

Investigation de la salinisation de la plaine de Bou-Areg (Maroc nord-oriental)

**A. CHAOUNI ALIA, N. EL HALIMI, K. WALRAEVENS,
E. BEEUWSAERT & W. DE BREUCK**

Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie, Université de Gand, Krijgslaan 281-S8, B-9000 Gent, Belgique

Résumé La plaine de Bou-Areg est caractérisée par sa situation stratégique entre quatre grands domaines différents. L'aquifère de cette plaine est formé par des formations quaternaires très épaisses. La collecte des données existantes a permis entre autres d'établir des profils hydrogéologiques, des cartes piézométriques et une carte de qualité des eaux. La chimie des eaux de la nappe est influencée par plusieurs origines parmi lesquelles une eau fossile concentrée, la recharge au niveau des limites montagneuses, les eaux qui proviennent de la plaine du Gareb à travers le couloir de Selouane, l'intrusion des eaux de la lagune et l'infiltration des eaux d'irrigation. Une étude détaillée d'une zone côtière au centre de la plaine, comprenant un nivellement de tous les puits domestiques de la zone, des mesures piézométriques et des analyses chimiques des eaux, a permis de formuler une hypothèse sur l'évolution hydrogéologique de cette partie de la plaine.

INTRODUCTION

La plaine côtière de Bou-Areg (Maroc nord-oriental) a un climat typiquement méditerranéen caractérisé par des irrégularités annuelles et interannuelles, une grande sécheresse en été et des précipitations modérées voir très modérées en hiver. La fertilité des sols et l'installation du système d'irrigation en 1974 ont fait de cette plaine une région de plus en plus peuplée. La plaine connaît un sérieux problème de salinisation des eaux souterraines provoqué en partie par l'infiltration des eaux de la lagune et en partie par la salinité des eaux fossiles contenues dans les dépôts.

SITUATION

La plaine de Bou-Areg est une dépression synclinale Néogène limitée au nord-ouest et à l'ouest par les montagnes de Gourougou et de Beni Bou-Ifrou, au sud par le couloir de Selouane qui assure la liaison avec la plaine du Gareb et au sud-est par les chaînes des Kebdanas. La limite nord coïncide avec la forme arquée de la lagune de Nador séparée de la Méditerranée par un lido de 25 km de long interrompu par une passe inférieure à 2 km de large pour maintenir la communication avec la mer.

