

Application des méthodes statistiques à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines de la Dorsale de Beni Hassan (Rif septentrional, Maroc)

[Application of statistical methods to the hydrogeochemical study of groundwater in the Beni Hassan Dorsal (Northern Rif, Morocco)]

Redouan Alilouch, Karim El Morabiti, Abdel Aziz El Mrihi, and Mahamat Ouchar Al-Djazouli

Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Abdel Malek Essaâdi, Tétouan, Morocco

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The study is based on a descriptive statistical approach aimed at analysing and processing hydrogeochemical data of groundwater draining the geological formations of the Beni Hassan Dorsal. The study area is located in the northern part of Morocco, in the Northern Rif. The latter is part of the Flysch nappes and part of the calcareous dorsal of the Rifaine chain to the south-east of the city of Tetouan. The formations of the main calcareo-dolomitic and detrital geomorphological units constitute an important reservoir in the study area. An inventory of the main resurgences of water points was carried out around the Dorsal and the sandstone massif. Consequently, 7 water points (including 6 springs and 1 well) were the subject of an in situ physico-chemical measurement, a chemical analysis in the laboratory, and in addition a hydrogeological study. The main water springs in the studied area spring up along abnormal contacts of the calcareo-dolomitic Dorsal with impermeable formations. Aquifers in the study area are generally of two types, depending on their physical attributes. They are therefore two types of natural groundwater reservoirs: fissured aquifers and aquifers in porous media. Generally speaking, from a chemical standpoint, the groundwater in the study area is less mineralized to moderately mineralized and shows bicarbonate-calcium chemical facies.

KEYWORDS: Descriptive statistics, Hydrogeochemistry, Calcaritic-Dolomitic Dorsal, Calcareous Dorsal, Chemical Facies, Moulay Bouchta Wadi.

RESUME: L'étude est fondée sur une approche statistique descriptive visant à analyser et traiter les données hydrogéochimiques des eaux souterraines drainant les formations géologiques de la Dorsale de Beni Hassan. Le secteur-objet d'étude se situe au Nord du Maroc, dans le Rif septentrional. Ce dernier fait partie des nappes des Flyschs et d'une partie de la dorsale calcaire de la chaîne rifaine au Sud-Est de la ville de Tétouan. Les formations des principales unités géomorphologiques calcaréo-dolomitiques et détritiques constituent un important réservoir dans la zone d'étude. Un inventaire des principales résurgences des points d'eau a été réalisé sur le pourtour de la dorsale. Par conséquent, 7 points d'eau (dont 6 sources et 1 puits) ont fait l'objet d'une mesure physico-chimique in situ, d'une analyse chimique au laboratoire, et de surcroît une étude hydrogéologique. Les principales sources d'eau dans le secteur étudié jaillissent le long des contacts anormaux de la Dorsale calcaréo-dolomitiques avec des formations imperméables. Les aquifères de la région d'étude sont généralement de deux types et ce, en fonction de leurs attributs physiques. Il s'agit donc de deux types de réservoirs naturels d'eau souterraine: les aquifères fissurés et les aquifères des milieux poreux. Généralement, du point de vue chimique, les eaux souterraines du secteur-objet d'étude sont de moins minéralisées à moyennement minéralisées et elles montrent des faciès chimiques bicarbonaté-calciques.

MOTS-CLEFS: Statistiques descriptives, Hydrogéochimie, Dorsale calcaréo-dolomitique, Dorsale calcaire, Faciès chimique, Oued Moulay Bouchta.

1 INTRODUCTION

Le Maroc est un pays dont les ressources en eaux sont limitées. Il dispose d'une quantité d'eau de surface estimée à 22,5 milliards de m³, dont seul 16 milliards de m³ sont mobilisables dans les conditions techniques et économiques actuelles [1], [2].

Les eaux souterraines de la région d'étude jouent un rôle primordial à la subvention des besoins en eau potable, en irrigation, en usage domestique et en industrie et constituent même la seule ressource disponible pour soutenir le développement socio-économique et assurer la sécurité de l'eau où les eaux de surface disponibles sont rares. D'une part, diverses activités humaines telles que la boisson, l'irrigation et l'utilisation industrielle sont soutenues par les eaux souterraines; d'autre part, les eaux souterraines jouent un rôle essentiel dans le maintien et la restauration des écosystèmes qui en dépendent, tels que les aquifères alluviaux et rocheux, les zones hyporhéiques, les sources et les zones humides [3], [4]. Il est bien connu que de nombreux processus écologiques importants peuvent être perturbés par des changements dans la chimie des eaux souterraines [5], [6], [7].

Le cheminement de l'eau souterraine à travers les formations géologiques peut en principe être déduit indirectement par l'étude de la signature géochimique des eaux résultant des interactions avec le milieu géologique (ex.: gains d'ions causés par la dissolution ou les pertes occasionnées par la précipitation de phases minérales) et les propriétés physico-chimiques de l'eau [8], [9]. En effet, la composition physico-chimique de l'eau souterraine reflète le milieu géologique dans lequel elle circule. C'est ainsi que certains éléments sont parfois présents dans les eaux souterraines à des concentrations particulièrement élevées sans qu'il y ait un risque pour la santé des consommateurs. Bien que l'eau souterraine soit généralement de meilleure qualité que l'eau de surface (lac, rivière, ruisseau), il demeure donc d'une importance capitale que l'eau soit analysée à l'aide de paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Cette analyse permet de préciser, s'il y a lieu, le type de traitement à appliquer pour en minimiser les effets désagréables et respecter les normes du règlement applicables sur la qualité de l'eau potable.

Les eaux souterraines exploitées par la population de la région d'étude commencent à être dépassées par les demandes et sont très inégalement réparties entre les communes. Ceci justifie l'importance de l'eau comme un élément primordial pour le développement socio-économique d'une région et augmente l'intérêt d'une connaissance hydrogéochimique. Ainsi, une stratégie de gestion durable de ces eaux nécessite une meilleure compréhension de l'évolution géochimique de manière à garantir un achalandage fiable à toutes fins utiles. C'est dans ce contexte général que s'inscrit la présente étude. Son but principal est fondé sur une approche statistique descriptive visant à analyser et traiter les données hydrogéochimiques des eaux souterraines drainant les aquifères de la région d'étude. Ceci se base sur:

- L'inventaire des sources d'eaux et l'étude de leurs relations avec les formations calcaréo-dolomitiques, détritiques et les formations avoisinantes.
- La caractérisation hydrogéochimique pour une compréhension de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de cette région. Ce travail a été mené à partir des résultats d'analyses de paramètres physico-chimiques des eaux et s'est appuyé sur un échantillon de 7 points d'eau. La méthodologie appliquée est basée sur des approches statistiques descriptives et des méthodes de classification hydrogéochimiques classique. La combinaison de ces différentes méthodes a permis d'apporter des réponses à notre problématique.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le secteur-objet d'étude se situe au nord du Maroc, dans le Rif septentrional entre les coordonnées (X= 505000m et X= 512500m) et (Y=515000 et Y=525000m) (fig.1). Celui-ci se caractérise par la présence d'une biodiversité importante sous un étage bioclimatique subhumide et un hiver tempéré à chaud. Toutefois à l'intérieur de la zone d'étude, les caractéristiques climatiques sont très influencées par le relief, l'action de l'océan et de la méditerranée. Il fait partie des nappes des Flyschs et d'une partie de la dorsale calcaire de la chaîne rifaine au Sud-Est de la ville de Tétouan. C'est une région moyennement peuplée, cette population n'est pas liée au réseau public de distribution d'eau potable. Son alimentation en eau est satisfaite intrinsèquement par des sources d'eau et des puits locaux, traditionnellement aménagées pour la plupart. La zone d'étude d'El Oued-El Hamra comporte un grand bassin versant d'Oued Moulay-Bouchta, ainsi que d'autres sous-bassins et plusieurs petits oueds ou affluents temporaires ou torrentiels.

2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le secteur objet d'étude se situe dans le domaine interne (Dorsale calcaire), le domaine externe (unité de Tanger) et le domaine des flyschs de la chaîne rifaine [10], [11], [12]. Celui-ci se distingue par sa grande complexité structurale et par plusieurs contacts anormaux entre les unités géologiques [13] (fig.1).

