique a donné une valeur moyenne de l'infiltration efficace de 80,33 mm. La méthode DRASTIC attribue un poids de 4 à la recharge efficace pour l'intervalle se situant à plus de 25 mm. Ce paramètre est reporté au tableau 3.

Tableau 3. Cotation du paramètre recharge de l'aquifère.

Recharge de l'aquifère (mm)			
Intervalle	R <sub>C</sub>	R <sub>P</sub>	R <sub>C</sub> .R <sub>P</sub>
+ 25 mm	9	4	36

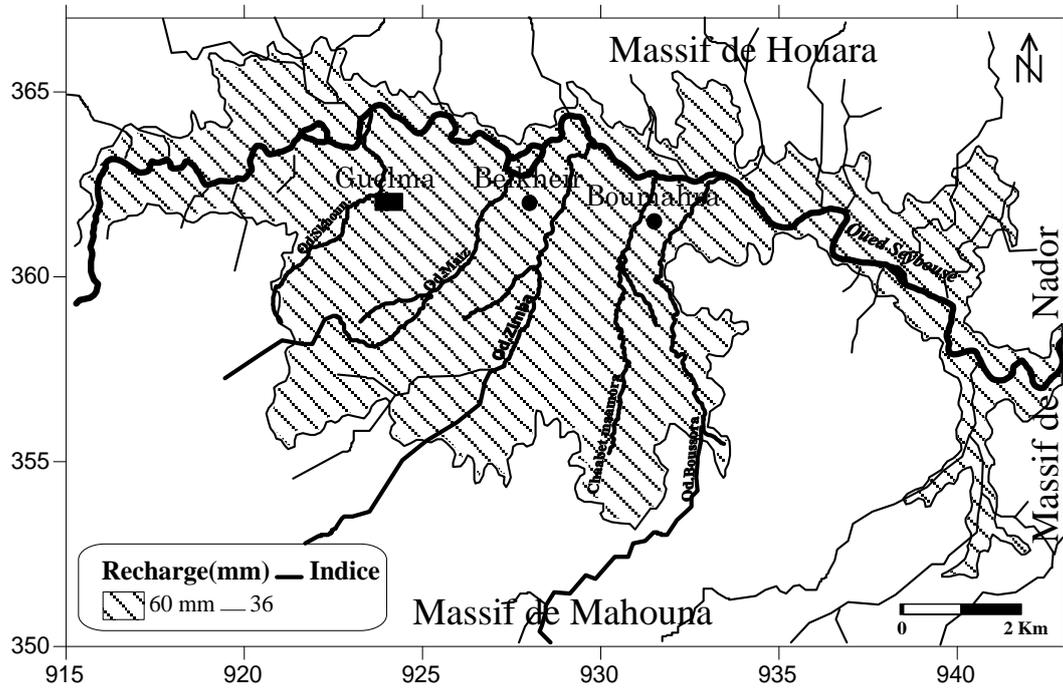


Figure. 9. Carte de répartition des valeurs de l'indice de la de Recharge dans l'aquifère.

**Matériaux de l'aquifère (A)**

La détermination de ce paramètre résulte de la combinaison des données de forages et de la prospection géophysique [3]. La carte des matériaux de l'aquifère (Fig. 10) se distingue par la présence des sables, galets et graviers, qui couvrent la partie nord-est de l'oued Seybouse et s'étend vers le Sud entre la ville de Guelma et le village de Boumahra, des grés au niveau de Nador et Chaabet Maamora, et par la dominance des calcaires au niveau de la bordure sud-ouest de la haute terrasse (unité des travertins). La méthode DRASTIC attribue un poids de 3 au matériau de l'aquifère. Ce paramètre, figurant dans le tableau 4, a un indice égal à 24 sur toute la plaine alluviale de Guelma, sauf pour la partie sud-ouest de l'oued Seybouse où il a une valeur de 18.

Tableau 4 : Cotation du paramètre matériau de l'aquifère.