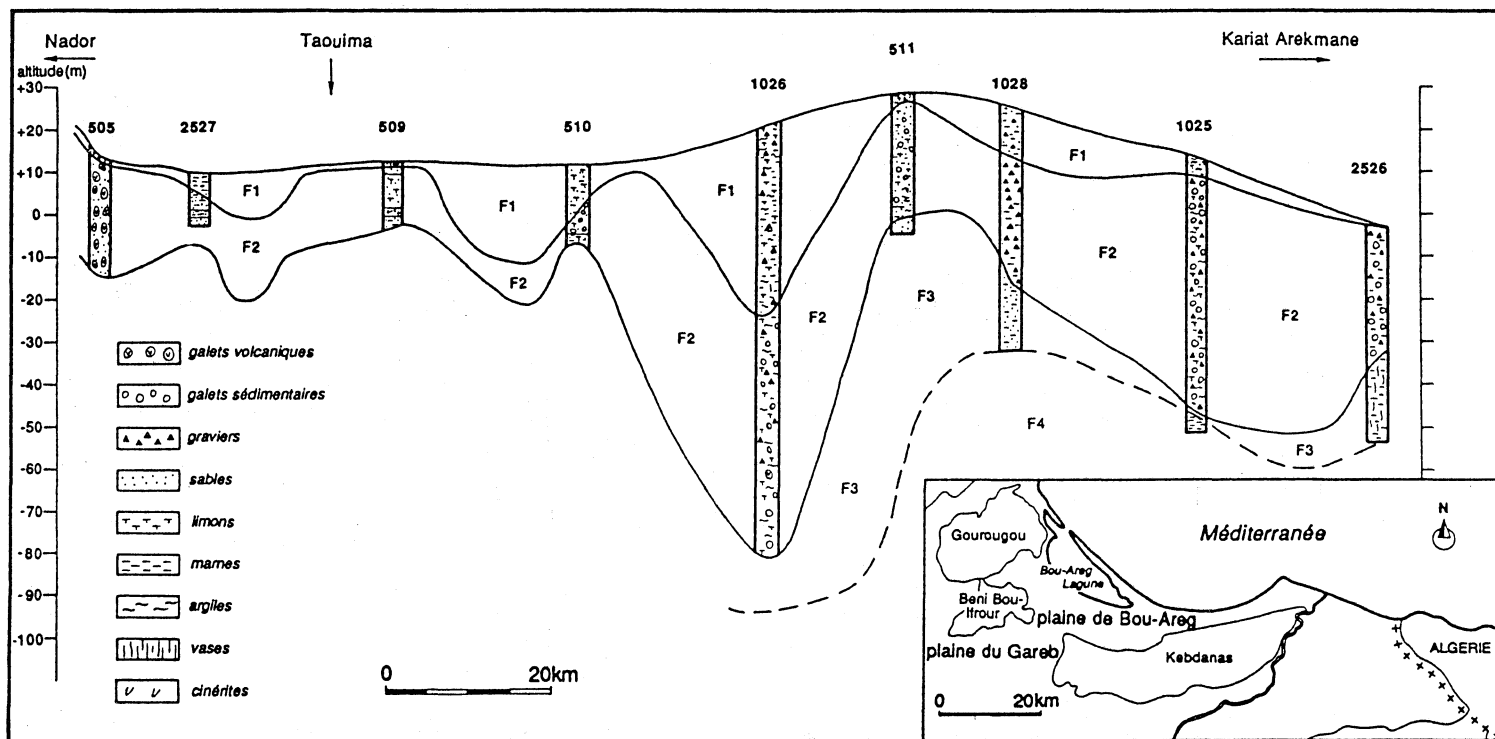


Fig. 1 Coupe hydrogéologique selon la route Nador-Taouïma- Kariat Arekmane.

ETUDE REGIONALE

Structure hydrogéologique

Durant la fin du pliocène et le quaternaire, la dépression de Bou-Areg a été le siège d'une sédimentation continentale très variée et très épaisse. Les matériaux sédimentaires sont connus par une trentaine de forages répartis un peu partout dans la plaine. Quatre grandes formations ont été distinguées (Fig. 1). Chaque formation regroupe un certain nombre de couches ou de lentilles qui ont un comportement hydrogéologique plus ou moins similaire. Du haut vers le bas on distingue:

- (a) *La formation F1*: C'est le groupe superficiel, il comprend des matériaux fins: argiles, marnes, limons argileux, calcaires ou marno-calcaires tuffeux, renfermant ou non des graviers. Ces dépôts ont une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m s^{-1} et une épaisseur très variable entre 0 et 44 m.
- (b) *La formation F2*: Elle désigne le groupe le plus important dans l'aquifère, elle est surtout formée par des dépôts grossiers: des galets, des graviers d'origine volcanique et/ou sédimentaire, sables, tous emballés dans des limons. Sa perméabilité est de l'ordre de 10^{-4} m s^{-1} . Son épaisseur varie d'un minimum de 8 m à plus de 74 m.
- (c) *La formation F3*: Elle est presque similaire à la première, formée par des sédiments très fins avec très peu de sable et rarement de petits graviers. La perméabilité de cette formation est aussi de l'ordre de 10^{-5} m s^{-1} et l'épaisseur va de 0 à 97 m.
- (d) *La formation F4*: C'est la dernière formation rarement atteinte par les forages, presque imperméable, formée surtout par des argiles ou des marnes pures.

Le système est alors formé par un niveau aquifère F2 encadré vers le haut et vers le bas par deux niveaux moins perméables F1 et F3; la formation F4 qui est retrouvée à une profondeur variante entre 56 et 66 m, peut être considérée comme le substratum imperméable.

