



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

**Apport de la Fracturation et des Méthodes d'analyses
Statistiques à l'étude Hydrogéochimique des Eaux
Souterraines du Massif Calcaireux de la Région de Tlata
Taghramt, Chaîne Calcaire du Haouz
(Rif Septentrional, Maroc)**

Hassan Barhi

Jamal Eddine Stitou El Messari

Université Abdelmalek Essaadi, Département de Géologie,
Faculté des Sciences, Tétouan, Maroc

Mohamed Reda Oulad Mansour

Service Qualité des Eaux, Agence du Bassin Hydraulique de Loukkos,
Tétouan, Maroc

[Doi: 10.19044/esj.2022.v18n33p207](https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n33p207)

Submitted: 13 September 2022

Accepted: 19 October 2022

Published: 31 October 2022

Copyright 2022 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Barhi H., El Messari J.E. & Mansour M.R.O. (2022). *Apport de la Fracturation et des Méthodes D'analyses Statistiques à L'étude Hydrogéochimique des Eaux Souterraines du Massif Calcaireux de la Région de Tlata Taghramt, Chaîne Calcaire du Haouz (Rif Septentrional, Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 18 (33), 207.

<https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n33p207>

Résumé

L'objectif de cette étude vise à établir les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des eaux souterraines des formations carbonatées de la région de Tlata Taghramt. Au total, 16 échantillons d'eau ont été prélevés pour l'analyse chimique. Le traitement des données hydrochimiques a été réalisé à l'aide de diagrammes de Piper, les indices de saturation en minéraux et à base des méthodes d'analyses statistiques. Les paramètres physiques tels que la conductivité électrique, le potentiel hydrogène et les températures ont été mesurés sur le terrain à savoir que : la conductivité électrique varie entre 403 μ S/cm et 925 μ S/cm, le potentiel hydrogène varie entre 7.55 et 8.04 et les températures varient entre 15°C et 18°C. L'analyse hydrochimique montre une abondance en éléments majeurs (Anions et Cations) respectivement par ordre décroissant : (HCO₃⁻ > Cl⁻ >

$\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$) et ($\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$). Les bicarbonates représentent 70% du total des anions, tandis que le calcium représente 12% du total des cations. Cet enrichissement en ces deux éléments traduit la nature carbonatée des formations géologiques traversées par les eaux souterraines ainsi l'interaction de l'eau avec la matrice du système aquifère. L'étude de la fracturation indique une dominance de fractures orientées N-S favorisant l'apparition des sources via les joints et les sutures affectant les roches réservoirs. De point de vue chimique, les eaux des sources ont une nature généralement bicarbonatée calcique et magnésienne.

Mots-clés: Tlata-Taghramt, Hydrochimie, Fracturation, Analyse chimique, Analyse statistique, Eaux souterraines

Contribution of Fracturing and Statistical Analysis Methods to the Hydrogeochemical Study of Groundwater in the Limestone Massif of the Tlata Taghramt Region, Haouz Chain (Northern Rif, Morocco)

Hassan Barhi

Jamal Eddine Stitou El Messari

Abdelmalek Essaadi University, Department of Geology,
Faculty of Sciences, Tetouan, Morocco

Mohamed Reda Oulad Mansour

Water Quality Service, Loukkos Water Basin Agency, Tetouan, Morocco

Abstract

This study aims to establish the hydrogeological and hydrochemical characteristics of groundwater of carbonate rocks in the Tlata Taghramt region. A total of 16 water samples were collected for chemical analysis. Hydrochemical data processing was carried out using Piper diagrams, mineral saturation indices and statistical analysis methods. Physical parameters such as Electrical Conductivity, PH and Temperatures were measured in the field. The EC varies between $403\mu\text{S}/\text{cm}$ and $925\mu\text{S}/\text{cm}$, the PH varies between 7.55 and 8.04 and the temperatures vary between 15°C and 18°C . Hydrochemical analysis shows an abundance of major elements (Anions and Cations) respectively in descending order: ($\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$) and ($\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$). Bicarbonates account for 70% of total anions, while calcium accounts for 12% of total cations. This enrichment in these two elements reflects the carbonate nature of the geological formations crossed by the groundwater and the interaction of water with the aquifer system matrix. The

study of fracturing indicates a dominance of N-S oriented fractures favoring the appearance of sources via joints and sutures affecting reservoir rocks. From a chemical point of view, spring waters have a calcium and magnesium bicarbonate-type facies.

Keywords: Tlata-Taghramt, Hydrochemistry, Fracturing, Chemical Analysis, Statistical Analysis, Groundwater

Introduction

Les roches carbonatées font partie des roches sédimentaires. Elles occupent des surfaces très importantes dans le monde, avec un pourcentage qui varie de 15% à 20 % des archives sédimentaires de la terre (Amiotte Suchet et al., 2003, Meybeck et al., 1987, Ford & Williams, 2007). Elles sont considérées parmi les formations géologiques les plus importantes. Leur importance réside dans leurs grands pouvoirs de rétention hydrique. Les aquifères carbonatés fournissent les principales ressources en eau pour la majorité des populations installées dans des régions montagneux (Akdin, 2015, Amraoui et al., 2004, El Bardai et al., 2014, Bouchaou et al., 1997, De Jong et al., 2008, Khalil et al., 2002, Sardinha et al., 2012). Au Maroc, les aquifères d'origine carbonatés contiennent 70% des ressources en eau (Aboufirassi et al., 1991). De même, les formations carbonatées formant l'ossature de la chaîne calcaire du Haouz (Rif septentrional) au nord de Tétouan, constituent d'importants réservoirs d'eaux souterraines naturels de type karstique, cela est marqué par l'abondance des sources d'eau le long de la dorsale calcaire. La recharge de ces aquifères se fait essentiellement par l'infiltration des précipitations, à savoir que la région reçoit une moyenne annuelle qui dépasse les 1600 mm sur les hautes altitudes. Après un temps de séjour des eaux infiltrés, la vidange des systèmes aquifères sera effectuée par un grand nombre de sources qui se localisent de part et d'autre de la chaîne calcaire. La naissance de ces points d'eau est conditionnée par un ensemble d'accidents tectoniques affectant ces formations carbonatées. Jusqu'à présent on ignore la profondeur des formations carbonatées dont dépendent ces réserves hydriques. Ces roches peuvent renfermer d'importantes réserves en eau, donc une ressource hydrique très importante en matière de subvention des besoins en eau pour la population de la région. Dans les dernières décennies, la région de Tanger-Tétouan, connaît un développement socio-économique très important à savoir, la réalisation des grands œuvres et projets dans la région et cela demande des ressources hydriques très importantes pour assurer une bonne subvention des besoins en eau, donc une demande accrue de cette précieuse ressource. Dans ce sens, cette étude a pour objectif de fournir les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques du massif calcaire de la région de Tlata Taghramt.

