

HYDRODYNAMISME ET MINÉRALISATION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE PHRÉATIQUE PLIO-QUATERNAIRE DU PLATEAU TIMAHDITE - ALMIS GUIGOU (MOYEN ATLAS, MAROC)

Samir Amrani

Saïd Hinaje

Laboratoire de Géo-ressources et Environnement, Université Sidi Mohamed
Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc

Abstract

The phreatic groundwater situated in the area of study between Timahdite and Almis Guigou (Middle Atlas), is housed in training fluvio-lacustrine and volcanic Plio -Quaternary age. This zone corresponds to a graben or ditch, 5 km wide and 30 km long approximately. This graben is limited to the NW and SE by normal faults mean direction of N30, which is the normal age - old Middle Quaternary result of a tectonic regime extended (Hinaje, 2004). The collapse of this area is attributed to the "dawn» of the Quaternary by J. Martin (1981).

From an inventory of water points and piezometric measurements during low waters (June, July and August, 2012) and during high water (January, 2013) campaign, we could establish piezometric maps. These lines show a groundwater flow groundwater Plio- Quaternary SW to NE direction. The hydraulic gradient increases towards the Almis Guigou region of NE side of the study area. The evolution of the piezometric in time shows seasonal fluctuations in relation to variations in rainfall and intermittent surges (seasonal pumping). Measurements of electrical conductivity of groundwater, as well as the results of physico- chemical analysis allowed us to define different hydrogeochemical fields. The waters are mostly calcium bicarbonate and magnesium facies of low mineralization, while water facies chloride, sulfate, calcium and magnesium strong mineralization, are mostly located near faults (infiltration and dissolution of clay-evaporitic and basaltic rocks of Triassic age).

Keywords: Hydrodynamics, hydrochemistry, Plateau Timahdite-Almis Guigou, Middle Atlas, Morocco

Résumé

La nappe d'eau phréatique située dans la zone d'étude comprise entre Timahdite et Almis Guigou (Moyen Atlas), est logée dans des formations fluvio-lacustres et volcaniques d'âge Plio-Quaternaire. Cette zone correspond à un graben ou fossé, de 5 km de largeur et 30 km de longueur environ. Ce graben est limité vers le NW et le SE par des failles normales de direction moyenne N30, dont le jeu normal est d'âge Quaternaire ancien-moyen, résultat d'un régime tectonique en extension (Hinaje, 2004). L'effondrement de cette zone est attribué à « l'aube » du Quaternaire par J. Martin (1981).

À partir d'une campagne d'inventaire des points d'eau et des mesures piézométriques réalisées en période de basses eaux (Juin, Juillet et Août, 2012) et en période de hautes eaux (Janvier, 2013) ; nous avons pu établir des cartes piézométriques. Celles ci montrent un sens d'écoulement des eaux souterraines de la nappe phréatique plio-quaternaire, du SW vers le NE. Le gradient hydraulique augmente vers la région d'Almis Guigou située du côté NE de la zone d'étude. L'évolution de la piézométrie dans le temps, montre des fluctuations saisonnières en relation avec les variations pluviométriques et les pompages intermittents (pompages saisonniers). Des mesures de la conductivité électrique des eaux souterraines, ainsi que les résultats des analyses physico-chimiques nous ont permis de définir différents domaines hydrogéochimiques. Les eaux sont surtout de faciès bicarbonaté calcique et magnésien de faibles minéralisations en général; alors que les eaux de faciès chloruré, sulfaté, calcique et magnésien de fortes minéralisations, sont surtout situées près des failles (infiltration et dissolution des roches argilo-évaporitiques et basaltiques d'âge triasique).

Mots-clés: Hydrodynamisme, Hydrochimie, Plateau Timahdite-Almis Guigou, Moyen Atlas, Maroc

Introduction

Le Plateau de Timahdie-Almis Guigou abrite une nappe fluvio-lacustre et volcanique offrant d'énormes quantités d'eau. Il constitue la source principale de réserve en eau de la région. L'objectif de cette étude est de caractériser l'aquifère fluvio-lacustre et volcanique de point de vue hydrodynamique, hydrogéochimique et de retrouver l'encaissant qui a été à l'origine de la minéralisation des ressources en eau du plateau de Timahdite-Almis Guigou à travers la modélisation de PHREEQC. Les circulations hydriques profondes proviennent du SW et se dirigent vers le NE; c'est-à-dire que la recharge est située dans le Moyen Atlas plissé. L'évolution de la

piézométrie dans le temps montre des fluctuations saisonnières en relation avec les variations pluviométriques.

Géologie de la région

La série lithostratigraphique méso-cénozoïque de la région d'étude s'échelonne du Trias supérieur au Quaternaire (Charrière, 1990 ; El Arabi, 1987). Cette série se présente de la façon suivante (figure 2) :

- des formations géologiques argileuses et salifères inférieures et supérieures par rapport au complexe basaltique médian qui s'y intercale et dont l'âge est triasique supérieur (Michard, 1976) ;

- ces formations argileuses et basaltiques sont surmontées par des carbonates liasiques, d'abord dolomitiques puis calcareuses d'âge liasique (Termier, 1936 ; Colo, 1961 ; Martin, 1981 ; El Arabi, 1987 ; Charrière, 1990) ;

- le Dogger est composé de deux formations ; les marnes de Boulemane et les calcaires corniches d'âge Bajocien (Fedan, 1988) ;

- le Crétacé est formé de calcaires et de marnes,

- les formations éocènes sont composées de calcaires roses, de marnes gypseuses et de calcaires lacustres (Martin, 1981 ; Fedan, 1988 ; Ait Slimane, 1989; Charroud, 1990) ;

- le Plio-quaternaire est caractérisé par des formations continentales fluvio-lacustres, travertineuses et volcaniques (Martin, 1981 ; Harmand et Cantagrel, 1984; Harmand et Moukadiri, 1986; Fedan, 1988 ; Hinaje et al., 2001 ; Hinaje, 2004).

