



Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco)

Nordine Nouayti¹, Driss Khattach¹, Mohamed Hilali²

1 : Laboratoire des Géosciences appliquées et COSTE, Faculté des sciences, Université Mohamed premier Oujda 60000, Maroc. E-mail : nordine.svt@gmail.com et dkhatach@yahoo.fr

2 : Laboratoire de Géo-Ingénierie et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, Maroc, BP 509 Boutalamine. E-mail: hilali2@hotmail.com

Received Aug 2014, Revised 25 Jan 2015, Accepted 26 Jan 2015

*Corresponding Author. E-mail: nordine.svt@gmail.com; Tel: (+212 0672685020)

Abstract

The aim of this study is to evaluate the physical and chemical quality of groundwater in the high Basin of Ziz and identify the sources of pollution in order to map the quality of the Jurassic groundwater. Twenty water points were sampled during march 2014. Seven chemical elements were analyzed by ion chromatography: Chloride, Nitrate, Sulphate, Sodium, Potassium, Calcium and Magnesium. Thematic maps were developed using Geographic Information System (SIG) for studying and comparing the spatial distribution of the results. The groundwater flow direction is from north to south in the eastern and from west to east in the western part of the basin. The water temperature varied between 15.1 °C and 49 °C. The pH is close to neutrality, it varies between 6.65 and 7.86. Analysis of the overall quality of water reveals that 35% of checked points are showing good quality, 60% are the medium quality, and 5% are very bad quality. These waters belong to three chemical facies: chlorinated- sulfated, calcic and magnesium facies, a calcium and magnesium and bicarbonate facies and a chlorinated sodic and potassium facies. The degradation of water quality in the Jurassic aquifer of the high basin of Ziz could have geological and anthropogenic origins.

Keywords: Groundwater –Quality– Pollution –GIS –High basin of Ziz–Morocco.

Résumé

Le présent travail a pour objectif l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région du Haut bassin du Ziz et la détermination des sources de pollution en vue d'établir une cartographie de la qualité des nappes jurassiques. Vingt points d'eau ont été échantillonnés durant le mois de mars 2014. Sept éléments chimiques ont été analysés par chromatographie ionique : Chlorures, Nitrates, Sulfates, Sodium, Potassium, Calcium et Magnésium. Pour étudier et comparer la répartition spatiale des résultats, des cartes thématiques ont été élaborées en utilisant un Système d'Information Géographique (SIG). Le sens d'écoulement général des eaux souterraines est du Nord vers le Sud dans la partie orientale et de l'Ouest vers Est dans la partie occidentale du bassin. La température de l'eau varie entre 15,1 et 49 °C. Le pH est proche de la neutralité, il varie entre 6,65 et 7,86. L'analyse de la qualité globale des eaux a révélé que 35% des points contrôlés sont de qualité bonne, 60% sont de qualité moyenne, et 5% sont de très mauvaise qualité. Ces eaux appartiennent à trois faciès chimiques : un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, un faciès bicarbonaté calcique et magnésien et un faciès chloruré sodique et potassique. La dégradation de la qualité des eaux des aquifères jurassiques du Haut bassin du Ziz pourrait avoir des origines géologique et anthropique.

Mots-clés : Eaux souterraines – Qualité – Pollution – SIG – Haut bassin du Ziz – Maroc.

Introduction

Partout dans le monde, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur les ressources en eau souterraines est à la hausse, principalement en raison de la demande croissante et de la dégradation de la qualité de l'eau. L'accès généralisé à l'eau potable, l'irrigation, l'expansion urbaine, le développement industriel et le tourisme sont autant de facteurs qui font augmenter ces pressions [27-28].

Au Maroc, la disponibilité en eau est, jusqu'à présent très limitée et risquerait de diminuer fortement à long terme en raison des périodes de sécheresses prolongées. En effet, les estimations prévisionnelles effectuées par la banque mondiale en 1994 ont déclenché la sonnette d'alarme. En effet, les ressources hydriques renouvelables par habitant risqueraient de diminuer de moitié en passant de 800 m³ en 1990 à 400 m³ en 2020, classant ainsi le Maroc dans la catégorie des pays en situation de stress hydrique chronique [1]. La détérioration de la qualité des ressources en eau par prolifération des différentes sources de pollution (engrais et pesticides, rejets d'eaux usées non traitées, rejets de déchets solides non contrôlés, exploitation minière, urbanisation, etc...) constitue une menace aussi importante que celle liée au déséquilibre quantitatif.

La présente étude concerne l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des aquifères jurassiques du Haut Bassin du Ziz (Haut Atlas central du Maroc). Pour ce faire, une campagne d'échantillonnage a été entreprise en mars 2014. Les paramètres physico-chimiques, mesurés *In Situ* et au laboratoire, ont servi pour la caractérisation de ces eaux.

I. Contextes géologique et hydrogéologique

Le zone d'étude s'étend de l'extrême Est du Haut Atlas central jusqu'à la partie Ouest du Haut Atlas Oriental. Il est limité au Nord par la Haute Moulouya (Meseta orientale), au Sud par l'Anti-Atlas oriental. Il renferme des nappes superficielles et profondes.

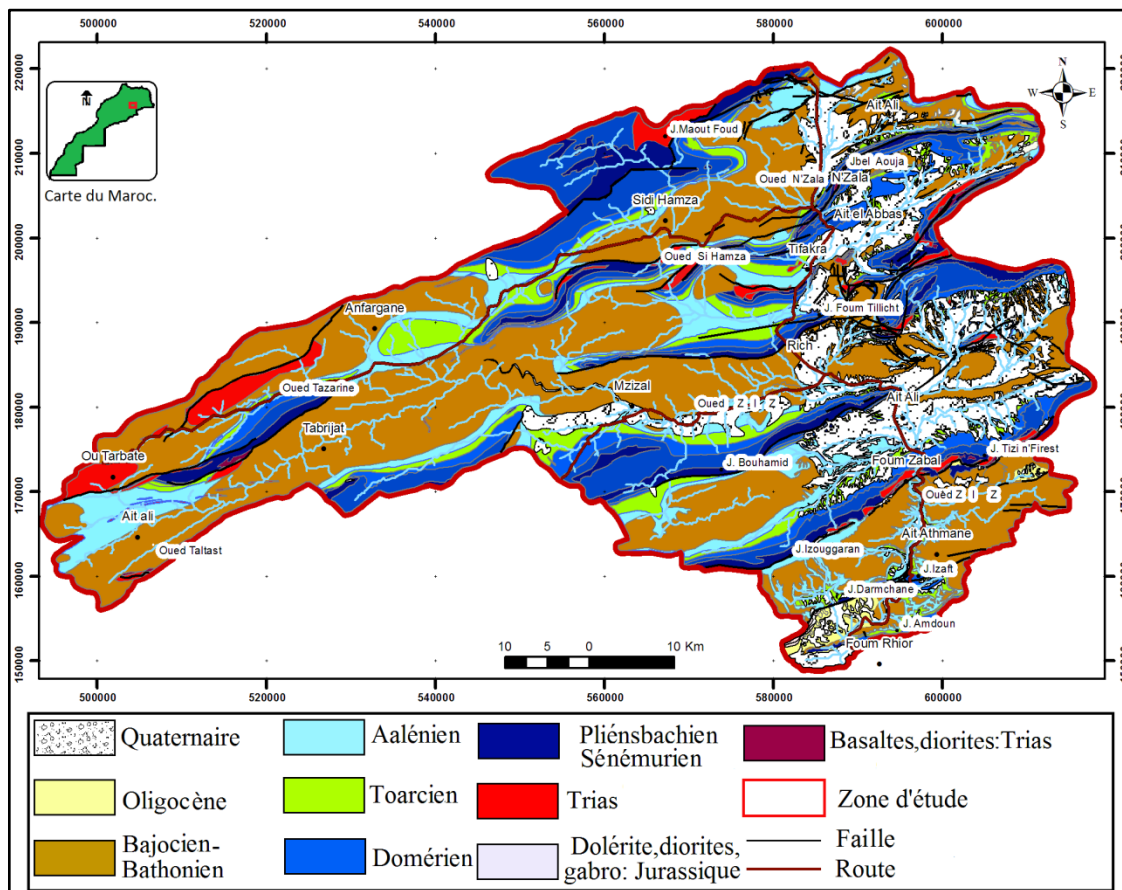


Figure. 1: Carte géologique avec situation du haut bassin du Ziz.

