

CHAPITRE IV :
HYDROGEOCHIMIE

IV. 1. Introduction

Toute étude hydrogéologique doit être complétée par une étude hydrogéochimique qui permet de fournir de précieux renseignements concernant les modifications des caractéristiques physico-chimiques de la nappe. La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.).

Dans notre zone d'étude, la dissolution des formations géologiques, l'évaporation des eaux du lac Fetzara, les effluents industriels, et l'activité agricole ont un impact direct sur la chimie des eaux (eaux superficielles et souterraines) (Djorfi S. et al., 2010). En raison de l'utilisation multiple de ces eaux, cette étude a été menée afin de caractériser et d'évaluer l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans le temps, dans l'espace en fonction de l'influences des facteurs naturels et des actions anthropiques.

IV. 2. Echantillonnage des eaux de la plaine de l'Oued Zied

L'étude des composantes physico-chimiques des eaux de la nappe libre de la plaine de l'Oued Zied a fait l'objet de plusieurs campagnes d'échantillonnage et ce depuis Octobre 2005. Le prélèvement a été effectué au niveau de 19 échantillons d'eau des puits et des forages (Fig.41), le choix des points d'eau a été fait de telle sorte qu'on puisse avoir une répartition régulière et homogène sur toute la superficie de la nappe. Le Tableau N°1 présente les statistiques descriptives des paramètres analysés.

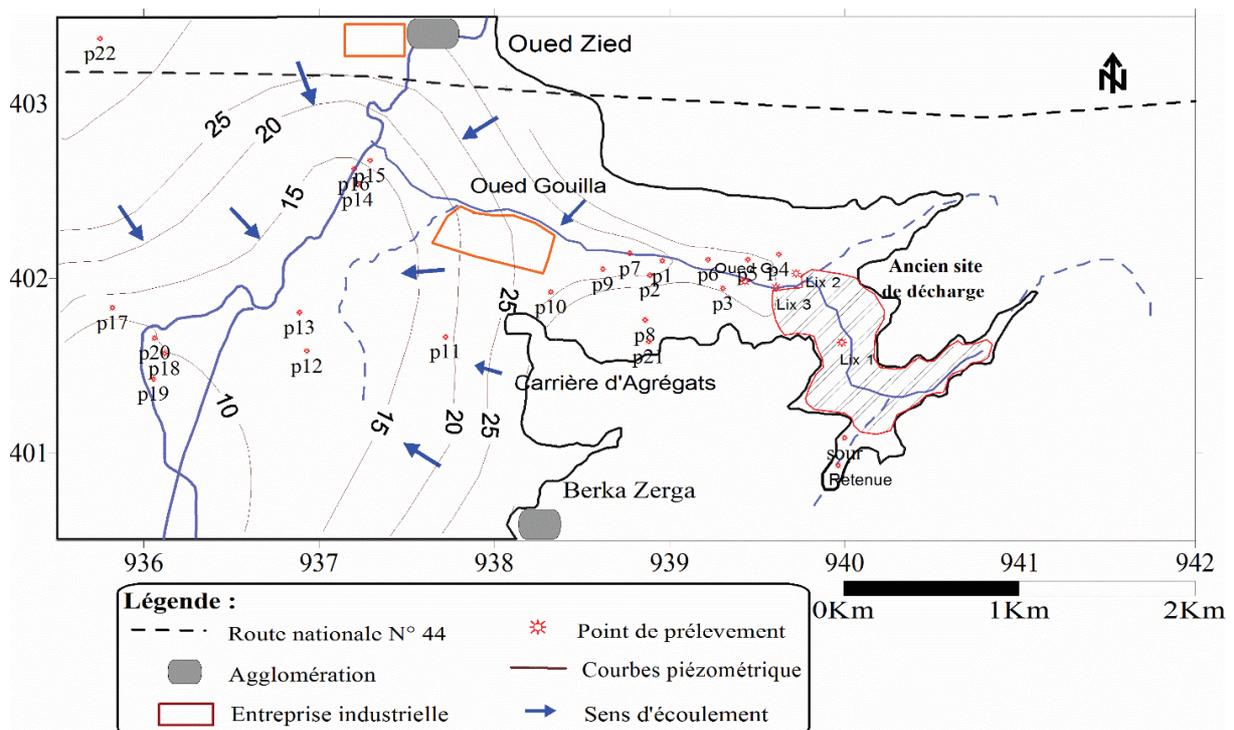


Figure 41 : Carte piézométrique et inventaire des points d'échantillonnage (Juin 2012).

IV. 3. Matériels et méthodes d'analyse

Les paramètres physico-chimiques ; la température, le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la conductivité électrique sont mesurés in situ, à l'aide d'un appareil multi paramètres de marque WTW 197i. Pour la piézométrie, on a utilisé une sonde électrique pour la mesure de la côte piézométrique.

Les éléments majeurs sont dosés au laboratoire central du complexe MittalSteel (Sider) et à la raffinerie de Skikda.

Titre alcalimétrique complet T.A.C (mg/l HCO₃⁻)

La mesure a été effectuée par volumétrie : ajout de 2 gouttes de méthyle orange à 50 ml de l'échantillon titré avec l'acide sulfurique jusqu'à obtention d'une coloration rose.

La dureté totale : TH (Ca²⁺ + Mg²⁺) mg/l

La dureté totale est la teneur globale en sels de Ca et Mg. La mesure a été effectuée par complexométrie en ajoutant à 50 ml de l'échantillon du noir d'iriochrome T (indicateur coloré) et titrés la solution avec le sel disodique de l'acide EthylèneDiamino Tétra Acétique (EDTA) en milieu tamponné à pH = 10.

Le calcium Ca²⁺ (mg/l)

La mesure a été effectuée par volumétrie en utilisant la méthode de complexométrie à l'EDTA.

Le magnésium Mg²⁺ (mg/l)

La teneur en Mg est obtenue à partir de la dureté totale et du calcium, comme suit :

$$\text{Mg}^{+2} = \text{TH} - \text{Ca}^{2+}$$

Les chlorures Cl⁻(mg/l)

Les chlorures sont dosés par volumétrie en milieu neutre par une solution de nitrate d'argent jusqu'à obtention d'une coloration rouge brique.

Le Sodium Na⁺ (mg/l)

Dosage du sodium par spectrométrie d'absorption atomique (flamme).

Les Sulfates SO₄²⁻ (mg/l)

Les sulfates ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique.

Les matières en suspension MES (mg/l)

Les matières en suspension sont déterminées par pesée différentielle après filtration de l'eau. Les prélèvements d'eau ont été effectués dans les puits captant la nappe, dans l'Oued Gouilla et l'Oued Zied.

