

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année 2018

Faculté des Sciences de la Terre  
Département de Géologie

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Diagnostic et modélisation de la pollution  
des eaux par les métaux lourds au niveau  
de la décharge de Berka Zerga (Annaba).

Option : Hydrogéologie

Par : FOUFOU Atif

**DIRECTEUR DE THÈSE :** M. DJORFI Saadane Professeur, U.B.M., Annaba

**CO-DIRECTEUR DE THÈSE :** M. HANI Azzedine Professeur, U.B.M., Annaba

DEVANT LE JURY

---

**PRESIDENT :** M. BENHAMZA Moussa Professeur, U.B.M., Annaba

**EXAMINATEURS :** M. KACHI Slimane Professeur, U. 8 Mai 1945, Guelma

M. DJIDEL Mohamed Professeur, U.K.M., Ouargla

M. GHRIEB Lassâad Maître de conférences A., U. 8 Mai 1945, Guelma

## تشخيص ونمذجة تلوث المياه بالمعادن الثقيلة بمكب النفايات البركة الزرقاء بعنابة.

### ملخص :

يعتبر مكب النفايات القديم ما بين البلديات بعنابة أحد المفارغ غير المراقبة في الجزائر. الموقع يستقبل قرابة 200 طن في اليوم من النفايات الصلبة ذات المنشأ الحضري والصناعي. الردم يكون مباشرة على سطح الارض. المياه الجوفية تجري على عمق بسيط ضمن تشكيل جيولوجي حديث من العصر الرباعي مع وجود صخور ذات طبيعة متحولة تتميز بسماحية الشقوق، المياه الجوفية تطفوا في عدة اماكن من المكب.

بغرض تقييم تأثير السوائل الراشحة من المكب على نوعية المياه الجوفية، تم القيام بمتابعة الخصائص الفيزيائية (درجة الحرارة، معامل الحموضة، معامل التأكسد، الناقلية الكهربائية، المستوي الارتوازي) مع أخذ قياسات لحظية. اجريت تحاليل المعادن الثقيلة على عينات مياه الطبقة الجوفية والسوائل الراشحة من المكب القديم. النتائج تبرز تراكيز التلوث بصفة معتبرة منقولة بواسطة السوائل الراشحة من مكب النفايات (الحديد=12.43ملغ.ل<sup>-1</sup>، الناقلية الكهربائية=33220مليسمنس.سم<sup>-1</sup>).

مقارنة محصلة معالجة نتائج التحاليل الكيميائية بمختلف الطرق (التحليل التركيبي الأساسي، القطوع المساحية، مؤشر الخطر، مؤشر تلوث المياه بالسوائل الراشحة،...)، مع النموذج المبني لاستنباط التلوث أثبتت نفس نتائج الطرق والمعايير المستعملة في هاته الدراسة مع تبيان وجود نسق تدريجي للتلوث في اتجاه جريان المياه. في هذه المناطق سجلنا القيم التالية (الناقلية الكهربائية أكبر من 5 سمنس.سم<sup>-1</sup>، وعلى التوالي 0.75، 0.32، 0.06، 2.52، و0.94 ملغ.التر<sup>-1</sup> بالنسبة للزنك، الكروم، الرصاص، النحاس واخيرا الحديد)، جميع هذه التراكيز تجتاز القيم المعيارية للمياه الشروب.

يبين مؤشر تلوث الماء الراشح (LWPI) أن نقاط المياه الواقعة أسفل مجرى مكب النفايات القديم ملوثة للغاية، في حين أن المياه الجوفية في سهل وادي زياد ملوثة بشكل معتدل وتبرز تأثير ضئيل ( $0.66 < LWPI \leq 1.53$ ). يعد LWPI أداة لتحديد المخاطر. يجب أن يأخذ استخدام LWPI في الاعتبار عوامل أخرى مثل كمية المادة الراشحة الناتجة، فترات التعرض، عمق طبقة المياه الجوفية، نوع التربة، السكان المتضررين، إلخ.

تم العثور على تمايز متباين في اتجاه NW-SE، واستخدمت المتغيرات الاتجاهية للكريجاج (kriging) العادي من درجات المعاملات ضمن شبكة D2. يقدر النموذج درجة التلوث باستخدام شبكة من 50\*50 م. ويظهر تدرجاً تلويثاً للمعادن في اتجاه مجرى النهر، وكثافة أعلى في المنبع.

لهذا، وبغرض التقليل من خطر تلوث المياه الجوفية، من الضروري تركيب نظام تجميع وصرف ومعالجة السوائل الراشحة كذلك وضع أسطح غير نفوذة للتقليل من رشح السوائل الملوثة نحو المياه الجوفية.

**كلمات مفتاحية:** تلوث، مياه جوفية، مكب حضري، سائل راشحة، معادن ثقيلة، الجزائر.

## **Diagnostic and modeling of water pollution by heavy metals at the Berka Zerga Landfill (Annaba).**

### **Abstract:**

The former intercommunal discharge of Annaba is one of many uncontrolled landfills in Algeria. The site received nearly 200 tonnes/day of solid waste from urban and industrial sources, stored directly on the ground. Groundwater circulates at shallow depths in quaternary and especially metamorphic formations, characterized by a high permeability of fissures, the aquifer waters outcropping in several places of the landfill.

In order to evaluate the landfill leachates impact on groundwater, a follow-up was made for the physical parameters ( $T^{\circ}$ , pH, Eh, CE, piezometry) with in situ measurements, analyzes of heavy metals were carried out on groundwater and leachates which come from the old discharge. The results show a significant pollutant load carried by the leachates from the landfill (Iron = 12.43mg / l, EC = 33220  $\mu$ s/cm).

The results treatment of the chemical analyzes by the various methods (PCA, profiles, etc.) has demonstrated a significant qualitative degradation of the groundwater, particularly in the sectors located in the downstream of the landfill. In these polluted areas, we observed the following values: EC greater than 5 ms/cm, 0.75, 0.32, 0.06, 2.52 and 0.94 mg.l<sup>-1</sup> for zinc, chromium , Lead, Copper, and Iron. These concentrations greatly exceed drinking water standards.

The Leachate Water Pollution Index (LWPI) shows that the water points located downstream of the old landfill are highly polluted, while the groundwater of the Oued Zied plain is moderately contaminated and presents an insignificant impact ( $0.66 < LWPI \leq 1.53$ ). The LWPI is a hazard identification tool. The use of the LWPI should take into account other factors such as the amount of leachates generated, exposure periods, aquifer depth, soil type, affected population, etc.

The anisotropy found is in the NW-SE direction, the directional variograms were used for ordinary kriging of the factor scores at 2D in the aquifer. The model estimates the pollution degree using a mesh of 50\*50 m. It shows an upstream-downstream metal pollution gradient with upstream intensity.

Thus, to reduce the risks of groundwater pollution, it is necessary to install a system of collectors, drainage and leachates treatment and to provide sealed surfaces to limit the infiltration of the polluted water.

**Keywords:** Pollution, Groundwater, Urban landfill, Leachates, Heavy metals, Algeria.

## **Diagnostic et modélisation de la pollution des eaux par les métaux lourds au niveau de la décharge de Berka Zerga (Annaba).**

### **RESUME**

L'ancienne décharge intercommunale d'Annaba est l'une des nombreuses décharges non contrôlées de l'Algérie. Le site recevait près de 200 tonnes/jour de déchets solides d'origines urbaines et industrielles, stockés directement sur le sol. Les eaux souterraines circulent à faible profondeur dans les formations quaternaires et surtout métamorphiques, caractérisées par une importante perméabilité de fissures, les eaux de la nappe affleurent en plusieurs endroits de la décharge.

Afin d'évaluer l'impact des lixiviats de la décharge sur les eaux souterraines, un suivi a été réalisé pour les paramètres physiques ( $T^\circ$ , pH, Eh, CE, la piézométrie) avec des mesures in situ, des analyses des métaux lourds ont été effectuées sur l'eau de la plaine et les lixiviats qui proviennent de l'ancienne décharge. Les résultats montrent une importante charge polluante véhiculée par les lixiviats de la décharge (Fer = 12,43mg/l, CE = 33220  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ).

Le traitement des résultats des analyses chimiques par différentes méthodes (ACP, profils ...) ont montré une dégradation qualitative importante des eaux souterraines, particulièrement dans les secteurs situés en aval de la décharge. Dans ces zones polluées, nous avons observé les valeurs suivantes : CE supérieures à 5 ms/cm, 0.75 , 0.32 , 0.06 , 2.52 et 0.94  $\text{mg.l}^{-1}$  respectivement pour le Zinc, Chrome, Plomb, Cuivre, et le Fer. Ces concentrations dépassent largement les valeurs standards pour l'eau potable.

L'indice de pollution des eaux par les lixiviats (LWPI) montre que les points d'eau situés en aval de l'ancienne décharge sont fortement pollués, tandis que les eaux souterraines de la plaine de l'Oued Zied sont modérément contaminées et présentent un impact peu significatif ( $0,66 < \text{LWPI} \leq 1,53$ ). L'LWPI est un outil d'identification des dangers. L'utilisation du LWPI devrait tenir compte d'autres facteurs tels que la quantité des lixiviats générés, les périodes d'exposition, la profondeur de l'aquifère, le type de sol, la population affectée, etc.

L'anisotropie trouvée est dans la direction NW-SE, les variogrammes directionnels ont été utilisés pour le krigeage ordinaire des scores factoriels dans la nappe à 2D. Le modèle estime le degré de la pollution en utilisant un maillage de 50\*50 m. Il montre un gradient de pollution métallique amont-aval avec une intensité en amont.

Ainsi, pour réduire les risques de pollution des eaux souterraines, il est nécessaire d'installer un système de collecteurs, de drainage et de traitement des lixiviats et de prévoir des surfaces étanches afin de limiter l'infiltration des eaux polluées.

**Mots-clés :** Pollution, eaux souterraines, Décharge urbaine, Lixiviats, Métaux lourds, Algérie.

# REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en tout premier lieu Allah qui nous a éclairés notre cheminement dans les nuits les plus obscures et qui nous a donné la force d'achever ce travail.

Egalement je tiens à remercier avec gratitude mon encadreur Pr. Saadane DJORFI pour ses conseils, sa patience, sa compréhension, ces encouragements et son suivi continu au cours de la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements à mon Co-encadreur Pr. Azzedine HANI pour les orientations et les efforts déployés durant toute la durée d'encadrements.

Mes remerciements et ma reconnaissance s'adressent aussi à Monsieur BENHAMZA Moussa, Professeur à la Faculté des Sciences de la terre de l'UBMA. Vous me faites le grand honneur en acceptant de présider le Jury de cette thèse malgré vos diverses occupations. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma haute considération.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude aux autres membres de Jury : Messieurs KACHI Slimane Professeur, GHRIEB Lassâad Maître de Conférences A, de l'Université de Guelma et Monsieur DJIDEL Mohamed, Professeur, de l'Université de Ouargla. Vous me faites le grand honneur en acceptant de juger ce travail malgré vos occupations multiples.

Mes remerciements vont également aux personnels du laboratoire (Mittal stee Annaba). Pour l'aide dans la réalisation des analyses chimique de l'eau, ainsi que le personnel du laboratoire de la raffinerie de Skikda.

Un grand merci à monsieur Dr. Rabah KECHICHED de l'université Kasdi Merbah-Ouargla pour ces aides ces conseils et ces efforts, ces encouragements et surtout pour les plusieurs sorties sur terrains effectués ensemble.

Egalement l'apport de monsieur Dr. Nadjib HAIED été très estimable, avec ces encouragements et ces aides ce travail a été élaboré.

Avec une grande affection je remercie mes collègues de l'université Ziane Achour-Djelfa pour l'aide qu'ils nous ont porté.

Egalement à tous les membres de la promotion du magister 2004/2007 option hydrochimie.

Je remercie vivement tout l'ensemble des personnels du département de géologie.