Matériaux de l'aquifère			
Intervalle	A <sub>C</sub>	A <sub>P</sub>	A <sub>C</sub> .A <sub>P</sub>
Sables et grés	8	3	24
Galets et graviers	8	3	24
Calcaires	6	3	18

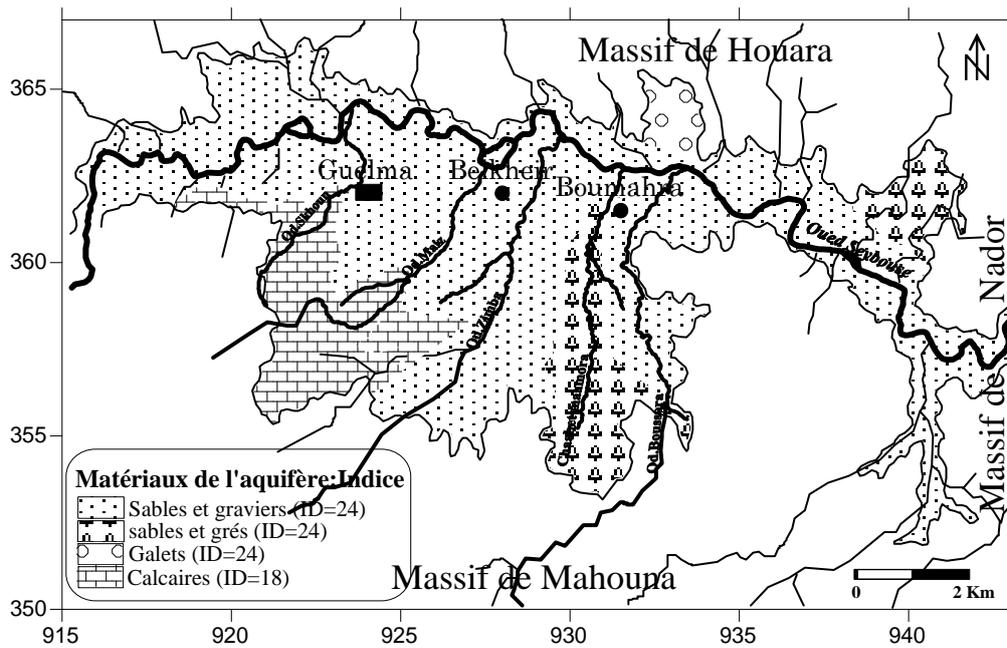


Figure 10 : Carte de répartition des valeurs de l'indice du matériau de l'aquifère.

**Type de sol (S)**

Le sol a un impact sur la frange d'eau qui s'infiltré à travers le sol pour atteindre la nappe d'eau souterraine et donc la migration verticale des polluants à travers la zone non saturée [17]. Ce facteur joue un rôle important quant à la détermination des zones polluées. La carte du type de sol (Fig. 11) montre que les graviers et les galets couvrent la totalité de la surface de la plaine de Guelma. Les lits de calcaire dominant la partie sud-ouest de la plaine. La méthode DRASTIC attribue à ce paramètre un poids de 2. Les indices correspondants sont présentés au tableau 5.

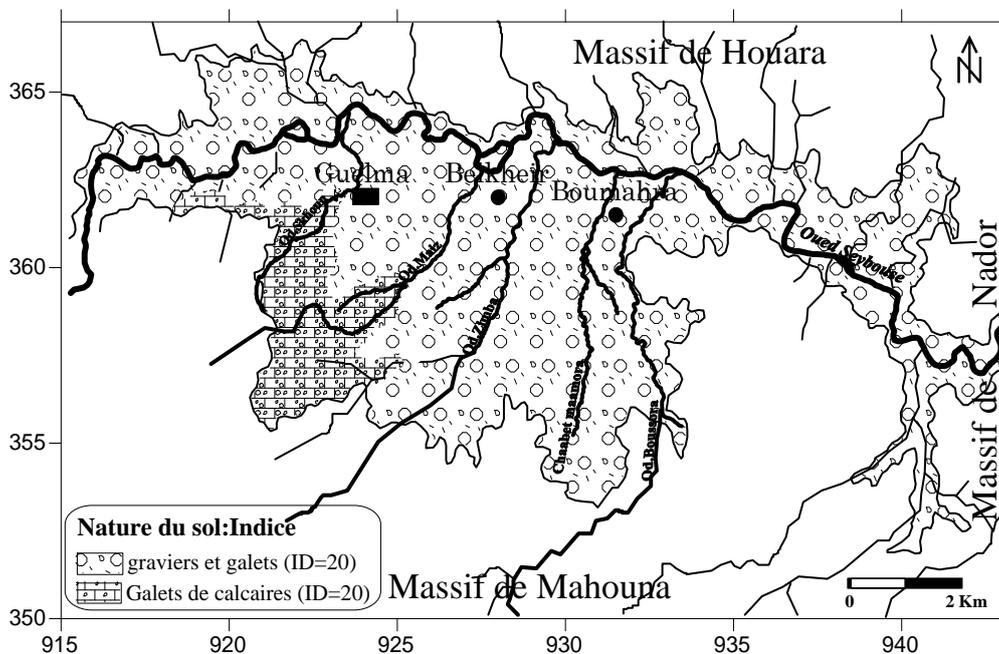


Figure. 11: Carte de répartition des valeurs de l'indice du type de sol.

