



**Apport de L'hydrochimie, la Fracturation et des Méthodes
D'analyses Statistiques pour Caractériser les 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/esipreprint.9.2022.p785](https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2022.p785)

Approved: 03 October 2022

Posted: 05 October 2022

Copyright 2022 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Barhi H., El Messari J.E.S., Mansour M.R.O. (2022). *Apport de L'hydrochimie, la Fracturation et des Méthodes D'analyses Statistiques pour Caractériser les Eaux Souterraines du Massif Calcaireux de la Région de Tlata Taghramt, Chaîne Calcaire du Haouz (Rif Septentrional, Maroc)*. ESI Preprints.

<https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2022.p785>

Résumé

L'objectif de cette étude est de fournir les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des eaux souterraines des roches carbonatées de la région de Tlata Taghramt. Géographiquement, cette région fait partie de la chaîne calcaire du Haouz central (Rif septentrional). La majorité des sources se localisent le long des contacts anormaux majeurs qui mettent en contact les formations carbonatées avec les formations imperméables (Sebtides/Ghomarides à l'Est et les masses des Flyschs/unités de Tanger à l'Ouest). Dans ce secteur, les formations carbonatées constituent un important réservoir karstique dont l'alimentation principale se fait par les précipitations. L'étude de la fracturation a clairement indiqué une dominance

de fractures orientée N-S. Ces dernières favorisent l'apparition d'un grand nombre de sources via les joints et les sutures affectant les roches réservoirs formants les aquifères de la région. La détermination des principaux groupes de facteurs participant à la minéralisation des eaux a été réalisée par méthode d'analyse statistique. Du point de vue chimique, les eaux ont une nature généralement bicarbonatée calcique et magnésienne. Ces ressources hydriques sont la principale ressource d'eau potable et d'irrigation pour les centres ruraux de la région.

Mots-clés: Hydrogéochimie, Tlata-Taghramt, Eaux souterraines, Aquifère karstique

Contribution of Hydrochemistry, Fracturing and Statistical Analysis Methods to Characterize the Groundwater of 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

The objective of this study is to provide the hydrogeological and hydrochemical characteristics of the groundwater of carbonate rocks in the Tlata Taghramt region. Geographically, this region is part of the central Haouz limestone chain (northern Rif). Most of springs are located along the major abnormal contacts between the carbonate formations and the impermeable formations (Sebtides/Ghomarids in the east and the Flyshs/Tangier units in the west). In this sector, the carbonate formations constitute an important karstic reservoir, which is mainly supplied by rainfall. The study of the fracturing clearly indicated a dominance of N-S oriented fracturing. This fracturing favors the appearance of a large number of springs across the joints and sutures affecting the reservoir rocks that form the region's aquifers. The determination of the main groups of factors involved in water mineralization was carried out by statistical analysis. From a chemical point of view, the waters are generally bicarbonate-calcic and magnesian type. These water resources are the main source of drinking water and

irrigation in the region's rural centers.

