

## EVOLUTION CHIMIQUE ET VULNERABILITE A LA POLLUTION DE L'AQUIFERE DUNAIRE DE BOUTELDJA (NORD-EST ALGERIEN)

Reçu le 04/05/2003 – Accepté le 16/06/2004

### Résumé

L'aquifère dunaire de Bouteldja est alimenté essentiellement par les précipitations et par les eaux de ruissellement sur les reliefs grés-argileux à l'Est. Les exutoires de la nappe sont constitués par la mer Méditerranée au Nord, la nappe des graviers au Sud et par les prélèvements dans les forages et dans les sources évalués en 1995 près de 600l/s.

Le passage latéral aux graviers de la plaine au Sud est marqué par de nombreux marécages (garaet) qui correspondent à un affleurement du niveau piézométrique. L'accroissement des terres cultivées et le développement des agglomérations limitrophes et, donc des besoins en eau, pourraient, dans un avenir proche, influencer négativement l'équilibre hydrodynamique de l'aquifère et la qualité des eaux.

Le dépouillement et l'analyse multivariable des données physico-chimiques observées depuis 1975, ont permis de définir les principaux traits caractérisant l'évolution chimique observée au niveau de l'aquifère et de mettre en évidence une augmentation des teneurs en nitrates dans les secteurs à forte activité agricole, favorisée par l'absence de terrain argileux protecteur.

**Mots clés:** Bouteldja, Aquifère dunaire, Vulnérabilité, ACP, Pollution.

### Abstract

The Bouteldja sandhill aquifer is mainly fed by the precipitations and waters run offs on the eastern surrounding reliefs made of clays and sandstones. The outlets of the underground water reserves beds are mediterranean sea to the North side, the many water springs as well as the underground pumping which was estimated to 600l/s during the year 1995.

The Southern plain laterale side passage to the gravel water reserves beds led to many marsh lands and swamps which are due to the near surface piezometric level. The extension of cultivated lands and the development of the surrounding urban areas with their growing water needs may in the near future affect negatively the hydrodynamique equilibrium of the aquifer and the water quality.

The examination of the physico-chemical data acquired since the year 1975 and its multivariable analysis has allowed a better definition of the chemical evolution characteristics observed at the aquifer level. This has also allowed the discovery of high nitrate concentration in the farm lands (agricultural lands) and this is because of the lack of protective clays.

**Keywords:** Bouteldja, Sandhill aquifer, vulnerability, PCA, pollution.

F. ASSASSI

A. HANI

L. DJABRI

Département de Géologie

Faculté des Sciences

de la Terre

Université Badji Mokhtar

BP. 12, 23000 Annaba

### ملخص

تتغذى الطبقة الرملية الحاملة للمياه في بوتلجة أساسا من مياه التساقط ومن جريان تضاريس الحجر الرمي، الخضاري في الشرق الجزائري. تتكون أماكن تصريف هذه الطبقة من البحر المتوسط شمالا ومن غشاء الجبس جنوبا ومن المياه المأخوذة من التنقيبات ومن مياه الينابيع التي قدرت سنة 1995 ب 600 لتر/ الثانية.

يتميز الانتقال الجانبي للجبس في السهل جنوبا بوجود مستنقعات عديدة (قرعات) تتناسب مع تكثفات مستوى مياه هذه الطبقة زيادة حاجات الأراضي الزراعية وتطور التجمعات العمرانية المجاورة إلى المياه يمكن أن تؤثر سلبا على توازن ديناميكية ونوعية المياه في هذه الطبقة في المستقبل القريب.

سمحت تحاليل المعطيات الفيزيائية – الكيميائية ذات المتغيرات العديدة والتي تم رصدها منذ سنة 1975 م بالتعرف على الملامح الرئيسية المميزة للتطور الكيميائي على مستوى هذه الطبقة وإبراز تزايد محتوى المياه من الفترات في القطاع ذي النشاط الزراعي الكثيف، وقد ساعد هذا التزايد غياب أراضي غضارية حامية.

**الكلمات المفتاحية:** بوتلجة، الطبقة الرملية الحاملة للمياه، القابلية، التلوث.

La connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux représente une part importante du coût d'exploitation d'un réseau ayant pour objectif principal la surveillance de la qualité des eaux souterraines, étape indispensable à la gestion de cette ressource, tant pour l'alimentation en eaux potables que pour l'irrigation. Etroitement lié aux produits solubles de l'altération des roches, l'état hydrochimique devrait nous permettre d'appréhender les mécanismes d'échange et d'alimentation, et de caractériser entre autres, l'évolution du chimisme des eaux de la nappe en se basant sur les données des différentes périodes de mesure. Pour atteindre ces objectifs, nous avons divisé cette étude en deux rubriques selon deux intentions différentes :

- déterminer les différentes familles au sein de l'ensemble des points de mesure. Cette étape passe par l'étude des valeurs moyennes des teneurs brutes mesurées pendant une période donnée. Les statistiques élémentaires des résultats analytiques de l'échantillonnage effectué entre mai 1975 et octobre 1993 permettent de définir certaines caractéristiques du réservoir aquifère.

- étudier les principaux facteurs d'influence sur le chimisme des eaux, en particulier la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère dunaire, en s'appuyant sur la méthode de l'analyse en composantes principales (A.C.P).

Les échantillons prélevés sur l'ensemble des points de mesure de la nappe dunaire de Bouteldja ont été analysés au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Constantine (A.N.R.H).



