



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie

Rouaida Trabelsi, Moncef Zaïri *, Habib Smida, Hamed Ben Dhia

Laboratoire « Eau, Énergie et Environnement », École nationale d'ingénieurs de Sfax, BP W, 3038 Sfax, Tunisie

Reçu le 21 juin 2004 ; accepté après révision le 8 novembre 2004

Disponible sur Internet le 25 février 2005

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Les eaux souterraines connaissent une dégradation de leur qualité en relation avec l'augmentation de la demande résultant de l'accroissement démographique rapide, l'urbanisation accélérée, la diversification des activités économiques et agricoles et l'amélioration du niveau de vie des citoyens. Cette dégradation est généralement exprimée par la salinisation et la contamination de ces eaux. La détermination de l'origine de la salinité des eaux de la nappe phréatique nord du Sahel de Sfax a été approchée à partir de l'étude de l'évolution dans l'espace des éléments chimiques majeurs. L'interprétation des données d'analyse et la répartition des eaux souterraines en groupes homogènes sont réalisées en utilisant les diagrammes de Stiff, de Durov étendu, et d'éléments pris deux à deux. L'étude a révélé une variété d'origines et de processus de la salinisation des eaux souterraines. Ainsi, dans la partie amont, ce phénomène serait dû essentiellement à la dissolution/précipitation des minéraux de la formation réservoir (groupe I). L'effet du mouvement de retour des eaux d'irrigation et de pompage intensif est considéré comme étant la principale origine de la minéralisation des eaux des groupes II et III, caractérisées par des réactions d'échange ionique direct et de mélange. L'anomalie de forte salinité observée au niveau de la zone Hazeg est expliquée par une contamination de la nappe par les eaux de mer. Cette hypothèse d'intrusion marine est justifiée par les fortes teneurs en chlorures dues à la présence de réactions d'échange cationique inverse (groupe IV) et par une piézométrie inférieure au niveau de la mer. **Pour citer cet article : R. Trabelsi et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Salinization of coastal aquifers: case of the North Sfax Sahel aquifer, Tunisia. The intensive agricultural and economic activities induce the increase of the risk of groundwater quality degradation through high groundwater pumping rates. The salinization and contamination are the main sources of this pollution, especially in coastal aquifers. The explanation of the origin of salinity for the shallow aquifer of Northern Sahel of Sfax was analysed by a chemical study of the groundwater main compounds. The partitioning of groundwaters into homogenous groups is undertaken by graphical techniques, including a Stiff pattern diagram, an expanded Durov diagram and several binary diagrams. The study indicates the presence of various

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : moncef.zaïri@enis.rnu.tn (M. Zaïri).

salinization processes. In the recharge area, salinization is the result of dissolution/precipitation of the aquifer formation material (group I). The irrigation water return and the intensive pumping have been identified as major sources of salinization in the south by direct cation exchange and mixing reactions (groups II and III). The anomaly of high groundwater salinity observed near the Hazez zone was explained by the presence of a seawater intrusion in this area. This hypothesis is related to the high chloride concentration, to the presence of inverse cation exchange reactions (group IV), and to the piezometric level inferior to sea level.

To cite this article: R. Trabelsi et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Nappe côtière ; Hydrochimie ; Salinisation ; Intrusion marine ; Tunisie

Keywords : Coastal aquifer; Hydrochemistry; Salinization; Seawater intrusion; Tunisia

Abridged English version

The uncontrolled groundwater extraction causes modification of the natural flow system and induces lateral flow of seawater from the coast and causes the groundwater quality degradation [20].

This study concerns the coastal phreatic aquifer of the northern Sahel of Sfax at the Centre-East of Tunisia (Fig. 1). This region has an arid climate, with extreme temperatures and rainfall variations with an average annual temperature and rainfall of 20 °C and 230 mm, respectively. The groundwater quality variations result mainly from intensive exploitation, agricultural activities and the presence of highly soluble minerals in the aquifer material.

The main object of this study was to outline the principal geochemical characteristics of the aquifer and to determine the origins and the mechanisms governing its salinization.

The northern Sahel of Sfax aquifer is located in the Mio-Pliocene layer system formed by sand and silty clay [10,14]. The aquifer is recharged by direct infiltration and its higher limit is at Medasse Sidi Salah. The discharge limits coincide with the Mediterranean shore line and the Sebkhass of El Ghorra and El Jem. The groundwater flow is mainly toward the south-east and may be locally disturbed by piezometric depressions due to the intensive exploitation (Fig. 2).

The actual pumping well density is about 100 to 110 wells per square kilometre, whereas it was of 30 to 45 wells per square kilometre in the 1970s.

The diagram in Fig. 3 gives the variations of annual rainfall, annual well withdrawal and groundwater chloride concentration at the zone of Hazez. It indicates a parallel increase of the last two parameters versus time, while the first parameter decreases. This fact may be explained by seawater intrusion related to intensive exploitation [15].

Representative groundwater samples were obtained from 68 pumping wells during year 2002. The electrical conductivity, temperature and pH were measured in situ and the chemical analyses concerned Na, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄, K, Mn, and NO₃. The measured physical and chemical parameters showed large spatial variations. The electrical conductivity varied between 1748 and 18 190 μS cm⁻¹ and the salinity between 0.7 and 13.6 g l⁻¹ (Fig. 4).