FOUFOU ATIF

## TABLE DE MATIERES :

N°	PAGE
ملخص .....	II
Abstract .....	III
Résumé .....	IV
Remerciement.....	V
Table de matières .....	VI
Liste des Tableaux.....	XI
Liste des Figures.....	XIII
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</b>	
I. 1. Situation régionale .....	3
I. 1. 1. Situation de la zone d'étude .....	4
I. 2. Aperçu Géomorphologique.....	4
I. 2. 1. Les montagnes .....	4
I. 2. 2. Sols et couvert végétal .....	5
I. 2. 3. Sols des versants .....	5
I. 2. 4. Sols alluvionnaires .....	6
I. 2. 5. Plaine d'Annaba.....	6
I. 2. 6. Lac Fetzara.....	7
I. 3. Contexte géologique .....	9
I. 3. 1. Géologie régionale .....	9
I. 3. 1. 1. Complexe cristallophyllien .....	9
I. 3. 1. 2. Subdivision du complexe.....	10
I. 3. 1. 2. 1. L'unité supérieure .....	10
I. 3. 1. 2. 2. L'unité intermédiaire .....	10
I. 3. 1. 2. 3. L'unité de base.....	11
I. 3. 1. 3. Les roches ignées .....	12
I. 3. 1. 3. 1. Groupe microgranodioritique.....	12
I. 3. 1. 3. 2. Groupe rhyolitique .....	13
I. 3. 1. 4. Les roches sédimentaires .....	13
I. 3. 1. 4. 1. Les flyschs ou grès numidiens (Oligo-Miocène).....	13
I. 3. 1. 4. 2. Les flyschs sénoniens (Maestrichtien) .....	13
I. 3. 1. 5. Tectonique.....	13
I. 3. 1. 5. 1. Accidents tectoniques importants .....	13
I. 3. 1. 5. 2. Petites fractures.....	14
I. 3. 1. 6. La minéralisation .....	14
I. 3. 2. Géologie locale .....	14
I. 3. 2. 1. Les roches métamorphiques.....	14
I. 3. 2. 1. 1. Les Gneiss .....	15
I. 3. 2. 1. 2. La série des micaschistes .....	16
I. 3. 2. 1. 3 Les calcaires cristallins .....	16
I. 3. 2. 2. Les roches sédimentaires .....	16
I. 3. 2. 2. 1. Les calcaires marno gréseux (Flysch).....	16
I. 3. 2. 2. 2. Les argiles et grès numidiennes .....	17
I. 3. 2. 2. 3 Les Eboulis de pente (Versants) .....	17
I. 3. 2. 2. 4. Les alluvions (des Oueds et la plaine) .....	17
I. 4. Etude Pédologique .....	19

I. 4. 1. Les différentes classes du sol.....	19
I. 4. 1. 1. Les sols peu évolués (SPE).....	19
I. 4. 1. 2. Les sols vertisoles (SV).....	19
I. 4. 2. Caractéristiques physiques des sols.....	19
I. 4. 2. 1. Granulométrie.....	19
I. 4. 2. 2. La densité.....	20
I. 4. 2. 3. La perméabilité.....	21
I. 4. 3. Occupation du sol.....	21
I. 4. 3. 1. Le piémont.....	21
I. 4. 3. 1. 1. Occupation agricole.....	21
I. 4. 3. 1. 2. Occupation humaine.....	22
a. Zone faiblement peuplée.....	22
b. Zone moyennement peuplée.....	22
c. Zone fortement peuplée.....	22
I. 4. 3. 2. Les plaines.....	22
I. 4. 3. 2. 1. Occupation du sol par l'industrie.....	23
I. 5. Conclusion.....	25

## Chapitre II : Hydro-Climatologie

II. 1. Introduction.....	26
II. 1. 1. Le bassin Côtiers Constantinois Centre.....	26
II. 1. 2. Caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara.....	28
II. 2. Les paramètres climatiques.....	29
II. 2. 1. Les précipitations.....	29
II. 2. 1. 1. Les précipitations moyennes mensuelles.....	29
II. 2. 1. 2. Répartition saisonnière des précipitations.....	30
II. 2. 1. 3. Précipitations moyennes annuelles.....	32
II. 2. 1. 3. 1. Variations des précipitations annuelles.....	34
II. 2. 2. La température.....	35
II. 2. 2. 1. La température moyenne mensuelle.....	35
II. 2. 2. 2. Température moyenne annuelle.....	36
II. 3. Diagramme Ombrothermique.....	37
II. 4. Climagramme de Louis Emberger.....	38
II. 5. Notion du bilan hydrique.....	39
II. 5. 1. Estimation de l'évapotranspiration.....	39
II. 5. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	40
A/ Formule de Turc.....	40
B/ Formule de Coutagne.....	41
II. 5. 3. L'interprétation du bilan hydrique.....	41
II. 5. 4. Comparaison des résultats des trois méthodes.....	46
II. 6. Estimation de la lame d'eau écoulee.....	47
II. 6. 1. Le ruissellement.....	47
II. 6. 2. Infiltration efficace.....	47
II. 6. Evaluation de la sécheresse météorologique.....	48
II. 6. 1. Définition de la sécheresse.....	48
II. 6. 2. La Classification de la sécheresse.....	48
II. 6. 3. Les indices de sécheresse.....	49
II. 6. 4. Evaluation et surveillance de la sévérité de la sécheresse.....	49
II. 6. 4. 1. Les caractéristiques de la sécheresse météorologique.....	50

II. 6. 4. 2. Les indices de la sécheresse météorologique .....	50
a- L'indice des précipitations normalisées.....	50
b- L'indice de la reconnaissance de la sécheresse .....	51
c- Evaporation potentielle (ETP) selon la Méthode de Thornthwaite.....	52
II. 6. 4. 3. Evaluation et surveillance de la sévérité de la sécheresse météorologique.....	52
II. 6. 4. 3. 1. Corrélation entre le SPI et le RDI.....	52
II. 6. 4. 3. 2. Interprétation des résultats.....	53
a- La sécheresse météorologique pour le court terme .....	53
b- La sécheresse météorologique pour le moyen et le long terme : .....	55
II. 7. Conclusion : .....	57

### Chapitre III : Hydrogéologie

III. 1. Introduction : .....	58
III. 2. La nappe des alluvions récentes et actuelles (superficielle) : .....	58
III. 3. La nappe des gneiss altérés .....	59
III. 4. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe superficielle : .....	60
III. 5. Les caractéristiques hydrodynamiques de la Nappe des cipolins : .....	61
III. 6. Etude de la piézométrie : .....	61
III. 7. Gradient hydraulique.....	65
III. 7. Conclusion : .....	67

### Chapitre IV : Hydrogéochimie

IV. 1. Introduction.....	68
IV. 2. Echantillonnage des eaux de la plaine de l'Oued Zied .....	68
IV. 3. Matériels et méthodes d'analyse .....	69
Titre alcalimétrique complet T.A.C (mg/l HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	69
La dureté totale : TH (Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> ) mg/l .....	69
Le calcium Ca <sup>2+</sup> (mg/l).....	69
Le magnésium Mg <sup>2+</sup> (mg/l).....	69
Les chlorures Cl <sup>-</sup> (mg/l).....	69
Le Sodium Na <sup>+</sup> (mg/l) .....	69
Les Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l).....	69
Les matières en suspension MES (mg/l) .....	69
IV. 4. Interprétation des résultats .....	70
IV. 4. 1. Les caractéristiques physiques .....	71
IV. 4. 1. 1. Température .....	71
IV. 4. 1. 2. Conductivité électrique .....	71
IV. 4. 1. 3. Cartes de répartition des conductivités électriques .....	72
IV. 4. 2. Paramètres chimiques de l'eau.....	74
IV. 4. 2. 1. Le pH.....	74
IV. 4. 2. 2. Cartes de répartition du pH .....	75
IV. 4. 3. Classification des eaux de la plaine de L'oued Zied.....	76
IV. 4. 3. Eléments chimiques majeurs dans les eaux de la plaine de L'Oued Zied .....	76
IV. 4. 3. 1. Chlorures (Cl <sup>-</sup> ).....	76
IV. 4. 3. 2. Les sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) .....	77
IV. 4. 3. 3. Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	78
IV. 4. 3. 4. Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	79
IV. 4. 3. 5. Calcium (Ca <sup>2+</sup> ).....	80
IV. 4. 3. 6. Magnésium (Mg <sup>2+</sup> ).....	81
IV. 4. 3. 7. Sodium (Na <sup>+</sup> ) .....	82

IV. 4. 3. 8. Potassium (K <sup>+</sup> ) .....	82
IV. 5. Faciès chimiques et classification des eaux .....	83
IV. 5. 1. Diagrammes de Stabler et Stiff .....	83
IV. 5. 2. Diagramme de Piper .....	85
IV. 5. 3. Diagramme de Durov .....	86
IV. 5. 4. Rapports caractéristiques .....	87
IV. 5. 5. Echanges de bases .....	90
IV. 5. 6. Indice de saturation .....	91
IV. 5. 7. Classification hiérarchique .....	93
IV. 6. Aptitude des eaux de la nappe à l'irrigation .....	94
IV. 7. Conclusion .....	96

## Chapitre V : Diagnostic de la pollution

V. 1. Introduction .....	98
V. 2. Matériels et méthode d'échantillonnage .....	98
V. 3. Interprétation des résultats .....	99
V. 3. 1. Les caractéristiques physico-chimiques des lixiviats .....	99
V. 3. 1. 1. Températures .....	99
V. 3. 1. 2. Le pH .....	99
V. 3. 1. 3. La conductivité électrique .....	100
V. 3. 2. Les métaux lourds .....	100
V. 3. 2. 1. Le Plomb .....	102
V. 3. 2. 2. Cartes des teneurs en Plomb .....	103
V. 3. 2. 3. Le Zinc .....	104
V. 3. 2. 4. Cartes des teneurs en Zinc .....	106
V. 3. 2. 5. Le Cuivre .....	107
V. 3. 2. 6. Cartes des teneurs en Cuivre .....	109
V. 3. 2. 7. Le Chrome .....	110
V. 3. 2. 8. Cartes des teneurs en Chrome .....	112
V. 3. 2. 9. Le Fer .....	113
V. 3. 2. 10. Cartes des teneurs en Fer .....	115
V. 4. Carte de répartition de la DBO5 .....	116
V. 5. Répartition spatiale des teneurs .....	117
V. 5. 1. Selon le profil N°1 .....	118
V. 5. 2. Selon le profil N°2 .....	120
V. 6. Evolution temporelle .....	122
V. 7. Conclusion .....	124

## Chapitre VI : Cartographie de la pollution

VI. I. Introduction .....	126
VI. 2. Indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI) .....	126
VI. 2. 1. Présentation de l'indice .....	126
VI. 2. 2. Résultats obtenus .....	127
VI. 3. Utilisation de l'Indice de Risque (IR) .....	129
VI. 3. 1. Evaluation du risque (EDR) sur la santé .....	129
VI. 3. 1. La toxicité des métaux lourds .....	129
VI. 3. 1. 1. Le Chrome (Cr) .....	129
VI. 3. 1. 1. 1. Impact sur l'environnement .....	129

VI. 3. 1. 1. 2. Impact sur la santé.....	130
VI. 3. 1. 2. Le Plomb (Pb).....	130
VI. 3. 1. 2. 1 Impact sur la santé.....	130
VI. 3. 1. 3. Le Fer total (Fe).....	130
VI. 3. 1. 3. 1. Impact sur l'environnement.....	131
VI. 3. 1. 3. 2. Impact sur la santé.....	131
VI. 3. 1. 4. Le Cuivre (Cu).....	131
VI. 3. 1. 4. 1. Impact sur l'environnement.....	131
VI. 3. 1. 4. 2. Impact sur la santé.....	131
VI. 3. 1. 5. Le Nickel (Ni).....	132
VI. 3. 1. 5. 1. Impact sur l'environnement.....	132
VI. 3. 1. 5. 2. Impact sur la santé.....	132
VI. 3. 1. 6. Le Zinc (Zn).....	132
VI. 3. 1. 6. 1. Impact sur l'environnement.....	132
VI. 3. 1. 6. 2. Impact sur la santé.....	132
VI. 3. 2. Evaluation des risques des métaux lourds sur la santé.....	133
VI. 3. 2. 1. Définition des concentrations d'exposition.....	133
VI. 3. 2. 2. Estimation des doses d'exposition.....	133
VI. 3. 2. 2. 1. Dose journalière d'exposition (DJE) : Est donnée par la relation suivante.....	133
VI. 3. 2. 2. 2. DJE pour le contact dermique avec le sol.....	134
VI. 3. 2. 2. 3. Dose journalière acceptable (DJA).....	134
VI. 3. 3. Estimation du risque.....	134
VI. 3. 3. 1. Estimation du risque non cancérigène.....	134
VI. 3. 3. 2. Estimation du risque cancérigène.....	134
VI. 4. Conclusion.....	138

## Chapitre VII : Modélisation géostatistique de la pollution métallique

VII. 1. Introduction.....	140
VII. 2. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	140
VII. 3. La cartographie krigéante (méthode géostatistique).....	141
VII. 3. 1. Notions de la géostatistique.....	141
VII. 3. 2. Variogramme.....	142
VII. 3. 3. La variance d'estimation.....	145
VII. 4. L'estimation par la méthode géostatistique.....	146
VII. 5. Résultats obtenus.....	148
VII. 5. 1. L'Analyse en Composantes Principale (ACP).....	148
VII. 5. 1. 2. Cercle FI-FII, plan FI-FII.....	149
VII. 5. 2. Modélisation géostatistique du degré de la pollution métallique.....	150
VII. 5. 2. 1. Variable régionalisée.....	150
VII. 5. 2. 2. Variographie des scores factoriels des individus.....	151
VII. 5. 2. 2. 1. Variographie de Surface.....	151
VII. 5. 2. 2. 2. Variogramme directionnels.....	151
VII. 5. 2. 3. Krigeage et cartographie.....	153
VII. 6. CONCLUSION.....	153
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>155</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>159</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>166</b>