La majorité des piézomètres sont installés dans la formation F2 considérée comme la partie aquifère principale du système. Le mur de F2 est représenté sur la Fig. 2. La géométrie de la base de F2 montre dans l'ensemble une structure simple dessinant un ensemble de vallées, plus ou moins perpendiculaires au rivage de la lagune. La profondeur variable de ces anciennes vallées augmente vers la lagune. Les épaisseurs maximales de F2 se trouvent au niveau de la vallée au centre de la plaine à l'est de l'Oued Selouane et dans la vallée de Kariat Arekmane.

Piézométrie

Les mesures du niveau d'eau dans les piézomètres et les puits (octobre-novembre, 1995) ont permis de tracer la carte de la surface piézométrique (Fig. 3). Cette carte laisse voir clairement que l'écoulement de la nappe converge vers la lagune. Les ressources principales d'alimentation de la nappe sont les apports souterrains à partir des reliefs limitants la plaine ou ceux qui proviennent de la plaine du Gareb à travers le couloir de Selouane, auxquels s'ajoute l'infiltration des eaux d'irrigation.

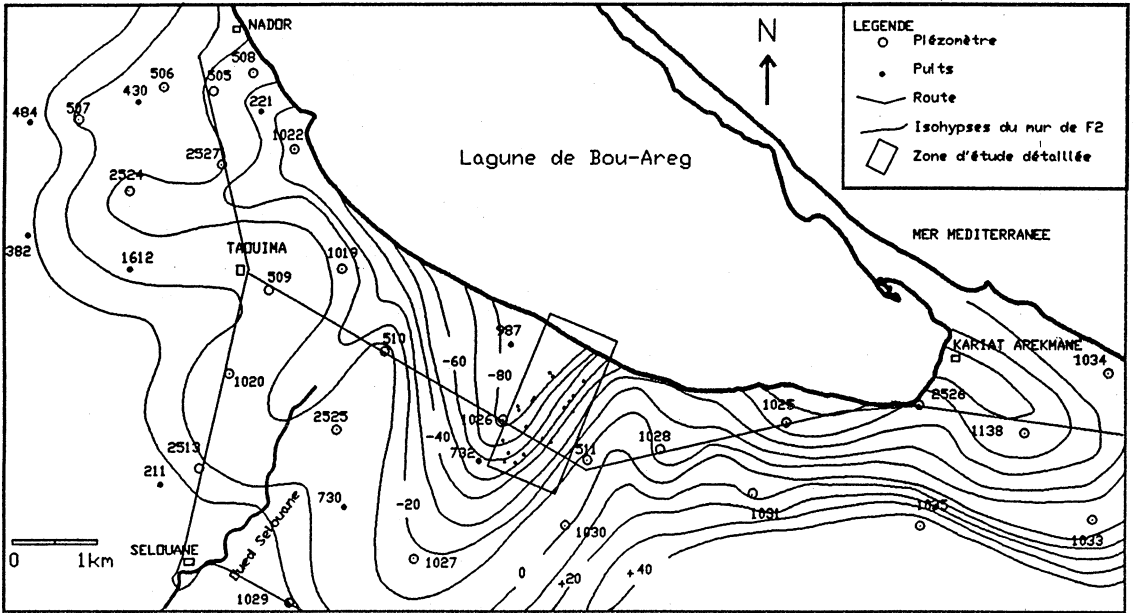


Fig. 1 Carte d'isohypses du mur de la formation F2 avec situation des piézomètres et des puits.

Hydrochimie

La distribution régionale des types d'eaux (selon la classification de Stuyfzand, 1986) basée sur un échantillonnage fait en 1963 lors de l'exécution des forages, est représentée à la Fig. 4. Cette classification consiste à représenter chaque type d'eau par un symbole englobant plusieurs renseignements sous forme de code: le premier code se base sur la teneur en chlorures: Cl < 150 mg l⁻¹ (F), eau douce-saumâtre avec 150 mg l⁻¹ < Cl < 300 mg l⁻¹ (Fb), eau saumâtre avec 300 mg l⁻¹ < Cl < 1000 mg l⁻¹ (B), eau saumâtre-salée avec 1000 mg l⁻¹ < Cl < 10 000 mg l⁻¹ (Bs), eau salée avec 10 000 mg l⁻¹ < Cl < 20 000 mg l⁻¹ (S) et eau hyperhaline avec Cl > 20 000 mg l⁻¹ (H). Le deuxième code se rapporte à la proportion relative de la somme des cations et des anions principaux en meq l⁻¹ et le troisième code représente l'échange de cations comme suit:

