

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE ET ISOTOPIQUE DES AQUIFÈRES DU BASSIN DE TINDOUF (ALGÉRIE).

Mohamed MAHIA*, Saadane DJORFI*, Azzedine HANI* et Larbi DJABRI*.

RÉSUMÉ

Dans la région de Tindouf, l'intense exploitation actuelle des nappes hamadienne et viséenne entraîne une vidange accélérée de ces réservoirs. Une nouvelle possibilité est représentée par les nappes des grès du Dévonien inférieur et du Cambro-Ordovicien, nappes confinées encore peu exploitées. Le problème essentiel consiste à délimiter les zones favorables aux captages et à connaître l'existence d'une alimentation actuelle de ces nappes.

L'étude isotopique, combinée à l'étude hydrochimique et hydrogéologique classique, a permis de mettre en évidence une recharge actuelle de ces nappes et d'identifier les principaux axes d'écoulement.

L'évolution chimique des eaux étudiées sur la base des équilibres thermodynamiques des systèmes, suit de très près la circulation souterraine traduisant en cela le vieillissement des eaux.

Mots-clés - Aquifère - Hamada - Caractéristiques chimiques - Caractéristiques isotopiques - Sebkhia - Axe d'écoulement souterrain.

HYDROGEOLOGICAL AND ISOTOPIC STUDY OF THE TINDOUF BASIN AQUIFERS (ALGERIA).

ABSTRACT

In the Tindouf region, the intense current exploitation of the Hamadian and the Visian aquifers is rapidly emptying these reservoirs. A new possible resource can be found in the Lower Devonian and the Cambro-Ordovician aquifers, confined aquifers that are less exploited.

The main problem is to identify the favourable zones for the implantation of wells and to know whether a current recharge of this aquifer exists.

The isotopic study, combined with classical hydrochemical and hydrogeological studies, pointed a recharge of this aquifers and showed the main flow paths.

Based on thermodynamic equilibrium of systems, the chemical evolution of the groundwater closely follows the underground circulation reflecting hence the ancient age of the waters.

Keywords - Aquifer - Hamada - Chemical properties - Isotopic properties - Sebkhia - Groundwater flow paths.

*Laboratoire de Géologie, Université Badji Mokhtar - Annaba, BP. 12, 23000, Annaba, Algérie.

E-mail : mohamed_mahia@yahoo.fr

- Manuscrit déposé le 06 Septembre 2008, accepté après révision le 20 Juin 2009.

I. INTRODUCTION

Le synclinal paléozoïque de Tindouf, encore mal défini du point de vue géométrique, renferme plusieurs niveaux aquifères contenus dans des formations superficielles de la Hamada, des Grès du Cambro-Ordovicien, des Grès du Dévonien inférieur et des Calcaires dolomitiques du Viséen inférieur. Les études effectuées dans cette région (Idrotecno, 1979; Progress Sarl-Annaba, 1999; Hani et al., 2003; Hani, 2003) ont mis en évidence une intensification des prélèvements au niveau de la nappe du Viséen, une contamination des eaux par les niveaux évaporitiques et l'absence d'une recharge actuelle à partir de la surface, avec la seule exception de l'aquifère du Hamadien. A partir des analyses hydrochimiques et isotopiques réalisées sur quelques points d'échantillonnage, nous avons essayé de définir les zones de recharge des différents aquifères de la région, d'évaluer les directions préférentielles de la circulation des eaux souterraines, et de délimiter les zones favorables à l'implantation des captages. La présente étude du synclinal de Tindouf trouve, en réalité, sa justification dans la nécessité de montrer que la définition de zone aride et semi-aride en hydrogéologie ne correspond pas toujours à la répartition géographique et climatique.

II. LE CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE ET CLIMATIQUE

Le synclinal paléozoïque de Tindouf se situe entre l'Anti-Atlas au nord et la dorsale Réguibat au sud. Vers l'est, il est délimité, respectivement du nord au sud, par le Tafilalt et la chaîne de L'Ougarta. Vers l'ouest, il passe au pays Mecheurs, puis au Sahara occidental où il disparaît sous le Crétacé qui affleure à moins de 100 km de Tindouf.

La zone d'étude est soumise à un climat saharien, caractérisé par des précipitations occa-

sionnelles. En effet, Les pluies sahariennes, essentiellement capricieuses, tombent sous forme de pluies torrentielles localisées, séparées par des périodes de sécheresse d'une ou de plusieurs années. Il en découle qu'au Sahara les notions de moyenne pluviométrique, de station représentative et surtout de période de retour ne sont qu'indicatives. A Tindouf même, on a vu quelques années avec 60 à 70 mm, et d'autres ne bénéficiant que de 10 à 20 mm, voire beaucoup moins. En effet, si l'on se rapporte aux isohyètes qu'a tenté d'établir J. Dubief (1953) (*in* : Progress Sarl-Annaba, 1999), presque tout le bassin recevait de 10 à 15 mm, seule la Hamada de Tindouf étant plus favorisée avec 30 à 50 mm dans ses parties nord-occidentales.