Keywords: Hydrochemistry, Tlata-Taghramt, Groundwater, Karst aquifer

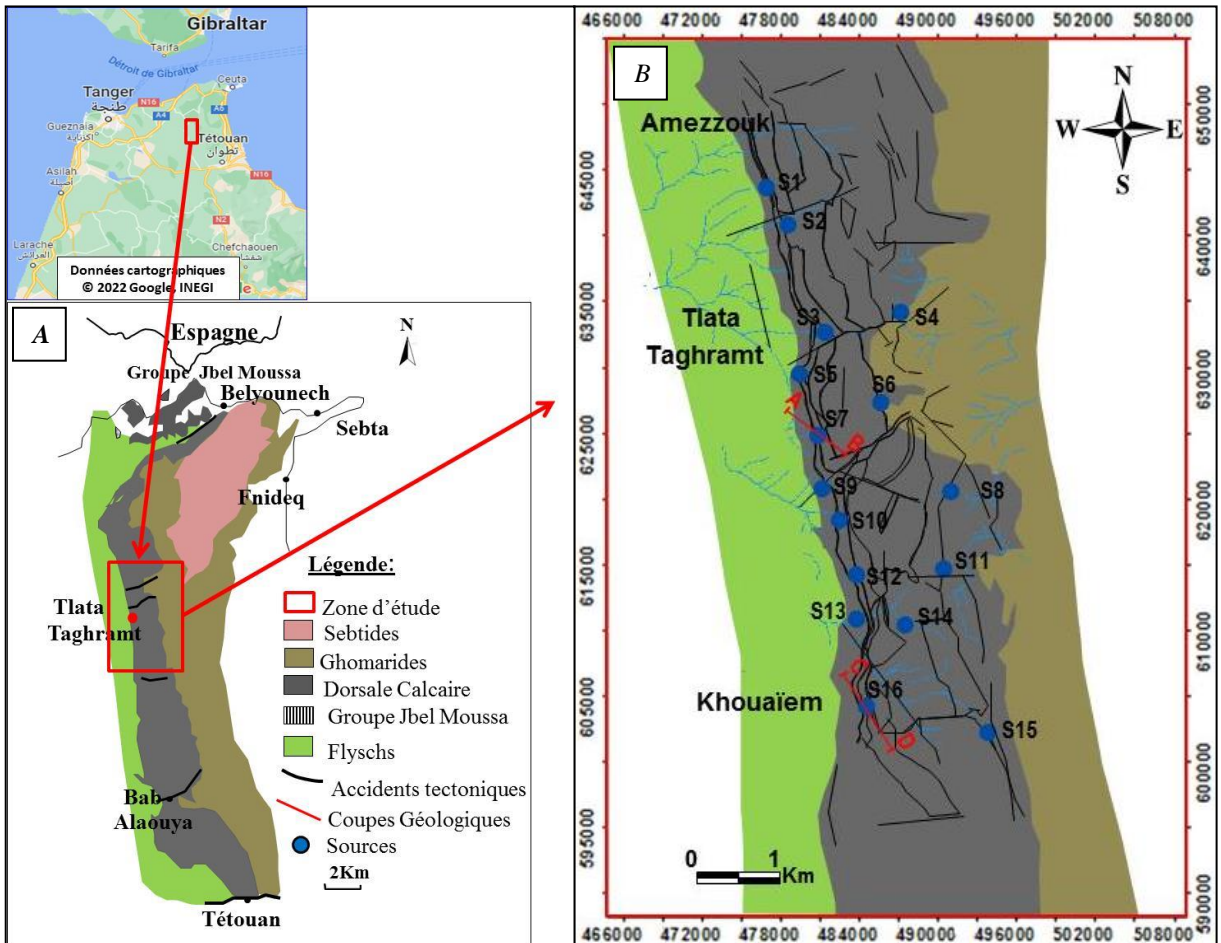
Introduction

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 montagneuses (Akdim, 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 se localise au nord de la ville de Tétouan entre les latitudes 5° 25' N et 5° 30' N et la longitude 35° 45' et 35° 50' W. Il occupe la

partie nord du Haouz central de la chaîne calcaire du Rif septentrional, précisément entre "douar Khouièm" et "douar Amezzouk", (figure 1).



D'une superficie de 20 km² approximativement, la région de Tlata Taghramt appartient administrativement à la province de Fahs Anjra-Tanger, caractérisée par un nombre de population qui dépasse les 15000 personnes (recensement, 2014), delà s'avère l'intérêt primordial de l'étude hydrogéologique pour ce secteur afin de pouvoir déterminer le rôle cruciale que joue cette ressource naturelle pour la satisfaction des besoins en eaux pour la région en question.

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 réseau hydrographique constitué par trois principaux cours d'eau, dont le principal est Ben El-Ouidane. Ce réseau hydrographique est de type dendritique, bien développé dans les formations

calcaire, et moins développé et très dense dans les terrains imperméables avoisinants (nappes des flyschs/ Sebtides et Ghomarides).

