

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE : RÉGION DE TÉBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

**Larbi DJABRI*, Azzedine HANI*, Rabah LAOUAR*, Saadane DJORFI*,
Christian LAMOUREUX** et Rochdi BOUSSAHEL***.**

RÉSUMÉ

Le présent travail se rapporte à la nappe alluviale de Tébessa. Cette zone est caractérisée par un climat semi-aride et par l'affleurement de formations géologiques très hétérogènes. En effet, au niveau de la bordure est affleurent les formations gypsifères du Trias ; par contre, les bordures nord et sud sont caractérisées par l'affleurement des calcaires. La plaine, elle-même, est composée d'alluvions sablo-argileux, ce qui confère à l'eau et au sol diverses compositions chimiques et pédologiques. Pour étudier le problème de pollution, deux méthodes ont été utilisées: (1) la méthode DRASTIC qui combine les renseignements fournis par 7 paramètres et aboutit à la carte de vulnérabilité à la pollution et (2) une méthode basée sur l'hydrochimie prenant en compte les résultats du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , car il montre l'influence des formations gypsifères sur la salinité des eaux. L'observation et la superposition des deux cartes réalisées montre que les zones les plus vulnérables sont les plus exposées à la pollution: cas de l'oued Chabro et l'oued Kébir ($Sr^{2+}/Ca^{2+} > 3\%$). Par contre, sur les bordures, le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} est inférieur à 1%. Cette zone est donc considérée la moins vulnérable. Cette étude a également permis de comprendre le déroulement du mécanisme d'acquisition de la salinité.

Mots clés - Tébessa - Pollution - Vulnérabilité - Salinité.

VULNERABILITY OF GROUND WATER TO POLLUTION IN A SEMI-ARID AREA: THE ALLUVIAL WATER TABLE OF TEBESSA (EAST ALGERIA) CASE STUDY.

ABSTRACT

The Tébessa region is characterised by a semi arid climate and a very heterogeneous geology. The Tébessa plain is bordered at the east by the Triassic évaporitic formation, whereas the northern and southern parts are characterized by the outcrops of limestones. The plain itself is composed of alluvium dominated by clays and sands. According to field observation, the alluvial water table of Tébessa plain is exposed to pollution, and to assess the extent of this water pollution, two methods were used: (1) the DRASTIC method which combines the information given by seven parameters leading to draw the map of vulnerability to pollution and (2) a method based on hydrochemistry emphasizing the results of the Sr^{2+}/Ca^{2+} ratios.

*11, Rue Asla Hocine, Annaba 23000, Algérie. Fax: 213.38.87.14.48, E-mail: djabri_larbi@yahoo.fr.

** SN5, Laboratoire de Géologie. Université de Lille1. Cité Scientifique Villeneuve d'Ascq 59000. France.

*** Hôpital central de Aïn Naadja. Service de toxicologie. Alger

- Manuscrit déposé le 03 Mars 2007, accepté après révision le 17 Octobre 2007.

The superposition of the two maps shows that the most vulnerable areas are those exposed to severe pollution; e.g. Oued Chabro and Oued Kebir where Sr^{2+}/Ca^{2+} is higher than 3‰. On the plain borders, the ratio Sr^{2+}/Ca^{2+} is less than 1‰; this area is therefore considered to be the least vulnerable to pollution.

The chemical data of ground water was also used to understand the process of salinity acquisition.

Key words - Tébessa - Pollution - Vulnerability - Salinity.

1. INTRODUCTION

L'étude de la vulnérabilité à la pollution eu égard aux changements climatiques qui engendrent des pertes colossales en eau, devient de plus en plus prépondérante, particulièrement dans les pays en voie de développement où les risques de pollution sont très présents car n'ayant pas été pris en charge à la base (aménagement des nouvelles cités).

Beaucoup de méthodes ont été élaborées, ces dernières sont basées sur la cartographie des éléments contribuant à l'accélération du processus de pollution dans des zones particulièrement exposées aux risques de pollution. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer : GOD basée uniquement sur l'étude de trois paramètres (*in* Boulabaiz, 2006; BRGM, *in* Djabri et al., 2001; Djabri et al., 2003) combine l'occupation du sol et la piézométrie et DRASTIC (*in* Menani, 2001; Chaffai et al., 2006). Pour donner plus de crédibilité à notre travail, nous avons couplé les résultats obtenus en appliquant deux méthodes différentes qui peuvent se compléter. La première dite méthode DRASTIC qui a pour but la détermination des zones vulnérables. La seconde, constitue une approche basée sur les résultats des analyses chimiques, particulièrement le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} mettant en évidence l'influence des évaporites sur la qualité des eaux. La cartographie réalisée permet la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes permettant d'avoir une idée sur l'état de la nappe. Les résultats obtenus peuvent être considérés comme fiables car plusieurs paramètres ont été utilisés. Ceci aura pour but de cerner dans le détail les paramètres

engendrant une dégradation de la qualité des eaux qui se posent dans la région. Le présent travail constitue une contribution à l'étude de la vulnérabilité des eaux dans une région caractérisée par les interférences de plusieurs facteurs de pollution. Pour réaliser notre travail, nous avons combiné les renseignements fournis par la géologie, la géophysique, l'hydrologie et les analyses chimiques des eaux.

2. CADRE DE LA RÉGION ÉTUDIÉE

2.1. Contexte géographique

Tébessa ville frontalière avec la Tunisie, est située à l'extrême Nord-Est algérien (fig. 1), aux portes du désert, à environ 230 km au Sud d'Annaba. La région est limitée au sud par la wilaya de Biskra, à l'ouest par celle de Constantine et à l'est par la frontière tunisienne.

2.2. Aperçu géologique

Les formations alluvionnaires (fig.2 et 3) sont très diverses (alluvions, sables, argiles...) au centre de la plaine par contre sur les zones périphériques, les calcaires du Crétacé supérieur, Turonien, Maestrichtien fissurés affleurent et jouent un rôle prépondérant dans la recharge de la nappe. La plaine est recouverte par des formations hétérogènes influençant la composition chimique de l'eau au cours de son écoulement. La colonne stratigraphique schématique décrite par Durozoy, 1956 et complétée par nos soins donne un aperçu sur les formations constituant le système aquifère on y reconnaît :

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TEBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

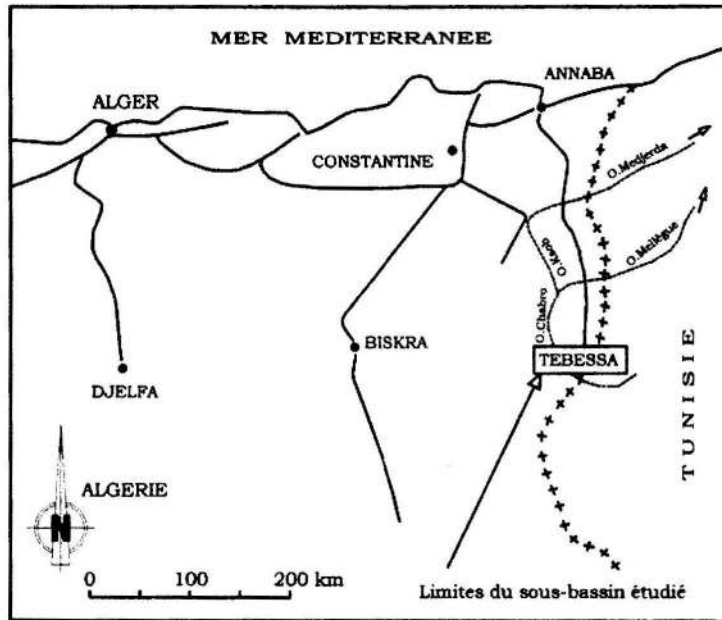


Fig.1 - Situation géographique de la région étudiée
Location of the study area.