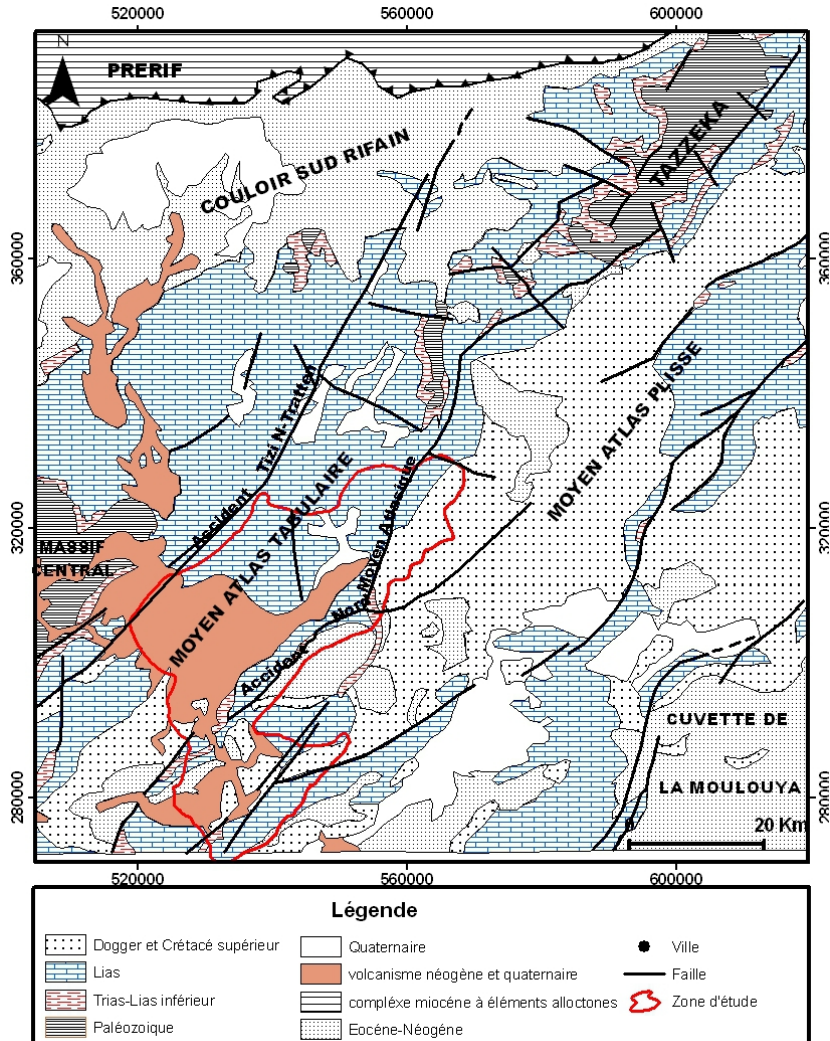


Figure 1: Carte géologique simplifiée de la région d'étude Almis Guigou et Timahdite (d'après Charrière, 1989 ; redessinée).

Matériels et Méthodes en hydrodynamisme

Mesure du niveau piézométrique

En hydrogéologie, et dans l'étude piézométrique en particulier, les outils de travail sont variés et plus précis les uns que les autres. Ces outils permettent de faire une étude précise et complète basée sur les mesures des latitudes, des longitudes, des altitudes et des niveaux piézométriques (Kouassy Kaledje, 2010). La mesure du niveau piézométrique est l'opération principale de l'inventaire de la ressource en eau souterraine. Elle correspond à l'altitude du niveau d'eau en équilibre naturel dans l'ouvrage (sondage ou puits). Elle est calculée par différence entre la cote du sol (repère sur l'ouvrage), l'altitude Z et la profondeur de l'eau H_p (Castany, 1982). Les

mesures des différents niveaux piézométriques que nous avons effectuées, correspondent à la période de basses eaux (Juin, Juillet et Août 2012) et à la période de hautes eaux (Janvier, 2013). En effet, la surface piézométrique que nous avons mesurée, constitue la limite supérieure de la nappe d'eau située dans l'aquifère. C'est une limite hydrodynamique qui peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable (Castany, 1982). Le matériel utilisé pour accomplir ce travail de terrain correspond au système de positionnement global (GPS) pour positionner les points d'eau; et la sonde pour mesurer la profondeur à laquelle se trouve la surface de l'eau dans un puits. Le traitement des données est réalisé par le logiciel ARCGIS 9.3.

Calcul du gradient hydraulique

Par comparaison entre le dispositif du laboratoire de Darcy (Castany, 1982) et le terrain, le gradient hydraulique i est la différence des niveaux piézométriques entre deux points de la surface piézométrique, par unité de longueur, mesuré le long d'une ligne de courant (sens d'écoulement). Le gradient hydraulique est assimilable à la pente de la surface piézométrique (Castany, 1982).