### CADRE GEOGRAPHIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Au nord-est de la grande plaine de Annaba, la nappe libre du massif dunaire est contenue dans les sables éoliens épais de 20m à l'Est et de 120m à l'Ouest. Localement, la nappe peut-être mise sous pression à la faveur de niveaux argileux imperméables [5]. A l'Ouest, ces formations reposent sur le remplissage mio-pliocène de la fosse de Ben M'hidi, alors qu'au sud elle passe latéralement aux graviers de l'aquifère principal des graviers [5,11] (Fig.1).

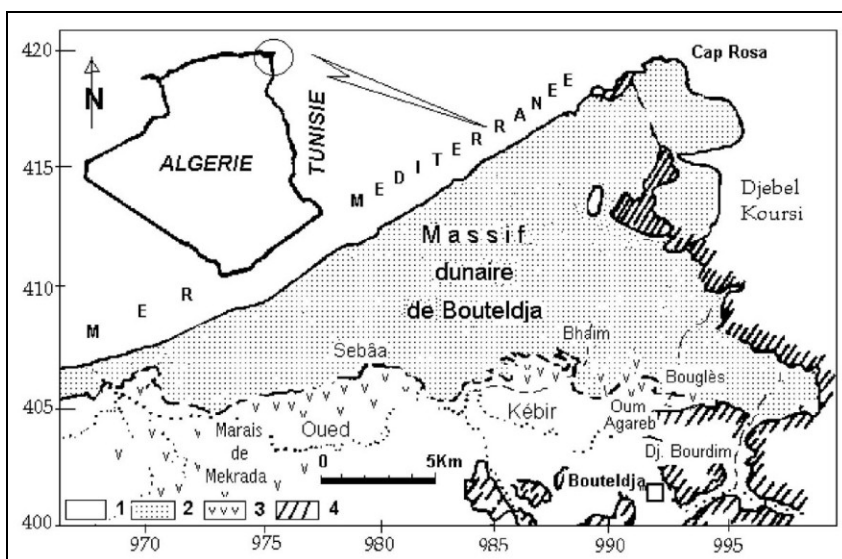
D'un point de vue hydrogéologique, la nappe du massif dunaire se caractérise par :

- une crête hydraulique orientée NNE-SSW qui sillonne le massif sur près de 15 km. De part et d'autre de cette crête, l'écoulement s'effectue vers la mer au Nord et vers la nappe des graviers au Sud. Le trop plein de l'écoulement servirait à alimenter les marais de bordure [6,7,11].

- un surdrainage des eaux souterraines par les oueds El Bhaim, Bouglès et Bourdim [6,11,12].

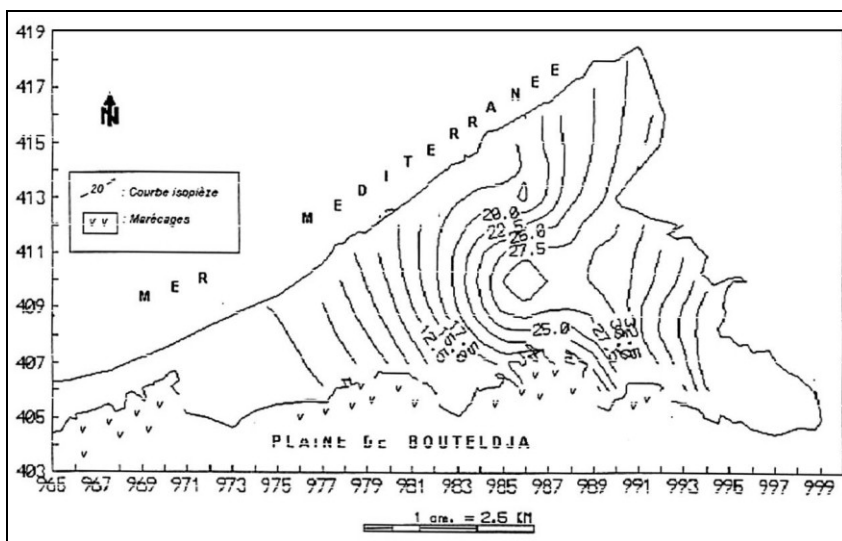
Ce drainage est compensé en partie par les eaux de ruissellement sur les reliefs grés-argileux du nord (Fig.2).

Par ailleurs, la morphologie de la surface piézométrique de la nappe dunaire reflète sensiblement la topographie de la zone d'étude (Fig.3) ; ce phénomène marque certainement la forme de l'alimentation qui s'effectue principalement par infiltration des eaux de pluie.