Les températures enregistrées dans la zone d'étude montrent la persistance de la chaleur qui atteint des valeurs absolues très élevées (50°C). La fréquence et la vitesse du vent, la faible humidité relative et la nébulosité combinées aux températures enregistrées, favorisent les fortes valeurs de l'évaporation qui atteint des valeurs considérables.

La majorité des bassins versants de la zone étudiée s'étale sur de vastes superficies, d'où l'énorme volume écoulé (des centaines de millions de m³) après une pluie torrentielle (Castany, 1967; Castany, 1968). En parcourant des centaines de kilomètres, avec un débit considérable, ces écoulements alimentent les différentes nappes aquifères du bassin de Tindouf.

III. LE CADRE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Les principaux aquifères identifiables sont :

- les formations hamadiennes constituent principalement une couche superficielle argilo-gréseuse à la base et calcaires tufeux blancs au sommet, d'une épaisseur variable de 20 à 80m.

L'écoulement de la nappe, limitée au secteur occidental par absence de relevés, se fait globalement de l'ouest vers l'est (fig.1A). L'alimentation se fait vraisemblablement par infiltration des eaux de pluie à travers les formations de la Hamada de Tindouf et par les eaux des crues exceptionnelles qui s'accumulent sur d'énormes surfaces dans les zones d'épandages. L'exutoire de la nappe est constitué par la grande Sebkhha de Tindouf et par la Sebkhha Abdallah (Idrotecno, 1979 et Progress, 1999). A l'exception du puits 50 qui présente une valeur relativement forte, les débits spécifiques sont faibles. La transmissivité calculée est de l'ordre de $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;

- **la nappe des calcaires du Viséen supérieur** est représentée par une dizaine de mètres d'argiles avec des niveaux de gypse massif surmontant une cinquantaine de mètres de calcaire graveleux et d'argile dolomitique reposant sur une série d'alternance de calcaire graveleux et d'argile dolomitique, d'argile ferrugineuse de siltstones à grès fins et de quelques niveaux d'anhydrite massive blanche. En l'état actuel de nos connaissances, il est très difficile de définir les écoulements souterrains dans les calcaires du Viséen. Cependant, les relevés effectués en 1975 ont mis en évidence un apport d'eau à partir de l'est vers la sebkhha (fig.1A). L'alimentation de la nappe serait régie par les précipitations sur les formations hamadiennes qui peuvent être en continuité hydraulique avec les calcaires sur une large bande orientée ouest-est (Idrotecno, 1979). Elle pourrait provenir également des apports des zones d'affleurement de l'aquifère situées dans l'Atlas (Progress, 1999). Géographiquement, ce sont les forages situés dans le secteur de Sebkhha Abdallah qui présentent les plus fortes valeurs de débits spécifiques alors qu'à l'est de la Sebkhha Abdallah, le rendement des ouvrages marque une décroissance assez nette;

- **la nappe des grès du Dévonien inférieur** correspond à une série gréseuse à grains fins à

moyens blanche à gris verdâtre avec un ciment argilo-calcaire. Le sommet est caractérisé par une série d'alternance de siltstone à grès très fins, avec de rares intercalations de calcaire. Les cinq relevés piézométriques effectués montrent un écoulement dirigé vers le nord conformément au pendage des couches (fig.1B). Les 2 seules valeurs obtenues ont montré des débits spécifiques relativement très faibles. La transmissivité est de l'ordre de $9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (T7);

- **la nappe des grès du Cambro-Ordovicien** est comprise entre les formations transgressives sur le socle antécambrien et les premiers niveaux d'argiles noires à Graptolites du Gothlandien. La série de base est composée d'argiles et de quartzites à graviers de 0,1 à 1 mm de diamètre. La série supérieure est représentée par une barre de grès souvent en plaquettes, avec des nodules de calcaire. D'une manière générale, la nappe qui pourrait être libre sur la moitié de la largeur des affleurements des grès (fig. 3), s'écoule de l'ouest vers l'est (fig.1B). Les débits spécifiques, tout comme les transmissivités, ont montré des valeurs relativement plus fortes que celles du Dévonien. Les transmissivités oscillent entre $1,3 \cdot 10^{-3}$ et $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Le coefficient d'emmagasinement serait de $7 \cdot 10^{-4}$.