La carte géologique de la zone d'étude (Fig.1) a été élaborée à partir de la carte géologique de Midelt au 1/200000 [2] et de la carte géologique de Rich et Boudnib au 1/200000 [3]. Le Trias, composé de dépôts détritiques, basaltes doléritiques et parfois des évaporites, repose en discordance angulaire sur le substratum paléozoïque déformé et structuré par plusieurs phases tectoniques [4-6]. Les séries jurassiques forment la majeure partie des terrains mésozoïques du Haut Atlas. Elles reposent en concordance sur les formations rouges du Trias-Lias inférieur. Leur nature lithologique est essentiellement constituée par des dolomies, des calcaires, des alternances marno-calcaires et des dépôts détritiques silico-clastiques [5;7-9].

Sur le plan structural, le régime d'extension orienté NW-SE, qui régnait au cours des temps triasico-jurassiques, a contrôlé la formation des bassins atlasiques. Le rifting est initié à partir du Trias, alors que l'individualisation de ces bassins et la subsidence contemporaine à la sédimentation a eu lieu au cours du Jurassique. Le cadre paléogéographique et morpho-

structural est dominé à l'époque par un système de blocs basculés essentiellement vers le NW ou vers le SE. Ces derniers sont limités par des failles normales majeures NE-SW à ENE-WSW que séparent des failles de transfert WNW-ESE [10-12].

Au Tertiaire, une phase de compression bi-épisode, d'abord NW-SE puis N-S, reprend les anciennes failles normales NE-SW en failles inverses ou en décro-chevauchements sénestres. Les failles transverses WNW-ESE sont réactivées en décrochements dextres. Cette compression qui initie la fermeture des bassins atlasiques à partir de l'Éocène supérieur se concrétise au cours de l'Oligo-Miocène et du Plio-Quaternaire [4] et [12].

Sur le plan hydrogéologique, le Haut Atlas dont fait partie le Haut bassin du Ziz forme un ensemble d'unités hydrogéologiques souvent communicantes entre elles : Le Lias forme un système relativement continu et Aalénien [13]. Ces aquifères donnent naissance à plusieurs sources dont les plus importantes sont celles de Zaouiet Sidi Hamza [13]. La productivité peut dépasser les 100 L/s dans les aquifères liasiques fracturées (zones de Fom Tillicht, Tazmamart, Kheng, etc...).

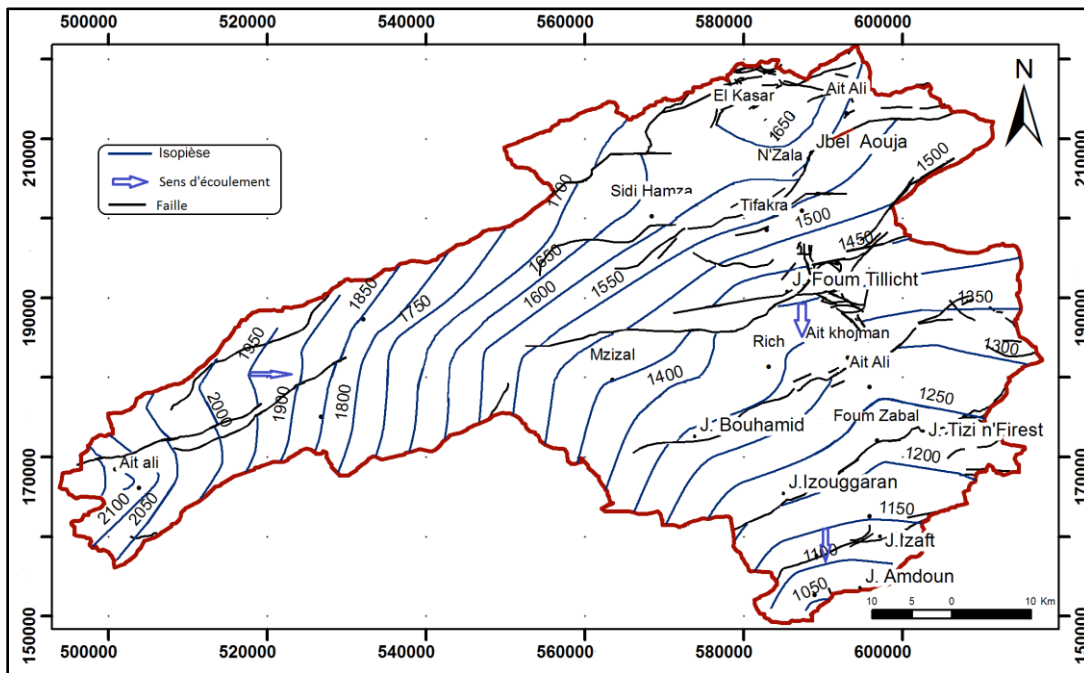


Figure. 2 : Carte piézométrique synthétique du haut bassin du Ziz(mars 2014) (coordonnées Lambert en m).

II. Matériels et méthodes

Les points d'eau (puits, forages, sources) échantillonnés ont été choisis de telle manière à couvrir l'ensemble des aquifères jurassiques du Haut bassin du Ziz. Au total vingt prélèvements pour les analyses physico-chimiques ont été effectués en mars 2014. Au niveau de chaque station, deux échantillons dans des contenants de 1litre en polyéthylène ont été prélevés. Ces points d'eau ont été localisés par leurs coordonnées Lambert déterminées par GPS. Les paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité électrique, salinité, alcalinité composite (TA), alcalinité totale (TAC)) ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde multi-paramètres. Les niveaux d'eau ont été mesurés à l'aide d'une sonde piézométrique. Les analyses chimiques des éléments majeurs (cations et anions) ont été effectuées par chromatographie ionique au laboratoire UATRS du CNRST de Rabat. Les résultats relatifs aux vingt échantillons sont présentés sous forme des cartes.

III. Résultats et discussions

3.1. Piézométrie

La profondeur de l'eau par rapport au sol, selon le relevé réalisé en mars 2014 au niveau de vingt points d'eau, varie de quelques mètres à plus de soixante mètres. L'analyse de la carte piézométrique (Fig.2) montre que le sens d'écoulement général des eaux se fait du Nord vers le Sud dans la partie orientale du bassin et de l'Ouest vers l'Est dans sa partie occidentale.

3.2. Paramètres physico-chimiques

La température de l'eau

La température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques [14]. Dans la zone d'étude, la température a présenté

une grande variation d'un point à un autre (Fig.3) avec un minimum de 15,1 °C (point 8) et un maximum de 49 °C (point 19, source Molay Ali Chrif). Ces valeurs restent acceptables pour les normes marocaines de potabilité.

Le pH

Le pH de l'eau renseigne sur son acidité et son alcalinité. Selon [15], le pH des eaux naturelles est généralement compris entre 6,6 à 7,8 et selon [16] il varie de 7,2 à 7,6. Habituellement, les valeurs du pH se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles [14]. La nature des terrains traversés par les eaux est la cause naturelle, provoquant des variations importantes du pH. L'analyse de ces eaux a dévoilé que le pH est proche de la neutralité, au niveau de l'ensemble des points d'eau, les valeurs moyennes du pH au niveau de la zone d'étude ont été dans les normes de potabilité de l'eau souterraine, toutes les valeurs ont correspondu au pH des eaux naturelles et semble être provenant des aquifères carbonatés.

La conductivité électrique des eaux

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, la conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau. Les eaux des points contrôlés sont minéralisées (Fig.5), avec des valeurs qui oscillaient entre 358,88 et 10897,79 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs importantes semblent résulter du lessivage de la roche réservoir au sein de laquelle les eaux séjournent.