Caractéristiques de la zone d'étude

Le secteur d'étude fait partie de la région de Tlata Taghramt, il se localise au nord de la ville de Tétouan entre les latitudes $5^{\circ} 25' N$ et $5^{\circ} 30' N$ et les longitudes $35^{\circ} 45' W$ et $35^{\circ} 50' W$. Il occupe la partie nord du Haouz central de la chaîne calcaire du Rif septentrional, précisément entre "douar Khouïem" et "douar Amezzouk", (figure 1).

La région de Tlata Taghramt occupe une superficie d'environ 20 km², administrativement, elle fait partie de la province de Fahs Anjra-Tanger. De point de vue géomorphologique, la région est caractérisée par la présence des montagnes à crêtes nues, altérées et fracturées et dépourvues de tous types de végétations. Le système hydrographique comprend trois cours d'eau principaux, dont le principal est Ben El-Ouidane, il est de type dendritique, bien développé dans les formations calcaires, et moins développé et très dense dans les terrains imperméables avoisinants (nappes des Flyschs, Sebtides et Ghomarides).

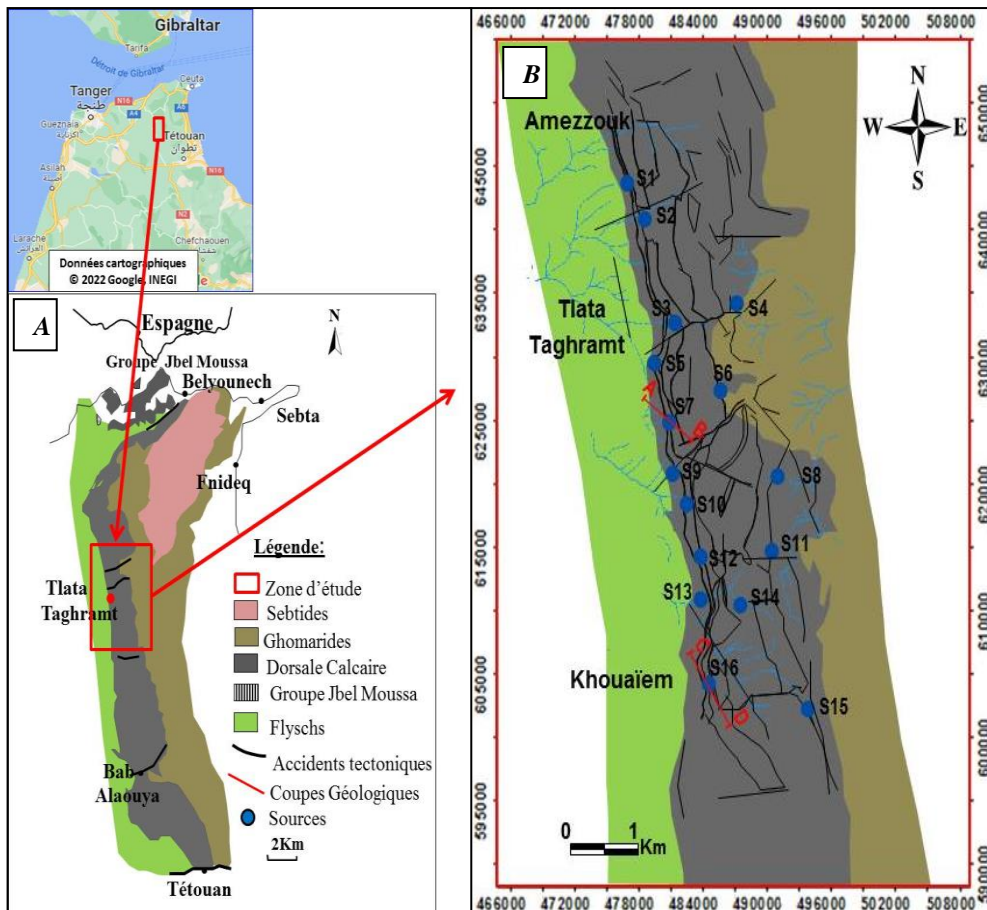


Figure 1. A : Localisation géographique de la zone d'étude/ **B :** Esquisse géologique montrant la localisation des sources étudiées, (Carte géographique de Sebt, échelle 1/50000)

Contexte géologique

De point de vue géologique, le secteur étudié est composé de séries stratigraphiques sous forme d'un empilement d'écaillés, fortement plissées et redressées, limitées à l'Est par les nappes Ghomarides et Sebtides à matériel schisteux paléozoïque et métamorphique et à l'Ouest par les nappes de Flyschs méso-tertiaires et l'unité de Tanger à matériel schisto marneux créacé (Kornprobst, 1966, (Raoult, 1966). La chaîne calcaire du Haouz est subdivisée en trois secteurs selon les marqueurs lithologiques dont de l'interne vers les zones externes on trouve : le Haouz interne, le Haouz intermédiaire et le Haouz externe. L'unité de Tlata Taghramt appartient aux unités du Haouz externe, formée par deux écaillés tectoniques ; l'écaille de "Dhar Lma" et l'écaille du col de "Souk Tlata" (Kornprobst, 1966). De sa part (Ben Yaich, 1981), il a défini une troisième sous-unité "Koudiat Tuila". De point de vue tectonique, l'écaille du col de "Souk Tlata" repose avec un contact tectonique plat (El Hatimi, 1991) sur l'unité avoisinante de l'écaille de "Jbel Dersa". Le secteur d'étude est caractérisé par la présence d'un ensemble d'accidents tectoniques transverses dont le principal est celui passant par le col de Souk Tlata Taghramt, de direction NE-SW (Kornprobst, 1966). De point de vue stratigraphique, la série de l'unité de Tlata Taghramt (Figure 2) est caractérisée par la présence des calcaires massive de l'Héttangien, surmontés par une série épaisse de calcaire à silex du Sinémurien supérieur, juste au-dessus vient une série de calcaire argileux du Domérien supérieur et des marno-calcaires à filaments du Toarcien inférieur. Tout l'ensemble est couronné d'une série de marnes et conglomérats d'âge Eo-Oligocène (El Hatimi, 1991).