- Un ensemble de formations actuelles avec:

des alluvions actuelles et récentes: peu puissantes, constituées de cailloutis calcaires riches en Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^- .

des limons récents: représentés par des horizons de l'altération et de lessivage des marnes environnantes (riches en Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-}).

- Les alluvions anciennes ou croûte calcaire: calcaire blanchâtre, parfois rosé, souvent d'aspect concrétionné cimentant des éléments calcaires bréchiques (riches en Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^-).

- Des brèches et cailloutis d'épandage ancien : avec des encroûtements, ils sont considérés comme des formations de pente; les éléments calcaires sont anguleux (riches en Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^-).

- Le Plio-Quaternaire, dont les éléments ont un bord arrondi, une mauvaise sphéricité et sont cimentés par des argiles, riches en Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} .

- Le Pliocène: constitué d'argiles rouges et de conglomérats sableux riches en Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} .

- Le Miocène: formations sableuses souvent associées à des argiles ou à des marnes, riches en Ca^{++} et Cl^- .

- L'Éocène: constitué de calcaire, peu développé dans la région, riche en Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^- .

- Le Crétacé : constitué par des calcaires fissurés sur les bordures, riches en HCO_3^- , assurant une recharge de la nappe.

- Le Trias: au niveau de Djebel Djebissa, marqué par sa richesse en Ca^{++} et SO_4^{2-} et constituant les affleurements des reliefs du Djebel Djebissa.

2.3. Le climat régional

Il est de type semi aride. Les précipitations annuelles peuvent y atteindre 400 mm/an. L'évapotranspiration réelle (E.T.R) calculée est

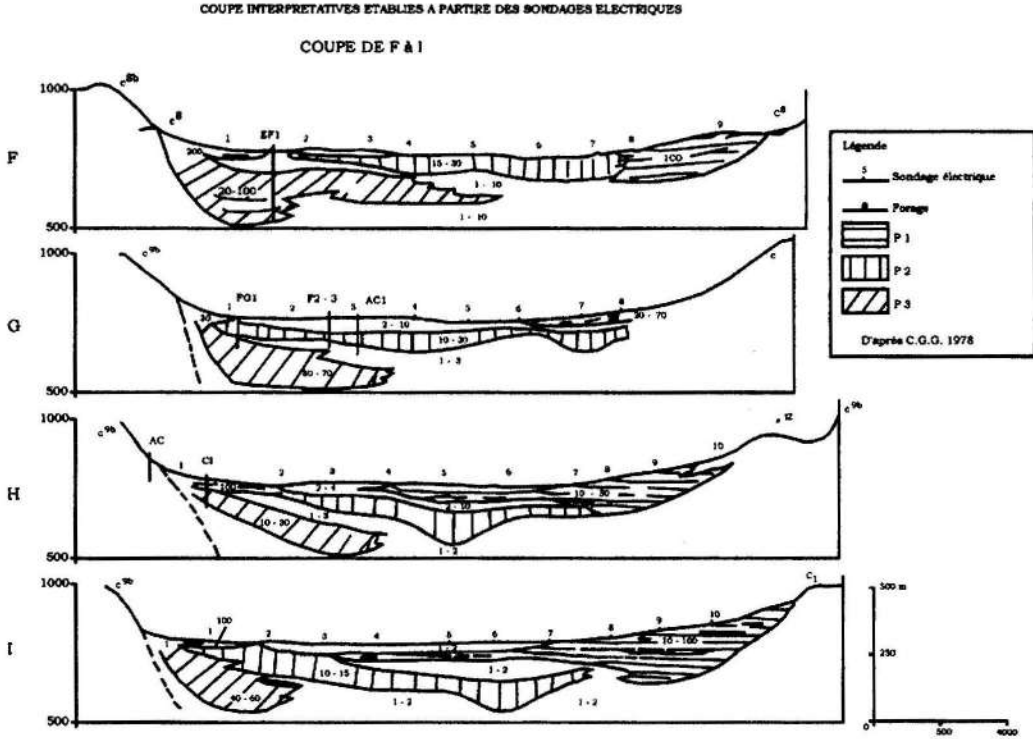


Fig. 5 - Profils géo électriques et succession des niveaux aquifères
Geoelectrical profiles and the succession of the aquifer levels

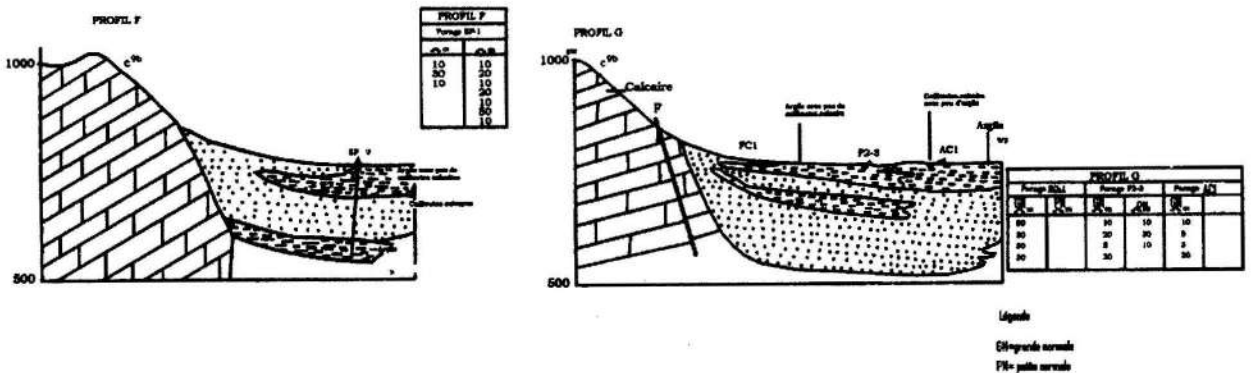


Fig. 6 - Lithologie et mode de dépôt à partir des résultats géophysiques
Lithology and sedimentation model based on geophysical data

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TĒBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

perméables (sables) ou imperméables (argiles ou marnes). Ces changements sont particulièrement présents dans la région de Tébessa, le niveau P1 qui est le niveau superficiel disparaît et se traduit par l'affleurement de la nappe au niveau de la Merdja (aéroport), par contre sur les bordures le niveau P1 est présent (fig. 7). Dans les secteurs de Bekkaria et Aïn Chabro, les niveaux imperméables apparaissent sur les bordures au niveau des djebels Bouroumane et Djebissa à Bekkaria et au djebel Boulhaf à Aïn Chabro. Cette reconstitution montre l'hétérogénéité géologique du niveau P1, se traduisant par une discontinuité des formations qui sera prise en considération lors de l'élaboration de la carte de vulnérabilité. Ce changement de faciès s'accompagne d'un changement des épaisseurs. On remarque (fig. 7), que les épaisseurs les plus importantes concernant le P1, se situent à Aïn-Chabro et atteignent 40m. Par contre, elles restent faibles ailleurs.