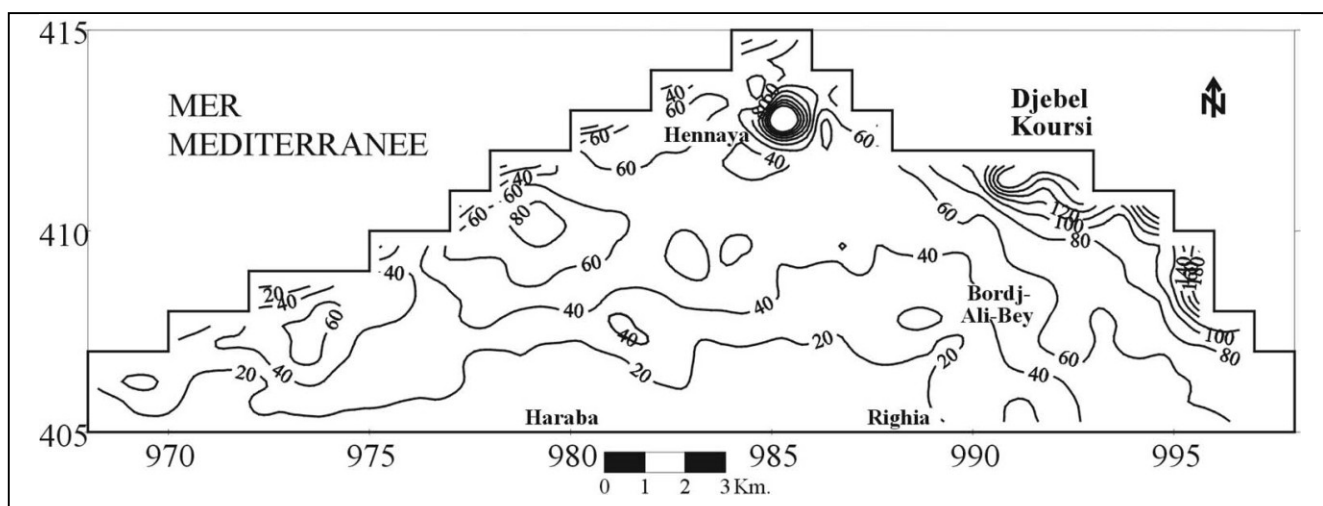


**Figure 1:** Carte de situation géographique et géologique.

1-Alluvions récentes et actuelles; 2- Dunes; 3- Marécages ou lacs 4- Grés ou argiles numidiennes.



**Figure 2:** Carte piézométrique des basses eaux 1994.



**Figure 3:** Carte topographique du massif dunaire de Bouteldja.

D'une manière générale, les données climatologiques observées de 1970 à 1993 (Tab. 1) [4] à la station de Bouteldja indique une infiltration efficace, estimée à partir de la formule de Turc, à 240mm avec des précipitations moyennes annuelles de 680mm.

Année	P	ETP	ETR	EXC.	ETP-ETR	ETR/P
1968/69	542.5	835.4	386.7	156.2	448.7	71.2
1969/70	628.7	833.8	437.3	191.4	396.5	69.5
1970/71	601.1	761.2	280.1	321	481.1	46.6
1971/72	539.4	837.5	402.5	137	435	74
1972/73	745.3	883.1	339.2	406	543.9	45.5
1973/74	533.8	876.4	392.2	141.6	484.2	73.4
1974/75	679.2	861.5	422.2	257	139.3	62.1
1975/76	623.3	845.4	380.2	243.1	465.2	60.9
1976/77	805.8	842.8	471.4	334.5	371.4	58.4
1977/78	545.1	856.5	331.8	213.3	524.7	60.8
1978/79	687.3	870	360.5	326.8	509.9	52.4
1979/80	590.7	823.5	386.4	203.6	437.1	65.4
1980/81	598.8	866.9	407.1	191.8	459.8	67.9
1981/82	728.9	790.2	366.7	362.1	423.5	50.30
1982/83	657.5	836.5	327.13	330.4	536.4	49.7
1883/84	895.5	805.9	415.6	479.9	390.3	46.4
1984/85	817.3	811.7	413.4	403.8	398.3	50.6
1985/86	645.9	825	341.2	304.7	483.8	52.8
1986/87	986.6	842.2	425.8	560.8	416.4	43.1
1987/88	475.3	861.7	315.4	159.9	546.3	66.3
1988/89	643.2	799.4	404.2	239.1	395.2	62.8
1989/90	592.8	866.8	412.4	180.4	454.4	69.5
1990/91	1019.0	870.9	339.1	679.8	531.8	33.2
1991/92	770.9	854.8	483.5	287.4	371.3	62.7
1992/93	790.8	869.0	376.8	413.9	492.2	47.6
Moyenne	685.7	842.2	385	301	457.5	56

Tableau 1: Bilans annuels à la station de Bouteldja (mm).

## DEPOUILLEMENT DES DONNEES BRUTES DU SYSTEME AQUIFERE

### 1- Les eaux de surface

#### a- Eaux de marais

Compte tenu de l'alimentation et du drainage de la nappe, nous avons jugé opportun de consulter des études réalisées particulièrement sur le marais de Mekrada, dont le chimisme favorise la modification des teneurs en éléments chimiques [9].

Les eaux du marais de Mekrada sont de type chloruré sodique, il apparaît cependant que le calcium et le magnésium sont en proportion identique, de même pour les sulfates et les bicarbonates. L'importance des teneurs en sels semble être liée à l'influence de la mer par l'intermédiaire du réseau hydrographique représenté par l'oued Mafragh et par la nature lithologique de la zone à texture argileuse salée. Les marais de Mekrada peuvent

Lieu	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	pH
Bouteldja	0,89	1,06	0,08	0,02	0,14	0,04	2,50	0,03	8
Lac des oiseaux	0,28	0,08	0,43	0	0,28	0	0,99	0,016	7,8

Tableau 2: Analyses chimiques des eaux de pluie dans la région de Bouteldja et lac des oiseaux (période des hautes eaux 1995).

constituer donc un front de pollution pour le système aquifère de Bouteldja suite éventuellement à une modification du sens de l'écoulement par les pompages excessifs.

