



Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans le voisinage de la décharge contrôlée de Berkane (Maroc)

Assessment of groundwater physicochemical quality in the vicinity of the Berkane controlled landfill (Morocco)

Amine Chaïeb, Driss Khattach,

Laboratoire de Géosciences appliquées et COSTE, Faculté des sciences, Université Mohamed Premier Oujda 60000, Morocco

Received 12 Jun 2015, Revised 08 Feb 2016, Accepted 18 Feb 2016

**Corresponding author: E-mail: chaieb.gc.2012@gmail.com*

Abstract

The aim of this study is to evaluate the physicochemical quality of groundwater in the vicinity of the Berkane landfill which started in 2004. Water of six wells was sampled during November 2013 and October 2014. In addition to pH, salinity and conductivity eight major chemical elements (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}) and eight heavy metals (Pb, Zn, Cd, Fe, Cu, Co, Ni and Cr) were analyzed. Results show a strong mineralization and high amounts of Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- . Groundwater has two facies: a chlorinated sodic and potassium facies, and a chlorinated-sulfated, calcic and magnesium facies. The nitrates values varied between 22.30 and 24.80 mg.L^{-1} ; without exceeding the World Health Organization (WHO) drink water standards. Heavy metal's analysis indicated that the Pb and Zn showed the highest values, which varying from 0 to 0.1148 mg.L^{-1} for Pb and 0.0083 to 0.3129 mg.L^{-1} for Zn. The contents of Pb exceed the WHO drink water standards (0.01 mg.L^{-1}). These chemical anomalies may either have a geological origin, related to the Landfill site dysfunction or a contribution of both. The Hydro-geological and geochemical data of the study area suggest that the deterioration of these waters is mainly due to a geological origin.

Keywords: Groundwater, Physicochemical quality, Major chemical elements, Heavy metals, Landfill of Berkane

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'état de la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans le voisinage du centre d'enfouissement technique de Berkane (CET) qui a démarré en 2004. Les eaux de six puits ont été échantillonnées et analysées en Novembre 2013 et Octobre 2014. En plus du pH, la salinité et la conductivité, huit éléments chimiques majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}) et huit métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Fe, Cu, Co, Ni and Cr) ont été analysés. Les résultats ont révélé une forte minéralisation et des teneurs élevées en Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- . Les eaux présentent deux faciès : Un faciès chloruré sodique et potassique dominant et un faciès chloruré sulfaté calcique et magnésien. Quant aux nitrates, les teneurs varient entre 22.30 et 24.80 mg.L^{-1} ; elles ne dépassent pas les normes. Les analyses des éléments traces indiquent que les teneurs élevées sont celles du plomb (0 à 0.1148 mg.L^{-1}) et du zinc (0.0083 à 0.3129 mg.L^{-1}). Les teneurs en Pb dépassent les normes recommandées (0.01 mg.L^{-1}) par l'organisation mondiale de la santé (OMS). Ces anomalies chimiques peuvent être soit d'origine géologique soit liées un dysfonctionnement du CET ou une contribution des deux. Les données hydrogéologiques et géochimiques du secteur d'étude suggèrent principalement une origine géologique de la dégradation de ces eaux.

Mots-clés : Eaux souterraines, Qualité physico-chimique, Eléments majeurs, Métaux lourds, Décharge de Berkane

1. Introduction

Les Centres d'Enfouissement Techniques (CET) sont des décharges contrôlées et n'ont fait leur apparition au Maroc que depuis quelques années. Ces centres de stockage de déchets ménagers et assimilés doivent avoir une modalité de contrôle afin de prévenir toute fuite ou dysfonctionnement. Cette surveillance devrait être basée sur des analyses régulières des eaux souterraines via des piézomètres implantés en amont et en aval hydraulique. Le CET de Berkane est un des premiers du pays et qui a démarré en 2004. Une caractérisation de ses lixiviats a été menée en 2006 et 2007 par [1,2]. L'objectif du présent travail est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines aux alentours du CET. Cette approche physico-chimique a été utilisée par plusieurs auteurs dans l'étude d'impact des décharges [3,4,5]. En absence d'un système de piézomètres, l'étude a porté sur les puits existant dans les alentours immédiats du site. Les teneurs des eaux en éléments majeurs et éléments traces ont été déterminées et comparées aux différentes normes.

2. Présentation de la zone d'étude

2.1. Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Berkane

Il se situe à environ 7 km à l'ouest de la ville de Berkane (sur la route de Nador), à 6 km de Sidi Slimane Cherrâa, 18 km d'Aklim, à 6 km de la population du centre rural de Boughriba et 10 km du centre rural de Zegzel. Le CET est accessible à partir de la RN2 PK 508 avec une piste d'environ 1,4 km; sa superficie est environ 10 hectares. Le site reçoit quotidiennement environ 200 tonnes de déchets ménagers [2]. La caractérisation physico-chimique des lixiviats du premier casier de cette décharge, effectuée entre 2006 et 2007 [1,2], indique des teneurs fortes élevées en certains éléments. Les nitrates varient entre 25 et 58 mg.L⁻¹ alors que les nitrites varient entre 0.09 et 45.1mg.L⁻¹. La salinité présente des valeurs entre 5 et 54 g.L⁻¹. Pour ce qui est des teneurs en métaux lourds, les résultats de la figure 1 des lixiviats du casier mentionnés dans le tableau 1 mettent en évidence une forte concentration en Fe, Zn et Cr [1].

Tableau 1: Teneurs des métaux lourds des lixiviats du casier du CET de Berkane d'après [1].