$$(\text{Na} + \text{K} + \text{Mg})_{\text{corrigé}} = (\text{Na} + \text{K} + \text{Mg})_{\text{mesuré}} - (1.061 * \text{Cl})$$

Si $(\text{Na} + \text{K} + \text{Mg})_{\text{corrigé}} < -(0.5 * \text{Cl})^{1/2}$ le code est "-": intrusion d'eau salée dans un milieu d'eau douce. Si $-(0.5 * \text{Cl})^{1/2} < (\text{Na} + \text{K} + \text{Mg})_{\text{corrigé}} < (0.5 * \text{Cl})^{1/2}$ le code est "0": équilibre dans l'échange de cations. Si $(\text{Na} + \text{K} + \text{Mg})_{\text{corrigé}} > (0.5 * \text{Cl})^{1/2}$ le code est "+": infiltration d'eau douce dans un environnement d'eau salée.

Un faible adoucissement régional est indiqué par le type d'eau Bs-NaCl+ portant un code d'échange de cations positif. Cet adoucissement progresse depuis les bordures montagneuses dans la direction de la lagune. Au sud, le long et à l'est de l'Oued Selouane l'adoucissement est apparemment plus avancé donnant un équilibre dans l'échange de cations (code 0) dans les eaux de cette zone, probablement lié à

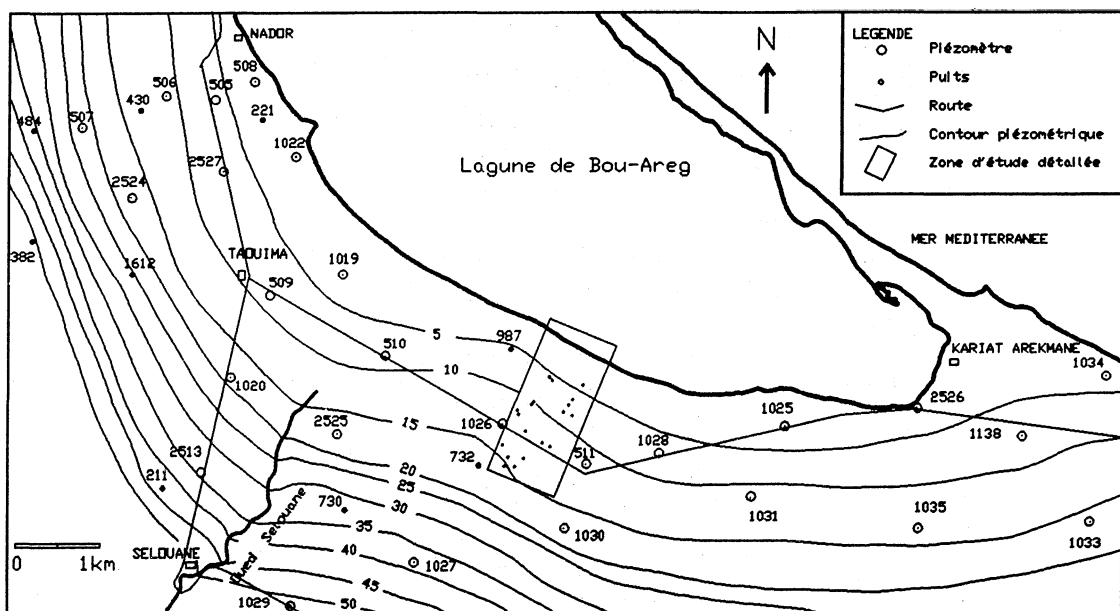


Fig. 3 Carte piézométrique d'octobre-novembre 1995.

l'alimentation par les eaux provenant de la plaine du Gareb.