IV. 4. Interprétation des résultats

Avant de tenter l'interprétation des analyses chimiques, il est indispensable de vérifier la crédibilité à fin de s'assurer que les analyses ont été effectuées correctement (erreur de dosage, de transcription des chiffres, analyse trop partielles), pour vérifier l'analyse on doit faire une balance ionique (Bi), pour ce ci, partant des teneurs exprimées en mg/l, on les convertit en méq/l ce qui l'on appelle les quantités en réaction

D'une autre façon, on a:

$$Bi. = \frac{(\sum r + - \sum r -)100}{(\sum r + + \sum r -)}$$

Cette différence permet de juger si l'analyse est bonne à l'interprétation ou à rejeter d'après G. Castany (1968) la balance ionique $Bi \leq 6\%$. Les résultats des analyses chimiques des échantillons des eaux de la plaine de l'Oued Zied ne présentent aucune anomalie où toutes les valeurs de Bi sont inférieures à 6% (Tab.28).

Tableau 27 : Statistiques descriptives des analyses des eaux de la nappe libre de l'Oued Zied (Juin 2012).

Paramètres	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type	Nor. Alg.	Nor. OMS
PH	7.15	6.8	7.5	0.16	6.5-8.5	6.5-8.5
CE (µs/cm)	1720	500	3800	1040	2800	1000
T°C	21.01	18.90	23.20	1.54	15-25	15-25
Ca ²⁺ (mg/l)	151.82	59.4	393.7	95.07	200	200
Mg ²⁺ (mg/l)	55.92	16.8	118.1	34.25	150	150
Na ⁺ (mg/l)	122.46	18.8	522.7	116.68	200	200
K ⁺ (mg/l)	14.24	2	51.5	15.94	20	12
Cl ⁻ (mg/l)	195.48	19.8	645.9	165.39	500	250
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	268.92	18.3	1487	351.5	400	250
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	380.46	135.9	1404.1	343.89	-	300
NO ₃ ⁻ (mg/l)	27.37	0	77.7	26.04	50	50

Tableau 28 : Balances ioniques des analyses des eaux de la nappe de l'Oued Zied, (Juin 2012).

Point	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
BI	2.4%	2.0%	3.1%	2.3%	2.4%	2.0%	2.5%	2.2%	2.6%	2.0%
Point	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	
BI	1.3%	2.2%	2.0%	2.1%	-2.0%	2.0%	1.2%	2.9%	2.5%	

Les résultats des analyses physico-chimiques sont interprétés selon les normes algériennes et celles de l'organisation mondiale de la santé (OMS). Ils sont exprimés sous formes de diagrammes et de cartes de distribution spatio-temporelles pour les différents paramètres mesurés ou analysés (Tab.27).

IV. 4. 1. Les caractéristiques physiques

IV. 4. 1. 1. Température

Les températures des eaux souterraines de la région de l'Oued Zied varient entre 15,1°C et 23,2°C, le maximum est observé au point P9 (Fig.42) durant le mois d'Octobre, le minimum au point P16 durant le mois de Février. L'observation de la température de l'eau des puits montre une évolution saisonnière : elle augmente durant les mois les plus chauds (Octobre 2005, Juin 2012) et elle diminue durant les mois les plus frais (Février 2006).

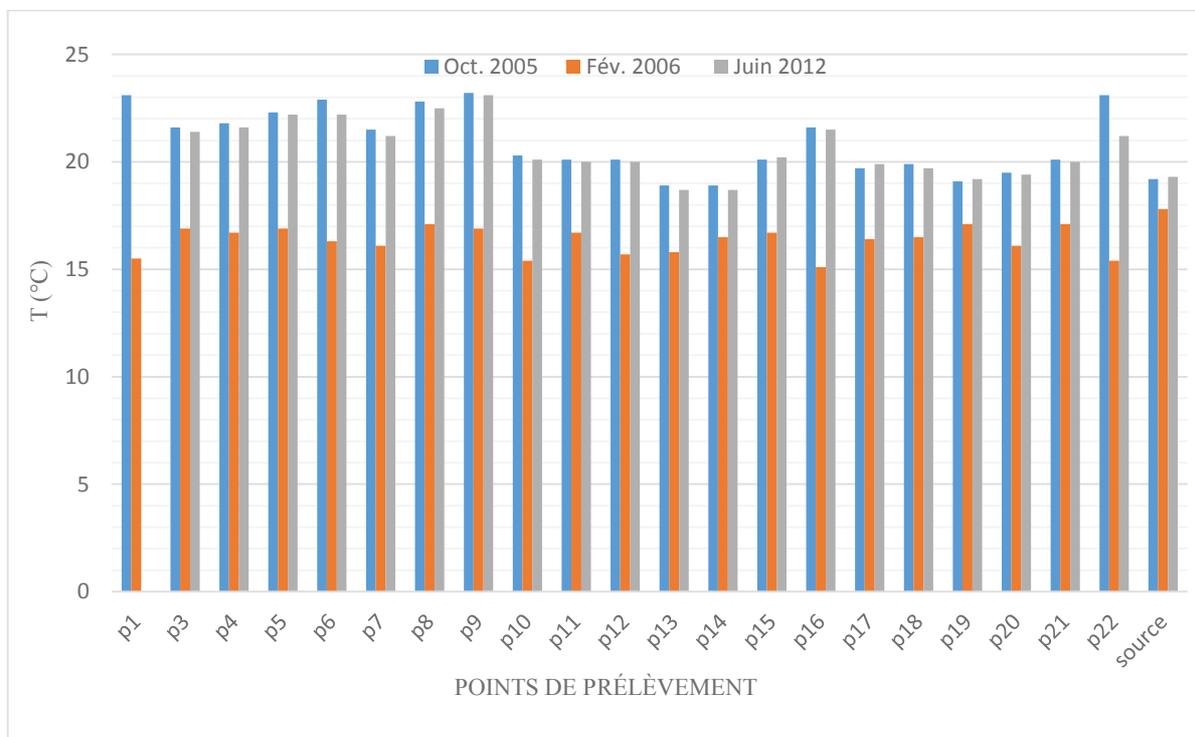


Figure 42 : Variations des températures des eaux de la nappe de l'Oued Zied.

IV. 4. 1. 2. Conductivité électrique

La mesure de la conductivité est un procédé simple à mettre en œuvre, elle permet d'apprécier la qualité de sels dissous dans l'eau. Une conductivité élevée traduit soit des pH anormaux, soit une salinité élevée. A 20° C, les eaux ne doivent pas être corrosives.