The Stiff pattern diagrams with the groundwater samples location are indicated in Fig. 5. The various diagram shapes indicate heterogeneous water chemistry [22]. Based on this representation, four groundwater quality groups are identified: group I, accounting for 41% of the samples, group II for 30%, group III for 21% and group IV for 7%. Group I is found mainly in the northern part of the zone, group II in the southern part and group IV in the coastal area. The expanded Durov diagram (Fig. 6) was used to identify processes and reaction paths such as mixing, ion exchange and dissolution affecting groundwater composition [12,16]. Box 1 in Fig. 6 is usually the place for low salinity recently infiltrated water in sand aquifers, boxes 2 and 3 represent ion-exchange waters where high values of Mg, HCO₃ and Na are exchanged for low values of Ca [5]. The major part of the samples from group I is affected by aquifer material dissolution. Box 5, where a part of groups I, II and III is present, is close to conservative mixing waters. Most samples in group II and III are in box 6, indicating that both mixing and ion exchange are responsible for their quality. A maximum increase in the salinity should produce water in box 9, however, the samples of group IV and five samples from groups II and III are in boxes 8 and 7, because mixing and reverse ion exchange affect their composition.

The Na–Cl diagram (Fig. 7a) indicates, for a part of group-II samples, enrichment in Na relative to Cl concentrations. The high Na concentration is related to direct ion-exchange reactions between groundwater and the clay particles of the aquifer material. Groups I and IV show Na deficiency with respect to the conservative mixing line due to reverse ions exchange and dissolution reactions [7].

The concentrations of Ca in the Ca–Cl diagram (Fig. 7b) are significant for all groups, with different amplitudes [7]. A strong correlation between NO_3 and Cl (Fig. 7d) is observed: it is derived from the evaporation processes and fertilizers dissolution, the salinity being affected by irrigation return flow [5,20].

The Mg/Ca ratio increases with the proportion of seawater introduced in the mixture [26]. The waters of group IV have the highest ratio proving a seawater origin (Fig. 7e). The points of groups II and III are situated on the conservative mixing lines corresponding to the irrigation-return flow water. Group I waters present the weakest values of the ratio following dissolution of gypsum and calcite present in the reservoir.

The SO_4/Cl ratio decreases as the seawater proportion in the mixture increases [19,25]. In Fig. 7f, the points of group IV present the weakest ratio, verifying a marine origin of the mixed waters. However, group I has a large chloride concentration and a high SO_4/Cl ratio, indicating a possible gypsum dissolution.

Confrontation of hydrogeological and geochemical data is used for the description of the origin of salinity in coastal aquifers. The composition of the aquifer material and the intensive agriculture practices lead to various processes of salinization. Dissolution/precipitation of minerals, ion exchange and mixing reactions are the main phenomena responsible for groundwater quality decrease. These are enhanced by geochemical interaction of the sediment with water, by seawater intrusion and by seepage of irrigation water excess.

1. Introduction

Le développement économique de la région d'étude (Nord du Sahel de Sfax), et particulièrement la croissance des activités agricoles et la forte expansion démographique, ont fait que les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées par les utilisateurs, avec une surexploitation de la nappe, malgré le périmètre

d'interdiction instauré en 1980 dans la région par le ministère de l'Agriculture.

L'alimentation directe par les eaux de pluie n'arrive plus à rétablir l'équilibre de la nappe, par suite des conditions climatiques difficiles et des sécheresses à répétition.

Freeze et Cherry [9] définissent l'intrusion comme la migration des eaux salées dans les eaux douces de l'aquifère, sous l'influence de l'évolution des ressources en eaux de la nappe. Le mouvement se fait naturellement, soit à l'intérieur des terres – on parle ainsi de mouvement descendant des sources de surface et des eaux d'irrigation vers l'aquifère et de mouvement ascendant des formations inférieures vers l'aquifère [13] –, soit dans les zones côtières, où les eaux de l'aquifère sont connectées hydrauliquement avec l'eau de mer [7,11,17]. Dans ce dernier cas, les deux systèmes ne se mélangent pas, puisque les eaux salées se déplacent au-dessous des eaux douces, par suite de la différence de densité entre les deux types d'eau [6,18,23].

Plusieurs auteurs [2,3,21] ont essayé, par des méthodes analytiques et numériques de modélisation, de décrire le phénomène, de prévoir la position de l'interface entre eau douce et eau marine, et de prévoir les changements des niveaux piézométriques et de la salinité. La caractérisation du phénomène d'intrusion nécessite une approche multidisciplinaire. La démarche consiste à établir la structure géologique et à déterminer les propriétés hydrologiques et géochimiques, à travers un nombre suffisant de mesures et d'analyses pour caractériser les sources et les origines de la salinisation, la localisation de l'interface et les fonctions qui engendrent son évolution spatio-temporelle [1]. Plusieurs auteurs [4,15,16,24] ont essayé de définir les processus et les réactions chimiques qui caractérisent la minéralisation et seraient ainsi responsables de l'enrichissement ou de l'appauvrissement des eaux souterraines en éléments chimiques. Ainsi, dans l'étude publiée en 2001 [8] sur le bassin versant de Djebebiana, qui représente une partie de la nappe du Sahel de Sfax, la minéralisation des eaux est expliquée par des processus de mélange entre les eaux météoriques, les eaux de mer et les eaux de la nappe profonde. Ce dernier processus nous paraît très difficile à admettre dans le contexte hydrogéologique local. En effet, la présence d'une couche argileuse épaisse de 150 m, qui constitue le toit de la nappe profonde artésienne, et