## LISTE DES TABLEAUX :

N°	Chapitre I	Page
<b>Tab. 1</b>	Les proportions des particules en pourcentage Minimum, Maximum, et la Moyenne.....	20
<b>Tab. 2</b>	La densité apparente, la densité réelle et la porosité totale des sols le maximum, le minimum et la moyenne.....	20
<b>Chapitre II</b>		
<b>Tab. 3</b>	ressources en eau superficielles et souterraines du bassin versant Côtiers Constantinois Centre.....	28
<b>Tab. 4</b>	Quelques caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara.....	28
<b>Tab. 5</b>	Caractéristiques des stations de mesure.....	29
<b>Tab. 6</b>	Précipitations moyennes mensuelles (1981 - 2013).....	30
<b>Tab. 7</b>	Répartition saisonnière des précipitations (1981-2013).....	31
<b>Tab. 8</b>	Les précipitations annuelles et les coefficients pluviométriques des trois stations (1981–2013).....	33
<b>Tab. 9</b>	La température moyenne mensuelle (1981-2013).....	35
<b>Tab. 10</b>	La température moyenne annuelle (1981–2013).....	36
<b>Tab. 11</b>	Paramètres du climagramme d’Emberger.....	38
<b>Tab. 12</b>	ETR annuelle selon la méthode de Turc.....	40
<b>Tab. 13</b>	ETR annuelle selon la méthode de Coutagne.....	41
<b>Tab. 14</b>	Bilan hydrique à la station de Berrahal pour la période (1981-2013).....	42
<b>Tab. 15</b>	Bilan hydrique à la station de Ain Berda pour la période (1981-2013).....	43
<b>Tab. 16</b>	Bilan hydrique à la station des Salines pour la période (1981-2013).....	45
<b>Tab. 17</b>	Résultats des valeurs de l’ETR par les trois méthodes.....	46
<b>Tab. 18</b>	Le Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckalof.....	47
<b>Tab. 19</b>	Les valeurs de l’infiltration efficace.....	47
<b>Tab. 20</b>	Valeurs de l’indice SPI.....	51
<b>Tab. 21</b>	Probabilité d’occurrence.....	51
<b>Tab. 22</b>	Classification de la sécheresse selon les indices météorologiques SPI et le RDI.....	52
<b>Tab. 23</b>	Coefficient de corrélation entre le SPI et le RDI pour différentes pas de temps.....	53
<b>Chapitre III</b>		
<b>Tab. 24</b>	Paramètres hydrodynamiques de quelques points situés dans la nappe superficielle des sables et graviers à l’Est du lac Fetzara.....	60
<b>Tab. 25</b>	Paramètres hydrodynamiques de l’aquifère des Cipolins.....	61
<b>Tab. 26</b>	Fluctuations de la profondeur de la surface piézométrique (Octobre 2005-Juin 2006).....	63
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Tab. 27</b>	Statistiques descriptives des analyses des eaux de la nappe libre de l’Oued Zied (Juin 2012).....	70
<b>Tab. 28</b>	Balances ioniques des analyses des eaux de la nappe de l’Oued Zied, (Juin 2012).....	70
<b>Tab. 29</b>	Classification des eaux de la nappe en fonction de la Conductivité.....	72
<b>Tab. 30</b>	Concentrations en Calcium par rapport aux pressions du gaz carbonique....	80

<b>Tab. 31</b>	Classification de l'eau de la plaine de l'Oued Zied basée sur le diagramme de Durov.....	86
<b>Tab. 32</b>	Indices d'échanges de Bases des analyses des eaux de la nappe de l'Oued Zied, (Juin 2012).....	90
<b>Tab. 33</b>	Statistique descriptive des valeurs de l'indice de saturation (Juin 2012).....	92
<b>Tab. 34</b>	Evolution des indices de saturation des minéraux, campagne Juin 2012.....	92

#### **Chapitre V**

<b>Tab. 35</b>	Comparaison des normes internationales de métaux lourds pour les eaux de consommation (OMS, États-Unis, CEE, France).....	100
<b>Tab. 36</b>	Les normes de rejets des lixiviats.....	101
<b>Tab. 37</b>	Sources anthropique et naturelle des métaux lourds.....	101
<b>Tab. 38</b>	Points retenus pour les deux profils.....	117

#### **Chapitre VI**

<b>Tab. 39</b>	Classes de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par les décharges (LWPI).....	127
<b>Tab. 40</b>	Classification de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par la décharge de Berka Zerga (LWPI).....	127
<b>Tab. 41</b>	Indice du risque total pour l'usage des eaux souterraines (plaine de l'Oued Zied et La décharge de Berka Zerga), Juin 2012.....	135
<b>Tab. 42</b>	Indice du risque total pour les Lixiviats (Décharge de Berka Zerga), Juin 2012.....	136

#### **Chapitre VII**

<b>Tab. 43</b>	Matrice de corrélation.....	148
<b>Tab. 44</b>	Valeurs propres.....	149
<b>Tab. 45</b>	Récapitulatifs des variogrammes directionnels et leurs ajustements.....	152

## LISTE DES FIGURES :

N°	Chapitre I	Page
<b>Fig. 1</b>	Situation géographique de la zone d'étude.....	3
<b>Fig. 2</b>	Coupe sur le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara (Marre A., 1992).....	7
<b>Fig. 3</b>	Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough.....	8
<b>Fig. 4</b>	Carte géologique du massif de l'Edough.....	11
<b>Fig. 5</b>	Colonne lithologique du massif de l'Edough.....	12
<b>Fig. 6</b>	Situation géologique et structurale des plaines de la région d'Annaba - Bouteldja.....	15
<b>Fig. 7</b>	Carte géologique de La région de Berka Zerga.....	18
<b>Fig. 8</b>	Carte d'occupation du sol.....	24
<b>Chapitre II</b>		
<b>Fig. 9</b>	Bassin versant Côtiers Constantinois Centre.....	27
<b>Fig. 10</b>	Précipitations moyennes mensuelles pour les trois stations (1981–2013).....	30
<b>Fig. 11</b>	Répartition saisonnière des précipitations à la station de Berrahal (1981-2013).....	31
<b>Fig. 12</b>	Répartition saisonnière des précipitations à la station de Ain Berda (1981-2013).....	32
<b>Fig. 13</b>	Répartition saisonnière des précipitations à la station des Salines (1981-2013).....	32
<b>Fig. 14</b>	Les variations du coefficient pluviométrique pour les trois stations (1981-2013).....	34
<b>Fig. 15</b>	Variations des précipitations annuelles des stations de Berrahal, de Ain Berda et des Salines (1981–2013).....	35
<b>Fig. 16</b>	Histogramme de la température moyenne mensuelle aux stations de Berrahal, Ain Berda et des Salines (1981-2013).....	36
<b>Fig. 17</b>	Diagramme Ombrothermique de la station de Berrahal (1981–2013).....	37
<b>Fig. 18</b>	Diagramme Ombrothermique de la station de Ain Berda (1981–2013).....	37
<b>Fig. 19</b>	Diagramme Ombrothermique de la station des Salines (1981-2013).....	38
<b>Fig. 20</b>	Climagramme d'Emberger de la station des Salines.....	39
<b>Fig. 21</b>	Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Berrahal pour la période (1981-2013).....	42
<b>Fig. 22</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Berrahal (1981-2013).....	43
<b>Fig. 23</b>	Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Ain Berda pour la période (1981-2013).....	44
<b>Fig. 24</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Ain Berda (1981-2013).....	44
<b>Fig. 25</b>	Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station des Salines pour la période (1981-2013).....	45
<b>Fig. 26</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station des Salines (1981-2013).....	46
<b>Fig. 27</b>	Diagramme du coefficient de corrélation entre SPI et RDI pour la station des Salines (1972-2016).....	54
<b>Fig. 28</b>	Comparaison des SPI 1 et RDI 1 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 1 mois.....	55
<b>Fig. 29</b>	Comparaison des SPI 3 et RDI 3 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 3 mois.....	55

<b>Fig. 30</b>	Comparaison des SPI 6 et RDI 6 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 6 mois.....	56
<b>Fig. 31</b>	Comparaison des SPI 9 et RDI 9 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 9 mois.....	56
<b>Fig. 32</b>	Comparaison des SPI 12 et RDI 12 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 12 mois.....	56

### Chapitre III

<b>Fig. 33</b>	Extrait de la carte hydrogéologie de l'Algérie du Nord.....	59
<b>Fig. 34</b>	Coupe schématique du système aquifère de la région d'Annaba.....	60
<b>Fig. 35</b>	Bloc-diagramme montrant les horizons aquifères de la plain de l'Oued Zied.....	61
<b>Fig. 36</b>	Variation de la profondeur de la surface piézométrique en fonction des précipitations (2006-2007).....	63
<b>Fig. 37</b>	Carte piézométrique du mois d'Octobre 2005.....	64
<b>Fig. 38</b>	Carte piézométrique du mois de Décembre 2005.....	64
<b>Fig. 39</b>	Carte piézométrique du mois de Janvier 2006.....	65
<b>Fig. 40</b>	Mesures du gradient hydraulique (moi de Juin 2006).....	66

### Chapitre IV

<b>Fig. 41</b>	Carte piézométrique et inventaire des points d'échantillonnage (Juin 2012)	68
<b>Fig. 42</b>	Variations des températures des eaux de la nappe de l'Oued Zied.....	71
<b>Fig. 43</b>	Variations spatiales de la conductivité électrique des eaux de la nappe de l'Oued Zied.....	72
<b>Fig. 44</b>	Carte des conductivités ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Campagne d'Octobre 2005.....	73
<b>Fig. 45</b>	Carte des conductivités ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Campagne de Février 2006.....	73
<b>Fig. 46</b>	Carte des conductivités ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Campagne de Juin 2012.....	74
<b>Fig. 47</b>	Variations du pH des eaux de la nappe.....	75
<b>Fig. 48</b>	Carte du pH, Campagne d'Octobre 2005.....	75
<b>Fig. 49</b>	Carte du pH, Campagne de Février 2006.....	76
<b>Fig. 50</b>	Carte du pH, Campagne de Juin 2006.....	76
<b>Fig. 51</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Cl}^-$ (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	77
<b>Fig. 52</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l), Campagne de Juin 2012...	78
<b>Fig. 53</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{HCO}_3^-$ (mg/l), Campagne de Juin 2012.	78
<b>Fig. 54</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{NO}_3^-$ (mg/l), Campagne de Juin 2012...	79
<b>Fig. 55</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Ca}^{2+}$ (mg/l), Campagne de Juin 2012....	81
<b>Fig. 56</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Mg}^{2+}$ (mg/l), Campagne de Juin 2012...	81
<b>Fig. 57</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Na}^+$ (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	82
<b>Fig. 58</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{K}^+$ (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	83
<b>Fig. 59</b>	Diagrammes de Stabler et Stiff des eaux de la plaine (Juin 2012).....	84
<b>Fig. 60</b>	Classification des eaux de la plaine selon diagramme Stiff (Juin 2012).....	84
<b>Fig. 61</b>	Diagramme de Piper ; Eaux de la nappe libre de l'Oued Zied (Juin 2012)...	85
<b>Fig. 62</b>	Diagramme de Durov illustrant les processus hydrogéochimiques impliqués dans les eaux de la plaine de l'Oued Zied.....	87
<b>Fig. 63</b>	Corrélation $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ et $\text{SO}_4^{2-}$ versus TDS.....	88
<b>Fig. 64</b>	Corrélation $\text{Ca}^{2+}$ vs $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ vs $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ vs $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Na}^+$ vs $\text{Cl}^-$ et $\text{Cl}^-$ vs $\text{HCO}_3^-$ .....	89
<b>Fig. 65</b>	Echanges de bases dans les eaux souterraines de plaine de l'Oued Zied (Juin 2012).....	91

<b>Fig. 66</b>	Boîtes à moustache des indices de saturation en Calcite, Dolomite, Gypse, Anhydrite et Aragonite des eaux de l'aquifère de l'Oued Zied (Juin 2012).	93
<b>Fig. 67</b>	Valeurs propres et pourcentage de variabilité exprimée.....	94
<b>Fig. 68</b>	Diagramme de Richards SAR (USSSL 1954) des eaux de la nappe libre de l'Oued Zied, Juin 2012.....	95
<b>Fig. 69</b>	Diagramme de Richards (USSSL 1954) (%Na <sup>+</sup> ) des eaux de la nappe de l'Oued Zied, Juin 2012.....	96

### Chapitre V

<b>Fig. 70</b>	Carte d'inventaire des points d'échantillonnage.....	98
<b>Fig. 71</b>	Variations des températures des lixiviats de la décharge de Berka zerga...	99
<b>Fig. 72</b>	Variations du pH des lixiviats de la décharge de Berka zerga.....	99
<b>Fig. 73</b>	Conductivités électriques des lixiviats de la décharge de Berka zerga.....	100
<b>Fig. 74</b>	Variations de la teneur en plomb des eaux de la nappe.....	102
<b>Fig. 75</b>	Variations de la teneur en plomb des lixiviats.....	103
<b>Fig. 76</b>	Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.....	103
<b>Fig. 77</b>	Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne de Février 2006.....	104
<b>Fig. 78</b>	Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	104
<b>Fig. 79</b>	Variations de la teneur en zinc des eaux de la nappe.....	105
<b>Fig. 80</b>	Variations de la teneur en Zinc des lixiviats.....	106
<b>Fig. 81</b>	Carte des teneurs en Zn (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.....	106
<b>Fig. 82</b>	Carte des teneurs en Zn (mg/l), Campagne de Février 2006.....	107
<b>Fig. 83</b>	Carte des teneurs en Zn (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	107
<b>Fig. 84</b>	Variations de la teneur en cuivre des eaux de la nappe.....	108
<b>Fig. 85</b>	Variations de la teneur en cuivre des lixiviats.....	109
<b>Fig. 86</b>	Carte des teneurs en Cu (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.....	109
<b>Fig. 87</b>	Carte des teneurs en Cu (mg/l), Campagne de Février 2006.....	110
<b>Fig. 88</b>	Carte des teneurs en Cu (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	110
<b>Fig. 89</b>	Variations de la teneur en Chrome des eaux de la nappe.....	111
<b>Fig. 90</b>	Variations de la teneur en Chrome des lixiviats.....	112
<b>Fig. 91</b>	Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.....	112
<b>Fig. 92</b>	Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne de Février 2006.....	113
<b>Fig. 93</b>	Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	113
<b>Fig. 94</b>	Variations de la teneur en fer des lixiviats.....	114
<b>Fig. 95</b>	Variations de la teneur en fer des lixiviats.....	114
<b>Fig. 96</b>	Carte des teneurs en Fe (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.....	115
<b>Fig. 97</b>	Carte des teneurs en Fe (mg/l), Campagne de Février 2006.....	115
<b>Fig. 98</b>	Carte des teneurs en Fe (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	116
<b>Fig. 99</b>	Carte des valeurs de la DBO <sub>5</sub> (mg/l), Campagne de Juin 2012.....	116
<b>Fig. 100</b>	Carte des tracés des profils N°1 et N°2.....	117
<b>Fig. 101</b>	Variations spatiales des différentes teneurs de la troisième campagne selon le profil N°1.....	119
<b>Fig. 102</b>	Variations spatiales de la pollution biochimique dans la troisième campagne selon le profil N°1.....	120
<b>Fig. 103</b>	Variations spatiales des différentes teneurs de la troisième campagne selon le profil N°2.....	121
<b>Fig. 104</b>	Variations spatiales la pollution biochimique dans la troisième campagne selon le profil N°2.....	122
<b>Fig. 105</b>	Variations temporelles des teneurs en métaux lourds dans le puits P14....	123
<b>Fig. 106</b>	Variations temporelles des teneurs en métaux lourds dans le point Lix. 1.	124