Métaux lourds	Unité	Lixiviat du casier
Cadmium(Cd)	mg.L-1	6
Cuivre(Cu)	mg.L-1	655
Nickel(Ni)	mg.L-1	574.4
Zinc(Zn)	mg.L-1	2625.7
Cobalt(Co)	mg.L-1	184
Plomb(Pb)	mg.L-1	232.3
Fer(Fe)	mg.L-1	43682.5
Chrome(Cr)	mg.L-1	934

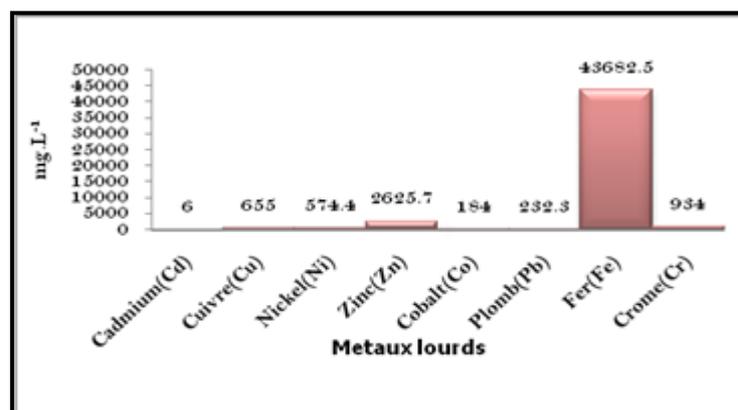


Figure 1: Répartition des teneurs en métaux lourds des lixiviats du casier du CET de Berkane [1]

2.2. Contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique

2.2.1 Géologie

La figure 2 met en vue l'implantation du C.E.T sur des sols quaternaires. Les terrains récents, entre 5 et 10m, sont composés de travertins, de conglomérats d'âge quaternaire ancien, d'éboulis de piémont, de glacis et d'encroûtements calcaires du Quaternaire moyen, puis à l'affleurement des cailloutis et limons bruns argileux du Quaternaire récent. En plaine, les formations néogènes sont enfouies sous les formations quaternaires. Les terrains anciens sont ceux du flanc nord Ouest de l'anticlinal du massif des Béni Snassen occidentaux, caractérisés par des formations géologiques d'âge jurassique constituées de bas en haut par des terrains carbonatés et marno-carbonatés, puis par des alternances marno-silto-gréseuses au sommet [6,7,8]. Au-dessus des formations du Lias inférieur dolomitique et d'un Lias moyen calcaire à marno-calcaire qui affleurent au Sud du domaine étudié, viennent des calcaires grisâtres et marno-calcaire appartenant à la « Dalle à Zoophycos » d'âge Aaleno-bajocien d'une cinquantaine de mètre d'épaisseur. A l'aplomb de la décharge et vers 350 m de profondeur on trouve la formation d'Anou Midra composée d'une série d'alternances marno-calcaire, de calcaire marneux et marne vers le sommet, de quatre-vingt mètre d'épaisseur, l'âge de la formation est bathonien. Cette formation est surmontée par la Formation des Grés des Béni Ourimech constituée d'alternances marno-silto-gréseuses brunâtres et de barres de grés siliceux brunâtres au sommet, l'épaisseur de la formation, dépasse les deux cent cinquante mètres. Toutes ces formations ont un pendage monoclinal d'une quinzaine de degré vers le Nord [9].

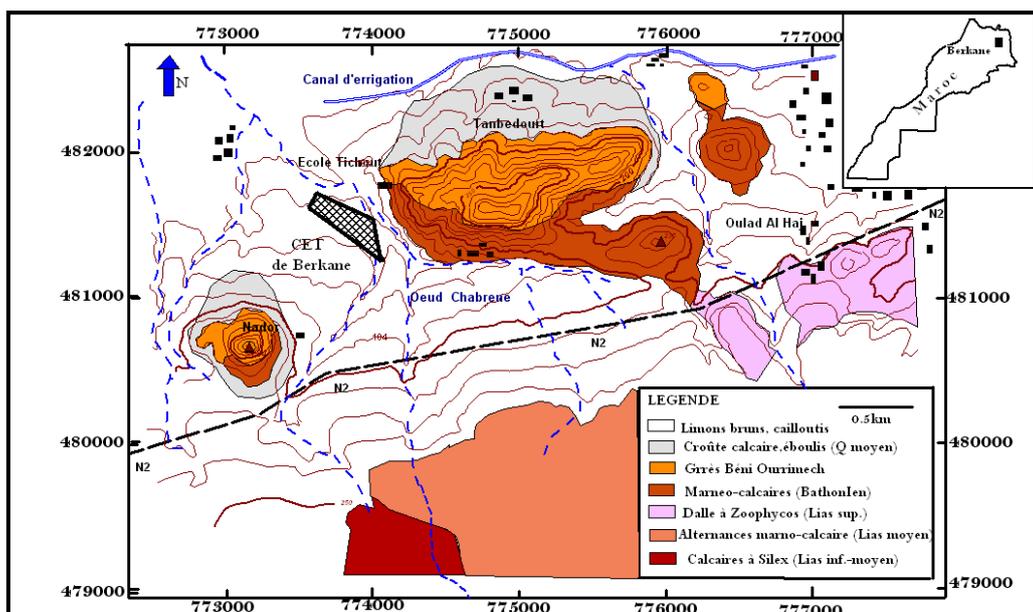


Figure 2: Carte géologique (extrait de [9]) et localisation du CET de Berkane (coordonnées Lambert).

2.2.2 Hydrologie-Hydrogéologie

Le secteur d'étude se trouve sur le flanc nord des Béni Snassen, à 170 m d'altitude et à 2 km des jbel Taourirt Ounwal, Malou Izemrane culminant à 400 m. La figure 4 indique les talwegs du site (pente de 8 %), à régime turbulent en période pluviale, ces talwegs se rencontrent au Nord pour donner l'oued Chabrene, confluent de l'oued Chraa affluent de la Moulouya.

Le massif des Béni Snassen est le château d'eau des Triffa au Nord. Le flanc nord du massif des Béni Snassen comporte une unité hydrogéologique composée de deux nappes captives : la nappe profonde de 700 m du Lias inférieur (Fezouane, Ichoun, Aghbal) exploitée pour l'alimentation en eau de Berkane, Ahfir et Saïdia [10-11-12]. Cette nappe est caractérisée par une bonne qualité des eaux et par un artésianisme au niveau de certains forages (Fezouane). Plus haut, à une profondeur de 500 m, une deuxième nappe aquifère est contenue dans les calcaires grisâtres de la « Dalle à Zoophycos », de moindre capacité que la précédente. Les niveaux aquifères des puits concernés par les prélèvements effectués au cours de cette étude sont constitués par la base de la

Croûte carbonatée du Quaternaire moyen et les termes supérieurs de la Formations des Grés des Béni Ourimech ; ces termes se composent d'alternances marno-silteuses et grés-silto-argileuses surmontées par des alternances de barres gréseuses pouvant atteindre des épaisseurs d'une vingtaine de mètre. Au niveau de la décharge et d'après les levés de novembre 2013 représentés dans la figure 4, la nappe phréatique était située à une profondeur d'environ 10m.

