

# La nappe alluviale une ressource vulnérable en zone aride

## *Alluvial groundwater a vulnerable resource in arid zone*

L. TARENGA<sup>1</sup>, S. HADJ-SAID<sup>2\*</sup>, A. ZEDDOURI<sup>3</sup>, A. BEN EL KHEIR<sup>4</sup> and J-D.TAUPIN<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Univ Ouargla, Fac. (Hydrocarbures, Energies Renouvelables et Sciences de la Terre et de l'Univers, Lab. (Réservoirs souterrains: Pétroliers, Gaziers et Aquifères), Ouargla 30000, Algérie, Adresse: Route de Ghardaïa, PB: 511 Ouargla 30000.

<sup>1</sup>[lahcen1199@yahoo.fr](mailto:lahcen1199@yahoo.fr)

<sup>2\*</sup>[hadjsaidsamia@gmail.com](mailto:hadjsaidsamia@gmail.com)

<sup>4</sup>[dedchou@yahoo.fr](mailto:dedchou@yahoo.fr)

<sup>5</sup> Laboratoire HydroSciences UMR5569 (IRD, CNRS, UM), Montpellier, France

<sup>5</sup>[taupin@msem.univ-montp2.fr](mailto:taupin@msem.univ-montp2.fr)

\*Auteur correspondant

### RESUME

Dans les zones arides la ressource en eau est essentiellement souterraine. L'expansion des agglomérations et le développement économique ont augmenté les besoins et de fait ces ressources sont de plus en plus sollicitées. C'est le cas de la région de Tamanrasset qui fait partie du Sahara algérien et qui compte 205 220 habitants. Dans la région d'étude, les formations géologiques sont cristallophyliennes et volcaniques. Localement, des nappes alluviales, liées aux écoulements superficiels, renferment des réserves dont la recharge est assurée par les crues de l'oued, c'est le cas de notre région d'étude où la nappe est alimentée par l'oued Tamanrasset. Cette recharge dépend des précipitations irrégulières tombant sur la région du Hoggar qui représentent une moyenne annuelle de 50mm à 1400m d'altitude (station de Tamanrasset) et 85mm à 2700m (station d'Assekrem).

Dans de tels contextes, il est très important de mettre en évidence l'état et la variation du niveau de la nappe ainsi que les modalités de son écoulement et l'appréciation de sa qualité chimique. Pour atteindre cet objectif, un suivi mensuel de mesures piézométriques de l'aquifère alluvial de Tamanrasset a été réalisé depuis Novembre 2014. Les données des mesures piézométriques ont été utilisées pour établir des cartes piézométriques qui ont mis en évidence l'écoulement de la nappe et son évolution. Les paramètres physico-chimiques de la nappe ont été mesurés in-situ et des échantillons d'eau ont été prélevés au cours de la campagne de Novembre 2014. Les résultats obtenus montrent que la minéralisation de la nappe est relativement faible, la conductivité électrique oscille entre 283 et 936 $\mu$ S/cm, avec un pH variant entre 6,85 et 7,98. Les teneurs en bicarbonates présentent les plus fortes concentrations (jusqu'à 695,4mg/l) pour les anions et le sodium (jusqu'à 100,5mg/l) pour les cations. De même, les résultats des analyses montrent de fortes concentrations en nitrates qui atteignent 48mg/l. La minéralisation de la nappe est dans l'ensemble influencée par la géologie mais également par les activités humaines.

**Mots clés :** inféro-flux, qualité, hydrogéologie, zone aride.

### INTRODUCTION

La région d'étude englobe la ville de Tamanrasset située dans le grand Sud Algérien à plus de 2000 km d'Alger dans le massif de l'Ahaggar. C'est une région aride où la population, comme partout ailleurs, se trouve confrontée au problème de l'accès à l'eau de bonne qualité. La ressource en eau dans cette région est souterraine et est limitée principalement aux aquifères alluviaux, délimités par les berges des oueds, qui constituent des petites réserves d'eau souterraine facilement épuisables, dont la recharge est étroitement liée aux rares crues qui se produisent lors des pluies d'intensité assez forte.

Ces nappes d'inféro-flux, représentent une réserve accessible et dans l'ensemble de bonne qualité. La nappe est captée par creusement de puits dépassant vingt mètres de profondeur. L'eau est destinée à l'AEP (Alimentation en Eau Potable) et parvient aux habitants par transport au moyen de camions citernes. Elle est également destinée à l'irrigation des parcelles agricoles implantées en bordure de l'oued.

Avant le développement important de la région de Tamanrasset, la préoccupation principale concernant les besoins en eau était d'assurer l'A.E.P et l'irrigation des jardins, mais aujourd'hui il faut assurer un troisième aspect concernant les besoins, encore plus important, qui est d'alimenter les activités industrielles naissantes, et les chantiers miniers.

Ainsi, le problème de l'eau de la région et de l'augmentation constante des besoins demande un diagnostic et une analyse spécifique, le souci majeur résidant beaucoup plus dans une gestion rigoureuse du peu d'eau disponible plutôt que dans la prospection et la découverte de nouveaux aquifères dont la potentialité n'existe pas (zone de socle) ou peu dans la région.

En effet, les aquifères en milieux cristallin ont fait l'objet de nombreuses études (Grillot et al., 1990 ; Diouf, 1999 ; Tweed et al., 2011; Roques., 2013) et c'est dans cette optique que s'inscrit l'objectif du présent travail qui consiste à caractériser cet aquifère à environnement fragile pour pouvoir le préserver contre la pollution et assurer la meilleure gestion possible en fonction des besoins croissants.

## **PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

La zone d'étude fait partie de la wilaya de Tamanrasset située à l'extrême sud algérien (fig. 1). La wilaya s'étend sur une superficie de 557906km<sup>2</sup>, elle est comprise entre 0°11'et 5°48' de longitude Est et 18°53' et 27°10' de latitude Nord et est située à 1400 m d'altitude. Elle est limitée par les wilayas de Ghardaïa au Nord, de Ouargla au Nord Est, de l'Illizi à l'Est et de l'Adrar à l'Ouest et par les républiques du Mali au Sud-Ouest et du Niger au Sud-Est.