A l'état initial, les sédiments Plio-Quaternaires étaient en équilibre chimique avec leur milieu de sédimentation laguno-lacustre. Comme l'eau douce a commencé à s'infiltrer dans les zones de recharge, l'eau interstitielle était graduellement diluée et entraînée dans la direction de l'écoulement vers la lagune. Cette dilution a mené à des types d'eau moins concentrés Bs et B. Les premières eaux formées sont chassées dans la direction de l'écoulement d'autant plus que les précipitations s'infiltrent.

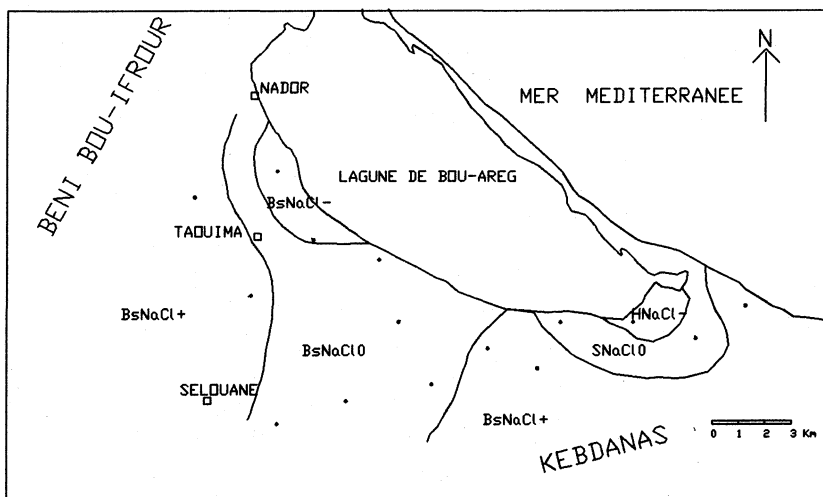


Fig. 4 Répartition régionale des types d'eaux (selon Stuyfzand, 1986).

Quand la phase de dilution est bien avancée, l'échange de cations entre l'eau et les surfaces des minéraux argileux commence à jouer son rôle (Walraevens, 1990), mais dans ce cas, plus faiblement par rapport à la dilution qui restera décisive, donnant le type d'eau NaCl.

Au niveau de Kariat Arekmane et au sud de Nador, on remarque qu'il y a une intrusion d'eau salée de la lagune dans l'aquifère moins salé. Ceci est indiqué par le code d'échange de cations négatif.

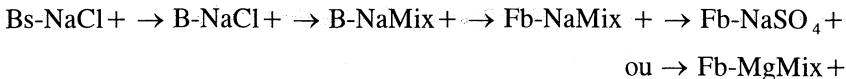
ETUDE DETAILLEE

Une étude détaillée a été menée durant l'été 1995 sur une zone de 3.5 km de long et 2 km de large, située dans la partie centrale nord de la plaine (Fig. 3). L'étude a porté sur l'ensemble des puits domestiques de cette zone dont la profondeur maximale est limitée à 18 m; ils se trouvent tous dans la formation F1. La description lithologique révèle des limons argileux roses à graviers et à débris de coquilles.

Caractéristiques chimiques

L'échantillonnage d'eau a porté sur 19 puits et deux échantillons d'eau d'irrigation, soit au total 21 analyses. La conductivité à 20°C présente un ensemble de valeurs comprises entre 1500 et 8100 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Les températures mesurées dans les puits varient entre 19 et 22°C avec une valeur moyenne de 20°C. Les valeurs de pH sont variables entre 7.7 et 8.5 avec une moyenne de 8.0.