4. APPORTS DE LA MÉTHODE DRASTIC

4.1 Méthodologie

La ville de Tébessa tire ses ressources hydriques à partir des forages implantés dans la nappe alluviale. Le couvert végétal est souvent absent voire même inexistant ce qui expose les nappes superficielles au risque de pollution. La région a fait l'objet de plusieurs études (Ricard, 1974; Djabri, 1987; Gouadia, 2001; Bouchagoura, 2003;...) Les résultats obtenus permettent la détermination des paramètres de pollution, ces derniers ont été cartographiés selon deux méthodes :

- La méthode DRASTIC qui demande une bonne connaissance régionale des formations aquifères. Elle requiert d'importants travaux de collecte de données pour la cartographie. Cette méthode a été élaborée en 1987 aux Etats-Unis

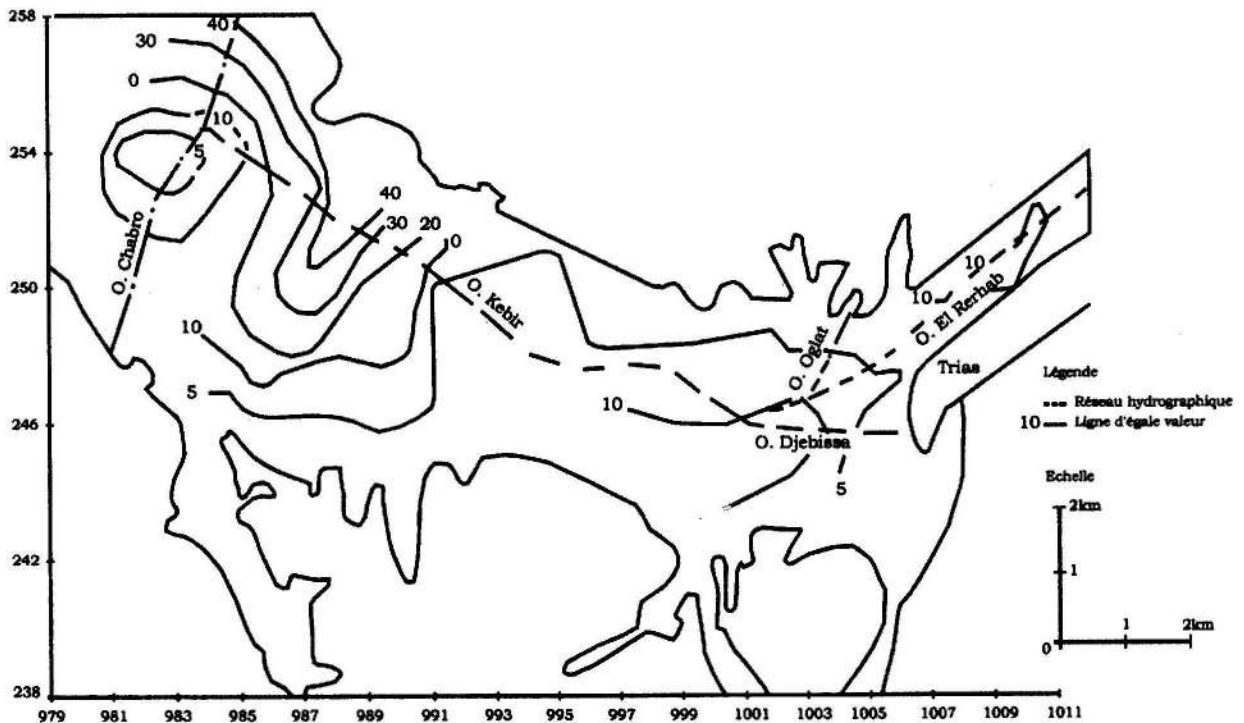


Fig. 7 - Carte isopaches du niveau P1 (m).

Isopachs of P1 level (m).

(Aller et al., 1987) et a été utilisée au Canada. Elle est basée sur l'utilisation de 7 paramètres qui sont: D: Depth to water (profondeur de l'eau), R: Net recharge (recharge efficace), A : Aquifer media (milieu aquifère), S: Soil media (type de sol), T: Topography (pente du terrain), I: Impact of the vadose zone (impact de la zone non saturée), C: Hydraulic conductivity (perméabilité k). La deuxième méthode va nous permettre de confirmer les résultats obtenus par la méthode DRASTIC.

Les paramètres DRASTIC (tableau I) aboutiront à la réalisation d'une carte de vulnérabilité mettant en évidence le degré de vulnérabilité à la pollution des différentes régions. Cette carte de vulnérabilité est issue à partir des indices calculés, où chaque paramètre fait l'objet d'une évaluation qui permettra de lui attribuer une cote pouvant varier de 1 à 10. À une cote de 1 correspondent les conditions de moindre vulnérabilité et une cote de 10 correspond aux conditions de haute vulnérabilité.

Tableau I - Poids assigné à chaque paramètre.

Parameters and their corresponding weights

Indice	Paramètre	Poids général
D	Profondeur de la nappe	5
R	Recharge efficace	4
A	Matériaux de l'aquifère	3
S	Matériaux du sol	2
T	Topographie	1
I	Impact de la zone vadose	5
C	Conductivité hydraulique	3

- La méthode chimique constitue une autre approche pour la quantification de la pollution des eaux. Dans le cas présent, on s'est intéressé aux indications fournies par l'étude du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} . Ce choix est dicté par la présence de formations évaporitiques affleurant au niveau du djebel Djebissa, par ailleurs l'écoulement des eaux se fait de l'est (Djebissa) vers le centre (Tébessa) conduisant au déplacement probable de la pollution.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Application à la nappe alluviale de Tébessa

5.1.1. La profondeur de l'eau (D)

Ce paramètre est déterminant pour la connaissance de l'état de pollution, en effet, plus la profondeur de l'eau est faible plus le risque de pollution est important. Car la distance à parcourir par le polluant est faible.

Les travaux réalisés par Bouchagoura (2003) portant sur la région de Tébessa montrent un niveau d'eau oscillant entre 4 et 25 mètres, les zones les plus profondes sont situées au niveau des bordures est et nord. Les résultats obtenus ont donné la carte en zone des profondeurs (fig. 8 et 9). Le découpage selon les intervalles accordés par la méthode DRASTIC montre trois zones d'inégale extension : la zone de faible profondeur localisée au niveau des oueds Kebir et Chabro, au centre de la plaine les profondeurs restent relativement faibles, elles avoisinent les 15 mètres au maximum, sur les bordures est et nord, les profondeurs sont les plus importantes.

Vu l'importance de la profondeur de l'eau un poids de 5 lui a été accordé. Ce dernier multiplié par les côtes de profondeur, conduit à l'élaboration de la carte des indices de la profondeur de l'eau (fig. 9). Cette dernière montre des indices élevés au niveau des oueds, qui deviennent plus faibles au fur et à mesure qu'on se rapproche des bordures avec une valeur de 13 (tableau II).

Tableau II - Cotation de la profondeur de l'eau.

Quotation of water depth parameter

Intervalle (m)	Dc	Dp	Indice partiel = Dc x Dp
4,5 - 9	7	5	35
8 - 15	5	5	25
15 - 23	3	5	15

Dc : Côte de profondeur de l'eau, Dp : Poids de profondeur de l'eau.

