

Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc)

Saidati Bouhlassa¹
Charifa Alechcheikh¹
Lahcen Kabiri^{2,3}

¹ Laboratoire radiochimie,
Département de chimie,
Faculté des sciences,
Université Med V,
BP 1014,
Rabat
Maroc
<bouhlass@fsr.ac.ma>
<charifaalaoui@yahoo.fr>

² Laboratoire des formations superficielles :
sciences du climat, de l'eau,
de l'environnement et du patrimoine
(LFS/SCEEP),
BP 509,
Boutalamine

³ Faculté des sciences et techniques,
Université My Ismail,
BP 509,
Boutalamine,
52 000 Errachidia
Maroc
<kabiri_lahcen@yahoo.fr>
<kabirou@hotmail.com>

Résumé

La nappe quaternaire, dans le bassin-versant de Rheris dans le Sud-Est marocain, est l'une des principales ressources pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable. Cette nappe peu profonde, d'une part, connaît une forte exploitation par des puits traditionnels mais surtout par ceux équipés de motopompes puissantes et, d'autre part, subit les contraintes de périodes de sécheresse répétées et longues. Les formations géologiques quaternaires qui renferment cet aquifère sont très hétérogènes du point de vue faciès et texture. Elles varient considérablement de l'amont à l'aval du bassin mais aussi de sa partie occidentale à sa partie orientale. Les faciès chimiques des eaux de cette nappe en relation avec cette hétérogénéité sont chloruré-sodique ou chloruré-calcique et bicarbonaté-calcique. Les compositions en ions majeurs dénotent des corrélations fortes entre les paires d'ions (Cl^- , $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$), (SO_4^{2-} , Ca^{2+}) et ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$). L'origine de cette minéralisation est liée à l'altération des matériaux aquifères (dissolution des évaporites chlorurés du gypse et des carbonates), au phénomène de dédolomitisation par les précipitations et au retour des eaux d'irrigation. La pollution nitrique, bien que générale, mais surtout alarmante autour des agglomérations humaines, indique l'impact sur la nappe de l'utilisation intensive des fertilisants et surtout de la pratique généralisée des fosses septiques pour les rejets domestiques.

Mots clés : eau souterraine, hydrogéologie, Maroc, minéralisation, qualité de l'eau, salinité.

Abstract

Origin of mineralization and deterioration of ground water quality of the shallow quaternary aquifer in the Rheris basin (Errachidia, Morocco)

Hydrochemical investigations were carried out in the Rheris area, South Eastern Morocco, to assess the quality of the shallow aquifer. This area is situated in an arid type of climate with annual precipitation less than 120 mm. The quaternary aquifer constitutes the main water resource for water supply and agricultural activities. A total of 21 representative water points were sampled to monitor the water chemistry for various ions. Positive correlations were established between the following pairs of

Tirés à part : L. Kabiri.

ions: $(Cl^- + Na^+ + K^+ + Mg^{2+})$, (SO_4^{2-}, Ca^{2+}) and $(HCO_3^- + SO_4^{2-}, Ca^{2+} + Mg^{2+})$. Water presents a spatial variability of chemical facies (Na^+-Cl^- , $Ca^{2+}-Cl^-$ and $Ca^{2+}-HCO_3^-$) which is in relation to their interaction with the geological formation of the basin. The study indicates that the salinization of the aquifer is controlled by the dissolution of evaporate (halite and gypsum), dolomite and calcite, as well as by irrigation water return and water precipitation. The nitric pollution of water is the result of intensive use of fertilisers and a generalised practice of sceptic soil-absorption systems of wastewater disposal in the region.

Keywords: ground water, hydrogeology, Morocco, mineralization, salinity, water quality.

Introduction

Géographie

Le bassin-versant de Rheris est limité à l'est par le bassin de Ziz, à l'ouest par le bassin de Toudgha, au nord par la chaîne du Haut Atlas et au sud par l'Anti-Atlas. Il a pour coordonnées Lambert, X1= 530, X2 = 590 ; Y1 = 490 ; Y2 = 550 (figure 1).

Ce bassin est marqué, d'une part par des altitudes variables de 800 à 1 200 m qui diminuent du nord vers le sud et, d'autre part, par un climat semi-aride à forte influence continentale, vu sa localisation à plus de 600 km à l'est de l'océan Atlantique. La température peut atteindre 50 °C en été dans sa partie méridionale et 0 °C pendant l'hiver dans sa partie septentrionale. Son ouverture vers le sud accentue l'aridité et les phénomènes d'évaporation [1-4].

Les précipitations moyennes enregistrées de 1970 à 2000 indiquent une diminution du nord au sud de 120 à 60 mm/an.

La population est d'environ 120 000 habitants et se répartit sur une superficie totale de plus de 2 000 km². Leurs principales ressources économiques sont l'agriculture, le commerce et le salariat. Plus de 55 % de la population exerce une activité agricole et développe une culture bien adaptée aux conditions écologiques de la région (cultures arbo-fruitières, maraîchère, fourragère, légumineuse et céréalières) et un élevage bien caractéristique et assez varié. Cette activité est toutefois liée directement à la disponibilité de l'eau (oueds, sources, *khet-tarats*¹).

¹ Galerie drainante qui amène par gravité l'eau de la nappe phréatique à la surface du sol.

Le réseau hydrographique principal est constitué par l'oued Rheris qui prend naissance aux sommets du Haut Atlas. Son écoulement s'effectue d'ouest en est avant de devenir nord-sud. Ses principaux affluents sont l'oued Tarda à l'est et l'oued Toudgha à l'ouest. Ce dernier a un parcours nord-sud, traverse les gorges de Toudgha et s'écoule d'ouest en est à partir de la ville de Tinghir. Il se jette dans l'oued Rheris non loin du *ksar*² Touroug sous le nom de oued Ferkla (figure 2).

La région, est marquée par une croissance urbaine accélérée, l'amélioration relative du niveau de vie et l'extension continue des périmètres irrigués publics et privés. Cette

² *Ksar* : ensemble de bâtiments de terre entourés de murailles, le *ksar* est un type d'habitat traditionnel présaharien.