Tableau 5: Cotation du paramètre type de sol.

Type de sol			
Intervalle	S <sub>C</sub>	S <sub>P</sub>	S <sub>C.S<sub>P</sub></sub>
Galets de calcaires	10	2	20
Galets et graviers	10	2	20

**Pente de terrain (T)**

La pente du terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants. Elle contrôle certains paramètres tels que l’infiltration. L’examen de la carte topographique de la région fait ressortir trois intervalles différents variant de 0-12% (Fig. 12). La pente du terrain se voit attribuer un poids très faible (1) par rapport aux autres paramètres. Le système de cotation attribué à la topographie est présenté au tableau 6. Nous remarquons que l’indice correspondant évolue dans le sens inverse de la pente du terrain.

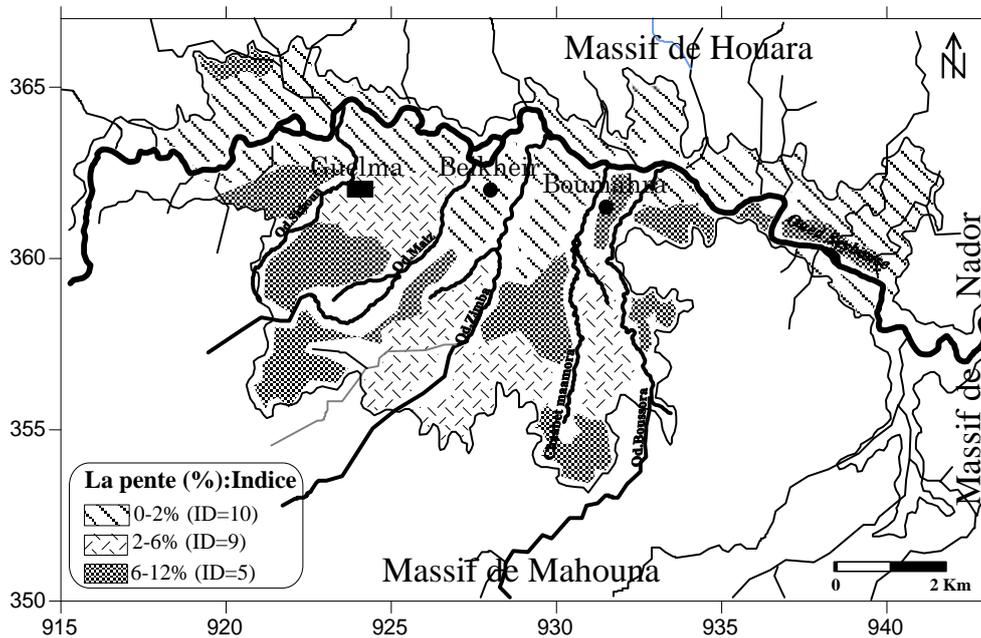


Figure. 12. Carte de répartition des valeurs de l’indice de la pente de terrain.

Tableau 6.Cotation du paramètre pente de terrain.

Pente du terrain (T)			
Intervalle	T <sub>C</sub>	T <sub>P</sub>	T <sub>C.T<sub>P</sub></sub>
0 – 2%	10	1	10
2 – 6%	9	1	9
6 – 12%	5	1	5

**Impact de la zone vadose (I)**

L’impact de la zone non saturée (zone d’aération) est considéré comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC, avec un poids de 5, car la nature et l’épaisseur de la partie comprise entre la surface du sol et l’aquifère, contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs. La carte de la zone vadose (Fig. 13) montre une domination des sables et des grès qui ont une bonne perméabilité dans la partie nord-est de la basse terrasse (la vallée actuelle). Les argiles occupent la partie sud-est de la plaine et les calcaires dans la partie sud-ouest au niveau de la nappe des travertins. Le tableau 7 donne les indices correspondants

Tableau 7 : Cotation du paramètre impact de la zone vadose.