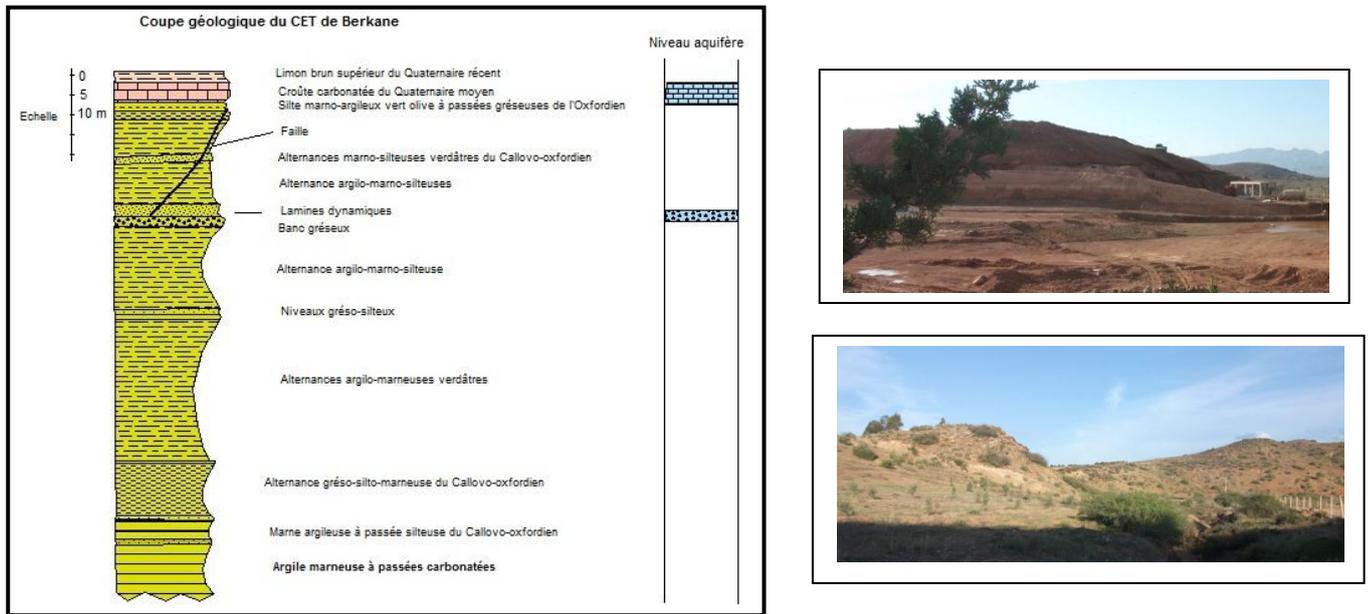


Figure 3 : Coupe géologique et photos des affleurements au niveau du C.E.T. de Berkane.

D'après la carte des isobathes de la nappe phréatique des Triffa de novembre de 1966 [12], ce niveau était inférieur à 5m de profondeur. Les écoulements des eaux souterraines sont dirigés du Sud vers le Nord suivant la pente de la surface piézométrique. La qualité des eaux de cette nappe est médiocre à cause d'une forte salinité présente dans les roches du plancher, contaminé par les formations néogènes évaporitiques. D'après la carte de salinité des eaux de la nappe présentée dans la figure 5 effectuée en novembre 1967 [12], la concentration en sel des eaux varie de 4 à plus de 8 g.L⁻¹.

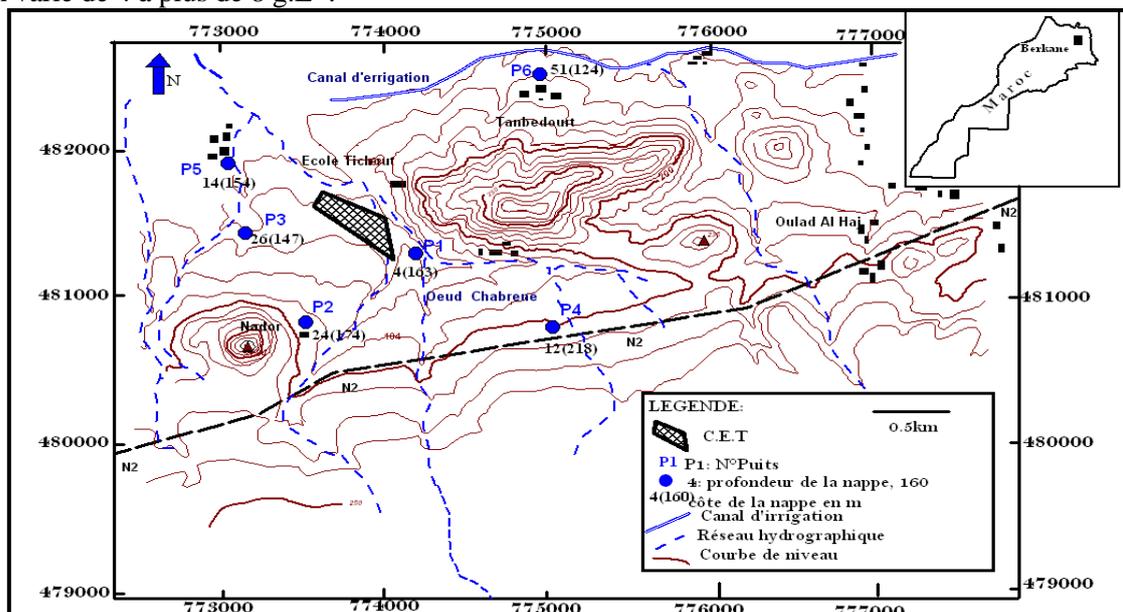


Figure 4 : Réseau hydrographique et de localisation des puits échantillonnés en novembre 2013 et octobre 2014.

3. Matériel et méthode

Une première campagne d'échantillonnage a été effectuée en novembre 2013 au niveau de cinq puits (P1, P2, P3, P4 et P5) situés dans l'entourage de la décharge représentés dans la Figure 4. Les analyses de ces eaux se sont limitées à la détermination de deux paramètres qui sont la conductivité électrique et la salinité. Une deuxième campagne de prélèvement a été menée en octobre 2014 au niveau de cinq puits (P1, P2, P3, P4 et P6), lors du prélèvement le puits P5 était sec. Ces eaux ont été analysées pour déterminer les différents paramètres physico-chimiques (Cond, pH, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}) et les concentrations des éléments traces (Cu, Zn, Cd, Ni, Co, Fe et Pb). Les analyses ont été effectuées en utilisant un spectrophotomètre modèle AA-6300 et un ASC-6100 auto sampler.