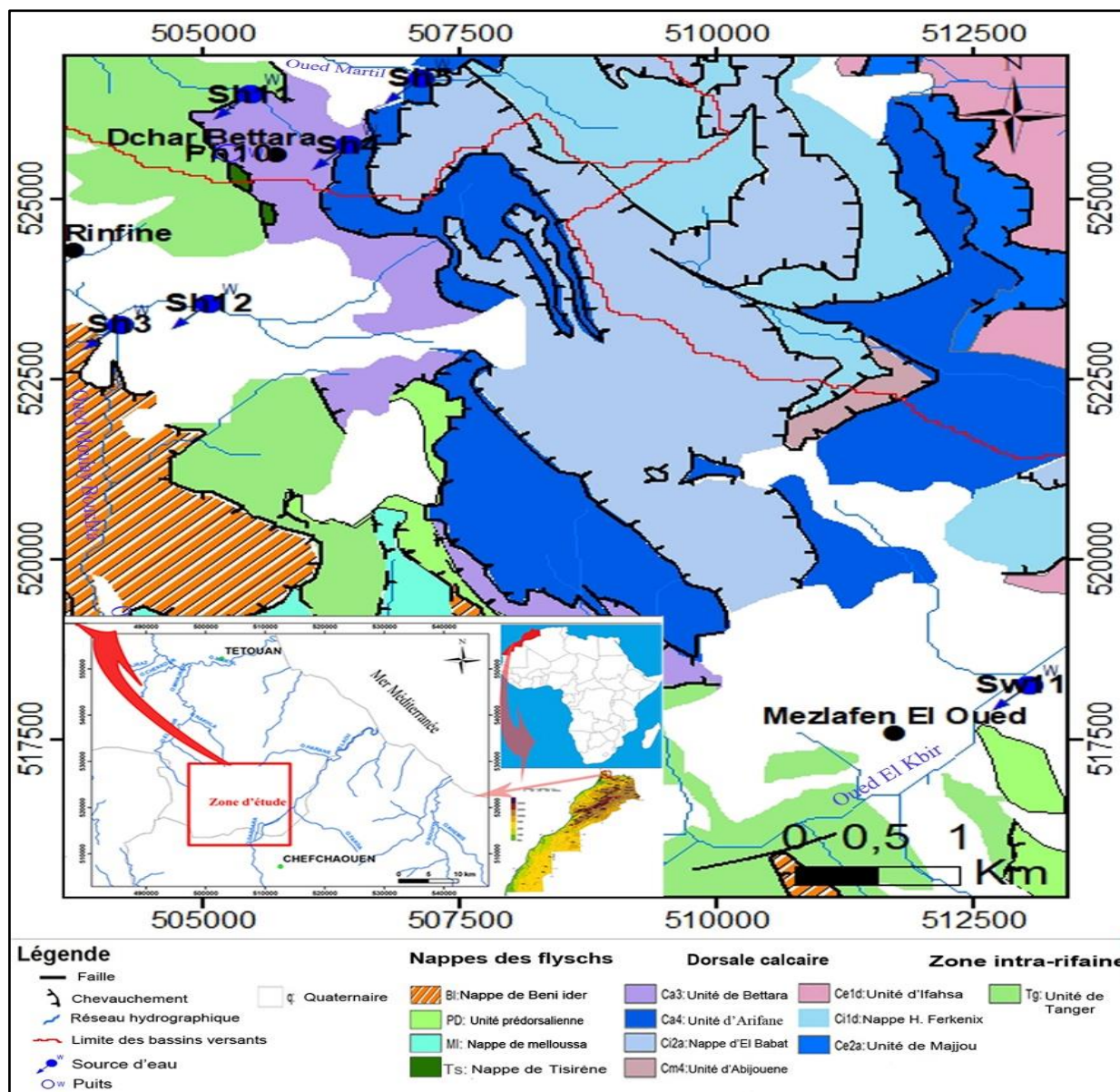


Fig. 1. Schéma structural de la région d'étude avec localisation des points d'eau inventoriés

- Le domaine interne de la zone d'étude représenté par la dorsale calcaire qui comprend l'unité de Bettara (Grès, Conglomérats, Marnes et des calcaires à la base, d'âges Lias inférieur à oligocène), l'unité d'Arifane (des formations allant du Rhétien à oligocène formées de: Grès, Conglomérats, Marnes, formation carbonatée massive et à la base des alternances calcaréo-dolomitiques), la nappe d'El Babat (d'âges permo-Werfénien à Eocène constituée des Conglomérats, Calcaire, Dolomie et à la base des formations détritiques), l'unité d'Abjouéne (marnes oligocènes, brèches éocènes, formation Carbonatée masive: Hettangien et alternance calcaréo-dolomitiques: Rhétien), la nappe de Hafa Ferkennix (Grès, Conglomérats: Oligocène, Calcaires massifs blancs, partiellement dolomitisés:

Sinémurien et Dolomies: Trias supérieur), l'unité d'Lfahsa (nappe de J. Lakraa) et l'unité de Majjou (nappe de J. Tazoute) [14], [15].

- Le domaine externe de la zone d'étude est formé par l'unité de Tanger qui est constituée de séries d'âge Crétacé supérieur (Marnes et minces lits de microbrèches en haut et des argiles, siltites et quelques bancs épais de calcilutite siliceuse passant au silex en bas). Il est largement charrié par les nappes des flyschs et le domaine interne [14]. Les nappes des flyschs (Flysch maurétanien et massylien) flottent sur les zones externes. Elles sont formées par la nappe de Beni Ider (calcarénites éocènes et grés-micacés oligocènes), la nappe de Melloussa (les séries sont caractérisées par des flyschs schisto-quartziteux de l'Albo-aptien, des phanites du Cénomanién et des marnoschistes du Crétacé supérieur) et la nappe de Tisirène, qui reposent par l'intermédiaire d'un contact tectonique plat ou à léger pendage vers l'Ouest et/ou l'Est sur les différents termes de l'unité de Tanger [16].
- L'unité prédorsalienne (flyschs marno-gréseux et grés d'aspect numidien d'âge Oligocène probable et marno-calcaires à Saccocoma d'âge Malm), il regroupe les affleurements qui se trouvent piégés entre les zones internes et externes du Rif et des cordillères bétiques [13].

2.3 MÉTHODOLOGIE

Dans le présent travail, l'analyse approfondie du terrain joue un rôle primordial et constitue une étape de base pour la démarche scientifique du thème. Il s'agit ici d'une méthodologie de recherche scientifique (OHERIC). Nous avons procédé par:

2.3.1 TRAVAIL DE TERRAIN

Sur le terrain, nous avons commencé par la reconnaissance géographique de la zone d'étude à l'aide d'une base cartographique adaptée; la reconnaissance géologique générale du secteur d'étude et l'inventaire des points d'eau existants sur le terrain. Ensuite, nous avons déterminé les coordonnées et les altitudes des points d'eau et mesurer sur terrain des paramètres physico-chimiques. A chaque campagne les mesures in situ ont été effectuées au niveau de chaque point d'eau: la température a été mesurée à l'aide d'un thermomètre digitale avec sonde déportée (thermomètre de précision CHECKTEMPR1), le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre étanche portatif muni d'une électrode (CONSORT C933) et vérifié par une bandelette indicatrice de pH (pH-Quick® en rouleau pH 1-11), et la conductivité avec un conductivimètre portatif multi gamme étanche équipé d'un dispositif de compensation automatique de température. Les échantillons d'eau prélevés pour l'analyse chimique sont conservés dans des bouteilles en plastique d'un litre rincées au préalable trois fois avec l'eau à prélever.

2.3.2 TRAVAIL DE LABORATOIRE ET DE BUREAU

Des glacières ont été utilisées pour la conservation des échantillons qui ont été acheminés au laboratoire. Les échantillons d'eau ont été conservés à 4 °C pendant le transport et au laboratoire, puis ont été analysés dans les 24 heures qui suivent. Le dosage des bicarbonates et des Nitrates s'est effectué à l'arrivée au laboratoire ou dans les 24 heures qui ont suivi le prélèvement. Les analyses chimiques des eaux sont réalisées au centre de Transfert des Technologies de l'eau (C.T.T) de l'agence du bassin hydraulique de Loukous de Tétouan, au Laboratoire Régional d'Environnement au sein de la Faculté des Sciences Abdel Malek Essaâdi de Tétouan et à la société WATER MINERAL à Chefchaoun. On a utilisé la technique de la tombée de burette, le titrage, le spectrophotomètre à flamme et le spectrophotomètre à UV. Ces analyses sont réalisées au laboratoire selon le protocole de l'analyse de Rodier [17].

3 RESULTATS

Les résultats des analyses physico-chimiques ont été traités par des méthodes d'analyse et des statistiques multivariées couplées aux méthodes hydrochimiques. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation des diagrammes de Piper, de Schöeller-berkaloff réalisés sous le logiciel Diagrammes pour la classification hydrochimique des eaux. L'approche statistique est basée sur l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux, le regroupement des eaux et l'identification des facteurs responsables de ces regroupements.

3.1 FACIES ET PARENTES GEOCHIMIQUES DES EAUX DES AQUIFERES DE LA REGION

La représentation sur le diagramme de Piper et de Schöeller-Berkaloff de la composition chimique des eaux analysées (7 points d'eau: 6 sources d'eau et un seul puits Ph10) des systèmes aquifères de la zone d'étude révèle bien un type d'eau caractérisé par une composition chimique à dominance bicarbonaté calcique (fig.2).

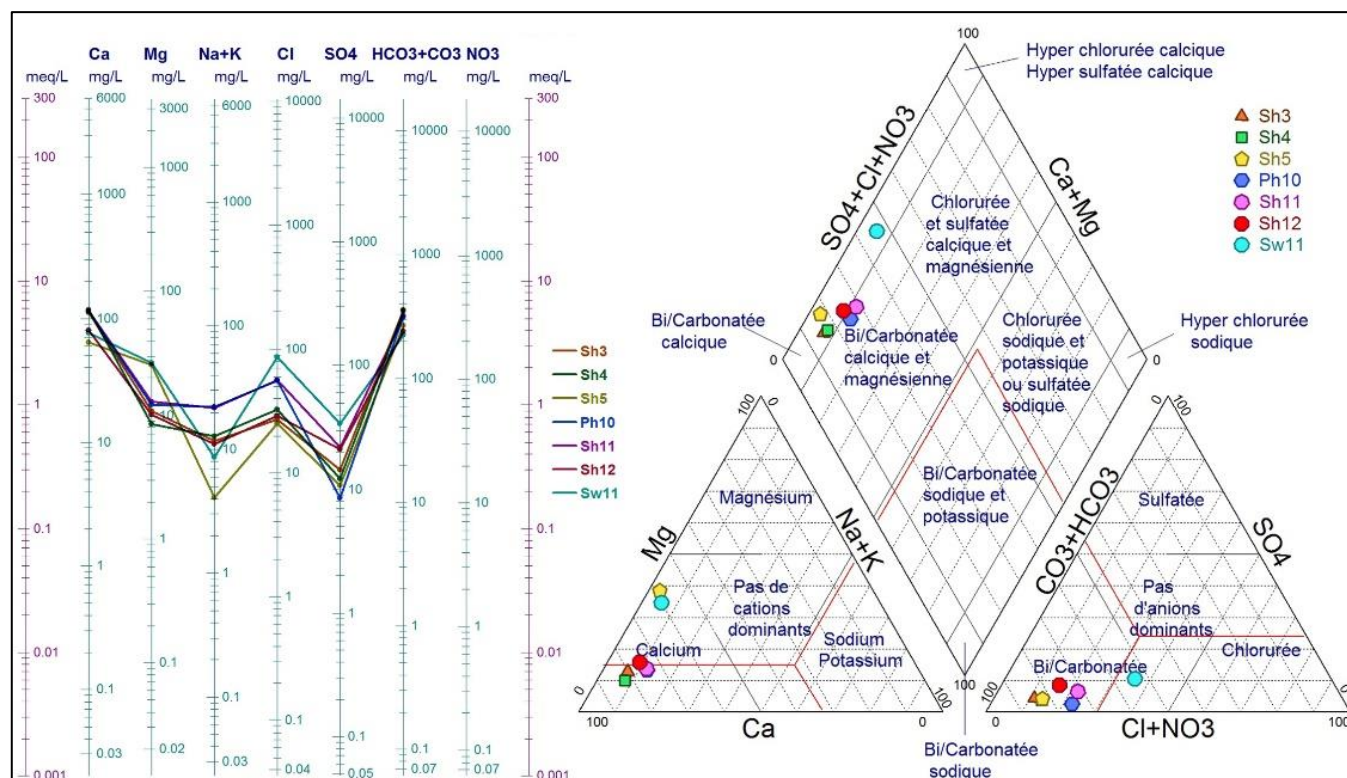


Fig. 2. Diagramme semi-logarithmique de Schöeller-berkaloff et de Piper représentent les faciès des eaux souterraines de la région d'étude