Dans la pratique, le gradient hydraulique i , est calculé sur le terrain à l'aide des niveaux piézométriques dans deux ouvrages d'observation alignés sur une ligne de courant (sens d'écoulement des eaux souterraines); l'un en amont H1, et l'autre en aval H2, séparés d'une distance L (Castany, 1982). Mais la méthode recommandée est celle de l'utilisation des cartes piézométriques (Castany, 1982). En application dans le plateau de Timahdite –Almis Guigou, le gradient hydraulique i est :

$$i = \frac{H1-H2}{L} \text{ (Castany, 1982)}$$

Région de Timahdite

$i = \frac{\text{Juin, Juillet et Aout 2012}}{(1670 \text{ m} - 1570 \text{ m}) / 7917 \text{ m}}$ $= 0.0126$	$i = \frac{\text{Janvier 2013}}{(1665 \text{ m} - 11570 \text{ m}) / 6458 \text{ m}}$ $= 0.0147$
---	--

Région d'Almis Guigou

$i = \frac{\text{Juin, Juillet et Aout 2012}}{(1540 \text{ m} - 1470 \text{ m}) / 3750 \text{ m}}$ $= 0.0187$	$i = \frac{\text{Janvier 2013}}{(1470 \text{ m} - 1425 \text{ m}) / 1250 \text{ m}}$ $= 0.036$
---	--

Ces valeurs du gradient hydraulique pour les périodes extrêmes nous montrent qu'elles sont différentes dans le temps. Cela veut dire que le régime des eaux souterraines dans la nappe est variable. C'est ce qui nous permet de faire intervenir une alimentation variée de la nappe d'eau et de plusieurs

types de circulation des eaux souterraines dans le plateau de Timahdite-Almis Guigou.

Matériels et méthodes en hydrochimie

En hydrochimie, le but est de déterminer les paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine entre Timahdite et Almis Guigou. Dix-huit (18) échantillons d'eau sont prélevés dans des bouteilles en plastique à partir des puits captant la nappe phréatique plio-quadernaire (Figure 2). Nous avons effectué les prélèvements durant le mois de Janvier 2013. L'échantillonnage des points d'eaux ont été choisis de telle sorte qu'ils soient répartis dans toute la surface de la région d'étude.

Les analyses ont été effectuées au niveau des laboratoires de la faculté polydisciplinaire de Taza et l'agence du bassin hydraulique de Sebou (ABHS), suivant les techniques standard (Rodier, 1996). Certaines mesures ont été effectuées sur place afin de pouvoir déterminer quantitativement les paramètres qui évoluent après échantillonnage, tels que la température, le PH, la conductivité électrique et l'oxygène dissous à l'aide d'appareils portatifs.

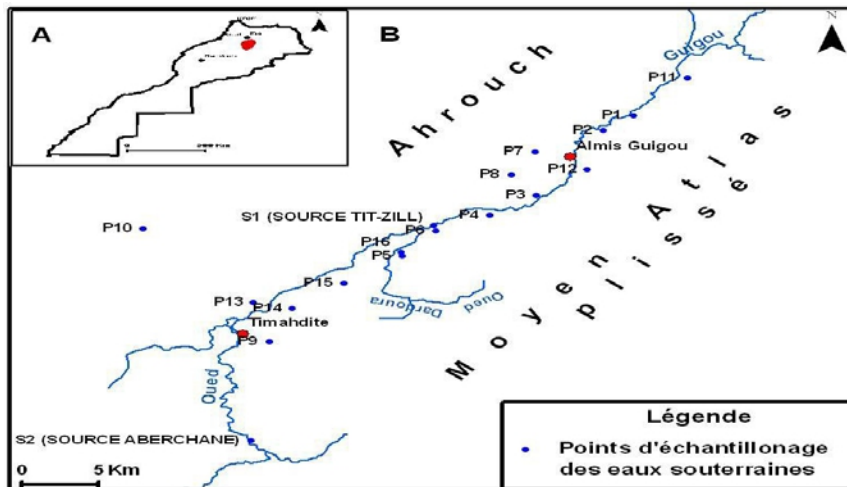


Figure 2: Carte de localisation des points d'échantillonnage d'eau dans la zone d'étude (Janvier 2013).

Résultats et discussions

Piézométrie de l'aquifère plio-quadernaire

La profondeur du niveau de la nappe d'eau dans la zone d'étude varie de moins de 14m dans les zones d'alimentation près des failles, et plus de 20m au centre, voire même supérieur à 100m à près de la faille d'Ahrouch (Figure 3). L'écoulement souterrain est contrôlé par les failles transversales et longitudinales de directions N20 à N45, N65 à N80 et N120 à N140; en plus des failles récentes sub-méridiennes.