#### b- Eaux de pluies

D'après les analyses chimiques des eaux de pluie effectuées dans la région de Bouteldja en période de hautes eaux de l'année 995 (Tab. 2), les eaux de précipitation ont été qualifiées du type bicarbonaté magnésio-calcique, pas assez différent de celui des eaux souterraines en période de hautes eaux. Légèrement influencées par les chlorures, on remarque que les éléments HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Ca<sup>++</sup> sont les plus dominants. Par conséquent, en période de hautes eaux, les eaux de pluies participent au chimisme de la nappe beaucoup plus que le sol par l'apport des ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Ca<sup>++</sup> à l'inverse des basses eaux où le contact eau-roche, après un temps de séjour plus long, est à l'origine de la variation chimique des eaux. Ce sont alors les sulfates et surtout les chlorures qui sont les plus marqués.

#### c- Eaux de l'oued Kébir

L'oued Kébir est considéré parmi les exutoires naturels de la nappe pouvant jouer un rôle de drainage ou d'alimentation. Il a fait l'objet d'une série d'analyse de 1975 à 1990, ayant pour objectif principal la détermination des caractéristiques chimiques des eaux qu'elles véhiculent et dont le chimisme apporte des modifications surtout au niveau des forages situés aux bords de l'oued. Une analyse en composantes principales effectuée sur les données relatives à l'oued Kébir a permis de mettre en évidence une relation très étroite entre les éléments chimiques et le régime du cours d'eau [9]. Durant la période des hautes eaux, c'est le processus de dilution qui fait baisser les concentrations. A l'étiage, par contre, c'est le processus de concentration des sulfates, magnésium et un degré moindre le calcium induit par la baisse du flux de l'oued.

### 2- Les eaux souterraines

#### a- Caractéristiques physiques

- La température de l'eau varie entre 18°C et 20°C avec une moyenne de près de 19°C (de 1975 à 1993) [9].

- Le pH oscille entre 6 à 7 caractérisant ainsi une eau acide à neutre.

- La conductivité est souvent comprise entre 0.1 et 0.3 mmhos/cm. Elle n'a pas beaucoup varié au fil des années, à l'exception de quelques points d'eau situés aux abords de l'oued Kébir où les valeurs sont de l'ordre de 0.4 à 0.7 mmhos/cm.

- Le résidu sec (RS) est défini comme étant la somme pondérale des ions. Dans le cas du système aquifère de la région de Bouteldja, la répartition de la minéralisation, en période de basses eaux de l'année 1993 non influencée par

les apports externes, se fait selon deux zones (Fig.4):

\* une zone où on constate une évolution décroissante du Nord vers le Sud Ouest et le centre où le résidu sec passe de 210 à 130 mg/l. Cette faible minéralisation, localisée dans la partie centrale, correspond à une zone de bonne perméabilité d'où un écoulement rapide de la nappe et un échange réduit entre l'eau et l'encaissant,

\*une deuxième zone à évolution croissante de la partie centrale vers l'extrême Sud du massif dunaire avec un résidu sec qui passe de 130 à 290 mg/l.

Cette observation peut s'expliquer par :

- l'effet de l'évaporation qui constitue un facteur important dans l'augmentation de la minéralisation des eaux surtout au niveau des zones d'affleurement de la nappe (Righia, Oum el Agareb). La nappe peut être mise sous pression à la faveur de lentilles argileuses ou par le passage latéral de faciès engendrant un phénomène d'artésianisme aux droits des forages B5, B11 et 565,

- l'alimentation de la nappe au niveau de ce secteur par les eaux de l'oued Kébir relativement chargée corrobore les résultats des analyses chimiques du forage 565 dont la teneur est de 426 mg/l,

- La nature argileuse de la nappe dans ce secteur alors qu'elle est plutôt sableuse au Nord ralentit l'écoulement de la nappe et entraîne une augmentation de minéralisation des eaux.

Les valeurs de la dureté de l'eau de la nappe dunaire et alluviale de Bouteldja sont comprises entre 3.05 et 11.12°F pour l'année 1992 et de 7.04 à 12.83°F pour l'année 1993. C'est donc une eau douce à très douce selon la classification de l'O.M.S. [8, 9].

### b- Caractéristiques chimiques

Près de 43 forages, bien répartis dans la zone d'étude (Fig.5), ont fait l'objet de prélèvement pour analyses chimiques. Le dosage des principaux ions ( $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^{+}+K^{+}$ ,  $SO_4^{-}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $HCO_3^{-}$  et  $NO_3^{-}$ ) a été réalisé de 1975 à 1993 avec un pas de temps semestriel. Le faciès dominant est bicarbonaté sodique et à un degré moindre bicarbonaté calcique. Ce faciès est observé sur la majorité des points de prélèvement, alors que dans certains forages il y a prédominance du faciès chloruré-sodique ( $B_1$  et  $A_5$ ). Les bicarbonates ont une très faible participation, contrairement donc aux ions  $Cl^{-}$  et  $Na^{+}$ .