Le tableau N°29 montre que la majorité des eaux de la nappe superficielle (libre) de la plaine de l'Oued Zied ont un degré de minéralisation relativement fort ; mais ces valeurs restent toujours dans les limites des normes de potabilité de l'OMS.

Pour les échantillons des eaux des puits localisés aux bordures du lac Fetzara ils présentent des conductivités qui dépassent les normes de potabilité, ces eaux sont très minéralisées, ce qui indique qu'il y a un fort lessivage des minéraux, soit au niveau des couches superficielles (argiles, sables et graviers) captées par des puits peu profonds, soit au niveau des couches relativement profondes (cipolins) captées par les puits profonds. La conductivité des points d'eau qui se trouvent à la limite de la décharge est très élevée, c'est le lessivage des déchets de toutes natures déposés au niveau de la décharge. La valeur maximale de la conductivité est enregistrée au point P19 au centre de la plaine (en contact avec le lac) 4250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pendant le mois d'Octobre, le minimum est enregistré au mois de Juin (692 $\mu\text{S}/\text{cm}$) au point dénommé « source », à l'amont de la décharge (Fig.43).

Tableau 29 : Classification des eaux de la nappe en fonction de la Conductivité (OMS).

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 25 °C	< 450	450 - 750	750 - 1500	1500 – 2300	2300 - 3000	> 3000
Degré de la minéralisation	Très faible	Faible	Moyen	Moyennement élevé	Elevé	Très élevé
Nombre de points	/	1	10	2	3	3
Pourcentage %	/	5.26	52.63	10.52	15.78	15.78

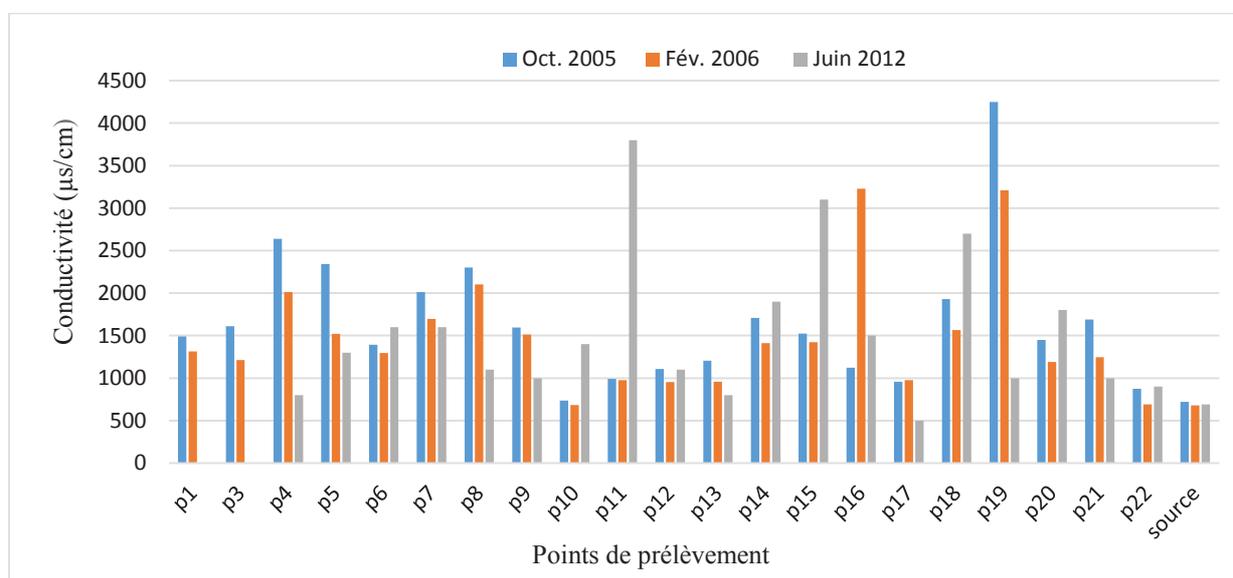


Figure 43 : Variations spatiales de la conductivité électrique des eaux de la nappe de l'Oued Zied.

IV. 4. 1. 3. Cartes de répartition des conductivités électriques

Pendant toutes les campagnes de prélèvement, on constate que les points se trouvant dans la zone limitrophe et au sein de la décharge (P7, P2, P1, P6, P3, et P5) montrent une

conductivité électrique élevée par rapport à l'ensemble des eaux de la nappe. Cependant des fluctuations saisonnières sont observées au sein d'un même secteur. C'est le cas des valeurs du mois de Février 2006 où elles diminuent (effet de la dilution) et du mois de Juin où elles augmentent (Evaporation). Au centre de la plaine, on remarque que la valeur de la conductivité obtenue dans le point P16 pendant la deuxième campagne (Février 2006) augmente, probablement, à cause soit de l'effet de l'Oued Zied soit de l'existence de lentilles gypsifères (Fig.44, 45, 46). Pour le point d'eau P20, on constate une double influence : celle du lac Fetzara pendant la période de basses eaux (évaporation) et celle de l'oued Zied pendant la période de hautes eaux. L'existence de lentilles gypsifères à l'emplacement de ce point, peut aussi expliquer ces fortes conductivités.

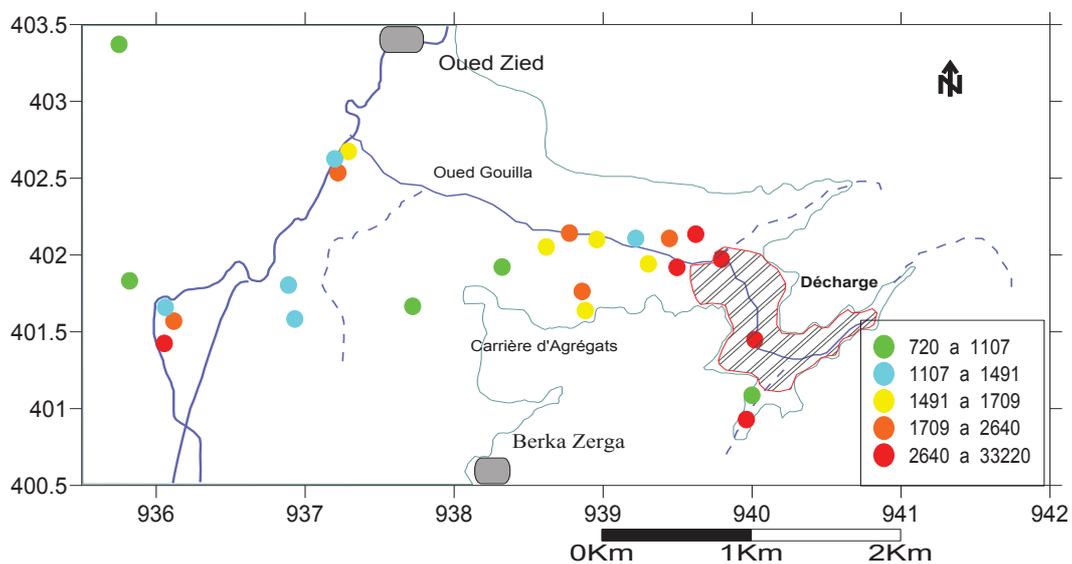


Figure 44 : Carte des conductivités ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Campagne d'Octobre 2005.