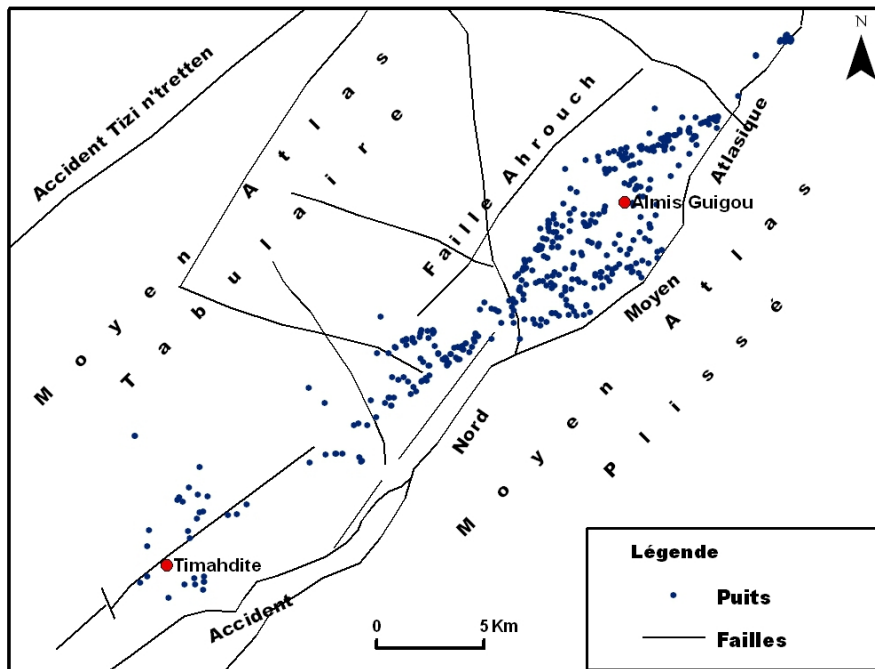


Figure 3: Carte de localisation des points d'eau dans la zone d'étude (basse eaux 2012 et haute eaux 2013).

Hydrodynamisme de l'aquifère

Dans le cadre de cette étude, deux campagnes de mesures et d'échantillonnages des eaux souterraines ont été réalisées ; l'une pendant la période de basses eaux (Juin, Juillet et Aout 2012) et l'autre pendant la période de hautes eaux (Janvier 2013). Ceci en vue de l'établissement des cartes piézométriques représentatives de l'état actuel des niveaux des eaux souterraines de la nappe. Il faut noter qu'il y a une hétérogénéité dans la répartition spatiale des points de mesures due tout simplement à la localisation géographique des différents puits.

À l'aide de ces différentes mesures, les cartes piézométriques de basses eaux (Figure 4), et de hautes eaux (Figure 5), ont été réalisées. Ces cartes nous ont permis de déterminer le sens global de l'écoulement dans le système aquifère.

La piézométrie des basses eaux (Juin, Juillet et Aout 2012)

La carte piézométrique de basses eaux nous a permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- le gradient hydraulique augmente vers la région d'Almis Guigou,
- l'écoulement général s'effectue du Sud Ouest vers Nord Est (région d'Almis Guigou);

- l'existence d'une alimentation à partir du Sud Ouest, comme le montre la carte (Figure 4), ne peut provenir que du Moyen Atlas plissé. En effet, la position perchée du Moyen Atlas plissé par rapport à la zone subsidente de Timahdite - Almis Guigou, laisse à penser à une alimentation latérale à travers les failles bordières qui favorisent l'écoulement des eaux souterraines à partir des blocs soulevés du Moyen Atlas plissé situé du côté SE.

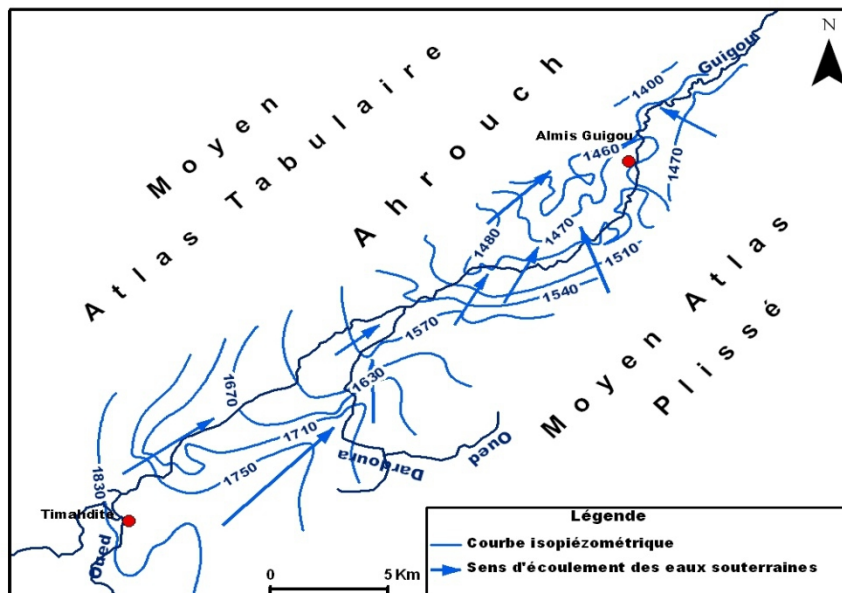


Figure 4: Carte piézométrique du plateau Timahdite-Almis Guigou en période de basses eaux (Juin, Juillet et Aout 2012).

Par ailleurs, l'analyse de cette carte piézométrique de basses eaux révèle des altitudes très variables des courbes isopiézométriques, avec un maximum situé dans la partie SW de la zone d'étude (zone d'alimentation) et un minimum dans la région d'Almis Guigou. Elle donne une vue globale sur le sens de l'écoulement des eaux souterraines, mais aussi des informations sur les caractéristiques géologiques du système aquifère. En effet, les eaux souterraines logées dans l'aquifère constitué par les formations fluviolacustres et volcaniques d'âge Plio-Quaternaire, montrent des courbes isopiézométriques orientées pratiquement vers la région d'Almis Guigou. Ces courbes se rétrécissent de plus en plus vers cette région (Figure 4). Elles caractérisent ainsi une perméabilité croissante dans le sens de l'écoulement. L'augmentation du gradient hydraulique vers le NE peut être expliquée par un basculement des blocs due à la tectonique plio-quaternaire qui affecte la région.