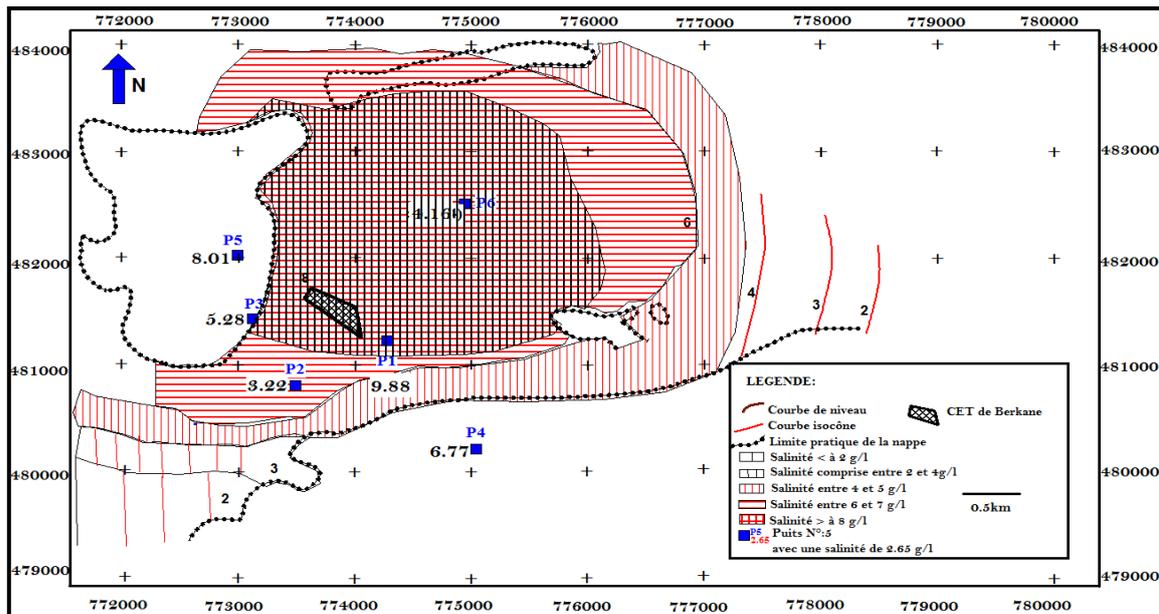


Figure 5 : Carte de salinité des eaux de la nappe d'après les mesures faites en 1966 [12] et les valeurs mesurées en novembre 2013 au niveau de six puits (P1 à P6) avoisinant le C.E.T.

4. Résultats

4.1 Résultats des analyses physico-chimiques

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité et le degré de potabilité. Les résultats d'analyses chimiques des prélèvements effectués en octobre 2014 des eaux des puits représentés évoqués dans la Figure 3 et les résultats tableau 2 sont reportés dans les diagrammes de Schöller-Berkaloff et ceux losangiques et ternaires de Piper dans la figure 5.

Les eaux souterraines présentent des concentrations dominantes en Na^+ (644 à 2484 mg.L^{-1}) et Cl^- (1773 à 5407 mg.L^{-1}), suivis par le SO_4^{2-} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Ca^{2+} (96-1560 mg.L^{-1}), (212-716 mg.L^{-1}), (360 à 549 mg.L^{-1}) et (210-380 mg.L^{-1}) respectivement et enfin le NO_3^- (22.30 – 24.80 mg.L^{-1}).

pH

Les valeurs du pH sont comprises entre 6.32 à 7.5. Les valeurs sont dans les normes de l'OMS [13] et des directives du Conseil des communautés européennes pour l'eau destinée à la consommation humaine qui indiquent comme niveau guide : 6,5 _ pH _ 9,5.

Salinité

Les valeurs de concentration de la salinité sont comprises entre 3.22 à 9.88 g.L^{-1} . Les concentrations sont largement au dessus des seuils des concentrations recommandées par les normes de l'OMS [13] qui indique comme valeur guide de 0,1 à 0,5 g.L^{-1} .

Conductivité

Les valeurs obtenues sont comprises entre 6 et 17 mS.cm⁻¹. Elles sont largement au dessus des seuils. Les directives du Conseil des communautés européennes relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine indiquent pour la conductivité un niveau guide de 2500 µS.cm⁻¹ à 20 °C [13]. Les normes marocaines exigent une valeur maximale admissible de 2700 µS.cm⁻¹ (Norme marocaine relative à la qualité des eaux d'alimentation humaine, 2006).

Tableau 2: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe (octobre 2014).

	Unité	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Salinité	g.L ⁻¹	9.88	3.22	5.28	6.77	8.01	4.16
Conductivité	mS.cm ⁻¹	16.10	6.05	8.60	12.90	-	7.83
PH		7.54	7.20	6.52	6.77	-	6.32
Chlorure (Cl⁻)	mg.L ⁻¹	5406.10	1772.50	2924.60	4449.00	-	1932.00
Sulfate (SO₄²⁻)	mg.L ⁻¹	1560.00	96.00	96.00	384.00	-	720.00
Nitrate (NO₃⁻)	mg.L ⁻¹	24.20	24.80	24.20	24.20	-	22.30
Bicarbonate (HCO₃⁻)	mg.L ⁻¹	549.00	396.50	396.50	427.00	-	701.50
Calcium (Ca²⁺)	mg.L ⁻¹	330.00	210.00	380.00	250.00	-	120.00
Magnésium (Mg²⁺)	mg.L ⁻¹	716.80	212.60	370.60	571.00	-	309.80
Sodium (Na⁺)	mg.L ⁻¹	2484.00	828.00	644.00	1932.00	-	1242.00
Potassium (K⁺)	mg.L ⁻¹	9.70	5.80	8.60	9.70	-	14.00

Tableau 3 : Dominance des éléments chimiques par puits.