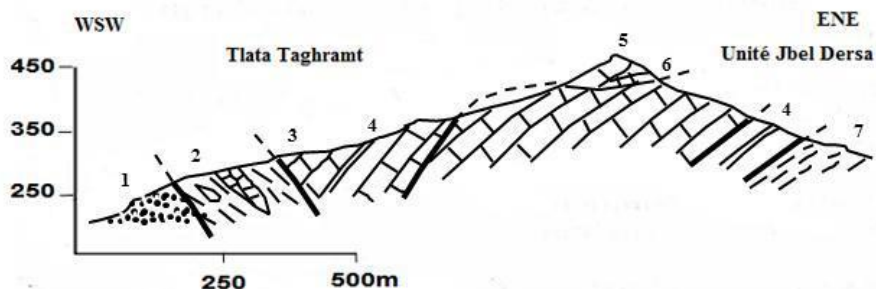


Figure 2. Coupe géologique montrant les relations tectoniques de l'unité de Tlata Taghramt avec les unités avoisinantes (Coupe d'après El Hatimi, 1991).

1: Flyschs créacé et tertiaire; 2: Formations du Prédorsalien; 3: Dolomies à stromatolithes du Trias supérieur; 4: Alternance Calcaréo-dolomotiques Rhétiennes; 5: Calcaire et dolomie massif du l'Héttangien; 6: Calcaire à silex et calcaire marneux du Lias inférieur et moyen; 7: Formations tertiaires.

Contexte Climatique

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen (Boughaba, 1992, Stitou El Messari et al., 2011), caractérisé par l'alternance de deux saisons qui sont bien différenciées; une saison humide et fraîche (octobre-avril), et une autre sèche et relativement chaude (mai- septembre). D'après les données climatiques de l'Agence du Bassin Hydraulique de Loukkos de Tétouan (ABHL), l'examen des moyennes mensuelles des précipitations représentées par la (figure 3) montre que les mois de juillet et août sont pratiquement secs, alors que le reste de l'année est arrosé d'une façon homogène avec un maximum de 120 mm enregistré en mois de décembre. L'examen des moyennes mensuelles des températures (figure 4) révèle une importante variation saisonnière, les valeurs maximales moyennes s'enregistrent pendant l'été en mois d'août, sont de l'ordre de (22 C°), alors que les valeurs minimales s'enregistrent pendant l'hiver durant le mois de janvier (12 C°).

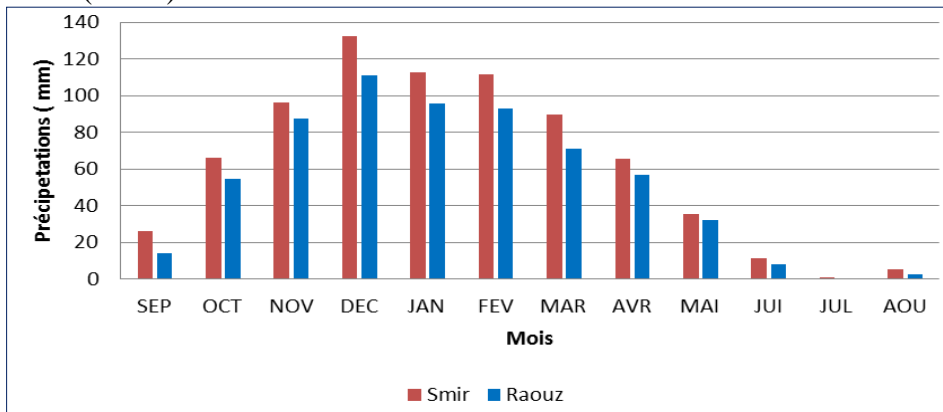


Figure 3. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles pour la période (1980/2018) (Source; ABHL)

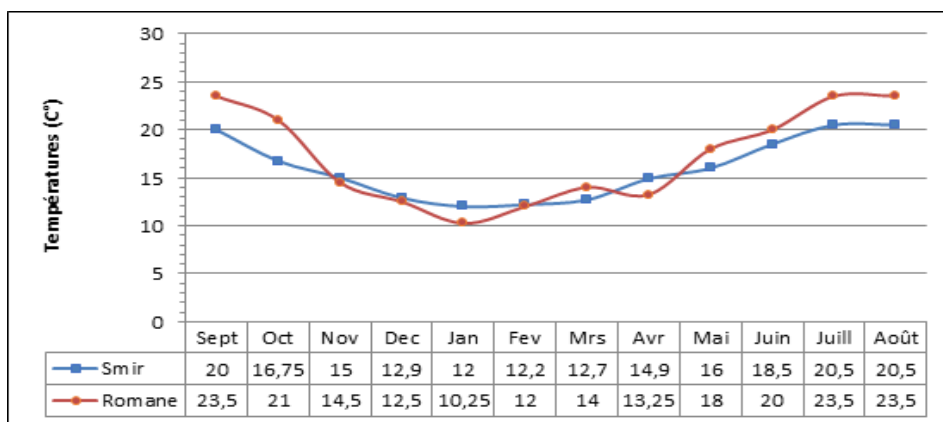


Figure 4. Températures moyennes mensuelles (C°) relevées depuis les stations de Smir et Raouz (Source; ABHL)

Matériels et méthodes

➤ *Methodologie*

L'étude de la région a été basée sur les deux cartes (topographique et géologique) de Sebta à une échelle de (1/50000). Une exploration de terrain assez poussée a conduit à l'inventaire et la localisation de l'ensemble des sources drainant les formations carbonatées de la région. Les coordonnées géographiques des sources ont été obtenues à l'aide d'un GPS, la projection de ces points d'eau sur la carte a été réalisée à l'aide du logiciel (ARCGIS 10.3). Après la réalisation d'une campagne d'échantillonnage, tous les échantillons d'eaux recueillies et qui sont destinés pour l'analyse chimique au laboratoire, ont été conservés dans des bouteilles en plastique d'un litre rincées au préalable trois fois avec l'eau à prélever et mis à l'abri dans une glacière à 4 C° pendant le transport. Les analyses chimiques des éléments majeurs (Anions et Cations) ont été réalisées au centre de Transfert des Technologies de l'eau (C.T.T) de l'Agence du Bassin Hydraulique de Loukkos de Tétouan selon le protocole de l'analyse de Rodier (Rodier & Legube, 2009), (tableau 1). Plusieurs techniques ont été appliquées à savoir: la technique de la tombée de burette, le titrage, le spectrophotomètre à flamme et le spectrophotomètre à UV. Les paramètres physiques tels que la conductivité électrique (CE), le potentiel hydrogène (PH) et la température ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un PH-mètre et un conductimètre, ces mesures ont été faites directement après le prélèvement des échantillons d'eaux. La représentation graphique de la chimie des eaux des sources étudiées a été réalisée en s'appuyant sur le Diagramme de Piper (Piper, 1945).