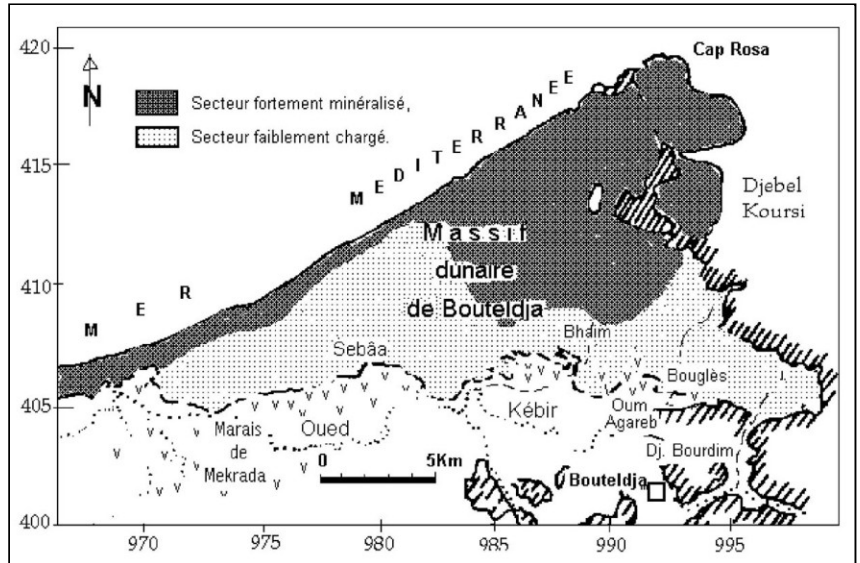


Figure 4: Répartition géographique de la minéralisation.

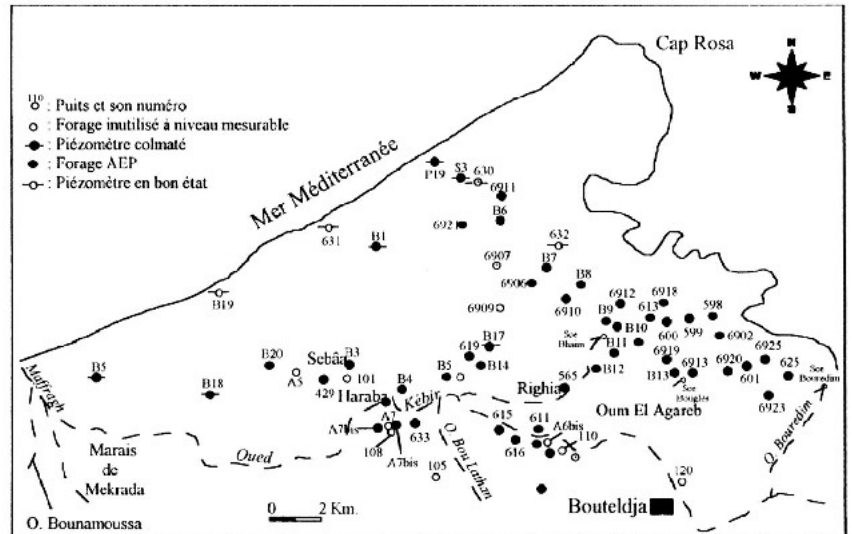


Figure 5: Carte de position des points d'eau du système aquifère Bouteldja.

### ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Les statistiques élémentaires permettent, élément par élément ou groupe d'éléments par groupe d'éléments, de déduire les phénomènes mis en jeu. Cependant, la prise en compte simultanée de l'ensemble des descripteurs acquis nous impose le recours à une analyse multidimensionnelle des données ; l'analyse en composantes principales. A cet effet, il a été nécessaire de regrouper dans un même tableau général, toutes les analyses où figurent les résultats des mesures des principaux paramètres physico-chimiques (10 variables : pH, conductivité,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $HCO_3^{-}$ ,  $SO_4^{-}$  et  $NO_3^{-}$ ) réalisées de 1980 à 1993 sur 36 points de surveillance de la qualité des eaux souterraines. La disparité des teneurs et des valeurs entrant dans un tableau de données d'analyses physico-chimiques est grande, et les gammes de variation des paramètres sont très variées.

Ainsi, au forage S<sub>3</sub>, la teneur en bicarbonates oscille-t-elle entre 220 et 868 mg/l pendant que la teneur en calcium varie de 2 à 94 mg/l. Pour atténuer cette disparité qui accorde, dans le calcul des variances un poids prépondérant aux descripteurs à forte valeur numérique, on emploie une A.C.P centrée réduite (normée) une A.C.P où la moyenne de chaque colonne est ramenée à zéro et où la variance est égale à 1. Tous les descripteurs ont alors un poids équivalent (sous réserve que les valeurs soient réparties de manière continue entre le maximum et le minimum). Une A.C.P a été pratiqué sur le tableau général des analyses réalisées sur l'ensemble des points de mesure du réseau. Le tableau 3 rend compte des valeurs propres et de l'inertie expliquée pour les trois composantes principales.

Axe Factoriel	Valeur propre correspondante	Inertie Expliquée (%)	Pourcentage Cumulé (%)
1	2.8115	31.2	31.2
2	1.5979	17.8	49.0
3	1.2905	14.3	63.3

**Tableau 3:** A.C.P.: Inertie des trois premières composantes principales.

Les deux premiers facteurs fournissent une inertie expliquée de 49% (soit 31.2 et 17.8) qui semble assez bonne, compte tenu de l'inertie moyenne. Toutefois le pourcentage cumulé tend lentement vers 100%, ce qui traduit la complexité des influences qui s'exercent sur le chimisme des eaux. Le traitement a été poussé jusqu'à 3 facteurs dont 63.3% de la variance ont été exprimés.

La contribution des 9 variables aux trois premiers vecteurs propres ont été consignées dans le tableau 4.