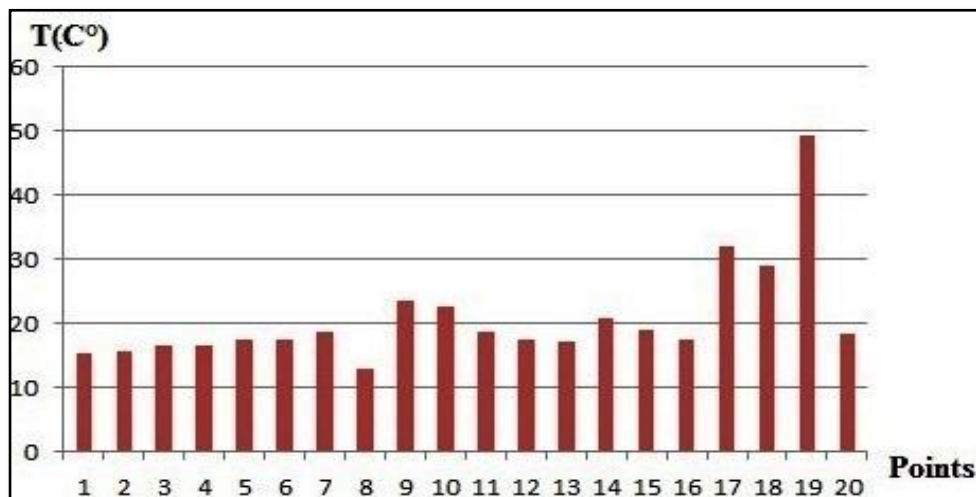


Figure 3 : Variation de la température des eaux souterraines du haut bassin du Ziz(mars 2014).

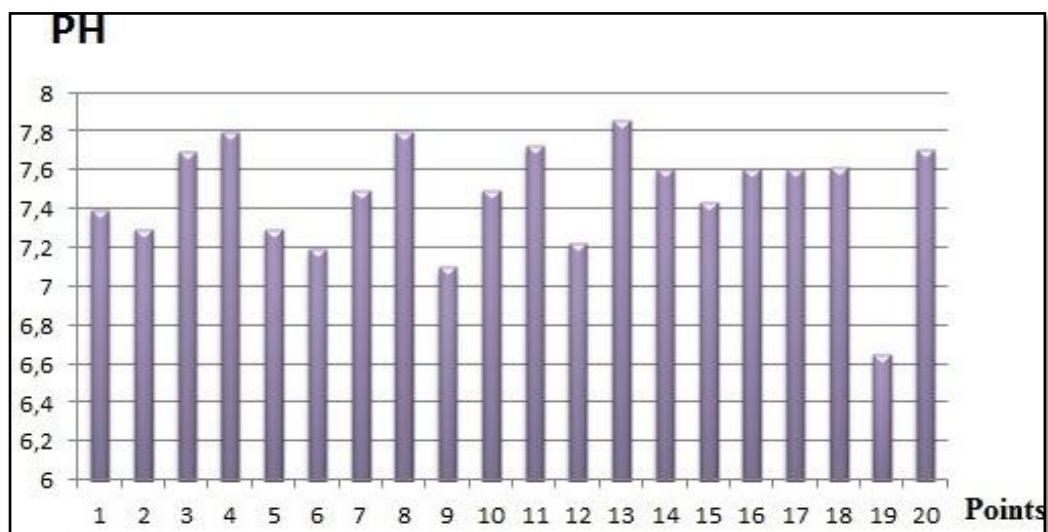


Figure 4 : Variation du pH des eaux souterraines du haut bassin du Ziz(mars 2014).

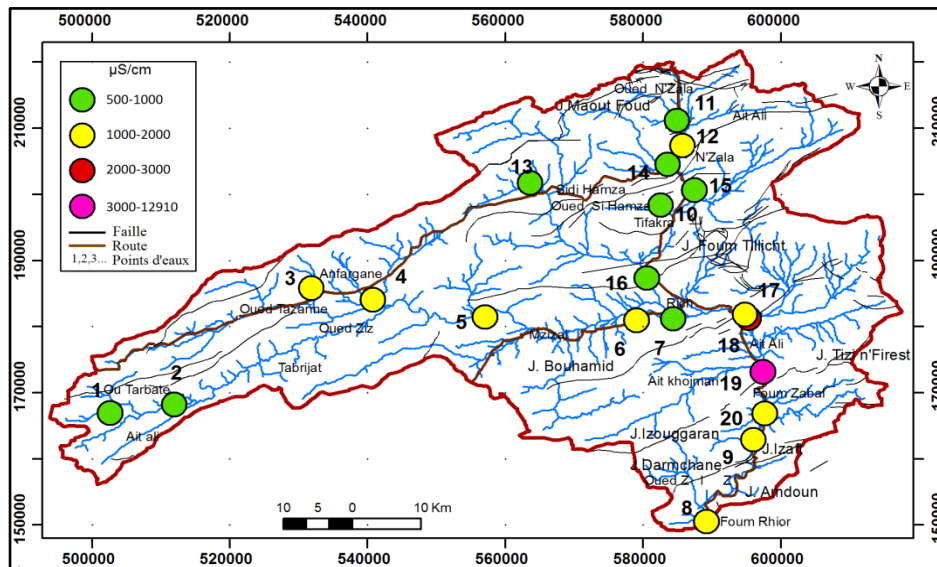


Figure 5 : Répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique(en $\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux souterraines du haut bassin du Ziz (mars 2014).

Les sulfates

Dans les conditions naturelles, les sulfates, forme de soufre dissous la plus répandue dans les eaux naturelles, ont essentiellement deux origines : géochimique et atmosphérique [17]. Du fait de la solubilité élevée des sulfates, l'eau souterraine en conditions normales peut en contenir jusqu'à 1,5 g/L [19]. L'oxydation des sulfures ainsi que la dégradation de la biomasse dans le sol constituent d'autres sources possibles. De nombreuses activités humaines et naturelles peuvent générer des apports de sulfates dans l'eau souterraine : application d'engrais sulfatés, précipitations chargées en dioxyde de soufre, etc...

Les valeurs des sulfates dans les eaux étudiées sont très variables, elles oscillaient entre 79,24mg/L à 1436 mg/L (Fig.6). Les teneurs élevées au niveau des points d'eau 2, 3, 4, 5, 8, 9, 19 et 20 semblent être liées à la formation triasique salifère mise en contact avec le réservoir aquifère par le biais d'importantes failles qui dominent la structure du haut bassin du Ziz (Fig.1). Au contact du gypse, l'eau se charge en sulfates de calcium et devient dure et impropre à la consommation, les autres points contrôlés restent dans les normes recommandées, les résultats obtenus sont similaires aux conclusions dégagées dans le cadre de l'étude concernant la région Sidi Chahed-Maroc confirmant l'origine géologique des sulfates[18].

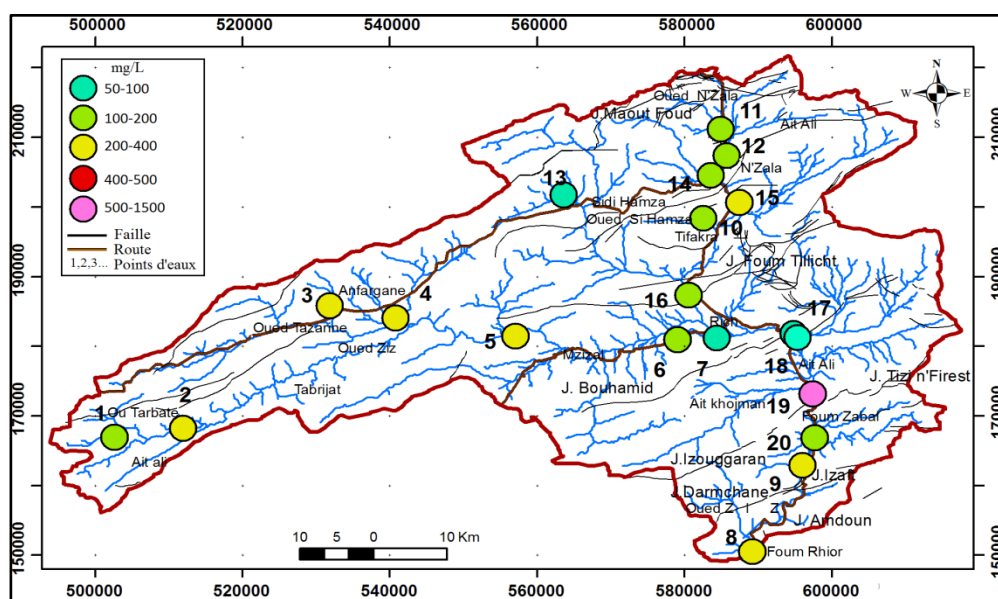


Figure 6 : Répartition spatiale des teneurs en sulfates dans les eaux souterraines du haut bassin du Ziz (mars 2014).