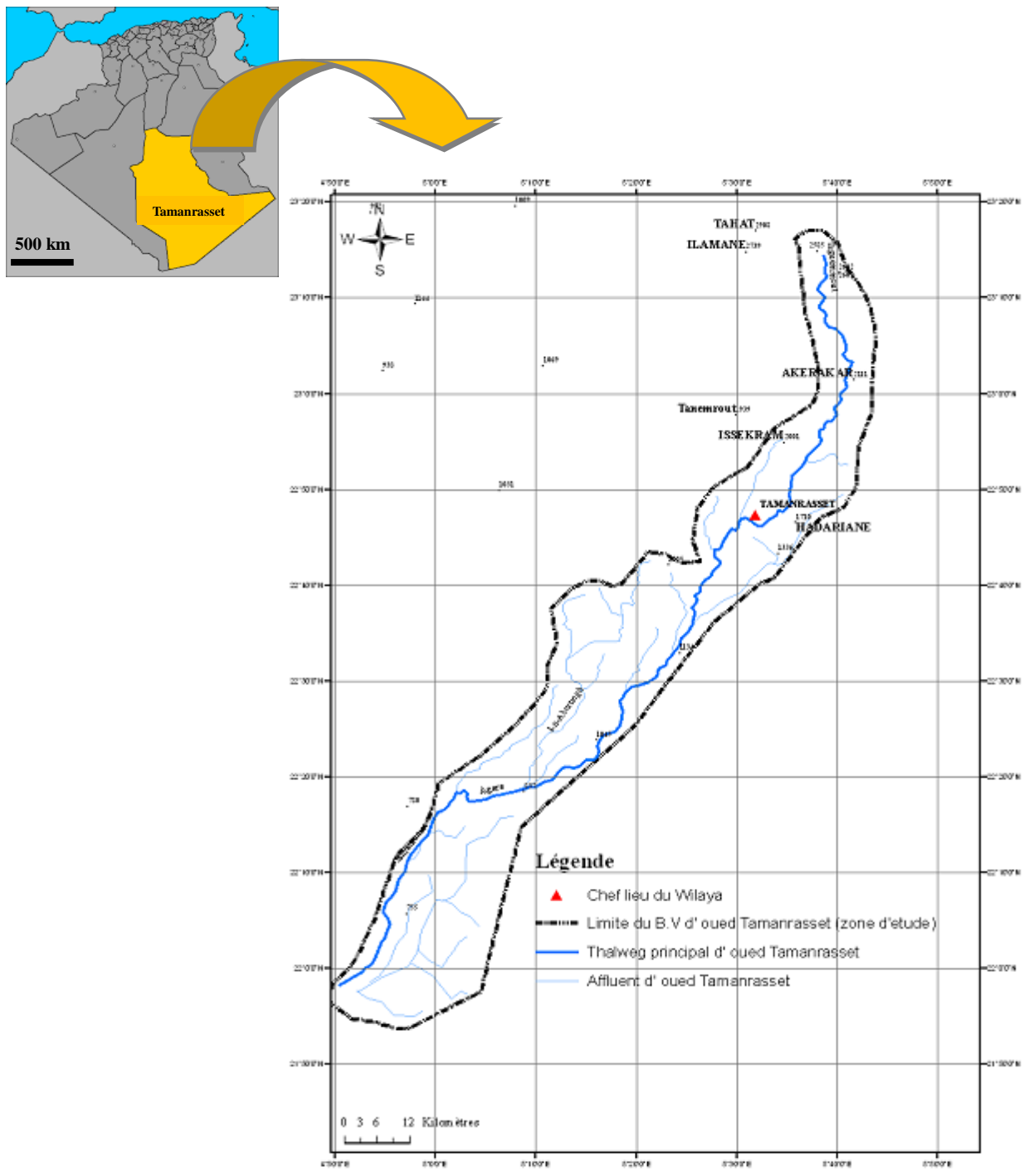


Fig 1. Carte de situation géographique.

La région du Hoggar se caractérise par un climat de type Saharien, auquel s'ajoutent des modifications dues à l'altitude et aux influences tropicales.

Le climat à Tamanrasset est sec, les hivers y sont rigoureux. La température moyenne annuelle est de 22°C. La précipitation ne dépasse pas en moyenne 50 mm à Tamanrasset (1400 m alt.) mais peut atteindre les 380mm, une valeur observée au cours de la période (1985/2006), sur les zones les plus hautes (2700m alt.) (Boulahbal, 2012). L'évaporation est très élevée et atteint en moyenne 4187 mm/an.

## HYDROLOGIE

Le bassin versant de l'Oued Tamanrasset avoisine 42000 km<sup>2</sup>, le tracé principal s'étend seulement sur 2500 km<sup>2</sup>. Toutefois, cette dernière superficie est peut être réduite à 500 km<sup>2</sup>, quand on ne prend en compte que la superficie des crues importantes qui proviennent seulement du bassin qui se situe en amont de la ville de Tamanrasset (Dubief, 1953).

L'Oued Tamanrasset prend naissance sur la face Sud de l'Atakor, dans la région de l'Assekrem, vers 2700 m d'altitude, il descend suivant une direction SSW. Il ne reçoit pratiquement pas d'affluents de sa rive gauche et très peu de sa droite. Le profil est assez régulier, mais dans les détails de nombreux petits accidents perturbent son tracé, ces derniers sont dus à la présence de coulées volcaniques récentes et à des seuils cristallins plus ou moins érodés qu'il franchit dans de petites gorges parfois très étroites. En amont de ces seuils cristallins l'oued s'étale parfois et forme de petites plaines alluvionnaires qu'il creuse actuellement. La plaine de Tamanrasset en est un bon exemple. Un essai de jaugeage par flotteur des débits de l'oued a été réalisé au niveau de la ville de Tamanrasset pendant la crue du 11 Mai 2014 et a donné des valeurs qui varient entre 0,5 et 5,24 m<sup>3</sup>/s.

## CONTEXTE GEOLOGIQUE

En vue de caractériser l'aquifère, nous avons procédé à une description de la nature géologique de la zone d'étude (fig. 2).

Le Nord du bassin versant est formé de plateaux basaltiques recouvrant la majeure partie vers l'Assekrem à 2000 m d'altitude, qui sont eux même traversés par des pointements trachytiques (Adouada, Akar Akar) et des épanchements phonolitiques d'âge Néogène (Fabre, 2005) .

Le Sud est constitué par l'alternance de formations granitiques attribuées au Pharusien (Briedge 1993) que l'on trouve sur une vingtaine de kilomètres le long de l'oued Tamanrasset et, un ensemble de gneiss schisteux d'âge Suggarien recouvrant la majeure partie de la zone d'étude. Les gneiss et schistes ont une tranche d'altération variable pouvant atteindre 10 à 20 m dans les dépressions. La surface alluviale ne devient importante qu'en aval (13 km<sup>2</sup> en amont et 4km<sup>2</sup> en aval de la ville de Tamanrasset) où le lit mineur atteint plusieurs centaines de mètres de largeur. Enfin, dans la basse vallée de l'oued, on note plusieurs seuils gneissiques d'importance inégale.