Paramètres	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Ca	0.8300	-0.0475	0.2084
Mg	0.0793	-0.6771	-0.5142
Na (+K)	0.7061	0.3716	-0.1573
Cl	0.5714	0.1980	-0.5016
SO <sub>4</sub>	0.0792	0.1733	-0.6627
HCO <sub>3</sub>	0.6941	-0.4424	0.4842
NO <sub>3</sub>	0.1875	0.3695	0.0294
CE	0.7015	-0.5149	-0.1250
pH	0.5254	0.5766	0.1250

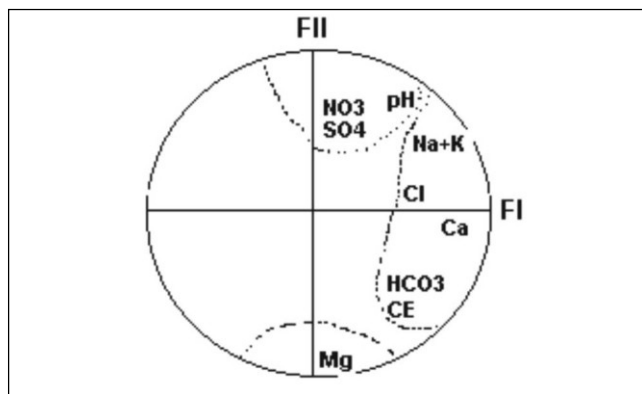
**Tableau 4:** A.C.P.: Corrélation entre les trois premières composantes principales.

## 1- Etude de la contribution des observations aux trois facteurs

a- Etude de la contribution des observations au premier facteur

La répartition des variables dans le plan I-II permet d'attribuer une signification au premier facteur caractérisé

par une variance de 31,2% par l'effet de la minéralisation traduite par le Ca, et dont la projection des variables montre que celui-ci est bien corrélé avec Cl, Na (+K), HCO<sub>3</sub> et la conductivité CE (Fig.6). Ceci nous a permis de considérer le facteur F1 comme facteur de minéralisation opposant ainsi les eaux à minéralisation relativement forte en calcium, bicarbonates, sodium associé au potassium et aux chlorures aux eaux faiblement chargées.



**Figure 6:** Cercle des variables, plan I-II.

On remarque que HCO<sub>3</sub> et Ca, caractéristiques du faciès bicarbonaté calcique, contribuent significativement au pôle de la minéralisation. Les mêmes constatations peuvent être faites pour le faciès bicarbonaté sodique représenté par le HCO<sub>3</sub> et Na.

Il faut en conclure que l'axe I est apte à discriminer les points de surveillance où les influences des différents apports en sels et par le lessivage des roches fait augmenter surtout les teneurs en bicarbonates. Il convient de noter que l'augmentation de la minéralisation est due vraisemblablement à la mise sous pression de la nappe, ce qui favorise l'échange de base et l'évaporation au niveau des nombreux marécages qui bordent l'aquifère dunaire (Fig. 4). Les chlorures peuvent avoir une origine liée à plusieurs facteurs dont les plus importants sont les formations lithologiques lessivées par les apports pluviométriques et l'évaporation, comme ils peuvent être aussi d'origine marine, compte tenu de la proximité de la mer. On a pris deux rapports caractéristiques pour préciser l'origine des chlorures dans l'eau. Il s'agit du rapport (rMg/rCa) caractéristique des eaux de mer, et du rapport (rCl/rHCO<sub>3</sub>) qui permet aussi l'identification d'une contamination marine. Ces valeurs sont consignées dans le tableau 5.

Forage	r Mg/ r Ca	rCl/ r HCO <sub>3</sub>
B <sub>1</sub>	0.717	2.018
565	0.702	0.618
B <sub>14</sub>	0.287	0.903
B <sub>18</sub>	1.899	0.800

**Tableau 5:** Valeurs des rapports caractéristiques rCl/Rhc et rMg/rCa.

D'une manière générale, la faiblesse des valeurs du rapport  $rMg/rCa$ , caractérise son indépendance avec le milieu marin. Cependant, le rapport  $rCl/rHCO_3$  traduit, par sa faiblesse une prédominance des carbonates sur l'ensemble, liée au phénomène de dilution à partir du lessivage des formations traversées par l'oued Kebir, dont les teneurs en bicarbonates sont les plus marquées, sauf pour le forage B<sub>1</sub> où ce rapport est particulièrement élevé, ce qui traduit peut être une influence des eaux de mer compte tenu de la faible distance de cette dernière.

**b- Etude de la contribution des observations au second facteur**

Le facteur II se caractérise par 17.8% de la variance totale. La projection des variables dans le plan factoriel I-II montre une opposition entre deux groupes plus ou moins distincts.