IV. DONNÉES HYDROCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

Aspects hydrochimiques

Sur la base des données analytiques recueillies, il est possible de souligner les constatations suivantes (Lamouroux et Hani, 2006):

- les eaux circulant dans l'aquifère hamadien sont très hétérogènes (fig.2a) avec 5 échantillons sur 15 de faciès chloruré sodique, 4/15 sulfaté magnésien, 4/15 sulfaté calcique, 1/15 sulfaté sodique et 1/15 chloruré calcique. Le résidu sec (RS) varie de 896 mg/l à 5460 mg/l,

les plus fortes minéralisations sont enregistrées en général à l'aval de l'écoulement en raison du temps de transit. L'alimentation se fait vraisemblablement par infiltration des eaux de pluie à travers les formations de la Hamada de Tindouf et par les eaux des crues exceptionnelles qui s'accumulent sur d'énormes épaisseurs dans les zones d'épandages. L'exutoire de la nappe est constitué par la grande Sebkhha de Tindouf et à moindre échelle par la Sebkhha Abdallah;

- l'aquifère du Viséen est caractérisé par 3 types d'eau (fig. 2b); chloruré sodique (2/4 échantillons), sulfaté calcique (1/4 échantillons) et

sulfaté sodique (1/4 échantillons). Le résidu sec passe de 2348 mg/l (puits 43) à 14006 mg/l au T1 en raison du lessivage d'évaporites;

- les eaux du *Dévonien* sont également de 3 types (fig. 2c) : 5/8 échantillons chloruré calcique, 1/8 échantillons chloruré sodique et 2/8 échantillons sulfaté calcique. Le RS varie de 1264 mg/l (puits 55) à 2592 mg/l (T7);

Dans l'aquifère du *Cambro-Ordovicien*, 3 types d'eau se distinguent (fig. 2d) : 5/8 sulfaté calcique, 2/8 chloruré sodique et 1/8 chloruré calcique. Le RS oscille de 694 mg/l (T29) à 4000 mg/l (66).

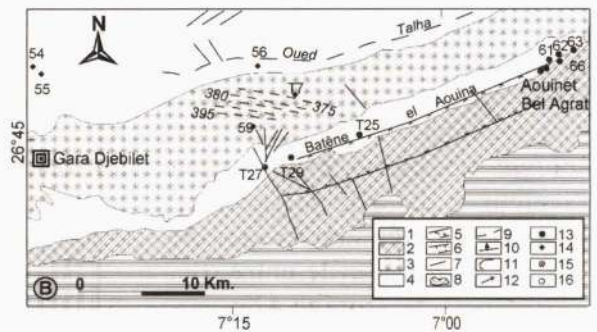
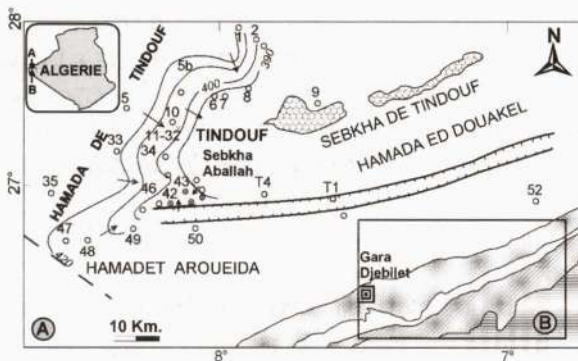


Fig. 1- 1A. Localisation des points d'eau et contexte géologique des aquifères de la Hamada et du Viséen (Idrotecno, 1979, modifiée).

Water points location and geological scheme of the Hamada and the Visean aquifers (after Idrotecno, 1979, modified).

1B. Localisation des points d'eau et contexte géologique des aquifères du Dévonien et du Cambro-Ordovicien (inclus dans fig. 1A; Idrotecno, 1979, modifiée).

Water points location and geological scheme (included in fig. 1A) of Devonian and Cambro-Ordovician aquifers (after Idrotecno, 1979, modified).

1 : Précambrien (*Precambrian*); 2 : Grès du Cambro-Ordovicien (*Cambro-Ordovician sandstone*); 3 : Grès du Dévonien (*Devonian sandstone*); 4 : Cénozoïque (*Cenozoic*); 5 : Secteur où la nappe du Cambro-Ordovicien est non confinée (*Non-confined area of the Cambro-Ordovician aquifer*); 6 : Secteur où le Viséen est couvert par le Hamadien (*Area where the Visean is covered by the Hamadian*); 7 : Faille (*Fault*); 8 : Sebkhha (*Sebkhha*); 9 : Surfaces piézométriques de l'aquifère du Dévonien (*Piezometric surfaces of the Devonian aquifer*); 10 : Surfaces piézométriques de l'aquifère du Viséen (*Piezometric surfaces of the Visean aquifer*); 11 : Surfaces piézométriques de l'aquifère hamadien (*Piezometric surfaces of the Hamadian aquifer*); 12 : Lignes de courant (*Stream line*); 13 : Piézomètre d'observation dans l'aquifère du Cambro-Ordovicien (*Observation piezometer of the Cambro-Ordovician aquifer*); 14 : Piézomètre d'observation dans l'aquifère du Dévonien (*Observation piezometer of the Devonian aquifer*); 15 : Piézomètre d'observation dans l'aquifère du Viséen (*Observation piezometer of the Visean aquifer*); 16 : Piézomètre d'observation dans l'aquifère du hamadien (*Observation piezometer of the Hamadian aquifer*).