Contexte géologique

De point de vue géologique, le secteur étudié est composé de séries stratigraphiques sous forme d'un empilement d'écailles, 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 crétacé (Kornprobst, 1966, (Raoult, 1966). Structuralement l'unité de Tlata Taghramt appartient aux unités du Haouz externe, formée par deux écailles 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". Du 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). Du point de vue stratigraphique, la série de l'unité de Tlata Taghramt (Figure 2) est caractérisée par la présence des calcaires massifs de l'Hétangien, 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).

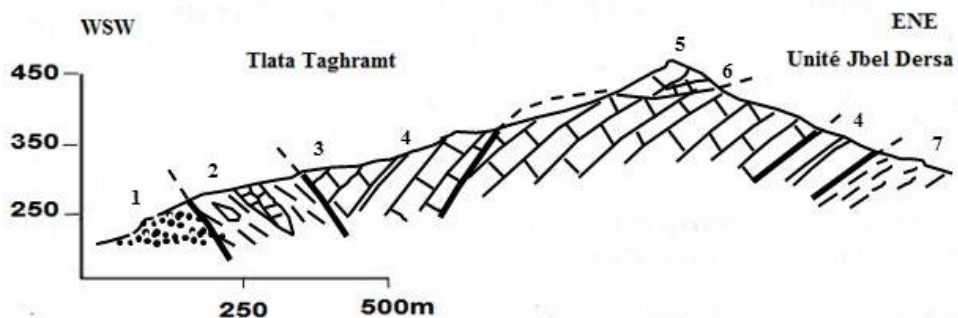


Figure 2. Coupe géologique montrant les relations tectoniques de l'unité de Tlata Taghramt avec les unités avoisinantes (Coupe d'après El Hatimi, 1991).

1: Flyschs crétacé 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'Hétangien; 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°).

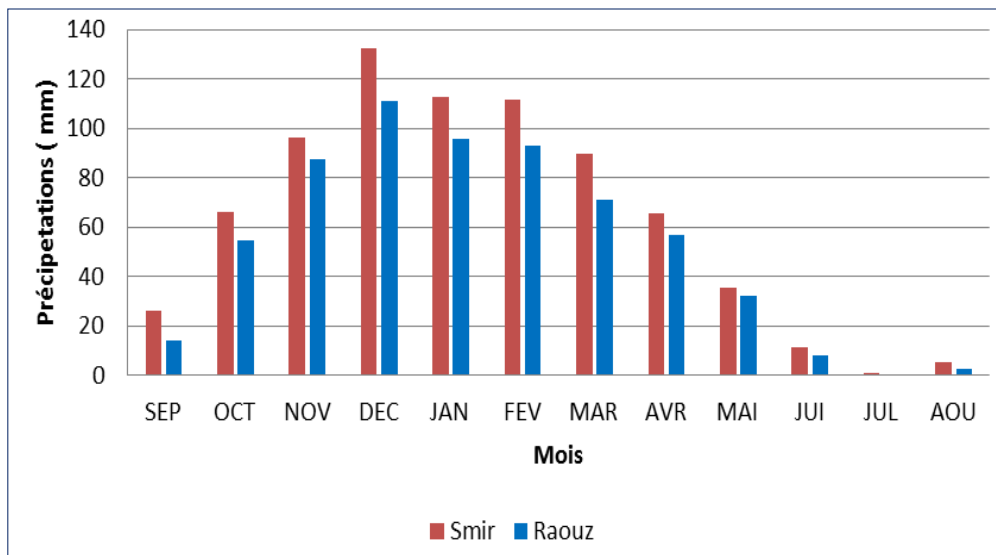


Figure 3. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles pour la période (1980/2018)