3.2 MECANISMES DE LA MINERALISATION DES EAUX DES SYSTEMES AQUIFERES

Le chimisme des eaux issues des systèmes aquifères de la Dorsale de Beni Hassan est déterminé à partir des résultats d'analyses de sept points d'eau (6 sources et 1 puits). Les points d'eau choisis sont bien répartis dans l'espace (Trois sources: Sh11, Sh12 et Sh3 et un puits: Ph10 au niveau du système aquifère de Bettara/Unité de Tanger, une source: Sh5 au niveau du système aquifère de nappe d'El Babat/Unité d'Arifane, une source: Sh4 au niveau du système aquifère d'Unité de Arifane/Unité de Bettara et une source: Sw11 du système aquifère d'unité prédorsalienne/Unité de Tanger). Ces points d'eaux captent des eaux souterraines qui jaillissent des aquifères constitués par des formations généralement carbonatées (Unité d'Arifane et Nappe d'El Babat) et gréseuses (Unité de Bettara et unité prédorsalienne). Ces formations géologiques constituent un réservoir potentiel logeant des aquifères à nappes libres. Les marnes d'Oligocène (Unité de Bettara) et les argiles du crétacé supérieur de l'Unité de Tanger forment le substratum imperméable de ces nappes d'eau.

L'étude statistique de 7 analyses des eaux des nappes libres des systèmes aquifères de la Dorsale de Beni Hassan montre des valeurs des écarts types allant d'une valeur minimale de 0.56 pour le potassium à une valeur maximale de 50 pour les bicarbonates (HCO_3^-). Cette dernière valeur signifie que la moyenne des bicarbonates est peu représentative et la dispersion de ces ions chimiques par rapport à la moyenne est grande. En se référant au coefficient de variance (CV%), on constate que les teneurs des éléments chimiques sont peu variables dans les eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan et elles ne présentent pas une dispersion très remarquable autour de leur moyenne. Les bicarbonates sont les anions les plus dominants avec une moyenne de 295.15 mg/l tandis que, le cation le plus dominant est le calcium avec une moyenne de 96.75 mg/l. Généralement, les eaux des aquifères de la région sont exemptes de la Nitrate (NO_3^-) (fig.3).

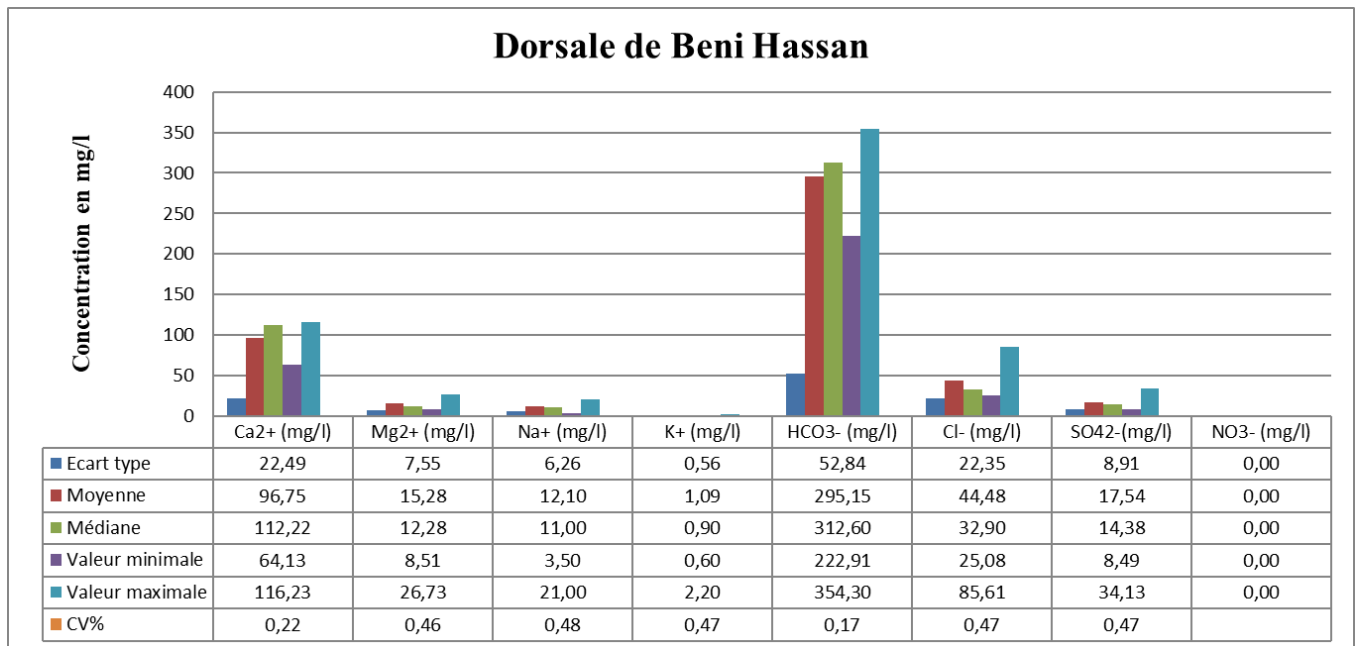


Fig. 3. Les valeurs statistiques des concentrations caractéristiques en éléments majeurs d'eau des nappes libres des systèmes aquifères de la Dorsale de Beni Hassan

3.2.1 L'ANALYSE DES BALANCES IONIQUES

La figure 4 représente les balances ioniques calculées sur chacun des échantillons d'eau analysés issus des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan (7 analyses). Elles sont toutes comprises dans l'intervalle de $-5\% < \text{NICB} < 5\%$. Ces résultats présentent un argument en faveur de la fiabilité des données d'analyses.

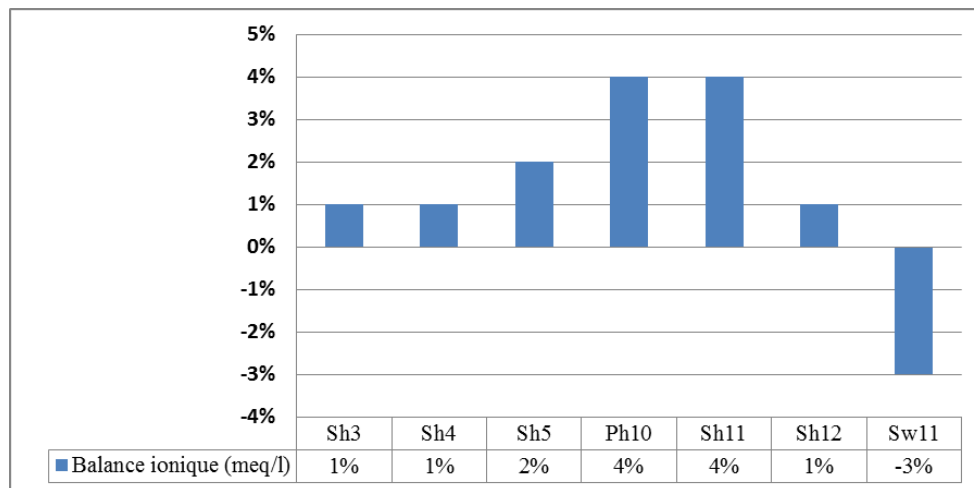


Fig. 4. Représentation des balances ioniques calculées des échantillons d'eau des nappes libres de la région d'étude

3.2.2 CATIONS

Les diagrammes de distribution (fig.3) montrent des variations importantes des teneurs en cations des eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan. Ils présentent un ordre d'abondance de type $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ (Fig. 3 et 5). Ces eaux souterraines analysées présentent des teneurs en cations comprises entre 5.27 à 7.70 meq/l pour une moyenne de 6.64 meq/l.

Les teneurs en ion dominant, le calcium (Ca^{2+}) varient entre 64.13 (Ph5) et 116.23 mg/l (Sh4) pour une valeur moyenne de 82.58 mg/l et la médiane de 112.22 mg/l (fig. 3). La majorité des valeurs sont regroupées autour de 115 mg/l au niveau de l'histogramme (fig. 5A).

Les concentrations en magnésium (Mg^{2+}) oscillent entre 8.51 et 26.73 mg/l. La valeur médiane de 12.28 mg/l est inférieure à la moyenne de 15.28 mg/l, ce qui implique que plus de 50 % des analyses ont une valeur inférieure à la moyenne. Deux échantillons ont une teneur supérieure à 26 mg/l tandis que le reste est regroupé autour de 10 à 14 mg/l (fig. 5B). Leur composition est probablement influencée directement par les formations calcaréo-dolomitiques des aquifères logeant ces nappes d'eau. Les concentrations en sodium (Na^+) sont variables d'une source à l'autre et s'inscrivent entre 3.5 mg/l et 21 mg/l. La valeur moyenne est de 12.10 mg/l, elle est supérieure à la médiane qui est de 11 mg/l (fig.3). Les valeurs sont concentrées autour de 8 mg/l et 12 mg/l et seulement deux points d'eau (Ph10 et Sh11) qui montrent des teneurs en sodium supérieur à 18 mg/l (fig. 5C).

