



## Pour une exploitation raisonnée des ressources en eaux souterraines du Sahara algérien, région de Ghardaïa : état des lieux et recommandations

### Towards a rational exploitation of the groundwater resources of the Algerian Sahara, Ghardaïa region: actual situation and recommendations

Youcef HAKIMI-DEDJELL<sup>1</sup>, Philippe ORBAN<sup>2</sup>, Mohamed CHETTIH<sup>3</sup> & Serge BROUYERE<sup>4</sup>

**Abstract:** The northern Sahara contains vast aquifer systems, including the Continental Intercalaire aquifer (CI) which is the main water reserve for the regions of the Great Western Erg and the Mزاب Ridge (Algerian northern Sahara). In order to identify the different processes controlling the acquisition and modification of CI water mineralization, different interpretation methods of the hydrochemical data have been carried out to describe the spatial variation of major and minor elements concentrations. This study showed that, in north of the study area (Laghouat region), the water type is Ca-SO<sub>4</sub>. In south of it (Ghardaïa region), it's Na-SO<sub>4</sub>-Cl. The Cl/ SO<sub>4</sub> ratio shows that there is enrichment with Cl toward the east of the study area. Moreover, based on the calculation of the Na/Cl and Br/Cl ratios as well as the saturation index, the origin of the salinity is showed as non-marine evaporite. The study of this spatial variation revealed that the concentrations of the ions are both controlled by natural phenomena that are related to the lithological characteristics of the aquifer (dissolution of gypsum and halite, ion exchange, etc.) but also by the intensity of the exploitation which tends to cause a mixing with water from deeper and saltier aquifers. Thus, it confirmed that the hydrogeological functioning, and therefore hydrochemical one, is strongly influenced by the overexploitation which significantly increases the salinity.

**Key words:** Hydrogeochemistry, water mineralization, salinity, overexploitation, North Western Sahara Aquifer System, Intercalary Continental Shelf, Mزاب Ridge

**Résumé :** Le Sahara septentrional renferme un des puissants systèmes aquifères dont le Continental Intercalaire (CI) qui constitue la principale réserve en eau pour les régions du Grand Erg occidental et la dorsale du Mزاب (Sahara septentrional algérien). Afin de comprendre les différents processus qui contrôlent l'acquisition et la modification de la minéralisation des eaux du CI, différentes méthodes d'interprétation des données hydrochimiques ont été appliquées pour décrire les variations spatiales des concentrations en éléments majeurs et mineurs. Cette étude a montré que les eaux du CI sont, au nord de la zone d'étude (région de Laghouat), plutôt sulfatées calciques. Au sud de celui-ci (région de Ghardaïa), elles sont sulfatées à chlorurées sodiques avec un enrichissement en Cl par rapport au SO<sub>4</sub> vers l'est en aval piézométrique. Par ailleurs, en s'appuyant sur le calcul des rapports caractéristiques Na/Cl et Br/Cl ainsi que sur l'indice de saturation, l'origine de la salinité évaporitique non marine a pu être identifiée. L'étude de cette variation spatiale a mis en évidence que les concentrations des ions sont contrôlées par des phénomènes naturels qui sont en relation avec les caractéristiques lithologiques de l'aquifère (dissolution du gypse et de la halite, échanges cationiques, ...) mais également par l'intensité de l'exploitation qui a tendance à provoquer un mélange d'eau avec des niveaux aquifères plus profonds et plus salés. Ainsi, on conclut que le fonctionnement hydrogéologique, et *a fortiori* hydrochimique, est fortement influencé par la surexploitation qui augmente significativement la salinité.

**Mots clés :** hydrogéochimie, acquisition de la minéralisation, salinité, surexploitation, Système Aquifère du Sahara Septentrional, Continental Intercalaire, Dorsale du Mزاب

## INTRODUCTION

Le Sahara est l'une des régions les plus arides au monde. Les conditions climatiques hostiles exigent une dépendance quasi-totale vis-à-vis des eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau (UNESCO, 1972). Les

<sup>1</sup> Université de Liège, Département ArGEnCo, UR *Urban and Environmental Engineering*, secteur GEO<sup>3</sup>, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement ([youcef.dedjell@doct.ulg.ac.be](mailto:youcef.dedjell@doct.ulg.ac.be)).

<sup>2</sup> Université de Liège, Département ArGEnCo, UR *Urban and Environmental Engineering*, secteur GEO<sup>3</sup>, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement ([p.orban@ulg.ac.be](mailto:p.orban@ulg.ac.be)).

<sup>3</sup> Université Amar Telidji - Laghouat, Algérie, Faculté de technologie, Laboratoire Ressources en Eau, Sol et Environnement, ([m.chettih@lagh-univ.dz](mailto:m.chettih@lagh-univ.dz)).

<sup>4</sup> Université de Liège, Département ArGEnCo, UR *Urban and Environmental Engineering*, secteur GEO<sup>3</sup>, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, ([serge.brouyere@ulg.ac.be](mailto:serge.brouyere@ulg.ac.be)).

nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT) constituent, en effet, les principales ressources d’approvisionnement en eau souterraine pour la consommation humaine, l’agriculture et l’industrie dans tout le Sahara septentrional (OSS, 2003).

Le CI, sujet de cette étude, couvre une superficie de plus de 1 millions de km<sup>2</sup> et a une épaisseur moyenne de 350m (OULD BABA SY, 2005), mais qui varie énormément en fonction de l’emplacement (OSS, 2003). Cet aquifère renferme un volume d’eau évalué à 20.000×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (OULD BABA SY, 2005). Ces énormes réserves sont cependant quasi-fossiles (BESBES *et al.*, 2004)

Le bassin du Grand Erg occidental et le piémont sud de l’Atlas saharien (nord-ouest du Sahara algérien) sont les principales aires de recharge du CI (CASTANY, 1982) avec une contribution de l’ordre de 50% (PETERSEN, 2014). Ces régions sont encore méconnues par rapport au bassin du Grand Erg oriental où les travaux sont plus abondants (OSS, 2003).