Puits	Dominance chimique
	Cl ⁻ > Na ⁺ > SO ₄ ²⁻ > Mg ²⁺ > HCO ₃ ⁻ > Ca ²⁺ > NO ₃ ⁻
P2	Cl ⁻ > Na ⁺ > HCO ₃ ⁻ > Mg ²⁺ > Ca ²⁺ > SO ₄ ²⁻ > NO ₃ ⁻
P3	Cl ⁻ > Na ⁺ > HCO ₃ ⁻ > Ca ²⁺ > Mg ²⁺ > SO ₄ ²⁻ > NO ₃ ⁻
P4	Cl ⁻ > Na ⁺ > Mg ²⁺ > HCO ₃ ⁻ > SO ₄ ²⁻ > Ca ²⁺ > NO ₃ ⁻
P6	Cl ⁻ > Na ⁺ > SO ₄ ²⁻ > HCO ₃ ⁻ > Mg ²⁺ > Ca ²⁺ > NO ₃ ⁻

Diagramme de Piper et de Schöller-Berkaloff :

Le diagramme de Schöller-Berkaloff permet de comparer la composition chimique des solutions provenant de différents puits (Figure 5). À l'exception du SO₄²⁻, qui présente des valeurs relativement plus faibles pour P2 et P3, les courbes ont la même allure et indiquent un pic pour Cl et Na+K. Le report des résultats des analyses des eaux de la nappe superficielle sur le diagramme triangulaire de Piper représentés dans la figure 6 met en évidence l'incidence du faciès lithologique sur la qualité des eaux et permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification. La plupart des puits sont représentés au pôle (Cl+NO₃) du triangle avec une dominance des chlorures. D'après ce diagramme les eaux analysées appartiennent à deux familles:

- Chlorurée sodique et potassique (P1, P2, P4 et P6)
- Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne (P3)

Sulfate

- Les valeurs obtenues dans le tableau 7 sont comprises entre 96 à 1560 mg.L⁻¹. A l'exception de P2 et P3 les concentrations en sulfate sont au dessus du seuil (250 mg.L⁻¹) recommandé par l'OMS et les

directives du CCE [13]. L'organisme est susceptible cependant de supporter des doses plus élevées, sans inconvénient majeur autre qu'une action laxative temporaire.

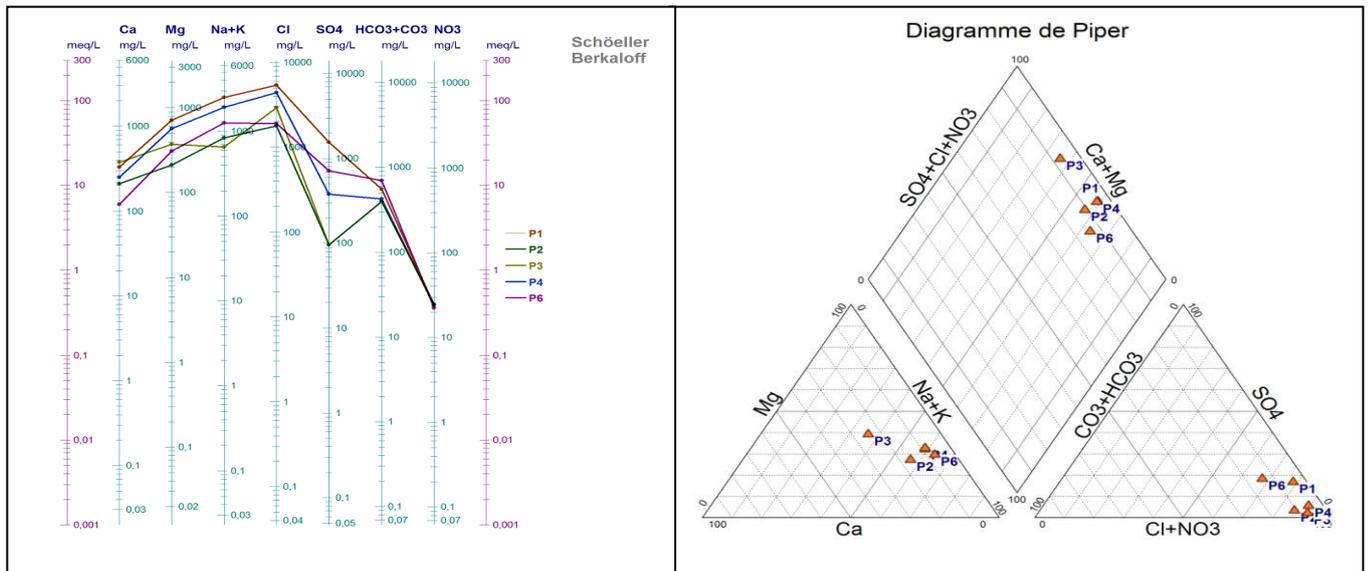


Figure 6: Diagramme de Piper et de Schöller-Berkaloff illustrant la composition chimique des eaux des puits.

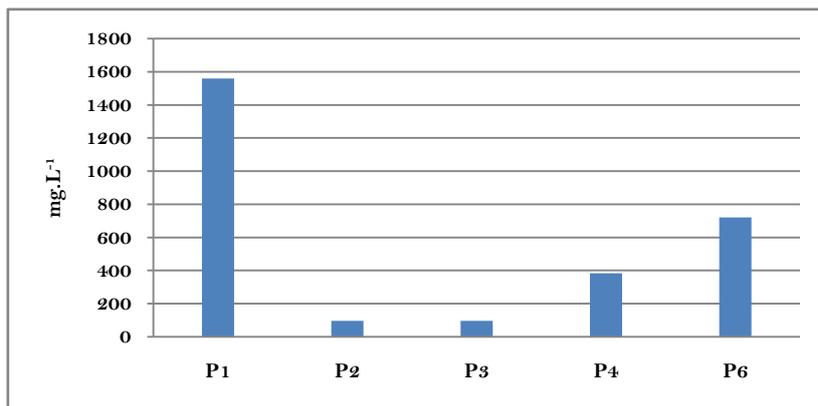


Figure 7: Répartition des teneurs en sulfate des eaux des puits

Nitrate

Les valeurs obtenues sont comprises entre 22.30 à 24.80 mg.L⁻¹. Elles sont au dessous des seuils recommandés. L'OMS recommande pour les eaux destinées à la consommation humaine une valeur limite de 50 mg.L⁻¹ [13]. Les directives du Conseil des communautés européennes indiquent comme niveau guide 25 mg.L⁻¹ et comme concentration maximale admissible 50 mg.L⁻¹.