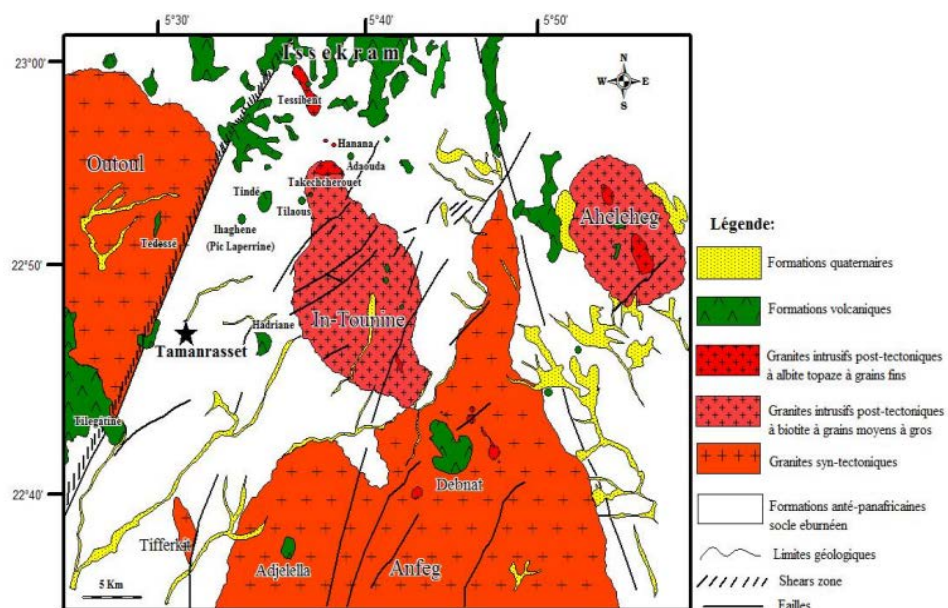


Fig 2. Carte géologique simplifiée de la région de Tamanrasset.

## CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

En termes de ressources en eau, les pays cristallophyllien et magmatiques de l'Ahaggar, subviennent à leur besoin en eau essentiellement par des systèmes aquifères d'inféro-flux liés aux oueds, qui sont renouvelés par des crues occasionnelles.

Les horizons aquifères les plus favorables sont localisés dans les vallées et se présentent sur trois niveaux superposés, en distinguant de haut en bas (fig. 3):

- Les alluvions superficielles qui abritent les nappes d'inféro-flux alimentées essentiellement par les crues
- La couche altérée du substratum sous-jacent
- Le socle affecté de réseau de fissure alimenté par infiltration des eaux à travers les deux niveaux précédents.

Les alluvions sont constituées dans les principaux oueds essentiellement de sables fins, moyens et grossiers. L'épaisseur moyenne est de 21m ; elle augmente d'amont en aval. Leur extension varie en fonction du modèle géomorphologique de la région.

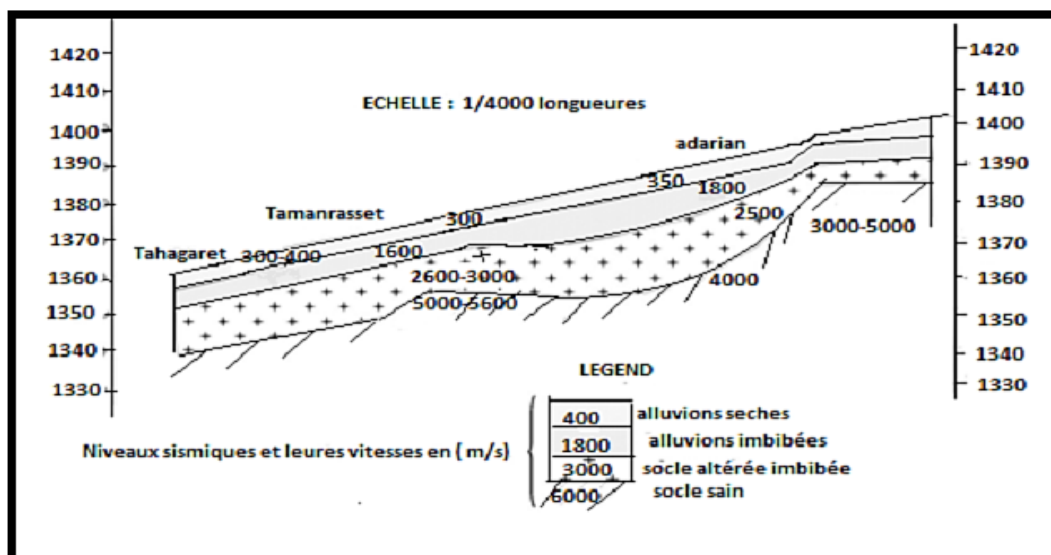


Fig 3. Séparation des niveaux sismiques matérialisant le changement de caractéristiques des sédiments et roches le long de l'oued Tamanrasset.

La réalimentation s'effectue principalement à la faveur des infiltrations lors des passages de crues épisodiques, ou par drainage à travers les fissures des terrains encaissants.

La couche altérée est composée essentiellement de gneiss altéré à intercalation de couches argileuses, de graviers et de débris de minéraux (quartz et feldspath). Parfois, c'est des gneiss schisteux à débris de quartz et mica-noir. C'est aussi du schiste altéré traversé par un filon de pegmatite et parfois du granite clair à orthose riche en chlorite. La profondeur de la couche altérée varie de 0 à 68m.

Son épaisseur minimale est de 1,8m et l'épaisseur maximale est de 44m.

Le socle est constitué de gneiss, granite ou schiste, il est rencontré à une profondeur allant de 2 à 83m.

L'étude de la densité des fractures des terrains métamorphiques du Hoggar en combinant les techniques de télédétection et les levés aéromagnétiques a montré la prédominance de trois classes de failles principales supposées ouvertes dont l'orientation est par ordre d'importance : N110°, N160° et N50° (Boulaïbal, 2012).

## RESULTATS ET DISCUSSION

### HYDRODYNAMIQUE

Dans le but de mettre en évidence le mode d'écoulement de la nappe et suivre l'évolution du niveau piézométrique au cours de l'année, un suivi mensuel de mesures piézométriques a été réalisé au niveau d'une trentaine de puits longeant le lit de l'oued. Les cartes ainsi réalisées (fig. 4) présentent dans l'ensemble la même allure et montrent un écoulement général qui coïncide avec le parcours de l'oued. Le niveau piézométrique varie de 1458m au nord à 1374m au sud. Au nord la direction de l'écoulement est nord est – sud ouest et l'écoulement est uniforme. Il converge par la suite vers l'aval à l'approche de la ville où l'exploitation est importante. Le gradient hydraulique est de 0,006 et augmente à 0,02 au centre et au sud. Sur la carte de la campagne de Janvier 2015, on remarque un rétrécissement des hydro-isohypses et donc un fort gradient hydraulique de l'ordre de 0,1.