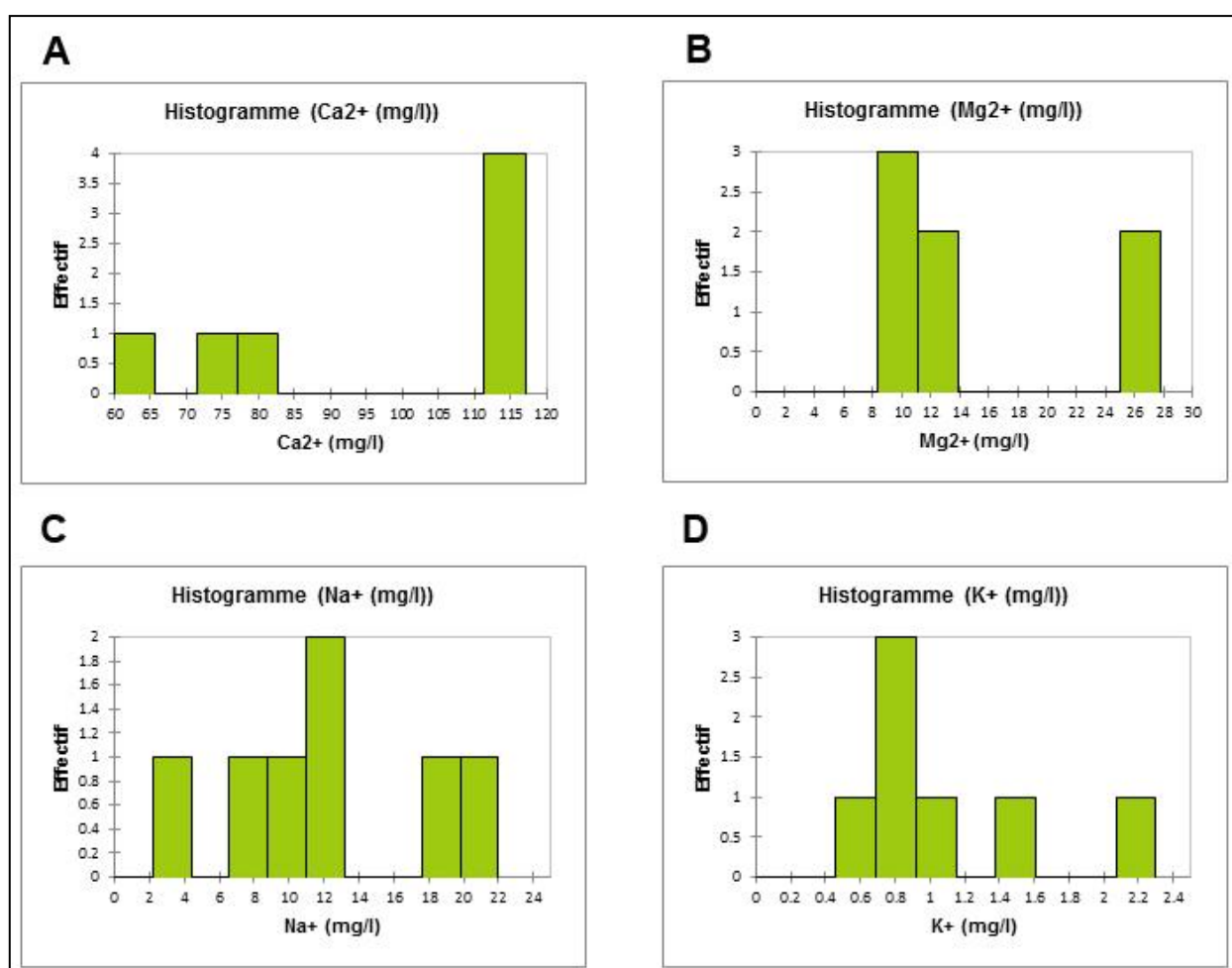


Fig. 5. Distribution des teneurs en cations des eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan

Le cation le moins abondant dans les eaux des nappes libres de la dorsale de Beni Hassan est représenté par une teneur moyenne en potassium de 1.09 mg/l qui est supérieur à la médiane de 0.9 mg/l. Il montre une variabilité moins importante avec une valeur minimale de 0.6 et un maximum de 2.2 mg/l. Son coefficient de variation illustre très bien cette observation avec un pourcentage de 0.45 % (Fig. 3). Une seule analyse qui a la teneur de 2.2 mg/l. La majorité des valeurs sont regroupées autour de 0.6 et 1 mg/l au niveau de l'histogramme (Fig. 5D).

3.2.3 ANIONS

En ce qui concerne les anions des eaux souterraines analysées, ils présentent des teneurs comprises entre 5.17 meq/l à 7.16 meq/l pour une moyenne de 6.46 meq/l, plus proches de la médiane (6.87 meq/l). Ces anions montrent un ordre d'abondance de type $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Ces eaux sont exemptes de nitrate NO_3^- (fig. 3).

En se basant sur les histogrammes de la figure 6, les concentrations des teneurs en anions des eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan sont généralement dissymétriques et dispersées dans l'ensemble. L'ion bicarbonate (HCO_3^-) reste l'anion le plus dominant dans toutes les eaux des nappes libres de la Dorsale. C'est l'anion dont les variations de concentration ont les plus grandes amplitudes et qui sont dispersés par rapport à la moyenne de 295.15 mg/l avec un grand écart type de 52.84 %. Ses valeurs s'inscrivent entre un minimum de 222.91 mg/l et un maximum de 354.30 mg/l et plus de 50 % des points d'eau sont supérieurs à 310 mg/l (fig. 6 A). Par la suite, viennent les chlorures avec une moyenne de 44.48 mg/l supérieure à la médiane de 32.90 mg/l. Ses valeurs sont regroupées autour de 30 mg/l et 55 mg/l. En outre, les ions sulfates marqués par une moyenne de 17.54 mg/l et des valeurs oscillantes entre un minimum de 8.49 mg/l et un maximum de 34.13 mg/l caractérisent l'eau de la source (Sw11) de la région Mezlafen El Oued (fig.1).

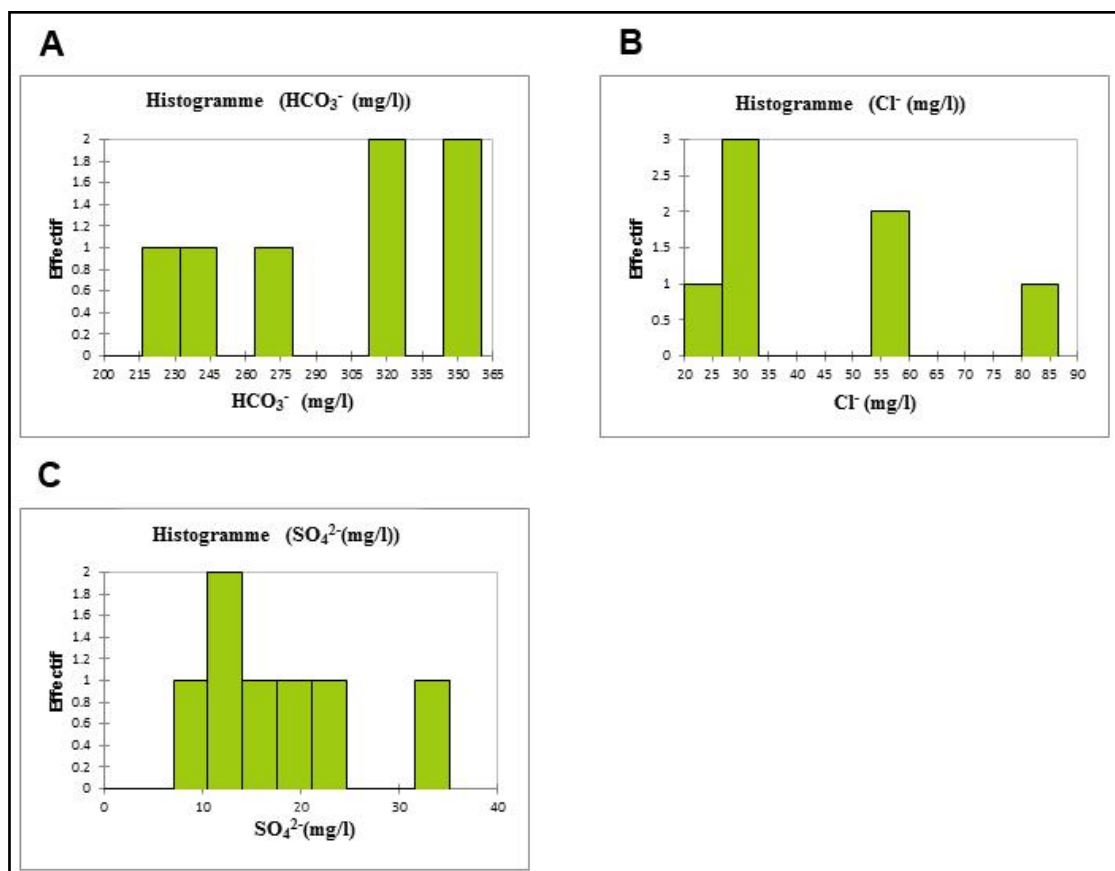


Fig. 6. Distribution des teneurs en anions des eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan

3.2.4 CORRELATION ENTRE LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES MAJEURS ET ORIGINE DE LA MINÉRALISATION

3.2.4.1 INDICE DE SATURATION

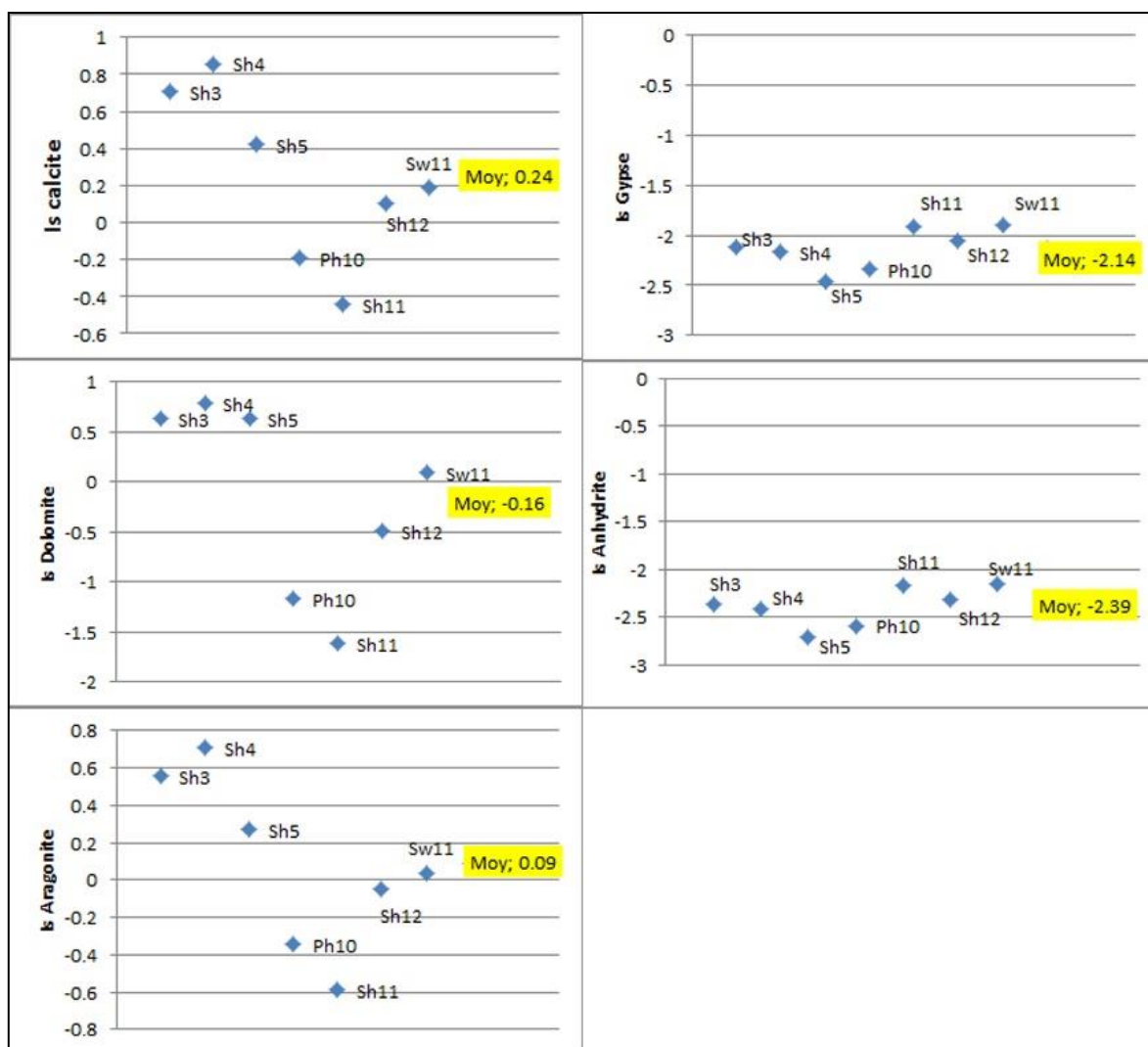


Fig. 7. Indice de saturation vis-à-vis des principaux minéraux

L'étude des équilibres chimiques des eaux souterraines des nappes libres de la dorsale de Beni Hassan et leur saturation vis-à-vis des minéraux est fondée sur le calcul des activités ioniques. Les indices de saturation (Is) sont calculés par le programme WateqF [18], [19]. La moyenne de l'indice de saturation de ces eaux est supérieure à zéro. Donc, ces eaux sont généralement sursaturées vis-à-vis de la calcite et de l'aragonite et sous-saturées vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite. Pour la dolomite, certains points comme Sw11, Sh5, Sh4 et Sh3 sont sursaturés vis-à-vis de la dolomite tandis que les restes sont sous-saturés (Fig. 7). Ainsi, la minéralisation des eaux est acquise en grande partie par l'échange ionique avec les roches encaissantes et le substratum.

En conséquence, les ions dissous qui dominent et qui agissent essentiellement sur la minéralisation des eaux et définissent la géochimie des eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan sont le calcium (Ca^{2+}) de la part des cations, et les bicarbonates (HCO_3^-) de la part des anions. La dissolution de ces ions est limitée par la saturation vis-à-vis de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite chez certains points d'eau. La dominance de ces ions pourrait être expliquée par les constituants des formations carbonatées calciques, calco-magnésiennes dolomitiques et gréseuses des aquifères de la Dorsale de Beni Hassan.

3.2.4.2 CORRELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LES CATIONS (CA²⁺ ET NA⁺)

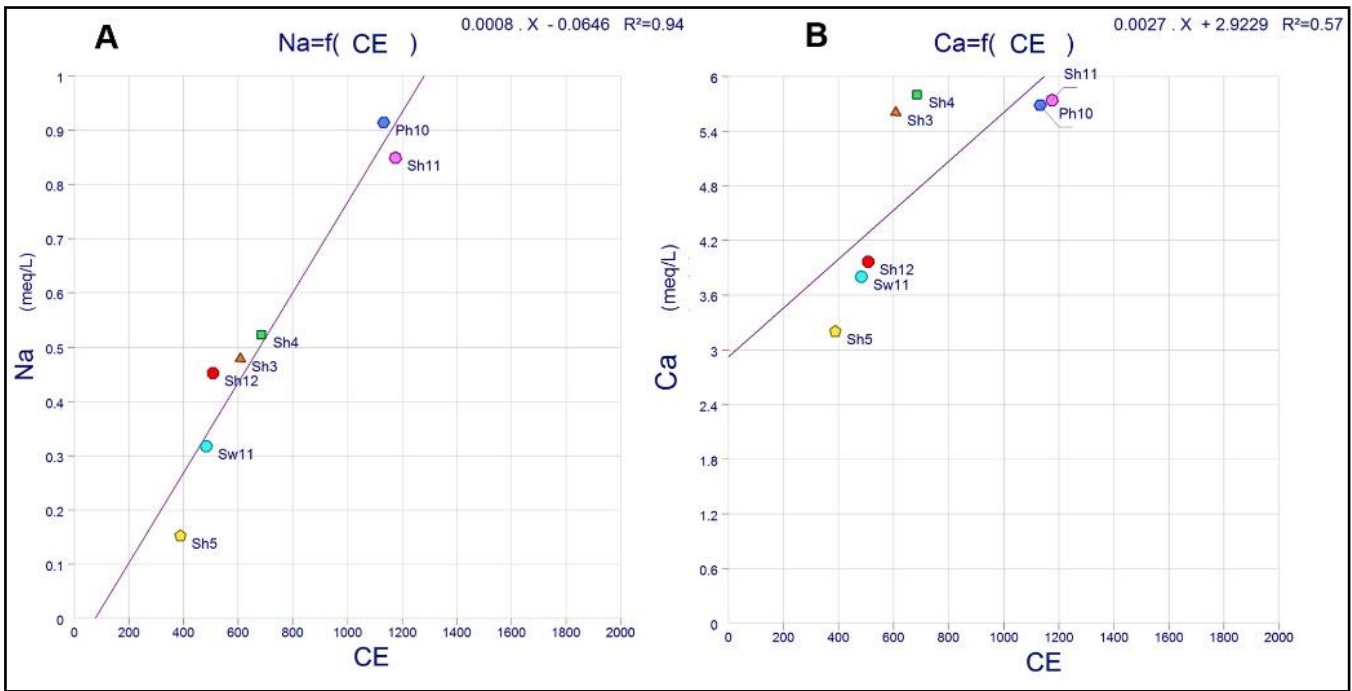


Fig. 8. Droites de régression entre la conductivité électrique (CE en µs/cm) et les ions (Ca²⁺ et Na⁺ en meq/L)

Les droites de régression des graphes binaires (fig. 8) montrent la relation étroite existante entre la variation de la conductivité électrique (CE en µs/cm) en fonction des ions calcium et sodium en eaux des nappes libres de la dorsale de Beni Hassan. Elles montrent une corrélation linéaire presque parfaite entre la conductivité électrique des eaux et le sodium (fig. 8A) et une corrélation positive plus ou moins significative entre la conductivité et le calcium (fig. 8B). Cela indique que la conductivité des eaux est étroitement contrôlée par le sodium (R²= 0.94) et le calcium (R²= 0.57).

3.2.4.3 LE RAPPORT CARACTERISTIQUE ENTRE BICARBONATES (HCO₃⁻) ET LES CATIONS

Tenant compte de la dominance des bicarbonates (HCO₃⁻) et du calcium (Ca²⁺), il est important de vérifier la relation entre ces deux éléments. La figure 9 montre une corrélation positive très significative entre les bicarbonates et le cation dominant (Ca²⁺), tandis qu’avec le cation magnésium (Mg²⁺) la corrélation est négative. Cet enrichissement peut s’expliquer par la dissolution des roches sédimentaires carbonatées constituant les formations aquifères du système d’une part et bordant ce dernier d’autre part. C’est le cas, en particulier, des mécanismes impliquant la chimie des carbonates et les échanges de bases, comme le montre la figure 9. Les cations alcalino-terreux (en meq/l) se corrént différemment aux ions bicarbonate. La figure 9 B montre que 70% des points analysés qui se positionnent au-dessus de la droite de dissolution, indiquent une abondance en calcium (Ca²⁺) dans les eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan.

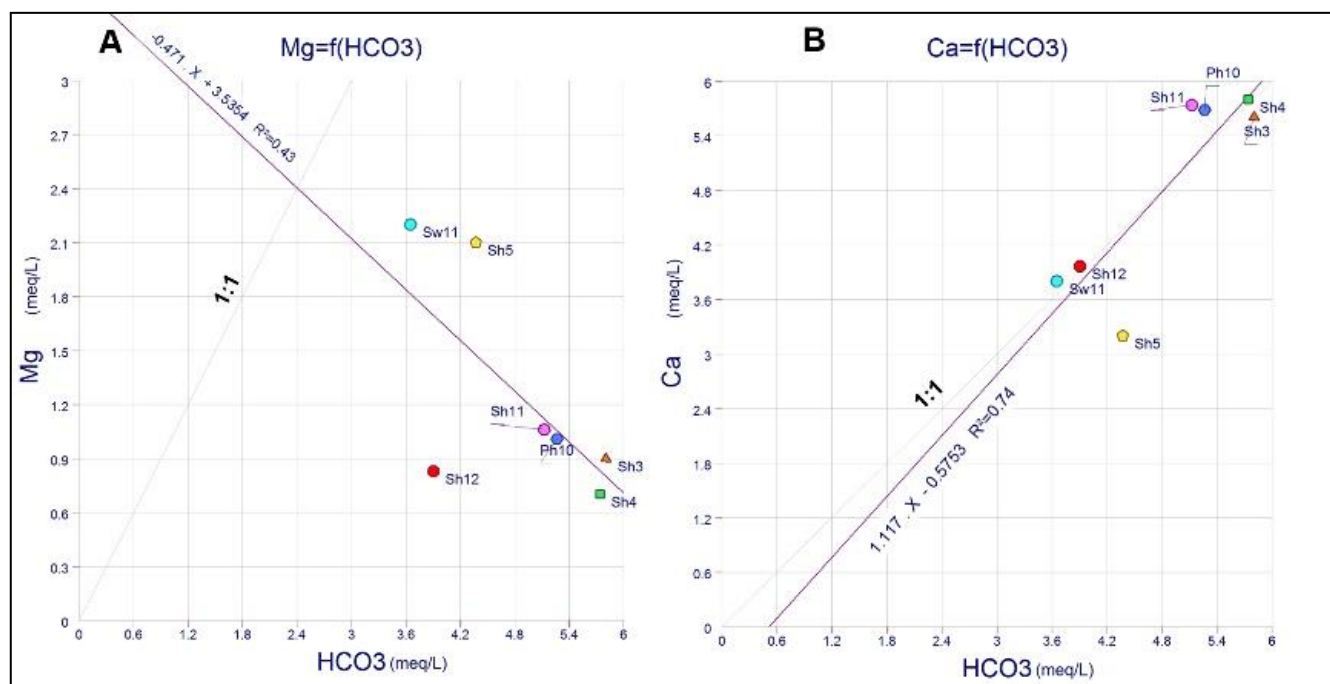


Fig. 9. Rapport entre la teneur en Bicarbonates (HCO_3^-) et les cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans les eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan