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TEBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

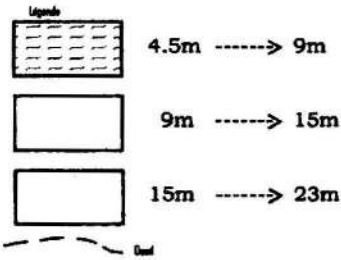
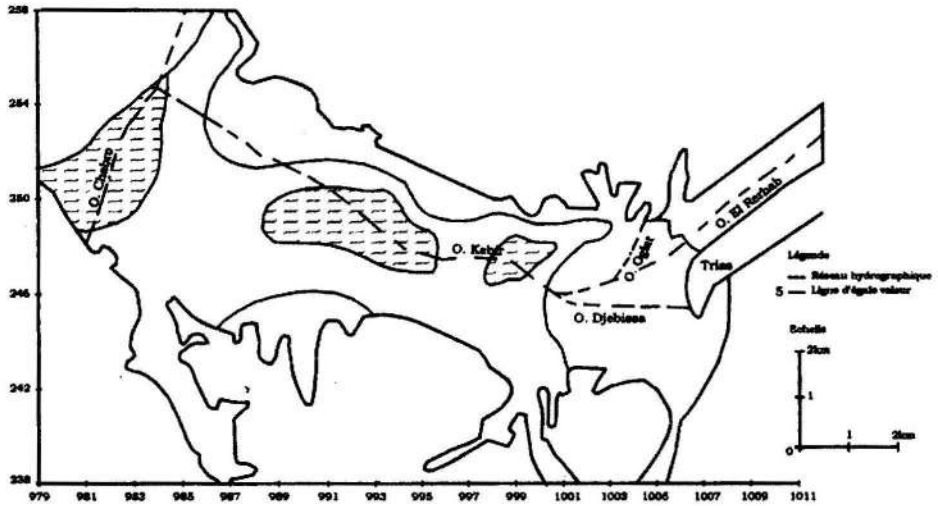


Fig. 8 - Carte en zone de la profondeur de l'eau (m),
Map of water depth zones (m).

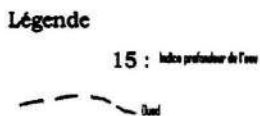
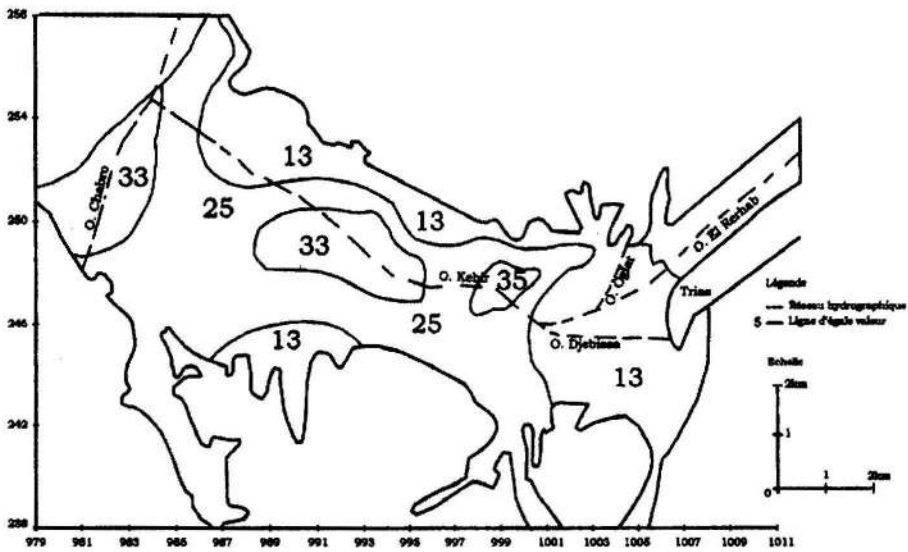


Fig. 9 - carte des indices de la profondeur
Map of depth indexes

5.2. LA recharge efficace : (R)

Le manque de stations météorologiques nous a contraint à utiliser les données de la station de Tébesa. Par ailleurs, le poids affecté à l'infiltration est de quatre (4), ce qui démontre l'importance de ce paramètre et son influence dans les processus de pollution. Pour une recharge annuelle inférieure à 5 cm, le Rc est égal à 1, ce qui nous donne un indice partiel relatif à ce paramètre égal à 4 (tableau III).

Tableau III - Cotation de l'infiltration efficace

Quotation of recharge rate parameter of aquifer

Intervalle (cm)	Rc	Rp	Indice partiel = Dc x Dp
0 - 5	1	4	4

Rc : Côte de recharger, Rp : Poids de recharge.

5.3. Les matériaux de l'aquifère (A)

La zone d'étude est caractérisée par un aquifère superficiel hétérogène confirmé par les renseignements déterminés à partir de l'étude géophysique et de l'observation des données de forages (fig.10) démontrant la présence de changements de faciès au niveau de l'aquifère, ce dernier est contenu dans des sables à Bekkaria, sur les bordures sud et nord les calcaires sont le siège de l'aquifère, par contre au centre les

formations alluvionnaires particulièrement riches en cailloutis, calcaires marnes..., constituent l'aquifère, à l'ouest à Aïn Chabro la nappe est constituée de graviers.

La carte des indices (fig.11) montre que ces derniers sont élevés sur les bordures nord et sud (30), par contre au niveau de l'oued Kebir, ils sont faibles (18). Au centre de la plaine, ils atteignent 24 au niveau des limites ouest et est. On peut donc déduire qu'un éventuel polluant peut circuler aisément sur les bordures de la nappe.

5.4. Le type de sol (S)

La pollution commence en surface avant d'aller en profondeur. La circulation du polluant reste conditionnée par la nature du sol. Si ce dernier est constitué par des formations perméables facilitant le transit du polluant celui-ci atteindra l'aquifère et se propagera. La connaissance de la nature du sol reste déterminante pour la propagation des polluants.

Les sables dominent dans le secteur est, au-delà, on retrouve des graviers particulièrement dans la région de Aïn Chabro et sur les bordures, le centre de la plaine est constitué par des terres grasses, argileuses souvent associées à des sables.

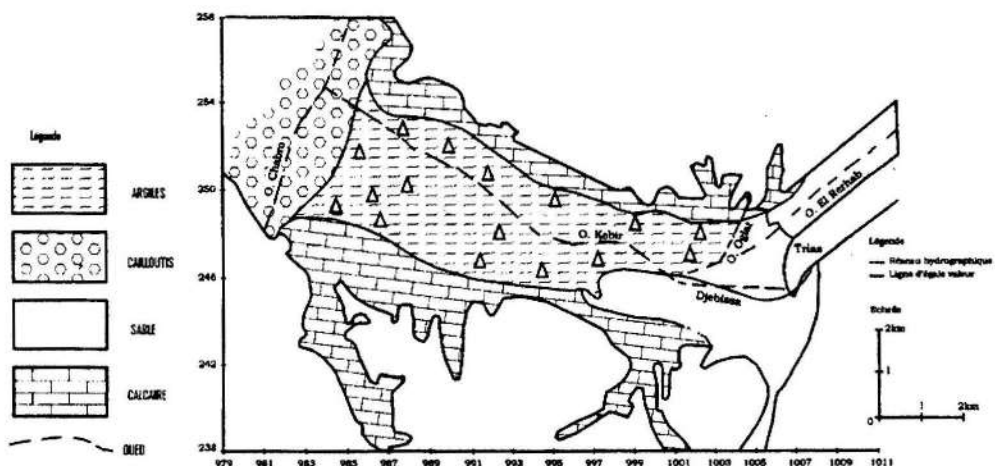


Fig.10 - Carte en zone des matériaux de l'aquifère,

Map of aquifer media

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TÉBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

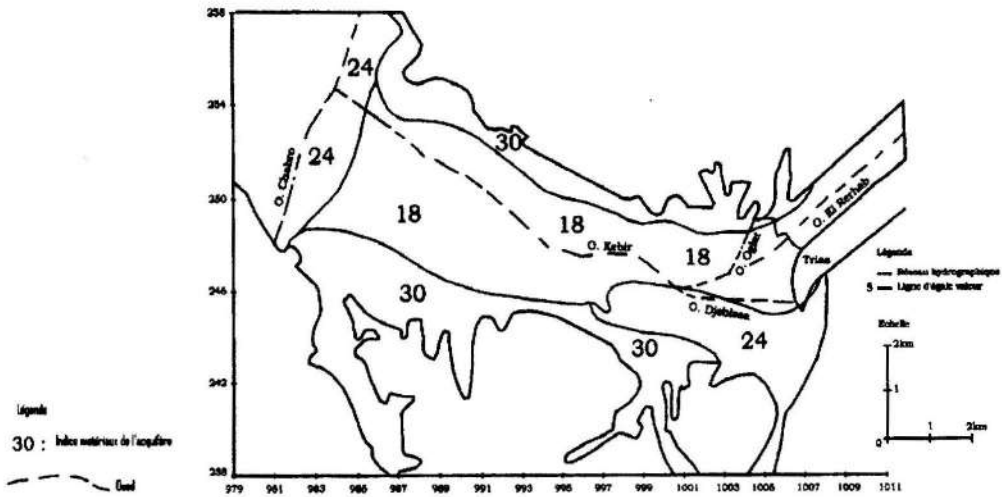


Fig.11 - carte des indices correspondant aux matériaux de l'aquifère
Map of aquifer media indexes.