4.2 Eléments traces

Pour étudier une éventuelle contamination des eaux des puits avoisinants le CET par les métaux lourds, les concentrations de ces éléments ont été déterminées. L'histogramme de la figure 7 montre la répartition des teneurs des différents éléments au niveau des cinq puits. Il indique, en particulier, deux pics pour le Zn et le Pb. Ces concentrations ont été comparées aux normes de potabilité de l'OMS et le CCE [13].

Plomb

Le plomb (Pb) admet des valeurs comprises entre 0 et 0.1148 mg.L⁻¹ d'après la figure 9. L'OMS, dans ses dernières recommandations, indique comme valeur guide 0,01 mg.L⁻¹. Les anciennes directives du Conseil des communautés européennes fixaient, pour les eaux destinées à la consommation humaine, une concentration

maximale admissible de $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ [13]. Mise à part le puits P1, les concentrations sont au dessus des concentrations recommandées.

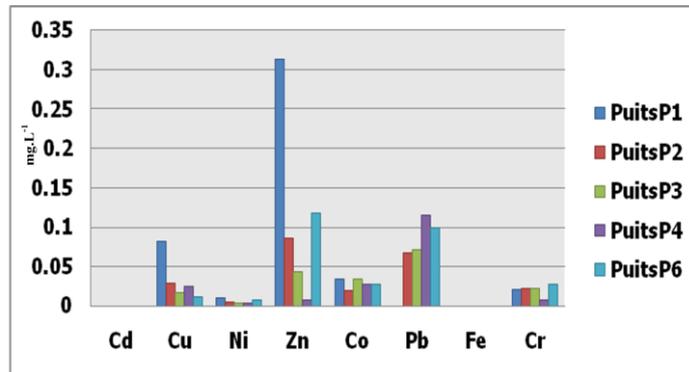


Figure 8: Répartition des teneurs en éléments traces des cinq puits.

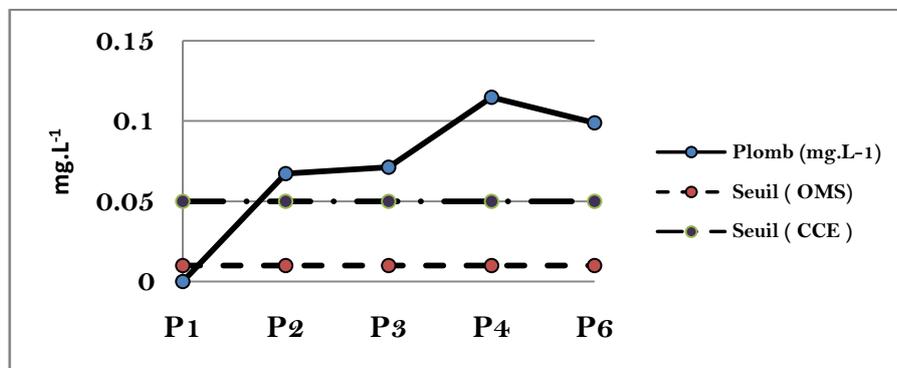


Figure 9: Répartition des teneurs en plomb des eaux des puits
 (OMS : Organisation Mondiale de la Santé, CCE : Conseil Communauté Européennes)

Zinc

Les valeurs du Zinc (Zn) sont comprises entre $0,083$ et $0,3129 \text{ mg.L}^{-1}$ représentées dans la Figure 10. L'OMS recommande comme valeur limite pour le zinc 3 mg.L^{-1} . À titre indicatif, les anciennes directives du Conseil des communautés européennes indiquaient un niveau guide de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ à la sortie des installations de pompage, et un niveau guide de 5 mg.L^{-1} après 12 heures de stagnation dans la canalisation et au point de mise à la disposition du consommateur [13].

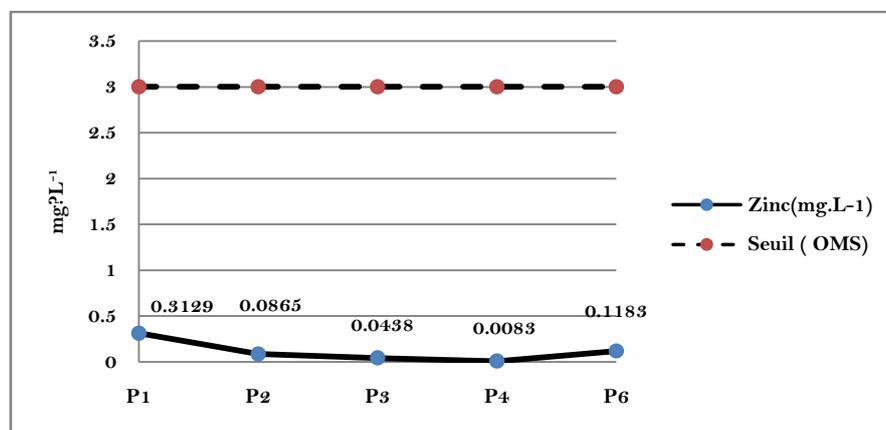


Figure 10: La répartition des teneurs en Zinc au niveau des cinq puits

Cobalt

Les directives du Conseil des communautés européennes et l’OMS ne donnent pas de valeurs pour le cobalt. Une teneur de 1 mg.L^{-1} dans l’eau de boisson pourrait être considérée comme concentration limite [13]. Les concentrations mentionnées dans la figure 11 du Cobalt sont comprises entre 0.0206 et 0.035 mg.L^{-1} et restent au dessous des concentrations considérées comme limites.

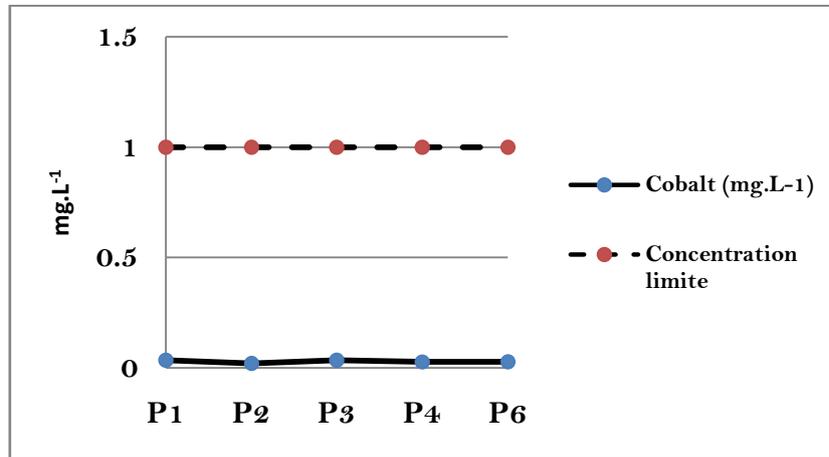


Figure 11: La répartition des teneurs en Cobalt au niveau des cinq puits

Cuivre

Les concentrations du cuivre représentées dans la figure 12 sont comprises entre 0.017 à 0.0818 mg.L^{-1} . Pour l’eau destinée à la consommation humaine, l’OMS recommande une valeur guide provisoire de 2 mg.L^{-1} compte tenu des incertitudes de la toxicité du cuivre pour l’homme. Toutefois, elle précise que des risques de taches sur les appareils sanitaires peuvent apparaître pour des teneurs supérieures à 1 mg.L^{-1} [13]. Les directives du Conseil des communautés européennes indiquent comme valeur impérative 2 mg.L^{-1} . Les concentrations restent largement au dessous des concentrations recommandées par ces normes.