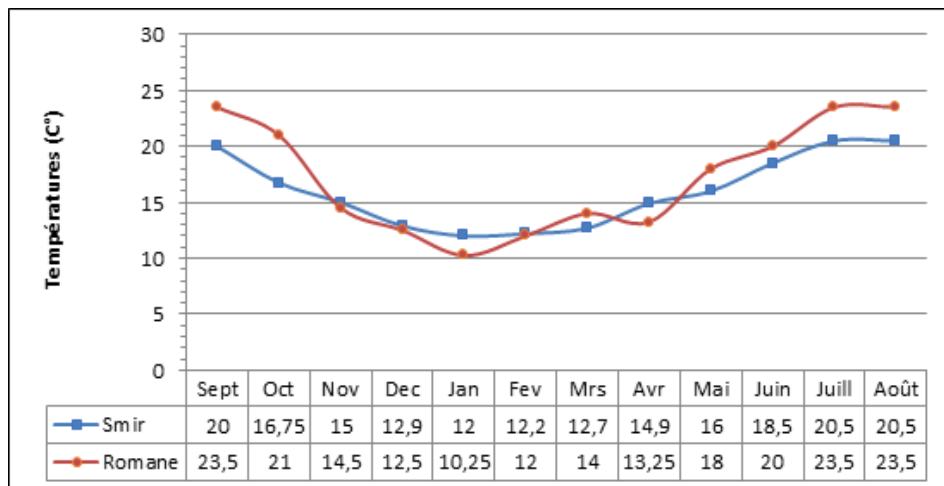


Figure 4. Températures moyennes mensuelles (C°) relevées depuis les stations de Smir et Raouz

Matériels Et Méthodes

- *Méthodologie*

L'étude de la région est basée sur les deux cartes de Sebta (topographique et géologique) à l'échelle de (1/50000), les données climatiques ont été offertes par l'ABHL en 2017. Les sources ont été inventoriées et localisées le long du secteur d'étude, les coordonnées géographiques ont été obtenues à l'aide d'un GPS et la projection de ces points d'eau sur la carte a été réalisée à l'aide du logiciel (ARCGIS 10.3). Une exploration de terrain assez poussée dans la région a conduit à l'inventaire de l'ensemble des sources. Après la réalisation d'une campagne d'échantillonnage, tous les échantillons recueillis ont été mis à l'abri dans une glacière pour l'analyse chimique. Les paramètres physiques tels que la température, le PH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur terrain à l'aide d'un PH-mètre et un conductimètre et faits directement après le prélèvement des échantillons d'eaux. Les analyses chimiques des éléments majeurs (Anions et Cations) ont été réalisées au sein du laboratoire de l'ABHL (tableau N°1) selon le protocole de l'analyse de Rodier (Rodier & Legube, 2009). La classification et la comparaison des eaux souterraines de la zone d'étude se basent sur des représentations graphiques en s'appuyant sur le diagramme de Piper et celui de Schöeller-berkaloff.

- *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 écaïlles orientées sensiblement N-S, soit des accidents transverses orientés E-W. Ces fractures ont été recueillies à base des études qui ont été effectuées sur terrain ou à base de la carte géologique de la région. La rosace de fracturation (figure 5) montre clairement une dominance de fracturation orientée N-S. Cette dernière 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.