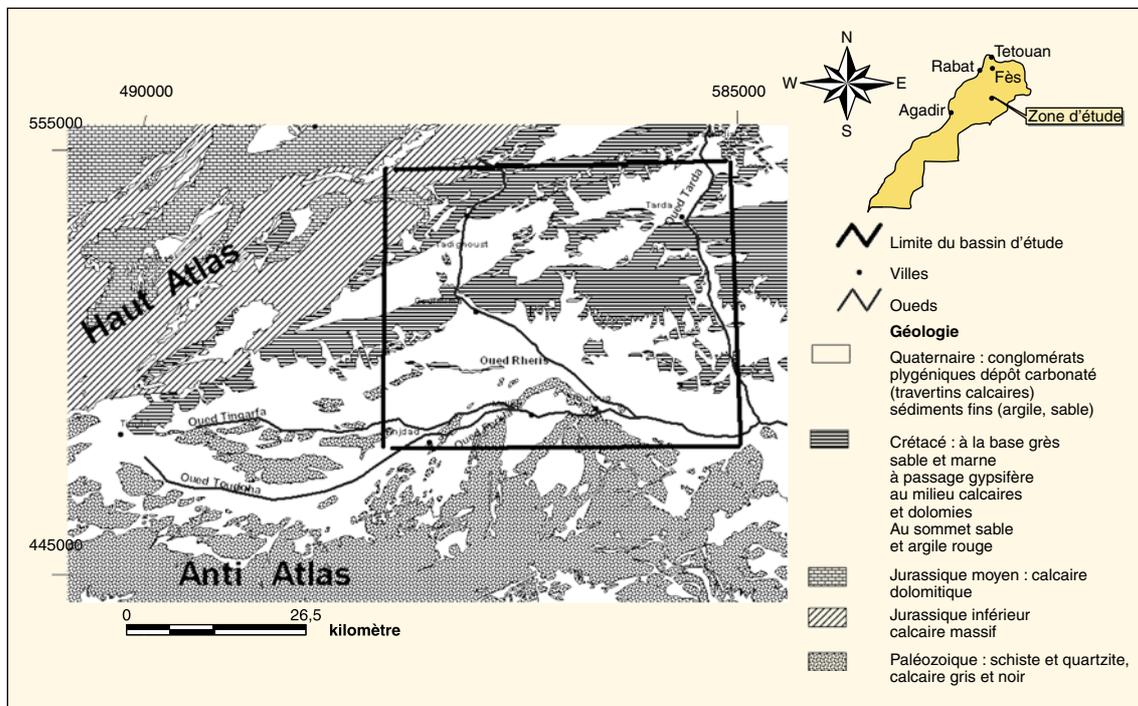


Figure 1. Carte géologique et localisation de la zone d'étude.

tendance a eu pour conséquence une augmentation sensible de la demande en eau.

Géologie

Du point de vue géologique (figure 1), cette région est limitée au nord par le flanc sud du Haut Atlas et au sud par l'Anti-Atlas. Trois unités morphostructurales peuvent être distinguées du nord vers le sud [2,5-7] :

- le flanc sud du Haut Atlas formé essentiellement de calcaire et dolomite de l'Aalénien et de Dogger séparés par le Toarcien marneux ;
- le bassin crétacé au centre qui se présente comme un synclinorium dissymétrique, est constitué de dépôts carbonatés du Turonien, grés-sableux à intercalation de gypse de l'Infra-cenomanien et de sable argileux avec des dépôts d'évaporites et des formations gypsifères du Sénonien ;
- la plaine, occupée par des dépôts quaternaires où parfois affleurent des travertins et des niveaux grés-schisteux du Paléozoïque et/ou du Précambrien. Les formations du Quaternaire reposent directement sur l'Infra-cenomanien au nord (région de Goulmima-Tadighoust et nord de Ferkla) et sur le Paléozoïque au sud (région de Toudgha-Ferkla).

La répartition de l'eau dans la région est liée à la structure géologique et aux conditions climatiques. Les ressources en eau

proviennent du Jurassique et du Crétacé au nord, des zones fissurées et altérées du Paléozoïque et/ou du Précambrien au sud [2,8] mais également des nappes phréatiques (nappes alluviales ou du Quaternaire). Ce sont celles-ci qui font l'objet de la présente étude car elles sont les plus sollicitées et les plus sensibles aux fluctuations climatiques et aux actions anthropiques.

Différentes techniques, telles que les *oughrouss*³ et les *khattarats*, ont été utilisées par l'homme de ces régions depuis l'Antiquité pour exploiter parcimonieusement l'eau [1-4]. Mais à partir des années 1950, l'extraction par motopompes a exacerbé la pression sur la ressource [2,3]. Les écoulements de plus en plus temporaires et les débits très irréguliers des cours d'eau s'ajoutent aux périodes de sécheresses prolongées pour accentuer la surexploitation de la nappe phréatique [1-4,8].

Le bilan global de la situation hydraulique actuelle du bassin de Rheris [2] qui fait apparaître des déficits pendant les dernières années, est le suivant :

- eaux de surface : 84 Mm³ ;
- eaux souterraines : 100 Mm³ ;
- écoulement en aval : 37 Mm³.

³ Système de puisage au moyen d'une outre bousculante dite *djou* à traction animale ou humaine.

La confrontation des disponibilités en eau et des consommations actuelles de la zone montre un dégagement d'un volume de 37 Mm³ à l'aval [2]. Ce volume n'est pas réellement un excès puisque les différentes palmeraies du bassin laissent apparaître un déficit chronique en eau. L'irrigation consomme pour toute la région 98 % de l'eau disponible et 2 % seulement servent pour l'eau potable [2].

Hydrogéologie

La disponibilité de la ressource et l'approvisionnement des populations en eau en quantité suffisante et en qualité acceptable sont devenus un défi difficile à relever dans la région, sans une meilleure connaissance du fonctionnement hydrogéologique des aquifères et particulièrement du Quaternaire. Cela afin de contribuer à la définition des consignes de gestion durable de la ressource et faire face à la menace sérieuse d'une désertification dans la région.

En plus, le problème de la salinisation des eaux se pose, vu le contexte géologique et climatique de la région.