La piézométrie des hautes eaux (Janvier 2013)

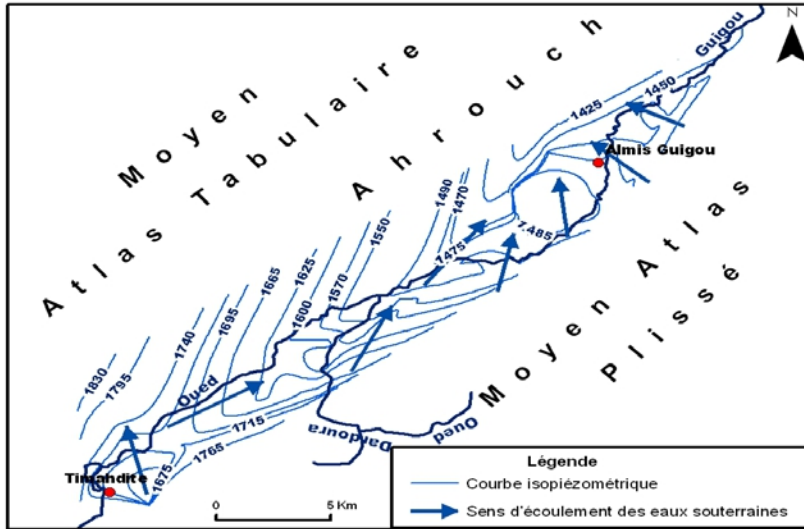


Figure 5: Carte piézométrique du plateau Timahdite-Almis Guigou en période de hautes eaux (Janvier 2013).

La carte piézométrique établie pour la période de hautes eaux, présente la même allure que celle de la période de basses eaux (Figure 5). la comparaison des deux cartes piézométriques issues des mesures de hautes eaux et de basses eaux; fait apparaître une augmentation moyenne de la piézométrie de l'ordre de 9m. Ceci est un indicateur de l'influence des précipitations et des circulations latérales des eaux souterraines sur l'alimentation de la nappe d'eau.

L'établissement de ces cartes piézométriques nous a permis de voir clairement le sens de l'écoulement général des eaux souterraines. Celles ci se dirigent en gros vers la dépression d'Almis Guigou située vers le NE.

Variations annuelles de la piézométrie (Fluctuations piézométriques)

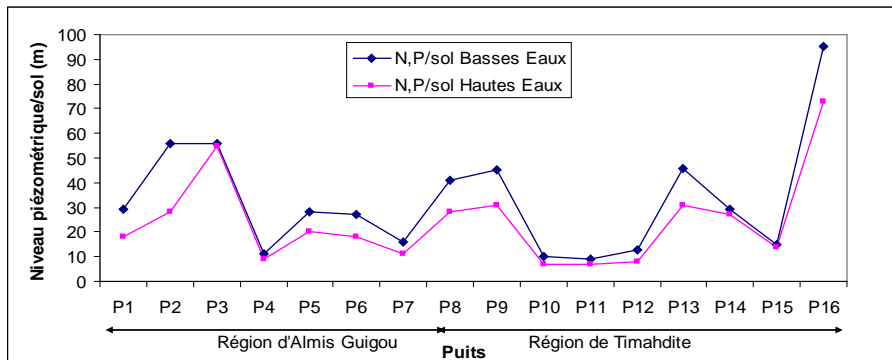


Figure 6: Fluctuations de la surface piézométrique au niveau de quelques puits de l'aquifère.

La figure 6 montre la variation du niveau d'eau dans la nappe au niveau des puits (P1, P2, ..., P16)(situation des puits : voir Figure 2). Ceci nous amène à conclure que la variation de la surface piézométrique de la nappe d'eau dans la région est dépendante de la variation des précipitations et des alimentations latérales des eaux souterraines. Ainsi on constate que le niveau d'eau est haut dans les ouvrages, près des zones d'alimentation et surtout à coté des failles. Le niveau d'eau remonte avec le retour des précipitations. Nous constatons que le sens d'écoulement des eaux souterraines est le même pendant les périodes de basses eaux et de hautes eaux.

Hydrogéochimie

Principaux faciès hydrogéochimiques

L'analyse des paramètres chimiques montre que les eaux de la nappe Plio-Quaternaire de la zone d'étude sont caractérisées par l'abondance des ions Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et HCO_3^- . Le report des résultats des analyses chimiques des eaux de cet aquifère sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure 7), met en évidence l'incidence de la lithologie sur la qualité des eaux souterraines. Le diagramme montre deux familles d'eau : les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes dominantes et les eaux chlorurées, sulfatées, calciques et magnésiennes (Amrani et Hinaje, 2014).

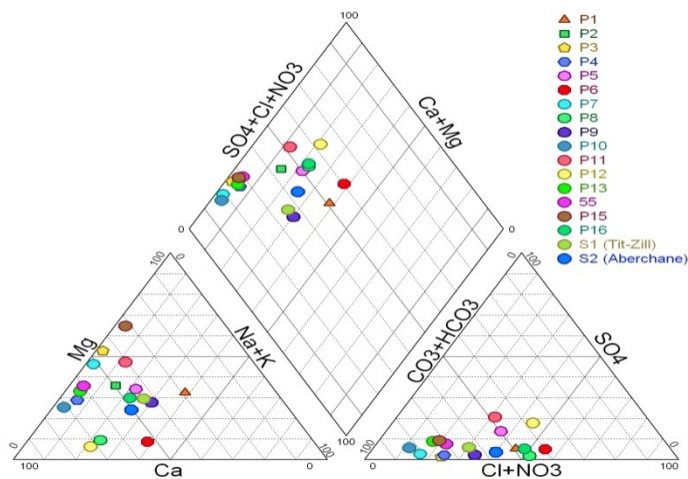


Figure 7: Diagramme de Piper des eaux de la nappe d'eau plio-quaternaire entre Timahdit et Almis Guigou (janvier 2013)

Les différents faciès révèlent des processus hydrogéochimiques qui régissent la minéralisation des eaux souterraines de cette nappe. L'examen de ce processus est essentiellement basé sur l'étude des résultats des analyses

chimiques effectuées. Par ailleurs, ces résultats montrent une faible variation des teneurs, avec des écart-types dans la plupart des cas, inférieurs à la moyenne sauf pour les sulfates (Tableau 1).