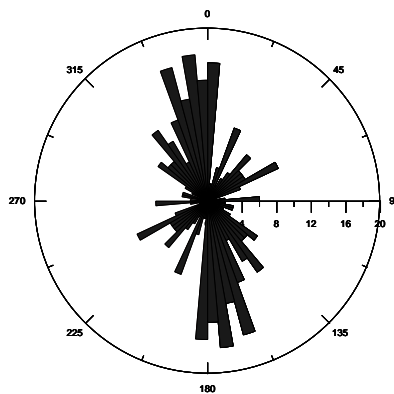


Figure 5. Rosace de fracturation du secteur d'étude

Contexte Hydrogéologique

L'inventaire de l'ensemble des points d'eau a permis de localiser 16 sources dans la zone d'étude. Ces points d'eau, sont de types pérennes, caractérisés par un potentiel hydrique considérable, dont les 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, il est de l'ordre de 16 l/s, cela traduit un comportement purement karstique des nappes aquifères de la zone d'étude. La région est caractérisée par la présence des terrains carbonatés surmontant des terrains peu à non perméable (flyschs, Sebtides et Ghomarides), ces derniers constituent le substratum des aquifères karstiques dans la région. Le secteur d'étude est affecté par un ensemble de fractures (contacts tectoniques, failles ou accidents transverses...). Le réseau de fractures résulte principalement de la tectonique qui affecte les formations géologiques de la région, mais aussi du processus d'altération lui-même résultant des précipitations. Cette fracturation est le moteur idéal responsable de la naissance de ces points d'eau dans la région.

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 10 l/s durant les hautes eaux.

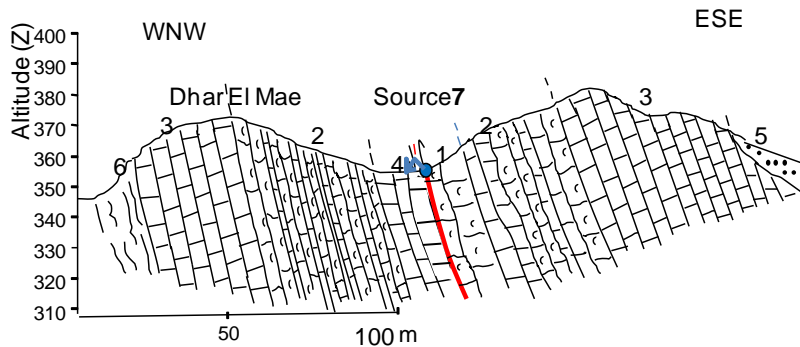


Figure 6. Coupe (AB) passant par la source N°7

1: Dolomies à stromatolithes d'âge Carnien-Norien; 2: Alternances calcaréo-dolomiques 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 Khouïem (figure 7), elle prend naissance à la base d'une écaïlle 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.

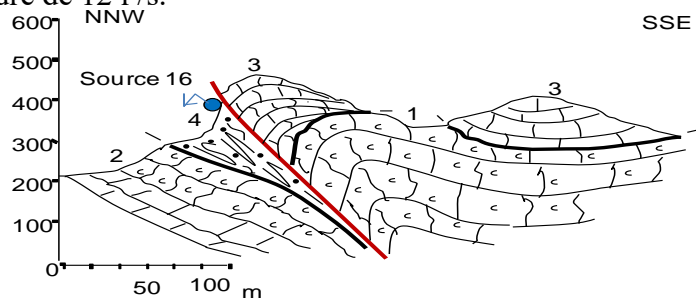


Figure 6. Coupe (CD) passant par la source N°16

1: Dolomies à stromatolithes d'âge Carnien-Norien; 2: Alternances calcaréo-dolomiques 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.