Les sels sont des composés chimiques formés par la combinaison d'ions positifs, par exemple sodium (Na⁺), potassium (K⁺), calcium (Ca²⁺) ou magnésium (Mg²⁺), avec des ions négatifs tels que chlorures (Cl⁻), sulfates (SO₄²⁻) ou bicarbo-

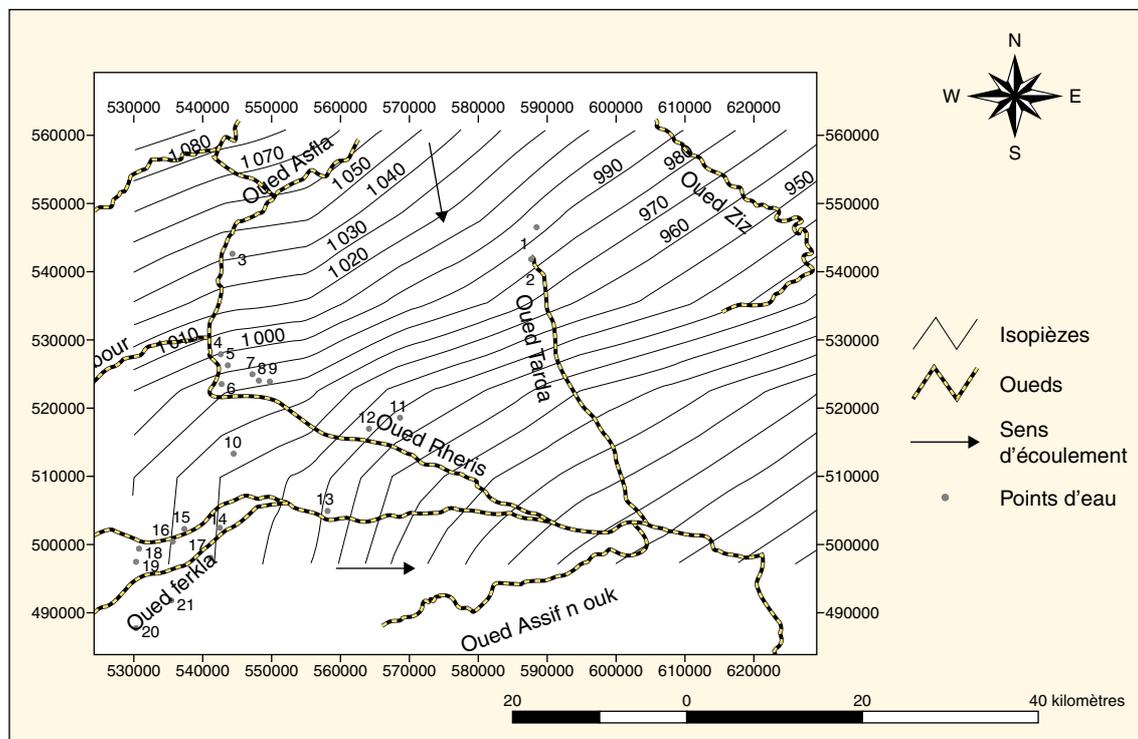


Figure 2. Carte piézométrique de la nappe quaternaire (21 janvier 2004) et localisation des points d'eau.

nates (HCO_3^-). Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) sont connus collectivement comme étant des ions majeurs. Les concentrations d'ions majeurs sont des descripteurs de base de la qualité de l'eau sur lesquels se fondent bien des critères d'utilisation de l'eau (eau potable ou eau destinée à des fins agricoles et industrielles). La problématique de la salinité se pose avec acuité surtout dans les zones arides et semi-arides où la pluviométrie est faible et l'évaporation considérable [9,10].

Le calcium est le cation le plus commun trouvé dans les eaux de surface. Il dépend principalement de la géologie (dépôts de carbonates ou de gypse présents, etc.).

Dans les régions arides et semi-arides [9,10], l'évapotranspiration produit une hausse de la teneur en sels (salinisation) des eaux de surface et l'augmentation des concentrations de sodium et de calcium. La teneur en sodium par rapport à la teneur en calcium constitue un descripteur clé de l'eau destinée à l'irrigation.

La teneur en sels dissous est régulée par la météorisation de quelques minéraux clés (chlorure de sodium et gypse, carbonates et silicates, par ordre décroissant de solubilité) ; ainsi, les concentrations de matières dissoutes totales (MDT) et d'ions sont liées aux types de roches.

La concentration des ions sulfates (SO_4^{2-}) est très variable dans les eaux de surface, où elle dépend des minéraux contenant du soufre. Elle a considérablement augmenté dans certaines régions du monde, en grande partie à la suite de l'intensification des activités industrielles et agricoles. Lorsque les minéraux contenant du soufre sont plus abondants, comme dans les schistes par exemple du Paléozoïque de Tafilalet, la teneur en SO_4^{2-} peut dépasser le seuil de 400 mg/L précisé dans la directive de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) relative à l'eau potable.

Présentation générale de la nappe quaternaire phréatique du Quaternaire

Les formations quaternaires qui abritent cette nappe se répartissent le long des grands oueds de la région, notamment l'oued Rheris qui prend naissance dans le Haut Atlas et ses affluents qui sont l'oued Tarda à l'est et l'oued Toudgha (Ferkla) à l'ouest.

Le long de l'oued Rheris, l'âge des formations quaternaires (figure 1) va du Pléistocène inférieur (Moulouyen) à l'Holocène [2,4].

Le Pléistocène inférieur est formé de conglomérats polygéniques et hétérométriques dont les éléments très arrondis sont issus des formations carbonatées d'âges jurassique ou crétacé. Ces éléments ont

été charriés par l'oued Rheris, depuis le Haut Atlas, sur de grandes distances comme le suggèrent leur nature et leur usure [2,4].

Les dépôts du Pléistocène moyen (Amirien) sont des conglomérats très consolidés et des encroûtements carbonatés [2,4].

Les formations du Pléistocène supérieur (Tensiftien et Soltanien), débutent par des conglomérats sur lesquels se dépose un ensemble sédimentaire de texture fine (limon, argile et sable) [2,4].

Plus en aval, dans la plaine, les dépôts deviennent de plus en plus fins (argile, limon et sable fin) [2,4].

La minéralogie de la fraction argileuse indique la présence de la palygorskite dans les dépôts du Pléistocène supérieur [2,4] et la dominance des minéraux lourds d'origine volcanique [2].

La diversité lithologique ainsi que les variations de l'épaisseur de ces dépôts qui est de l'ordre d'une quinzaine de mètres au sud de Tadighout dans la partie amont du bassin, et de 6 mètres environ à l'aval, font que cette nappe présente des caractéristiques hydrodynamiques et chimiques complexes et variables de l'est à l'ouest et de l'amont à l'aval du bassin versant.