Sachant que l'écart type permet de mesurer la dispersion des valeurs autour de la moyenne, dans ce cas les valeurs de l'écart type sont plus petites, ce qui indique que les valeurs des variables sont moins dispersées. Elles mettent en évidence une certaine homogénéité des eaux échantillonnées.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Cond. ($\mu\text{s/cm}$)	521	1770	981,22	398,03
PH	6,62	8,18	7,65	0,35
T($^{\circ}\text{C}$)	9,8	18	13,45	2,36
O ₂ d (mg/l)	1,15	4,93	2,39	0,76
Ca ²⁺ (mg/l)	54,5	127	83,31	19,87
Mg ²⁺ (mg/l)	6,5	71,9	29,35	17,46
Na ⁺ (mg/l)	2,8	72,8	32,68	26,36
K ⁺ (mg/l)	0,5	4,9	1,79	1,27
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	167	434	294,79	86,26
Cl ⁻ (mg/l)	17,5	146	71,36	42,18
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	4,9	123,6	29,81	31,38
NO ₃ ⁻ (mg/l)	10	77,16	36,99	19,16
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,01	0,79	0,09	0,18

Tableau 1: Les résultats préliminaires des paramètres physico-chimiques

Rapports caractéristiques

Les relations entre les éléments chimiques présents dans les eaux souterraines : Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ et HCO₃⁻ montrent la dominance des ions carbonatés (Ca²⁺, HCO₃⁻) par rapport aux ions gypseux (Ca²⁺, SO₄²⁻) et aux ions salifères (Na⁺, Cl⁻). Pour expliquer les relations existantes entre les éléments chimiques des eaux souterraines, nous avons établi certains graphes qui montrent les rapports caractéristiques suivants :

Rapport Na⁺/Cl⁻

L'étude du couple Na⁺-Cl⁻ est un outil performant pour remonter à l'origine de la minéralisation (Dindane et al., 2007). Le comportement du sodium en fonction de la teneur en chlorures considéré comme un ion conservé, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines chlorurées, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydo-réduction et non affecté par l'activité bactérienne (Fetter, 1993).

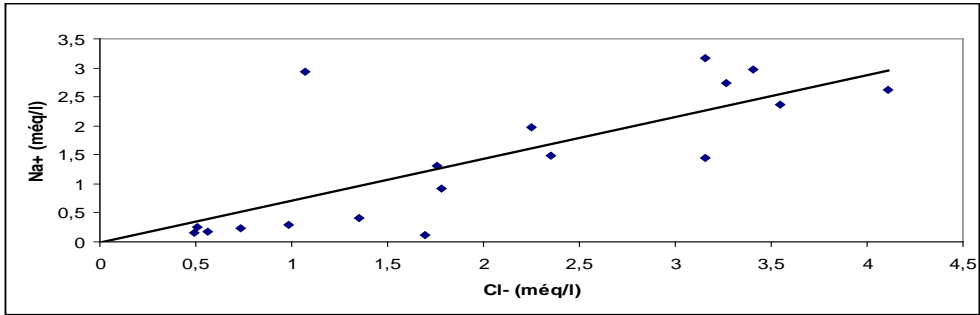


Figure 8: relation entre Na^+/Cl^-

Ce rapport montre un excès en chlorures par rapport à la droite de la dissolution de la halite (Figure 8), cela s’explique par l’existence d’une autre origine pour les ions chlorures qui fait accroître la concentration des chlorures par rapport à celle des sodiums. Cet excès en chlorures pourrait provenir de la dissolution des sels, de l’infiltration des eaux usées et du recyclage des eaux d’irrigation. Mais, comme cet excès en chlorures est accompagné d’un déficit en sodium, il peut être expliquée par le phénomène d’échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent l’ion Na^+ après libération des ions Ca^{2+} .

Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

Tenant compte de la dominance des bicarbonates (HCO_3^-) et du calcium (Ca^{2+}), il est important de vérifier la relation entre ces deux éléments. Le graphique montre que la majorité des points analysés qui se positionnent au dessus de la droite de dissolution, indiquent un excès en calcium (Ca^{2+}) dans la solution, ce qui entraine dans le bilan final, de fortes teneurs en calcium dans la solution.

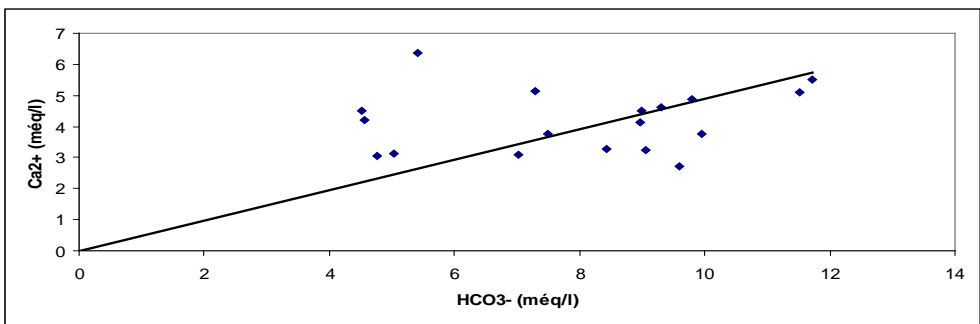


Figure 9: relation entre $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$

La représentation du graphique des teneurs de Calcium (Ca^{2+}) en fonction de celles en sulfates (SO_4^{2-}) met en évidence un excès de Calcium (Ca^{2+}) (Figure 10). Cependant, les points qui présentent un excès des teneurs

en Ca^{2+} traduisant une autre origine suite à la dissolution des formations triasiques.