Avec une moyenne de $654,28\mu\text{S}/\text{cm}$, la conductivité électrique oscille entre $800,75\mu\text{S}/\text{cm}$ enregistrée dans la source (S7) comme valeur maximale et de $531\mu\text{S}/\text{cm}$ enregistrée dans la source (S13) comme valeur minimale. Ce paramètre ne dépasse pas $1000\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui indique que les eaux sont moyennement minéralisées. Le potentiel hydrogène, avec une moyenne de 6,89, la valeur la plus élevée est de l'ordre de 7,61, tandis que la valeur la plus basse est de 6,78. Les températures enregistrées varient entre un minimum de 15°C et un maximum de 17°C avec une moyenne de $16,25^{\circ}\text{C}$. 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$	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	78,41	65,32	12	1	0,2	31,75	31,9	464,68	+3%
S2	15,5	712	88,37	45,87	17	1	0,67	28,5	24,81	476,87	+1%
S3	16	403	68,33	56,32	23	1	0,34	28,5	31,9	510,52	-4%
S4	15	454	88,41	41,56	11	1	1,7	42	28,36	464,68	-6%
S5	16	541	60,42	48,85	19	2	0,9	33,2	35,45	397,6	-2%
S6	16	757	80,44	68,07	26	1	0,39	26,5	32,45	615,89	-4%
S7	16	693	96,41	79,58	32	1	0,15	22,5	25,36	615,89	+6%
S8	17	730	94,34	54,49	18	1	0,09	25,7	21,36	598,83	-5%
S9	17	644	86,65	52,93	24	1	0,2	35,25	38,45	506,39	-2%
S10	16,5	632	76,35	55,36	15	1	0,67	26,65	22,45	407,36	+7%
S11	16	711	82,4	50,18	13	2	0,34	20	19,45	537,85	-5%
S12	16	616	98,33	35,59	16	1	1,7	13,5	29,36	470,78	-2%
S13	16	395	78,29	56,14	23	1	1	15,63	20,36	405,03	+2%
S14	18	925	60,18	53,99	18	3	0,39	23,5	38,25	443,92	-3%
S15	17	855	80,36	43,71	25	2	0,15	5,75	33,36	497,6	-3%
S16	15,5	672	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%, suivi par les chlorures, les sulfates et le sodium qui représentent des pourcentages qui ne dépassent pas 4%. Le potassium et les nitrates sont assez faibles avec un pourcentage presque nul.

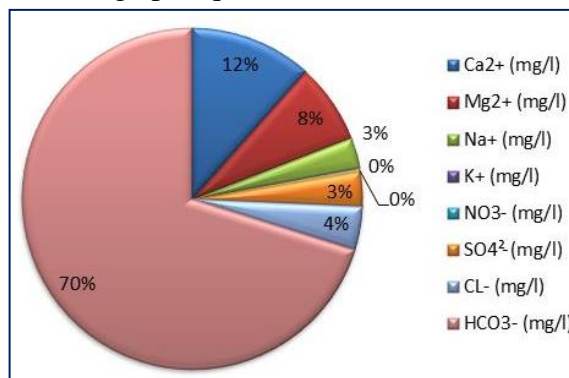


Figure 7. Pourcentages des concentrations en (mg/l) des éléments chimiques des eaux des sources étudiées.

➤ **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 oscillent 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 représentatif 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