Les essais de pompages effectués dans certains forages et puits ont donné des transmissivités variables, entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $9,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ qui sont à lier aux variations de faciès (Direction régionale de l'hydraulique d'Errachidia). Les coefficients d'emménagement sont faibles, de 10^{-3} à 10^{-4} . Ils rappellent les caractéristiques d'une nappe captive ou semi-captive. La carte piézométrique de la région montre deux sens d'écoulement préférentiels : nord-ouest vers sud-est et ouest vers est (figure 2).

Méthode de prélèvement et matériel d'analyse

Échantillonnage et analyse

Vingt et un points d'eau (puits fonctionnels) ont été échantillonnés le long de trois profils en respectant le sens de l'écoulement (figure 2) :

– profil 1 : formé par le bras Rheris, représenté par les points d'eau 3 à 11 ;

– profil 2 : selon l'axe Toudgha-Ferkla, ou ouest-est constitué des points d'eau 12 à 21 ;

– profil 3 : avec deux points d'eau (1, 2) prélevés le long du confluent Tarda.

Les mesures de température, de pH, de conductivité et d'alcalinité ont été effectuées localement sur les échantillons d'eau fraîchement prélevés.

Les teneurs en anions majeurs ont été déterminées au laboratoire par chromato-

graphie liquide, sur des échantillons filtrés (filtres de $0,45 \mu\text{m}$). Les concentrations cationiques sont obtenues par analyse par absorption atomique des échantillons d'eau, filtrés et conservés par acidification à pH légèrement inférieur à 2, par ajout de quelques gouttes d'acide nitrique de qualité analytique.

Un strict respect des procédures d'échantillonnage et d'analyse conduit à une précision de 2 à 4 % sur les teneurs des ions et à une balance ionique généralement inférieure à 4 %, à l'exception du point 8 qui présente une valeur de la balance ionique supérieure à 4 % mais qui reste tout de même acceptable (6,6 %). Les compositions et les propriétés physico-chimiques des eaux des différents points sont données aux tableaux 1 et 2.

Résultats et discussions

• Caractéristiques physico-chimiques

Température et pH

Les températures de l'eau relevées dans l'ensemble du bassin sont généralement comprises entre 19 et 24 °C. Quarante-vingt-dix pour cent des points d'eau présentent toutefois une température circonscrite au domaine 19-21 °C.

Les valeurs de pH fluctuent entre 6,4 et 7,6, avec de très faibles variations d'un point d'eau à l'autre dans chaque profil. Ces valeurs de pH inférieures à la seconde acidité (soit 10,33) de l'acide carbonique sont en faveur de la forme bicarbonatée des carbonates dissous.

Salinité des eaux dans le bassin

La figure 3 illustre les variations des sels dissous (TDS, ou concentration totale de sels dissous) dans les trois profils échantillonnés ; on y distingue deux domaines bien différenciés :

– le premier renferme presque l'ensemble des points d'eau du bassin, il est caractérisé par des teneurs en sel qui varient de 500 à 3 000 mg/L ; ses eaux appartiendraient à la classe II ou de qualité potable ;

– le second est constitué des autres points (3, 8, 9, 20) présentant des concentrations en sels supérieures à 3 000 mg/L, de classe III ou à usage limité.

Cette différence reflète des compositions ou natures différenciées des matériaux aquifères et une inhomogénéité de la puissance de l'aquifère quaternaire, conjuguée à une forte évaporation, dans les deux profils.

La concentration totale des sels solubles et les proportions relatives de sodium, calcium, magnésium, bicarbonate, constituent les éléments déterminants de la qualité de l'eau pour les usages agricoles. Le tableau 2 rapporte les paramètres SAR (taux d'adsorption de sodium) et SCR (carbonate de sodium résiduel) relatifs à ces variables.

Tableau 1. Résultats des analyses hydrochimiques des eaux de la nappe quaternaire en meq/L

Point d'eau	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
1	0,007	0,452	0,084	5	1,825	0,797	0,265	3,246	3,292
2	0,007	12,883	0,137	9,8	5,058	14,789	0,182	4,164	9,154
3	0,003	24,139	1,338	13,025	9,117	27,229	2,323	7,443	11,75
4	0,001	12	0,131	9,6	8,5	15,686	0,321	6,311	6,25
5	0,004	16,87	0,228	10,2	9,083	18,714	0,16	6,721	7,563
6	0,001	10,983	0,139	9	4,05	12,274	0,115	6	6,729
7	0,004	21,661	0,172	14	8,917	26	0,156	7,525	7,792
8	0,01	21,87	0,199	14,05	10,131	31,886	0,282	7,836	12,813
9	0,004	33,104	0,553	19,45	16,817	48,971	1,742	8,557	13,906
10	0,001	11,409	0,317	8,82	5,267	11,314	1,258	7,754	6,25
11	0,005	10,504	0,279	14,03	8,1	12,629	0,274	6,639	15,25
12	0,003	5,552	0,099	7	3,442	7,286	0,169	5,443	3,875
13	0,007	8,383	0,786	8,6	5,467	4,8	0,871	17,836	1,625
14	0,003	4,039	0,076	6,75	4,25	5,314	0,955	6,525	2,083
15	0,007	17,387	0,901	10,4	12,558	20,171	0,877	10	8,646
16	0,003	3,013	0,052	6,95	3,617	6,086	0,513	3,607	2,896
17		7,117	0,187	12,2	8,917	11,029	1,137	6,721	7,104
18	0,006	8,457	0,219	4,65	5,1	7,6	0,24	7,279	3,479
19	0,002	13,913	0,388	14,2	9,5	10,943	2,432	18,246	8,042
20	0,005	24,148	0,225	12,85	21,058	30,714	3,887	11,754	10
21	0,002	7,361	0,162	6,4	6,075	8,171	0,273	8,164	3,97

NH₄⁺ : ammonium ; Na⁺ : sodium ; K⁺ : potassium ; Ca²⁺ : calcium ; Mg²⁺ : magnésium ; Cl⁻ : chlorures ; NO₃⁻ : nitrates ; HCO₃⁻ : bicarbonates ; SO₄²⁻ : sulfate.