Pour l'ensemble des campagnes piézométriques réalisées, le niveau statique varie entre 10m sous la surface au mois de Janvier à 33,5m au mois de Mai.

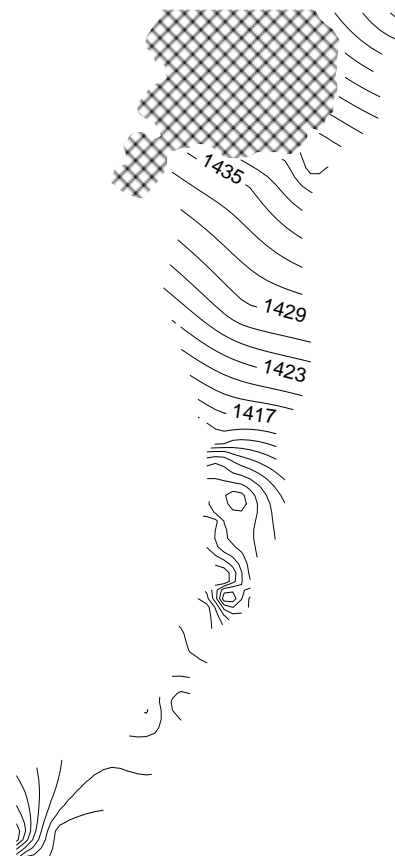
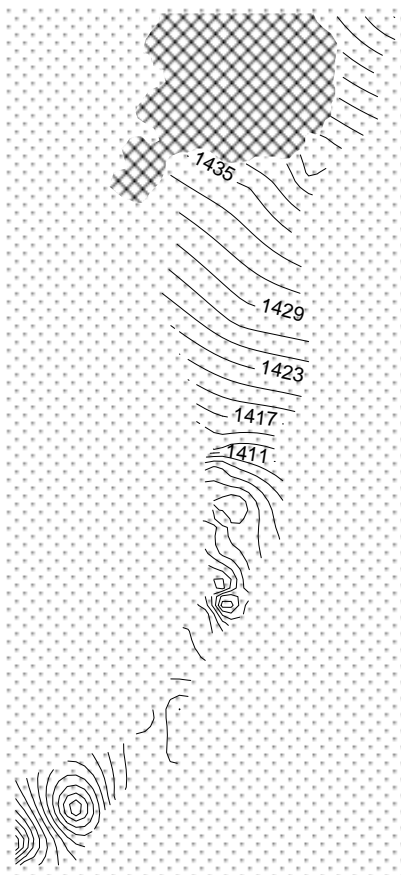


Fig 4 (a). Carte piézométrique Novembre 2014

Fig 4 (b). Carte piézométrique Décembre 2014

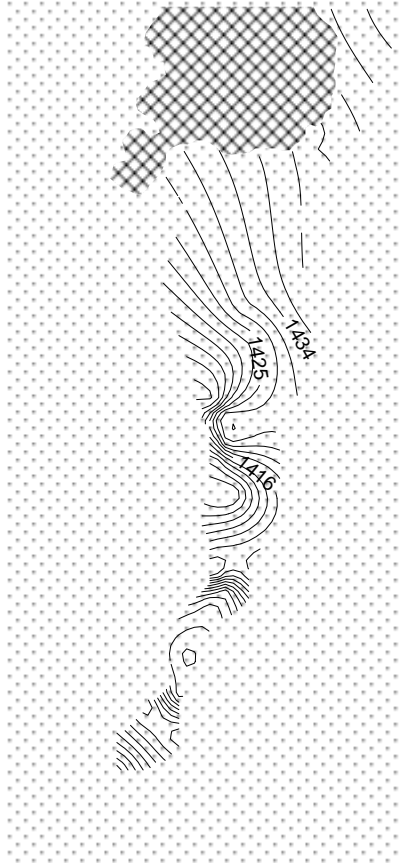


Fig 4 (c). Carte piézométrique Janvier 2015

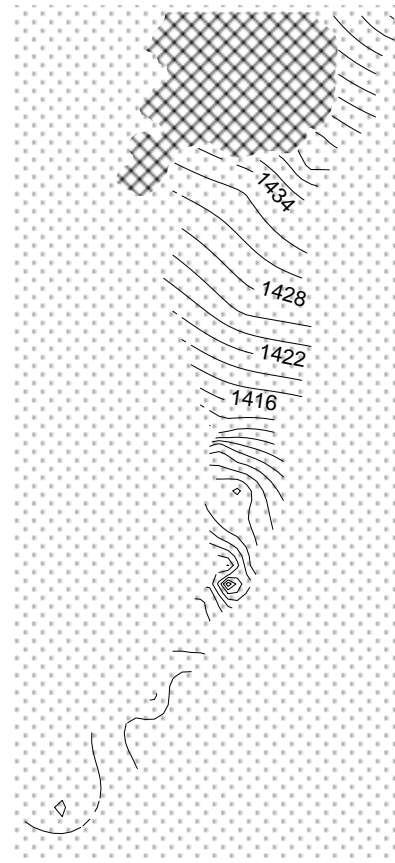


Fig 4 (d). Carte piézométrique Mai 2015

Fig 4. Cartes piézométriques.

## GEOCHIMIE DES EAUX

Le chimisme des eaux souterraines dépend essentiellement de la composition lithologique des terrains traversés et du temps de séjour des eaux dans le réservoir. Ainsi que du type d'alimentation et la profondeur de la nappe. Ces interactions influent sur la teneur des eaux en ions majeurs. De nombreux travaux ont évoqué l'évolution hydrochimique des aquifère dans des contextes semblables à celui de notre région d'étude et ont lié l'origine de la minéralisation des eaux à l'altération du socle cristallin (Faillat et Blavoux, 1989 ; Razack et Dazy, 1990 ; Ajaz et Veizer, 2000 ; Frengstad et al., 2002 ; Banks et Frengstad, 2006 ; Al-Ahmadi et El-Fiky, 2009 ; Jaunat et al., 2012 ; Sonkamble et al., 2012 ; Ghesquiere et al., 2015).

L'interprétation des mesures des paramètres physico-chimiques (Tab.1) et des analyses de 37 échantillons prélevés en Novembre 2014 (balance ionique < 5% pour 34 échantillons et 3 < 10%) au niveau des puits montre des valeurs de pH comprises entre 6,85 (puits 23) et 7,98 (puits 24), indiquant des eaux proches de la neutralité. La conductivité électrique varie entre 283 (puits 29) et 936  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (puits 33), il s'agit donc d'une eau, qui en terme de minéralisation, peut convenir à l'alimentation humaine.