Bicarbonates

La teneur en bicarbonates dans les eaux souterraines dépend surtout de la présence des minéraux carbonatés dans le sol et l'aquifère, ainsi que la teneur en CO₂ de l'air et du sol dans le bassin d'alimentation [19]. La teneur en bicarbonates des eaux souterraines non soumises aux influences anthropiques, varie entre 50 et 400 mg/l [19]. Les valeurs médianes des teneurs en bicarbonates se situent autour de 302 mg/L dans le domaine habituel des eaux souterraines non polluées [19]. Les teneurs en bicarbonates des points étudiés (fig.7) variaient globalement entre un minimum de 155,55 mg/L et un maximum de 549 mg/L. Les valeurs élevées sont dues vraisemblablement à la circulation de ces eaux dans le réservoir aquifère de nature calcaro-dolomitique.

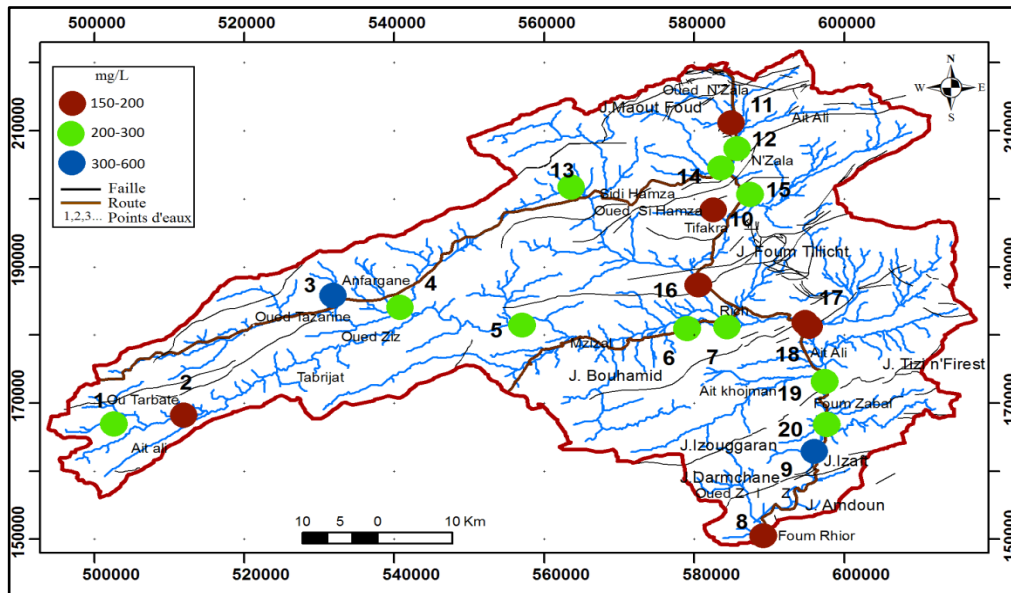


Figure 7 : Variation spatiale des teneurs en bicarbonates des eaux souterraines du haut bassin de Ziz (mars 2014).

Le calcium

Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables et sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés (terrain calcaire ou gypseux) [20]. Les teneurs en calcium des eaux contrôlées (Fig.8) variaient de 72,64mg/L à 457,88 mg/L. A l'exception du point 19 qui affichait la valeur maximale (457,88mg/L), tous les autres points étudiés ont des concentrations inférieures à la valeur maximale admissible qui est de 200 mg/L [26]. Les teneurs élevées en calcium pourraient être attribuées à la dissolution de la calcite ainsi que d'autres minéraux calciques tels que le gypse.

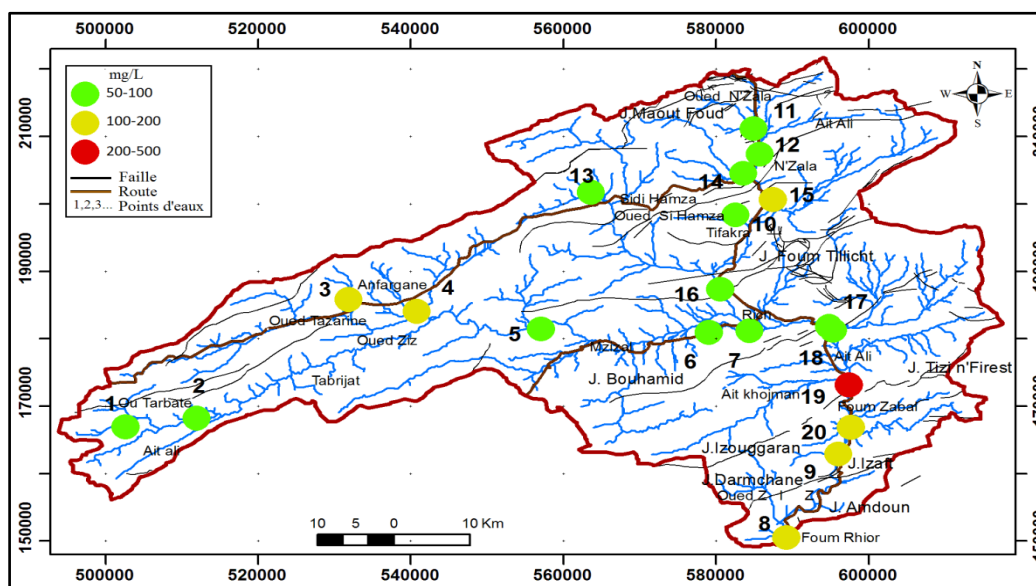


Figure 8 : Variation spatiale des teneurs en calcium des eaux souterraines du haut bassin de Ziz (mars 2014).

Chlorures

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution [21].

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. L'origine peut être naturelle[22] :

- Percolation à travers des terrains salés ;
- Infiltration des eaux marines dans les nappes phréatiques et profondes ;
- Effet de l'activité humaine ;
- Industries extractives et dérivées (soudières, salines, mines potasse, industries pétrolières...).

Les teneurs en chlorures des échantillons d'eau analysés (Fig.9) affichaient des valeurs oscillant entre 7,64mg/L et 4565,7 mg/L. Les points d'eau situés en amont du bassin sont conformes aux normes, étant donné que la concentration en chlorures est inférieure à celle recommandée par les normes marocaines dans le cas des eaux souterraines et qui est de l'ordre de 750 mg/L. En aval du bassin, les points 8, 9,17 et 18 renfermaient des eaux avec une qualité moyenne ; les teneurs oscillaient entre 300mg/L et 750 mg/L. Le point 19 montrait une teneur en chlorures qui dépassait les normes, soit 4565,7 mg/L. Ces valeurs élevées pourraient être dues au contact des eaux avec des dépôts triasiques salifères. Par ailleurs, la minéralisation des eaux souterraines augmente généralement avec le sens de l'écoulement qui est ici du nord vers le sud (Fig.2).

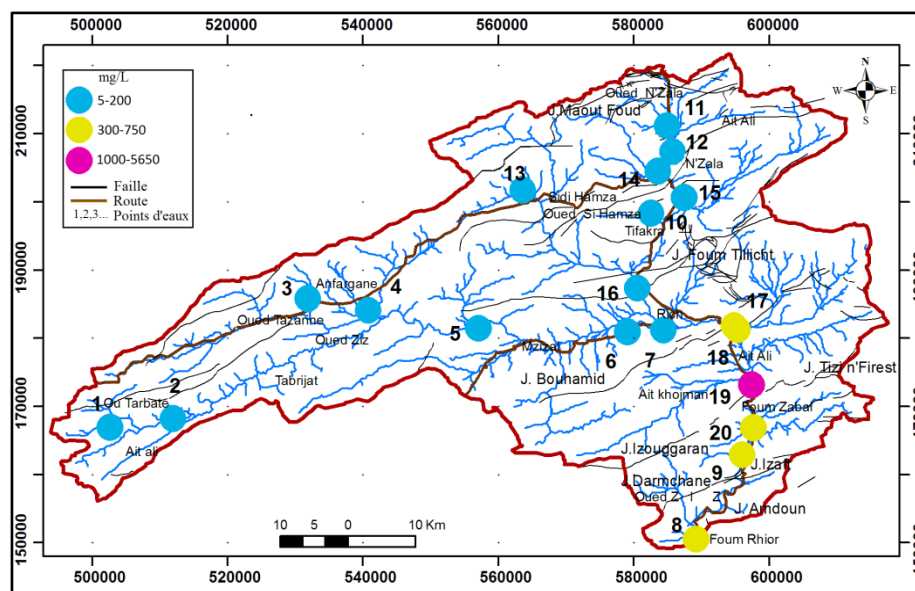


Figure. 9 : Variation spatiale des valeurs de chlorures des eaux souterraines du haut bassin de Ziz(mars 2014).