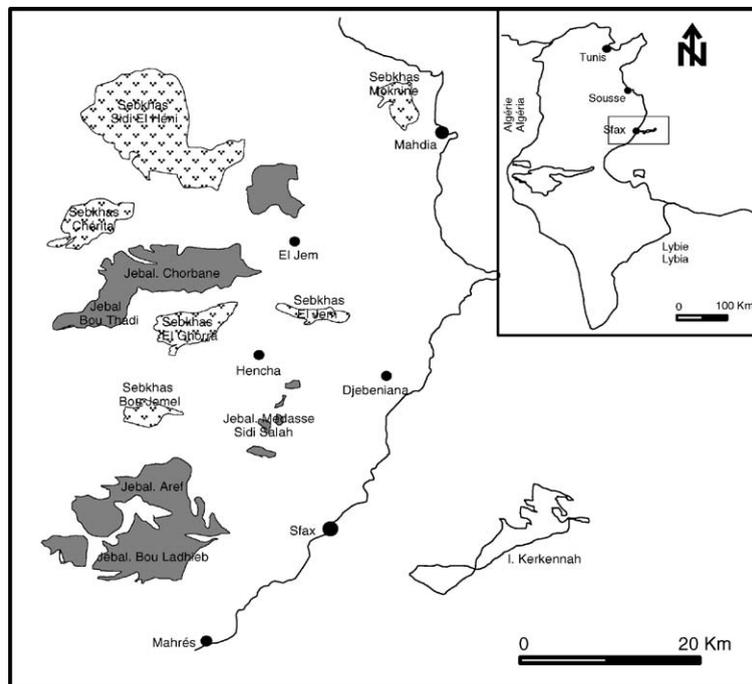


Fig. 1. Carte de localisation de la zone d'étude.

Fig. 1. Location map of the study area.

les différences des niveaux piézométriques des deux nappes réduisent considérablement leurs possibilités de communication. La nappe phréatique côtière étudiée dans ce travail se situe dans le Nord du Sahel de Sfax, dans le Sud-Est tunisien (Fig. 1). Les problèmes de cet aquifère résultent du non-équilibre entre la recharge et l'intense exploitation, l'importance des activités agricoles et la présence de minéraux de haute solubilité dans son réservoir.

L'objectif spécifique de la présente étude englobe la caractérisation géochimique de cette nappe côtière, l'identification des processus et des réactions chimiques qui gouvernent sa salinisation et la détermination précise de la limite de l'intrusion marine.

2. Cadre hydrogéologique

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, de type aride à semi-aride. Les températures présentent une moyenne interannuelle de l'ordre de 20 °C. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 230 mm.

La nappe occupe presque la totalité de la partie septentrionale du Sahel de Sfax (Fig. 2) ; elle est limitée,

au nord par la plaine de Mahdia, au nord-ouest par les dômes de Bouthadi-Chorbane et d'El Jem, et à l'est par la mer Méditerranée.

La nappe est logée dans les assises sablo-argileuses du Quaternaire ancien et du Mio-Pliocène.

Le substratum est constitué d'un imperméable, de nature argileuse à argilo-marneuse, du Mio-Pliocène moyen à inférieur.

La base du réservoir est constituée par une unité argilo-sableuse, d'origine continentale, caractérisée par des alternances de sable grossier et de conglomérats et renfermant des passages de marnes sableuses rouges et des argiles.

En général, ces formations aquifères ont un caractère alluvionnaire et possèdent une géométrie lenticulaire, une étendue horizontale limitée et une continuité verticale irrégulière [10,14].

L'écoulement des eaux de la nappe est multidirectionnel, convergeant vers l'exutoire principal – la mer Méditerranée – et des exutoires secondaires formés par les Sebkhass d'El Jem et d'El Ghorra. Les collines de Medasse Sidi Salah et les zones de Blettech et Ouled Youssef s'identifient à des zones de recharge (Fig. 2).

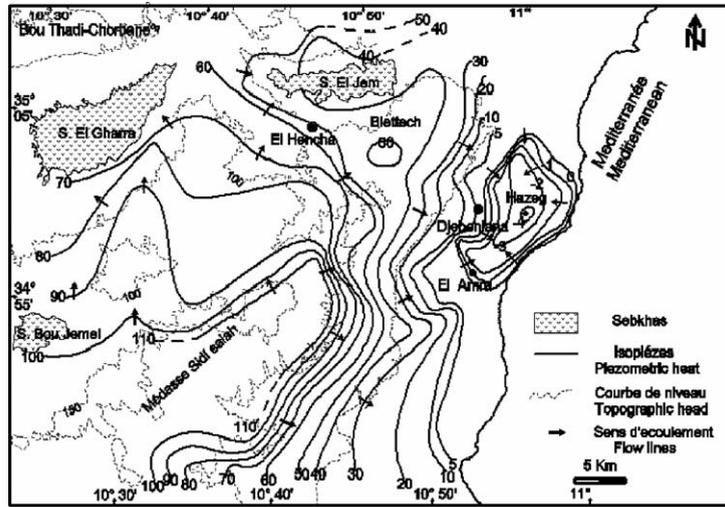


Fig. 2. Carte piézométrique de 2002.