Aspects isotopiques

L'oxygène 18 et le tritium ont été mesurés dans tous les échantillons alors que le deutérium et le ^{14}C ont été analysés seulement dans 11 et 9 échantillons respectivement. Sont reportés ci-dessous les principaux résultats obtenus (Fontes, 1976; Hani *et al.*, 2003):

- **nappe hamadienne** : l'interprétation des données isotopiques, en particulier le tritium, met en évidence une répartition en 3 familles d'eau :

*eaux très récentes ($^3\text{H} > 16,6$ UT) : échantillons 34, 48 et 49;

*eaux relativement récentes ($8,3 < ^3\text{H} < 16,6$ UT) : échantillons 1, 3, 6, 8 et 46;

*eaux plus vieilles ($^3\text{H} < 8,3$ UT) : échantillons 7, 9, 20, 29, 47, 50 et 52;

- **nappe des calcaires du Viséen supérieur** : les valeurs du tritium pour tous les échantillons considérés sont très faibles voire nulles. L'âge des eaux oscille entre 6700 ans (forage T4) et 8600 ans (forage 42);

- **nappe des grès du Dévonien inférieur** : le ^{14}C montre une large variation des valeurs qui

s'échelonnent entre une activité actuelle en carbone moderne (100% au forage 58) souligné par un ^{13}C (= - 6,9‰) et une activité pratiquement nulle (1,43‰ au puits T7), en accord avec un ^{13}C partiellement échangé avec la matrice (- 5,6‰).

Le tritium met en évidence également l'existence d'eaux actuelles (échantillons 58 et 59) ayant des valeurs de l'ordre de 20 UT correspondant à un âge actuel et des eaux plus vieilles avec des valeurs nulles (forage T7) et dont l'âge serait de 28000 ans;

- **nappe des grès du Cambro-Ordovicien** : les teneurs en tritium montrent un manque d'apport en eaux actuelles, sur la majeure partie de la nappe sauf dans les secteurs affectés par des failles, alors que le radiocarbone indique des âges variables entre un minimum de 660 ans au forage T27 et un maximum de 11000 ans au forage T25.

V. INTERPRÉTATION

- **Nappe hamadienne** : en analysant les valeurs isotopiques des échantillons par rapport à leur distribution géographique, on peut déduire que

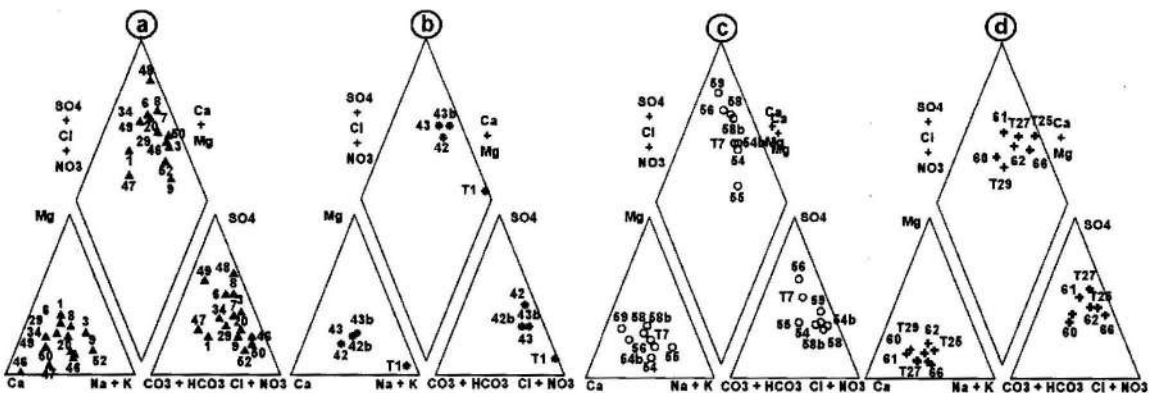


Fig. 2 (a, b, c et d) - Diagrammes de Piper des eaux du bassin de Tindouf.

Piper diagrams of Tindouf basin aquifers.

les eaux les plus vieilles représentent l'évolution normale de la nappe. En effet, aux fortes valeurs de salinité correspondent de faibles teneurs en tritium. Les eaux les plus jeunes sont induites par des situations locales comme le lessivage des évaporites qui fait augmenter la salinité ou l'influence de l'évaporation lors de l'accumulation des eaux de pluie dans les zones d'épandages.