Tableau 1. Résultats des analyses physico-chimiques de dix échantillons  
(Campagne Novembre 2014)

N°	X	Y	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	RS
2	766851	2531978	7,4	815	63,8	43	81,3	7,4	23	61	555,1	9,8	488
6	766659	2531551	7,6	777	67,5	29,7	100,5	5,4	20	48	530,7	10,8	502
13	765560	2528176	7,51	318	32,5	15,4	20	13,3	7	49	167,75	0,5	170
19	765576	2527486	7,67	591	45	47,1	25	4	39	51	256,2	48	418
23	766225	2527319	6,85	751	67,5	42	62,5	5,4	26	82	481,9	17,5	496
24	766057	2526528	7,98	582	55	32,8	50	6	20	49	366	0,3	380
29	765654	2526389	7,75	283	22,5	19,5	21,3	4,8	3	29	176,9	13,5	182
33	764709	2524963	7,46	936	76,3	65	56,3	4	19	37	695,4	14,5	644
39	763105	2523453	7,74	552	44	33,8	39,3	2,8	55	43	213,5	16,3	388
40	763198	2523213	7,63	901	70	52,2	41,5	4	168	115	155,55	17	758

**Légende:** CE : Conductivité électrique en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ; RS : Résidu sec en  $\text{mg}/\text{l}$  ; les concentrations des ions en  $\text{mg}/\text{l}$

L'évolution spatiale de la conductivité électrique (fig. 5) montre que la minéralisation est moyenne à forte au Nord et au Sud et elle est faible au centre de la zone d'étude. Les puits présentant cette forte minéralisation sont localisés à proximité des massifs ce qui permet de supposer un apport en eau chargée en provenance du socle à travers les fractures. Quant au puits situé au Sud dont la conductivité électrique est de  $901\mu\text{S}/\text{cm}$ , il présente de fortes concentrations en sulfates et en chlorures qui sont respectivement de l'ordre de  $115$  et  $168\text{ mg}/\text{l}$ . Ces fortes concentrations seraient liées à une contamination liée aux rejets non contrôlés d'eaux usées.

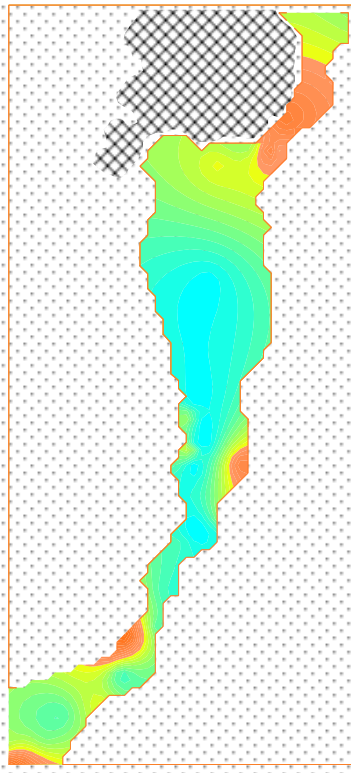


Fig 5. Carte de l'évolution de la conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )



Les valeurs du résidu sec de l'eau de la nappe d'inféro-flux de Tamarrasset varient entre 170 mg/l (puits 13) et 758 mg/l (puits 40).

Les résultats des analyses ont été portés sur le diagramme de Piper (fig. 6) en utilisant le logiciel Diagramme.

Sur le triangle des cations, les eaux présentent un faciès mixte avec un enrichissement en Mg. Cet enrichissement se traduit par une évolution du pôle calco- sodique en amont (10, 6, 9, 8...) vers le pôle calco-magnésien en aval (35,38, 39...). Sur le triangle des anions, les eaux présentent un faciès bicarbonaté avec un pourcentage dépassant 55% de la charge anionique totale excepté, le point 40 qui présente plutôt un faciès chloruré. Ce dernier, localisé vers l'aval, présente la plus forte teneur en Cl de 168mg/l qui probablement est en relation avec une contamination d'origine humaine.

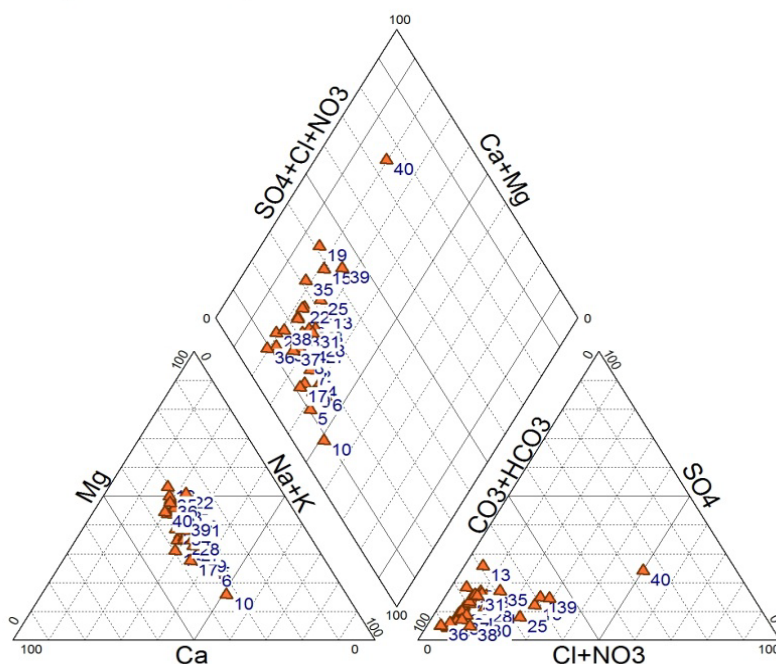


Fig 6. Diagramme de Piper.

La teneur en calcium de la nappe est comprise entre 22,5 mg/l (puits 14 et 29) et 76,3 mg/l (puits 33). L'évolution spatiale du calcium (fig. 7) montre des faibles concentrations dans l'ensemble de la zone d'étude cependant certains puits présentent des teneurs relativement élevées à proximité des massifs basaltiques (Iharen et Adrian). Cette nature lithologique indique des origines différentes du calcium qui seraient en relation avec l'altération des pyroxènes, amphiboles et plagioclases en provenance des roches volcaniques et métamorphiques environnantes.

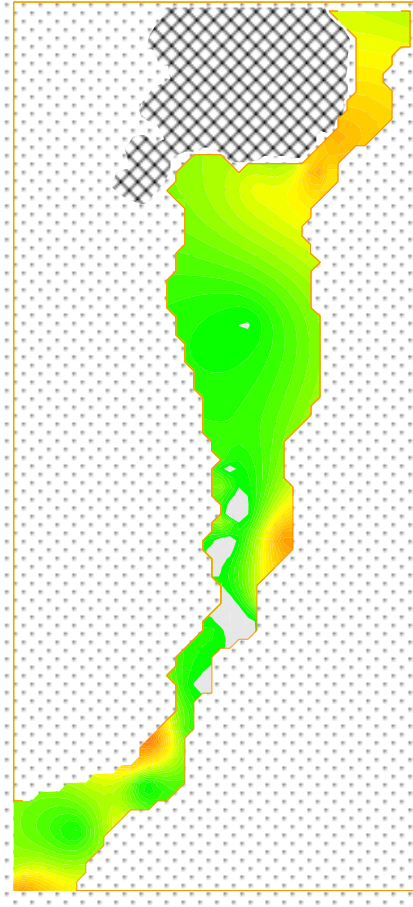


Fig 7. Carte de l'évolution des teneurs en calcium.