## Chapitre VI

<b>Fig. 107</b>	répartition de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par la décharge de Berka Zerga LWPI (Juin 2012).....	128
<b>Fig. 108</b>	Indice du risque total du Cr dans la plaine de L'Oued Zied, Juin 2012.....	136
<b>Fig. 109</b>	Indice du risque total du Cu dans la décharge de Berka Zerga, Juin 2012.....	137
<b>Fig. 110</b>	Carte de L'IR du Cr pour l'enfant (plaine de l'Oued Zied), Juin 2012.....	137
<b>Fig. 111</b>	Carte de L'IR du Cr pour l'adulte (plaine de l'Oued Zied), Juin 2012.....	138

## Chapitre VII

<b>Fig. 112</b>	Représentation schématique des points de mesure de la variable.....	142
<b>Fig. 113</b>	Estimation du variogramme.....	143
<b>Fig. 114</b>	Représentation graphique du variogramme.....	144
<b>Fig. 115</b>	Schémas théoriques d'ajustement des variogrammes.....	145
<b>Fig. 116</b>	Totales des variances et Pourcentages cumulés.....	149
<b>Fig. 117</b>	Représentation de l'ACP selon les facteurs FI et FII.....	150
<b>Fig. 118</b>	Représentation de l'ACP selon les plans FI FII des individus .....	150
<b>Fig. 119</b>	Variogramme de surface des scores factoriels des individus par rapport F1 montrant une anisotropie dans la direction NW-SE (Dir. 135°).....	151
<b>Fig. 120</b>	Variogrammes directionnels des scores factoriels des individus pour le facteur F1.....	152
<b>Fig. 121</b>	Représentation de l'estimation locale du degré de pollution dans la nappe (Juin 2012).....	153

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

L'eau est un élément important pour la vie des êtres vivants, sa valeur dépend de son état de sa disponibilité et de sa qualité. La répartition de l'eau sur l'échelle planétaire est très déséquilibrée on trouve des régions bien fournies citant par exemple l'hémisphère nord et des régions où l'eau se fait rare comme le Moyen-Orient. Le continent africain et spécialement la région du Maghreb est confrontée à cette mauvaise répartition selon la disposition géographique et les zones climatiques. Les ressources hydriques, vu l'évolution croissante de la demande en eau des différents secteurs y compris l'alimentation en eau potable de population locale, vont être soumises à plusieurs pressions parmi elles la pollution.

La pollution de l'eau est une thématique d'actualité dans les cercles scientifiques, les effets de la pollution de l'eau s'observent à différents niveaux notamment à l'échelle locale et synoptique. Les activités humaines influent sur l'eau et peuvent avoir des conséquences préjudiciables à notre santé et à l'équilibre des systèmes hydriques, parmi les principaux éléments perturbateurs, on note les industries, les transports et les activités domestiques.

La région d'Annaba dans le passé était une région à vocation agricole par excellence. Depuis les années 1960, elle s'est transformée en un pôle de développement qui génère, des emplois industriels. L'exode massif des populations a engendré un étalement urbain et la ville d'Annaba a devenu la quatrième ville d'Algérie en nombre d'habitants après la capitale Alger, Oran et Constantine. Parmi les secteurs qui enregistrent des problèmes de gestion d'une telle ville, le secteur des ordures ménagères et les décharges publiques.

Pour subvenir aux besoins de la population plusieurs sites ont été transformés en décharge urbaine, parmi eux la décharge publique de Berka Zerga qui se localise dans la plaine de l'Oued Zied dans le sous-bassin versant endoréique du lac Fetzara, qui est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-Est algérien, il a été officiellement classé comme une zone « Ramsar ». Plusieurs études ont été effectuées sur la qualité des eaux et des sols de la nappe: (Durand D.,1950; A.J.C.I,1985; Djamai R.,1993 et 2007; Zenati N.,1999; B.N.E.D.E.R,2004; Habes S.,2006; Zahi F.,2014).

Notre étude a été réalisée afin de mettre en relief l'état des lieux de la chimie des eaux superficielles et souterraines de la région de l'Oued Zied, d'évaluer l'impact des lixiviats générés par l'ancienne décharge de Berka Zerga sur l'eau et l'environnement. Pour atteindre cet objectif, on a suivi la démarche suivante :

Le **premier chapitre** décrit le cadre physique, l'étude du contexte géologique et géomorphologique de la région d'étude, montrent l'affleurement de diverses formations, le complexe de l'Edough est composé d'une variété de roches métamorphiques, en fin nous présentons un aperçu pédologique.

Le **deuxième chapitre** est consacré au traitement des données hydro-climatiques et à l'évaluation des termes du bilan hydrologique, ainsi que l'étude de la sévérité de la sécheresse dans la région

Le **troisième chapitre** est consacré à l'hydrogéologie, qui nous montre par le biais de l'apiezométrie, l'existence d'une certaine interconnexion entre les eaux de la nappe et la décharge, et que la région est caractérisée par une assez forte perméabilité indiquant, une probable exposition de la nappe à toute forme de pollution.

Le **quatrième chapitre** destiné à étudier l'hydrogéochimie, le chimisme des eaux souterraines et superficielles de la plaine de l'Oued Zied a été abordé.

Le **cinquième chapitre** de l'étude est consacré à un diagnostic de la pollution causée par les éléments métalliques contenus dans les lixiviats générés par les dépôts de l'ancienne décharge d'Annaba. L'exploitation et le traitement des différents résultats obtenus, fait le point sur le problème de la contamination des eaux de la plaine de l'oued Zied par la décharge, plusieurs méthodes ont été utilisées pour pouvoir déterminer les différentes origines de la pollution, à savoir ; les méthodes statistiques, et l'apport des profils des variations des concentrations.

Le **sixième chapitre** destiné à cartographier la pollution et son évolution en utilisant l'indice de pollution des eaux par les lixiviats (LWPI) afin de déterminer les zones les plus vulnérables à la pollution et enfin la détermination de l'impact de cette pollution métallique sur la santé humaine à l'aide de l'indice de risque (IR).

Le **septième chapitre** destiné à la modélisation du degré de la pollution métallique des eaux et son évolution en utilisant l'outil géostatistique.

Enfin l'ensemble des résultats de l'étude est discuté avec une approche méthodologique et des recommandations pour la protection des ressources en eau sont proposées dans la conclusion générale.

**CHAPITRE I :**  
**PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

### I. 1. Situation régionale

La région d'Annaba est située au Nord-Est algérien sur la totalité de la frange tellienne entre la longitude  $7^{\circ}40'$  E et la latitude  $36^{\circ}30'$  N. Elle occupe une position stratégique sur le littoral septentrional de la Méditerranée. Elle s'étend sur une superficie de  $1439 \text{ km}^2$  soit  $0,06 \%$  du territoire national, sa population est de  $609.500$  habitants environ, soit une densité de  $429 \text{ ha/km}^2$  et un taux de croissance de la population de  $1,24 \%$  (selon RGPH 2008). Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud la wilaya de Guelma, de Souk Ahras, à l'Est la wilaya d'El Tarf et à l'Ouest par la wilaya de Skikda (Fig.1).

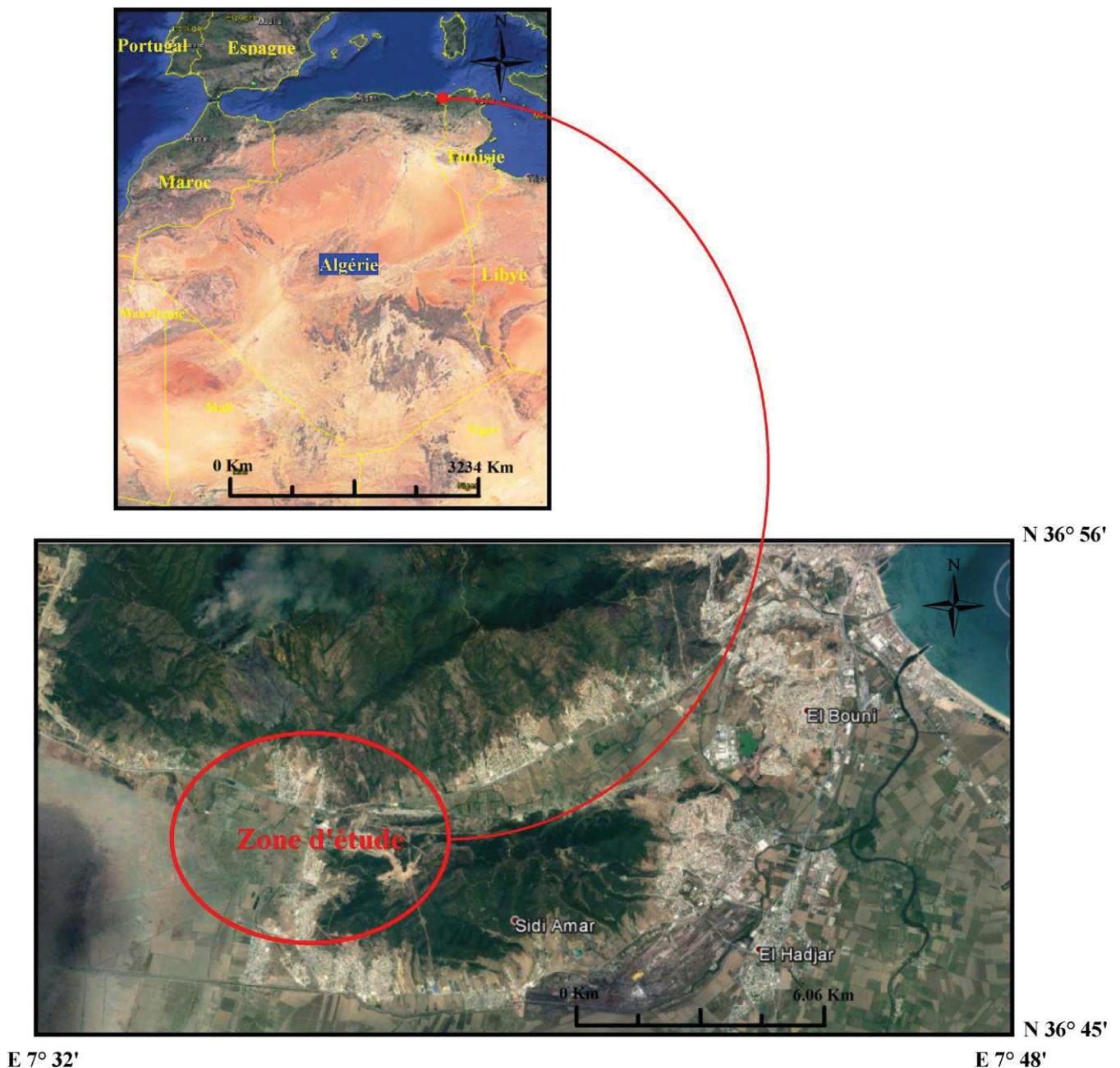


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

La région se caractérise par deux importantes chaînes de montagnes : la succession de montagnes littorales et la chaîne numidique. Les montagnes littorales correspondent à des crêtes souvent allongées et arrondies dont les altitudes varient entre 200 et 400m (monts de la Cheffia). Le mont de l'Edough est nettement séparé des reliefs, situés au Nord-Ouest sa masse principale est plongée en direction du Nord à 55° Est. La ligne de crête relativement rectiligne longue de 26 Km, débute au Nord du lac Fetzara, elle s'élève rapidement à plus de 600m pour culminer à 1008m d'altitude au Kef Seba et redescend à 867 m vers Séraïdi, elle s'abaisse ensuite régulièrement jusqu'au cap de Gard au Nord de la ville.

### **I. 1. 1. Situation de la zone d'étude**

La zone d'étude appartient au sous bassin versant de l'oued Gouilla, affluent de l'oued Zied, plus exactement dans l'endroit nommé Berka Zerga. Elle se situe à 15 km au Sud-Ouest de la ville d'Annaba dans un environnement vulnérable constitué par la plaine de l'Oued Zied et le lac Fetzara ; le réseau routier y est très dense. Elle est entourée par les massifs montagneux de l'Edough et Djebel Beléléita. Le sous bassin versant de l'Oued Gouilla fait partie du massif de Beléléita, il est limité au Sud par le col de Kef Ghorab, à l'Est par le col de Berka Zerga, au Nord par la route nationale N° 44 et enfin par la plaine de l'Oued Zied et le lac Fetzara à l'Ouest.

### **I. 2. Aperçu Géomorphologique**

La géomorphologie de la région du lac Fetzara présente trois formes morphologiques variées, dues essentiellement à la grande tectonique du cénozoïque et du quaternaire. Elles constituent deux sous bassins versants principaux caractérisés par la région du lac Fetzara à l'Ouest, et la Seybouse et l'Oued Meboudja à l'Est.