L'utilisation de la classification de Stuyfzand (1986) a permis de distinguer six types d'eau montrant une langue d'adoucissement allongée dans la direction de l'écoulement (Fig. 5). Certainement ce phénomène est lié en majeure partie à une percolation importante locale des eaux d'irrigation qui sont de type Fb-CaSO₄. L'adoucissement progresse de l'extérieur vers le centre de la zone depuis l'eau saumâtre salée (Bs) (qualité régionale) jusqu'à une eau douce saumâtre (Fb) selon l'évolution suivante:



La qualité régionale Bs-NaCl+ subit tout d'abord une dilution donnant des eaux B-NaCl+. L'apport d'autres anions que les chlorures donne des types d'eau B-NaMix+ et Fb-NaMix+. A partir du stade Fb-NaMix+, on a une divergence dans l'évolution de l'adoucissement selon que si l'échange de cations est plus rapide, donnant Fb-MgMix+, ou que si les anions SO₄²⁻ deviennent dominants par rapport aux chlorures, donnant Fb-NaSO₄+. Cette évolution pourrait après converger à nouveau pour aboutir finalement à l'eau d'irrigation Fb-CaSO₄.

L'importance de l'échange de cations est clairement reflétée par les types d'eau et par l'ampleur du paramètre d'échange de cations $(\text{Na}+\text{K}+\text{Mg})_{\text{mesuré}} - 1.061\text{Cl}$ (en meq l⁻¹) (Stuyfzand, 1986), qui est compris entre 6.5 et 50 meq l⁻¹ pour les eaux

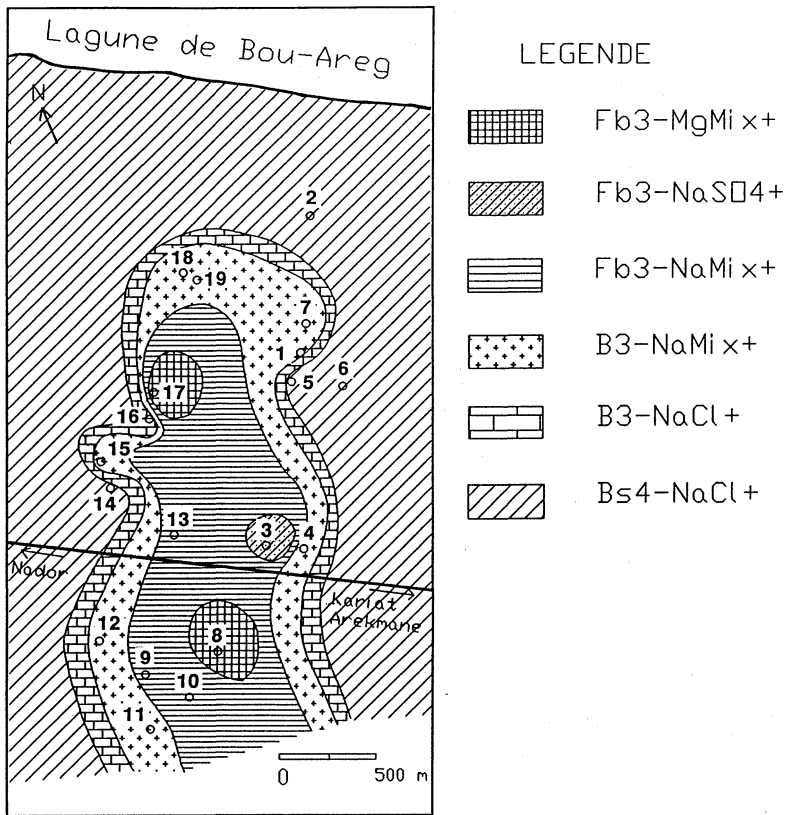


Fig. 5 Répartition des types d'eau dans la zone d'étude détaillée.

étudiées. La distribution de la conductivité électrique, de la teneur en chlorure et de la teneur en sodium confirme cet adoucissement.

Evolution chimique et processus diagénétique

Les réactions chimiques qui se déroulent pendant une salinisation ou un adoucissement, peuvent être déduites en calculant une composition basée sur le mélange conservateur de l'eau de mer et de l'eau douce et en comparant les concentrations conservatrices avec celles trouvées actuellement dans les eaux analysées (Appelo & Postma, 1993). Pourtant dans notre étude détaillée, l'eau douce initiale n'est pas la même que celle utilisée par Appelo & Postma (1993). Ici il s'agit des eaux d'irrigation. D'autre part il y a également l'adoucissement régional par l'apport des eaux douces des limites montagneuses provenant de l'eau des précipitations dans laquelle s'est dissous du CaCO₃. L'eau douce d'Appelo & Postma (1993) peut être une bonne approximation pour cette dernière.