➤ *Fracturation du secteur d'étude*

La région d'étude fait partie de l'arc rifain qui se caractérise par une tectonique alpine très complexe. Cette activité tectonique a provoqué la compartimentation de la chaîne calcaire du domaine rifain interne en plusieurs systèmes aquifères dont les relations hydrauliques restent difficiles à comprendre. De ce fait, le secteur d'étude est affecté par un ensemble de fractures résultant de l'ensemble des contraintes tectoniques affectant la région, qui sont soit des contacts tectoniques entre les différentes écailles orientées sensiblement N-S, soit des accidents transverses orientés E-W. Ces fractures ont été recueillies à base des mesures qu'on a effectuées sur le terrain et à base de la carte géologique de la région. La rosace de fracturation montre une dominance de fractures orientées N-S (figure 5). Cette fracturation favorise l'apparition d'un grand nombre de sources via les joints et les sutures affectant les roches réservoirs formants les aquifères de la région.

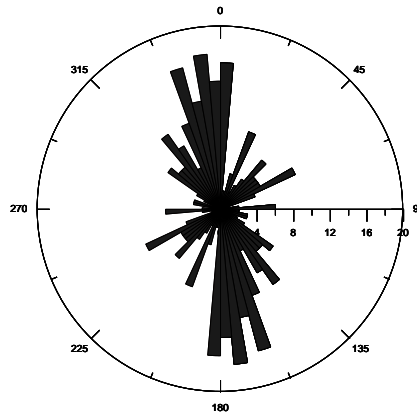


Figure 5. Rosace de fracturation du secteur d'étude (Barhi, et al)

Contexte hydrogéologique

De point de vue hydrogéologique, La région est caractérisée par la présence des terrains carbonatés surmontant ou sont inclus dans les matériaux imperméables aussi bien du côté Est qu'à l'Ouest, mais avec un enracinement faible, ce qui conditionne les réserves en eau. Dans cette partie de la chaîne, les affleurements carbonatés sont affectés par un réseau de fractures résultant sous l'effet de la tectonique (accidents tectoniques, failles, plissements..), ou parfois même du processus de l'altération résultant des précipitations, cela aboutit à la formation d'un réseau de conduit par fissuration et karstification. Cette fracturation est considérée comme le moteur responsable de la naissance des sources d'eau dans la région. La majorité de ces points d'eau sont de types pérennes, caractérisés par un potentiel hydrique très important, leurs débits varient d'une source à l'autre à savoir que le débit le plus élevé est enregistré au niveau de la source n°7, qui est de l'ordre de 16 l/s. Le substratum imperméable des matériaux aquifères est constitué par des formations métamorphiques d'âge paléozoïque (Sebtides et Ghomarides) dans la partie orientale et par des formations tertiaires dans la partie ouest. Toutes les ressources d'eau de la zone d'étude proviennent de l'infiltration des eaux de pluie à la surface des affleurements, principalement à des niveaux où les effets de karstification sont très élevés.

Source 7 : Cette source prend naissance au niveau d'un contact tectonique séparant les dolomies à stromatolithes d'âge Carnien-Norien et les calcaires noduleux gris d'âge Hétangien (figure 6). Au niveau du contact tectonique, on note la présence des calcaires à silex d'âge Sinémurien-Pliensbachien. La source est de type pérenne caractérisée par un débit important qui est de l'ordre de 16 l/s durant les hautes eaux.

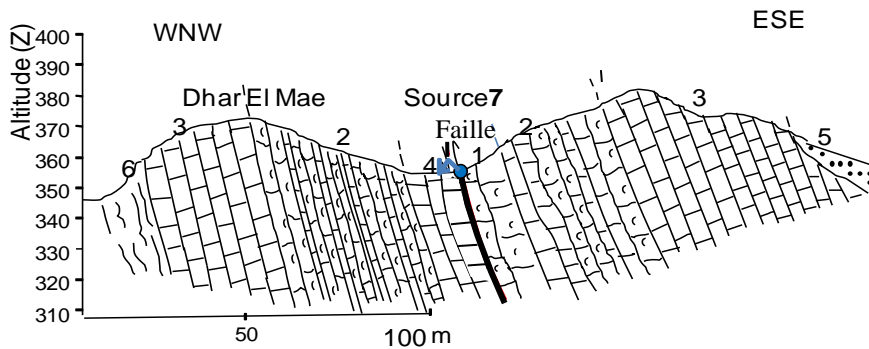


Figure 6. Coupe (AB) passant par la source n°7

1: Dolomies à stromatolithes d'âge Carnien-Norien; 2: Alternances calcaréo-dolomotiques du rhétien; 3: Calcaires à silex du Sinémurien-Pliensbachien; 4: Formations tertiaires d'âge Éocène-Oligocène; 5: Prédorsalien à grès grossiers d'âge Oligocène-Aquitainien; 6: Nappes des Flyschs d'âge Néocomien-Albien

Source 16 : Située au NE du douar Khouiém (figure 7), elle prend naissance à la base d'une écaille subverticale de calcaire noduleux gris, orientée sensiblement NS, reposée en contact anormal sur un banc marneux. Son débit est de l'ordre de 12 l/s.

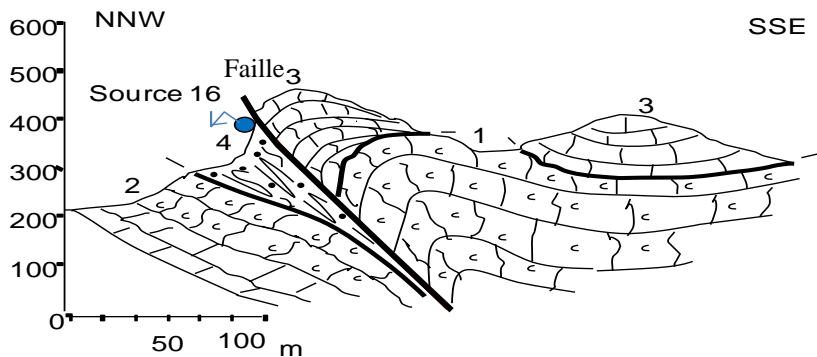


Figure 6. Coupe (CD) passant par la source n°16

1: Dolomies à stromatolithes d'âge Carnien-Norien; 2: Alternances calcaréo-dolomotiques du rhétien; 3: Calcaires noduleux gris de l'Hétangien; 4: Formations tertiaires d'âge Éocène-Oligocène.

Résultats et discussions

Les paramètres physico-chimiques

Les analyses hydrochimiques sont largement utilisées pour comprendre les interactions eau-roche et le mouvement des eaux souterraines dans les aquifères. Les paramètres physiques ont été mesurés sur terrain. La conductivité électrique varie entre 925 μ S/cm enregistrée au niveau de la source (S14) comme valeur maximale et 403 μ S/cm enregistrée au niveau de la source (S13) comme valeur minimale, avec une moyenne de 651,75 μ S/cm. Le potentiel hydrogène représente une moyenne de 7,77 dont les valeurs

maximales et minimales sont de l'ordre de 7,55 et 8,04 respectivement. Les températures enregistrées varient entre un minimum de 15°C et un maximum de 18°C avec une moyenne de 16,15°C. Dans l'ensemble les eaux des sources étudiées sont neutres et moyennement minéralisées avec un caractère froid.