Impact de la zone vadose (I)			
Intervalle	$I_C$	$I_P$	$I_C \cdot I_P$
Argiles sableuses	6	5	30
Calcaires	6	5	30
Sables, grès	6	5	30

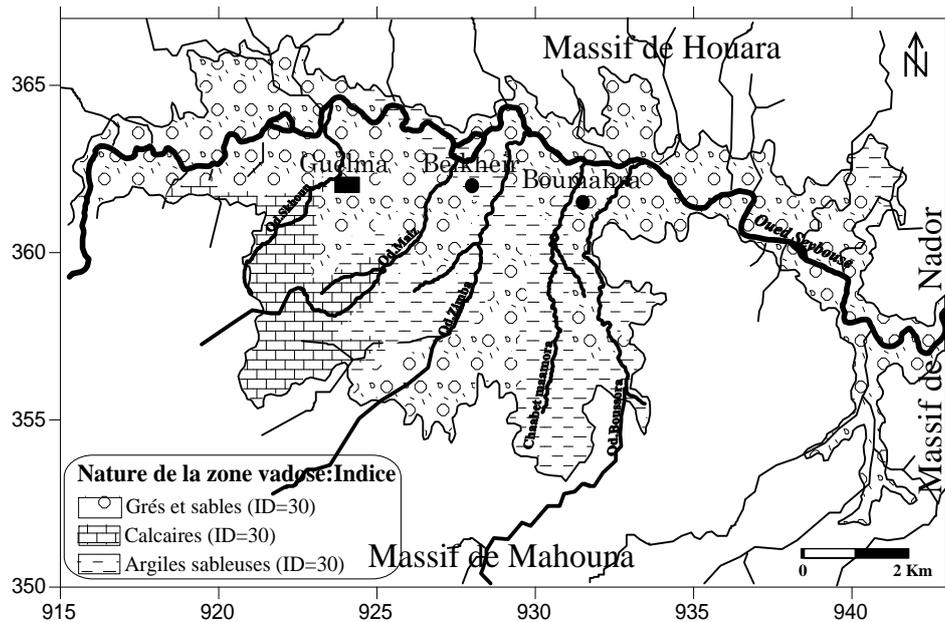


Figure 13: Carte de répartition des valeurs de l'indice de la nature de la zone vadose.

**Conductivité hydraulique (C)**

La carte du coefficient de perméabilité est établie par les essais de pompage dans les différents forages et par l'interprétation des données géophysiques. Le coefficient de perméabilité traduit la vitesse à laquelle l'eau, transportant le polluant par dispersion, circule dans le sous sol. La méthode DRASTIC attribue un poids moyen de 3 à la perméabilité. Les valeurs de l'indice pour ce paramètre sont reportées dans le tableau 8. Nous remarquons que la valeur 18 de l'indice est attribuée aux endroits de Nador ; la valeur de 12 est attribuée aux extrêmes est et ouest de la basse terrasse (la vallée actuelle de l'oued Seybouse) ; la valeur 6 de l'indice couvre le centre de la nappe de la moyenne terrasse, ainsi qu'au voisinage des villages de Belkheir et de Boumahra et dans la partie extrême ouest de la nappe et enfin, alors la valeur 3 de l'indice couvre pratiquement la surface totale de la haute terrasse au niveau de la nappe des travertins (Fig. 14).

Tableau 8 : Cotation du coefficient de perméabilité.

Conductivité hydraulique (m/j) (C)			
Intervalle	$C_C$	$C_P$	$C_C \cdot C_P$
0.04-4	1	3	3
4-12	2	3	6
12-29	4	3	12
29-41	6	3	18