Les niveaux piézométriques sont impactés par l’exploitation (CASTANY, 1982). Ces dernières décennies, on a constaté, en plusieurs régions du Sahara Septentrional, la disparition de l’artésianisme ainsi que le tarissement des sources (OSS, 2003). La baisse du niveau piézométrique peut ainsi atteindre 2m par an en Algérie (OSS, 2003).

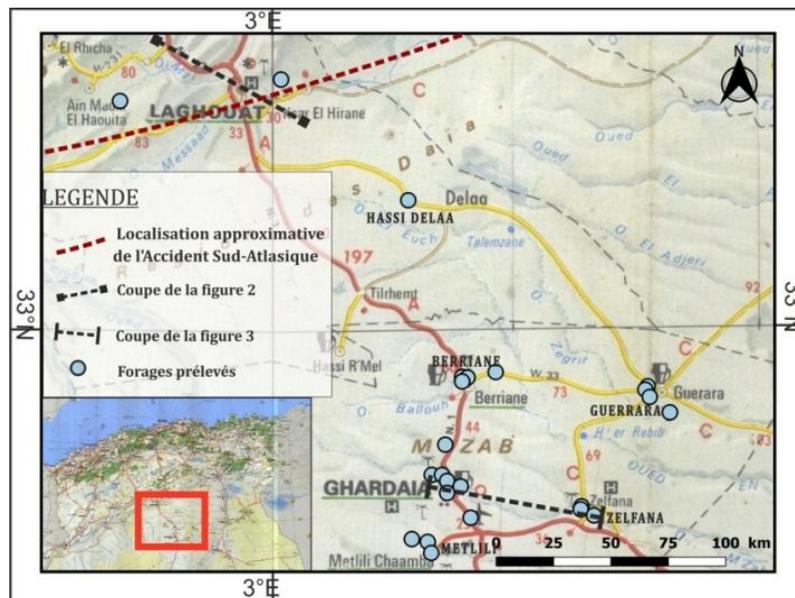
A ces problèmes quantitatifs, s’en ajoutent d’autres d’ordre qualitatif. Une tendance à la salinisation a été signalée dans plusieurs travaux (UNESCO, 1972 et OSS, 2003). Ce phénomène est expliqué par un effet d’homogénéisation, renforcé par l’exploitation de la nappe, de la qualité chimique entre les différents niveaux aquifère au sein du CI (OSS, 2003). L’origine de cette salinisation a ainsi été discutée par EDMUNDS *et al.* (2003), ils en déduisent qu’elle provient essentiellement d’évaporites non marines.

Au-delà de ces études régionales, aucune étude publiée n’a traité ce phénomène à échelle locale au niveau du bassin du Grand Erg occidental. Peu d’études ont été consacrées à la partie centrale correspondant à la Dorsale du Mزاب où les eaux du Continental Intercalaire assurent plus de 88% des besoins en eau de la région de Ghardaïa (BENKENZOU, 2008). Partant de ce constat, la présente étude vise à contribuer à la caractérisation de l’hydrochimie du CI, d’expliquer les phénomènes qui contrôlent sa minéralisation et de montrer l’effet de la surexploitation sur sa qualité chimique dans la partie septentrionale de la Dorsale du Mزاب.

## PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE

### Cadre géographique et hydroclimatique

La zone d’étude se situe à 400km au sud d’Alger et couvre, partiellement, les régions de Laghouat au Nord et Ghardaïa au Sud (Figure 1).



**Figure 1 :** Localisation géographique de la zone d’étude et des points de prélèvements. La surface couverte par la figure est de 35000km<sup>2</sup> (Fond : Algérie, carte touristique (INCT, 1997)).

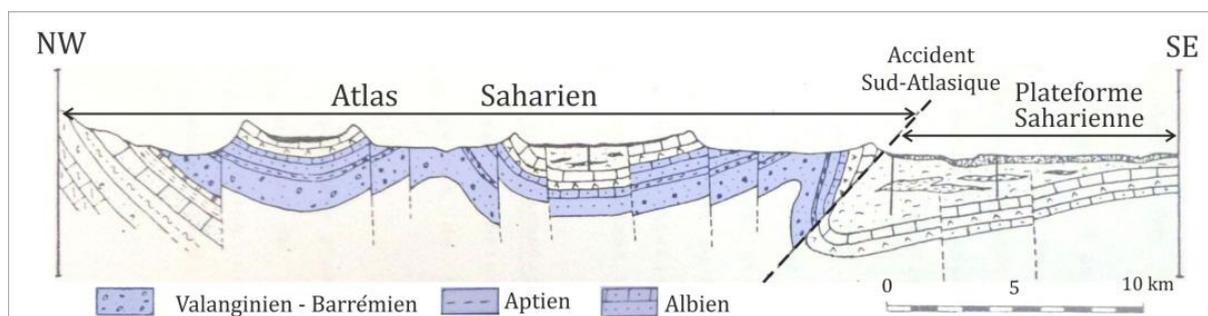
La zone d’étude se situe dans un contexte de climat aride avec des précipitations allant de moins de 60 mm au sud à plus de 200 mm au nord. L’évapotranspiration potentielle dépasse 1000 mm. Les eaux superficielles

sonst nahezu abwesend oder insignifikant. Mehrere endorheische Oueden durchqueren die Untersuchungszone von Nordwest nach Südost wie der Oued Mzi in der Region von Laghouat und die Oueden der Chebka der Dorsale des Mzab in der Region von Ghardaïa (HANNACHI, 1981; DUBIEF, 1953)

## Géologie et géomorphologie

Die Untersuchungszone ist über zwei geologisch und geomorphologisch unterschiedliche Bereiche, den Atlas saharien im Norden und die Dorsale des Mzab im Süden, unterteilt.