Tableau 1. Paramètres physico-chimiques des eaux des sources de la zone d'étude

Sources	T° C°	CE μS/cm	PH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	B.I %
S1	15,5	588	7,67	78,41	65,32	12	1	0,2	31,75	31,9	464,68	+3%
S2	15,5	712	7,98	88,37	45,87	17	1	0,67	28,5	24,81	476,87	+1%
S3	16	403	7,85	68,33	56,32	23	1	0,34	28,5	31,9	510,52	-4%
S4	15	454	7,72	88,41	41,56	11	1	1,7	42	28,36	464,68	-6%
S5	16	541	7,55	60,42	48,85	19	2	0,9	33,2	35,45	397,6	-2%
S6	16	757	7,67	80,44	68,07	26	1	0,39	26,5	32,45	615,89	-4%
S7	16	693	8,04	96,41	79,58	32	1	0,15	22,5	25,36	615,89	+6%
S8	17	730	8,02	94,34	54,49	18	1	0,09	25,7	21,36	598,83	-5%
S9	17	644	7,69	86,65	52,93	24	1	0,2	35,25	38,45	506,39	-2%
S10	16,5	632	7,64	76,35	55,36	15	1	0,67	26,65	22,45	407,36	+7%
S11	16	711	7,67	82,4	50,18	13	2	0,34	20	19,45	537,85	-5%
S12	16	616	7,79	98,33	35,59	16	1	1,7	13,5	29,36	470,78	-2%
S13	16	495	7,68	78,29	56,14	23	1	1	15,63	20,36	405,03	+2%
S14	18	925	7,89	60,18	53,99	18	3	0,39	23,5	38,25	443,92	-3%
S15	17	855	7,73	80,36	43,71	25	2	0,15	5,75	33,36	497,6	-3%
S16	15	672	7,82	92,38	48,3	38	1	0,09	23,5	31,9	515,89	+2%

CE : conductivité électrique, PH : Le potentiel hydrogène ; B.I : Balance ionique

Balance ionique

Le calcul de la balance ionique a permis de tester la fiabilité des analyses chimiques des eaux. Théoriquement, il faut que la somme des cations soit égale à la somme des anions exprimés en milliéquivalents pour tous les échantillons d'eau. Les taux des balances ioniques calculées des eaux analysées des sources étudiées coïncident entre -6% et +6%. Dans l'ensemble, les analyses chimiques sont admissibles.

Les éléments chimiques

Les analyses chimiques des eaux des sources révèlent que l'élément dominant est le bicarbonate suivi par le calcium. L'histogramme de la (figure 7) représente les pourcentages des concentrations des éléments chimiques en (mg/l). Pour l'ensemble des eaux analysées, les bicarbonates sont l'élément le plus représentatif avec un pourcentage de 70% du total des anions, suivi par le calcium avec un pourcentage de 12% du total des cations. Cette richesse en ces deux éléments se traduit par la nature carbonatée des terrains traversés par les eaux souterraines. Le magnésium représente un pourcentage de 8%. Les chlorures, les sulfates et le sodium représentent des pourcentages qui ne

dépassent pas 4%. Le potassium et les nitrates sont assez faibles avec un pourcentage presque nul.

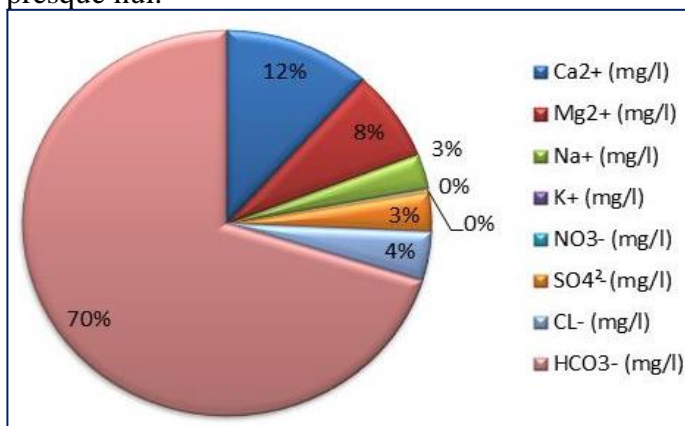


Figure 7. Pourcentages des concentrations en (mg/l) des éléments chimiques des eaux des sources étudiées

➤ **Les anions :** Les bicarbonates sont dominants par rapport aux autres anions. Avec une moyenne de 495,61 mg/l, ils varient entre 615,89mg/l comme valeur maximale enregistrée dans les deux sources S6 et S7 et 397,6mg/l comme valeur minimale enregistrée au niveau de la source S5. Les teneurs des sulfates sont respectivement enregistrées entre un maximum de 42mg/l au niveau de la source S4 et un minimum de 5,75mg/l au niveau de la source S15, la valeur moyenne est de 32,49mg/l. Avec une moyenne de 29,07mg/l, les teneurs des chlorures varient entre 38,45mg/l comme valeur maximale enregistrée au niveau de la source S9 et 19,45mg/l comme valeur minimale enregistrée au niveau de la source S11. L'élément nitrate est l'anion le plus faible, ses teneurs varient entre un maximum de 1,7mg/l enregistré au niveau des sources S4 et S12, et un minimum de 0,09mg/l enregistré au niveau de la source S16, ces faibles teneurs témoignent l'absence d'une action anthropique dans la région.

➤ **Les cations :** Le calcium est le cation le plus répandu dans les eaux souterraines des sources étudiées, traduisant ainsi la nature carbonatée de la roche encaissante. Avec une moyenne de 81,87mg/l, les valeurs maximales et minimales du calcium sont respectivement 96,41mg/l et 60,18mg/l enregistrées au niveau des sources S7 et S14. Le magnésium représente des valeurs comprises entre 79,58 mg/l comme valeur maximale enregistrée au niveau de la source S7 et 35,59mg/l comme valeur minimale enregistrée au niveau de la source S12, la moyenne est de 53,51mg/l. Le sodium est relativement élevé dans les eaux des sources, ses teneurs oscillent entre 38mg/l comme valeur maximale enregistrée au niveau de la source S16 et 11mg/l comme valeur minimale enregistrée au niveau de la source S4. Le

potassium est l'élément le plus faible, ses teneurs ne dépassent pas 3mg/l pour l'ensemble des sources.