Fig. 2. Piezometric map for 2002.

Le gradient hydraulique est très variable, en fonction des changements latéraux du faciès de la formation aquifère et des appels d'eau liés à la surexploitation.

La forte exploitation de la nappe a entraînée un abaissement considérable du niveau piézométrique, particulièrement dans la région littorale. Au niveau de la zone de Hazeg et de ses alentours, le niveau piézométrique atteint $-4,5$ m par rapport au niveau de la mer.

En raison de l'abaissement piézométrique très important et de l'augmentation notable de la salinité dans cette partie, nous avons eu recours à l'analyse des données disponibles pour comprendre les causes principales de cette dégradation.

Au cours d'une période de 32 ans, le nombre de puits exploitant la nappe a augmenté considérablement. La concentration est actuellement de 100 à 110 puits par kilomètre carré, alors qu'elle était de 30 à 45 puits par kilomètre carré au cours de l'inventaire de 1970.

Le diagramme de la Fig. 3 illustre la variation de la précipitation annuelle, de l'exploitation annuelle et des concentrations moyennes en chlorures des eaux de la nappe dans la zone de Hazeg. On note une évolution croissante des teneurs en chlorures, en parallèle avec l'augmentation de l'exploitation et la diminution des précipitations.

Dans les zones côtières, l'extraction d'un volume d'eau de la nappe plus grand que la recharge accentue

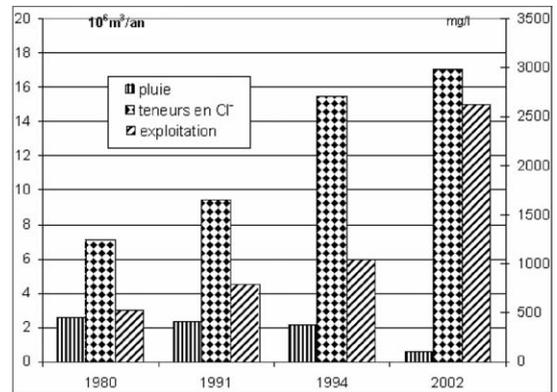


Fig. 3. Comparaison des teneurs en chlorures des eaux de la nappe par rapport à l'exploitation et aux précipitations.

Fig. 3. Comparison of chloride concentrations in relation to withdrawal and rainfall.

le mouvement des eaux de la mer vers la terre, conduisant ainsi à des processus de salinisation, connus sous le nom d'intrusion d'eau marine [15].

3. Étude de la qualité des eaux

Les échantillons d'eau ont été récoltés au niveau de 68 puits pompés, sélectionnés suivant une répartition spatiale homogène sur toute la zone d'étude, au cours de la période d'octobre 2001–mars 2002.

La température, le pH et la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain. Les analyses chimiques

du Na, Ca, Mg, HCO_3 , Cl, SO_4 , K et NO_3 , ainsi que la mesure du résidu sec par évaporation, ont été effectuées au laboratoire.

Le dosage du potassium et des sulfates a été effectué par gravimétrie, et celui des chlorures, des nitrates et du calcium, par titrimétrie. La spectrométrie d'absorption atomique est utilisée pour mesurer les concentrations du calcium, du magnésium, du sodium et du potassium.

4. Résultats et discussions

Les températures des eaux de la nappe nord du Sahel de Sfax sont comprises entre 13 et 24 °C, avec une moyenne de 19 °C. Les valeurs mesurées sont proches de la température atmosphérique moyenne annuelle. Elles présentent une différence assez faible dans un même niveau et entre les différents niveaux aquifères ; cela est dû au fait que les mesures ont été réparties dans un intervalle de temps assez large et que l'échantillonnage a été effectué à des profondeurs variables.

Le pH des eaux souterraines varie entre 6,5 et 8,2, avec une moyenne de 7,5.

Les résultats des analyses chimiques montrent une large variation de la composition chimique des eaux. Les valeurs de conductivité électrique varient entre un minimum de 1748 $\mu\text{S cm}^{-1}$ et un maximum de 18 190 $\mu\text{S cm}^{-1}$; les salinités varient entre 0,7 et 13,6 g l^{-1} , avec une moyenne de 5 g l^{-1} (Fig. 4).

La carte de salinité, exprimée en résidu sec (g l^{-1} , Fig. 4), montre une similitude assez étroite avec l'allure de la carte piézométrique de la nappe. Une évolution de la minéralisation des eaux de la nappe depuis l'amont vers l'aval est observée. Des salinités modérées (2 à 3 g l^{-1}) sont observées au niveau de Médasse Sidi Salah, Blettech et Ouled Messallem et de la partie sud de la zone d'étude. Les fortes valeurs de salinités qui peuvent atteindre 7 g l^{-1} sont observées au niveau de la partie centrale entre les localités d'El Hencha et de Sidi Salah. À l'est du village de Djebeniana, les valeurs du résidu sec oscillent entre 6 et 12 g l^{-1} . Cette salinité particulièrement élevée est associée à une dépression piézométrique centrée sur la région de Hazeg.