#### **I. 2. 1. Les montagnes**

Le mont de l'Edough est limité à son piémont Sud et Est par le lac Fetzara, la plaine d'Annaba et la mer Méditerranée à l'Ouest, ce massif est nettement séparé des reliefs situés au Nord-Ouest par la vallée de Oued El Aneb. Sa masse principale est plongée en direction du Nord à 55° Est. La ligne de Crête relativement rectiligne longue de 26 km, débute au Nord du lac Fetzara, elle s'élève rapidement à plus de 600 m pour culminer à 1008 m d'altitude au Kef Seba et redescend a 867 m vers Séraïdi, elle s'abaisse ensuite régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord de la ville d'Annaba (Fig.2, 3).

Entre Beléléita et Bouhamra se creuse la vallée transversale de la basse Meboudja qui prend naissance au pied de la ride dunaire limitée à l'Est par la cuvette du Lac Fetzara, et qui entre en confluence avec l'Oued Seybouse au Nord d'El Hadjar.

Enfin à l'Ouest, Djebel l'Edough est relié par deux ensembles de collines ; le premier situé entre les deux communes de Oued El Aneb et Berrahal (226 m), le second au Nord de Boumaiza (130 m).

### **I. 2. 2. Sols et couvert végétal**

La zone d'étude est formée par un ensemble d'unités bien distinctes. L'interaction du relief, de l'altitude et des pentes, de la roche mère et de la tectonique, peut ainsi déterminer le façonnement du paysage naturel de la cuvette lacustre de Fetzara. Ce qui explique la diversité de l'occupation du sol.

A ce propos, on peut distinguer, en dehors des zones urbanisées, des zones occupées par la végétation naturelle ou par les reboisements et des zones de mise en valeur culturale.

### **I. 2. 3. Sols des versants**

Les versants Nord et Sud disposent d'une remarquable couverture végétale donnant l'aspect d'une succession visible à l'œil nu, le maquis sur les niveaux plus ou moins hauts et la forêt sur les niveaux de haute altitude.

Le Djebel Menchoura, au Sud-Est très dégradé et ne se reconstitue que très lentement, bien qu'il ne fasse l'objet d'aucune exploitation, il s'agit uniquement de chêne-liège, de pin maritime et surtout d'eucalyptus au bord des routes. Enfin, des aménagements agricoles en versants ont été mis en oeuvre par le développement d'arboriculture en montagne, comme l'olivier, le péchier,...etc.

Ailleurs, principalement sur les grès, c'est le domaine du maquis méditerranéen typique à cistes et calycotomes associés à des plantes annuelles, le plus souvent tubéreuse et à des touffes de brachypodes rameux. Le Diss n'apparaît en abondance qu'au-dessus de 600 m d'altitude.

Au nord, la forêt occupe les sommets du massif de Berrahal et la région du Douar Toubéïga à l'Ouest. Le chêne-liège est l'essence principale couvrant environ 1/3 de la superficie forestière, cette forêt est exploitée en matière de bois et de liège. Elle fournissait ce dernier à l'unité SNLB localisée à l'Oued El Aneb.

Un peu plus bas, la présence du maquis révèle la dégradation d'une ancienne forêt ; elle est due aux actions anthropiques continues (les incendies, parcours du bétail),

il serait donc nécessaire de préserver ces zones contre le pâturage pour rétablir l'équilibre naturel et lutter contre le phénomène de dégradation.

Les reboisements sont constitués de deux essences : l'une feuillue (Eucalyptus) et l'autre résineuse (Pin maritime), ce qui a contribué à une régénération de la forêt et une stabilisation des versants.

Enfin, l'agriculture de piémont est axée sur une arboriculture rustique (olivier, figuier et figuier de barbarie), ainsi qu'un maraîchage légumier varié, léger et limité.

#### **I. 2. 4. Sols alluvionnaires**

La végétation pastorale (prairie naturelle) occupe les zones basses de la région et principalement les alentours du lac Fetzara.

La présence de cette couverture végétale, constitue une véritable réserve de fourrage pour le cheptel qui est important dans la région. Le surpâturage pose le problème de régénération des herbes.

L'agriculture de plaine est surtout axée sur le maraîchage, la tomate industrielle, la céréaliculture et la culture fourragère, ainsi que l'arboriculture fruitière en irriguée pour les agrumes et fruits à noyaux.

#### **I. 2. 5. Plaine d'Annaba**

La plaine d'Annaba est drainée par l'Oued Seybouse et située immédiatement en arrière de la ville d'Annaba.

Elle est limitée au Nord par l'anticlinal du massif de l'Edough et au Sud par l'anticlinal de la chaîne numidienne, avec une topographie relativement régulière. Dans l'espace ainsi défini, trois secteurs présentent chacun des formes différentes : la basse plaine dans laquelle s'encaisse l'Oued Seybouse, les bordures où on peut observer des glacis et le littoral où quelques formations quaternaires sont visibles. Cette basse plaine a une forme inclinée et légèrement bombée avec la Seybouse comme axe de drainage. Celle-ci présente un tracé très sinueux avec de nombreux méandres, puis jusqu'à l'embouchure, elle prend un tracé plus rectiligne.

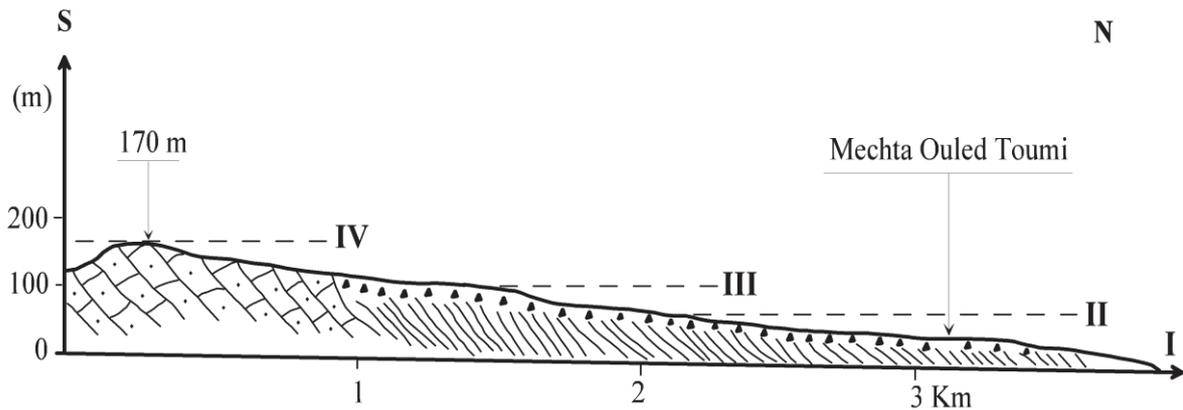
A l'Est et à l'Ouest, la basse terrasse sableuse de la Seybouse disparaît pour laisser la place à des dépressions de 2m d'altitude et aux formations argileuses noires et hydromorphes (marais de Boukhmira près de l'aéroport d'Annaba).

Actuellement à l'Ouest la Seybouse se jette dans la mer Méditerranée à Sidi Salem par l'intermédiaire d'un chenal artificiel creusé pendant les années 1960, c'est

pour éviter l'envasement du port par les inondations de l'Oued Seybouse (apport de matériaux qui se déposent au fond de la mer)

### I. 2. 6. Lac Fetzara

La cuvette du Lac Fetzara présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques, elle est due à une tectonique active pendant le Quaternaire ; elle est représentée par une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13km du Nord au Sud (Habes S. 2013).



**Légende :** I-II-III-IV : niveaux de glacis

**Figure 2 : Coupe sur le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara (Marre A., 1992).**

Au Sud, un véritable piémont avec six niveaux de glacis, s'est construit en aval du tell Nord Guelmien. La coupe (Fig.2) montre bien qu'il existe sur ce piémont quatre niveaux de glacis. Au-dessus du niveau IV, la coupe montre Bien des replats de petites tailles qui tronquent les grès pseudo numidiens de ces massifs (Belhamra A., 2001).

Cette cuvette s'est formée suite à une grande tectonique active pendant le cénozoïque et le Quaternaire (Fig. 03), ainsi la série de Fetzara s'est développée en bordure du Lac Fetzara et plus largement autour des Djebels Debar, Grar et Taya (Vila J.M., 1980), et elle présente deux bordures dissymétriques orientées, l'une vers le Nord et l'autre vers le Sud. Il s'agit donc, d'une région où l'érosion a beaucoup fonctionnée durant le Quaternaire.

Au Nord, le massif de l'Edough pénètre brutalement dans la cuvette du lac Fetzara, et, peu de formes quaternaires assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Sur le piémont de la bordure Nord du Lac, la tectonique semble avoir été plus active que sur la bordure Sud (Marre, 1992).

Le fond de la cuvette du lac est occupé, à l'Ouest par le lac proprement dit, et à l'Est par la plaine d'El Hadjar qui se prolonge par celle d'Annaba. Ces deux ensembles morphologiques sont séparés par un cordon dunaire, celui-ci sert de ligne de partage des eaux,

entre le lac Fetzara et l'Oued Meboudja, et il ferme aussi la dépression.

Le canal de dessèchement, long de 14km, assure le drainage des eaux du lac en période pluvieuse, il traverse la cuvette de Fetzara selon une direction Ouest-Est et rejoint le cours d'eau de la Meboudja où il assure la vidange du lac.

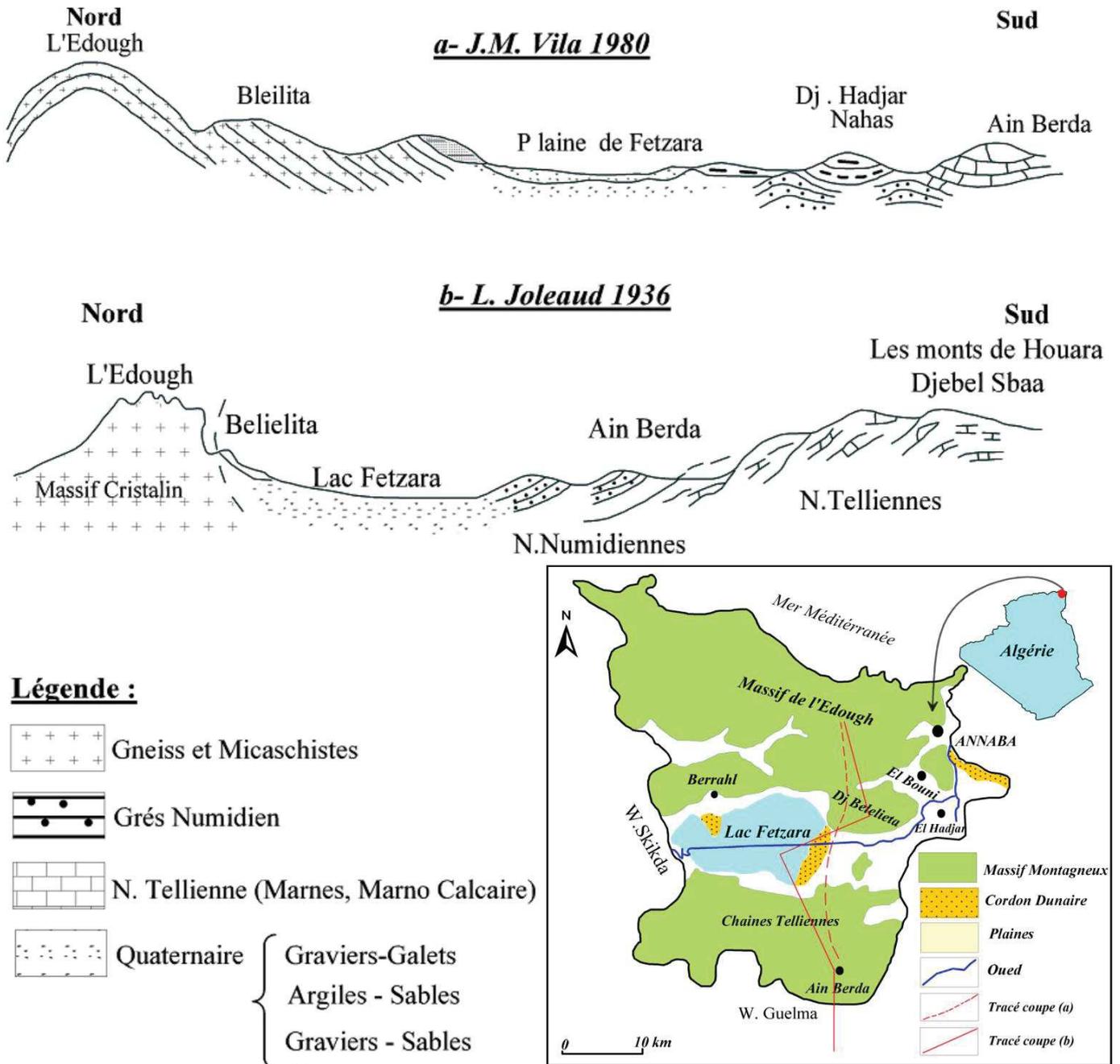


Figure 3 : Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough. (In Habes S. 2013 Modifie).

Le long du canal on observe, des sables argileux jaunâtres avec, à la base des traces d'hydromorphie, des niveaux noirs argileux qui se terminent en biseaux vers l'aval.

Ils sont riches en matières organiques. On a donc là, une alternance de phases rhéxistatiques pendant lesquelles le lac recevait des formations sableuses venues soit des versants grâce au transport des Oueds, soit du littoral par transport éolien, et des phases biostatiques pendant que le lac devenait marécageux avec une faune lagunaire à marine (Haou. 2001).