Tableau 2. Analyses hydrochimiques des eaux de la nappe quaternaire

Point d'eau	Nom	T °C (eau)	Ph	Cond Us/cm	Profondeur	TDS	BI %	SAR	SCR
1	P Pait khelifa	20,6	7,6	590,0	22,0	15,0	-1,8	0,2	-3,6
2	PM Tarda	20,6	7,6	2 400,0		56,2	-0,8	4,7	-10,7
3	S Med Barabi	19,0	7,4	4 095,0	21,0	96,4	-1,4	7,3	-14,7
4	Magamane	20,5	7,1	2 605,0	15,0	58,8	2,8	4,0	-11,8
5	Ait y Atman	20,4	6,9	3 140,0	29,0	69,5	4,6	5,4	-12,6
6	Taltfraout	23,6	7,4	2 180,0		49,3	-1,9	4,3	-7,1
7	Ait Mouch	20,5	6,9	4 115,0	21,0	86,2	3,8	6,4	-15,4
8	Boutanfit	19,6	7,2	4 220,0	20,0	99,1	-6,6	6,3	-16,3
9	Monhoya	20,2	7,1	6 315,0	18,0	143,1	-2,3	7,8	-27,7
10	Anfar	19,9	7,0	2 220,0	11,0	52,4	-1,7	4,3	-6,3
11	Aouina	20,5	7,1	2 695,0	5,0	67,7	-2,9	3,2	-15,5
12	Ait baMaati	21,0	7,5	1 480,0	6,6	32,9	-2,1	2,4	-5,0
13	isilf	21,2	7,0	1 840,0	11,0	48,4	-4,6	3,2	3,8
14	El Khorbate	20,1	7,2	1 235,0	19,0	30,0	0,8	1,7	-4,5
15	Asrir	19,3	7,1	3 615,0	17,0	80,9	1,7	5,1	-13,0
16	Sat	21,0	7,6	1 100,0	23,0	26,7	2,0	1,3	-7,0
17	Gardmite	20,2	7,1	2 235,0	25,0	54,4	4,4	2,2	-14,4
18	Sidi Houari	20,7	7,8	1 500,0	17,0	37,0	-0,5	3,8	-2,5
19	Igli	20,6	6,5	3 100,0	15,0	77,7	-2,3	4,0	-5,5
20	Mellaab	20,9	7,2	4 950,0	14,0	114,6	1,5	5,9	-22,2
21	Touroug	24,0	7,3	1 715,0		40,6	-1,4	2,9	-4,3

Cond Us/cm : conductivité en microsiemens/cm ; TDS : concentration totale de sels dissous en meq/L ; BI : balance ionique ; SAR : taux d'adsorption de sodium ; SCR : carbonate de sodium résiduel.

Nitrates

Le taux des nitrates est variable d'un point d'eau à l'autre au sein d'un même profil (tableau 1).

Les graphiques des variations des nitrates en fonction de Cl⁻ et TDS ne montrent pas de corrélation linéaire simple. Toutefois, on remarque une tendance à

l'augmentation des chlorures et de la TDS à des concentrations en nitrates constantes ; c'est le cas des points d'eau 4, 5, 6, 7, 8, 11 dans le profil 1 et

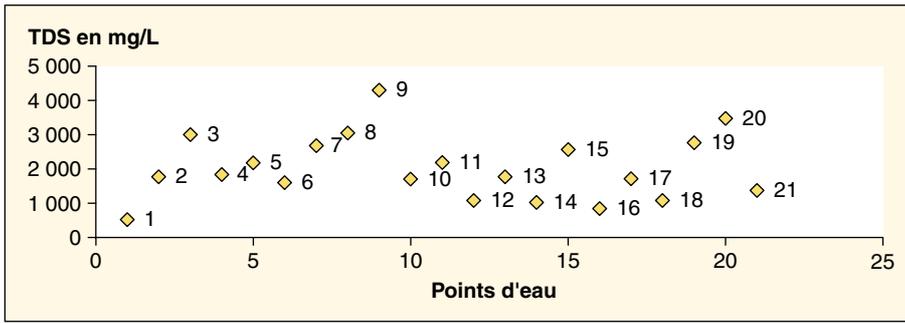


Figure 3. Répartition de la salinité totale dans le bassin.
TDS : concentration totale de sels dissous exprimée en mg/L.

des points d'eau 12, 18, 21, dans le profil 2.

Cette variation semble indiquer une recharge par le retour des eaux d'irrigation concentrées en engrais azotés et une dissolution des évaporites chlorurés accumulés dans la zone non saturée constituée de dépôts aux perméabilités variables. Plus les dépôts sont fins, limoneux et argileux, plus le temps de résidence de l'eau est grand et plus la dissolution des chlorures est importante, ainsi que le confirment les caractéristiques géologiques rapportées précédemment qui indiquent une variation de lithologie de l'amont à l'aval. Les autres points d'eau mettent en évidence une relative augmentation des nitrates avec les chlorures ou la TDS. Cette tendance à une concentration en nitrates parallèle aux chlorures ne peut pas s'expliquer par une simple évaporation qui aurait conduit à une variation simultanée mais non continue des teneurs en NO_3^- et Cl^- car les conditions climatiques qui gouvernent l'évaporation sont identiques dans toute la zone. En revanche, la situation de ces points d'eau coïncide avec la présence d'agglomération humaine approvisionnée en eau potable et dépourvue de réseau d'assainissement.

Dans ces villages, l'utilisation généralisée des fosses septiques pour la récupération des eaux usées constituerait une source d'apport externe et expliquerait le taux élevé des nitrates autour de ces localités. Il ressort de cet aperçu que les épandages d'engrais azoté constituent le facteur essentiel de la pollution des eaux de la nappe phréatique de cette région, auquel s'ajouterait la pollution par les rejets domestiques.

• **Faciès hydrochimiques**

L'analyse de la composition en ions majeurs et leurs distributions dans le diagramme de Piper (figure 4) permettent de distinguer les principaux faciès chimiques des eaux :

– dans le profil 1, le faciès est chloruré-sodique, à l'exception du point d'eau 11 qui est chloruré-calcique ;

– dans le profil 2, nous relevons trois faciès : un faciès chloruré-calcique représenté par les points 12, 16, 17 ; un faciès chloruré-sodique caractéristique des points d'eau 20, 15, 18 ; et un faciès bicarbonaté-calcique relatif aux points 13, 14, 19 ;

– dans le profil 3, le point 1 est bicarbonaté-calcique alors que le point 2 est chloruré-sodique.

Les faciès des eaux (chloruré-sodique ou chloruré-calcique et bicarbonaté-calcique) sont généralement liés aux matériaux aquifères et à l'origine des eaux.