Faciès d'eau

Pour déterminer le type d'eau souterraine, nous avons utilisé le diagramme de Piper (Piper, 1944). Il est composé de deux triangles représentant respectivement la distribution des anions et des cations, et d'un losange représentant la distribution synthétique des ions majeurs, les valeurs utilisées sont exprimées en % meq.l⁻¹. Ce diagramme est principalement utilisé pour afficher le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau (SM Rashrash et al, 2015).

La représentation graphique des eaux de la zone d'étude sur les diagrammes de Piper montre que le faciès chimique des eaux des sources étudiées est de type bicarbonatée calcique et magnésien (figure 8).

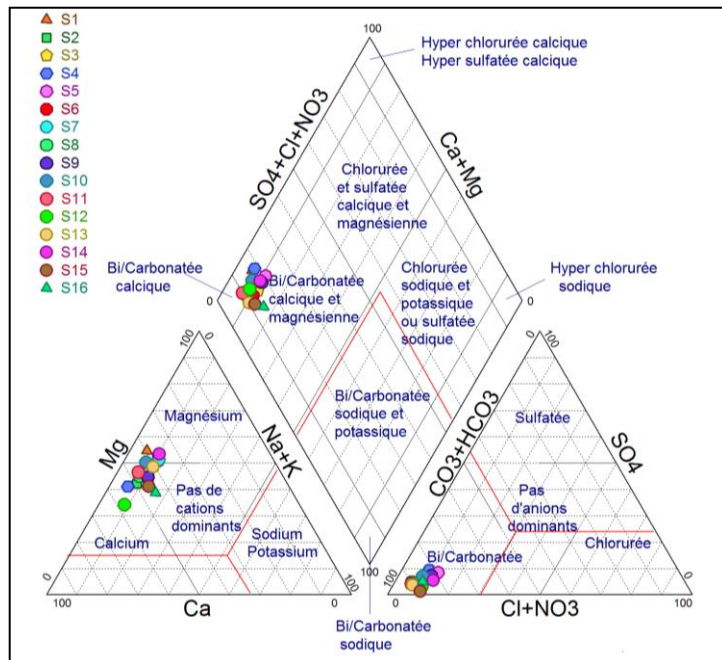


Figure 8. Diagramme de Piper des eaux échantillonnées des sources de la zone d'étude

Les indices de saturations

La détermination de l'équilibre chimique des eaux souterraines et leurs saturations en minéraux sont basées sur le calcul de l'activité ionique (Plummer et al., 1976). Le calcul de la valeur moyenne des indices de saturation des eaux analysées du secteur d'étude indique une sursaturation (IS>0), cela témoigne l'existence d'un équilibre entre les paramètres chimiques des échantillons d'eau et le milieu encaissant. La (figure 9) indique que les eaux des sources de la zone d'étude sont saturées en dolomite et en

calcite, sauf les deux sources S5 et 14 présentent une sous-saturation en calcite. L'aragonite présente une faible saturation pour quelques sources (S6, S7 et S8), le reste des sources sont sous-saturées vis-à-vis à ce minéral. Toutes les eaux souterraines des sources étudiées sont sous-saturées en éléments gypse et anhydrite.

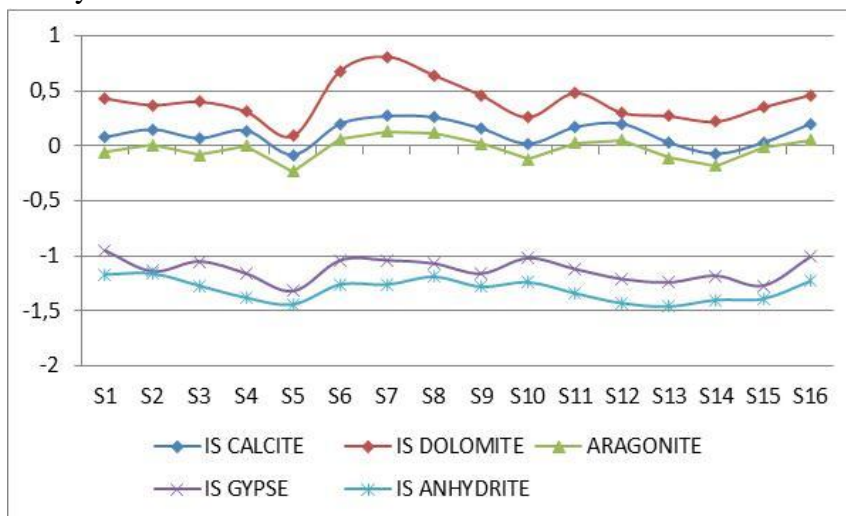


Figure 9. Indice de saturation vis-à-vis des principaux minéraux

Analyse Statistique

Pour réaliser une description hydrochimique et classer les eaux selon des groupes, afin de pouvoir interpréter le chimisme des eaux souterraines des aquifères de la zone d'étude, on a utilisé ACP (Analyse en Composante Principale) comme méthode d'analyse statistique multivariée, cette méthode a pour but de tracer les différentes directions de l'espace qui représentent les bonnes corrélations entre les variables quantitatives et les individus. Dans cette étude, la conductivité (CE) et les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) représentent les variables, alors que les sources représentent les individus.

➤ Matrice de corrélation

Les calculs statistiques sur l'ensemble des variables permettent de déduire des corrélations significatives qui sont soit positives soit négatives. Le tableau n°2 résume l'ensemble des résultats obtenus. D'après la matrice de corrélation on a:

- une corrélation négative entre le calcium et le potassium de l'ordre de (-0,627);
- une corrélation positive entre le calcium et l'indice de saturation de calcite (ISC) de l'ordre de (0,901);
- une corrélation positive entre le magnésium et l'indice de saturation de dolomite (ISD) de l'ordre de (0,646);

- une corrélation positive entre l'indice de saturation de calcite (ISC) avec l'indice de saturation de dolomite (ISD) et la pression partielle (PCO₂) de l'ordre de (0,833) et (0,832) respectivement;
- une corrélation positive entre l'indice de saturation de dolomite (ISD) et la pression partielle (PCO₂) de l'ordre de (0,939).

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les variables des eaux des formations carbonatées de la région de Tlata Taghramt.