- Nappe des calcaires du Viséen supérieur : en ce qui concerne l'aquifère viséen, le graphique $\delta^{18}\text{O}\text{‰} - \delta^2\text{H}\text{‰}$ de la figure 3 montre que les points 43b et 42 s'ajustent à la droite d'évaporation alors que le forage T1 est situé sur la droite moyenne des précipitations indiquant l'absence d'évaporation.

Il en ressort que la différence dans la composition chimique, entre les points 42 et 43 et le point T1 situés dans le même contexte géologique, est dû principalement à la présence d'évaporites au niveau de ce dernier forage.

- Nappe des grès du dévonien inférieur : la droite d'équation $\delta\text{‰ H}_2 = 4,95 \delta\text{‰ O}_{18} - 24,94$ montre assez parfaitement l'effet de l'évaporation sur les eaux de cet aquifère (fig. 3).

- Nappe des grès du Cambro-Ordovicien : tous les points sont disposés le long de ligne d'évaporation (fig. 3). Les différences de comportement hydrochimique entre le forage T27 et le T25 sont dues essentiellement aux apports d'eaux plus récentes dans les secteurs où la formation aquifère est affectée par des failles. La comparaison des résultats exposés ci-dessus avec ceux fournis par le contexte lithologique et structural permet de mettre en évidence ce qui suit :

1- la répartition spatiale des faciès hydrochimiques dans l'aquifère hamadien ne permet pas d'établir une quelconque zonalité pour diverses raisons; effet de l'évaporation dans la

zone capillaire, hétérogénéité lithologique et temps de séjour.

En somme, les puits présentant des eaux fortement minéralisées sont vraisemblablement alimentés, en partie, par un écoulement hypodermique dans des formations quaternaires subissant ainsi une forte évaporation. Ailleurs des zones d'épandages recevant les eaux des crues exceptionnelles qui s'accumulent sur d'énormes épaisseurs engendrant une charge suffisante, par conséquent une alimentation des nappes profondes;

2- la continuité hydraulique entre les points 42 et 43, captant la nappe des calcaires du Viséen, est bien évidente. Toutefois, une différence significative entre le comportement physico-chimique de ces 2 points et le forage T1 est mise en évidence. Cette différence peut être expliquée essentiellement par la présence d'évaporites signalées par la coupe lithologique du forage T1 et à un moindre degré par le temps de transit des eaux lors de l'écoulement;

3- le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère, l'alimentation locale et l'évaporation peuvent également expliquer les différences observées entre les données analytiques de l'ensemble des points 54 à 59 et le point T7 relatifs à l'aquifère des grès du Dévonien inférieur;

4- dans l'aquifère du Cambro-Ordovicien, l'évolution hydrochimique est régie essentiellement par la direction du flux, dirigé de l'ouest vers l'est. Toutefois, quelques exceptions à cette règle sont observées dans les secteurs où l'alimentation de la nappe à travers les fractures (au niveau du forage T29 expl.) est possible.

Analyse factorielle discriminante

L'analyse factorielle discriminante, utilisée dans cette étude, se fixe pour objectif d'étudier

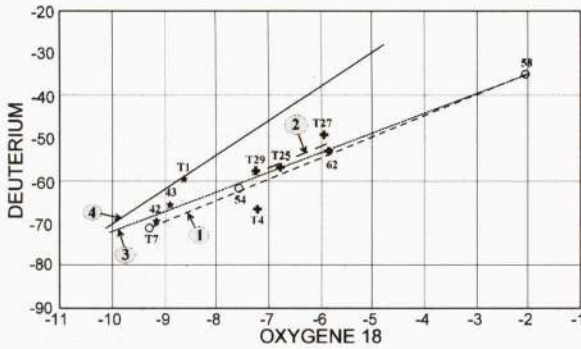


Fig. 3 - Relation Deutérium/Oxygen18 dans les eaux souterraines.

Relationship between δ^2H (‰) - $\delta^{18}O$ (‰) in the groundwaters.

le rôle d'une variable qualitative (espace, temps) en plus des variables quantitatives (Davis, 1984; Deverel, 1989; Melloul et Collin, 1991; Melloul, 1992; Melloul, 1995).

L'emploi d'une variable qualitative au sein d'une population d'individus revient à une partition de cette population, chaque individu étant affecté à un seul ensemble que nous appelons groupe. La discrimination des groupes consiste à maximiser la variance entre les barycentres et on peut alors, mettre en évidence les propriétés qui les distinguent les uns des autres. Si l'individu est réaffecté à son groupe d'appartenance, il est dit "bien classé", s'il est réaffecté à un autre groupe, il est dit "mal classé".