L'épaisseur du sol est importante au niveau des oueds, elle peut atteindre 80 cm et sur les bordures est et nord, elle n'excède pas 50 cm. En surface, on retrouve des formations hétérogènes, ce qui rend la quantification assez difficile (tableau V).

5.5. La pente du terrain (T)

Elle a un poids de 3. Ce coefficient montre que la pente reste un élément important car elle favorise le déplacement du polluant. La pente générale de la zone en question est variable (tableau VI).

Plus la pente est importante, plus le polluant peut se déplacer par ruissellement. Entre Bekkaria et Aïn Chabro, le changement de pente se fait par palier avec des zones de stabilisation, ce qui peut entraîner des pollutions très localisées par piégeage des polluants. Cette situation peut se produire dans la région de Tébessa car dans cette zone apparaît un effet de substratum (causé par la disposition de la couche imperméable séparant la nappe de la surface du sol) provoquant ainsi, un affleurement de la nappe l'exposant directement au risque de pollution.

Tableau IV - Cotation des matériaux de l'aquifère.

Quotation of the aquifer media parameter

Nature du matériau aquifère	Ac	Ap	Indice partiel = Ac x Ap
Argile	6	3	18
Alluvions	6	3	18
Gravier	8	3	24
Sable	8	3	24

Ac : Côte des matériaux de l'aquifère, Ap : Poids des matériaux de l'aquifère.

Tableau V - Cotation de la nature du sol.

Quotation of the soil media parameter

Nature du sol aquifère	Sc	Poids (Sp)	Indice partiel = Sc x Sp
Graviers	10	2	20
Galets calcaires	10	2	20
Argiles sableuses	6	2	12
Sables	9	2	18

Sc : Côte de la nature du sol, Sp : Poids de la nature du sol.

Tableau VI - Cotation de la pente du terrain.

Quotation of the topography parameter

La pente du terrain en %	Tc	Poids (Tp)	Indice partiel = TcxTp
0 - 2 %	10	3	30
2 - 6 %	9	3	27

Tc : Côte de pente, Tp : Poids de la pente

5.6. L'impact de la zone non saturée (I)

Sa composition lithologique peut constituer un frein (formations imperméables) ou un accélérateur pour la propagation de la pollution. Les observations réalisées au niveau des puits nous ont permis de dresser la carte (fig. 12), montrant un sous-sol constitué de sables et de

gravier à l'est et à l'ouest, par contre au centre les sables sont mélangés avec des argiles.

La carte des indices (fig.13), montre des valeurs oscillant entre 30 et 40, occupant une grande partie de la plaine mettant en évidence un risque de pollution évident. Le tableau VII donne un aperçu sur les formations constituant la zone non saturées.

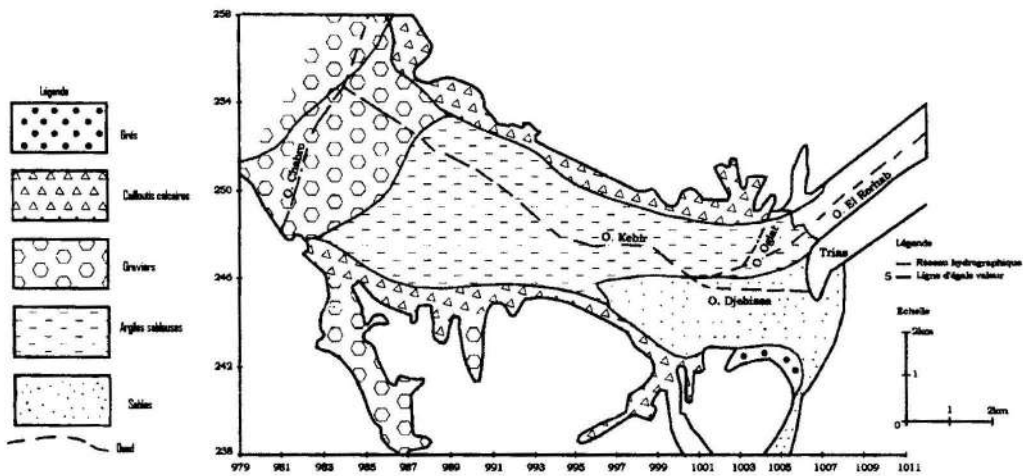


Fig.12 - Carte en zone de la partie non saturée de l'aquifère
Map of the vadose zone of the aquifer

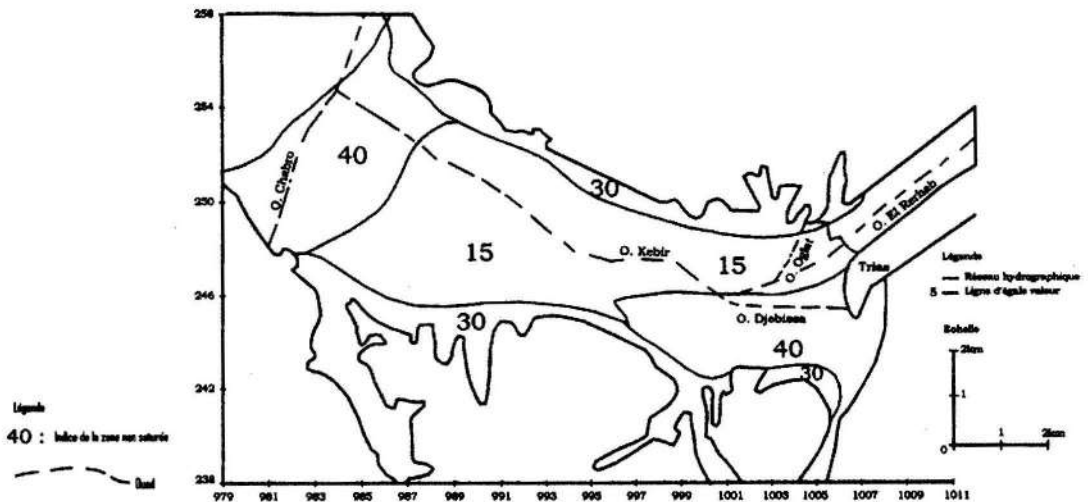


Fig.13 - Carte des indices correspondants à la zone non saturée
Map of the vadose zone indexes

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TÈBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

Tableau VII - Cotation de la zone non saturée.

Quotation of the vadoze effect parameter

Impact de la zone saturée	Ic	Ip	Ic.IP
Grès	6	5	30
Sable + garvier	8	5	40
Argile sableuse	6	5	30
Sable	6	5	30

Ic : Côte de zone non saturée, Ip : Poids de zone non saturée.