L'ion sodium provient en partie de l'hydrolyse des silicates tels l'albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) plagioclase entrant dans la composition des roches qui constituent le socle. L'évolution de sa teneur varie de celle du calcium, les résultats montrent des teneurs en sodium de la nappe comprises entre 17,5 mg/l (puits 14) et 100,5 mg/l (puits 6).

L'évolution spatiale des teneurs en sodium (fig. 8) montre que les fortes concentrations se trouvent au Nord à proximité du mont d'Iharen et diminuent vers l'aval.

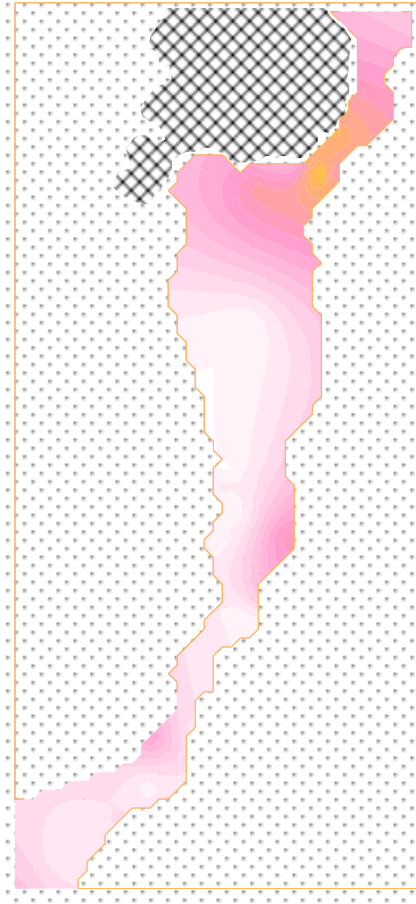


Fig 8. Carte de l'évolution des teneurs en sodium.

La teneur en magnésium est plus ou moins étendue, passant de 11,3 mg/l (puits 17) à 65,0 mg/l (puits 33). Celle du chlorure est comprise entre 3,0 mg/l (puits 29) et 168.0 mg/l (puits 40).

Les concentrations des eaux en bicarbonates varient de 155.5 mg/l (puits 40) à 695,4 mg/l (puits 33). Elles varient de 8 mg/l (puits 17) à 115 mg/l (puits 40) pour les sulfates.

En vue d'identifier l'origine des différents ions composant l'eau, nous avons analysé les rapports caractéristiques. La relation  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  (fig. 9) montre que dans l'ensemble les deux cations ont une même origine liée à l'altération par l'eau du pyroxène et de l'amphibole.

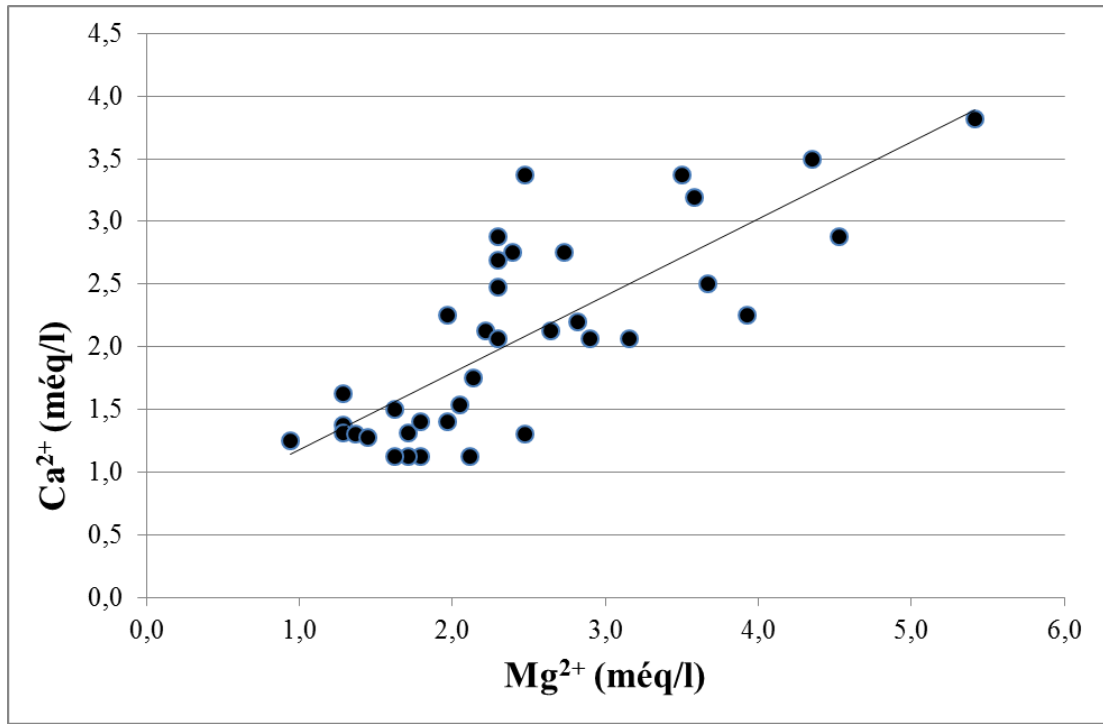


Fig 9. Relation Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>.

La relation Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup> (fig. 10) montre que dans l'ensemble les deux cations ont une même origine qui proviendrait de l'altération des plagioclases et de l'amphibole. Par ailleurs, certains points montrent un enrichissement en calcium ce qui reflète une autre origine de ce cation, lié à l'altération des pyroxènes comme évoqué précédemment et provenant des roches volcaniques.