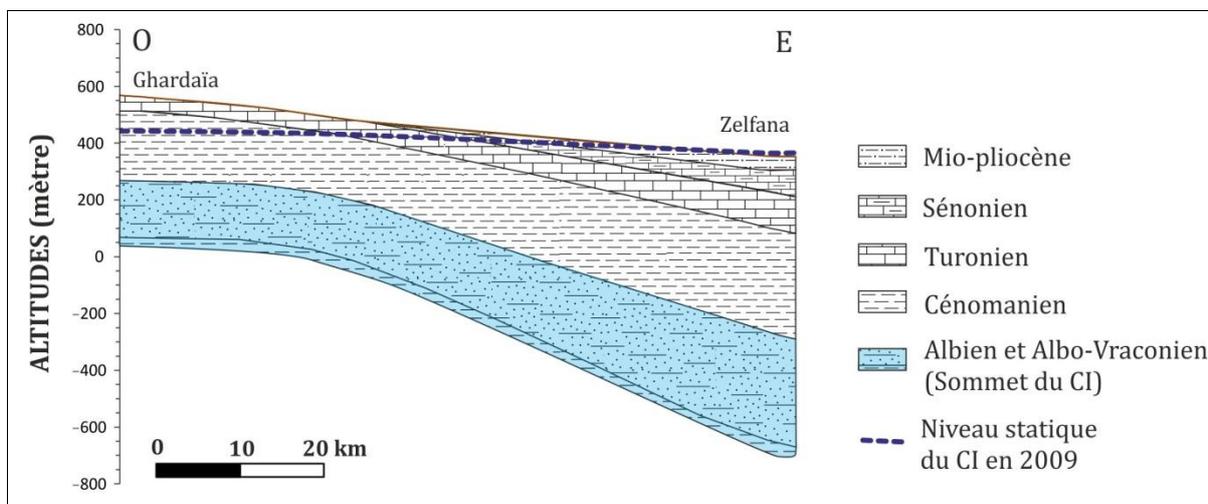
Der Atlas saharien bildet eine lange Reihe von Reliefs mit gefalteten Strukturen (Abbildung 2), die von Nordost nach Südwest verläuft, von der Westküste Algeriens bis zur tunesischen Grenze. Es ist das Ergebnis der alpinen Kompression, die eine mächtige Sedimentschicht des Sekundärschalters aufbaute, die zu den charakteristischen synclinalen Senken und antichlinalen Rücken des Atlas saharien führte. Der Süd-Atlas-Accident ist eine Serie von schrägen Störungen, die die Grenze zwischen dem Atlas saharien im Norden und der saharien Plattform im Süden markieren (HERKAT, 1999).



**Figure 2 :** Coupe géologique interprétative de la région de Laghouat. Au nord de l'accident sud-atlasique, les formations du Continental Intercalaire (en bleu) affleurent localement. Au sud, ces formations sont enfouies à grandes profondeurs et ne sont pas représentées sur la coupe (Source : CHETTIH, 1995).

La dorsale du Mzab fait partie du domaine de la plateforme saharienne qui constitue l'ensemble du domaine situé au sud de l'Algérie. Cette dernière comprend un socle précambrien et une puissante couverture phanérozoïque. Le domaine situé juste au sud de l'Accident sud-atlasique (Abbildung 2) a subi une subsidence lors de l'orogénèse alpine et de ce fait a reçu d'importants sédiments d'âge tertiaire (Mio-Pliocène) dont l'épaisseur doit dépasser les 200m (BUSSON, 1970).

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente une coupe simplifiée au droit de la dorsale de Mzab réalisée par interpolation entre trois logs de forages situés sur une ligne orientée globalement ouest-est (cf. tracé de coupe sur la Figure 1). Ces trois forages captent uniquement l'Albien. L'Albien est constitué principalement de sable et de grès à ciment argileux ou carbonaté et parfois gypseux. Vers l'est, on observe un passage latéral progressif vers un faciès carbonaté et argileux au sommet de cette formation, d'où l'appellation Albo-Vraconien (BUSSON, 1970).



**Figure 3 :** Coupe géologique simplifiée O-E au nord de la dorsale du Mzab. Le CI est représenté en bleu.

## Description du CI

Le terme « Continental Intercalaire » désigne un épisode composé d'empilement de dépôts détritiques intercalé entre deux cycles sédimentaires argileux (KILIAN, 1931). Ces dépôts ont été attribués à la période entre le Barrémien, à la base, et l'Albien inférieur, au sommet, séparé par l'imposante barre carbonatée aptienne (FABRE *et al.*, 2005). Les caractéristiques pétrographiques, géométrique et hydrodynamiques de cet aquifère sont spatialement très variables.

Au nord de l'Accident sud-atlasique, les formations du Continental Intercalaire affleurent dans les combes anticlinales de l'Atlas saharien (Figure 2) où leur épaisseur peut dépasser 1000m (CHETTIH, 1995). Au sud de cet accident, ces formations s'amincissent et elles sont couvertes d'une formation argileuse d'âge Albien supérieur à Cénomaniens inférieur de plus de 100m d'épaisseur ce qui les protège de tous échanges avec les aquifères adjacents (UNESCO, 1972).

La coupe géologique présentée à la figure 3 montre que la profondeur du toit et l'épaisseur de l'Albien croissent d'ouest en est. La nappe du CI est captive ; artésienne à l'est, et exploitée avec pompage à l'ouest. Le niveau statique est observé à des profondeurs pouvant atteindre 140 m sous la surface du sol (ACHOUR, 2010).

## MATERIELS ET METHODES

Afin d'étudier l'hydrogéochimie des eaux du CI de la zone d'étude, une campagne d'échantillonnage a été réalisée pendant le mois d'avril 2015. 24 forages appartenant essentiellement au réseau public de l'AEP ont été échantillonnés (Figure 1).

La localisation des points d'échantillonnage a été relevée, sur le terrain, à l'aide de l'application « My GPS Coordinates » puis confirmée sur Google Earth.

Les 24 points de prélèvement se répartissent comme suit :

- 02 points (PT01, PT02) au nord de l'Accident sud-atlasique,
- 01 point intermédiaire (PT03) au sud de l'accident et au nord de la région de Ghardaïa. D'après les informations collectées, il n'y a pas d'autres forages dans cette région.
- 14 points à l'ouest de la région de Ghardaïa, répartis du nord au sud comme suit : Berriane (PT04 à PT07), agglomérations de Ghardaïa (PT12 à PT18) et Metlili (PT19 à PT21).
- 07 points dans la zone artésienne à l'est, dans les communes de Guerrara (PT08 à PT11) et Zelfana (PT22 à PT24).