En effet, les arrivées sont des espèces (faunes) qu'on retrouve à l'heure actuelle dans les estuaires où les eaux sont peu salées. La présence de cette faune au fond du lac Fetzara indique donc, la relation ancienne entre cette dépression et la mer.

La liaison entre le Lac et la plaine d'El Hadjar s'effectue à partir de l'Oued Mehoudja qui sinuait autrefois entre Beléléita et Bouhamra avant de se relier dans l'Oued Seybouse.

La plaine d'El Hadjar se termine brutalement au Nord, contre le Djebel Beléléita, dernier mont du massif de l'Edough. Le versant de ce Djebel est rectiligne et abrupt. Il s'agit certainement d'un contact par faille.

Deux niveaux de petits glacis peuvent être observés au-dessus de la plaine d'El Hadjar, ils sont nettement déformés et plongent vers le fond de la plaine et disparaissent sous la basse plaine sableuse.

La plaine d'El Hadjar a donc joué en subsidence jusqu'à une date récente. Cette subsidence semble avoir été très importante au droit du cordon dunaire du lac Fetzara qui a permis de montrer à la fin le rôle de la tectonique et du climat dans l'élaboration du lac. La tectonique est responsable d'un jeu en subsidence de la dépression. En effet, les failles qui limitent cette cuvette sont restées actives pendant tout le quaternaire.

### **I. 3. Contexte géologique**

#### **I. 3. 1. Géologie régionale**

##### **I. 3. 1. 1. Complexe cristallophyllien**

En Algérie, le massif de l'Edough est le plus oriental des massifs cristallophylliens du littoral (Fig.4) (Gleizes G., et al 1988). C'est un massif cristallin externe de la chaîne Alpine périméditerranéenne, considéré souvent comme étant la continuité des massifs internes kabyle de la chaîne des maghrebides.

Il se présente en un brachyanticlinal à prédominance de gneiss entourés de micaschistes à intercalations de marbres, d'amphibolites et de schistes satinées (Vila J.M., 1980), il s'étend de 50 km de long sur 20 km de large et d'orientation axiale N60 (Fig.4).

### **I. 3. 1. 2. Subdivision du complexe**

D'après les travaux de G. Gleizes et al (1988) le massif de l'Edough pourrait être subdivisé en trois unités (Fig.5) :

- L'unité supérieure
- L'unité intermédiaire
- L'unité de base

#### **I. 3. 1. 2. 1. L'unité supérieure**

Elle affleure essentiellement au Cap de Garde, elle est composée de micaschistes à grenats, de sericitoschistes, de chloritoschistes et de quartzites. Elle contient des niveaux caractéristiques de tourmaline qui forment parfois des amas ou des lentilles souvent très continue. La découverte d'Acritarches dans les intercalations de quartzites et de lydiennes précise l'âge paléozoïque de cette série (Ilavsky et Snopkova, 1987). Les schistes contiennent une grande quantité de grenats et de baguettes d'andalousite et de staurotide. Vers sa base s'intercale une dalle de gneiss ocellés dont la puissance varie de 10 à 100 m issue de la déformation d'un leucogranite : il s'agit en effet de roches claires pratiquement dépourvus de biotites, toujours riche en tourmaline à grains grossiers et à texture porphyroïde, il existe aussi des faciès à grain fin d'aspect léptynitique. Les horizons de tourmaline dans les micaschistes sont plus nombreux à l'approche de la lame de gneiss. Le contact entre cette unité et l'unité intermédiaire est anormal, matérialisé par une faille majeure (le cas du Cap de Garde).

#### **I. 3. 1. 2. 2. L'unité intermédiaire**

Elle est caractérisée par une alternance de micaschistes à grenats et parfois même à disthène et de calcaires métamorphiques.

Les micaschistes ne forment que des lames d'épaisseur réduite (quelques mètres à une centaine de mètres) sauf dans le secteur périphérique de Cap de Garde où ils réapparaissent en position verticale avec une épaisseur cumulée de plus de 1000 m.

Ces micaschistes riches en feldspaths sont jalonnés par un ou plusieurs horizons de marbres constitués presque uniquement de calcite bien cristallisée et d'autres minéraux accessoires comme la muscovite, phlogopite, pyrite, diopside, trémolite, grenat.

Outre les marbres on rencontre aussi des amphibolites et des pyroxénites souvent réduit à des amas plus au moins continus à lenticulaires.

Au Cap de garde le contact entre les marbres et les micaschistes est souligné par des skarns.

Le contact entre cette série et la série gneissique de base est parallèle à la foliation régionale (Hamor D, 1992).

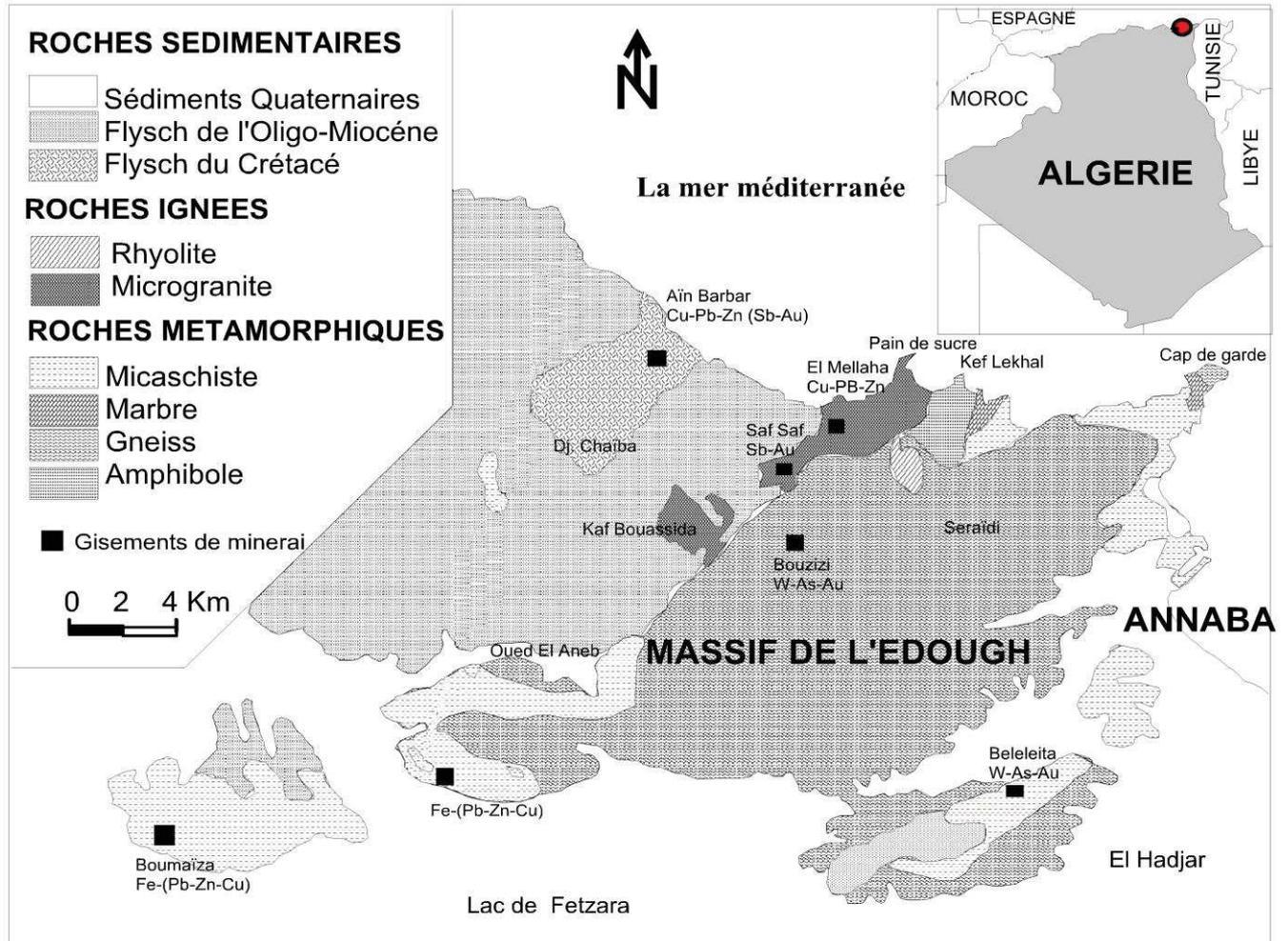


Figure 4 : Carte géologique du massif de l'Edough. (Laouar R., et al., 2002)

### I. 3. 1. 2. 3. L'unité de base

On y distingue des gneiss clairs, des gneiss sombres et des leptynites. L'ensemble constitue le cœur de l'anticlinal et sont observés à la périphérie grâce aux accidents tectoniques.

Cette unité gneissique est riche en matériel quartzo-feldspathiques, en micas, sillimanite et parfois tourmaline.

Les gneiss clairs sont pauvres en biotite et sont caractérisés par de gros yeux de feldspath de 3 à 5 cm.

Quant aux gneiss sombres, on les trouve à la périphérie du massif tel que le Cap de Garde, au Nord du massif de Beléléita et au Sud-Ouest de Berrahal. Ce sont des gneiss finement lités, très riches en biotite, renfermant des grenats et de la tourmaline.

Les leptynites sont des niveaux holo-leucocratiques riches en quartz, feldspath, muscovite et renfermant parfois des grenats et de la tourmaline qui forment souvent des linéations parallèles à la foliation.

**I. 3. 1. 3. Les roches ignées**

Selon J. Hilly (1962) les roches ignées du massif de l'Edough font partie d'une même série calco-alcaline et peuvent être divisées en quatre groupes :

- Groupe microgranodioritique
- Groupe rhyolitique
- Groupe dioritique
- Groupe andésitique

**I. 3. 1. 3. 1. Groupe microgranodioritique**

C'est le groupe le plus important dans le massif de l'Edough. Il se présente selon le cas, en dykes, en petits pointements, en bosses ou laccolites plus ou moins étendues.

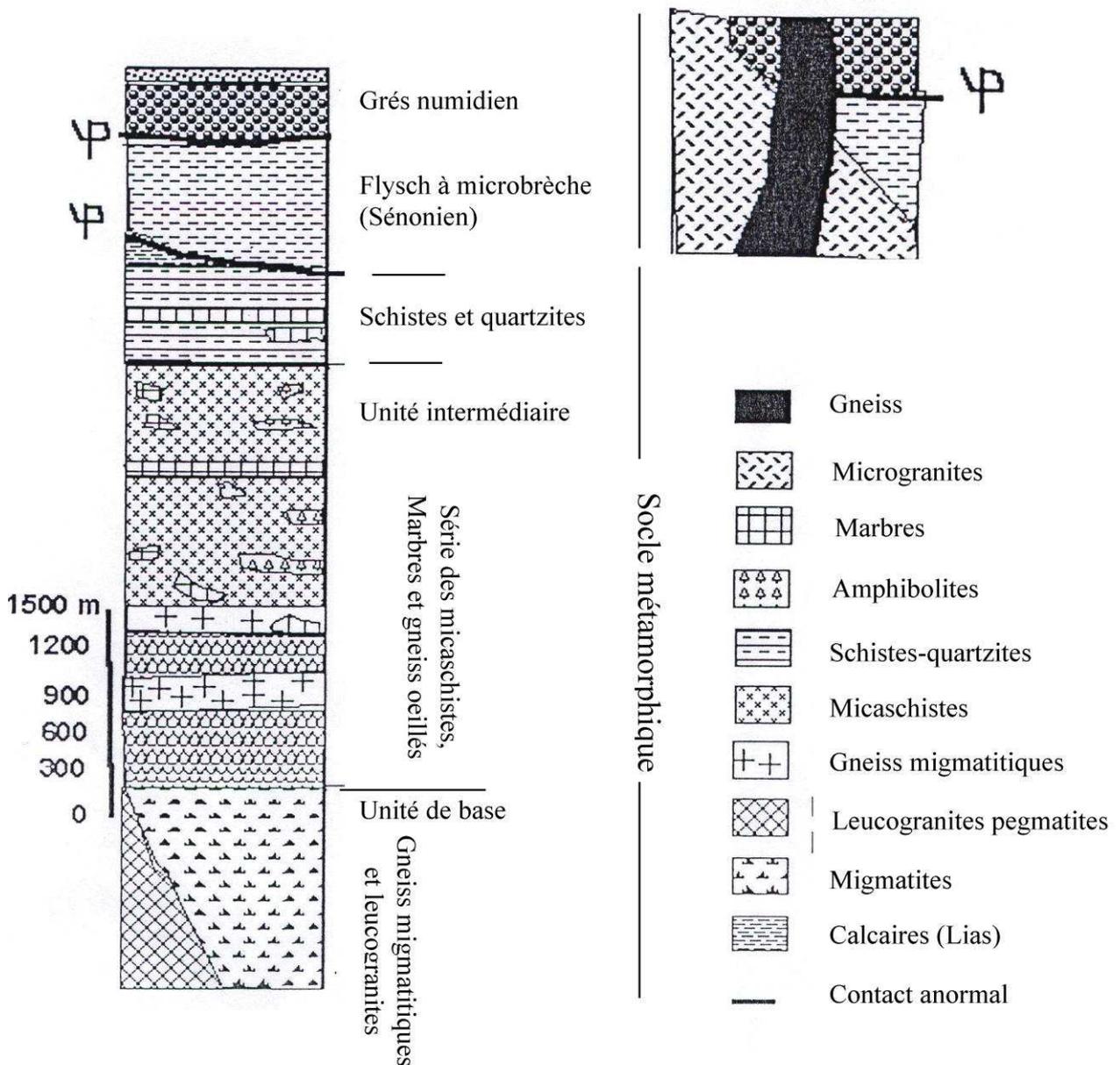


Figure 5 : Colonne lithologique du massif de l'Edough. (D'après Hammor D., 1992)

La profondeur de mise en place diminue de l'Est à l'Ouest. Il affleure à Oued El Afris (ou pain de sucre) et dans la région de Saf-Saf au Nord de l'Edough. Il recoupe les gneiss et les micaschistes. Le quartz est rarement visible à l'œil nu (Djerrab et Gherbi, 1991).