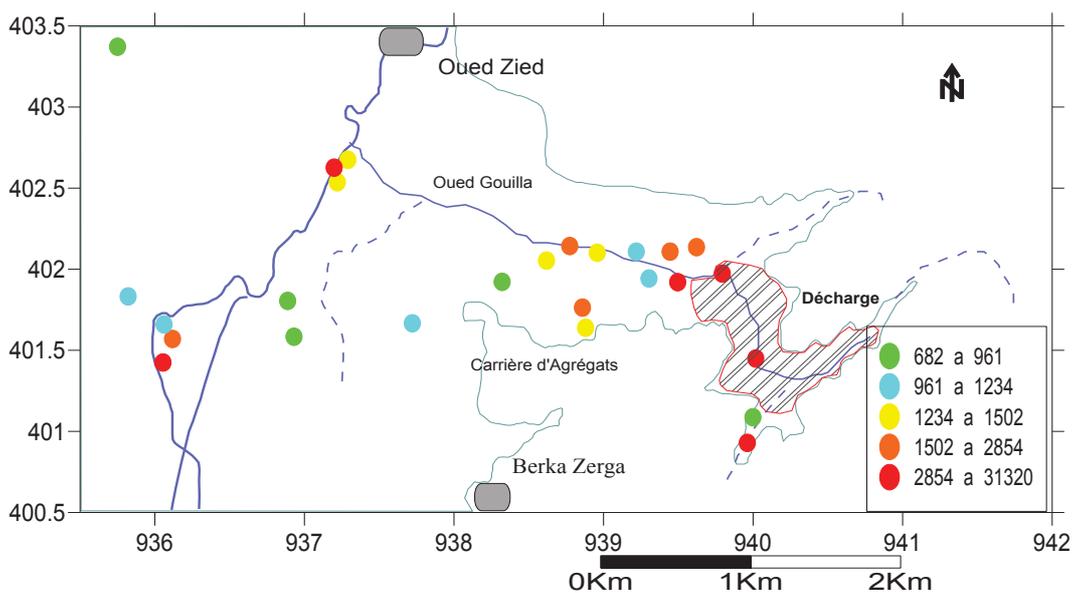


Figure 45 : Carte des conductivités ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Campagne de Février 2006.

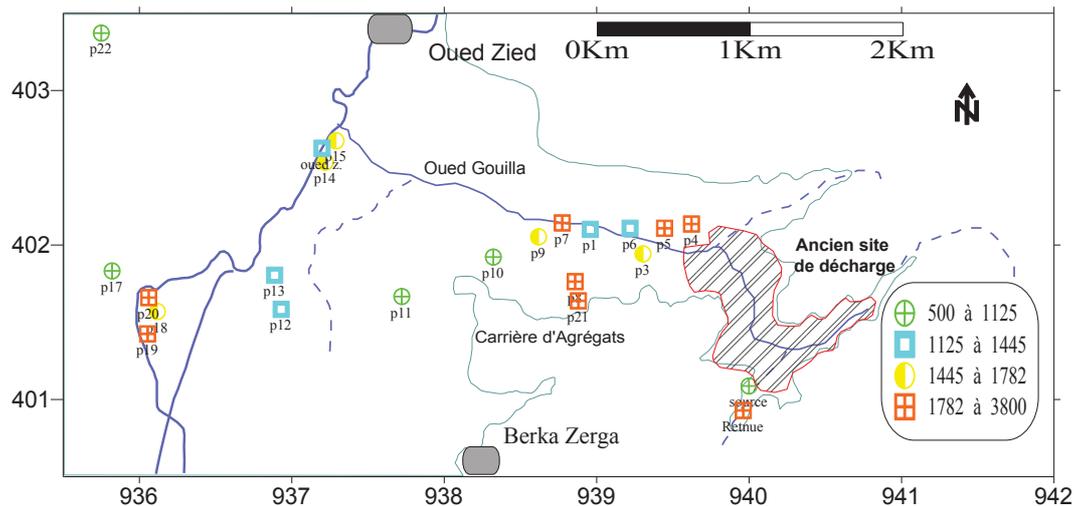


Figure 46 : Carte des conductivités ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Campagne de Juin 2012.

IV. 4. 2. Paramètres chimiques de l'eau

IV. 4. 2. 1. Le pH

Le potentiel hydrogène (pH) est un paramètre physico-chimique de l'eau qui se mesure avec des bandelettes test ou un appareil (pH-mètre) ; il donne le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau sur une échelle de 0 à 14. Le pH est le reflet de la concentration d'une eau en ions H^+ : $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$.

Dans chaque milieu naturel les eaux ont une valeur de pH propre en fonction du sous-sol de leur bassin versant ; Le pH doit être compris entre 6 et 8 pour les eaux naturelles. Un pH inférieur à 5 représente une acidité forte, donc présence d'acides minéraux ou organique. Dans les régions calcaires où les eaux sont basiques car fortement minéralisées le pH est supérieur à 7. Une mesure de pH, différente de la valeur habituelle du cours d'eau, peut-être l'indice d'une arrivée de pollution, en générale industrielle, en amont du point de mesure.