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

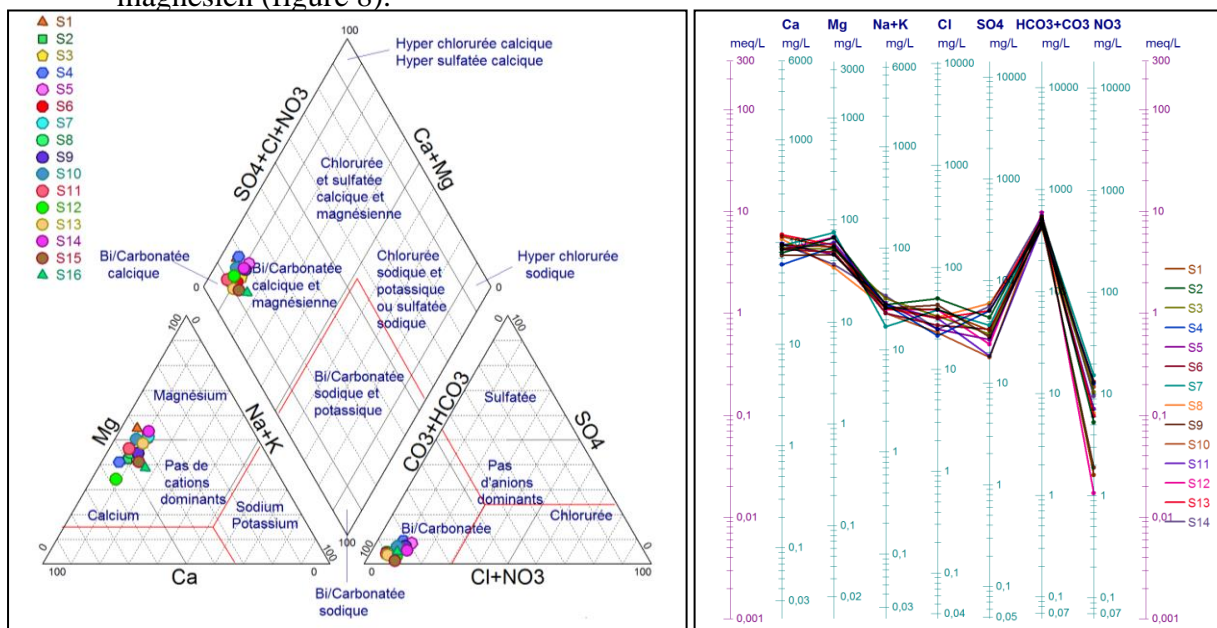


Figure 8. Diagrammes de Piper et celui de Schöeller Berkaloff des eaux échantillonnées des sources de la zone d'étude

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 calcite, sauf les deux sources S5 et 14 présentent une faible sous-saturation en calcite. Toutes les eaux souterraines des sources étudiées sont sous-saturées de gypse et d'anhydrite. 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.

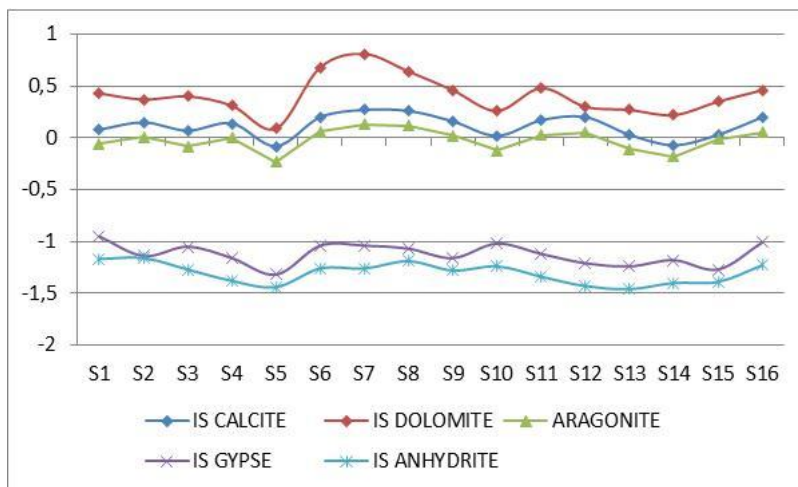


Figure 9. Indice de saturation vis-à-vis des principaux minéraux

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 (PCO_2) 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 (PCO_2) 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, 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, pCO_2 , Ca²⁺ et Mg²⁺). 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 HCO₃⁻). 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.