3.2.4.4 LES RAPPORTS CARACTERISTIQUES ENTRE LES CHLORURES ET LES AUTRES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

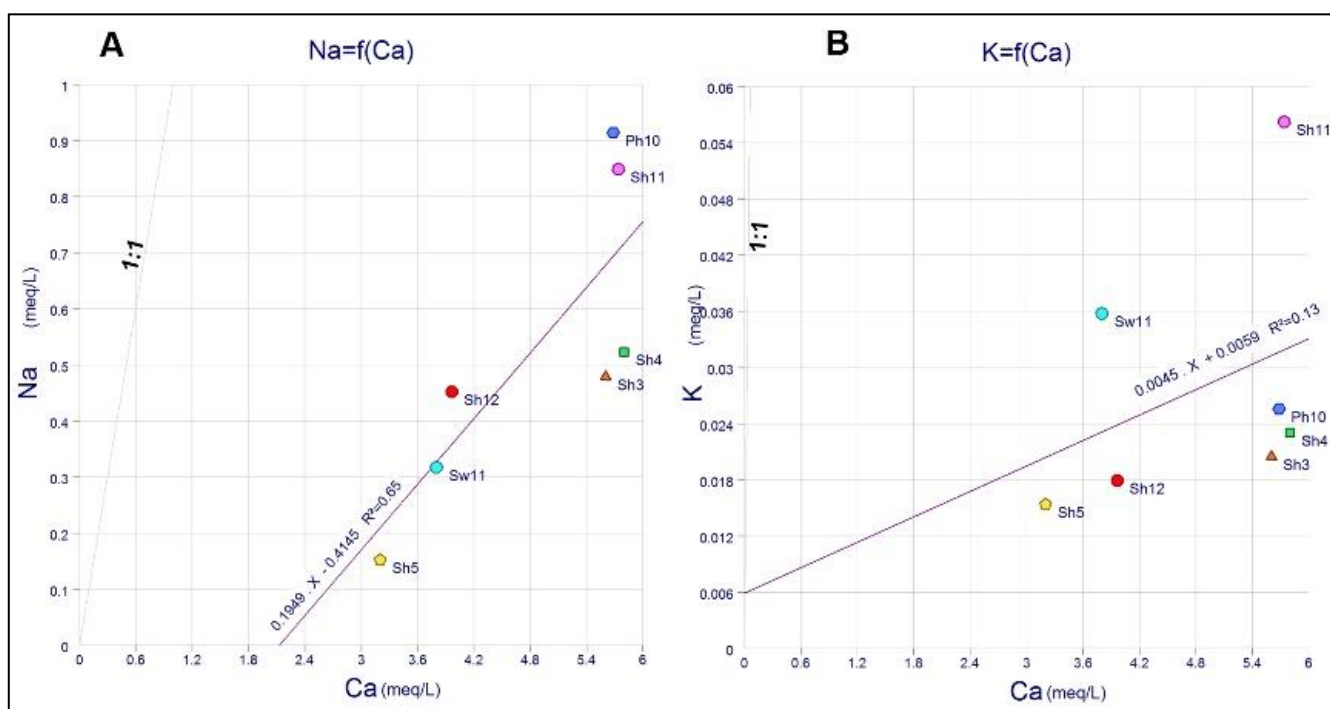


Fig. 10. Relation entre la teneur en chlorure (Ca^{2+} en meq/l) et les ions potassium et sodium (Na^+ et K^+) dans les eaux des de la zone d'étude

La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium (Na^+) et potassium (K^+) en fonction des concentrations en chlorures (fig. 10 A et B), montre que, tous les échantillons analysés se trouvent au-dessous de la droite de la dissolution (1:

1) de l'halite (NaCl) et de la Sylvine ou du sel amer (KCl); ce qui explique la présence considérable de l'ion chlorure (Cl⁻) dans les eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan. Cela favorise l'existence d'une autre origine pour l'ion chlorure qui fait accroître la concentration des chlorures par rapport à celle du sodium et du potassium. Comme cet excès en chlorures est accompagné d'un déficit en sodium et en potassium dans les eaux, il peut être expliqué par le phénomène d'échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent l'ion Na⁺ et K⁺ après libération des ions Ca²⁺ (l'hydrolyse des silicates dans les grès (Flyschs) et les argiles (Unité de Tanger). Cette proposition est illustrée par la figure (fig. 10) qui montre une bonne corrélation entre le Ca²⁺ et Na⁺ d'une part et d'autre part une mauvaise corrélation entre calcium et potassium, donc d'une façon générale un excès en Ca²⁺ par rapport à la droite de la pente (1: 1).

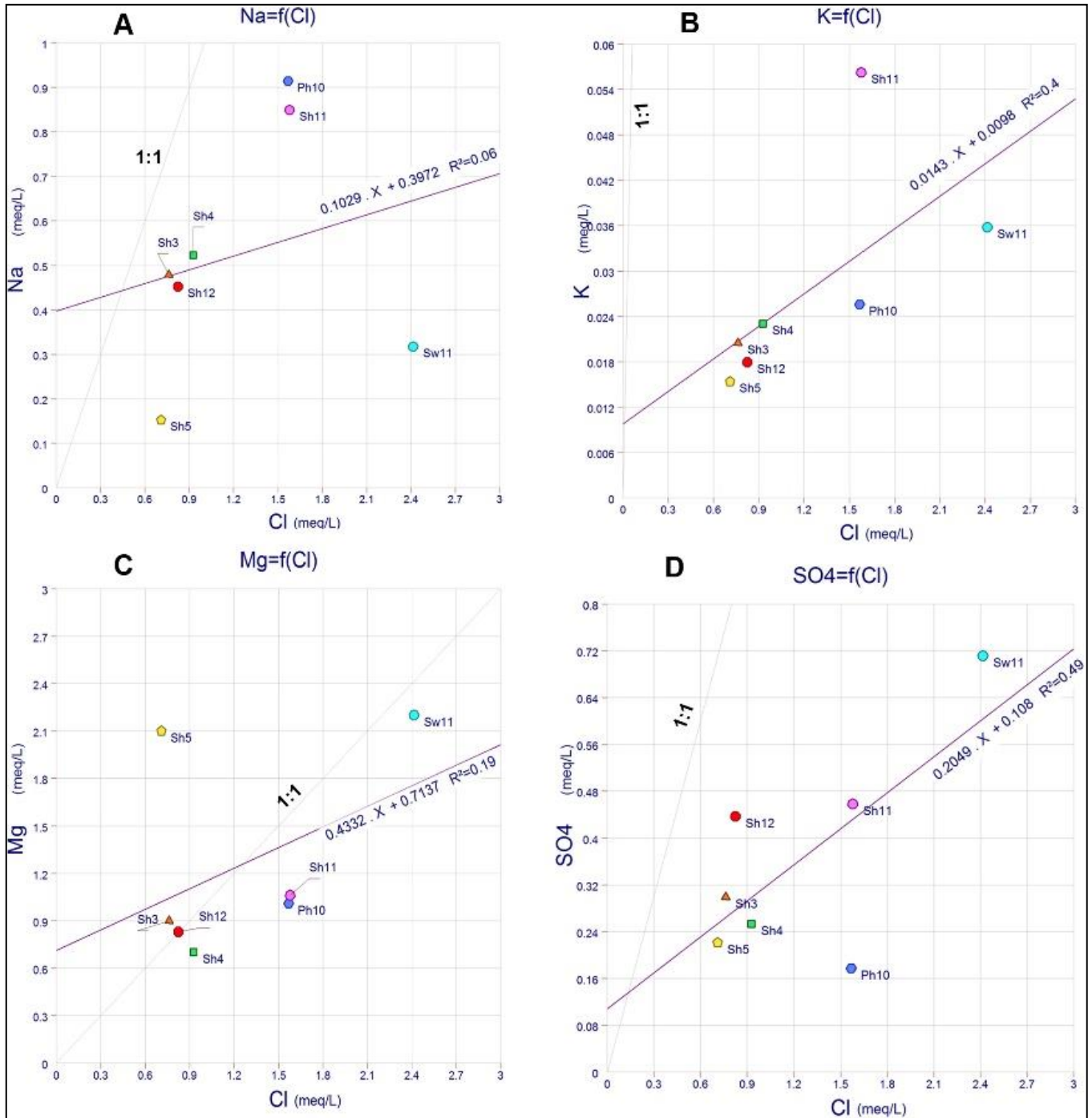


Fig. 11. Relation entre la teneur en chlorure (Cl en meq/l) et certains éléments chimiques (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ et SO₄²⁻) dans les eaux des de la Dorsale de Beni Hassan

Les figures 11 (C et D) montrent que le chlorure est toujours en quantité supérieure par rapport aux ions Magnésium et Sulfate dans les eaux des nappes libres du secteur d'étude.