Magnésium

La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Il provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates[24].

Dans les points d'eau analysés (Fig.10), les teneurs en magnésium variaient entre 30,05 et 130,63 mg/L, et toutes les valeurs ne dépassaient pas les normes marocaines. La source du magnésium semble être liée au contact des eaux avec les roches calcaires et dolomitiques constituant le principal réservoir aquifère du haut bassin du Ziz.

Sodium

Le sodium est un élément dit conservatif car une fois en solution, aucune réaction ne permet de l'extraire de l'eau souterraine. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine, les teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres [20; 24]. Dans les eaux souterraines non polluées et sans contact avec des évaporites, la teneur en sodium se situe entre 1 et 20 mg/L[19].

L'analyse des données a montré que les teneurs moyennes en sodium dans les eaux des points étudiés variaient de 10,89 mg/L à 2584,2 mg/L (Fig.11). Nous avons remarqué que les points situés en aval dépassaient les normes de potabilités.

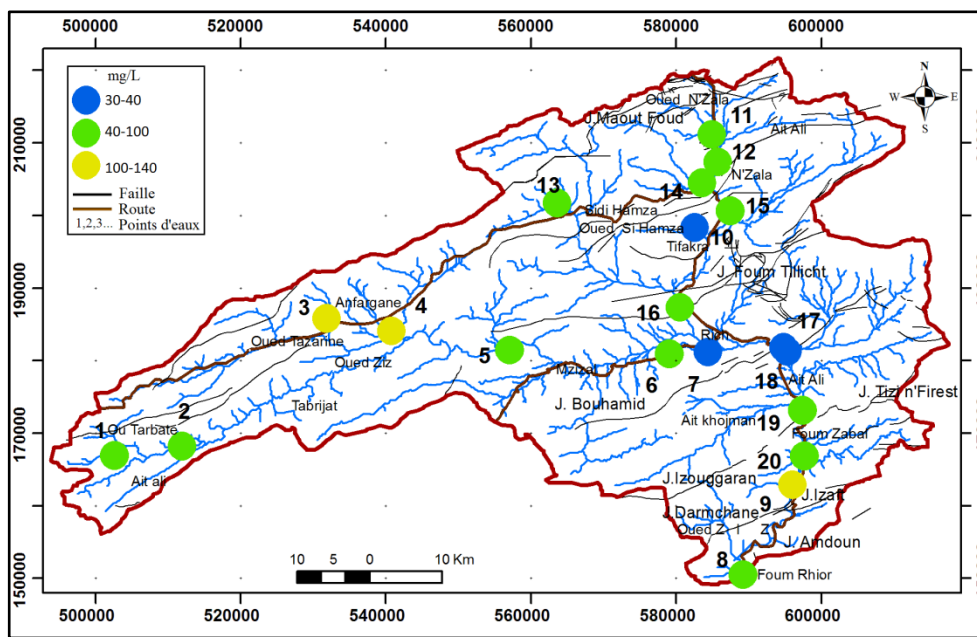


Figure. 10 : Variation spatiale des teneurs en magnésium des eaux souterraines du haut bassin de Ziz(mars 2014).

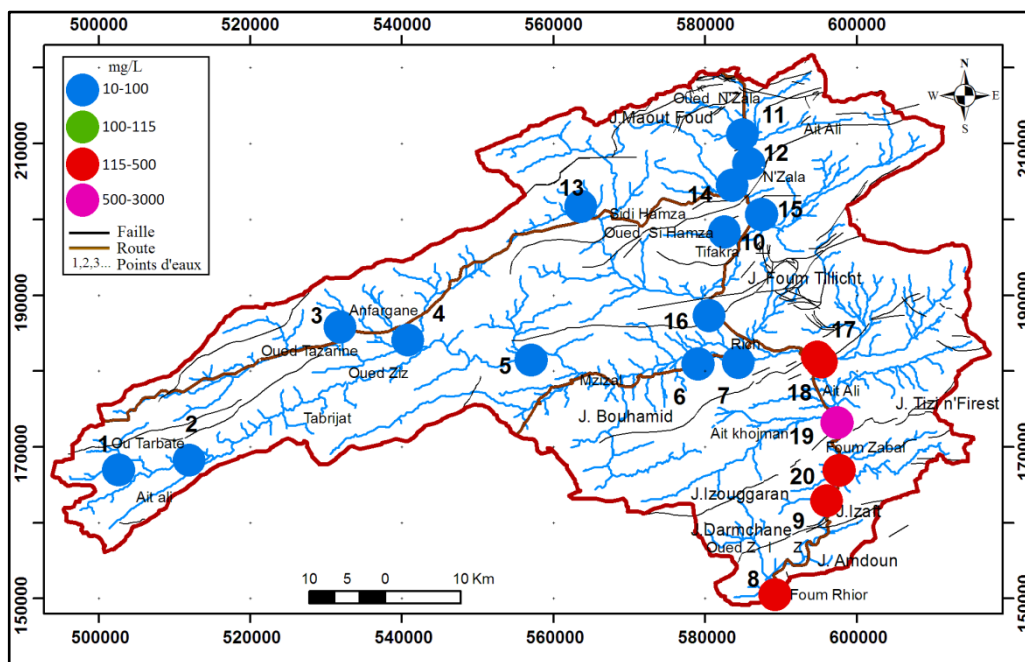


Figure. 11 : Variation spatiale des teneurs en sodium des eaux souterraines du haut bassin de Ziz(mars 2014).

Les teneurs élevées en sodium des eaux de la nappe ont la même origine que celle des chlorures. En effet, le sodium accompagne généralement la pollution due aux chlorures [25]. La figure 12 montre une bonne corrélation linéaire positive entre les deux éléments en question.

Potassium

Le potassium est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium ; il ne prend qu'exceptionnellement le troisième rang des cations [28].

Le potassium se rencontre sous forme de chlorures doubles dans de nombreux minerais tels que la corrollite et la sylvinite. On le trouve également dans les cendres des végétaux sous forme de carbonate. Le potassium est un élément indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux. L'agriculture, il est utilisé comme engrais sous forme de sulfate de potassium, de chlorure de potassium, ou encore de nitrate de potassium [25].

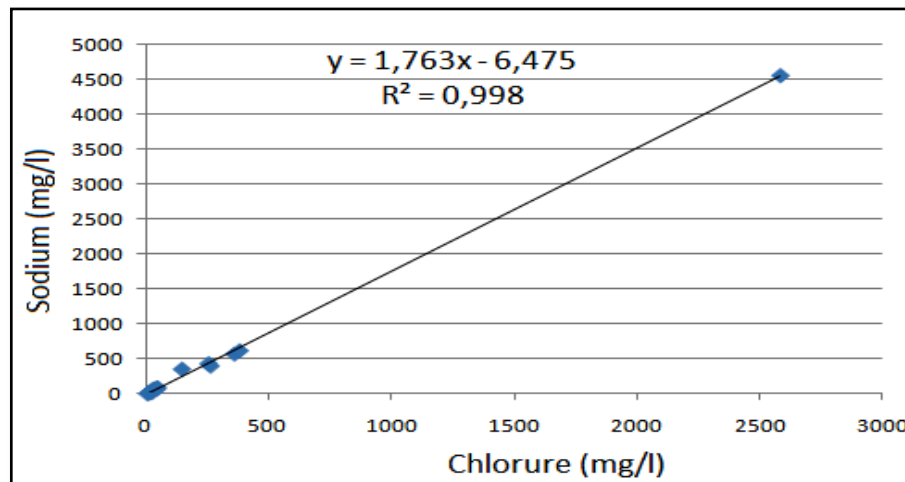


Figure.12 : Courbe de corrélation entre les concentrations des chlorures et du sodium des eaux souterraines.

La teneur en potassium est presque constante dans les eaux naturelles. Celle-ci ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/L [27]. Sa concentration dans les points d'eau contrôlés (Fig.13) variait entre 0,96mg/L et 18,82 mg/L ; elle ne dépassait pas les normes marocaines de potabilité. La valeur la plus élevée en potassium est enregistrée au niveau du point d'eau 19, soit près de 18,82 mg/L.