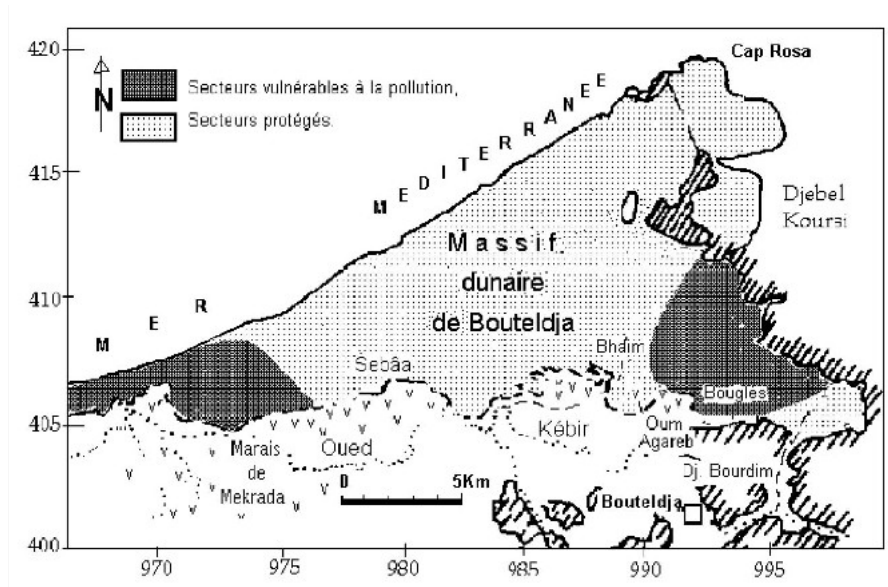
Il s'agit de l'ensemble formé par les ions  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , et pH et du groupe Mg et, à un degré moindre la conductivité et les bicarbonates. Le premier groupe évolue plus particulièrement dans les zones où il y a absence d'un recouvrement argileux, dans ce secteur la nappe affleure formant des petits marais, ce qui la rend très vulnérable à la pollution de surface (Fig.7).

Le développement croissant des cultures à caractère spéculatif comme l'arachide, défrichement du massif dunaire en vue de sa mise en valeur, la création de petites unités industrielles (élevage de volailles et de bovins) risque d'altérer la qualité chimique des eaux.

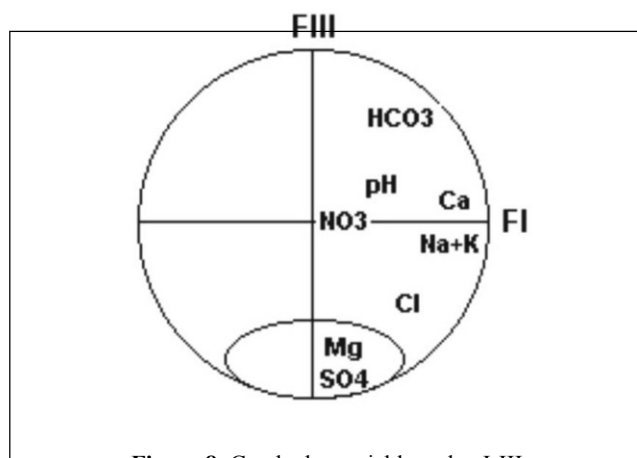
Nous pouvons donc considérer que l'axe II caractérise la vulnérabilité de la nappe à la pollution de surface. La concentration en nitrates des eaux de la nappe dunaire de Bouteldja demeure en réalité très faible par rapport aux normes fixées par l'O.M.S [8,9]. Cela montre par conséquent, qu'il ne s'agit pas là du moins pour l'instant d'une pollution réelle dont le critère principal est la transformation des nitrates en nitrites, mais il s'agit plutôt d'une vulnérabilité de la nappe à la pollution de surface avec le risque d'une dégradation de la qualité des eaux de la nappe en l'absence d'un terrain argileux protecteur. Les nitrates ont donc une origine totalement différente que l'on peut lier à une pollution dans les secteurs où l'irrigation s'accroît principalement dans les zones de Sebâa et Righia représentées par les forages B<sub>14</sub> et B<sub>3</sub>; les périodes de hautes eaux sont celles qui contrôlent les variations des teneurs en nitrates, qui sont d'origine plutôt superficielle.

**c- Etude de la contribution des observations au troisième facteur**

Le facteur III représente 14.3% de la variance totale (Fig.8). Sur cet axe, l'ion  $NO_3^-$  est négligeable à cause de sa position sur l'axe III, tandis que les ions  $SO_4^{2-}$  et  $Mg^{++}$  contribuent aussi significativement à ce facteur, dans sa



**Figure 7:** Répartition géographique du facteur de la vulnérabilité.



**Figure 8:** Cercle des variables, plan I-III.

partie négative. Donc, on peut considérer que l'axe III caractérise le pouvoir réducteur du milieu et où aucun élément n'est opposé à ces deux ions dans la partie positive.

La projection des variables dans le plan factoriel I-III montre que les meilleures corrélations à la troisième composante principale (F III), sont les sulfates et le magnésium au pôle négatif.

L'identité des répartitions des teneurs élevées en sulfates coïncident probablement avec l'apparition dans certains forages de "niveaux pyriteux" [10] dont l'oxydation libère les sulfates. Au niveau de la zone de contact massif dunaire-plaine de l'oued Kébir, plus particulièrement les zones à intercalations argileuses où l'aération est mauvaise, dans les zones marécageuses qui rassemblent presque toutes les conditions favorables pour le développement des bactéries anaérobies sulfato-réductrices suite à une dégradation de la matière organique (Fig.9). Généralement, les sables permettent à l'eau d'être constamment aérée et maintiennent la nappe dans un état d'oxydation. Or, les lentilles d'argiles de faible perméabilité, intercalées dans la formation sableuse, par endroits sont responsables de la

non-aération du milieu, elles contribuent au confinement de la nappe et par conséquent offrent les conditions réductrices des eaux par les sulfates qui sont corrélés avec le magnésium caractérisé par des teneurs élevées dans ces zones.

### CONCLUSION

En s'appuyant sur la méthode de l'analyse en composantes principales (A.C.P), trois facteurs pouvant influencer le chimisme des eaux de la nappe dunaire de Bouteldja, ont pu être identifier à partir de l'ensemble des analyses physico-chimiques dont 63.3% de l'information ont été expliqués :

- Le facteur de minéralisation (31.2% de l'inertie totale), se manifeste par une forte minéralisation opposant les eaux faiblement chargées. C'est le caractère initialement bicarbonaté calcique et sodique qui demeure le plus représentatif de cette minéralisation.