Les quatre aquifères appartiennent au même bassin versant, et présentent une minéralisation différente. Pour étudier le comportement de ces nappes dans l'espace (système), on peut subdiviser la population en quatre groupes (nappe hamadienne, nappe des calcaires du Viséen supérieur, nappe du Dévonien inférieur et nappe des grès du Cambro-Ordovicien).

L'axe I est déterminé par les éléments de la minéralisation et 3H qui ne sont opposés qu'à

l'oxygène 18. C'est un axe de minéralisation. Il oppose les eaux des nappes des grès du Dévonien, du Cambro-Ordovicien et des calcaires du Viséen à celles de l'aquifère hamadien (fig. 4a).

L'axe II est caractérisé par une opposition entre la pCO_2 et le pH ce qui traduit la mise en équilibre des eaux mettant en évidence le temps de séjour des eaux dans les aquifères.

Dans le plan des individus (fig. 4b), l'axe II oppose la nappe des grès du Cambro-Ordovicien à celles du Dévonien et des calcaires du Viséen supérieur. Dans la nappe hamadienne, les points évoluent des eaux les plus jeunes (tritium > 30 UT) vers les eaux les plus évoluées chimiquement et les plus vieilles ($^3H < 4,2$ UT) d'un point de vue isotopique.

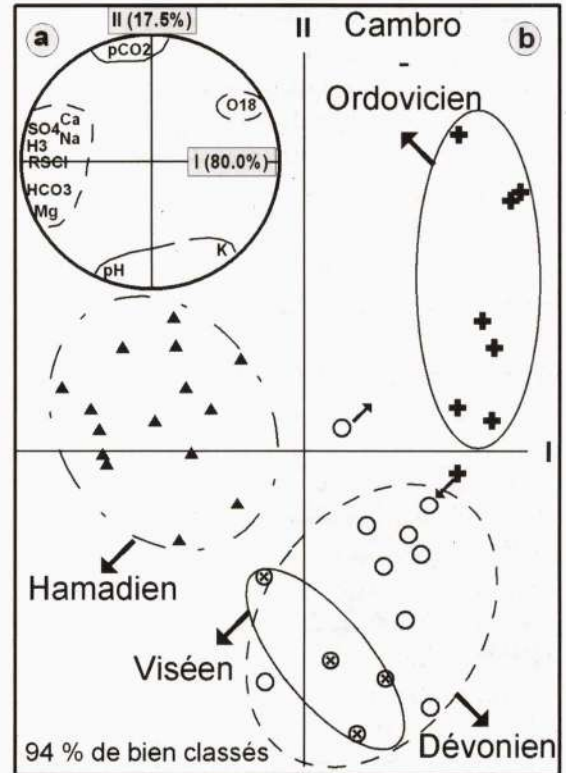


Fig. 4 (a et b) -Résultats de l'Analyse Factorielle Discriminante.

Results of Discriminant Factorial Analysis.

L'étirement des enveloppes des points du Dévonien parallèlement à l'axe II traduit le passage des eaux des zones de recharge vers les exutoires conformément à la direction du flux (W-E). Les résultats du classement donnent 93,8% de bien classés. L'aquifère hamadien et viséen sont complètement distincts (100% de bien classés). Le Dévonien et le Cambro-Ordovicien sont ainsi distincts avec de très faibles échanges d'individus (un pour chaque aquifère).

Il en ressort que, les différentes nappes sont autonomes et présentent un caractère chimique dépendant de la lithologie. L'échange d'individu entre les grès du Dévonien et du Cambro-Ordovicien, qui ont la même chimie, met en évidence un axe de drainage entre les deux nappes à la faveur des nombreuses failles qui affectent ces deux formations.

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans les réservoirs du bassin de Tindouf (fig. 5a, b, c, d et 6a, b, c, d).

Dans la nappe hamadienne, les eaux montrent une évolution des points les moins évolués chimiquement (34,49 et 48) aux points les plus murs et les plus évolués (50,52).

La première famille correspond aux eaux les plus récentes avec des valeurs en tritium de 50,7 UT pour l'échantillon 34 ; 30,1 UT pour 49 et 35,7 UT pour 48. Alors que pour le deuxième groupe, les teneurs en tritium sont très faibles.

Les eaux de la nappe des calcaires du Viséen confinée, échantillons T1, 42, 43 et 43 bis, montrent une maturation chimique plus évoluée et affichent un âge de l'ordre de 8600 ans. L'enveloppe des 8 échantillons prélevés en décembre 1998 se superpose à celle des points 42 et 43 et conforte donc l'idée que la nappe viséenne ne reçoit aucun apport récent.