Les valeurs du pH des eaux étudiées varient entre 6,21 et 8,33 ; elles se trouvent dans la fourchette des normes fixées par l'OMS. Le pH relativement acide est mesuré au point P1 pendant le mois d'Octobre 2005 (contact de l'eau avec l'air) alors que le pH le plus basique est mesuré au point P16 pendant le même mois (influence de rejets industriels), (Fig.47)

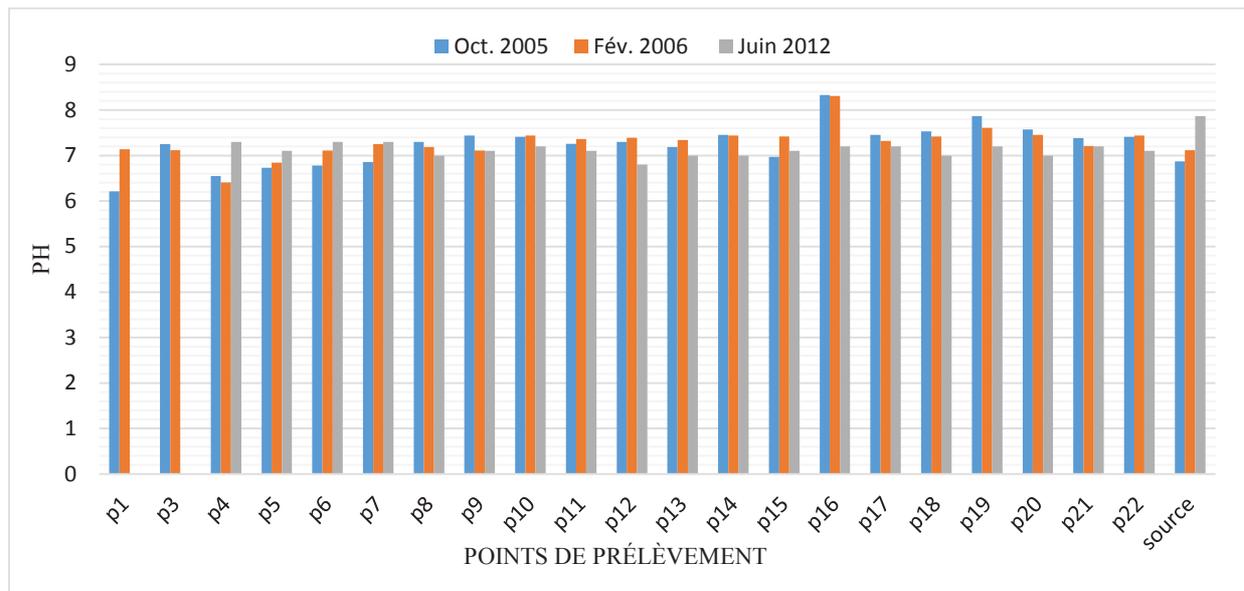


Figure 47 : Variations du pH des eaux de la nappe.

IV. 4. 2. 2. Cartes de répartition du pH

Au centre de la plaine et dans la décharge, le pH est neutre à basique et ne varie pas dans le temps. Cependant, on remarque une diminution du pH des eaux dans la zone avale de la décharge, c'est l'effet de lessivage, des lixiviats et des rejets de l'entreprise de travaux publiques située le long de l'oued Gouilla (Fig.48, 49, 50).

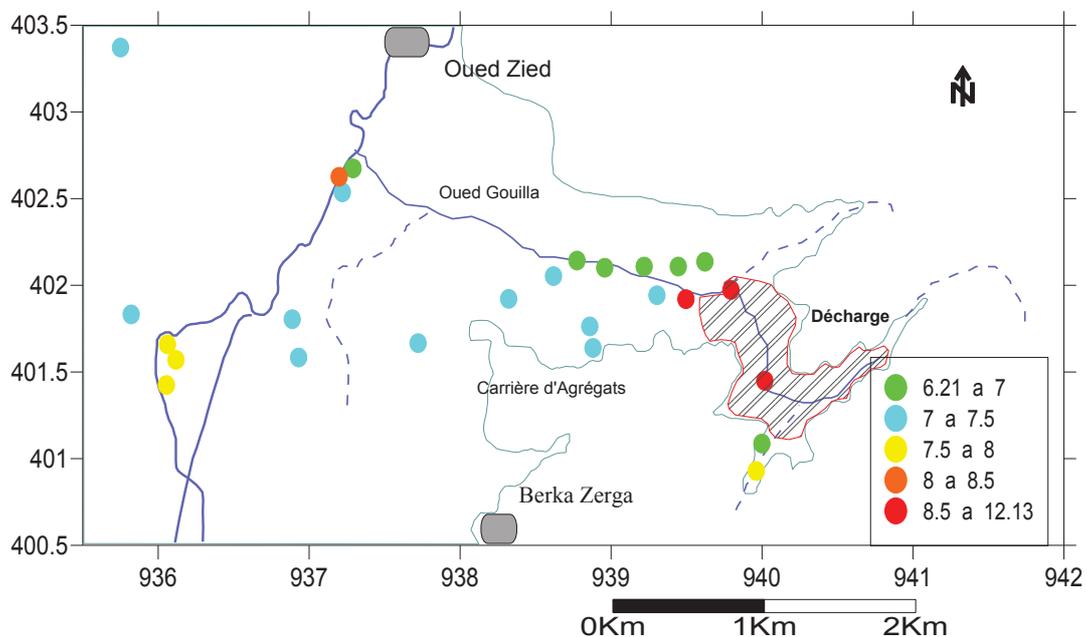


Figure 48 : Carte du pH, Campagne d'Octobre 2005.

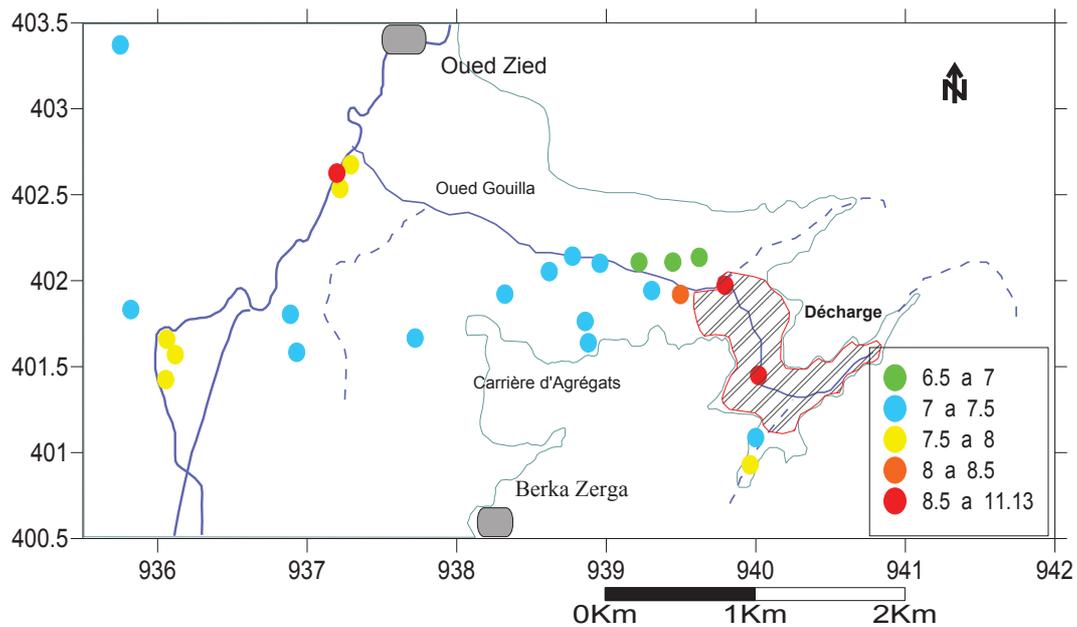


Figure 49 : Carte du pH, Campagne de Février 2006.