Ces faciès semblent indiquer une dissolution des carbonates, des évaporites particulièrement chlorurés des formations quaternaires formant la matrice de l'aquifère, et probablement des échanges cationiques de (Mg, Ca)/Na sur les argiles.

• **Origine de la minéralisation des eaux**

Corrélation entre les ions

La figure 5 indique une corrélation linéaire positive entre les cations ($\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$) et l'anion chlorure avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,9$). La pente de la droite de corrélation est quasiment égale à 1 mais l'ordonnée à l'origine est positive : cela

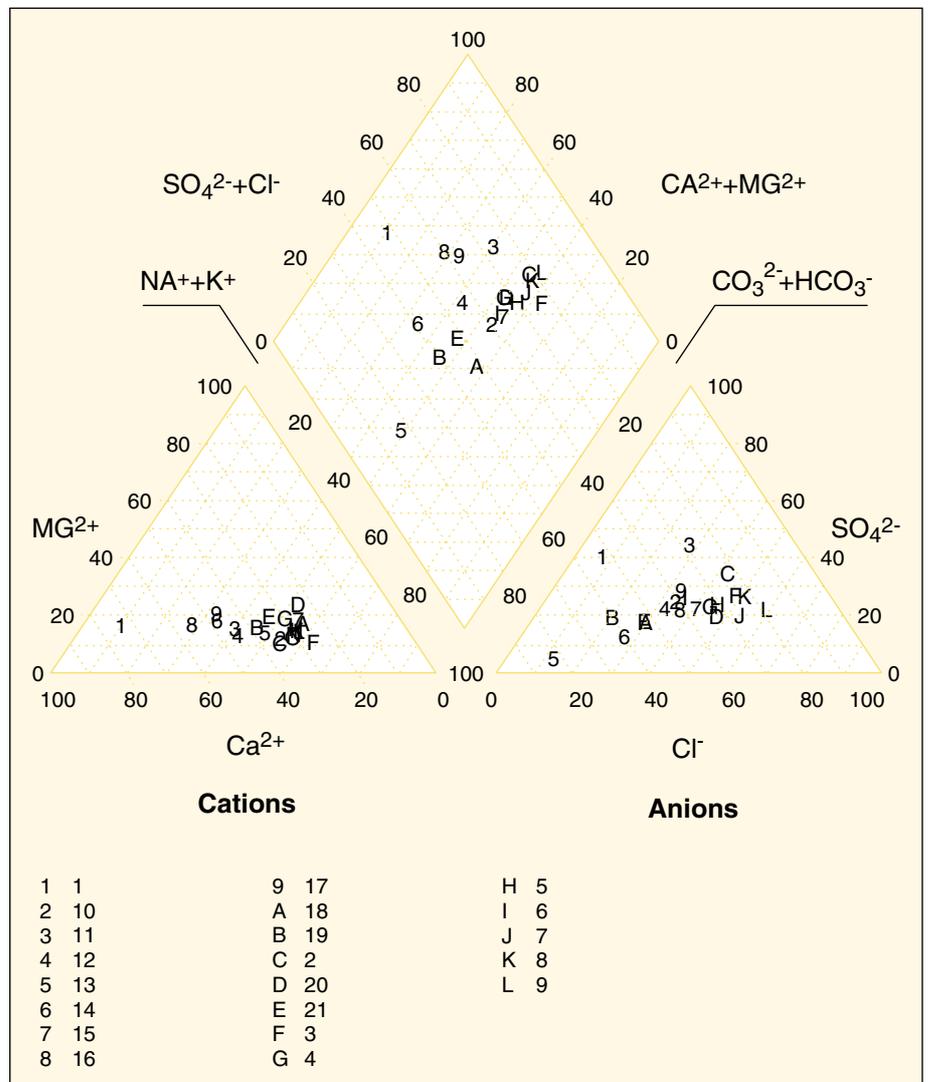


Figure 4. Faciès chimique de l'eau d'après le diagramme Piper.

tend à prouver que la totalité des chlorures provient de la dissolution des chlorures de Na^+ , Mg^{2+} , K^+ mais qu'une très faible proportion de ces cations pourrait provenir de la dissolution d'autres minéraux.

Par ailleurs, la variation de Ca^{2+} en fonction de SO_4^{2-} (figure 6) montre une bonne corrélation linéaire ($R^2 = 0,72$). Le coefficient directeur ainsi que l'ordonnée à l'origine de la droite de régression semblent indiquer qu'une faible partie de Ca^{2+} provient d'une origine autre que le gypse et l'anhydrite mais que la quasi-totalité des anions sulfates sont liés à ces minéraux. La figure 7 qui rapporte la variation de $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ en fonction de $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ indique qu'une partie de calcium et magnésium pourrait bien provenir de la dissolution des carbonates de la matrice aquifère.

Indice de saturation

L'équilibre des eaux avec la matrice est souvent exprimé soit par le taux de saturation [$S = (\text{PAI}/K_s) * 100$], soit par l'indice de saturation [$I_s = \text{Log}(\text{PAI}/K_s)$], où PAI est le produit d'activité des ions concernés et K_s le produit de solubilité du minéral considéré. L'indice de saturation est la forme la plus utilisée pour les eaux souterraines.

L'eau est en équilibre avec un minéral lorsque $I_s = 0$, elle est sous-saturée lorsque $I_s < 0$ et sursaturée lorsque $I_s > 0$. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, celui-ci aura tendance à se dissoudre.

Le code NETPATH qui a été utilisé pour le calcul des indices de saturation [11] à partir des activités ioniques conduit aux données rapportées dans le tableau 3 et la figure 8.

Les résultats ainsi obtenus indiquent, une sous-saturation par rapport au gypse dans tout le bassin et une sursaturation par rapport à la dolomite dans tout le bassin.

À l'exception du point 18, l'ensemble des eaux du bassin sont sursaturées en calcite. Les résultats obtenus montrent que l'évolution de l'indice de saturation de la calcite, de la dolomite et du gypse en fonction de la concentration en sulfates (figure 9) est marquée par :

- une tendance vers la saturation en gypse lorsque les concentrations en sulfates augmentent ;
- une sursaturation en dolomite et calcite, quelle que soit la teneur en sulfate à l'exception bien sûr du point 18 sous-saturé en calcite.