Les eaux du Dévonien se divisent en deux groupes; le 1^{er} représenté par les points 58 et 59, très peu évolués dont l'âge est actuel (point 58), 340 ± 100 ans pour le point 54.

Les eaux du forage T7 montrent une maturation chimique très évoluée et affichent un âge nettement plus ancien (de l'ordre de 28000 ans).

La répartition des eaux du Cambro-Ordovicien sur le diagramme de stabilité Ca/Na montre une évolution des points les moins murs chimiquement (T25, T27 et T29) aux plus évolués (61, 62, 63 et 66) avec une évolution selon la direction du flux de l'ouest à l'est.

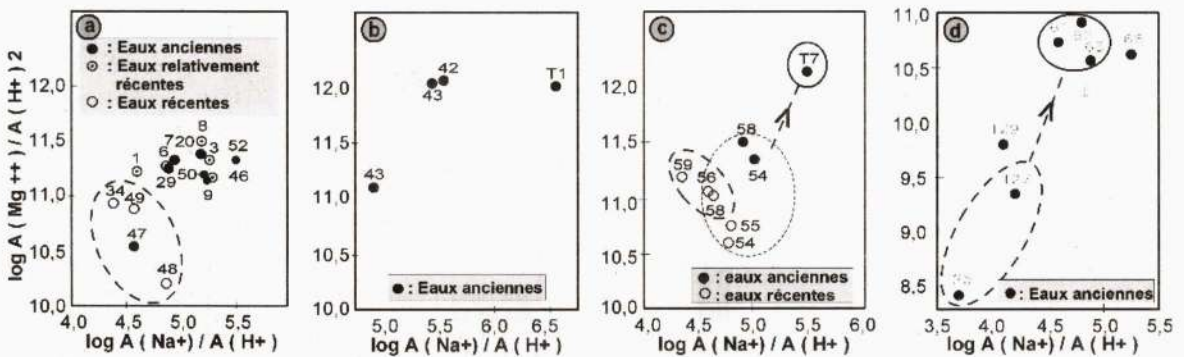


Fig. 5 -Diagrammes de stabilité Mg/Na.
Stability diagram Mg/Na.

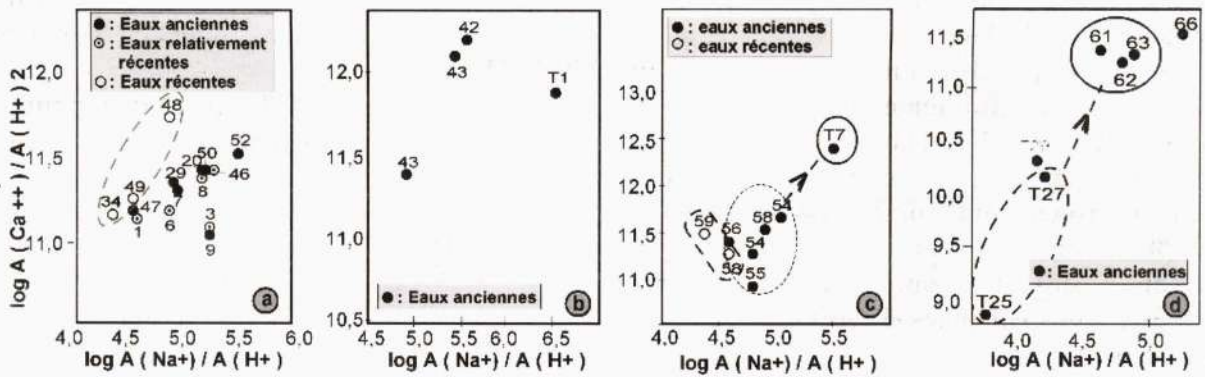


Fig. 6 - Diagrammes de stabilité Ca/Na
Ca/Na stability diagrams.

L'âge des trois premiers points varie de 11000 ans au T25, 660 ans au T27 à 2270 ans au T29, alors que pour le second groupe l'âge serait de l'ordre de 7100 ans (62).

VI. ALTERNATIVES POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Quatre systèmes aquifères sont identifiés (fig. 7A-B) :

- l'aquifère hamadien, caractérisé par une position perchée qui ne lui permet pas une recharge sauf à sa base. Actuellement, il subit un égouttement des réserves héritées de la dernière période humide du Quaternaire. L'alimentation se fait essentiellement par les eaux de crues exceptionnelles qui s'accumulent sur d'énormes épaisseurs dans les zones d'épandages. L'exutoire de la nappe est constitué principalement, par la grande Sebkhia de Tindouf et par la Sebkhia Abdallah. Compte tenu de sa lithologie et de son extension, les réserves de cette nappe restent très limitées. Cependant, les sites les plus favorables, pour une exploitation par forage peu profond se situeraient au pied de la Hamada ancienne. Les eaux sont impropres à l'alimentation humaine. Le RS varie en fonction de la position de prélèvement par rapport

aux zones de recharge;