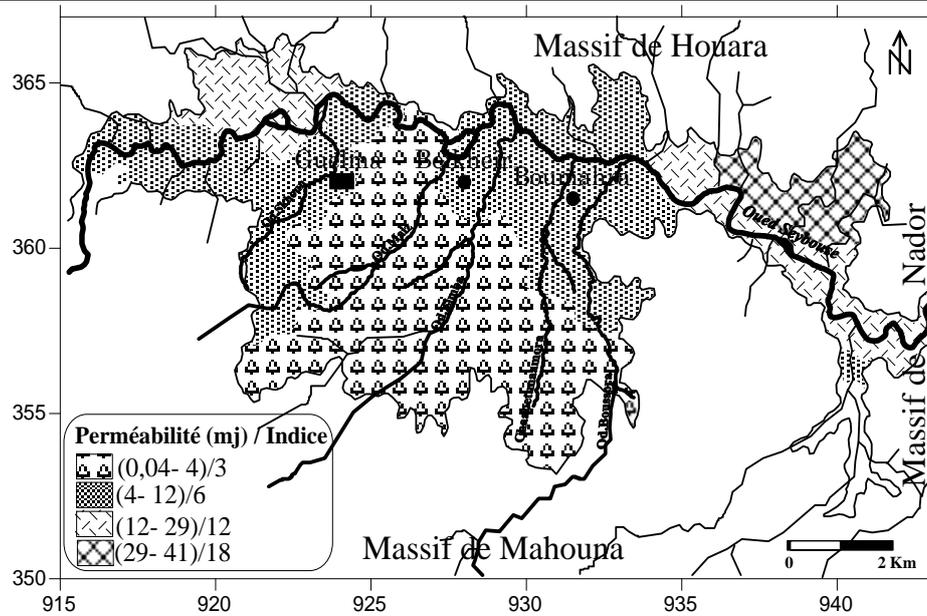


Figure. 14: Carte de répartition des valeurs de l'indice du coefficient de la perméabilité.

**Carte globale des indices :**

L'application de l'équation (2) en utilisant les indices répartis sur les différentes cartes, nous permet d'obtenir la carte finale des indices (Fig. 15), nécessaire à l'établissement de la carte de vulnérabilité de l'aquifère à la pollution.

La carte établie, montre que les indices varient entre 62 et 167. Les valeurs les plus faibles oscillent entre 62 et 126 et sont localisées sur la bordure sud-ouest de la haute terrasse, au niveau de la nappe des travertins. Au centre de la nappe des hautes terrasses et à l'extrême est de la moyenne terrasse les valeurs de l'indice oscillent entre 127 et 149, par contre dans la zone de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma, les valeurs sont fortes et vont de 150 à 167.

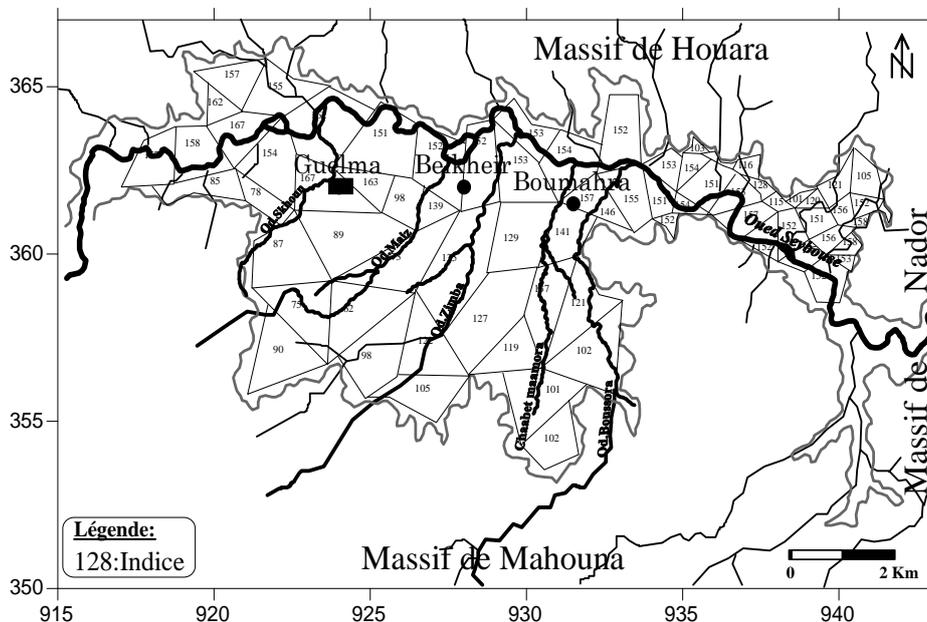


Figure. 15: Carte des indices DRASTIC.