3.2.4.5 LE RAPPORT CARACTERISTIQUE ENTRE CALCIUM ET MAGNESIUM

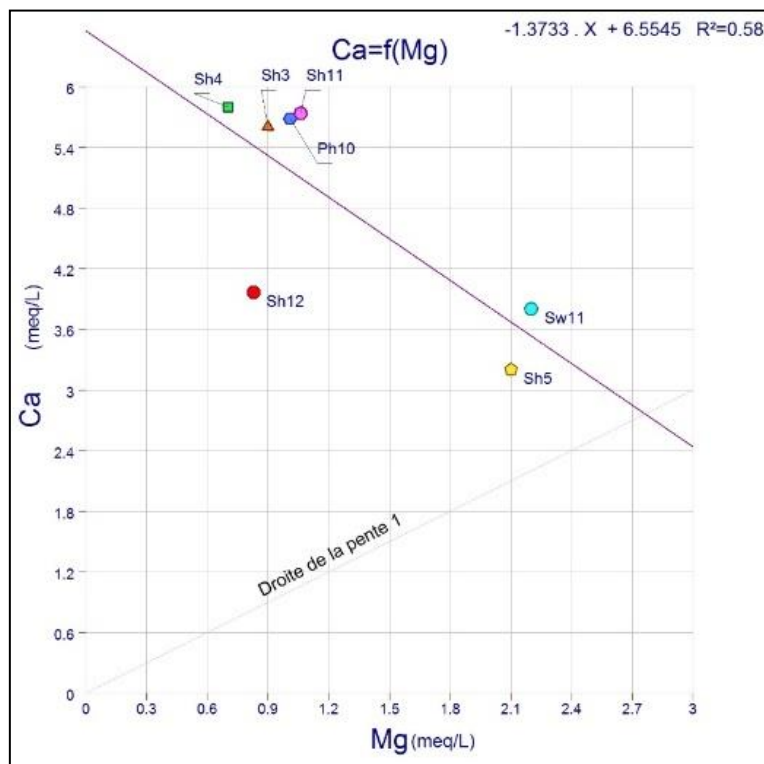


Fig. 12. Le rapport Mg^{2+} / Ca^{2+} des eaux souterraines des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan

La figure 12 montre une corrélation négative plus ou moins significative entre le magnésium (Mg^{2+}) et le calcium (Ca^{2+}) et que la totalité des échantillons se situent au-dessus de la droite de la pente 1 mettant en évidence un excès en Ca^{2+} qui semble s'accroître avec l'augmentation de la minéralisation. Généralement, cette évolution peut s'expliquer par un apport prédominant de Ca^{2+} issu de lessivage des roches carbonatées et des Flyschs formants les aquifères des nappes libres de la Dorsale calcaréo-dolomitique d'une part et des argiles des substratums d'autre part.

3.3 ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIABLE

Pour l'analyse en composantes principales, nous avons réalisé une étude touchant à tous les points d'eaux analysés des systèmes aquifères de la dorsale de Beni Hassan. Cette analyse a été faite en se basant sur 10 paramètres physico-chimiques (Tableau 1) provenant de ces eaux souterraines et elle nous permet de décrire ou de classer les données pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydrogéochimique de l'aquifère et de mettre en évidence les associations entre les différentes variables et l'existence éventuelle de sous-populations.

Tableau 1. Les codes des variables utilisés pour le traitement de l'ACP

Variables	Température d'eau	Le potentiel hydrogène	Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
Code	T°C	pH	Cond	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	SO4

3.3.1 MATRICE DE CORRELATION

La matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques des 7 analyses d'eau issues des systèmes aquifères du secteur-objet d'étude montre des liaisons de corrélation considérables entre certains paramètres physico-chimiques. Au regard des résultats de ce tableau, il existe des corrélations positives et négatives plus significatives représentées sous forme de (Tableau 2):

Tableau 2. Matrice de corrélation des eaux des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan

Variabes	T°C	pH	e25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
T°C	1									
pH	0.215	1								
e25°C	-0.116	-0.876	1							
Ca ²⁺	0.290	-0.409	0.757	1						
Mg ²⁺	-0.589	0.243	-0.460	-0.760	1					
Na ⁺	-0.073	-0.839	0.968	0.803	-0.610	1				
K ⁺	-0.139	-0.708	0.644	0.358	0.029	0.534	1			
HCO ₃ ⁻	0.484	-0.064	0.485	0.862	-0.656	0.493	0.018	1		
Cl ⁻	-0.771	-0.382	0.285	-0.015	0.440	0.238	0.635	-0.385	1	
SO ₄ ²⁻	-0.285	-0.061	-0.209	-0.337	0.417	-0.208	0.502	-0.652	0.697	1

- Une très bonne corrélation entre la conductivité et l'ion de sodium (0.968) et de calcium (0.757);
- Une bonne corrélation positive entre les bicarbonates et le calcium (0.862) et une corrélation négative entre le magnésium et les bicarbonates (-0.656);
- Une corrélation significative entre chlorure et sulfate (0.697), entre chlorure et potassium (0.635) et entre Mg²⁺ et les ions So₄²⁻ et Cl⁻ à un degré moindre (0.417) et (0.449) successivement.

La minéralisation des eaux souterraines des nappes libres de la Dorsale de Beni Hassan est acquise en grande partie par l'échange ionique avec les roches sédimentaires carbonatées qui dominent la région. Les relations entre les teneurs des éléments chimiques présents dans ces eaux montrent que la minéralisation est régie par le calcium et le magnésium pour les cations, par les bicarbonates et les chlorures pour les anions.

3.3.2 CERCLE DE CORRELATION ET ANALYSE HIERARCHIQUE ASCENDANTE (HCA)

Le tableau 3 et le cercle de corrélation (Fig. 13) examinent les liens entre les variables. Ils montrent que les axes factoriels (F1 et F2) portent 78.14 % d'informations ou de données. Le premier axe (F1) exprime 41.93 % de la variance totale et le deuxième, 36.21 %. La représentation à l'aide des deux premiers facteurs rend compte de manière satisfaisante de la structure des nuages de points. Cette somme indique ainsi que la représentation plane de la distribution spatiale des individus contient 78.14 % de l'information totale donnée par les mesures. Elle est donc très significative pour observer le comportement global des échantillons.

Tableau 3. Représentativité des axes factoriels des eaux des nappes aquifères de la Dorsale de Beni Hassan

Axe factoriel	F1	F2	F3
Valeur propre	4,19	3,62	1,08
Variabilité (%)	41,93	36,21	10,83
% cumulé	41,93	78,14	88,97

La représentation graphique du cercle de corrélation (Fig. 13) met évidence trois grands regroupements et deux sous-regroupement des paramètres étudiés dans les eaux souterraines de la région d'étude. Ces variables sont donc bien représentées. La conductivité, les ions dominants (Ca²⁺, HCO₃⁻) et le sodium présentent non seulement une très forte corrélation positive entre eux, mais aussi avec l'axe F1 en formant le premier regroupement. Ceci nous permet de conclure que l'axe F1 oppose les eaux très minéralisées aux eaux moyennement minéralisées. Il met en évidence une minéralisation de l'eau par le phénomène de dissolution de la roche. Le facteur F1 définit donc un axe de minéralisation globale de l'eau par le phénomène de dissolution de la roche calcaire à la suite d'un long temps de contact eau-roche et le phénomène d'échange de

base qui est le deuxième mécanisme dans l'acquisition des ions dans les eaux souterraines du secteur d'étude. Tandis que, la température, le pH, le Mg^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^- présentent une corrélation très remarquable avec l'axe F2. Il représente l'axe le plus minéralisé par les ions Mg^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^-

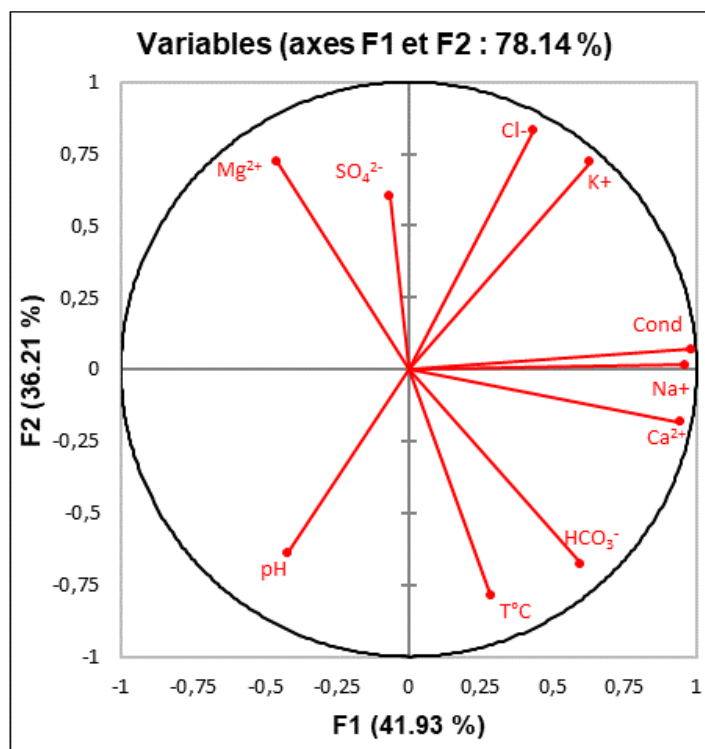


Fig. 13. Cercle de corrélation des variables explicatives des eaux des aquifères de la dorsale de Beni Hassan sur le plan factoriel (F1 et F2)

La projection des variables physico-chimiques et des points d'eaux analysées sur le plan factoriel (F1 x F2) suggère trois classes ou groupes et deux sous-groupes d'eau souterraine caractérisant la dorsale de Beni Hassan (Fig. 14).