L'échantillonnage a été effectué en respectant les mesures nécessaires pour assurer une bonne représentativité de l'échantillon prélevé (forage en marche pour assurer une bonne purge de l'ouvrage, prélèvement près de la tête du forage, rinçage des flacons et bouchons ainsi que du dispositif de filtration, remplissage complet du flacon, étiquetage adapté). Les échantillons ont été conservés à une température fixe (15°C pendant la campagne et 4°C au laboratoire) à l'abri de la lumière.

L'eau prélevée a été stockée dans des flacons en polyéthylène recommandés pour une analyse ordinaire (RODIER *et al.*, 2009). Deux flacons ont été utilisés par point de prélèvement, le premier d'un volume de 100 ml d'eau filtrée à 0.45µm puis acidifié avec HCl à 12N jusqu'à un pH de 2 pour le dosage de fer et de manganèse dissous, le second d'un volume de 150 ml d'eau brute pour l'analyse des autres éléments majeurs et mineurs.

La température et la conductivité électrique de l'eau pompée ont été mesurées sur le terrain, le plus près de la tête du forage, à l'aide d'un thermomètre à mercure et d'un conductivimètre.

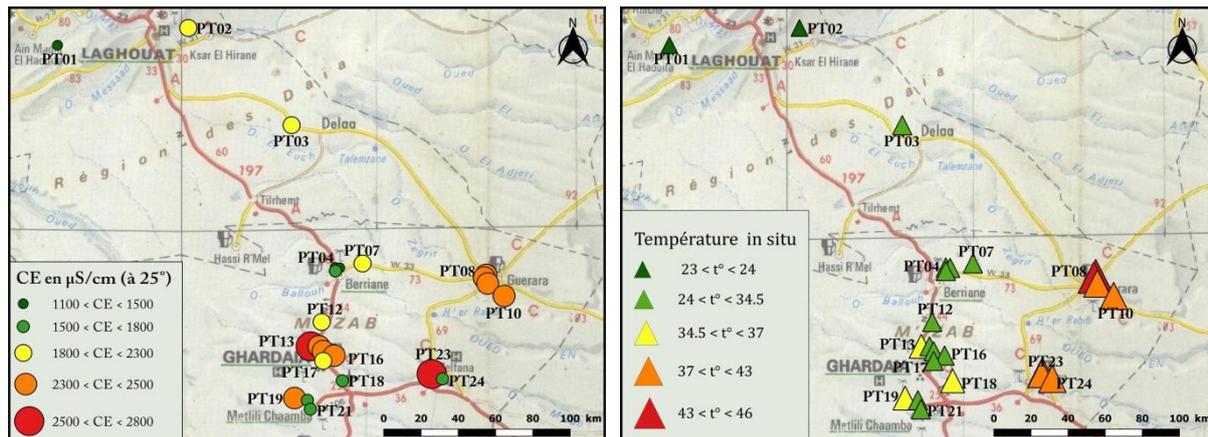
Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse en Phase Aqueuse du groupe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGE-ULg).

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Etude des paramètres physico-chimiques

Pour tous les échantillons analysés, l'erreur sur la balance ionique est inférieure à 5% ce qui semble confirmer la qualité des analyses.

Une importante variabilité spatiale de la conductivité électrique est observée dans la zone d'étude. (Figure 4). Au nord de la zone d'étude (de PT01 à PT03), la conductivité électrique varie entre 1144 et 2147 µS/cm. Au sud de la zone d'étude (à partir de PT04), la conductivité électrique varie entre 1420 µS/cm au niveau de la commune de Berriane (PT04) et 2770 µS/cm au niveau de l'agglomération de Ghardaïa (PT13).



**Figure 4 :** en est conformément à la piézométrie régionale du CI et à la profondeur des niveaux échantillonnés. Distribution spatiale de la conductivité électrique (à gauche) et de la température (à droite). Une tendance à l'augmentation des conductivités électriques et des températures est observée d'ouest en est conformément à la piézométrie régionale du CI et à la profondeur des niveaux échantillonnés.

Une importante augmentation de la minéralisation est observée au niveau de l'agglomération de Ghardaïa (1769 - 2771  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) située entre Berriane (1420 - 1810  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) au nord et Metlili (1533 - 2338  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) au sud. Le débit pompé pour ces trois localités est respectivement de l'ordre de  $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{j}$ ,  $13.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{j}$  et  $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{j}$ . On remarque également que les forages situés dans des zones à forte exploitation (par exemple pour le PT13 au centre de l'agglomération de Ghardaïa, et le PT23 à proximité des thermes de Zelfana) ont une minéralisation plus élevée que les autres forages situés à leur proximité. Ceci laisse supposer que la surexploitation de la nappe a un effet sur la salinisation des eaux du CI. Ce constat observé à échelle régionale et locale vient consolider les résultats des anciennes études (UNESCO, 1972 et OSS, 2003).

La température de l'eau, mesurée in situ, est relativement basse ( $11.5^\circ\text{C}$ ) au nord où la nappe est libre. À l'ouest de la région de Ghardaïa, les températures varient entre  $32.5^\circ\text{C}$  et  $36^\circ\text{C}$ . Par contre, elles sont comprises entre  $39.5^\circ\text{C}$  et  $45.5^\circ\text{C}$  à l'est de celle-ci. Notons que les températures élevées ont donné naissance à une région très réputée pour ses thermes. Cette différence est liée à la profondeur des niveaux aquifères et est conforme au gradient géothermique qui est, selon nos mesures *in situ*, de l'ordre de  $1.06^\circ\text{C}$  tous les 50m au niveau de la région de Ghardaïa.

Les points PT13 et PT23 présentent des légères anomalies positives de température par rapport aux forages avoisinants. Ceci est accompagné, comme susmentionné, de l'augmentation de la charge minérale. Ainsi, on suppose que suite à la forte exploitation, un mélange d'eau se fait avec des niveaux aquifères relativement plus profonds, plus chauds et plus minéralisés.