**3.2.2. Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC**

La carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Guelma permet de visualiser les principales zones à risque qui sont liées à des indices élevés. Selon la méthode DRASTIC, les plages de vulnérabilité, basée selon la classification de l'U.S. Environmental Protection Agency, sont définies comme suit : 1) vulnérabilité faible :  $I < 100$  ; 2) vulnérabilité moyenne :  $100 < I < 150$  ; 3) vulnérabilité forte :  $I > 150$ .

La lecture de la carte de vulnérabilité (Fig. 16) met en évidence la dominance de la classe 3 ( $I > 150$ ), qui représente une forte vulnérabilité à la pollution aux endroits de Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma, où la propagation du polluant, à partir de la surface du sol, est facilitée par la perméabilité des matériaux encaissants du lit de la rivière ( blocs, galets, graviers et sable), par l'apport des eaux d'irrigation et par le pompage intensif des puits, situés en bordure de l'Oued Seybouse, surtout en période sèche. En plus, la faible profondeur des puits et des pentes faibles (3%) avec des terrains quasi-plats favorisent l'infiltration et, par conséquent, la contamination de l'aquifère à ces endroits. Une moyenne vulnérabilité est observée dans la partie extrême nord-est de la moyenne terrasse, au centre de la nappe des hautes terrasses et au également, plus au Sud, au niveau de la limite avec la molasse argilo-gréseuse, là où les ouvrages, captant l'aquifère, y sont profonds et où les échanges d'eau souterraine, entre la nappe superficielle et la nappe profonde, se font par drainage. Le niveau des forages exploités sont situés entre 10 et 70 m de profondeur. Il est important de signaler que la plupart des forages, destinés à l'alimentation en eau potable, sont implantés dans les zones à forte vulnérabilité [9]. La nappe des travertins à l'Ouest est caractérisée par une vulnérabilité faible.

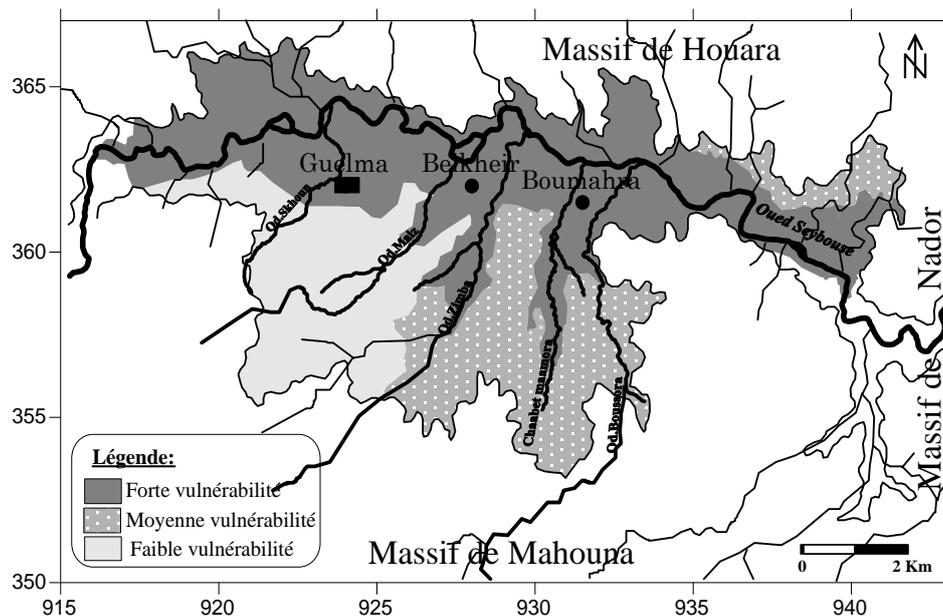


Figure. 16: Carte de la vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC

#### 4. CONCLUSION

L'application des méthodes GOD et DRASTIC a permis d'estimer les indices de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Guelma. Cette vulnérabilité s'accroît du centre de la plaine vers les bordures Nord. La répartition des sources de pollution a induit cette croissance. L'analyse des deux cartes de vulnérabilité résultant de l'application des deux méthodes GOD et DRASTIC a révélé que la vulnérabilité se focalise sur les classes « Faible », « Moyenne » et « Forte », ce qui laisse à penser que les deux cartes de vulnérabilité sont relativement proches mais que la carte de vulnérabilité réalisée à partir de la méthode DRASTIC reflète le mieux la réalité de la pollution des eaux souterraines de la plaine de Guelma.