- l'aquifère du Viséen, qui représente le principal aquifère en exploitation de nos jours, présente des conditions hydrogéologiques exceptionnellement favorables notamment dans le secteur de la Sebkhia Abdallah. En effet, les études réalisées ont permis l'identification d'un système montrant par endroit trois horizons très productifs. L'aquifère, constitué essentiellement par des calcaires et des dolomies a subi une fracturation intense d'où l'importance du réservoir. Une exploitation supplémentaire pourrait, sans la réalisation d'une modélisation, provoquer un déséquilibre du bilan global et par conséquent, la contamination de l'aquifère par les eaux très salées de la Sebkhia ou par les apports provenant du secteur est du champ captant actuel. Une autre possibilité d'exploitation consiste à récupérer les pertes par évaporation au niveau de la Sebkhia Abdallah.

La conception des plans de captage, inadaptée à ce type d'aquifères, renfermant des niveaux évaporitiques, et la qualité d'exécution insuffisante des travaux de forages peuvent être à l'origine des faibles débits fournis par le captage et des fortes salinités des eaux dans certains secteurs;

La conclusion pratique de cette étude montre :

- les sites les plus favorables, pour une exploitation par forage peu profond dans l'aquifère hamadien se situeraient au pied de la Hamada ancienne mais les eaux sont impropres à l'alimentation humaine;

- l'aquifère du Viséen, qui représente le principal aquifère en exploitation de nos jours, présente des conditions hydrogéologiques exceptionnellement favorables notamment dans le secteur de la Sebkhah Abdallah. Une exploitation supplémentaire pourrait provoquer un déséquilibre du bilan global et par conséquent, la contamination de l'aquifère par les eaux très salées de la Sebkhah ou par les apports provenant du secteur est du champ captant actuel;

- de part sa disposition structurale, l'aquifère du Dévonien inférieur renferme des réserves probablement modestes mais de bonne qualité. La nappe serait exploitable par forage sur la majeure partie de la vallée de l'oued Talha;

- une exploitation supplémentaire de l'aquifère du Cambro-Ordovicien serait possible plutôt dans la zone des forages T27 et T29 qui se situeraient sur les tracés où sur les croisements des failles. En général, la qualité de l'eau reste bonne à acceptable.

BIBLIOGRAPHIE

- CASTANY, G. 1967. Traité pratique des eaux souterraines. Paris, Edition Dunod, 660p.
- CASTANY, G. 1968. Prospection des eaux souterraines. Paris, Edition Dunod, 711p.
- DAVIS, J.C. 1984. Statistics and data analysis in geology (2nd ed.). New York, John Wiley and Sons, 646p.
- DEVEREL, S.J. 1989. Geostatistical and principal components analysis of groundwater chemistry and soil-salinity data, San Joaquin Valley, California. *Proceedings of the Baltimore Symposium, May 1989, Regional Characterization of Water Quality, IAHS Publication*, n° 182, pp. 11-18.
- FONTES, J.C. 1976. Les isotopes du milieu dans les eaux souterraines: *la Houille Blanche*, v. 3, pp. 205-221.
- HANI, A. 2003. Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. *Thèse de doctorat d'état, université Badji Mokhtar, Annaba*, 214 p.
- HANI, A., DJABRI, L., LALLAHEM, S. ET MANIA, J. 2003. Identification des axes d'écoulement souterrains dans les systèmes aquifères du bassin de Tindouf et des plaines de Annaba-Bou-teldja. *IAHS Publ.* n°. 278, pp. 29-34.
- IDROTECNO, 1979. Etude hydrogéologique de la région de Tindouf. *Rapport final IDROGE/AO-623*, 76 p.
- LAMOUREUX, C. AND HANI, A. 2006. Identification of groundwater flow paths in complex systems aquifer. *Hydrol. Process.* 20, pp. 2971-2987.
- MELLOUL, A. 1992. The "Principal Components" statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification: *J. of Hydrol.*, v. 140, pp. 49-73.
- MELLOUL, A. 1995. Use of Principal Components Analysis for studying deep aquifers with scarce data - Application to the Nubian sandstone aquifer, Egypt and Israel: *Hydrogeology Journal*, v. 3, n°. 2, pp. 19-39.
- MELLOUL, A. AND COLLIN, M. 1991. Water quality factor identification by the Principal components statistical method. *Water Sciences and Technology*, v.24, n°.11, pp. 41-50.
- PROGRESS SARL-ANNABA, 1999. Etude de rénovation du champ captant de Hassi-Abdallah (wilaya de Tindouf). *Rapport de synthèse, mission I, phase A et B*, 99 p.