La dissolution du gypse a pour conséquence l'augmentation de la concentration des ions Ca^{2+} et celle du rapport des concentrations Ca/Mg . Lorsque ce dernier a une valeur supérieure à 0,5 - ce qui est le cas de l'ensemble des points - le phénomène de dédolomitisation est favorisé [12] :

$$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}^{2+} \Leftrightarrow 2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+}$$

Cette réaction explique la sursaturation en calcite et dolomite et la sous-saturation par rapport aux sulfates de calcium.

Conclusion

Les eaux du bassin quaternaire des régions de Goulmima, Tadighoust, Tindjad sont caractérisées chimiquement par les faciès suivants :

- chloruré-calcique et chloruré-sodique ;
- bicarbonaté-calcique.

La distribution spatiale de la salinité est très variable d'un point à l'autre et dépend largement du matériau aquifère. Elle varie aussi en fonction de la position géographique du site de prélèvement (amont ou aval du bassin).

Deux sources de minéralisation peuvent être mises en évidence :

- la première concerne la dissolution des évaporites chlorurées et du gypse ;
- la seconde, en revanche, est liée au phénomène de la dédolomitisation comme en témoignent la sous-saturation des eaux du bassin en gypse, leur sursaturation en calcite et dolomite et l'augmentation des teneurs en magnésium.

En effet, cette salinité reste modérée pour la plupart des points d'eau, d'où la possibilité de leur utilisation pour l'irrigation, mais la contamination par les nitrates devient préoccupante et leur concentration élevée dans certains puits est à lier aux activités anthropiques. Cette pollution proviendrait de l'usage des engrais azotés auquel s'ajoute la pollution par les rejets domestiques. L'absence de réseaux

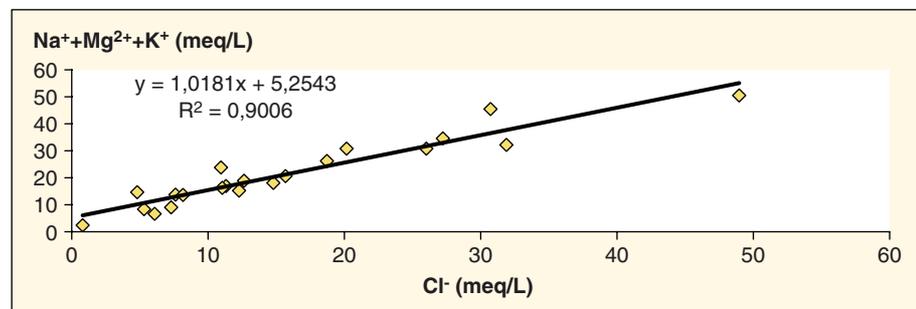


Figure 5. Variation de $(\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+)$ en fonction de Cl^- .

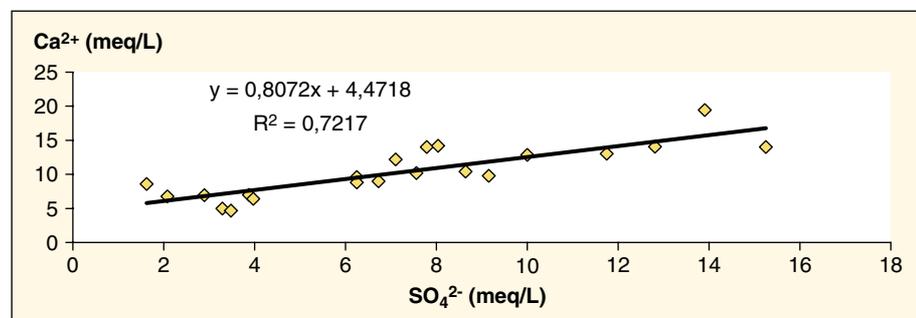


Figure 6. Variation de Ca^{2+} en fonction de SO_4^{2-} .

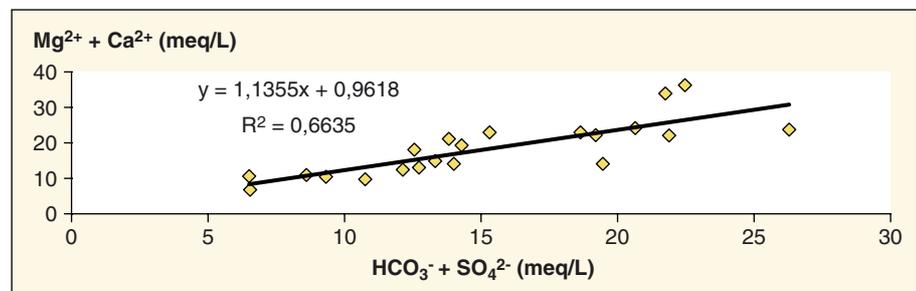


Figure 7. Variation de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ en fonction de $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ meq/L.

Tableau 3. Indice de saturation des eaux de la nappe quaternaire vis-à-vis de quelques minéraux

N	IRE	Nom	TDS en mg/L	Calcite	Aragonite	Dolomite	Gypse	Anhydrite
1	764/47	P Paït khelifa	518,1	0,328	0,181	0,287	- 1,332	- 1,567
2	765/47	PM Tarda	1 770,3	0,566	0,419	0,915	- 0,858	- 1,093
3	746/47	S Med Barabi	3 006,5	0,613	0,465	1,126	- 0,773	- 1,012
4	673/47	Magamane	1 836,5	0,218	0,071	0,455	- 1,048	- 1,283
5	671/47	Ait y Atman	2 178,7	0,026	- 0,121	0,072	- 0,973	- 1,208
6	759/47	Taltfraout	1 596,8	0,509	0,364	0,78	- 0,994	- 1,219
7	697/47	Ait Mouch	2 675,6	0,206	0,059	0,29	- 0,877	- 1,111
8	663/47	Boutanfit	3 052,7	0,426	0,279	0,772	- 0,71	- 0,947
9	659/47	Monhoya	4 295,8	0,427	0,28	0,866	- 0,654	- 0,899
10	1369/56	Anfar	1 703,2	0,174	0,027	0,188	- 1,055	- 1,292
11	1525/56	Aouina	2 187,2	0,291	0,144	0,411	- 0,577	- 0,813
12	1500/56	Ait baMaati	1 080	0,453	0,307	0,676	- 1,244	- 1,478
13	1360/56	isilf	1 768,9	0,513	0,366	0,913	- 1,633	- 1,866
14	1445/56	El Khorbate	1 025,1	0,269	0,122	0,403	- 1,517	- 1,753
15	1449/56	Asrir	2 563,6	0,389	0,241	0,918	- 0,964	- 1,202
16	1438/56	Sat	843,5	0,405	0,259	0,604	- 1,347	- 1,581
17	1476/56	Gardmite	1 713	0,378	0,231	0,687	- 0,911	- 1,147
18	1357/56	Sidi Houari	1 082,2	- 0,327	- 0,473	0,498	- 2,457	- 2,691
19	1358/86	Igli	2 766	0,141	- 0,006	0,183	- 0,874	- 1,1
20	1361/56	Mellaab	3 473,6	0,61	0,463	1,518	- 0,946	- 1,179
21	1841/56	Touroug	1 368,5	0,424	0,279	0,941	- 1,329	- 1,553

IRE : inventaire des points d'eau ; TDS : concentration totale de sels dissous exprimée en mg/L.