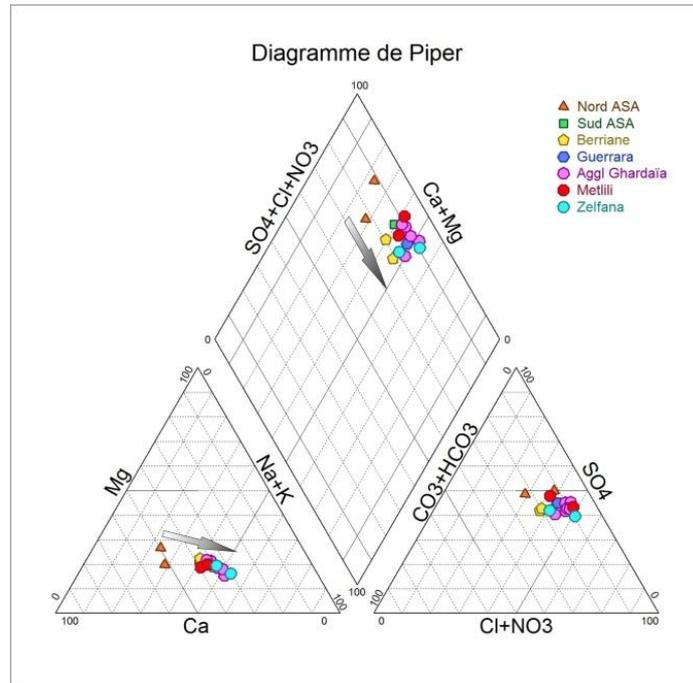
Par ailleurs, le pH mesuré au labo est proche de la neutralité pour tous les échantillons, compris entre 7.61 et 8.15. Les eaux du CI présentent des duretés totales comprises entre  $37^\circ\text{f}$  et  $78^\circ\text{f}$ . L'indice de Langelier montre que les eaux du CI sont incrustantes (RODIER *et al.*, 2009), une contrainte majeure pour les gérants du réseau de l'AEP, s'ajoutant au problème de la température élevée.

Les teneurs en nitrate sont relativement élevées et celles en fer et en manganèse très basses, alors que la nappe du CI dans ces régions est captive. On peut déduire de cela que les conditions réductrices (anaérobies) ne sont pas encore atteintes dans la zone d'étude. Ceci corrobore les résultats d'EDMUNDS *et al.* (2003) qui ont montré que la zone anaérobie pour le CI est à environ 50 km à l'est de la zone d'étude. Ceci concorde avec plusieurs travaux antérieurs qui ont signalé l'existence de teneurs élevées en nitrate dans des systèmes aquifères profonds situés dans des zones arides (EDMUNDS & GAYE, 1997 et STONE & EDMUNDS, 2014). Ils ont conclu que l'origine du nitrate semble être naturelle.

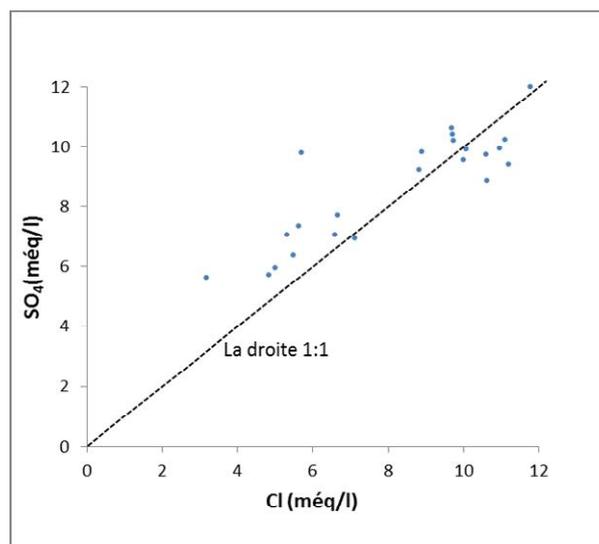
### Facies chimique des eaux

La classification des eaux du CI révèle que les eaux souterraines au nord de l'Accident sud-atlasique (ASA) sont plutôt sulfatées calciques. Ceci est probablement dû au lessivage des niveaux gypsifères reconnus dans ces zones. Dans la partie confinée du CI au sud de l'ASA, les eaux sont plutôt sulfatées à chlorurées sodiques.

Si on peut facilement déduire que le cation est dominant, il n'en n'est pas de même pour les anions. On remarque qu'il y a un rapport  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  de l'ordre de  $1 \pm 0.2$  pour la plupart des échantillons. La figure 6 montre qu'il y a un enrichissement proportionnel en Cl en fonction de l'augmentation de la charge minérale qui augmente d'ouest en est.



**Figure 5 :** Faciès chimiques des eaux du CI. La flèche montre la position des échantillons d'amont en aval piézométrique.



**Figure 6 :** Evolution des concentrations en  $\text{SO}_4$  et Cl.

### Matrice de corrélation des éléments chimiques

La matrice de corrélation (Tableau 1 : **Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques**) montre que la conductivité électrique (CE) est très positivement corrélée avec Ca, Mg, Na, Cl et  $\text{SO}_4$ . Ceci reflète logiquement la contribution majeure de ces ions à la minéralisation des eaux. On remarque que les cations Ca, Mg et Na sont relativement moins corrélés avec la CE que les anions Cl et  $\text{SO}_4$ . Cela est peut être expliqué par le phénomène d'échanges cationiques qui est spécifique aux cations alors que les anions subissent un transport plus conservatif (BEN ALAYA *et al.*, 2014).

Les ions Ca, Mg et  $\text{SO}_4$  sont très positivement corrélés, idem pour les ions Na et Cl, ce qui peut signifier la similarité de leur origine respective à travers la dissolution de gypse/anhydrite et de halite (KAMEL *et al.*, 2006). On remarque que  $\text{SO}_4$  et Cl sont très positivement corrélés (cf. figure 6). Ainsi, on suppose que la mise en solution de ces deux ions se fait simultanément.