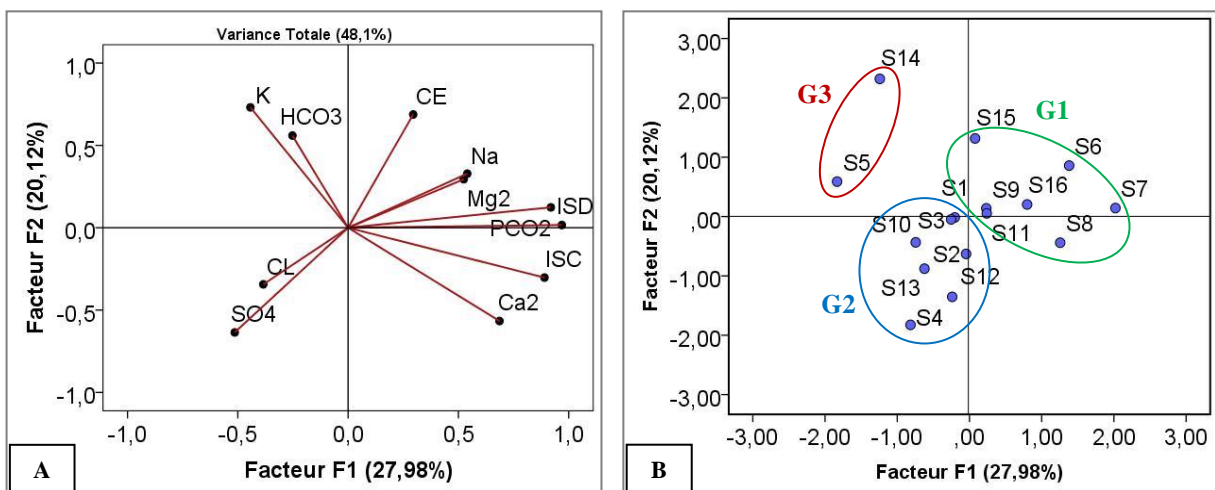


Figure 10. Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/ F2

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 11/A). Cet enrichissement des eaux en éléments chimiques est probablement dû 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.

Du point de vue hydrogéochimique, tous les échantillons d'eaux analysées de la zone d'étude sont en accord avec les normes internationales

de potabilité (WHO, 2006) (tableau 1) dont lesquelles l'élément "nitrate" ne dépasse les 25mg/l pour l'ensemble des sources.

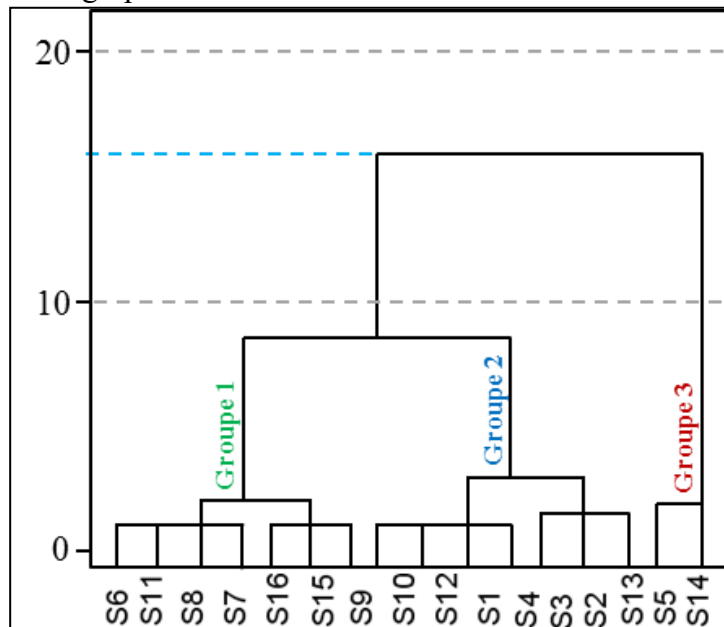


Figure 11. Dendrogramme des eaux analysées des sources de la région de Tlata Taghramt

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 le long de la dorsale calcaire, ainsi que leurs débits qui dépassent 12 l/s pour certaines sources. 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 décharge permanente de ces ressources hydriques s'effectue par le biais d'un ensemble de sources qui se localisent le long des contacts tectoniques qui séparent les formations calcaires des zones imperméables (nappes des flyschs, Sebides et Ghomarides), ou même au sein de la dorsale calcaire. 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). L'échange ionique des eaux souterraines avec les formations géologiques qui dominent la région participe à la minéralisation des eaux. Dans l'ensemble les eaux des sources de la zone d'étude demeurent de bonne qualité pour la consommation humaine, leurs caractéristiques hydrochimiques révèlent une

prédominance du faciès d'eau du type bicarbonaté calcique et magnésien moyennement minéralisée.

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 l'ensemble des systèmes aquifères de la région, ainsi que les réserves hydriques en termes de de qualité et de quantité.

Remerciement

Nous tenons à remercier la direction du laboratoire de l'agence du bassin hydraulique de Loukkos de Tétouan, pour leur aide et contribution à la récolte des différentes données.

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., Misdaq, 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. 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.
 19. 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.
 20. Rodier, J., & Legube, B. (2009). *L'analyse de l'eau*. Dunod.
 21. 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.
22. 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.