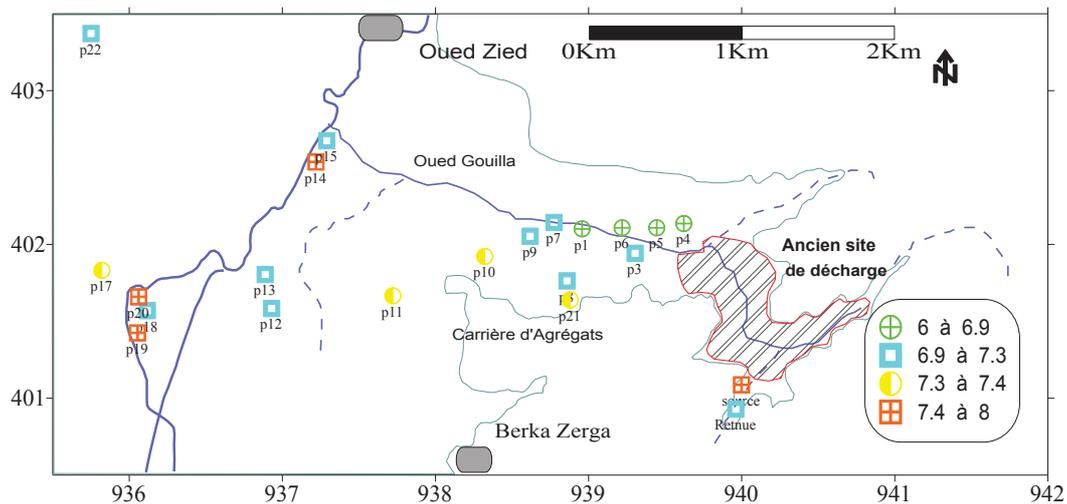


Figure 50 : Carte du pH, Campagne de Juin 2006.

IV. 4. 3. Classification des eaux de la plaine de L'oued Zied

IV. 4. 3. Eléments chimiques majeurs dans les eaux de la plaine de L'Oued Zied

IV. 4. 3. 1. Chlorures (Cl)

Le chlore est le plus abondant dans la nature. La quantité de Cl dans l'eau de mer est 18,98 g/l ; L'eau de pluie \approx 4mg /l. La teneur de chlore dans les eaux continentales peut être maximum sur les zones côtières et moindre en s'éloignons de la mer ; Ceci est dû à l'eau de pluie qui s'appauvrit en chlore en fonction de la distance de la mer. Les roches sédimentaires représentent la source la plus importante des chlorures il provient des évaporites (KCl) (Sylvite) ; NaCl (Halite) il peut aussi provenir du bassin endoréique (fermées) comme le cas du sous bassin versant du lac Fetzara.

Les analyses montrent que la majorité des points d'eaux présentent des teneurs inférieures à la norme limite de la potabilité, la norme d'OMS recommande que la teneur en chlorure des eaux ne dépasse pas 250 mg/l (Rodier, 2009).

Les valeurs du chlorure des eaux du système aquifère de la plaine de l'Oued Zied oscillent entre 18.8 mg/l (Puits N°17) et 645.9 (Puits N°7), (Fig.51). La répartition spatiale de chlorure est identique à celle du Sodium, ce qui confirme que l'apport de ces deux éléments provient de la même source salifère.

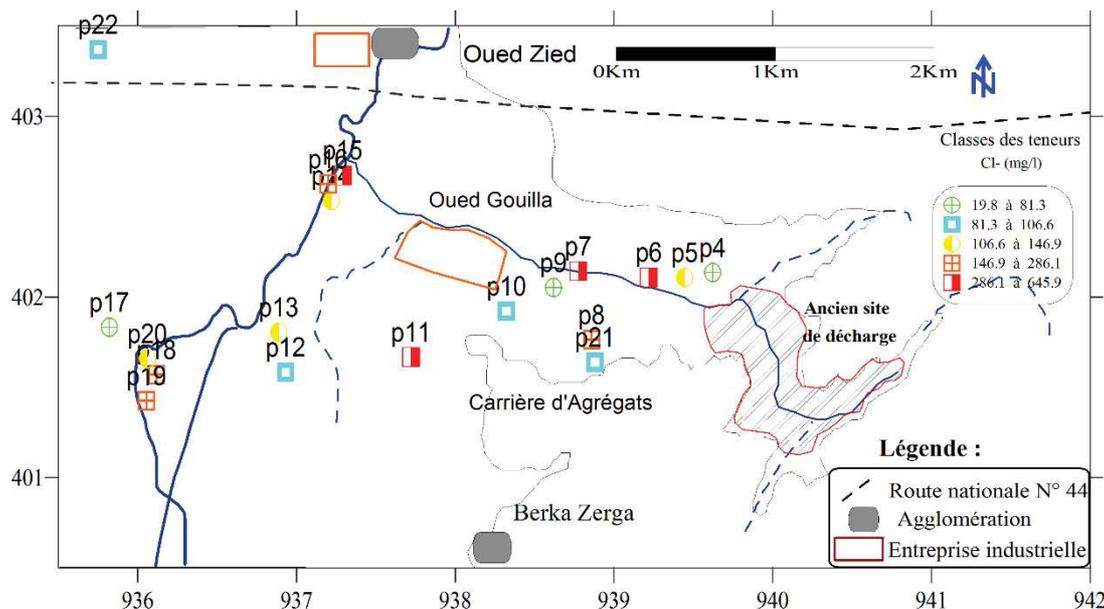


Figure 51 : Carte de répartition des teneurs en Cl⁻ (mg/l), Campagne de Juin 2012.

IV. 4. 3. 2. Les sulfates (SO₄²⁻)

Les sulfates proviennent des roches sédimentaires et métamorphiques : Les marnes, les argiles, schistes pyriteux, évaporites, (CaSO₄·2H₂O gypse, CaSO₄ anhydrite), célestine SrSO₄, barytine BaSO₄, algésite PbSO₄, glauberite Na₂SO₄. Les Autres origines des sulfates sont les rejets industrielles (fertilisants) et aussi dans les poussières des sols ; la teneur des sulfates dans les eaux de pluie [SO₄²⁻] ≈ 1mg/l.