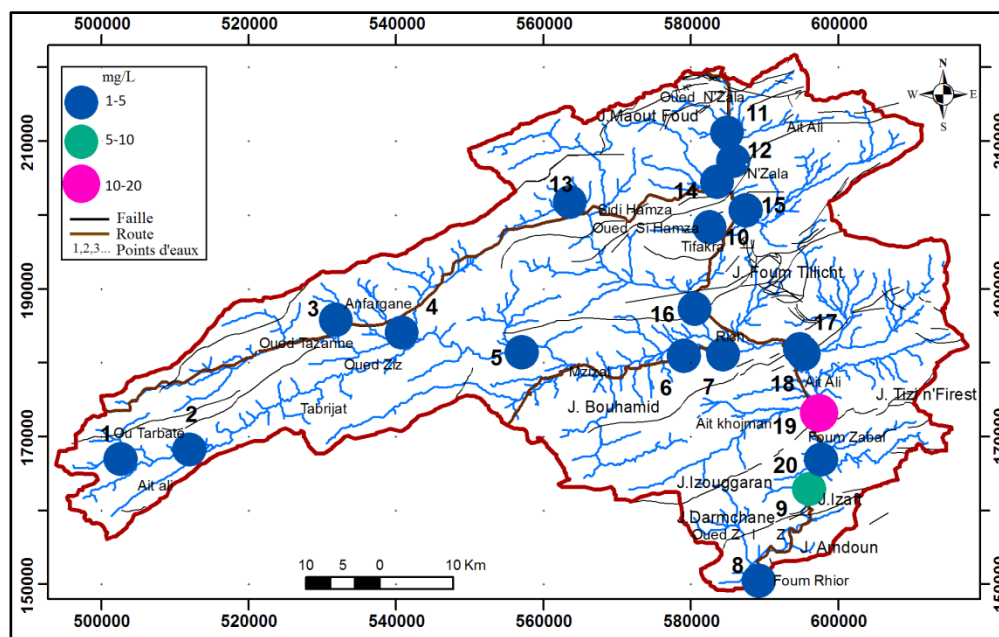


Figure. 13 : Variation spatiale des teneurs en potassium des eaux souterraines du haut bassin de Ziz (mars 2014).

Nitrates

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique, leur présence dans une eau polluée atteste que le processus d'autoépuration est déjà entamé. L'activité humaine accélère le processus d'enrichissement en cet élément sur les sols subissant l'érosion, ce qui provoque l'infiltration des eaux usées, par les rejets des industries minérales et d'engrais azoté [22].

Dans les stations étudiées et comme il est indiqué sur la figure 14 les teneurs en nitrates variaient entre 0,6mg/L et 39,46 mg/L. Elles n'ont pas dépassé les normes marocaines. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en amont du bassin. Cette dégradation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes aux points étudiés, les eaux usées, les puits perdus et les déchets des élevages. Les résultats obtenus sont similaires aux conclusions dégagées dans le cas de basse Moulouya confirmant l'origine anthropique des nitrates [23].

3.3 Faciès chimiques des eaux obtenus à partir du diagramme de Piper

Le report des résultats des analyses des eaux sur le diagramme de Piper montre une variabilité du faciès chimique (Fig.15). On distingue trois pôles :

- le premier pôle se caractérise par un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, surtout pour les points d'eau 2,4,5,6,9,10,11,12,15,16 et 20 ;
- le deuxième pôle se caractérise par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien (points d'eau 1,3,7,13 et 14), il est lié à la dissolution des calcaires des réservoirs aquifères ;
- le troisième pôle se caractérise par un faciès chloruré sodique et potassique, surtout dans les points 8, 17, 18 et 19, il est associé aux sédiments évaporitiques du Trias.

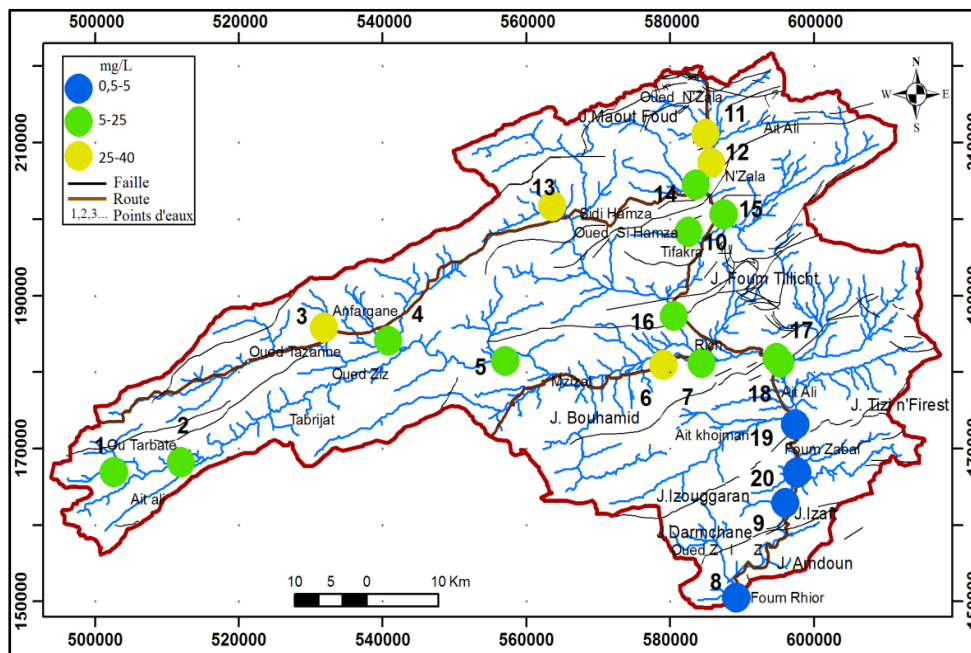


Figure. 14 : Variation spatiale des teneurs en nitrates des eaux souterraines du haut bassin de Ziz (mars 2014).

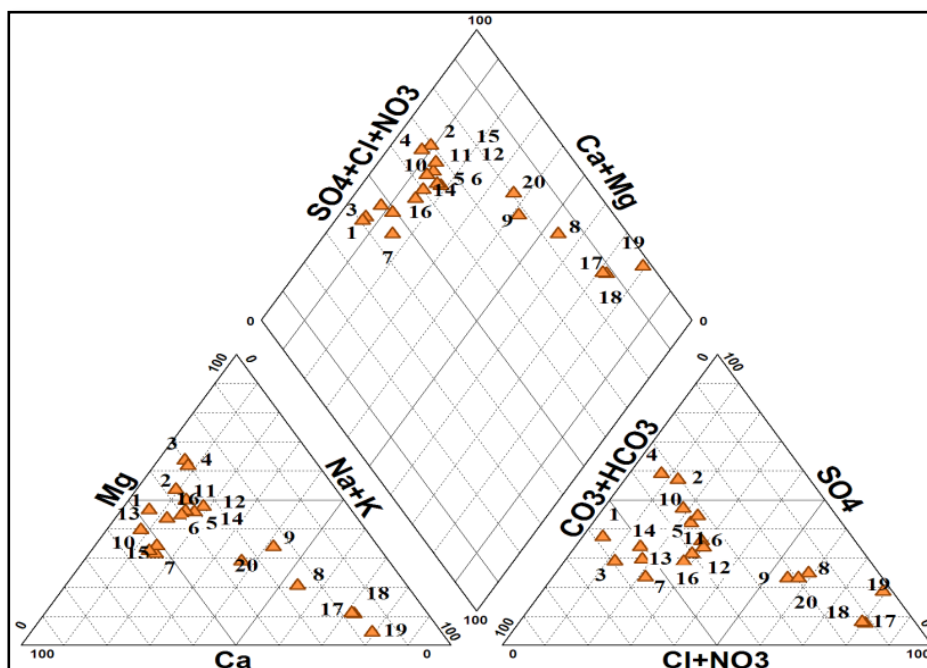


Figure. 15: Report des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper (mars 2014).

3.4 Faciès chimiques des eaux selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est une représentation graphique semi-logarithmique : sur les axes des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun des ions majeurs, la teneur réelle en mg/L est reportée sur l'axe des ordonnées, les points obtenus sont reliés par des segments de droites. L'allure graphique obtenue (Fig.16) permet de visualiser le faciès de l'eau minérale concernée. L'analyse du diagramme de Schoeller-Berkaloff nous permet de conclure que les eaux de la nappe présentaient des profils identiques, à l'exception des points d'eau 17, 18, 19 et 20 dont la concentration en chlorures, potassium, sodium et calcium est plus remarquable par rapport aux bicarbonates. Les points d'eau 8 et 9 présentaient des teneurs importantes en chlorures, potassium et sodium. Elles sont dues à l'existence d'une source de sédiments salifères.