D'abord, on calcule la fraction de l'eau de mer dans le mélange de l'eau de mer et de l'eau douce en considérant que les chlorures n'ont qu'une seule origine qui est la mer:

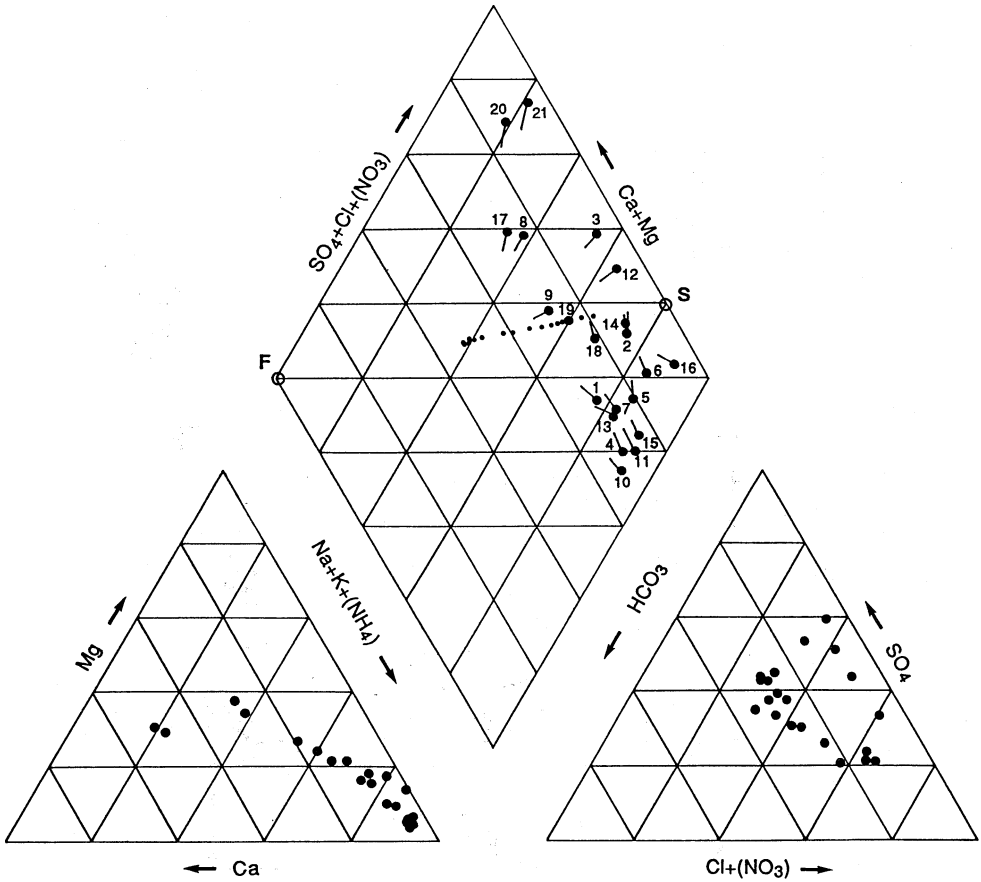


Fig. 6 Représentation des analyses sur le diagramme de Piper.

$$F_{\text{mer}} = (m_{\text{Cl}^-, \text{éch}} - m_{\text{Cl}^-, \text{douce}}) / (m_{\text{Cl}^-, \text{mer}} - m_{\text{Cl}^-, \text{douce}}) \quad (1)$$

Dans l'eau douce les chlorures sont très négligeables par rapport à l'eau de mer d'où:

$$F_{\text{mer}} = m_{\text{Cl}^-, \text{éch}} / 566 \quad (2)$$

où 566 = concentration de l'eau de mer en Cl^- (mmol l^{-1}).