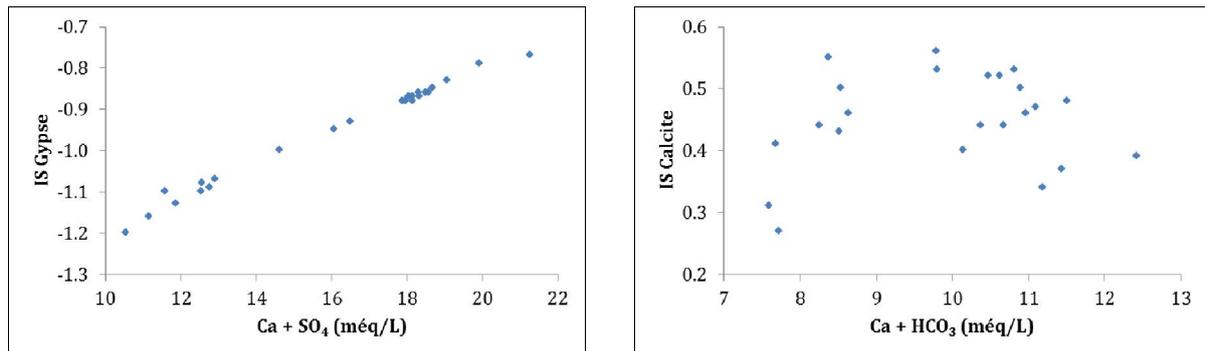
On remarque également que  $\text{HCO}_3$  ne montrent pas une corrélation significative ni avec Ca ni avec Mg. Ceci semble montrer que les minéraux carbonatés ne contrôlent pas significativement ces deux cations.

**Tableau 1 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques.**

	CE	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>
CE	1.00								
Ca	0.81	1.00							
Mg	0.81	0.91	1.00						
Na	0.91	0.53	0.53	1.00					
K	0.25	0.08	0.21	0.26	1.00				
SO <sub>4</sub>	0.95	0.89	0.87	0.80	0.20	1.00			
Cl	0.97	0.71	0.71	0.94	0.29	0.86	1.00		
HCO <sub>3</sub>	-0.28	-0.35	-0.20	-0.22	0.71	-0.32	-0.25	1.00	
NO <sub>3</sub>	0.07	0.42	0.38	-0.18	-0.49	0.19	-0.11	-0.38	1.00

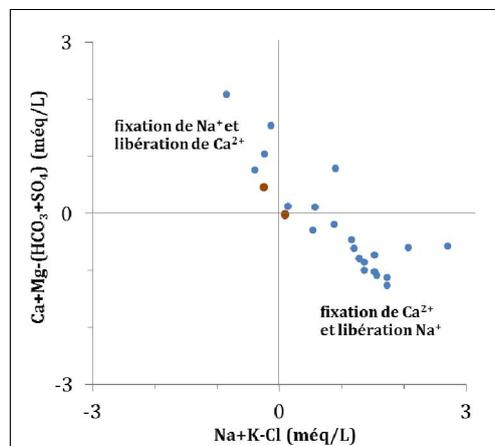
### Acquisition de la minéralisation

Les indices moyens de saturation du gypse et d'anhydrite (Figure 7) sont évalués à -0.95 et -1.17 respectivement, celui de la halite à -5.89 et celui de la calcite et de l'aragonite à 0.30 et 0.44. Ainsi, on déduit que le gypse/anhydrite est en sous-saturation et que la halite est absente (nette sous-saturation) (ALLEY, 1993). Les minéraux carbonatés (calcite et aragonite) présentent des indices compris entre 0 et 0.6, donc on peut les considérer à l'état d'équilibre (PLUMMER *et al.*, 1976).



**Figure 7 : Indice de saturation du gypse et de la calcite.**

La projection de  $[(Ca+ Mg)-(HCO_3+SO_4)]$  en fonction de  $(Na+K-Cl)$  met en évidence le phénomène d'échanges cationiques. Le cas échéant, les échantillons s'alignent, en gros, sur une droite à pente égale à -1 (Figure 8) (GARCIA *et al.*, 2001).



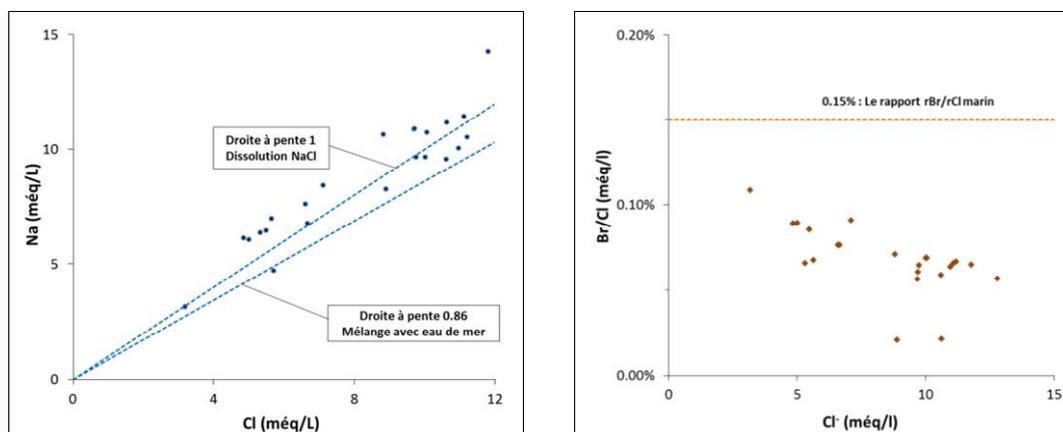
**Figure 8 : Indice d'échanges cationiques (points bruns : PT01 et PT03).**

Partant du principe que les forages PT01 et PT03 sont les plus proches de la zone de recharge, on peut considérer leur composition chimique comme celle de référence. Par rapport à ces points, on constate que ces

échanges s'effectuent principalement dans le sens de la libération de Na des formations aquifères contre la fixation de Ca de l'eau.