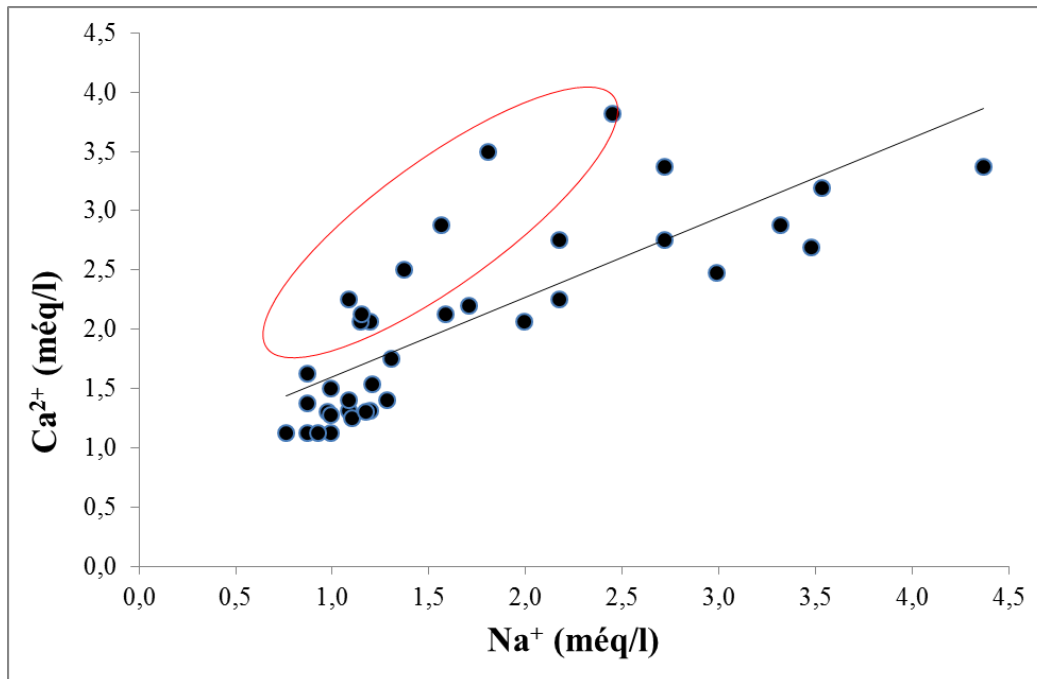


Fig 10. Relation Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>.

La relation  $Mg^{2+}$ - $Na^+$  (fig. 11) met en évidence trois groupes de points indiquant des origines différentes des deux cations. Le premier groupe rassemble les points situés en amont riches en sodium, le deuxième comporte les points situés en aval et qui sont riches en magnésium et enfin, le troisième groupe qui évolue entre les deux pôles.

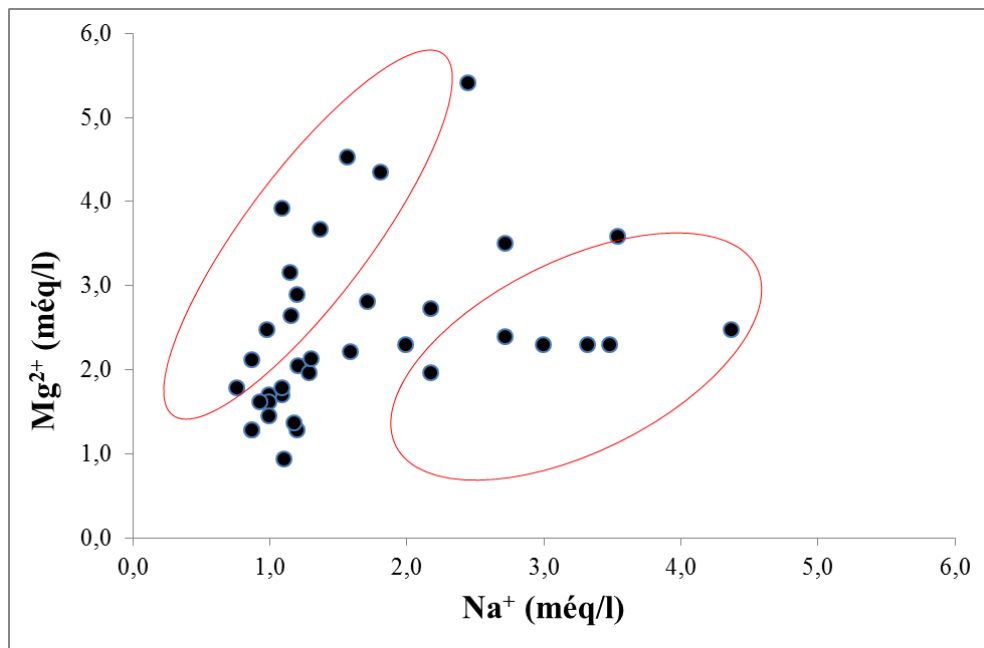


Fig 11. Relation  $Mg^{2+}$ - $Na^+$ .

Le rapport  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  en fonction de  $HCO_3^-/(SO_4^{2-}+Cl^-)$  montre que globalement la conductivité des eaux est liée à l'histoire d'eaux pluviales infiltrée rapidement suivi d'un processus d'augmentation de la charge ionique par dissolution eau/roche plutôt que par un processus d'évaporation. De plus la profondeur de la nappe ( $> 10m$ ) exclut toute minéralisation à partir d'une reprise de l'eau souterraine par évaporation à travers la zone non saturée (fig. 12). Toutefois un seul point (le point 40) reflète une forte minéralisation où s'ajoute en plus un processus local de contamination à partir du rejet d'eaux usées, les autres points proches (ex 39) n'étant pas concernés avec une conductivité beaucoup plus faible  $552\mu S/cm$ . De même, on remarque une dominance du magnésium sur le calcium pour le point 40.