Le logiciel de traitement des données HydroGEN 32 nous a permis de déterminer les faciès chimiques à partir des résultats des analyses des éléments majeurs. Ce sont des eaux essentiellement sulfatées-calciques, pour les eaux les moins minéralisées, et chlorurées-sodiques, pour les eaux les plus minéralisées. Des faciès de type Ca–Na–Cl– SO_4 , Ca–Mg– SO_4 , Na–Ca–Cl et Na–Mg– SO_4 –Cl sont également observés. Cette hétérogénéité chimique de l'aquifère nous conduit à raisonner en considérant la répartition des analyses suivant des groupes homogènes, déduits à partir des représentations graphiques, en utilisant les diagrammes de Stiff [22], le diagramme de Durov étendu [5,12,16] et les diagrammes cartésiens.

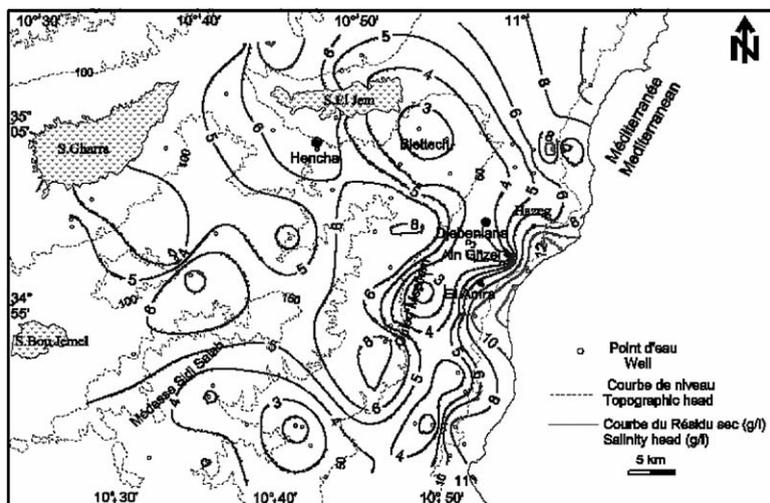


Fig. 4. Carte de salinité des eaux de la nappe.

Fig. 4. Groundwater salinity map.

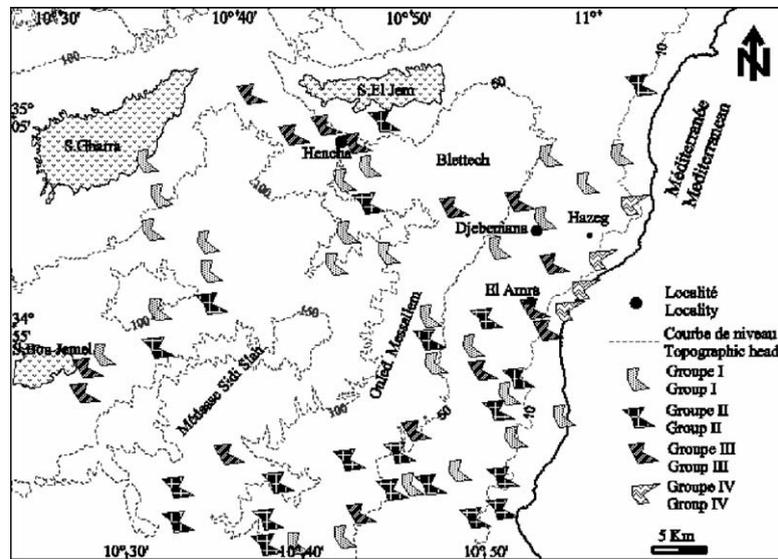


Fig. 5. Diagrammes de Stiff des eaux de la nappe côtière.

Fig. 5. Stiff diagrams of the coastal aquifer groundwater.

La représentation de Stiff consiste à construire, pour chaque échantillon, un diagramme sous forme de polygone qui prend une forme géométrique selon la teneur des éléments chimiques considérés. La distinction entre les échantillons se base sur la géométrie du polygone qui donne une idée sur les espèces dominantes et la parenté chimique [1]. Les trois axes du diagramme de Stiff choisis dans notre cas sont respectivement, de haut en bas, Na–Cl, Ca–HCO₃, Mg–SO₄. Ainsi, le logiciel HydroGEN 32 est utilisé pour élaborer les diagrammes de Stiff de tous les échantillons. Ces diagrammes (Fig. 5) ont permis de diviser les eaux de la nappe en quatre groupes chimiques homogènes : I, II, III et IV. La répartition de l'ensemble des échantillons entre ces groupes est de 41 %, 31 %, 22 % et 7 %, respectivement. Le premier groupe se localise essentiellement dans la partie amont au nord, le deuxième est fréquent surtout dans la partie sud, le troisième se présente partout dans la région d'étude, tandis que le quatrième se localise sur la côte, près de Hazeg. Cette répartition spatiale des différents groupes de diagramme de Stiff correspondrait à des processus chimiques spécifiques à chaque zone [5]. Cette dernière hypothèse est analysée en utilisant le diagramme de Durov étendu. Ce dernier a pour axes de coordonnées deux diagrammes de Piper des anions et des cations, respectivement. Ainsi pour chaque échantillon,

on représente sa composition en ions et en anions sur l'axe correspondant. L'intersection de la projection des deux coordonnées ainsi obtenues donne le point représentatif de l'échantillon sur le diagramme de Durov.