5.7. La carte de la conductivité hydraulique (C) :

D'une manière générale, les perméabilités sont issues des essais par pompage. Pour déterminer les perméabilités du niveau P1, nous avons réalisé une corrélation entre le débit spécifique et la transmissivité, sachant que le logarithme népérien du débit spécifique est égal à la transmissivité. Comme nous ne disposons pas de toutes les valeurs de transmissivité et partant de la formule obtenue par la corrélation réalisée, nous avons calculé pour les points manquants la transmissivité correspondante et de ce fait le calcul de la perméabilité de tous les points était devenu possible. Pour cela nous avons utilisé la formule connue: $T=K$ e d'où $K=T/e$. Une fois cette opération réalisée, on a établi la carte des perméabilités de la région d'étude.

La comparaison du tableau III avec la carte de la conductivité hydraulique de la région permet d'affecter un indice partiel à cette zone qui varie entre 3 et 24 (tableau VIII, fig. 6).

Tableau VIII - Cotation de la conductivité hydraulique
Quotation of the hydraulic conductivity parameter

La conductivité hydraulique	Cc	Poids (Cp)	Indice partiel = Cc x Cp
0,04 - 4	1	3	3
4 - 12	2	3	6
12 - 29	4	3	12
29 - 41	6	3	18
41 - 82	8	3	24

Cc : Côte de perméabilité, Cp : Poids de perméabilité.

La perméabilité est un élément important, car elle conditionne l'infiltration ou le déplacement du polluant au sein même de la nappe. Si la perméabilité est importante, le polluant se déplace facilement et donc les risques de contamination sont importants. Les perméabilités sont importantes à Bekkaria et à Aïn Chabro favorisant ainsi le déplacement du polluant avec les eaux suivant le sens de l'écoulement des eaux de la nappe. Cette situation expliquerait la présence des polluants dans des zones supposées à l'abri de toutes pollutions. À Tébessa la perméabilité est faible, ceci se traduit par des écoulements assez lents favorisant la contamination des eaux. Par ailleurs, l'effet de substratum se produisant dans cette partie favorise les échanges entre les polluants et l'eau, accentuant la dégradation de cette eau.

La combinaison de tous ces paramètres, en utilisant l'outil cartographique, permet de déboucher sur l'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution. Notons, qu'au préalable, on obtient la carte des indices.

5.8. Établissement et interprétation de la carte de vulnérabilité

En superposant les sept cartes indicelles deux à deux, nous obtenons la carte globale des indices (fig. 14 et 14') à laquelle nous appliquons la classification du MEDEV (*in* Menani, 2001).

Cette dernière est basée sur les trois classes suivantes:

- a- $100 < \text{Indice global}$ (faible vulnérabilité),
- b- $100 < \text{Indice global} < 150$ (vulnérabilité moyenne),
- c- $\text{Indice global} > 150$ (forte vulnérabilité).

La carte obtenue (fig. 14') met en évidence trois zones à vulnérabilité différente:

- a- La première zone caractérise une faible vulnérabilité. L'indice I est inférieur à 100 ($100 < I$);

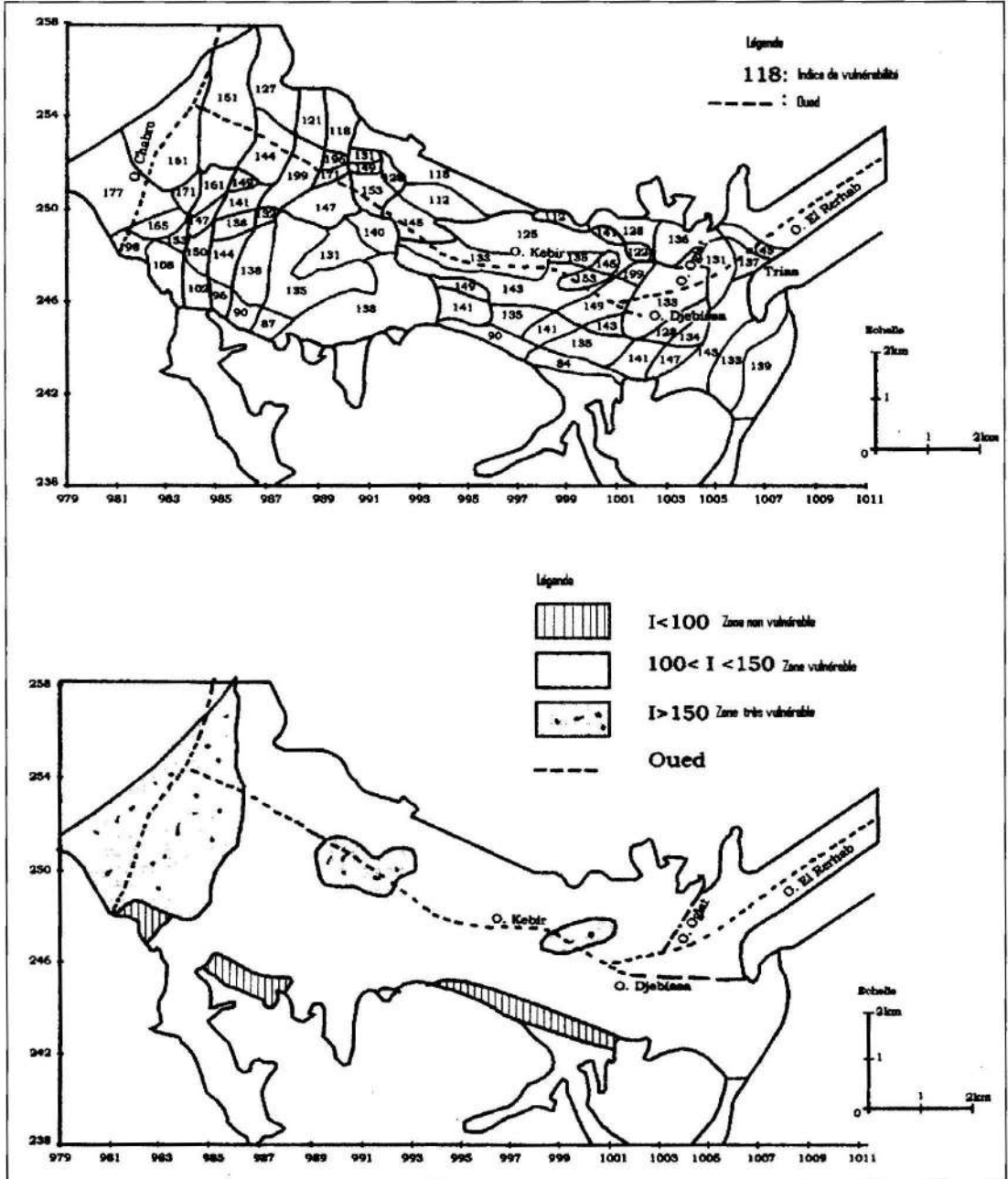


Fig.14 et 14' - Carte de vulnérabilité (méthode DRASTIC), région de Tébessa
Vulnerability map (DRASTIC method) of the Tebessa region.

A : Carte globale des indices (*Map of DRASTIC indexes*), B : carte de vulnérabilité (*Vulnerability map*).