- Le facteur de vulnérabilité (17.8% de l'inertie totale). En raison de la contribution des variables  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  avec le pH au deuxième axe factoriel, dans sa partie négative, le second facteur a été interprété comme indicateur de vulnérabilité.

Il se caractérise par une progression dans les teneurs en nitrates, même si elles sont inférieures aux normes des nitrates, peuvent, contribuer de manière très sensible à la minéralisation et être dans l'avenir, par la multiplication des épandages, typiques d'une dégradation de la qualité chimique des eaux de la nappe dunaire en l'absence d'un couvert argileux protecteur.

En plus de l'épandage des engrais pour l'irrigation s'ajoute celui des rejets et des fermes agricoles principalement dans la localité de Sebâa, Mouaïssia et Righia.

- Le facteur pouvoir réducteur du milieu (14.3% de l'inertie totale). Il a été mis en évidence par la présence des sulfates, on constate que ce sont surtout les forages B14, Y,B1(A) et 6911(E) qui attestent d'un tel type de milieu. Ce sont les niveaux argileux, pyriteux et même tourbeux qui sont à l'origine du phénomène par confinement de l'aquifère dans certains secteurs.

### REFERENCES

[1]- Ciglia J., "Valorisation des données hydrogéologiques et hydrochi Conception et gestion informatisée des réseaux de surveillance des eaux souterraines. Application à l'aquifère crayeux de la région des Ardennes", Th. de Doct. de l'Univ. de Franche-Comté (1988), 187 p.  
 [2]- Gaud B., "Etude hydrogéologique du système de Annaba-Bouteldja. Synthèse des connaissances et recherche des

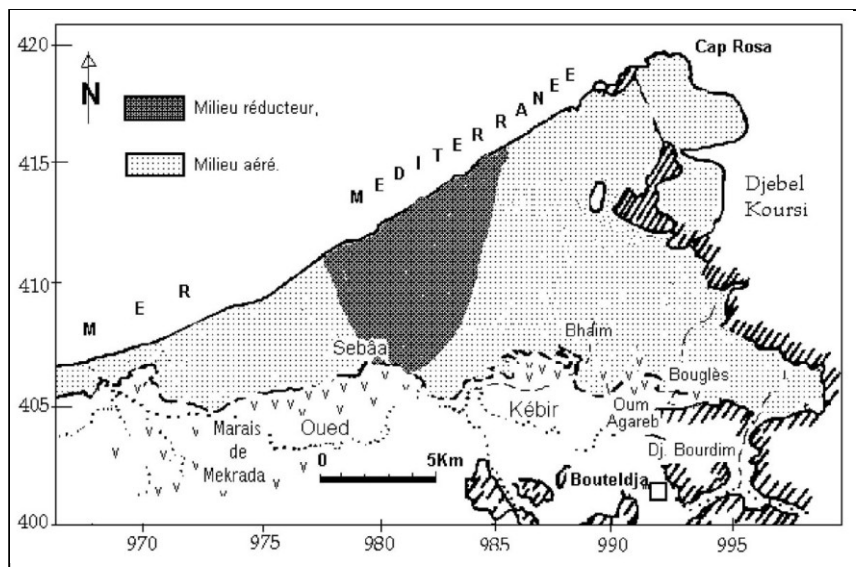


Figure 9: Répartition géographique du pouvoir réducteur.

[3]- Hani A., Djabri L., Mania J., et Mudry J., "Impacts de la surexploitation de l'eau souterraine sur l'aquifère dunaire de Bouteldja, Algérie", *Revue VECTEUR environnement*, vol. 35, n° 6, nov. (2002), pp.66-71.  
 [4]- Hani A., "Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques :application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranée", Th. de Doct. d'Etat de l'Univ. de Annaba, (2003), 214p.  
 [5]- Joleaud L., "Etude géologique de la région de Bône et de la Calle ", *Bull. Serv. Carte Géol. de l'Algérie*, 2<sup>e</sup> série, 12, (1936), 20p.  
 [6]- Kherici N., "Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (Nord Est algérien)", Thèse de Docteur 3<sup>ème</sup> cycle USTL, Montpellier (1985), 202p.  
 [7]- Kherici N., "Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba-la-Mafragh) Nord-Est algérien", Thèse de Doctorat es Sciences de l'Université de Annaba (1993), 170p.  
 [8]- O.M.S., "Directives de qualité pour l'eau de boisson", 2<sup>ème</sup> édition, v Recommandations, Genève, Suisse (1994).  
 [9]- Ramdani A., "Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja", Mémoire de Magister, Université de Annaba (1996), 138p.  
 [10]- Strojexport, "Prospection géophysique de la plaine de Annaba", Réinterprétation, Rapport A.N.R.H., (inédit) Annaba, Algérie, (1975), 30p.  
 [11]- Toubal A.C., "Etude hydrogéologique du massif dunaire de Bouteldja", Thèse de troisième Cycle, Université Bab-Ezzouar, Alger (1983), 500p.  
 [12]- Toubal A.C., "Approche géophysique des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger", Thèse de doctorat d'état, U.S.T.H.B, Alger (1998), 226p.  
 [13]- Schoeller H., "Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources", Masson et Cie, Paris (1962), 642 p. □