La position des échantillons dans les casiers de 1 à 9 du diagramme de Durov (Fig. 6) est utilisée pour l'identification des processus et des réactions chimiques qui règnent dans l'aquifère. Selon de nombreux auteurs [5,12,16], les échantillons du casier 1 sont des eaux de faible salinité et correspondent à des eaux d'infiltration récentes de type HCO₃–Ca. Les casiers 2 et 3 représentent normalement une progression des eaux vers la minéralisation par enrichissement en Na et HCO₃ aux dépens du Ca, en raison de réactions d'échange ionique et de la dissolution des carbonates. Dans le casier 4, on retrouve plus de la moitié des échantillons du groupe I, on assiste à une dissolution des minéraux riches en calcium (calcite et gypse). Dans le casier 5, on rencontre les eaux des groupes I, II et III. Leur composition résulte ainsi des réactions de mélange des eaux de différentes origines. Les groupes se présentent aussi dans le casier 6, qui correspond aux deux processus de mélange et d'échange ionique. Les échantillons avec des salinités importantes se présentent dans le casier 9 où on assiste à un mélange avec les eaux de mer. Cependant, les échantillons du

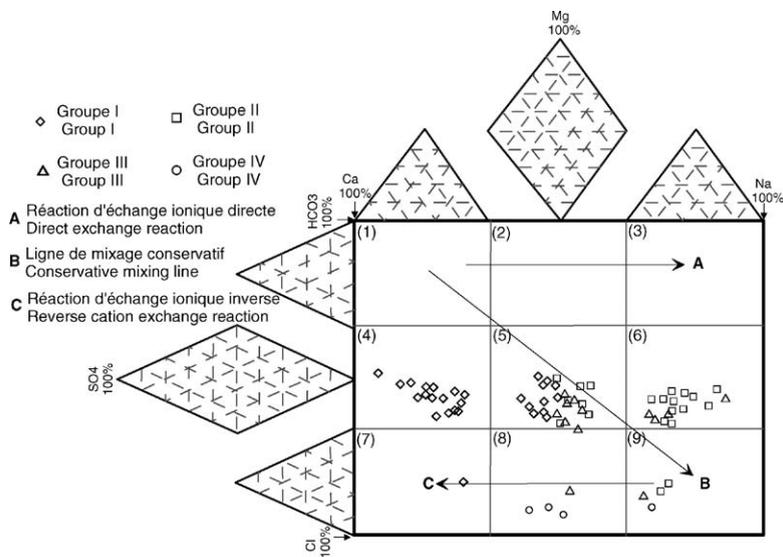


Fig. 6. Diagramme de Durov étendu.

Fig. 6. Expanded Durov diagram.

groupe IV se présentent dans les casiers 8 et 9, indiquant des réactions de mélange et d'échange ioniques inverses. Le calcium de la fraction argileuse de l'aquifère est échangé avec le sodium de l'eau provoquant ainsi une augmentation du Ca et une réduction du Na dans l'eau de la nappe.

Le deuxième moyen d'interprétation utilisé dans cette étude est constitué par les diagrammes croisés des concentrations des différents ions, analysés en fonction des chlorures, qui sont considérés comme des halogènes conservatifs et non influencés par les processus redox et les minéraux de faible solubilité [25].

Le diagramme Na–Cl (Fig. 7a) montre que les points représentatifs des groupes I, III et IV se localisent au-dessous de la droite de mélange des eaux de mer–eaux de pluie, indiquant un appauvrissement en cet ion [7]. Ces eaux sont contrôlées surtout par les réactions d'échange cationique, alors que les échantillons du groupe II se divisent au-dessous et au-dessus de la droite, indiquant la présence de réactions d'échange ionique direct. Le diagramme Ca–Cl (Fig. 7b) montre un enrichissement général en calcium par rapport à la droite de mélange eau de mer–eaux de pluie, à ceci que l'amplitude de cette augmentation est différente d'un groupe à l'autre. Les groupes I et IV présentent le maximum d'enrichissement et le groupe II, le minimum. Les échantillons des diffé-

rents groupes présentent un appauvrissement en ion potassium (Fig. 7c), puisque les points se localisent au-dessous de la droite de mélange eaux de mer–eaux de pluie [7].

Le diagramme NO₃–Cl (Fig. 7d) montre que l'augmentation des nitrates s'accompagne d'une augmentation des chlorures, particulièrement pour les échantillons des groupes II et III, indiquant un enrichissement par suite du mouvement de retour des eaux d'irrigation. Ces derniers mouvements couplés avec l'évapotranspiration facilitent les processus de dissolution des minéraux et mettent en solution des fertilisants et résidus de l'agriculture, conduisant ainsi à une diminution du Ca, HCO₃ et SO₄, comme résultat de la précipitation, et à une augmentation de Na, K, Cl et NO₃ [5,20].