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TÈBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

son extension est faible et se localise sur les bordures du terrain et est constituée particulièrement de calcaires fissurés et compacts. Cette zone est à l'abri de toute forme de pollution.

b- La deuxième zone dite de vulnérabilité moyenne où $100 < I < 150$, occupe pratiquement la totalité du terrain. Elle est caractérisée par la présence de formations alluvionnaires plus ou moins riches en argiles. Dans cette zone, l'écoulement se fait dans la direction est-ouest. La perméabilité est de l'ordre de 10^{-5} m/s.

c- La troisième zone est dénommée zone à vulnérabilité importante car l'indice I est important ($I > 150$). Son extension est faible et elle se localise au niveau de l'oued Kebir caractérisé par l'affleurement de la nappe, par contre la région de l'oued Chabro constituée de cailloutis indiquant une très forte perméabilité 10^{-3} m/s, permettant une meilleure propagation du polluant dans la nappe.

La carte de vulnérabilité élaborée par la méthode DRASTIC constitue le premier résultat de notre travail. Nous allons utiliser les résultats obtenus à partir des analyses chimiques des eaux, ce qui nous permettra de cerner au mieux les processus de pollution dans une zone relativement vulnérable.

6. APPORT DE L'HYDROCHIMIE

Les résultats des analyses des eaux obtenus nous ont permis de réaliser une analyse en composantes principales, ce qui nous permettra d'étudier les liens pouvant exister entre les éléments chimiques et par ricochet, démontrer leur impact sur la pollution des eaux.

6.1. Analyse en composantes principales

L'examen du plan des facteurs F1 et F2 (fig. 15 et 15') montre que ces deux derniers représentent 70% de la variance. L'axe F1 est déterminé positivement par un ensemble de sept

éléments chimiques; il oppose donc les eaux minéralisées indiquant une pollution saline aux eaux faiblement minéralisées. Par contre, le facteur F2 n'est déterminé que par NH_4 , NO_3 et K d'une manière positive et par HCO_3 d'une manière négative. Ce facteur oppose les eaux en provenance des bordures latérales aux eaux polluées par les engrais utilisés par les agriculteurs.

6.1.1. Origine de la salinité ou pollution naturelle

Les résultats fournis par l'analyse en composantes principales indiquent une pollution saline. Pour rechercher son origine, nous allons nous intéresser à l'étude du rapport strontium sur calcium (Sr/Ca), qui à partir des valeurs calculées donne un premier aperçu sur l'origine de la salinité. Le dosage des deux éléments a été réalisé par Djabri (1999).

*Etude du rapport $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau IX. L'examen des valeurs obtenues montre que le rapport Sr/Ca varie entre 0,8‰ et 28‰. En nous basant sur les valeurs limites dégagées par Bakalowicz (*in* Hsissou, 1997) qui a appliqué cette méthode aux eaux d'Agadir, nous avons pu dégager trois groupes:

a- Groupe A ($\text{Sr}/\text{Ca} < 2\text{‰}$): Comprend 3 échantillons, soit 9,4%.

b- Groupe B ($2\text{‰} < \text{Sr}/\text{Ca} < 3\text{‰}$): Comprend 4 échantillons, soit 12,5%.

c- Groupe C ($\text{Sr}/\text{Ca} > 3\text{‰}$): comprend 25 échantillons, soit 78,1%.

On note que 78,1% des échantillons présentent un rapport $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+} > 3\text{‰}$ mettant en évidence l'influence des formations évaporitiques sur la qualité des eaux souterraines (fig. 16).

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI ARIDE :
RÉGION DE TEBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

La carte (fig. 17) montre que les plus faibles valeurs du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} inférieures à 3‰, caractérisent les eaux en provenance des bordures nord et sud. Ceci montre une alimentation de la nappe par les formations latérales pauvres en strontium (pas d'influence évaporitique). Au centre de la plaine, on retrouve les rapports les plus élevés, mettant en évidence une salinité des eaux, particulièrement riches en gypse.

**Processus d'acquisition de la salinité*

La cartographie piézométrique (fig. 18) montre un écoulement dirigé de l'est vers l'ouest. Les oueds jouent le rôle d'axes de drainage. La carte géologique indique l'affleurement de formations triasiques (gypsifères) au niveau de djebel Djebissa. Ces formations sont lessivées et entraînées par l'eau au cours de son déplacement, ce qui aura pour conséquence une propagation de la salinité. La pente favorise également

le déplacement de la salinité vers les zones éloignées.

Le deuxième facteur engendrant une augmentation de la salinité est le climat. Les températures élevées, particulièrement en été (28°C, valeur moyenne), entraînent une forte évapotranspiration entraînant ainsi une augmentation de la salinité par concentration.

6.1.2. Pollution anthropique:

Le cercle ACP (fig. 9) montre un lien entre NO_3^- , NH_4^+ et K, probablement lié aux fertilisants ou aux rejets des eaux usées. Les eaux analysées ne sont pas trop profondes; sous l'influence de l'oxygène dissous et des bactéries, on assiste au passage :