3.5 Qualité des eaux de la nappe

L'appréciation de la qualité des eaux souterraines s'effectue par l'étude des paramètres de pollution, puis par interprétation de la qualité globale sur la base d'une grille simplifiée (Table 1) comportant trois paramètres indicateurs de pollution physico-chimique et azotée, ces paramètres sont :

- la conductivité électrique qui renseigne sur la qualité minéralogique des eaux ;
- les ions chlorures qui renseignent sur la qualité minéralogique des eaux ;
- les nitrates, principaux indicateurs d'une pollution d'eau souterraine.

Les eaux des échantillons 1, 2, 4, 5, 7, 10, 14, 15 et 16 (Table 1) présentent globalement une bonne qualité. Cet état de qualité est dû :

- A la minéralisation, avec des valeurs maximales enregistrées de 1089 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (qualité bonne) ;
- Aux teneurs en chlorures (qualité excellente) ;
- Aux nitrates, qui varient entre un minimum de 5,8 mg/L et un maximum de 19,91 mg/L (qualité bonne).

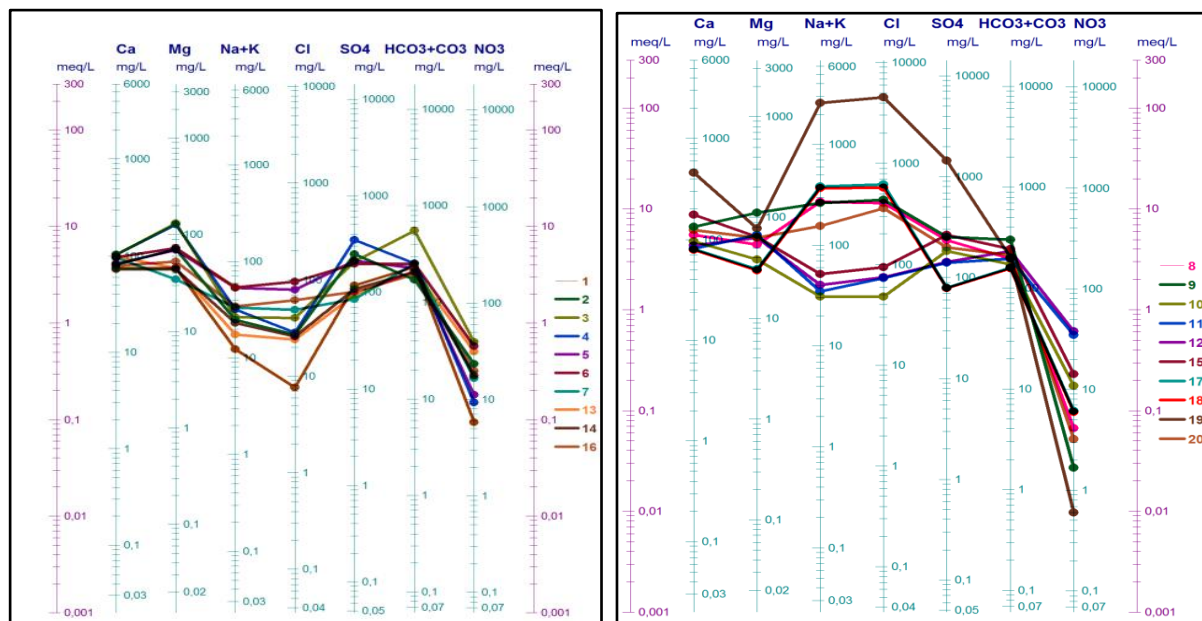


Figure. 16: Diagramme de Schoeller-Berkaloff pour des eaux souterraines du haut bassin du Ziz (mars 2014).

Table 1. Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines [26].

	Paramètres		
	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Chlorures (mg/l)	Nitrates (mg/l)
Excellente	<400	<200	<5
Bonne	400-1300	200-300	5-25
Moyenne	1300-2700	300-750	25-50
Mauvaise	2700-3000	750-1000	50-100
Très mauvaise	>3000	>1000	>100

L'analyse des échantillons 3,6, 11, 12 et 13 montrait que la qualité globale de l'eau est moyenne en raison des teneurs en nitrates qui oscillaient entre 25mg/L et 50 mg/L (Table.1). La qualité des chlorures est généralement excellente.

A l'exception du point d'eau 19 qui est de qualité très mauvaise liée aux sels dessous, les autres points (8, 9, 17, 18 et 20) ont globalement une qualité moyenne (Table.1).

L'histogramme de la figure 19 indique que 35% des points échantillonnés sont de bonne qualité, 60% sont de qualité moyenne et 5% sont de très mauvaise qualité. La répartition spatiale de la qualité globale des eaux est représentée sur la figure 18.

Table 2. Qualité globale des eaux souterraines du haut bassin du Ziz.

N° d'échantillon	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Conductivité électrique (µS/cm)	Qualité globale
1	7,64	5,8	553	Bonne
2	27,2	23,24	789,4	Bonne
3	40,44	39,46	1008	Moyenne
4	28,26	9,27	894,2	Bonne
5	78,34	11,29	884,1	Bonne
6	94,95	35,77	970,5	Moyenne
7	48,49	16,71	552,7	Bonne
8	406,88	4,13	1786,00	Moyenne
9	440,19	1,68	1089	Moyenne
10	47,83	10,89	707,5	Bonne
11	73,47	34,51	756	Moyenne
12	73,87	37,82	824,7	Moyenne
13	24,04	31,3	358,7	Moyenne
14	25,91	17,79	575,7	Bonne
15	93,75	14,3	1000	Bonne
16	61,74	19,91	746	Bonne
17	624,63	6,16	1805,00	Moyenne
18	578,61	6	2122,00	Moyenne
19	4565,7	0,6	13910,00	Très mauvaise
20	361,34	3,25	1468,00	Moyenne

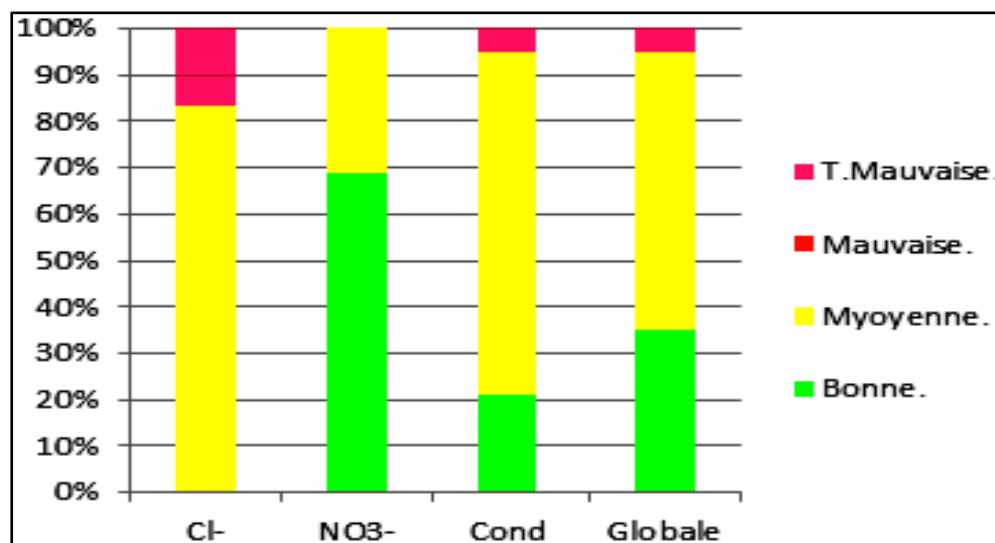


Figure. 17 : Histogramme de l'état de la qualité des eaux souterraines du haut bassin du Ziz (mars 2014).