### **I. 3. 1. 3. 2. Groupe rhyolitique**

On le rencontre au Nord-Ouest de l'Edough, il se présente soit en filon soit en massif. Les rhyolites massives présentent des phénocristaux millimétriques de quartz, feldspath, biotite et tourmaline.

Il est à noter la présence d'enclaves de gneiss, de micaschistes, de grés numidien, flysch Sénonien et microgranite au sein de rhyolites. Par contre les filons rhyolitiques sont des roches blanchâtres constituées d'une matrice microlitique, de biotite et quartz. Quand aux groupes dioritique et andésitique, ils ne se situent pas exactement dans le massif de l'Edough, mais plutôt du côté du Cap de Fer et de Chetaïbi.

### **I. 3. 1. 4. Les roches sédimentaires**

On distingue deux types de flyschs recouvrant partiellement le massif :

#### **I. 3. 1. 4. 1. Les flyschs ou grés numidiens (Oligo-Miocène)**

Montre une alternance de grosses barres métriques à décamétriques de grés grossier à dragées de quartz et de minces couches pelitiques dans les bancs de grés très minces à la base, formant de grosses barres au sommet de la série (Laouar, 2002).

Les flyschs numidiens reposent sur les flyschs sénonien et sont séparés d'eux par une zone bréchiqne intensément silicifiés et chloritisé.

#### **I. 3. 1. 4. 2. Les flyschs sénoniens (Maestrichtien)**

Ils affleurent sous le numidien en fenêtre près d'El Mellaha et Saf-Saf au Nord-Ouest du massif. Ils sont transgressifs sur le socle métamorphique. Ils présentent l'aspect du schistes argileux de teinte noir bleutée devenant verdâtre suite à l'altération et intercalé avec 20 à 50 cm de calcaire sableux et une microbrèche calcaire de couleur gris bleuté (Laouar, 2002).

On note aussi des indices de traces de matériels volcano-clastique (fragments de lave vitreuse ou microlitique).

### **I. 3. 1. 5. Tectonique**

Au moyen de photographie aériennes et de levés géophysiques (EREM) à travers le massif de l'Edough, Aissa ; 1985 a classé les accidents tectoniques en :

#### **I. 3. 1. 5. 1. Accidents tectoniques importants**

Une première famille dont l'orientation varie de NW-SE à WNW-ESE avec la direction la plus fréquente de N120° à N150° et que l'orientation N140° à N150° d'un bon

nombre de dykes permet de conclure que cette famille correspondrait à un système de failles décrochantes dextres (mont Eddikra, Kef Guelâa).

Une deuxième qui semble être conjuguée à la première, dirigée NNE-SSW (direction fréquente N28° en moyenne), cette famille correspondrait à un système de failles décrochantes sénestres. Il y a aussi les mêmes accidents au NW du massif dans les petits massifs microgranitiques.

Des rares accidents tectoniques profonds d'orientation Est-Ouest (au Sud de la Voile Noire et au Sud de Koudiet Tenfous) et d'autres au Sud de Karezas (A. Sattor, 1968) de pendage 55° à 70° vers le sud, affectées par une silicification et d'une tourmalinisation.

#### **I. 3. 1. 5. 2. Petites fractures**

Dans les roches métamorphiques, ce sont des petites failles normales et inverses d'étendue relativement faible (horizontale et verticale) et de pendage variant entre 45° et 90°. Près des filons métallifères elles sont remplies par du quartz et de rares sulfures.

#### **I. 3. 1. 6. La minéralisation**

La métallogénie du massif de l'Edough se distingue particulièrement par les gîtes polymétalliques d'Aïn Barbar et des gisements ferrifères et arseno-wolframifères du versant Sud. Les autres minéralisations essentiellement filoniennes recoupent le socle et sa couverture, sont d'une importance moindre. Elles se sont probablement développées lors de la circulation des fluides hydrothermaux le long du réseau de fractures liées probablement à la mise en place des roches microgranodioritique et rhyolitiques.

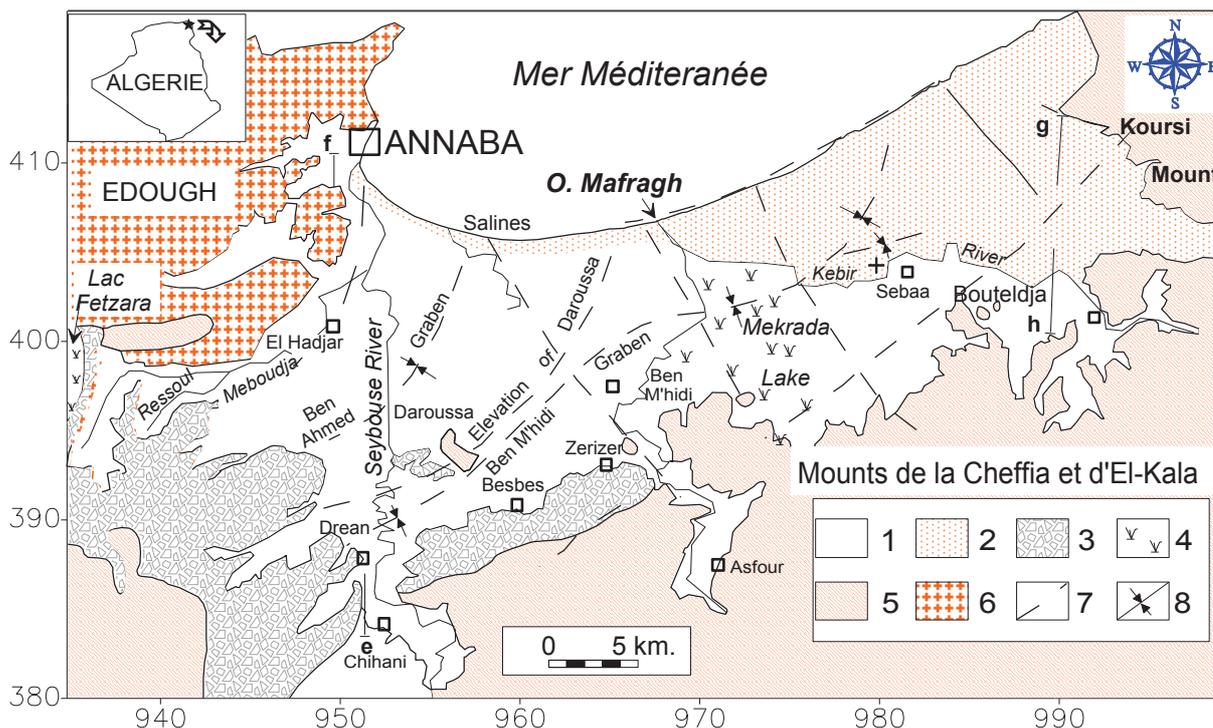
#### **I. 3. 2. Géologie locale**

La région de berka zerga fait partie du massif de Beléléita. L'étude géologique du sous bassin versant de la décharge (Oued Gouilla) permet la mise en évidence de plusieurs formations géologiques à savoir de bas en haut dans un ordre chronologique de formation, le métamorphisme (les gneiss, les micaschistes et les calcaires cristallins), et les sédimentaires (le calcaire marno gréseux, les argiles numidiennes, le grès numidien, les éboulis de pentes et les alluvions) (Fig.6).

##### **I. 3. 2. 1. Les roches métamorphiques**

On distingue trois variantes de roches :

- Les gneiss (résultent du métamorphisme des roches granitiques) ;
- Les micaschistes ;
- Les calcaires cristallins.



**Figure 6 : Situation géologique et structurale des plaines de la région d'Annaba-Bouteldja.**

(D'après Strojexport, 1975, modifié par A. HANI 2002).

**Légende :** 1 : Alluvions récentes et actuelles ; 2 : Dunes ; 3 : Alluvions anciennes ; 4 : Marécage ou lac ; 5 : Grés et argile numidiens ; 6 : Formations métamorphiques ; 7 : Faille ; 8 : Axe des fosses.

### I. 3. 2. 1. 1. Les Gneiss

Le massif gneissique du Berka Zerga est constitué essentiellement de roches à grains moyens à grossiers montrant une foliation souvent nette, caractérisée par des lits généralement de teinte sombre, riche en minéraux ferromagnésiens alternant avec des lits claires de quartz et de feldspath.

Ce massif est surmonté par une couche d'environ 1m d'épaisseur de gneiss altéré, constitué essentiellement de grains de quartz et de feldspath, ce qui donne à cette couche un aspect de sable argileux.

Les gneiss, c'est la roche dominante à l'affleurement. Elle constitue la plus grande partie du site de la décharge, ils apparaissent depuis l'entrée jusqu'à l'altitude 191 m. Couvrant ainsi toute la rive droite de l'Oued Gouilla.

Ces gneiss ont une couleur sombre, généralement orientée NW° 80°. On signale la présence des filons de quartz de l'ordre de 1 à 5 cm d'épaisseur ; parfois ils sont massifs.

Il s'agit des Gneiss à tourmaline avec des lentilles de cipolin (calcaire cristallin plus au moins marbre). D'après l'étude pétrographique, on peut dire qu'il s'agit des gneiss à migmatitiques.

Du point de vue hydrogéologique, les gneiss altérés peuvent constitués le siège d'une nappe aquifère.

### **I. 3. 2. 1. 2. La série des micaschistes**

C'est une série de roches métamorphiques à grains généralement moyens ayant une schistosité et une foliation marquées. Riche en feuillés de micas, visible à l'œil nu, d'où elle se divise facilement en plaquettes (quelques mm ou cm).

Cette série apparaît au niveau du quai de la décharge. C'est une série d'alternance de schiste, micaschiste à grenat et des niveaux de calcaires cristallins l'épaisseur de cette association varie de 5 à 20 mètres. Elle forme une bande étroite d'environ une centaine de mètres de long.

### **I. 3. 2. 1. 3 Les calcaires cristallins**

Ces calcaires affleurent au niveau des carrières. Ce sont des calcaires de couleur bleutée, dur à la cassure et généralement massifs. Au niveau du sous bassin versant de la décharge il existe deux pointements de calcaires cristallins exploités (carrières) pour des agrégats.

L'épaisseur des calcaires est estimé à environ une cinquantaine de mètres de calcaires massifs, mais il existe des niveaux très réduits de calcaires associés à la série des alternances des micaschistes.

Ce sont des roches calcaires à cristaux de calcite visible à la loupe ou à l'œil nu, ayant fréquemment des cassures translucides à grain saccharoïde.

### **I. 3. 2. 2. Les roches sédimentaires**

On distingue plusieurs types de roches :

- Les calcaires marno gréseux (flysch)
- Les argiles numidiennes (argile de base)
- Le grès numidien (sommet)
- Les éboulis de pente (versants)
- Les alluvions (des oueds, la plaine)

#### **I. 3. 2. 2. 1. Les calcaires marno gréseux (Flysch)**

C'est un faciès de type flysch constitué par une formation d'alternance de calcaire gréseux de couleur verdâtre avec des niveaux marneux à matériel détritique.

Cette formation s'est déposée sur le calcaire cristallin cité ci-dessus. L'épaisseur est évaluée à environ 150 mètres. Parfois la présence des éboulis de grès sur les versants rend difficile l'observation de la continuité.

#### **I. 3. 2. 2. 2. Les argiles et grès numidiennes**

Les dépôts de numidien très répons dans la partie occidentale du massif de Beléléita comprennent essentiellement des argilites schisteuses et des grès ; les argilites dominant à la base, admettant des bancs peu épais de quartzite et de grès, tandis que dans la partie supérieure de la formation on observe surtout de grosses barres de grès quartzeux séparées par des lits argileux.

#### **I. 3. 2. 2. 3 Les Eboulis de pente (Versants)**

Dans ce secteur d'étude on remarque de bas en haut la succession des formations suivantes :

- A la base un substratum gneissique ;
- Eboulis très grossiers très volumineux (1m<sup>3</sup>) emballés dans une arène gneissique ;
- Eboulis relativement moins grossiers, uniquement formés de grès numidiens. Dans la partie inférieure (1.50m), les blocs de grès présentent souvent une pellicule blanchâtre. Ceux de la partie haute (1m) ont gardé leur teinte marron.

#### **I. 3. 2. 2. 4. Les alluvions (des Oueds et la plaine)**

Cette formation se présente sous forme de couche grise, sableuse, reposant en discordance sur les formations antérieures d'épaisseur variable (quelques décimètres).

Du point de vue age, L. Joleaud (1936) les a cartographiés soit comme dépôts anciens, sableux ou limoneux, de la Gueraa Fetzara (Pléistocène récent), soit comme conglomérats de Numidie (Eocène supérieur, Oligocène).