La cartographie de la vulnérabilité de la plaine à partir de la méthode DRASTIC, montre que les zones de vulnérabilité faible occupent 25% de la plaine et se localisent au niveau de la nappe des travertins à l'Ouest. Les zones de vulnérabilité moyenne couvrent 30% de la surface totale et se localisent dans les parties extrême et moyenne au nord-est de la moyenne terrasse, au centre de la nappe des hautes terrasses et également plus au Sud, au niveau de la limite avec les molasses argilo-gréseuses. Par contre les zones à forte vulnérabilité, sont plus importantes et couvrent 45% de la surface totale et se situent à Nador, au Nord de Belkheir et aux alentours de Guelma. Le long de l'Oued Seybouse et ses affluents (Oued Maiz, Oued Zimba, Chaabet Maamora).

Les résultats de la méthode GOD, qui est plus simple avec un nombre réduit de paramètres, confirment, avec une certaine marge d'erreur, la répartition de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère, où les zones à forte vulnérabilité occupent 40% de la surface totale le long de l'axe Guelma-Belkeir-Boumahra.

**REFERENCES**

- [1] Guillaume M., Marie L., 2015.Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec), *Géohydro2011*.7p
- [2] Gabriel Etienne Ake., Hélène Boyossoro K., Kouassi D., 2010. Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO<sub>3</sub>-) de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *International Journal of Biological and chemical Sciences*,vol.4(5),1676-1692.
- [3] Chaffai H., Laouar R., Djabri L., Hani A., 2006. Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe alluviale de Skikda : Application de la méthode DRASTIC, *Bulletin du Service Géologique National*, Vol. 17(1) ,63-74.
- [4] Bouchahm N., Slimani R.,Chaib W.,Rezeg A.,Benaouda L.,Djabri L.,2009. Détermination de la vulnérabilité des eaux a la pollution par différentes méthodes : application a la nappe phréatique de Biskra Sud Algérien, *Journal Algérien des Régions Arides*, N°08, pp 35-50.
- [5] Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J. Hacket G., 1987. A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings, *Prepared by the National Water Well Association for the US Environmental Protection Agency*,Vol. 600(2),87-035.
- [6] Khemmoudj K., Bendadouche H., Merabet S., 2014. Assessment of the vulnerability of an aquifer by DRASTIC and SYNTACS methods: Aquifer of Bazer – Geult Zerga area (northeast Algeria), *E3 Journal of Environmental Research and Management*, Vol. 5(9), 0169-0179.
- [7] Villa J M., 1980.La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat ès sciences Nat, Université de Pierre Marie Curie, Paris VI, France.2 vol. 665p.
- [8] Laraba.A ., Hadj Zobir.S., 2009.Pollution organique des eaux de l'oued Seybouse (plaine alluviale de Guelma, Nord Est Algérien),*Bulletin Sciences Géographiques*, N°23(1<sup>er</sup> semestre).
- [9].Nouar T., 2007.Impact de la pollution sur les ressources en eau superficielles et souterraines de la région de Guelma. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.179p.
- [10] Brahmia N., 2016. Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la moyenne Seybouse, Nord-Est, Algérien.Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.133p.
- [11] Kachi N., 2015.Impact du périmètre irrigue sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la seybouse. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.209p.
- [12] Drias T., Toubal A.C., 2015.Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Bassin versant de l'Oued Ksob) extrême Est Algérien, *Larhyss Journal*, ISSN, Vol.1112-3680(22),35-48.
- [13] Cheng Yu., Baoxiang Z., Yingying Y., Fanhai M., Chunmiao Z., 2012. A field demonstration of the entropy-weighted fuzzy DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment, *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.57 (7),1420-1432.
- [14].Rouabhia A., 2006. Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.174p.
- [15]. Chandoul E.R., Trabelsi N., Bouaziz S., Ben Dhia H., SIG 2008."Spatial Analyst" pour le calcul et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution selon la méthode DRASTIC. Application sur la nappe phréatique de Gabès Nord, La conférence Francophone ESRI, Versailles.
- [16].Kachi S., 2007. Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott face aux polluants. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.163p.
- [17] Dibi B., Kouassi Kouakou L., Kouamé Kouassi I., Konan Kouakou S., Soumahoro M., Konan-waidhet Arthur B., Gnakri D., 2013.Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS:Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.2 (4), 464-476.