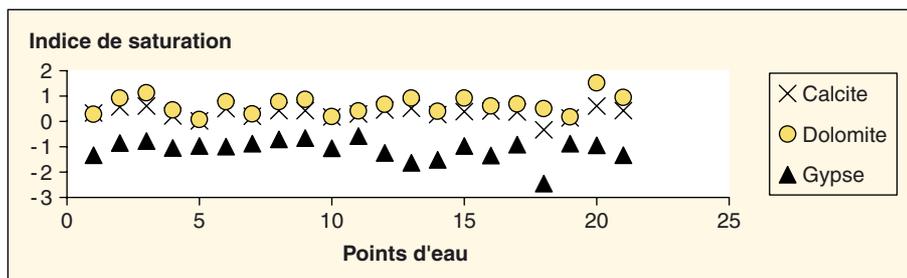


Figure 8. Variation de l'indice de saturation des différents minéraux.

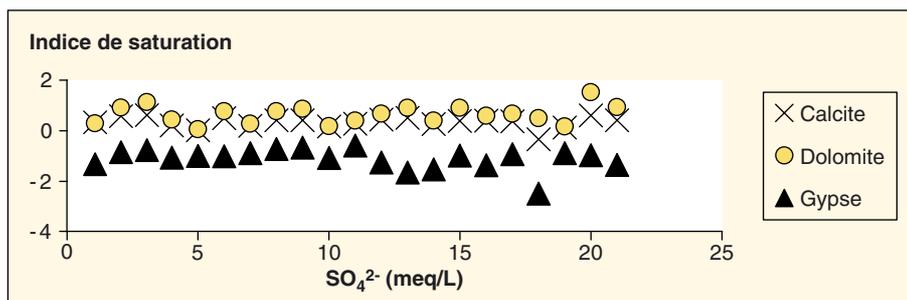


Figure 9. Variation de l'indice de saturation en fonction de la concentration de SO_4^{2-} .

d'assainissement et/ou de stations de traitement des eaux usées domestiques, et le recours généralisé aux fosses hygiéniques, conjugués aux très faibles précipitations (< 140 mm/an) et à la faible puissance de l'aquifère constituent un risque majeur et prééminent de détérioration de la potabilité et de la qualité de la réserve

en eau pour les usages agricoles. Une utilisation raisonnée des engrais, doublée d'une meilleure régularisation des eaux des crues épisodiques des oueds pour une réalimentation plus efficace de la nappe, contribuerait certainement à une amélioration de la ressource en quantité et qualité. ■

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement la direction régionale de l'hydraulique Guir-Rheris-Ziz d'Errachidia (DRHE) pour sa collaboration fructueuse à la réalisation de ce travail.

Références

1. Kabiri L. *Gestion de la pénurie de l'eau dans le périmètre de Tinjdad*. Action Research Program (ARP) On Participatory Irrigation Management (PIM). ORMVA/TF, 30 mai-3 juin 2005, Errachidia, Maroc.
2. Kabiri L. *Contribution à la connaissance, la préservation et la valorisation des Oasis du Sud marocain : Cas de Tafilalt*. Thèse d'habilitation universitaire, facultés des sciences et techniques, Errachidia, université My Ismail, Maroc, 2004.
3. Kabiri L. *Impact des changements climatiques et anthropiques sur les ressources en eau dans l'oasis de Ferkla*. Rapport d'activité, Bourse pour les jeunes chercheurs scientifiques, MAB & UNESCO, 2003.
4. Boudad L, Kabiri L, Weisrock A, et al. Les formations fluviales du Pléistocène supérieur et de l'Holocène dans la «Plaine» de Tazoughmit (Oued Rheris, piémont sud-atlasique de Goulmima, Maroc). *Quaternaire* 2003 ; 14 : 139-54.
5. El Ouali A. *Modalité d'alimentation et échange entre aquifères de piémonts en conditions climatique arides. Cas des systèmes aquifères du Haut Atlas. Bassin crétacé d'Errachidia (Maroc)*. Thèse d'Etat, université Mohammed V, EMI, Rabat, Maroc, 1999.

6. Amharref M. *Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée du Ziz (Province d'Errachidia, SE du Maroc). Incidence respective de la sécheresse et du barrage Hassan Addakhil sur les ressources en eau en aval.* Thèse, université Besançon, 1991.

7. Bellouti F, Ben Dhia H. La modélisation de la nappe de Turonien du bassin d'Errachidia-Boudenib (Sud-Est marocain) : outils d'aide à la gestion des aquifères. *Africa Geosciences Review* 1997 ; 4 : 355-60.

8. Margat J. Les recherches hydrogéologiques et l'exploitation des eaux souterraines au Tafilalt. *Mines et Géologie (Rabat)* 1958 ; (4) : 43-68.

9. Nezli IE, Brinis NR, Labar S. *Origines de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla).* Journées scientifiques algéro-françaises (colloque de Ouargla JSAF2004), université de Ouargla, 2004.

10. Gonzalez Barrios JL, Job JO, Ahlers R. Irrigation et salinisation des sols dans la partie basse

aride du bassin Nazas-Aguanaval : le périmètre de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique). *Sécheresse* 2002 ; 13 : 244-50.

11. Plummer LN, Prestemon EC, Parkhurst DL. *NET PATH-USGS water resource investigations. Report 9+1-4078.* Reston : sn, 1991.

12. Plummer LN, Parkhurst DL, Thorstenson DC. Development of reaction models for groundwater systems. *Geochim Cosmochim Acta* 1983 ; 47 : 665-85.