	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	CL ⁻	HCO ₃ ⁻	ISC	ISD	PCO ₂
CE	1,000										
Ca ²⁺	,035	1,000									
Mg ²⁺	,060	-,056	1,000								
Na ⁺	,145	,205	,334	1,000							
K ⁺	,547	-,627	-,174	-,153	1,000						
SO ₄ ²⁻	-,479	,083	-,548	-,477	-,134	1,000					
CL ⁻	-,424	-,094	-,124	-,350	-,118	,159	1,000				
HCO ₃ ⁻	,223	-,405	-,069	,227	,348	-,130	,085	1,000			
ISC	,203	,901	,148	,322	-,516	-,196	-,244	-,306	1,000		
ISD	,247	,589	,646	,425	-,411	-,523	-,274	-,236	,833	1,000	
PCO ₂	,360	,519	,463	,406	-,240	-,495	-,348	-,115	,832	,939	1,000

Analyse en Composante Principale (ACP)

La méthode de l'ACP permet de réduire un grand nombre de variables quantitatives ou qualitatives (paramètres physiques et chimiques des échantillons d'eau) en un plus petit nombre de facteurs orthogonaux pour interpréter la matrice de corrélation (Jackson, 1991, Meglen, 1991, Cloutier et al., 2008). C'est une méthode statistique qui se propose de trouver les vecteurs propres dans la matrice des variables ainsi que leurs valeurs propres. Le premier vecteur (F1) exprime la valeur la plus importante qui représente un pourcentage très élevé de la variance totale du nuage des points, tandis que le deuxième vecteur (F2) exprime la partie de la variance résiduelle. La (figure 10/A) montre l'expression des liens entre les variables.

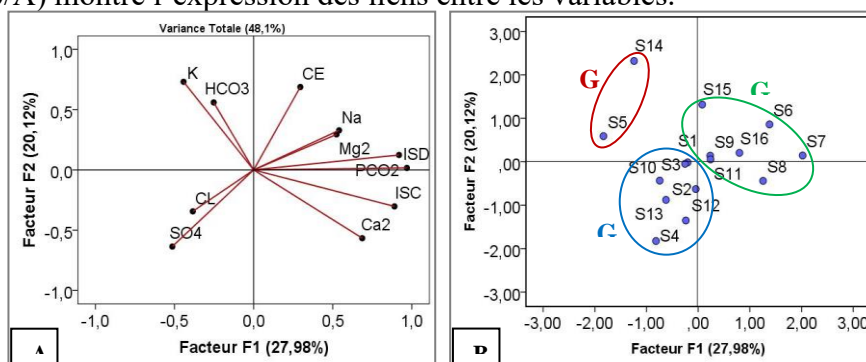


Figure 10. Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/ F2

Les axes factoriels F1 et F2 expriment (48,1%) de la variance totale. Le premier facteur F1 représente (27,98%) de la variance totale du système, déterminé par (ISD, ISC, $p\text{CO}_2$, Ca^{2+} et Mg^{2+}). Cet axe est totalement lié à l'équilibre calco-carbonique qui est en fonction des conditions d'écoulement. Ce facteur témoigne une circulation des eaux purement karstique. Le facteur F2 représente (20,12%) de la variance totale du système, représenté par (CE et HCO_3^-). le calcium est opposé au magnésium et aux bicarbonates, cette opposition est liée à des temps de séjour qui sont courts pour le calcium et longs pour le magnésium, le potassium marque le lessivage des sols. Ce facteur caractérise le temps du contact eau-roche, ainsi, il explique le type de minéralisation des eaux.

L'analyse factorielle du nuage des points représentant les individus (Sources), (figure 10/B), montre l'existence de trois groupes d'eaux souterraines. Le premier groupe est celui qui comporte les sources (S6, S11, S8, S7, S16, S15 et S9), les eaux de ce groupe sont caractérisées par un enrichissement en éléments chimiques, cela est marqué par l'expression des liens entre les variables représentées par l'axe F1 (figure 10/A). Cet enrichissement des eaux en éléments chimiques est probablement lié au grand contact des eaux avec la roche réservoir, ou par un écoulement lent qui laisse suffisamment de temps pour que l'ionisation soit faite d'une manière adéquate. Le deuxième groupe comporte les sources (S10, S12, S1, S4, S3, S2 et S13). Pour ce groupe, les eaux sont moyennement minéralisées, cela est figuré sur l'axe F2 de la (figure 10/B). Seuls les sulfates et les chlorures sont corrélés négativement avec l'axe F2. Le troisième groupe comporte les sources (S5 et S14), ce groupe est corrélé positivement avec l'axe F2, qui montre une expression en bicarbonates et en potassium, ce groupe est faiblement minéralisé.

Pour déterminer les relations possibles entre les différents échantillons, une analyse Cluster a été effectuée sur l'ensemble des points d'eau, le dendrogramme de la (figure 11) révèle quelques indications sur le niveau de similitude entre les points d'eau. L'analyse Cluster permet de distinguer trois groupes ou classe de sources qui sont liés entre eux à une distance euclidienne importante (16), ce qui indique que les échantillons des trois groupes sont géochimiquement distincts.

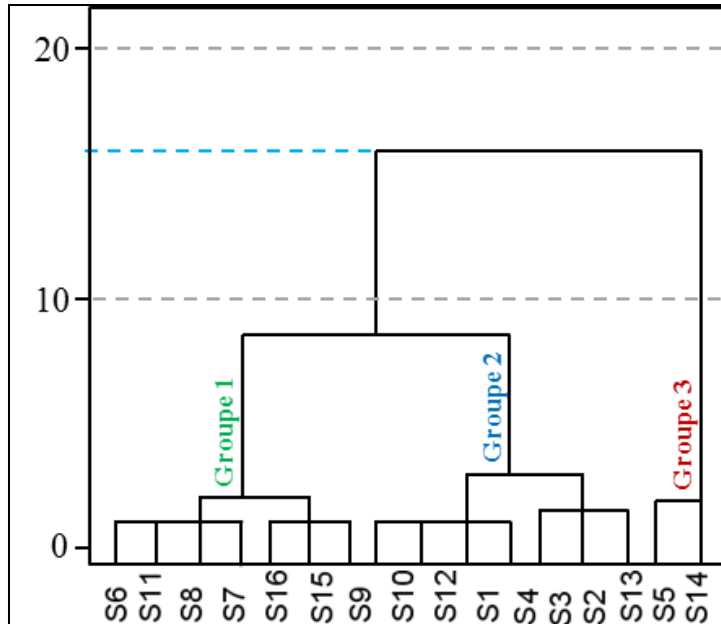


Figure 11. Dendrogramme des eaux analysées des sources de la région de Tlata Taghramt

Conclusion

Les formations carbonatées de la région de Tlata Taghramt comportent un important réservoir d'eau souterraine qualifié de type karstique, caractérisé par un potentiel hydrique très important, cela est marqué par l'abondance des sources d'eau le long de la dorsale calcaire. Cette approche hydrogéologique a permis de dégager quelques conclusions :