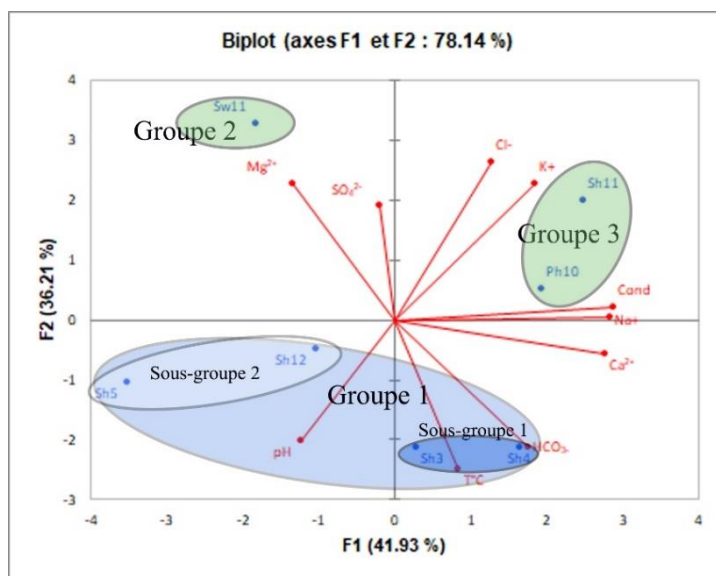


Fig. 14. Carte factorielle des variables explicatives et des points d'eaux analysées des aquifères de la Dorsale de Beni Hassan

Le dendrogramme appliqué aux 7 échantillons d'eau des aquifères de la dorsale de Beni Hassan révèle quelques indications sur le niveau de similitude entre les points d'eau formant trois classes ou groupes et qui sont liés entre eux à une distance euclidienne importante (23), ce qui indique que les échantillons des trois groupes sont géochimiquement distincts.

Le groupe 1 (Sources: Sh3, Sh4, Sh5 et Sh12) est corrélé négativement à l'axe F2 de minéralisation en ions Cl^- , Mg^{2+} et SO_4^{2-} . Il se divise en 2 sous-groupes; le sous-groupe 1 (Sources Sh3 et Sh4) est corrélé positivement à l'axe F1, il représente un sous-groupe d'eau le bien minéralisé, tandis que le sous-groupe 2 (Source Sh5 et Sh12) représente les eaux moyennement minéralisées et il corrèle négativement avec l'axe de minéralisation globale F1 (fig. 14) (fig. 15).

Le groupe 2 (Source Sw11) et le groupe 3 (Puits Ph10 et source Sh11) sont corrélé positivement avec l'axe F2. Au contraire, on trouve que le groupe 3 corrèle positivement avec l'axe F1 et par conséquent, il représente le groupe d'eau le très bien minéralisé, tandis que le groupe 2 corrèle négativement avec l'axe de minéralisation globale (F2) donc, il appartient aux groupes d'eau souterraine qui sont généralement moyennement minéralisés (fig. 14) (fig. 15).

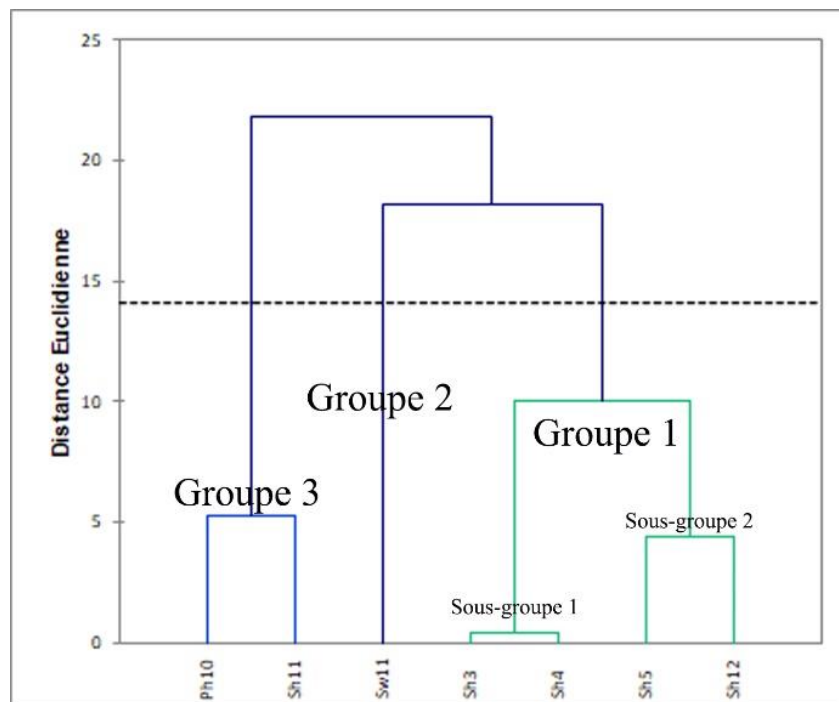


Fig. 15. Dendrogramme des eaux analysées des systèmes aquifères de la Dorsale de Beni Hassan

Du point de vue hydrogéochimique, les eaux souterraines analysées du secteur d'étude sont exemptes de l'élément «Nitrate» et en accord avec les normes internationales de potabilité [20] (fig. 3). Ces résultats hydrogéochimiques corroborent les interprétations hydrogéologiques de ces systèmes aquifères [21].

4 CONCLUSION

Le faciès géochimique des eaux souterraines de la région d'étude est à dominance bicarbonatée calcique. Ces eaux montrent généralement un état de saturation pour la majorité des échantillons vis-à-vis de la calcite, l'aragonite et la dolomite (à un degré moindre), et un état de sous-saturation vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite. L'application des analyses statistiques descriptives à l'étude hydrogéochimique des eaux de la région a bien confirmé que la recharge des nappes aquifères se fait par l'infiltration des eaux des précipitations (pluie + neige) qui tombent au niveau des crêtes des massifs gréseux et calcaréodolomitiques de la Dorsale de Beni Hassan. L'étude des corrélations établies entre les concentrations des principaux éléments majeurs et la conductivité électrique a permis de remonter à l'origine de la minéralisation des eaux des systèmes aquifères du secteur d'étude et elle nous révèle l'existence de 3 classes d'eau (dont 2 sous-classes) qui montrent une minéralisation variée de moyennement minéralisée, bien minéralisée à très bien minéralisée.

REFERENCES

- [1] M. BZIOUI, "La mobilisation de l'eau par les barrages collinaires," *Rev. marocaine génie civil*, pp. 14, 17–19, 1986.
- [2] B. Abdellaoui, A. Merzouk, M. Aberkan, and J. Albergel, "Hydrological balance and siltation of the Saboun dam (Morocco)," *Rev. des Sci. l'Eau*, vol. 15, no. 4, pp. 737–748, 2002, doi: 10.7202/705478ar.
- [3] A. J. Boulton, "Recent progress in the conservation of groundwaters and their dependent ecosystems," *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, vol. 19, no. 7, pp. 731–735, 2009.
- [4] P. J. Hancock, A. J. Boulton, and W. F. Humphreys, "Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater," *Hydrogeol. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 98–111, 2005.
- [5] S. Amalfitano et al., "Groundwater geochemistry and microbial community structure in the aquifer transition from volcanic to alluvial areas," *Water Res.*, vol. 65, pp. 384–394, 2014.
- [6] T. Di Lorenzo, M. Cifoni, P. Lombardo, B. Fiasca, and D. M. P. Galassi, "Ammonium threshold values for groundwater quality in the EU may not protect groundwater fauna: evidence from an alluvial aquifer in Italy," *Hydrobiologia*, vol. 743, no. 1, pp. 139–150, 2015.
- [7] S. Iepure, R. Meffe, F. Carreño, R. L. Rasines, and I. de Bustamante, "Geochemical, geological and hydrological influence on ostracod assemblages distribution in the hyporheic zone of two Mediterranean rivers in central Spain," *Int. Rev. Hydrobiol.*, vol. 99, no. 6, pp. 435–449, 2014.
- [8] C. A. J. Appelo and D. Postma, "Geochemistry, groundwater and pollution: Rotterdam," *AA Balkema*, vol. 536, no. 2, pp. 237–247, 1993.
- [9] J. D. Hem and G. S. (US), "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water," 1989.
- [10] A. Piqué, *Géologie du Maroc: les domaines régionaux et leur évolution structurale*. Imprimerie el Maarif al Jadida, 1994.
- [11] G. Suter, "Carte structurale de la chaîne rifaine au 1/500 000," *Notes Mémoires du Serv. géologique du Maroc*, vol. 245, 1980.
- [12] W. Wildi, "La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène," *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, vol. 24, no. 3, pp. 201–297, 1983.
- [13] M. Durand-Delga, *La courbure de Gibraltar, extrémité occidentale des chaînes alpines, unit l'Europe et l'Afrique*. Birkhäuser, 1972.
- [14] DIDON J., HOGGA A., HADDANE M., *Carte géologique de SOUK LARBA A BENI HESSANE (Echelle 1/50000)*. 2004.
- [15] S. E. M. Saadi, E. A. Hilali, and A. Boudda, "Carte géologique du Rif. Ministère d'Énergie et des Mines Maroc," *Serv. Géol. Not. Mém*, no. 254, 1980.
- [16] EL MRIHI A., "Structure et cinématique de mise en place des nappes de flysch mauritaniens (Rif externe nord occidental) : Elaboration d'un modèle," Abdelmalek Essaadi, *Fac. Sci. Tétouan*, 2005.
- [17] N. M. et coll. Rodier, J. Bernard LEGUBE, *L'analyse de l'eau.*, 9e ed. Paris: ISBN 978-2-10-054179-9, 2009.
- [18] L. N. Plummer, B. F. Jones, and A. H. Truesdell, *WATEQF-a FORTRAN IV version of WATEQ: a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters*, vol. 76, no. 13. Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division, 1976.
- [19] K. Abid, R. Trabelsi, K. Zouari, and B. Abidi, "Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire (sud tunisien) /Hydrogeochemical characterization of the Continental Intercalaire aquifer (southern Tunisia)," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 54, no. 3, pp. 526–537, 2009.
- [20] O. M. de la Santé, "Directives de qualité pour l'eau de boisson: volume 2: critères d'hygiène et documentation à l'appui," in *Directives de qualité pour l'eau de boisson: volume 2: critères d'hygiène et documentation à l'appui*, Genève, 2000, p. 341.
- [21] R. ALILOUCH, K. EL MORABITI, and A. Aziz EL MRIHI, "The contribution to hydrogeological and hydrochemical knowledge of the aquifers in the east side of Bouhachem area (Tetouan, Morocco)," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 8, no. 12, pp. 4510–4522, 2017, doi: 10.26872/jmes.2017.8.12.476.