### Origine de la salinité des eaux souterraines

Les teneurs élevées en Na et Cl peuvent être liées à plusieurs sources, principalement la dissolution de la halite et la dilution de l'eau de mer.



**Figure 9 :** Diagrammes binaires Na en fonction du Cl (à gauche) et Br/Cl en fonction du Cl (à droite).

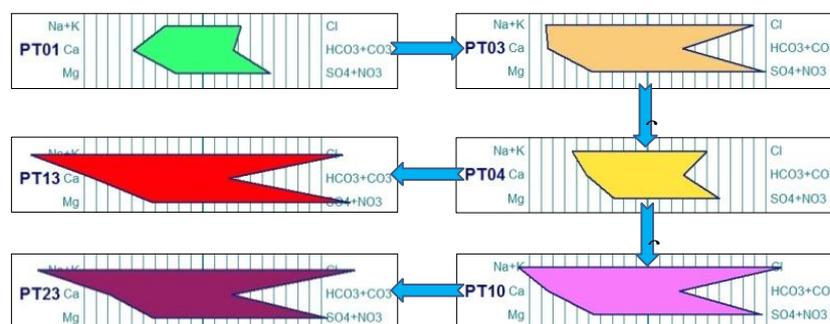
Le diagramme binaire Na en fonction du Cl permet de distinguer la salinisation provenant de la dissolution de la halite de celle provenant d'un mélange avec l'eau de mer. Dans le cas étudié (Figure 9), les échantillons analysés s'alignent autour de la droite de pente 1/1 correspondant à la droite de dissolution de la halite (MÖLLER, 1990).

Le rapport Br/Cl peut également être utilisé pour déterminer si la salinisation provient de l'eau de mer (eaux anciennes piégées). Le brome est en effet parmi les espèces les mieux conservées et mobiles dans l'eau (El ACHHEB *et al.*, 2001). Dans le présent cas (Figure 9), les échantillons analysés montrent un rapport de Br/Cl autour de 0.8‰ qui est bien inférieur à celui de l'eau de mer (PIPER & GARRETT, 1953).

Les deux méthodes indiquent que l'origine des ions Cl et Na est liée à la dissolution de la halite. L'indice de saturation de ce minéral étant très nettement inférieur à 0, ceci laisse supposer que les eaux prélevées ne sont pas directement en contact avec les formations salifères mais ont migré des formations plus profondes contenant des eaux salées suite aux pompages notamment.

### Modèle conceptuel hydrochimique

Sur base de l'ensemble des données et interprétations, un modèle conceptuel d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines du CI au niveau de la zone d'étude est proposé et illustré par le diagramme de Stiff (Figure 10).



**Figure 10 :** Evolution de l'hydrochimie du CI.

Au nord de l'Accident sud-atlasique, les eaux sont très enrichies en SO<sub>4</sub> et Ca (PT01) dont la minéralisation provient essentiellement de la dissolution du gypse.

Au sud de ce dernier, les eaux deviennent plus chargées en Na (PT04), l'indice d'échanges cationiques montrant que le Ca a été changé contre le Na des formations géologiques. On remarque que l'échantillon PT03 renferme une importante teneur en calcium, représentant ainsi un état transitoire entre les deux facies.

Sachant que l'écoulement souterrain se fait d'ouest en est, il est supposé que les eaux rencontrées à l'ouest de la zone d'étude dans les régions où la nappe n'a pas subi d'importante exploitation représentent l'état initial

« de référence » des eaux du CI pour la présente étude (Communes de Berriane et Metlili). Les eaux y sont faiblement minéralisées (PT04) avec un rapport  $SO_4/Cl$  inférieur à 1. Entre ces deux communes, à l'agglomération de Ghardaïa où le CI est fortement sollicité, les eaux sont plus chargées et en particulier en Na et en Cl (PT13).

En allant vers l'est, la charge minérale augmente avec un rapport  $SO_4/Cl$  supérieur à 1 (PT10) et au niveau des zones à très forte exploitation (PT23) les eaux sont plus chargées également.

La chimie des eaux du CI semble donc contrôlée principalement par les phénomènes d'interaction eau/roche, à savoir la dissolution du gypse et de la halite, les échanges cationiques, etc. Il semble également que la surexploitation du CI a un effet non négligeable sur sa qualité chimique, en particulier sa salinisation.

## CONCLUSION

L'application de différentes méthodes d'interprétation des analyses hydrochimiques a permis de réaliser des premières avancées dans la compréhension des processus d'acquisition de la minéralisation des eaux du CI au nord de la dorsale du Mzab. Elles ont montré qu'il y aurait une tendance à la salinisation suite à la sollicitation croissante de l'aquifère du CI.

La minéralisation des eaux du CI est contrôlée par les ions Ca, Na, Cl et  $SO_4$ . Au nord de l'Accident Sud-Atlasique les eaux du CI sont plutôt sulfatées calciques. Au sud de ce dernier, elles sont sulfatées à chlorurées sodiques avec un rapport  $SO_4/Cl$  qui montre un enrichissement en Cl vers l'est. Dans les zones à forte exploitation, elles sont plus salées. Cette augmentation de la salinité a été provoquée très probablement par un mélange avec des niveaux plus profonds et plus salés. Le calcul des rapports caractéristiques Na/Cl et Br/Cl ainsi que l'indice de saturation ont montré que l'origine de la salinité est évaporitique non marine. Néanmoins, l'origine de NaCl dissout reste encore à investiguer car nulle part il n'a été signalé l'existence de la halite au sein de l'aquifère du CI.

Pour affiner les résultats de ce travail, un minutieux suivi de la nappe est recommandé tant sur le plan piézométrique qu'hydrochimique, à échelle locale, depuis les zones de recharge situées au piedmont de l'Atlas saharien à l'ouest et en mettant en œuvre les techniques isotopiques.