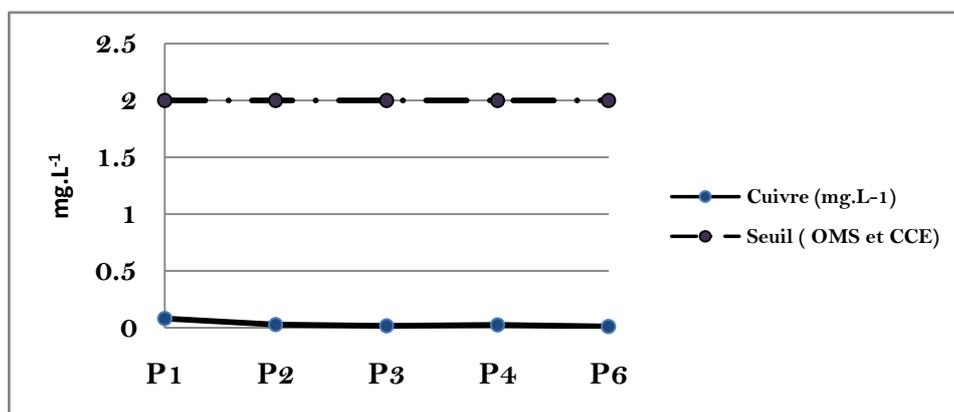


Figure 12: La répartition des teneurs en cuivre au niveau des cinq puits.

Chrome

Les concentrations du Chrome présentées dans la figure 13 sont comprises entre 0.0216 à 0.028 mg.L^{-1} . L’OMS ainsi que les directives du Conseil des communautés européennes relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine ont adopté comme valeur limite du chrome le chiffre de $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$. En raison du caractère cancérigène par inhalation, le Centre international de recherche sur le cancer a classé le chrome VI dans le groupe 1 (cancérigène pour l’homme). En fait, la limite indiquée pour le chrome est très inférieure à la dose toxique, mais il est estimé que cet élément devrait être absent de l’eau [13]. Les concentrations restent largement au dessous des concentrations recommandées par les normes.

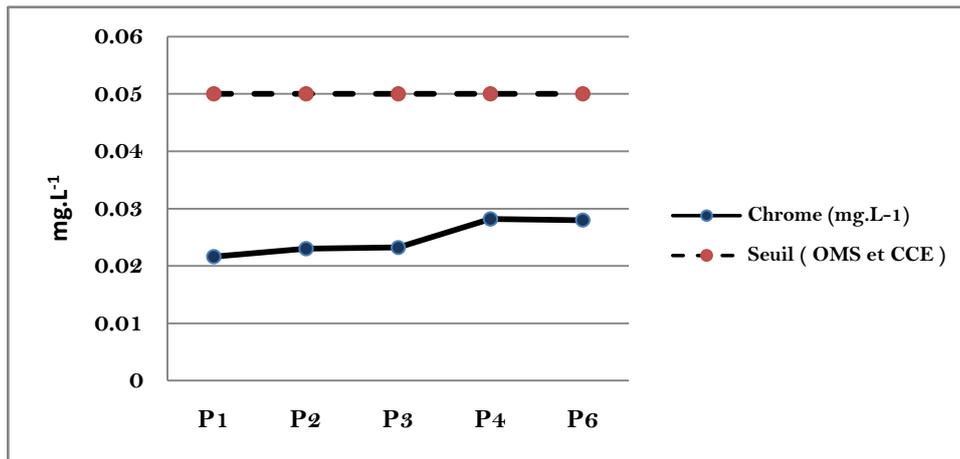


Figure 13: La répartition des teneurs en chrome au niveau des cinq puits

5. Discussion

Les analyses physico-chimiques des eaux des puits indiquent une forte minéralisation et des teneurs élevées en Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- . Quant aux nitrates, ses teneurs ne dépassent pas les normes. Les analyses des éléments traces indiquent une présence du Pb et du Zn et une quasi-absence du Fe et du Cd. L'origine de ces anomalies chimiques peut être soit géologique soit liée un dysfonctionnement du CET ou à une contribution des deux. Les données hydrogéologiques et géochimiques de la zone du CET plaident plutôt en faveur d'une origine géologique. En effet, avant l'installation du CET les eaux souterraines présentaient déjà des valeurs élevées de la salinité (les analyses de 1966, [12]) qui peuvent être liées à la dissolution et à la diffusion des minéraux de roches évaporitiques [14]. En effet, le contexte marin de la sédimentation terrigène des termes supérieurs de la Formation des Grés des Béni Ourimech a contribué à une richesse en sel (richesse en Na, Cl, K, SO_4) et plus généralement la « Crise du Messinien » a pour sa part, contribué au dépôt de plusieurs gisements de sels et d'évaporites dans le flanc nord des Béni Snassen et de lentilles de sel dans les marnes du col du Guerbouz et dans les Oulad Mansour, forages hydrogéologiques traversant le Messinien dans les Triffa et Chouihya [15]. Pour Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- , ils seraient liés à la dissolution des carbonates magnésiens (dolomie). Les anomalies en plomb et en zinc peuvent se justifier par la présence de la mine de Zinc de Sidi Amer Acherki, située à 4 km en amont et au Sud du C.E.T et aussi par la carte géochimique de Berkane [16] établie par la Direction de Géologie représentée dans la figure 14.