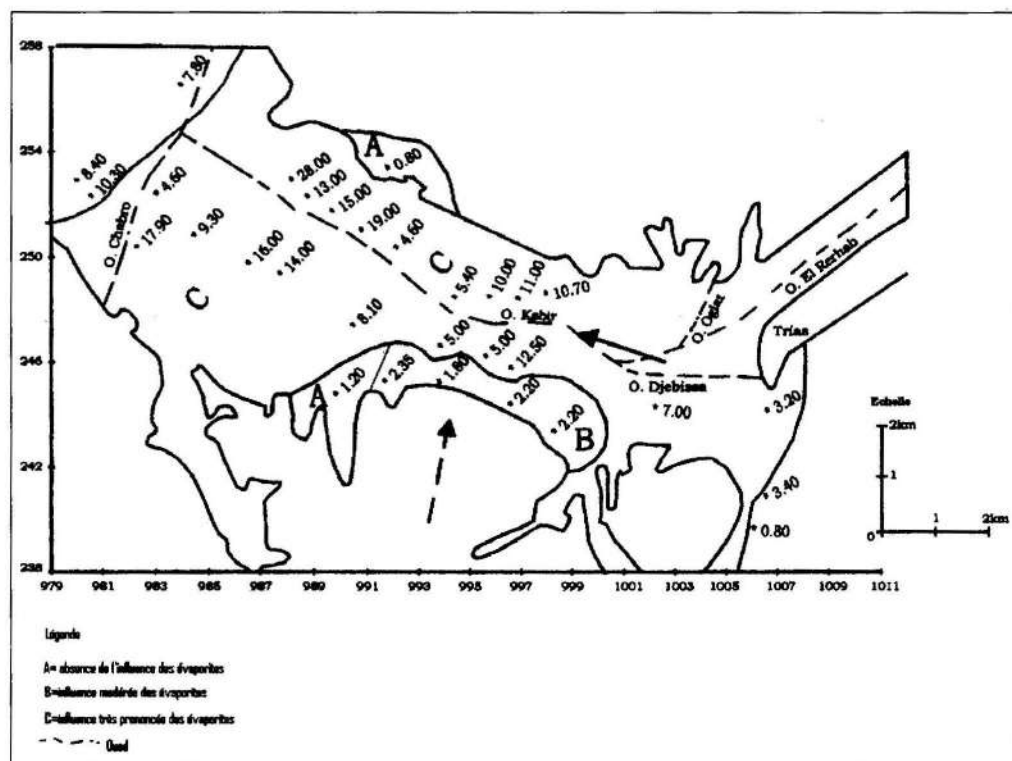


Fig.17- Carte de répartition des rapports Sr^{2+}/Ca^{2+}

Map of the Sr^{2+}/Ca^{2+} distribution

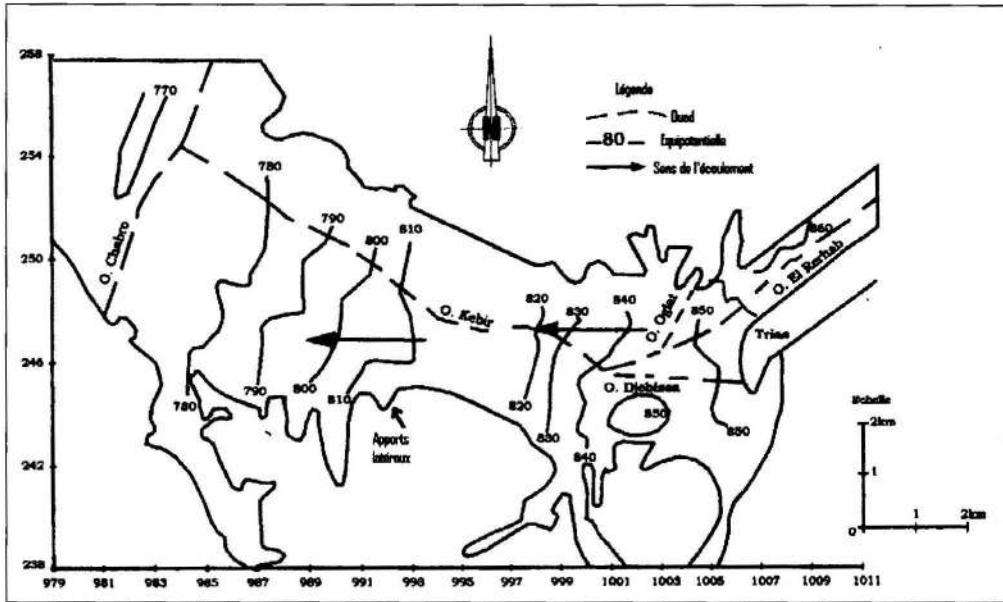


Fig.18 - carte piézométrique de la nappe alluviale de Tébessa (m).

Piezometric map of the alluvial water table of Tébessa (m)

La partie consacrée à la mise en évidence de la pollution confirme la présence des deux formes: l'une naturelle et l'autre anthropique. Chaque forme de pollution contribue à la dégradation de la qualité des eaux. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont similaires. Sur la bordure sud, le rapport $Sr^{2+}/Ca^{2+} < 3\%$, ce qui correspond à une zone de faible vulnérabilité. Au centre de la plaine, le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} est élevé, mais les zones de vulnérabilité sont moyennes à élevées; celles-ci restent conditionnées par la nature du terrain et de sa perméabilité.

a- Si la perméabilité est faible, cas de la plaine, on a une zone à faible vulnérabilité;

b- Si la perméabilité est forte, cas des oueds, on a une zone à forte vulnérabilité.

7. CONCLUSION

Le travail réalisé porte sur la vulnérabilité à la pollution d'une zone où interfèrent plusieurs facteurs pouvant provoquer la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Les deux

méthodes appliquées montrent une certaine complémentarité entre elles. En effet, la méthode DRASTIC a conduit à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité qui se superpose à celle établie à partir du strontium. L'application des deux méthodes nous a permis de confirmer et d'expliquer les problèmes qui se posent dans une zone fortement sollicitée par l'homme et desservie par la nature, affleurement du Trias gypsifère et sécheresse prolongée. Dans cette région, seules les zones de bordures caractérisées par une pente permettant les écoulements vers le centre de la plaine des polluants sont encore intéressantes au point de vue qualité d'eau.

8. BIBLIOGRAPHIE

- ALBINET, M. 1970. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. *Bull. BRGM(2)*, section III, N°4, pp. 13-22.
- ALLER, L. 1987. DRASTIC: A standard system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *National Water Well Association Rapport*, N°EPA 600/2-87.035, 455 p. et 22 cartes et légendes.

VULNÉRABILITÉ DES EAUX À LA POLLUTION DANS UNE ZONE À CLIMAT SEMI-ARIDE :
RÉGION DE TÈBESSA (EXTRÊME EST ALGÉRIEN).

- BOUCHAGOURA, L. 2003.** Etude hydrogéologique de la plaine alluviale de Tébessa. *Mémoire de magister de l'Univ. de Annaba.*
- BOULABAIZ, F. 2006.** Contribution à l'étude de la vulnérabilité de la nappe de Collo (N.E algérien). *Mém. de magister de l'université de Annaba.* 135p.
- CHAFFAI, H., LAOUAR, R., DJABRI, L. ET 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, n°1, pp. 63-74.
- C.G.G. 1972.** Réalisation d'une campagne géophysique sur l'aquifère Tébessa-Morsott. *Rapport interne.* 20p.
- DENIS, I. 1990.** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. *Revue Sciences et Techniques de l'Eau,* 25, N°3.
- DJABRI, L. 1987.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement «Essai de modélisation». *Thèse de Doc. Ing. de l'Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté.*
- DJABRI, L., HANI, A., MANIA, J. ET MUDRY, J. 2001.** Mise en évidence du processus de salinité des eaux superficielles. vérification par l'APC dans le secteur d'Annaba-Bouchegouf et Guelma. *Revue Tribune de l'eau.* Vol. 54, N° 610, pp. 29-43.
- DJABRI, L., HANI, A., MANIA, J. ET MUDRY, J. 2001.** La méthode DRASTIC, un moyen moderne pour l'étude de la vulnérabilité des nappes : Application aux nappes superficielles de Guelma-Bouchegouf-Annaba. *Revue EDIL inf-eau* n° 27. pp. 4-9.
- DJABRI, L. HANI, A., MANIA, L. AND LAOUAR, R. 2003.** Potential pollution of groundwater in the valley of the Seybouse River, north-eastern Algeria. *Revue, environnemental geology,* volume 44, number 6, September, 44, 738-744.
- DUROZOY, G. 1956.** Carte géologique de la région de Tébessa et sa notice explicative. Feuille 206.
- GOUAIDIA, L. 2001.** Approche hydrochimique d'une nappe en zone semi aride : cas de la nappe alluviale de la plaine de Tébessa, extrême Est algérien. *Mémoire de Magister de l'Université de Annaba.* 180p .
- HSSISSOU, Y. BOUCHAOU, L. MUDRY, J. ET MANIA, J. 1996.** Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin de Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . *J. Hydrol.,* 183p.
- HSSISSOU, Y. BOUCHAOU, L. MUDRY, J., MANIA, J. ET CHAUVE, P. 1997.** Dynamique et salinité de la nappe côtière d'agadir (Maroc): Influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. *Hydrochemistry, IAHS Publ.,* 244p.
- MANIA, J. ET AMAAREF, A. 1998.** La protection des eaux souterraines dans les zones rurales de moyenne montagne à vocation agricole. *Hydrogéologie,* N°4, pp. 29-32, 1 fig., 2 tabl.
- 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. *Revue sécheresse,* n° 12, vol. 2, pp. 95-101, juin 2001.
- MUNOZ, S. 1991.** Adaptation d'une méthode cartographique assistée à l'élaboration de cartes de vulnérabilité au Guatemala. *Hydrogéologie,* N°1, pp. 65-84, 11 fig., 3 tabl.
- RICARD, J. 1974.** Inventaire et état de la ressource en eau de la région de Tébessa. *Rapport interne.* 76p.
- SHAMSUDDIN, S. 2000.** A study of groundwater vulnerability using/GIS. West Bengal. India. *Journal of environmental hydrology,* 8. 1-9p
- TRIPET, J.P. 1998.** Nécessité d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères fissurés. *Workshop Vulnérabilité et Protection des Eaux karstiques,* 18-20. 05, Chyn, Neuchatel