Le rapport Mg/Ca augmente en fonction de la proportion d'eau de mer introduite dans le mélange [26]. L'enrichissement en magnésium et l'appauvrissement en calcium sont dus essentiellement aux réactions d'échange ionique, caractéristiques des mouvements de mélange eaux douces/eaux de mer. Dans la Fig. 7e, les points du groupe IV présentent les plus hautes valeurs de ce rapport, prouvant l'origine marine de la minéralisation de ces eaux. Les points des groupes II et III se localisent sur la droite de mélange eau de pluie–eau de mer, confirmant ainsi le phénomène de

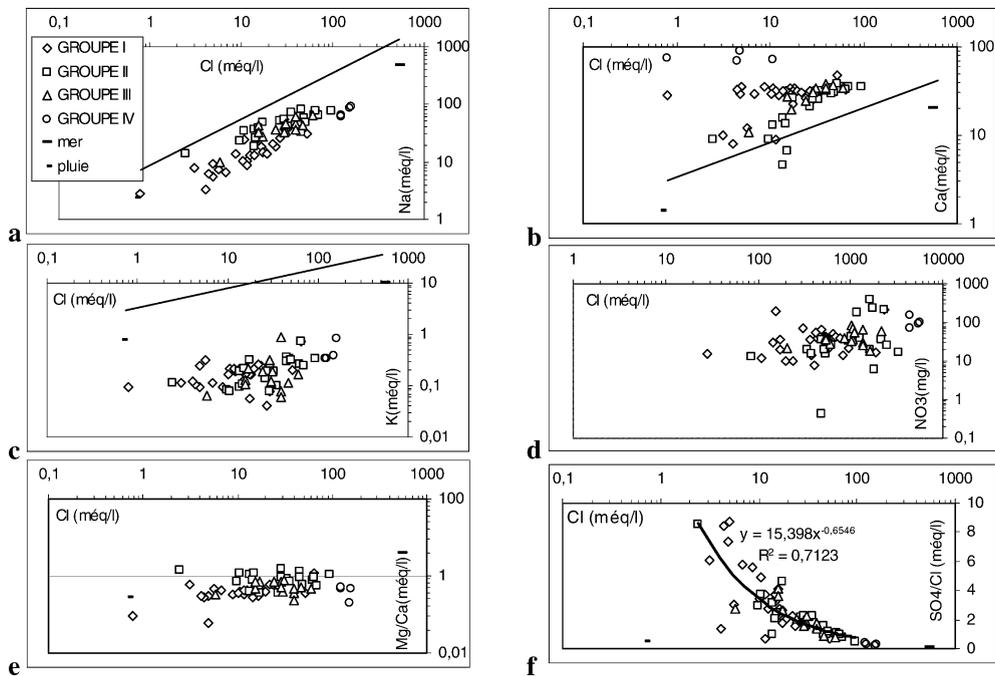


Fig. 7. Variation des concentrations des chlorures (meq l^{-1}) en fonction de Na (a), Ca (b), K (c), NO_3 (d), Mg/Ca (e) et SO_4/Cl (f).

Fig. 7. Chloride concentrations (meq l^{-1}) as function of Na (a), Ca (b), K (c), NO_3 (d), Mg/Ca (e), and SO_4/Cl (f).

retour des eaux d'irrigation. Le groupe I présente les plus faibles valeurs du rapport, en raison de sa richesse en ion calcium, qui a pour origine la dissolution du gypse et de la calcite présents dans le réservoir.

Le rapport SO_4/Cl diminue lorsque la proportion d'eau de mer dans le mélange augmente [19,25]. La Fig. 7f montre que les points du groupe IV présentent les plus faibles valeurs du rapport, vérifiant l'origine marine des eaux. À l'inverse, les points du groupe I présentent des valeurs importantes des teneurs en chlorures et du rapport SO_4/Cl , indiquant une autre origine de la minéralisation ; on pense que cette augmentation du rapport des points du groupe I est due à la dissolution du gypse dans le réservoir.

5. Conclusion

Les analyses des échantillons d'eau de la nappe montrent que le résidu sec est généralement élevé et oscille entre 0,7 et $13,6 \text{ g l}^{-1}$.

L'étude hydrochimique identifie trois processus responsables de la salinisation des eaux souterraines : l'intrusion d'eau marine dans la nappe, la dissolution de la formation aquifère et le retour des eaux d'irri-

gation. Les eaux de la nappe sont divisées en quatre groupes, en fonction des processus responsables de leur minéralisation.

Dans la partie amont de la nappe, les fluctuations de la salinité sont dues principalement au phénomène de dissolution/précipitation du gypse et du calcaire de la formation réservoir (groupe I). Celles des échantillons des groupes II et III sont liées à l'effet de l'évaporation capillaire et au mouvement de retour des eaux d'irrigation au cours des périodes sèches. Ces derniers groupes sont le siège de réactions d'échange ionique, particulièrement dans la partie sud de la zone d'étude, et de réactions de mélange par les eaux d'irrigation. Ainsi, ces zones sont des aires de recharge préférentielle, où l'écoulement vertical est facile et plus ou moins rapide, et l'épaisseur de la zone non saturée est faible.

L'anomalie de forte salinité observée sur la carte de salinité au niveau de la zone de Hazeg est expliquée par une contamination de la nappe par les eaux de mer. Cette hypothèse est justifiée par les fortes teneurs en chlorures et la présence des réactions d'échange cationique inverse, qui sont caractéristiques des mouve-

ments de mélange des eaux mer avec les eaux douces. Dans les différents diagrammes, on observe la tendance des échantillons du groupe IV à s'approcher d'une composition d'eau marine, ce qui donne un argument supplémentaire en faveur de la présence d'une zone d'intrusion marine au niveau de la région de Hazeg, dont la piézométrie est, de plus, inférieure au niveau de la mer.