Puis on calcule la concentration de chaque ion dans le mélange:

$$m_{i, \text{mél}} = F_{\text{mer}} * m_{i, \text{mer}} + (1 - F_{\text{mer}}) * m_{i, \text{douce}} \quad (3)$$

où m_i = concentration de l'ion i .

Les réactions additionnelles éventuelles sont alors trouvées comme la déviation de la composition du mélange simple:

$$m_{i, \text{réaction}} = m_{i, \text{éch}} - m_{i, \text{mél}} \quad (4)$$

Sur le diagramme de Piper (Fig. 6), on porte les analyses, la composition moyenne d'eau douce (F), d'eau salée (S) et les compositions des mélanges conservateurs calculées, qui viennent sur la droite qui lie F et S. Les réactions additionnelles peuvent être visualisées en traçant une queue du point représentant l'analyse dans la

direction du point indiquant le mélange conservateur correspondant. En dessous de la ligne F-S, les eaux subissent un adoucissement avec un échange de cations très clair (déplacement des queues parallèlement à l'axe (Na + K + NH₄). Au dessus de la ligne F-S, les eaux montrent un déplacement parallèle à l'axe (SO₄ + Cl + NO₃), ce déplacement peut signifier qu'il y a une réduction de HCO₃⁻ car on a une augmentation relative ponctuelle de (SO₄ + Cl + NO₃). Dans le cas de cette étude il s'agit d'une augmentation de SO₄²⁻ (voir triangle des anions de la Fig. 6), reflétant l'influence augmentée des eaux d'irrigations (20 et 21) riches en SO₄²⁻.

Indice de saturation

L'équilibre thermodynamique et l'indice de saturation sont calculés par le modèle mathématique WATEQ4F (Ball & Nordstrom, 1992). Les minéraux dont le potentiel de dissolution est très élevé, tel que l'anhydrite, la halite, l'epsomite et la brucite, seront dissous s'ils sont présents dans le sédiment. La solution est en équilibre chimique ou faiblement sursaturée par rapport à la calcite (-0.12 < SI < +0.93).

CONCLUSION

L'aquifère de Bou-Areg subit un adoucissement régional, lent et progressif dans la direction de l'écoulement depuis les chaînes de Gourougou et Beni Bou-Ifrou, le couloir de Selouane et les chaînes des Kebdanas. La partie correspondante à l'adoucissement le plus avancé (Bs-NaClO) où l'échange de cations atteint son équilibre, coïncide avec la grande vallée fossile à l'est de l'Oued Selouane, où la formation F2 est la plus épaisse et par laquelle passent les eaux souterraines provenant de la plaine du Gareb.

Une intrusion des eaux de la lagune dans la nappe aquifère est observée au niveau de Kariat Arekmane et au sud de Nador; ceci est probablement le résultat de pompages excessifs locaux. Par ailleurs, la langue d'adoucissement local observée dans la zone d'étude détaillée, n'est probablement que le résultat d'une infiltration plus importante des eaux d'irrigation à la surface de la nappe.

Remerciements Les auteurs tiennent à reconnaître le support du Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie de l'Université de Gand, du Ministère de la Communauté Flamande, du Fonds National pour la Recherche Scientifique (Belgique) et du projet AVICENNE-73 de l'Union Européenne, ainsi que l'aide apportée par la Direction Hydraulique à Rabat, l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole de la Moulouya de Berkane et la Direction Régionale Hydraulique d'Oujda (Maroc).

REFERENCES

- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (1993) *Geochemistry, Ground Water and Pollution*. Balkema, Rotterdam.
 Ball, J. W. & Nordstrom, D. K. (1992) WATEQ4F, a computer program for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters. *US Geol. Survey Open-File Report 91-183*.

- Stuyfzand, P. J. (1986) A new hydrochemical classification of water types: Principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands. In: *Proc. 9th Salt Water Intrusion Meeting* (Delft), 641-655.
- Walraevens, K. (1990) Hydrogeology and hydrochemistry of the Ledo-Paniselian semi-confined aquifer in East- and West- Flanders. *Acad. Analecta* 3, 11-66.