La présence des d'ions sulfatés dans de la nappe superficielle (libre) est liée aux horizons argileuses. Les teneurs déterminés sont comprises entre 18.3 mg/l (Puits N°22) et 1487mg/l (Puits N°18). Les fortes valeurs se localisent dans partie centrale de la plaine et au Sud ceci est liée à la pratique agricole et au niveau piézométrique qui est proche de la surface (Foufou A ., 2017).

D'une manière générale l'eau de la nappe de l'Oued Zied se caractérise par des teneurs inférieures à la limite admissible pour la potabilité selon la norme d'OMS (Fig.52).

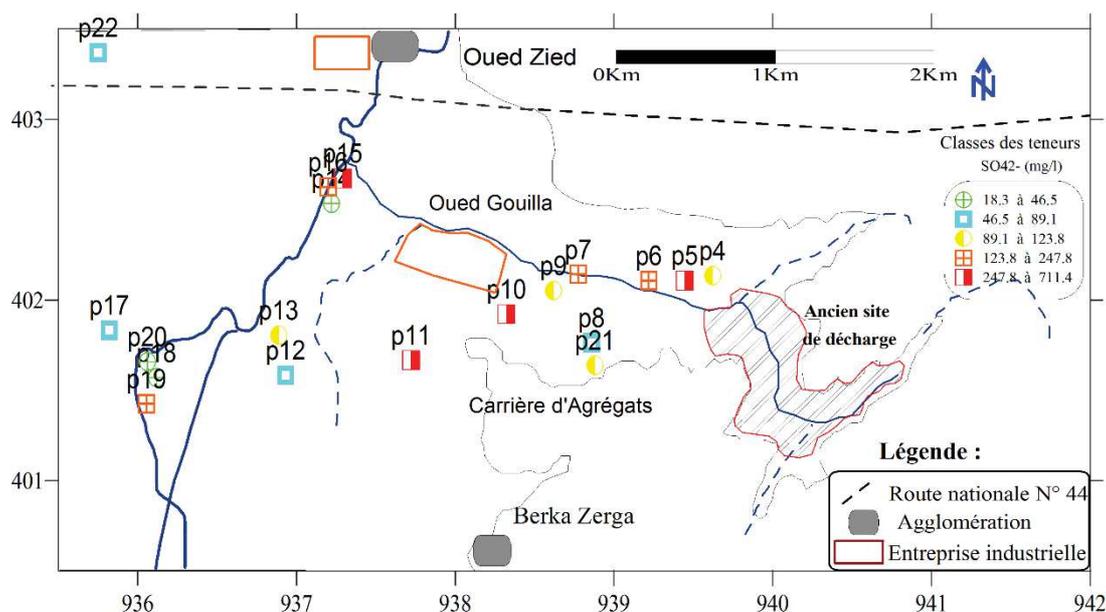
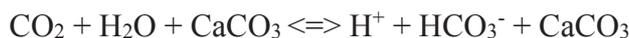


Figure 52 : Carte de répartition des teneurs en SO₄²⁻ (mg/l), Campagne de Juin 2012.

IV. 4. 3. 3. Bicarbonates (HCO₃⁻)

La précipitation (ou la dissolution) des carbonates dépend de la réaction suivante :



La présence des carbonates est donc contrôlée par le pH du milieu (-log₁₀ [H⁺]), lui-même contrôlé par la pression partielle de CO₂ (pCO₂). Une baisse de la pCO₂ augmente l'alcalinité. Dans les eaux naturelles l'alcalinité, exprimée en HCO₃⁻, varie de 10 à 350 mg/l (Rodier J., et al., 2005).

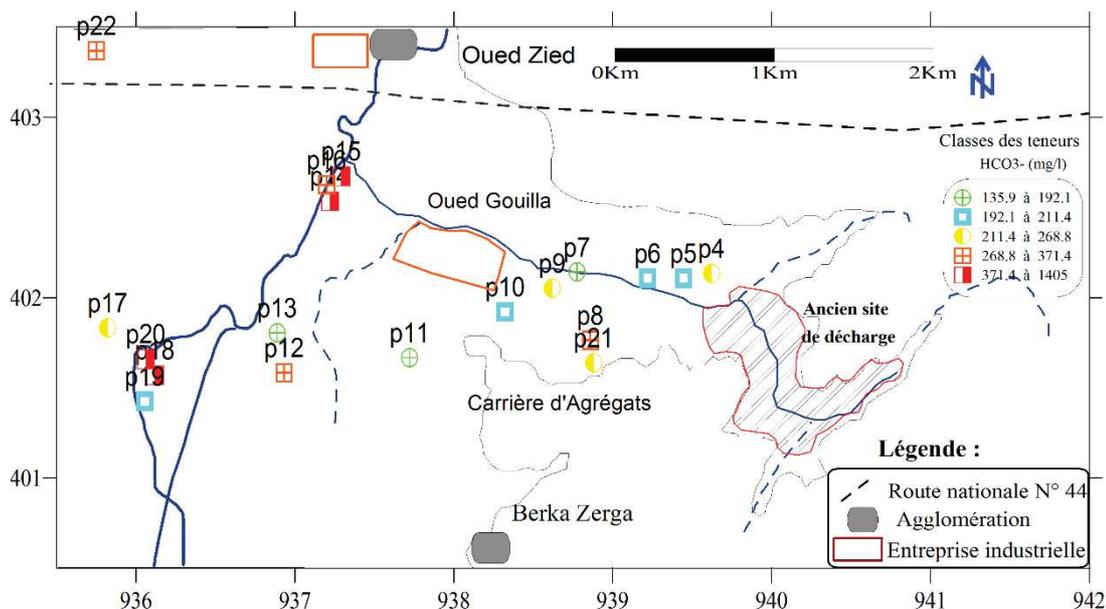


Figure 53 : Carte de répartition des teneurs en HCO₃⁻ (mg/l), Campagne de Juin 2012.

Les eaux de nappe de la région d'étude présentent des teneurs qui oscillent entre 135.9 mg/l (Puits N°17) et 1404.1mg/l (Puits N°18), les valeurs extrêmes de cet élément sont

enregistrées dans la zone Sud-Est de la nappe aquifère (Fig.53). Les apports des bicarbonates dans les eaux de la nappe de l'Oued Zied sont liés probablement à la dissolution des formations calcaires qui affleurent aux bordures Sud-Est de la plaine (Djebel de Bélilita).