- L'analyse de la fracturation a permis de mettre en évidence que la mise en place d'un grand nombre de sources résulte en faveur des accidents tectoniques affectant les roches réservoirs de la zone d'étude ;
- La recharge des nappes aquifères de la zone d'étude est assurée par l'infiltration des eaux de pluie à la surface des affleurements, principalement où les effets de la karstification sont très élevés ;
- La décharge permanente de ces ressources hydriques s'effectue par le biais d'un ensemble de sources qui se localisent le long des contacts tectoniques, séparant les formations calcaires aux zones imperméables (nappes des Flyschs, Sebtides et Ghomarides), ou même au sein de la dorsale calcaire ;
- Les paramètres physiques montrent que : la conductivité électrique varie entre $925\mu\text{S}/\text{cm}$ et $403\mu\text{S}/\text{cm}$, le potentiel hydrogène varie entre 7,55 et 8,04, et les températures varient entre 15°C et 18°C ;
- L'analyse hydrochimique révèle que les bicarbonates et le calcium sont les deux éléments majeurs dominants le chimisme des eaux, traduisant

ainsi la nature carbonatée des terrains traversés par les eaux souterraines ;

- L'échange ionique des eaux souterraines avec les formations géologiques qui dominent la région participe à la minéralisation des eaux ;
- L'analyse statistique révèle l'existence de trois groupes d'eaux : le premier groupe comporte les sources (S6, S11, S8, S7, S16, S15 et S9), le deuxième groupe comporte les sources (S10, S12, S1, S4, S3, S2 et S13) et le troisième groupe comporte les sources (S5 et S14) ;
- Les analyses hydrochimiques révèlent une prédominance du faciès d'eau de type bicarbonaté calcique et magnésien ;
- les eaux souterraines des sources étudiées sont neutres et moyennement minéralisées, ayant un caractère froid ;
- Les eaux des sources servent à l'usage domestique, alimentation en eau potable, ainsi que pour l'irrigation.

Ces résultats constituent une étape préliminaire dans la connaissance hydrogéochimique de la zone d'étude. Ils méritent d'être complétés par d'autres approches pour déterminer les différents systèmes aquifères de la région, ainsi que les réserves hydriques dont dépends ces formations carbonatées.

Conflits d'intérêts: Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt

References:

1. Aboufirassi, M., Amrhar, M. B., Errouane, M., Fakir, Y. L., Quortbi, N. E., Hebil, M. El, & El Mandour, A. (1991). Hydrologie des milieux fissurés, milieux carbonatés et milieux de socle. Congrès Mondial de l'Association Internationale Des Ressources En Eau (7), 62–68.
2. Akdim, B. (2015). Karst landscape and hydrology in Morocco: research trends and perspectives. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 251–265.
3. Amiotte Suchet, P., Probst, J., & Ludwig, W. (2003). Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2).
4. Amraoui, F., Razack, M., & Bouchaou, L. (2004). Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée: la source Bittit (Maroc). *Comptes Rendus Geoscience*, 336(12), 1099–1109.
5. Ben Yaich, A. (1981). Etude géologique de la dorsale calcaire entre Tleta Taghrant et Ben Younès (Haouz, Rif, Maroc). Diplôme Etudes Supérieures These, Université Mohammed V, Rabat.

6. Bouchaou, L., Chauve, P., Mudry, J., Mania, J., & Hsissou, Y. (1997). Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride: cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, 25(2), 225–236.
7. Boughaba, A. (1992). Les littoraux meubles septentrionaux de la péninsule de Tanger (Maroc). *Geomorphologie et intervention anthropique sur leur environnement*, Nantes.
8. Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3–4), 294–313.
9. De Jong, C., Cappy, S., Finckh, M., & Funk, D. (2008). A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. *Engineering Geology*, 99(3–4), 228–238.
10. El Bardai, R., Targuisti, K., & Aluni, K. (2014). Caractérisation hydrodynamique des sources karstiques: cas de la source de Ras El Maa (Rif Septentrional, Maroc). *Revue Des Sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 27(2), 139–153.
11. El Hatimi, N. (1991). Rifting mésozoïque sur la bordure occidentale du Rif interne (Maroc). *Evolution géodynamique d'un secteur de la marge ouest-téthysienne. Exemples du Haouz et du Groupe du J. Moussa*. Thesis, Univ. Pau, France.
12. Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley.
13. Jackson, J. E. (1991). *A User's Guide to Principal Components*; John & Wiley. New York.
14. Khalil, N., Misdag, M. A., Berrazzouk, S., & Mania, J. (2002). Characterization of the Oum Er Rbia (Morocco) high basin karstic water sources by using solid state nuclear track detectors and radon as a natural tracer. *Applied Radiation and Isotopes*, 56(6), 985–990.
15. Kornprobst, J. (1966). La chaîne du Haouz, de la Hafa Queddana au col d'Azlu d'Arabia. *Notes et Mémoires Du Service Géologique (Rabat)*, 184, 9–54.
16. Meglen, R. R. (1991). Examining large databases: a chemometric approach using principal component analysis. *Journal of Chemometrics*, 5(3), 163–179.
17. Meybeck, M., Lô, H. M., Cauwet, G., & Gac, J. Y. (1987). Geochemistry of the sahelian Gambia river during the 1983 high-water stage. *Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers*, 64, 461–473.
18. A. M. Piper, (1944) "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses", *Eos, Trans, Am, Geophys, Union*,

- vol. 25, no. 6, pp. 914–928.
19. Plummer, L. N., Jones, B. F., & Truesdell, A. H. (1976). WATEQF-a FORTRAN IV version of WATEQ: a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters (Vol. 76, Issue 13). Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division.
 20. Raoult, J.-F. (1966). La chaîne du Haouz, du col d'Azlu d'Arabia au Bab Aonzar. Notes et Mémoires Du Service Géologique (Rabat), 184, 61–131.
 21. Rashrash, S. M., Ghawar, B. M. B., & Hweesh, A. M. (2015). Evaluating groundwater pollution using hydrochemical data: case study (Al Wahat Area East of Libya). *Journal of Water Resource and Protection*, 7(04), 369.
 22. Rodier, J., & Legube, B. (2009). *L'analyse de l'eau*. Dunod.
 23. Sardinha, J., Carneiro, J. F., Zarhloule, Y., Barkaoui, A., Correia, A., Boughriba, M., Rimi, A., & El Houadi, B. (2012). Structural and hydrogeological features of a Lias carbonate aquifer in the Triffa Plain, NE Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 73, 24–32.
 24. Stitou El Messari, J., García-López, S., Hlila, R., & Emran, A. (2011). Reconocimiento hidrogeológico, hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas del macizo kárstico del Haouz (Rif septentrional, Marruecos) Hydrogeological, hydrochemical and isotopic survey of the groundwater of the Haouz karstic massif (northern Rif, Morocco). *Geogaceta*, 50(1), 95–98.