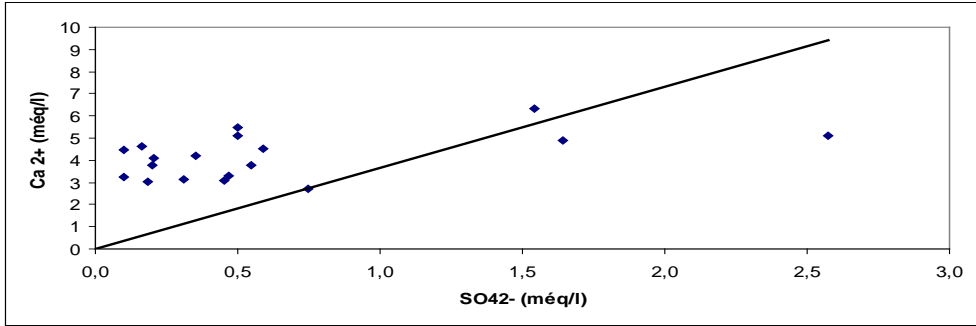


Figure 10: relation entre $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$

Rapport $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

La représentation du graphique de l'association entre le calcium et le magnésium ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) avec les bicarbonates (HCO_3^-) (Figure 11), montre une tendance différente où les eaux analysées se situent au-dessous de la droite de la dissolution. Ceci suggère que ces deux ions sont impliqués dans des processus géochimiques différents.

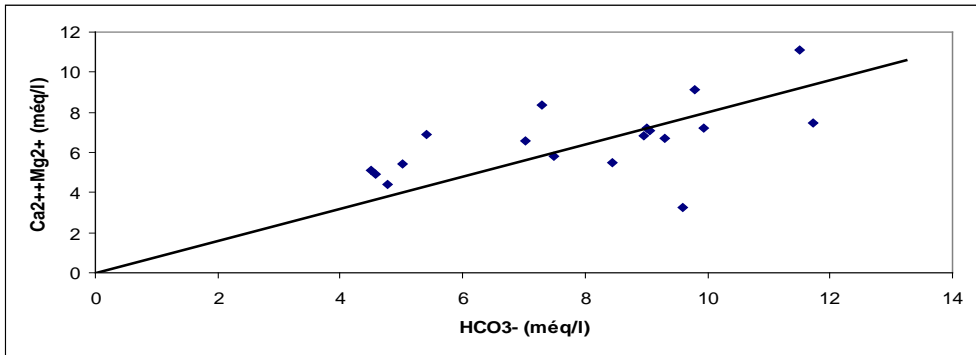


Figure 11: relation entre $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

Rapport $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$

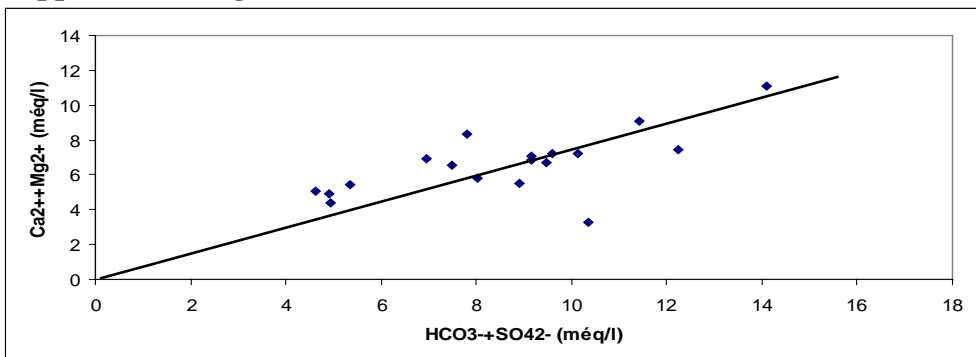


Figure 12: relation entre $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$

L'évolution proportionnelle entre les teneurs de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ suggère la dissolution des formations triasiques argilo-évaporitiques, et liasiques carbonatées. Ces formations sont drainées par les eaux souterraines qui proviennent du Moyen Atlas plissé et qui sont, par la suite, mélangées aux eaux de l'aquifère au niveau du plateau à travers les failles.

Indice de saturation

Pour évaluer les processus géochimiques qui sont à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines dans le Plateau Timahdite-Almis Guigou. Une attention particulière est accordée au paramètre chimique sélectionné, l'indice de saturation (IS) des eaux à l'égard de certains minéraux. L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever J. F., 1997). L'utilisation du programme géochimique de PHREEQC (Plummer et al, 1976), nous a permis de calculer l'indice de saturation de l'anhydrite, de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite, du gypse et de l'halite.

	minimum	maximum	moyenne
IS Anhydrite	-3.22	-1.75	-2,52
IS Aragonite	-0.63	0.85	0,18
IS Calcite	-0.48	1.00	0,28
IS Dolomite	-0.99	1.52	0,37
IS Gypse	-2.68	-1.50	-2,28
IS Halite	-8.79	-6.64	-7,51

Tableau 2: Valeurs Moyennes des Paramètres Calculés.