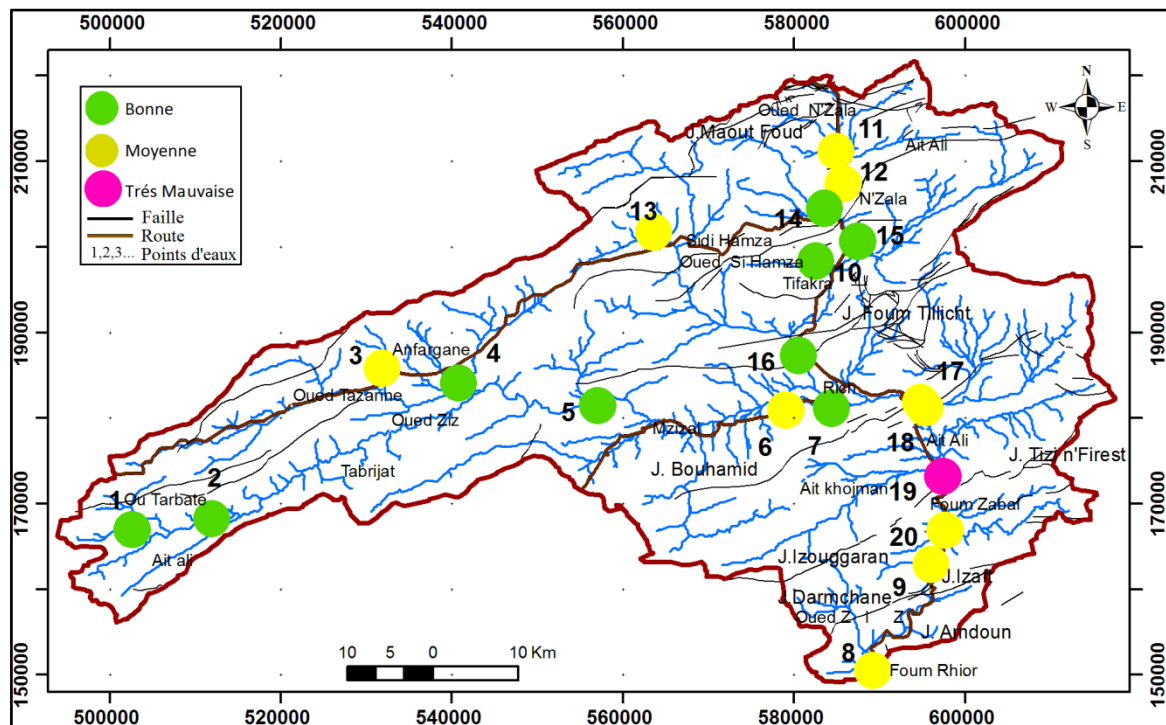


Figure. 18 : Carte de la qualité globale des eaux souterraines du haut bassin du Ziz (mars 2014).

Conclusion

Cette étude a permis une évaluation de la qualité physico-chimique des eaux des aquifères jurassiques du Haut bassin du Ziz. L'analyse des résultats a révélé que les eaux des points contrôlés sont affectées par une pollution d'origine géologique et anthropique. En amont de la zone d'étude la dégradation de la qualité des eaux est due essentiellement à la présence des nitrates qui semblent être liés aux eaux usées rejetées sans traitement et à l'utilisation des engrais. Les eaux de la partie aval du bassin sont caractérisées par des valeurs élevées de la conductivité électrique et des chlorures associées aux sédiments évaporitiques. L'analyse de la qualité globale des eaux a révélé que 35% des points contrôlés affichaient une qualité bonne, 60% ont une qualité moyenne, et 5% montrent une qualité très mauvaise. Ces eaux appartiennent à trois faciès chimiques : un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, un faciès bicarbonaté calcique et magnésien et un faciès chloruré sodique et potassique.

Bibliographie

1. Berdai. Synthèse des travaux réalisés au Maroc sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Division des études, service des expérimentations des essais et de la normalisation, Rabat (1997).
2. Gonzague D et Despujols M. Carte géologique de Midelt au 1/200 000 publiée par le service géologique du Maroc (1939).
3. Lyazidi M, Eyssautier L, Marçais J, Choubert G, Faillot P. Carte géologique de Rich et Boudnib au 1/200 000 publiée par le service géologique du Maroc (1956).
4. Michard A. Elément de géologie marocaine. *Notes et Mém. Ser. Géol. Maroc*, 252 (1976) 408.
5. Charrire A. Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinental : le Moyen Atlas au S de Fès (Maroc). Thèse Doct. Etat, Toulouse, (1990) p589.
6. Hinaje S. Apport de l'analyse de la tectonique cassante tardi et post-panafricane à la modélisation de la mise en place des minéralisations dans la boutonnière de Bou-Azzer (Anti-Atlas, Maroc). Thèse de 3ème cycle, Fac. Sci. Rabat, (1995) p238, + carte h.t au 1/2000.
7. Hinaje S., Charroud M. A. E Fedan B. Evolution géodynamique méso-cénozoïque du Moyen-Atlas : l'exemple de la transversale Tihboula-Boulemane-Anjil. 9° Colloque des Bass. Sédi. Maroc., (1991) 28-29.
8. Benjelloun F. Evolution jurassique du Moyen-Atlas central : contrôles tectono-eustatique et climatique de la dynamique sédimentaire, thèse Etat, Univ. Claude Bernard, Lyon, (1995)335.
9. Sadki D., Elmi S. et Amhoud H. Les formations jurassiques du Haut Atlas central marocain : corrélation et évolution géodynamique. Le 1er Coll. Nat. Sur le Jur. Marocain, (1999)122-123.

10. Mattauer M., Tapponier P. et Proust F. Sur les mécanismes de déformation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. *Bull. Soc. Géol. France*, (7), t. XIX, n°3, (1977) 521-526.
11. EL Kochri A. Géométrie et mécanisme de déformation du Haut Atlas centro-oriental (Maroc). Thèse Doct. Etat, Rabat, (1996) 200.
12. Beuchamps W., Barazani M., Demnati A. Et Alji M. Intracontinental rifting and inversion : Missouri basin Atlas mountains, Morocco. *AAPG Bulletin*. 80 n°9 (1996) 1459-1482.
13. DRH GRZ. Etude de synthèse hydrogéologique du Haut Atlas faisant partie des bassins du Guir, Rhéris et Ziz (provinces d'Errachidia, Ouarzazate et Figuig), (2009) 15-16.
14. Chapman D., Kimstach V. Selection of water quality variables. Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, (1996) 59-126.
15. Nisbet E.G. et Verneau O. Composantes chimiques des eaux courantes, discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Ann. Limn*, 6(2) (1970) 161-190.
16. Rodier J. L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 7ème édition, Dunod, Paris, (1984) 1353.
17. Delisle C.E. et Schmidt J.W. The effects of sulphur on water and aquatic life in Canada. Dans: *Sulphur and its inorganic derivatives in the Canadian environment*, NRCC No. 15015, comité associé sur les critères scientifique concernant l'état de l'environnement, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (1977).
18. Mehanned S, Chahlaoui A, Zaid A, Samih M, Chahboune M. Typologie de la qualité physico-chimique de l'eau du barrage Sidi Chahed-Maroc, *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (5) (2014) 1633-1642.
19. Matthess G. Geol. Mijimbouw, 53, 194. -In Forstner U ET Wittmann GTW Metal pollution in *the Aquatic Environment*, (1994) 355-359.
20. Rodier J. et al. L'analyse de l'eau, 9e édition. DUNOD (éditeur), Paris, France. (2009) 1579.
21. Abdoulaye Demba N'diaye, Khadijettou Mint Mohamed Salem, Mohamed Brahim El Kory, Mohamed Ould Sid' Ahmed Ould Kankou, Michel Baudu. Contribution à l'étude de l'évolution Spatio-temporelle de la qualité physicochimique de l'Eau de la Rive droite du fleuve Sénégal, *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (1) (2014) 320-329.
22. Bremond R. et Vuichard R. Paramètres de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEPE, Paris, (1973) 179.
23. A. Brahim, A. Chafi. Etude écotoxicologique de l'oued Za et de son affluent Oued Tizeghrane (Basse Moulouya, Maroc Oriental), *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (5) (2014) 1671-1682.
24. Bermond R. et Perridon C. Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de l'environnement Paris, (1979) 259.
25. Pesson P. Pollution des eaux continentales, incidences sur les biocénoses aquatiques (1979) 97-101.
26. Ministère chargé de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement. Etat de la Qualité des Ressources en Eau au Maroc 2000/2001 (Novembre 2003) 17.
27. Association internationale des Hydrogéologues. 41ème Congrès International de l'AIH "Eaux Souterraines: Challenges et Stratégies" Marrakech (deuxième circulation), (15- 19 Septembre 2014) 3.
www.iah2014.org/doc/Deuxieme_Circulaire_IAH2014.pdf

(2015) ; <http://www.jmaterenvirosci.com/>