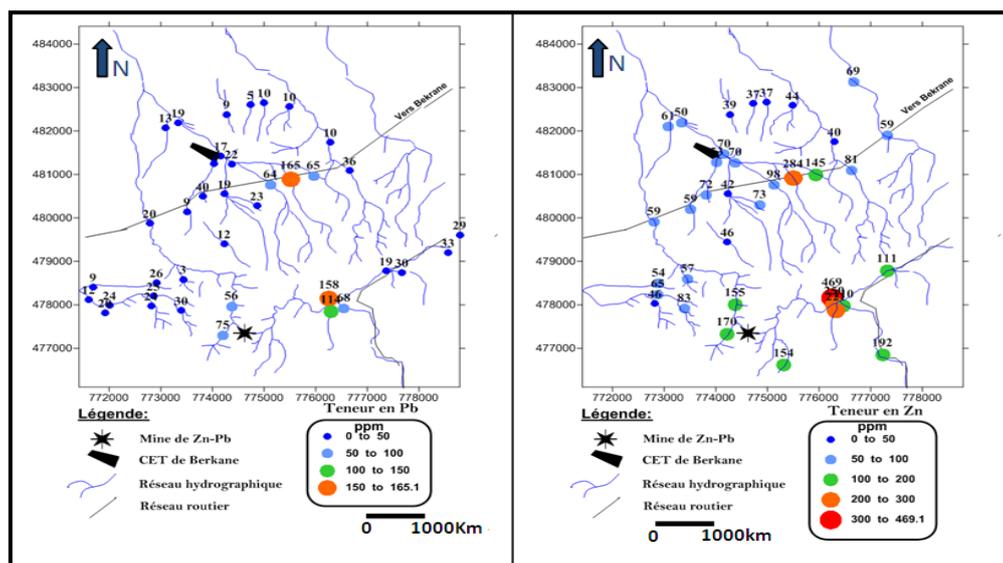


Figure 14: Distribution des teneurs en Pb et Zn des sédiments des ruisseaux et des sols dans la zone du CET de Berkane (extrait de [16]).

La mine ayant démarré durant les années trente et a été fermée vers les années cinquante du siècle dernier. La zone des puits se trouve encadrée par des oueds qui descendent directement des anciens travaux de la mine, de ce fait elle se trouve dans la zone d'influence de pollution de la mine. La prospection géochimique des sédiments qui se trouvent dans les rives des talwegs et petits ruisseaux (Stream sédiment) et des sols représenté dans la figure 14 montre qu'au niveau de la zone d'étude les valeurs atteignent 165 mg.L^{-1} pour le plomb et 470 mg.L^{-1} pour le zinc. La présence en amont d'indices minéralisés en plomb (Pb) et en zinc (Zn) dont les plus connus sont ceux de l'ex-mine de Sidi Amar Acherki (filons encaissés dans les formations liasiques) serait à l'origine de la pollution des eaux et des sols en aval. Ce processus s'est produit grâce au lessivage des zones minéralisées et la migration de ces éléments vers l'aval pour se disséminer dans les sédiments fins des talwegs et des oueds et pourront s'infiltrer dans les niveaux aquifères. Dans le voisinage immédiat du CET les teneurs sont comprises entre 17 et 40 mg.L^{-1} pour le plomb et entre 40 et 72 mg.L^{-1} pour le zinc.

Conclusion

La caractérisation physico-chimique des eaux souterraines des alentours du CET de Berkane via les puits disponibles, indique que ces eaux appartiennent à deux faciès : un faciès chloruré sodique, potassique et chloruré et un faciès sulfaté calcique et magnésien. La forte minéralisation des eaux analysées a été attribuée au contexte géologique caractérisée par la présence des évaporites du Néogène. Quant aux éléments traces, les analyses indiquent une présence du Pb, Zn et Cu. Seul le plomb dépasse les normes. Vu la disposition des puits (généralement en amont du CET) et les données géochimiques de la zone d'étude, ces métaux proviendraient d'une mine située dans les Béni-Snassen, en sud CET.

Cette étude préliminaire qui attribue la dégradation de la qualité des eaux souterraines au niveau du site du CET principalement au contexte géologique n'exclue pas une contribution liée à une fuite de lixiviats. Pour palier à cette indétermination, il importe de compléter cette étude par l'installation de piézomètres en amont et en aval hydraulique du CET et d'un suivi de la qualité des eaux basé sur l'analyse d'indicateurs pertinents de pollution.

References

1. Quintin F., *Mém. Grad. Bio-ing. Sci. Tech. Environ.-Univ. Cathol. Louv.-la-Neuv.* (2007).
2. Nhari F., Sbaa M., Vassel J. L., Fekhaoui, M., El Morhit, M., *J. Internat. of Aqua. Sci.* 5 (2014) 198.
3. Chofqi A., Abedelkader Y., El Kbir L., Jacky M., Jacques M., Alain V., *J. Afric. Earth Sci.* 39 (2004) 509.
4. Bahaa-eldin E. A., Yusoff I., Samsudin A. R., Yaacob, W. Z., Rafek A. G. M. *J. Hydrogeol.* 8 (2010) 997.
5. Singh U.K., Kumar M., Chauhan R., Jha P. K. Ramanathan A. Subramanian V., *J. Environ. Monit. Assess.* 141 (2008) 309.
6. Boudchiche L., *Thès. 3^{ème} cyc. Univ. Claud. Bern. Lyon I.* (1994) 190.
7. Naciri T. *Doc. t ès-Sci. Univ. Med. I, Fac. Sci. Oujda.* (1994) 243.
8. Ouahhabi B. *Doc. ès-Sci. Univ. Med I. Fac. Sci. Oujda.* (1994).
9. Domingo, A.G., Arias A.M. *Edit. su Serv. Géol. Maroc.* N.M. 425 (2001).
10. El Gout R., Khattach D., Houari M.R., *Bull. Inst. Sci. Rabat. Sect. Sci. Ter.* 31 (2009) 61.
11. El Gout R., Khattach D., Houari M.R., Kaufman O., *J. Hydrocar. Min. Environ. Resear.* 2 (2011) 119.
12. Carlier J., *Minis. Trav. Publ. Commun.* (1971).
13. Rodier J., Legube B., Merlet N., *Chap. D part. 6* (2009) 1063.
14. Nouayti N., Khattach D., Hilali M., *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (2015) 1068.
15. Chaïeb M., *Edit. su Serv. Géol. Maroc.* N.M. 453 (2004).
16. Locutura J., Bel-lan. *Edit. su Serv. Géol. Maroc.* (2004).

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com/>