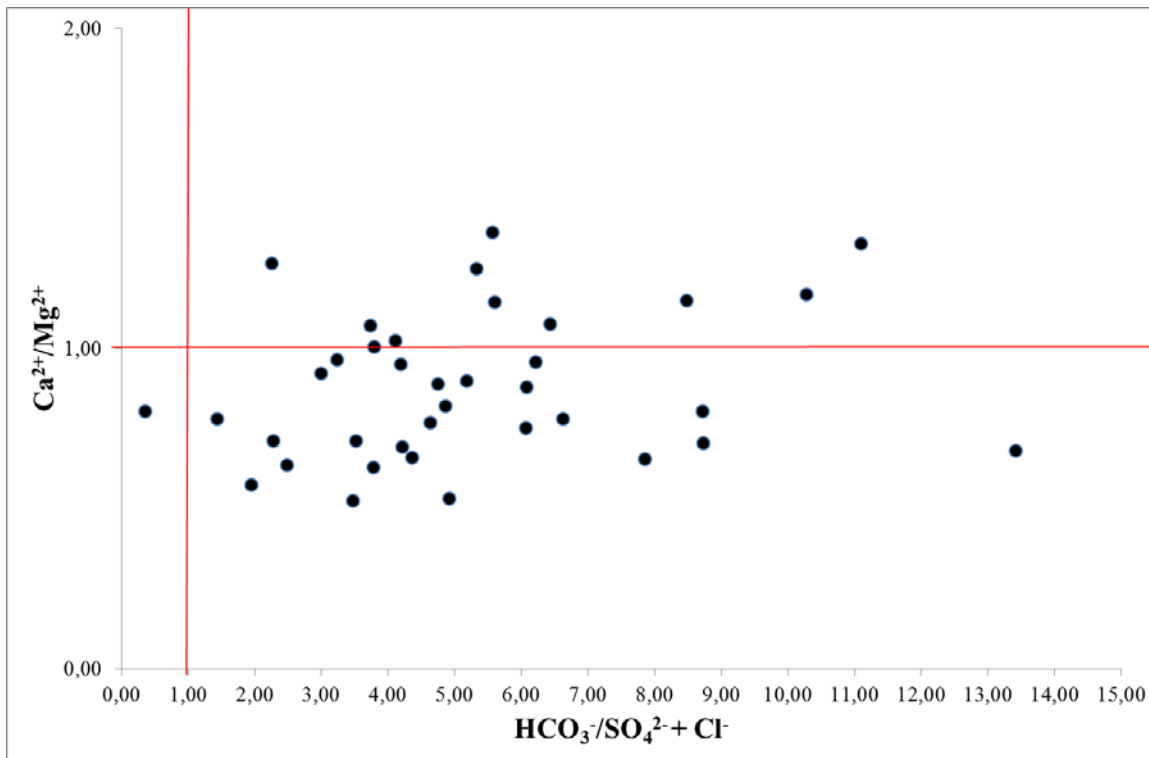


Fig 12. Rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  en fonction de  $\text{HCO}_3^-/(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ .

## CONCLUSION

La région de Tamanrasset fait partie du Sahara algérien, elle est caractérisée par un paysage particulier avec des massifs montagneux de nature géologique différente et par une tectonique complexe. C'est une zone aride, la température moyenne annuelle est de 22°C et les précipitations n'excèdent pas 50mm à 1400m d'altitude et peuvent atteindre 380mm à 2700m. La ressource en eau est principalement souterraine et les nappes d'inféro-flux représentent la réserve en eau de bonne qualité mais d'extension limitée et très vulnérable. Le suivi mensuel depuis novembre 2014 à Mai 2015 du niveau de la nappe de Tamanrasset a mis en évidence une direction d'écoulement NE-SW avec un gradient hydraulique de 0,006 qui augmente à 0,02 au centre et au sud. Sur la carte de Janvier 2015, le gradient hydraulique est fort de l'ordre de 0,1

La conductivité électrique oscille entre 283 et 936  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , elle est moyenne à forte au Nord et au Sud et elle est faible au centre de la zone d'étude. La forte minéralisation est liée aux massifs cristallins et est probablement le résultat d'un apport à travers les fractures en provenance du socle. D'autre part, la plus forte minéralisation est observée au Sud (point 40) à proximité de la ville et semble être le résultat d'une contamination par les eaux usées.

Le faciès chimique des eaux est bicarbonaté calcique et magnésien à bicarbonaté sodique. L'emploi des rapports caractéristiques a montré des origines différentes des cations ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ ) liés à la nature du socle cristallin qui est dans l'ensemble gneissique et parfois granitique, schisteux et basaltique.

Un enrichissement en ions  $\text{Mg}^{2+}$  (ion dominant) se fait de l'amont vers l'aval et la minéralisation est le résultat d'une dissolution résultant du contact eau/roche mais on note aussi une contamination dans la partie aval.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ajaz, K. and Veizer, J. (2000). Weathering processes in the Indus river basin: implications from riverine carbon, sulfur, oxygen and strontium isotopes. *Chem. Geol.*, 170, 153-177.
- AL-Ahmadi, M.E. and EL-Fiky, A.A. (2009). Hydrogeochemical evaluation of shallow alluvial aquifer of Wadi Marwani, western Saudi Arabia. *Journal of King Saud University -Science*, 21, 179–190.
- Banks, D. and Frengstad, B. (2006). Evolution of groundwater chemical composition by plagioclase hydrolysis in Norwegian anorthosites. *Geoch. et cosmoc. Acta*, 70, 1337-1355.
- Boulahbal, S. (2012). Etude des écoulements souterrains dans les gneiss schisteux fissurés du Précambrien de la région de Tamanrasset. Mémoire de Magister université de Batna, Algérie.
- Briedge, M. (1993). Etude géologique de la région de Tahifet (Hoggar centrale, Algérie). Implication géodynamique. Thèse de Doctorat, université de Nancy 1 (France).
- Diouf, S. (1999). Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental Doctoa de 3<sup>ème</sup> Cycle Université CHEIKH ANTA DIOP de Dakar, Sénégal.
- Dubief J. (1953). Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Ed. Service des études scientifiques, Alger, 457 p.
- Fabre, J. (2005). Géologie du Sahara Central et Occidental. Tervuren African Geosciences Collection, MRAC, Tervuren, Belgique.
- Faillat, J.P. et Blavoux, B. (1989). Caractère hydrochimique des nappes des roches endogènes fissurées en zone tropicales humides : exemple de la côte d'Ivoire. *Journal of Afrique Earth Sciences (and the Middle East)* 9(1), 31- 40.
- Frengstad, B., Banks, D., Skrede, AA. M., Krog, J. R. , Siewers, U., Strand, T. (2002). The hydrochemistry of crystalline bedrock groundwater in Norway. *NGU-BULL* 439, p. 87.
- Ghesquiere, O., Walter, J., Chesnaux, R., Rouleau, A. (2015). Scenarios of groundwater chemical evolution in region of the Canadian shield based on multivariate statistical analysis. *J. of Hydr. Regional Studies*, 4, 246-266.
- Grillot, J.C., Raullet, M., Ferry, L. (1990). Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicales humides d'altitude (Haut plateau de Madagascar). *J. of Hydr.*, 120(1-4), 271-282.
- Jaunat, J., Huneau, F., Dupuy, A., Celle-Jeanton, H. (2012). Hydrochemical data and groundwater dating to infer differential flowpaths through weathered profiles of a fractures aquifer. *App. Geoch.*, 27, 2053-2067.
- Razack, M, Dazy, J.(1990). Hydrochemical characterization of groundwater mixing in sedimentary and metamorphic reservoir with combined use of Piper's principle and factor analysis. *J. of Hydr.*, 114, 371-393.
- Roques, C. (2013). Hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin : implications en terme de ressources en eau pour le Massif Armoricaïn. Thèse de doctorat université de Rennes 1, France.
- Sonkamble. S, Sahya . A, Mondial N.C., Harikumar, P. (2012). Appraisal and evolution of hydrochemical processes from proximity basalt and granite areas of Deccan Volcanic Province (DVP) in India. *J. of Hydr.*, 438–439, 181–193.
- Tweed, S, Leblanc, M, Cartwright, I, Favreau, G, Leduc, C. (2011). Arid zone groundwater recharge and salinization processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia. *J. of Hydr.*, 408, 257-275.