Bien que la salinisation des eaux souterraines paraisse être un phénomène irréversible, il est toujours possible de limiter son aggravation et son extension géographique. Le contrôle des pompages intensifs dans la zone côtière, l'utilisation de techniques d'économie d'eau dans l'irrigation, l'optimisation de l'utilisation des engrais, insecticides et pesticides constituent les actions à prendre pour réduire les risques de dégradation de la qualité des eaux de la nappe.

Références

- [1] O. Banton, M.L. Bangoy, Hydrogéologie, multi-science environnementale des eaux souterraines, AUPELF, 1987.
- [2] J. Bear, Q. Zhou, J. Bensabat, Three-dimensional simulation of seawater intrusion in heterogeneous aquifers with application to the coastal aquifer of Israel, in : Proc. 1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Maroc, 2001.
- [3] M.L. Calvache, A. Pulido-Bosch, Modeling the effects of saltwater intrusion dynamics for coastal karstified block connected to a detrial aquifer, *Groundwater* 32 (5) (1991) 767–771.
- [4] M.L. Calvache, A. Pulido Bosch, Processus d'intrusion extrusion marine dans des aquifères côtiers du sud de l'Espagne, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 323 (1996) 673–679.
- [5] A. Cardona, J.J. Carrillo-Rivera, R. Huizar-Alvarez, E. Garniel-Castro, Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Beja California Sur, Mexico, *Environ. Geol.* 45 (2004) 350–366.
- [6] E. Custodio, R.M. Llamas, *Hydrologia Subterranea*, second ed., Omega, Barcelona, Spain, 1983.
- [7] A. El Achheb, J. Mania, J. Mudry, Processus de salinisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel–Doukkala (Maroc occidental), in : Proc. 1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Maroc, 2001.
- [8] L. Fedrigoni, M. Krimissa, K. Zouari, A. Maliki, G.M. Zuppi, Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie), *Earth Planet. Sci. Lett.* 332 (2001) 665–671.
- [9] R.A. Freeze, J.A. Cherry, *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.
- [10] A. Hajjem, Étude hydrogéologique de la plaine de Djebeniana, Rapport interne du Commissariat régional de développement agricole, Sfax, Tunisie, 1979.
- [11] Y. Hsissou, J. Mudry, J. Mania, L. Bouchaou, P. Chauve, Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines : exemple de la plaine du Souss (Maroc), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 328 (1999) 381–386.
- [12] W.J. Lloyd, J.A. Heathcote, *Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1985.
- [13] M. Maimone, R. Fitzgerald, *Effective Modeling of Coastal Aquifer Systems*. Camp Dresser and McKee, Woodbury, Cambridge, USA, in : 1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Maroc, 2001.
- [14] A. Maliki, Étude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe profonde de Sfax (Tunisie), thèse, faculté des sciences de Tunis, 2000, p. 300.
- [15] B. Panteleit, W. Kessels, W. Kantor, H.D. Schulz, Geochemical Characteristics of Salinization-zones in the Coastal Aquifer Test Field (CAT-Field) in North-Germany, in : Proc. 1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Maroc, 2001.
- [16] C.P. Petelas, I.B. Diamantis, Origin and distribution of saline groundwater in the Upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northern Greece, *Hydrogeol. J.* 7 (3) (1999) 305–316.
- [17] A. Pulido Bosch, J.-M. Andreu, A. Estévez, J. Ayanz, Zonation hydrogéochimique verticale dans l'aquifère karstique du Cid (Alicante, Espagne), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 326 (1998) 421–426.
- [18] A. Pulido Bosch, I.Y. Morell, J.-M. Andreu, Modifications hydrogéochimiques provoquées par la surexploitation d'un aquifère karstique, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 323 (1996) 313–318.
- [19] P. Pulido-Lebœuf, A. Pulido-Bosch, M.-L. Calvache, A. Vallegos, J.-M. Andreu, Strontium, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro Aquifer (SE Spain), *C. R. Geoscience* 335 (2003) 1039–1048.
- [20] B.C. Richter, C.W. Kreitler, *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Groundwater Salinization*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1993.
- [21] A. Rivera, E. Ledoux, S. Sauvagnac, A compatible single-phase/two-phase numerical model 2, Application to a coastal aquifer in Mexico, *Groundwater* 28 (2) (1990) 215–223.
- [22] H.A. Stiff, The interpretation of chemical water by means of patterns, *J. Pet. Technol.* 3 (1951) 15–17.
- [23] F.Y. Sanchez Martos, A. Pulido Bosch, Boron and the origin of salinization in an aquifer in southeast Spain, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 328 (1999) 751–757.
- [24] P.J. Styfzand, Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow, *Hydrogeol. J.* 7 (1) (1999) 15–27.
- [25] J.H. Tellam, J.W. Lloyd, Problems in the recognition of seawater intrusion by chemical means: an example of apparent equivalence, *Q. J. Eng. Geol.* 19 (1986) 389–398.
- [26] A. Vengosh, E. Rosenthal, Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country, *J. Hydrol.* 156 (1994) 389–430.