IV. 4. 3. 4. Nitrates (NO_3^-)

Dans les eaux souterraines les nitrates viennent du drainage des sols par minéralisation de la matière organique (naturelle ou ajoutée pour la fertilisation des sols ou bien des grandes plaines de culture). Son origine peut être animale, par décomposition de la matière minérale des êtres (Animal, homme, les os) ; Les nitrates peuvent provenir des eaux usées. Les nitrates ne se forment que lorsque l'oxygène est abondant et le potentiel d'oxydoréduction est élevé, Sinon ils se transforment en nitrite et en ammonium. La teneur des eaux d'océan en azote $\approx 0,03\text{mg/l}$ à $0,9\text{ mg/l}$; dans les eaux de pluie 10% de l'azote proviennent des éclairs, dans les eaux des surfaces non contaminées 1 à 5 mg/l de NO_3^- ; Les eaux souterraines sont caractérisées par une teneur de 0 mg/l à quelques centaines de mg/l, sa présence est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques.

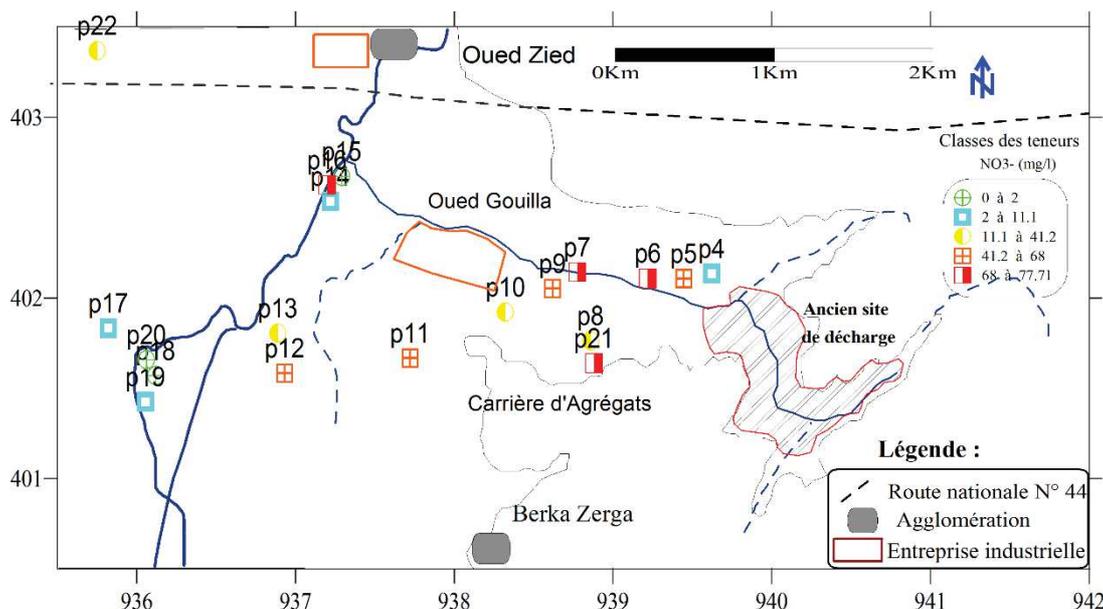


Figure 54 : Carte de répartition des teneurs en NO_3^- (mg/l), Campagne de Juin 2012.

Les résultats de l'analyse montrent que 77.3% des points analysés présentent des concentrations des nitrates inférieures à la concentration maximale admissible de 50 mg/l (Rodier J., et al., 2009). Les concentrations des nitrates varient entre 0.01 mg/l comme valeur minimum observé au niveau du Puits N°22 et 77.7mg/l comme valeurs maximum enregistrés au niveau du Puits N°11. L'analyse spatiale montre que les fortes teneurs se localisent dans les zones suivantes (Fig.54) :

- La partie Sud-Est et Nord du système aquifère : les teneurs en nitrates sont supérieures à 75 mg/l, ces teneurs proviennent probablement des rejets des eaux usées des agglomérations urbaines et des déchets domestiques, ce qui conduit à une augmentation des nitrates.
- Dans la zone Centrale de la plaine de l'Oued Zied on rencontre des teneurs en nitrates qui dépassent la norme de potabilité qui est 50 mg/l, ces fortes concentrations proviennent de la présence des pratiques agricoles (les fertilisants par les engrais azotés).

IV. 4. 3. 5. Calcium (Ca²⁺)

Le calcium est très abondant dans les calcaires CaCO₃ dans les dolomies CaMg(CO₃)₂, la calcite CaCO₃, l'aragonite CaCO₃, le gypse CaSO₄·2H₂O, l'anhydrite CaSO₄, fluorite CaF₂, fluorapatite Ca₅(PO₄)₃F, grès (dans le ciment) et les évaporites. Une teneur élevée de Ca⁺⁺ fait penser à un lessivage de gypse ou d'anhydrite. Une faible teneur de Ca⁺⁺ fait penser à un échange de base contre le sodium ou bien à l'absence des minéraux riches en calcium et faiblement altérables, la précipitation du Ca²⁺, signifie que le pH dépasse le 8 (pH ≥ 8). Dans les roches calcaires le CO₂ est le facteur essentiel de leurs dissolutions :



Dans les profondeurs le CO₂ attaque l'encaissant (la roche), arrivé en surface et y échappe, il se forme alors des travertins, la concentration du Ca⁺⁺ dépend de la pression de CO₂ (Tab.30).

Tableau 30 : Concentrations en Calcium par rapport aux pressions du gaz carbonique.

Pression CO ₂ (en atmosphère)	3. 10 ⁻⁴	3. 10 ⁻²	10 ⁻²
[Ca ²⁺] (mg/l)	20	100	70

Dans les terrains calcaires et eau de surface [Ca²⁺] = 20 mg/l ; dans les terrains cristallins [Ca²⁺] = 2 à 10 mg/l ; Les terrains gypseuses [Ca²⁺] = 600 mg/l ; L'eau de la mer présente une teneur moyenne de 400 mg/l.

Les résultats d'analyse obtenus au laboratoire montrent que les teneurs varient entre 59.4 mg/l (Puits N°17) et 393.7mg/l (Puits N°11). Les fortes valeurs se localisent dans la partie Sud-Est. L'apport de calcium est assuré par les d'alimentation de l'aquifère constituées par des formations géologiques suivantes (Fig.55): Les calcaires cristallins à la base et les calcaire-gréseux sur les versants.