Par ailleurs, les résultats mis en évidence par ce travail sont inquiétants, et ils nous préviennent sur la fragilité de la nappe du CI qui ira au pire sachant que les régions sahariennes sont devenues une destination de choix pour une intense activité agricole et économique. Pour assurer un développement socio-économique durable dans ces régions sahariennes, une nouvelle approche de gestion tenant compte des principes d'une gestion intégrée de cette précieuse ressource doit être mise en place.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier « **Arlon Campus Environnement** » et « **l'Académie de Recherche et d'Enseignement supérieur – Commission de la Coopération au Développement (ex CUD)** » de nous avoir offert l'opportunité d'obtenir le « Master Complémentaire en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement, option : Gestion de l'eau » et de réaliser le présent travail.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR, M. 2010. Premières mesures piézométriques en utilisant les nouveaux piézomètres captant la nappe du CI dans la wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Ouargla. Rapport intérieur. 14p.
- ALLEY, W. M. 1993. *Regional ground-water quality*. John Wiley & Sons. 635p.
- BENKENZOU, D. 2008. Ghardaïa, Annuaire statistique. Rapport inédit. Service des Études Économiques, du Traitement de l'Information Économique et Sociale et de la Gestion. 132p.
- BESBES, M., BABASY, M., KADRI, S., LATRECH, D., MAMOU, A., PALLAS, P., & ZAMMOURI, M. 2004. Conceptual framework of the North Western Sahara Aquifer System. *Shared Aquifer Resources*, 163-169.
- BEN ALAYA, M., ZEMNI, T., MAMOU, A. & ZARGOUNI, F. 2014. Acquisition de salinité et qualité des eaux d'une nappe profonde en Tunisie: approche statistique et géochimique. *Hydrological Sciences Journal*, 59, (2) : 395-419.
- BUSSON, G. 1970. Le Mésozoïque Saharien 2ème partie: Essai de synthèse des données des sondages Algero-Tunisiens, Tome 2. In : *Ser. Geol.* CNRS Paris. 811p.
- CASTANY, G. 1982. Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie). Aquifères du Continental intercalaire et du complexe terminal [nappe captive, système multicouche, hydrodynamique, gestion des ressources en eau, milieu aride]. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières Section 3 Hydrogéologie Géologie de l'Ingenieur*, 127-147.

- CHETTIH, M. 1995. *Simulation par modèle hydrodispersif des écoulements souterrains et des variations de salinité dans l'aquifère alluvial de la vallée du M'Zi*. Thèse de doctorat en hydrogéologie. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger. 110p.
- CORNET, A. 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. *Rev Géogr Phys et Géol Dyn*, 6, (1) : 5–72.
- DUBIEF, J. 1953. *Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara*. Gouvernement général de l'Algérie, Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique, Service des études scientifiques. 457p.
- EDMUNDS, W. M. & GAYE, C. B. 1997. Naturally high nitrate concentrations in groundwaters from the Sahel. *Journal of Environmental Quality*, 26, 5 :1231-1239.
- EDMUNDS, W. M., GUENDOÛZ, A. H., MAMOU, A., MOULLA, A., SHAND, P. & ZOUARI, K. 2003. Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Applied Geochemistry*, 18, (6) : 805–822.
- EL ACHHEB, A., MANIA, J. & MUDRY, J. 2001. Processus de salinisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel-Doukkala (Maroc occidental). In *First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal aquifers-Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco*.
- FABRE, J., LATOUCHE, L., KAZI TANI, N., MOUSSINE-POUCHKINE, A., AÏT HAMOU, F., DAUTRIA, J. M. & MAZA, M. 2005. *Géologie du Sahara occidental et central*.
- GARCIA, G. M., HIDALGO, M. del V., & BLESIA, M. A. 2001. Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 9, (6) :597–610.
- HANNACHI, A. 1981. *Relations entre aquifères profonds et superficiels: hydrogéologie de la vallée de l'Oued M'Zi, à l'est de Laghouat, Wilaya de Laghouat (Algérie)*. Thèse de doctorat en Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Grenoble.
- HERKAT, M. 1999. *La Sédimentation de haut niveau marin du cretacé supérieur de l'Atlas Saharien oriental et des Aurès* Thèse de doctorat en Sédimentologie – Géodynamique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
- INCT. 1997. Algérie, carte touristique. Institut national de cartographie et de télédétection. Hussein-Dey, Alger, Algérie.
- KAMEL, S., DASSI, L. & ZOUARI, K. 2006. Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie. *Hydrological sciences journal*, 51, (4) :713–730.
- KILIAN, C. 1931. Des principaux complexes continentaux du Sahara. *Comptes Rendus sommaire de la Société Géologique de France*, 9 : 109–111.
- MÖLLER, D. 1990. The Na/Cl ratio in rainwater and the seasalt chloride cycle. *Tellus B*, 42, (3) : 254–262.
- OSS. (2003). Le système aquifère du Sahara septentrional : une conscience de bassin, volume 2 : Hydrogéologie.
- OULD BABA SY, M. 2005. Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara Septentrional. *Faculte des Sciences de Tunis, Département de Géologie*, 271.
- PETERSEN, J. O. 2014. *Traçage isotopique (36Cl, 4He, 234U) et modélisation hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Application à la recharge Quaternaire du Continental Intercalaire*. Thèse de doctorat Geosciences de l'environnement. Aix-Marseille.
- PIPER, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25, (6) : 914–928.
- PIPER, A. M. & GARRETT, A. 1953. Native and contaminated waters in the long beach—Santa Ana area, California. *US Geol. Sur. Water-supply paper* :1136–1320.
- PLUMMER, L. M., JONES, B. F. & TRUESDELL, A. H. (1976). WATEQF-A Computer Program for Calculating Chemical Equilibrium of Natural Waters.
- RODIER, J., LEGUBE, B., MERLET, N. & BRUNET, R. (2009). *L'analyse de l'eau-9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. Dunod.
- STONE, A. E. C. & EDMUNDS, W. M. 2014. Naturally-high nitrate in unsaturated zone sand dunes above the Stampriet Basin, Namibia. *Journal of Arid Environments*, 105 : 41-51.
- UNESCO. (1972). Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional : Rapport sur les résultats du projet, conclusions et recommandations.