Les résultats significatifs de tous les échantillons d'eau souterraine analysés (Tableau 2), montrent que ces derniers sont saturés par rapport à l'aragonite, la calcite et la dolomite, mais ils sont plutôt sous-saturés en ce qui concerne l'anhydrite, le gypse et l'halite. Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, cela peut être expliqué par l'effet des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques (NaCl (-4.34) ; CaSO_4 (-4.59)), ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Par contre pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible (dolomite (-16.81) , calcite (-8.42) et aragonite (-8.26)), ce qui produit une précipitation rapide des minéraux carbonatés.

Conclusion

Le système hydrogéologique du plateau Timahdite-Almis Guigou (Moyen Atlas) est caractérisé par une très importante capacité de stockage des eaux. L'écoulement de la nappe d'eau souterraine cantonnée dans les dépôts fluvio-lacustre et volcanique d'âge Plio-Quaternaire, se fait du SW vers le NE en direction d'Almis Guigou. Ce déplacement généralisé des eaux souterraines est guidé par l'effondrement et les basculements tectoniques qui affectent la région. L'évolution de la piézométrie dans le temps montre des fluctuations saisonnières en relation avec les précipitations. Les relations entre les éléments chimiques Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et HCO_3^- qui caractérisent les formations géologiques de la région, montrent la dominance des ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) par rapport aux ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) et aux ions salifères (Na^+ , Cl^-). Le contexte géologique et la répartition spatiale des éléments chimiques indiquent que la composition chimique des eaux souterraines de la nappe est fortement influencée par la dissolution des formations carbonatées liasiques, argilo-évaporitiques triasiques et par les paramètres hydrologiques de la région; à savoir le sens d'écoulement et le temps de séjour dans l'aquifère du plateau.

Références:

- Ait Sliman A., (1989). Evolution structuro-sédimentaire paléogène de la partie Sud-Ouest du Moyen Atlas (Baqrit-Timahdite-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou). Thèse 3^o cycle, Fac. Sc. Marrakech, 179p.
- Amrani S. et Hinaje S., (2014), Utilisation des analyses hydro-géochimiques et des analyses en composantes principales (A.C.P) dans l'explication du chimisme des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire entre Timahdite et Almis Guigou (Moyen Atlas, Maroc). ScienceLib Editions Mersenne : volume 6, N^o 140306, ISSN 2111-4706, 14p.
- Castany G., (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Bordas, Paris, 238p.
- Charrière A., (1989). Carte géologique du Maroc (Région de Sefrou). Notes et Mémoire. Service Géologique. Maroc. N^o354.
- Charrière A., (1990). Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au SE de Fes (Maroc), Thèse de doctorat d'Etat, Toulouse, 589p.
- Charroud M., (1990). Evolution géodynamique de la partie sud-ouest du moyen atlas durant le passage jurassique-crétacé, le crétacé supérieur et le paléogène : un exemple d'évolution intraplaque. Thèse 3^o cycle, Rabat, 234p.
- Colo G., (1962). Contribution à l'étude du Moyen-Atlas septentrional. Not. Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, n^o139, 226 p.

- Drever, J. F., (1997). "The geochemistry of natural waters". 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC; 379 pp.
- El Arabi H., (1987). Etude stratigraphique et sédimentologique du lias aux confins du causse moyen atlasique et du moyen atlas plissé (Maroc).Thèse 3^o cycle, Toulouse, 192p.
- Fedan B., (1989). Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements: le moyen atlas(Maroc) Durant le méso-cénozoïque. Travaux de l'Institut Scientifique. Rabat, n°18, 142p
- Fetter C.W., (1993). Contaminant hydrogeology, macmillan publishing Co. New York, USA, 458p.
- Harmand C. et Cantagrel, J.M., (1984). Le volcanisme alcalin tertiaire et quaternaire du moyen atlas (Maroc): chronologie K/Ar et cadre géodynamique. J.Afric.Earth.Sc. vol.2, n°1, pp.595-603.
- Harmand. C. et Moukadiri. A., (1986). Synchronisme entre tectonique compressive et volcanisme alcalin : exemple de la province quaternaire du Moyen-Atlas (Maroc). Bull. Figure 2 Soc. Géol. France, II, 4, pp.595-603.
- Hinaje S., Ait Brahim L., Gourari L. et Charroud M., (2001). Evénements tectoniques et paléocontraintes enregistrées par les dépôts néogènes et quaternaires du Moyen Atlas (Maroc). Comm. Inst. Geol. e Mineiro, 2001, t. 88, pp. 255-264.
- Hinaje S., (2004). Tectonique cassante et paléochamps de contraintes dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas central (Midelt-Errachidia) depuis le Trias jusqu'à l'actuel. Thèse Doc. Etat, Univ. Rabat, 363p.
- Kouassy Kaledje P. S., (2010). Etudes piézométriques et hydrochimiques du bassin versant de la Bibkola (Nord Ouest N'Gaoundéré). DEA, Facultés des sciences, Univ. Yaoundé. Cameroun.
- Martin.J., (1981). Le Moyen Atlas Central, étude géomorphologique. Notes et Mém.Serv.Géol.Maroc, N°258, 445p.
- Piper.A.M., (1944). Graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. Trans Am Geophys Union 1944; 25: 914–923.
- Plummer, L. N., B. F. Jones, A. H. Truesdell., (1976). WATEQF: a Fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. – In: US Geological Survey. Water Research Investigation Report, 76–13.
- Rodier J., (1996). Analyse des eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8^{ième} édition Dunod, Paris, 1384p.
- Termier H., (1936). Etude géologique sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional. Notes et mém.Serv. Géol. Maroc, N°33, 1566p.