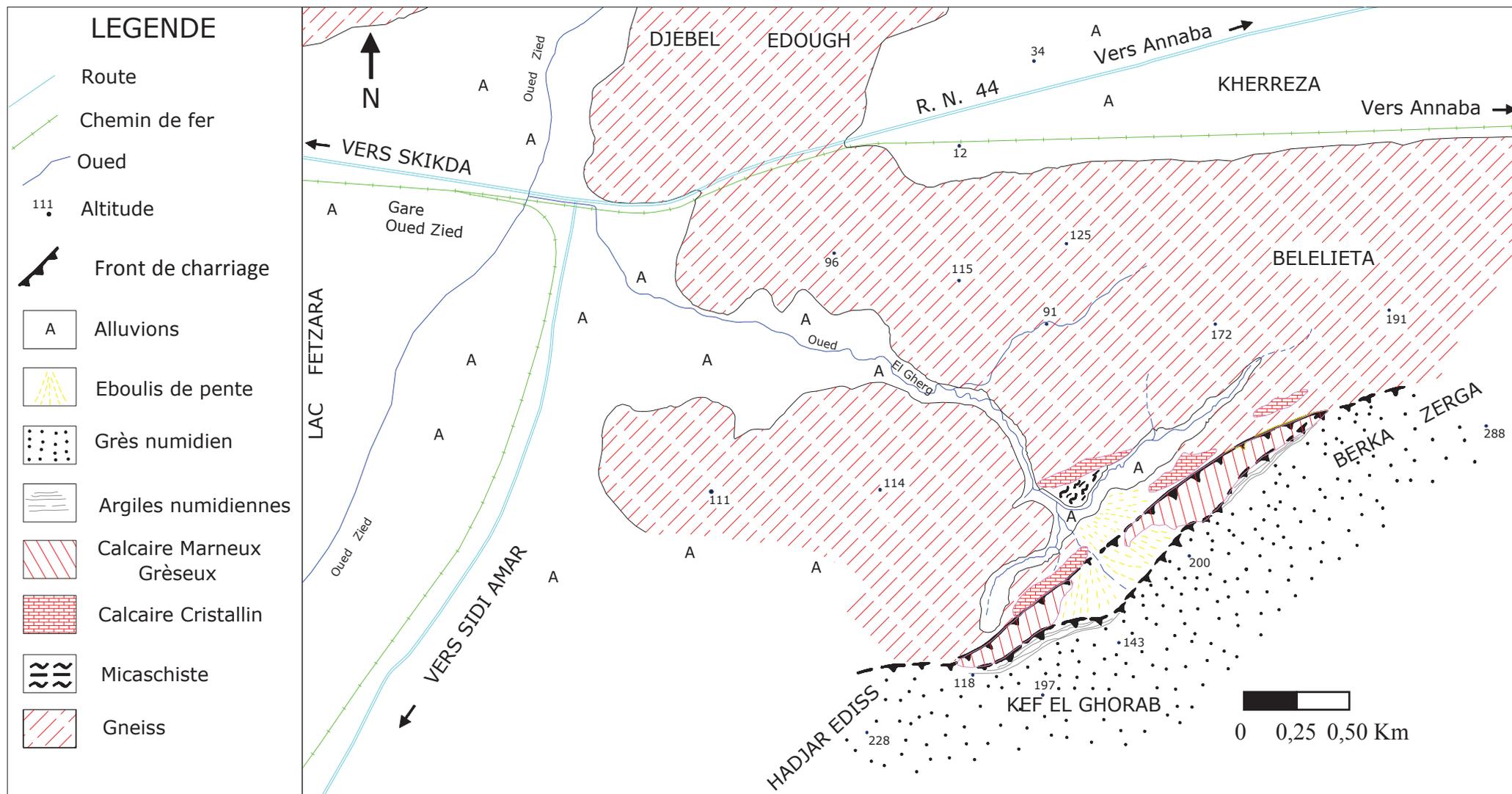


Figure 7 : Carte géologique de La région de Berka Zerga.

#### **I. 4. Etude Pédologique**

Deux études pédologiques ont été effectuées sur la région d'étude, le but étant de mettre en évidence les différentes classes du sol de la région de Fetzara, (A.I.C.1., 1985; B.N.E.D.E.R., 1997 - 2004).

La classification retenue s'inspire de celle établie par Duchaufour correspondant à la classification française.

L'étude effectuée par B.N.E.D.E.R., 2004 ; fait ressortir deux classes de sols dans notre zone d'étude qui se répartissent comme suit :

##### **I. 4. 1. Les différentes classes du sol**

###### **I. 4. 1. 1. Les sols peu évolués (SPE)**

Les sols peu évolués sont d'origine non climatique. Ces sols ont été constitués sur une couche d'apport constituée de sables et d'argiles. L'épaisseur varie selon leur position topographique. On les rencontre sur les terres onduleuses des pieds des montagnes et sur les terrasses.

Ces deniers se caractérisent par une faible rétention d'eau, une perméabilité très élevée et un taux de matières organiques moyen.

###### **I. 4. 1. 2. Les sols vertisoles (SV)**

Ces sols existent sous forme d'une seule sous forme. Ils sont répartis dans la zone Nord-Est du Lac Fetzara et, sont riches en argile gonflante. Les vertisoles ont de mauvaises propriétés physiques (sols lourds), ils possèdent une texture très fine et présentent un mauvais drainage. Ces sols se divisent en deux classes :

- Les sols à drainage externes nul ou réduit ;
- Les sols à drainage externe possible.

##### **I. 4. 2. Caractéristiques physiques des sols**

###### **I. 4. 2. 1. Granulométrie**

Elle est considérée comme l'une des plus importantes propriétés concernant la qualité physique des terres. C'est la composition élémentaire du sol, c'est-à-dire les proportions des particules minérales constitutives des sols classées suivant leur dimension.

D'après les travaux de A.J.C.L, 1985 ; B.N.E.D.E.R., 1997, pour ressortir le caractère dominant de ces sols, les résultats des argiles, des limons, et des sables totaux ont été reportés sur le triangle des textures. On constate la dominance de la texture limono argileuse, d'après les proportions mentionnées dans le (Tab.1), les argiles et les limons dominent dans la plupart des sols du lac Fetzara, la texture du sol déterminée, permet d'expliquer certaines

propriétés du sol, telles que : son comportement vis-à-vis du développement de l'eau, de l'air et des plantes.

**Tableau 1 : Les proportions des particules en pourcentage : Minimum, Maximum, et la Moyenne. (A.J.C.L, 1985 ; B.N.E.D.E.R., 1997)**

	Lac Fetzara		
		Sols peu évolués	Sols Vertisols
Argile %	Min	1	14
	Max	45	52
	Moyenne	15.44	30.65
Limon %	Min	6	17
	Max	32	44
	Moyenne	16.52	30.70
Sable %	Min	13	21
	Max	142	68
	Moyenne	68.14	39.28

#### I. 4. 2. 2. La densité

Les sols de la région d'étude ont une densité qui varie entre 2.1g/cm<sup>3</sup> et 2.8g/cm<sup>3</sup> (Tab.2), d'après les résultats, la porosité totale des sols varie entre 31.83 % et 42.23%, si l'on se réfère à l'échelle proposée par Katchinski (in Kaouritchev, 1983), la porosité totale des sols varie entre les classes faibles et insatisfaisantes.

**Tableau 2 : La densité apparente, la densité réelle et la porosité totale des sols : le maximum, le minimum et la moyenne. (A.J.C.1., 1985)**

	Sols peu évolués	Sols Vertisols
<b>Densité Apparente</b>	g/cm <sup>3</sup>	
<b>MAX</b>	1.9	1.9
<b>MIN</b>	1.09	1.22
<b>MOY</b>	1.45	1.52
<b>Densité Réelle</b>	g/cm <sup>3</sup>	
<b>MAX</b>	2.7	2.4
<b>MIN</b>	2.2	2.1
<b>MOY</b>	2.51	2.23
<b>M % Porosité totale</b>	= ( 1 - Da / Dr) * 100	
<b>MAX</b>	50.45	41.90
<b>MIN</b>	29.62	20.83
<b>MOY</b>	42.23	31.83

### **I. 4. 2. 3. La perméabilité**

De la même manière que la porosité, la perméabilité est liée à la texture du sol. Une terre sableuse est caractérisée par une forte infiltration d'eau et une faible capacité de rétention, ceci est dû à la faiblesse de la force de surface. Une terre très argileuse est souvent difficile à travailler en temps sec, elle est dure, en période humide, les sols argileux sont plastiques et collants, c'est pour cette raison qu'on les appelle sols lourds, avec une faible infiltration de l'eau ; car ils ont une faible perméabilité, et leur capacité de rétention d'eau est très importante. La texture moyenne permettra à la fois l'écoulement de l'eau et une bonne diversification, car la matière organique évolue lentement dans ce type de sol. De nombreux travaux ont montré que la perméabilité des sols dépend aussi de la concentration saline de l'E.S.P. (Pourcentage de Sodium échangeable) (Mc Neal, 1968 ; Halim & al.; Aouds & Rwanika, 1991 ; Djamai, 1993). Les sols du Lac Fetzara ont un coefficient plus souvent inférieur à 2cm/h.

En comparant le chiffre de 2cm/h avec l'échelle de la perméabilité Duchaufour, (1970), on constate que les sols du Lac Fetzara sont moyennement perméables avec : un coefficient de perméabilité (K) entre 1 à 18cm/h.

### **I. 4. 3. Occupation du sol**

L'occupation actuelle du sol est divisée entre une occupation naturelle et une occupation résultant de l'action de l'homme.

D'après la géomorphologie de la région, on distingue trois zones :

La montagne : zone de maquis dense ;

Le piémont : zone d'extension urbaine en alternance avec les zones de maquis ;

La plaine : zone à vocation agricole et industrielle.

#### **I. 4. 3. 1. Le piémont**

Sur le piémont sud de l'Edough, on peut trouver deux types d'occupation du sol coexistants : occupation agricole et occupation humaine. Cette occupation est donc liée à deux principaux facteurs :

Le type des formations superficielles qui reflètent la géologie de la région, la pente qui s'adoucit en approchant de la vallée, ce qui favorise l'accumulation des formations superficielles qui permettent la pédogenèse, donc l'agriculture.

##### **I. 4. 3. 1. 1. Occupation agricole**

D'après les formations superficielles, on a constaté une occupation agricole très limitée dans la région de l'Oued Zied alors que, les autres lieux sont délaissés aux pâturages et

aux maquis.

#### **I. 4. 3. 1. 2. Occupation humaine**

La croissance industrielle et démographique dans la wilaya d'Annaba depuis les années 70 jusqu'à nos jours, a conduit à un exode rural massif des populations vers celle-ci. Cet accroissement de la population dans les grandes communes a provoqué l'extension des zones urbanisées.

Les problèmes des terrains fonciers limités dans ces communes, aggravent celui du logement. Une politique des nouvelles cités lancées a pour objectif de contribuer à l'amélioration des conditions de vie pour la population.

C'est pour ces raisons qu'on trouve le long du piémont des nouvelles cités implantées de part et d'autres, qui sont en extension continue. Parmi elles, on cite Oued Zied, Berka Zerga, Hadjar Eddisse et Bergouga.

Les recensements de 1966, 1977, 1987 et 2008, ont permis d'apprécier la répartition de la population, qui présente une grande intégralité.

Elle se concentre le plus souvent autour des zones industrielles, terres agricoles et des points d'eau. On distingue trois zones :

##### **a. Zone faiblement peuplée**

Elle se localise aux alentours du Lac Fetzara, et plus précisément au Sud. Elle comprend les Cités de : El Eulma, Cheurfa, El Hashassia, Azizi Ahmed, Sidi Hamed et El Gantra. Ce sont des zones dépourvues d'axes de communication et où, les terres cultivables sont rares.

##### **b. Zone moyennement peuplée**

Ce sont les Cités : d'El Kerma, Houraicha, Griche, Hadjar Eddisse, Oued Zeid, Berka Zerga et Derradji Redjem. Ce sont des zones agricoles avoisinant des zones industrielles.

##### **c. Zone fortement peuplée**

Elle correspond aux chefs-lieux des communes de Sidi Amar, El Bouni et El Hadjar. Ce sont des zones à vocation agricole et industrielle, où, les moyens de communication sont développés.

#### **I. 4. 3. 2. Les plaines**

La zone d'étude fait partie de la zone agricole méditerranéenne. Les cultures qui y sont pratiquées sont principalement des cultures d'hiver pendant la période principale de précipitation, des cultures d'été pendant la période sèche où l'on pratique l'irrigation, et d'autres produits qu'on peut cultiver toute l'année.

Les cultures cervelières : la région d'étude présente des grandes étendues favorables à ce type de pratiques culturelles. Elles s'étendent même sur les endroits à topographie chahutée. Blé dur, blé tendre et orge constituent les principales cultures.

Les cultures industrielles : ce sont principalement le tabac et la tomate industrielle. Cette dernière est une spécialité des wilayas d'Annaba, El Tarf et Skikda qui produisent environ 80% de la production nationale.

Les cultures maraîchers et les légumes secs : ils sont moins répandus dans la région d'étude. Parmi ces cultures, on cite la pomme de terre, pastèque, melon, pois chiche.

L'arboriculture : elle est moins présente dans cette région. Elle est représentée essentiellement par des agrumes, les noyaux et les pépins, les oliviers et la verticulture. On note que les oliviers sont des plantations oléicoles à l'état sauvage ou travaillés. Ce type d'arbre parfois associé à des cultures annuelles, a souvent été planté sur des terrains en pente ou en plat.

Les terrains incultes : ils occupent une grande superficie surtout dans la région de Lac Fetzara. La plupart de ces terrains incultes sont des terrains inondés pendant la pluie. Au niveau de la plaine, la région dans son ensemble est vouée aux céréales et à la tomate industrielle. Après les mois humides, en juin, le paysage prend un aspect désertique.

Les terrains nus : ce sont des terrains non occupés par une quelconque végétation. Ces terrains sont généralement situés au Nord de la région et au niveau de la lunette sableuse qui sépare le Lac Fetzara et la plaine Ouest d'El Hadjar

#### **I. 4. 3. 2. 1. Occupation du sol par l'industrie**

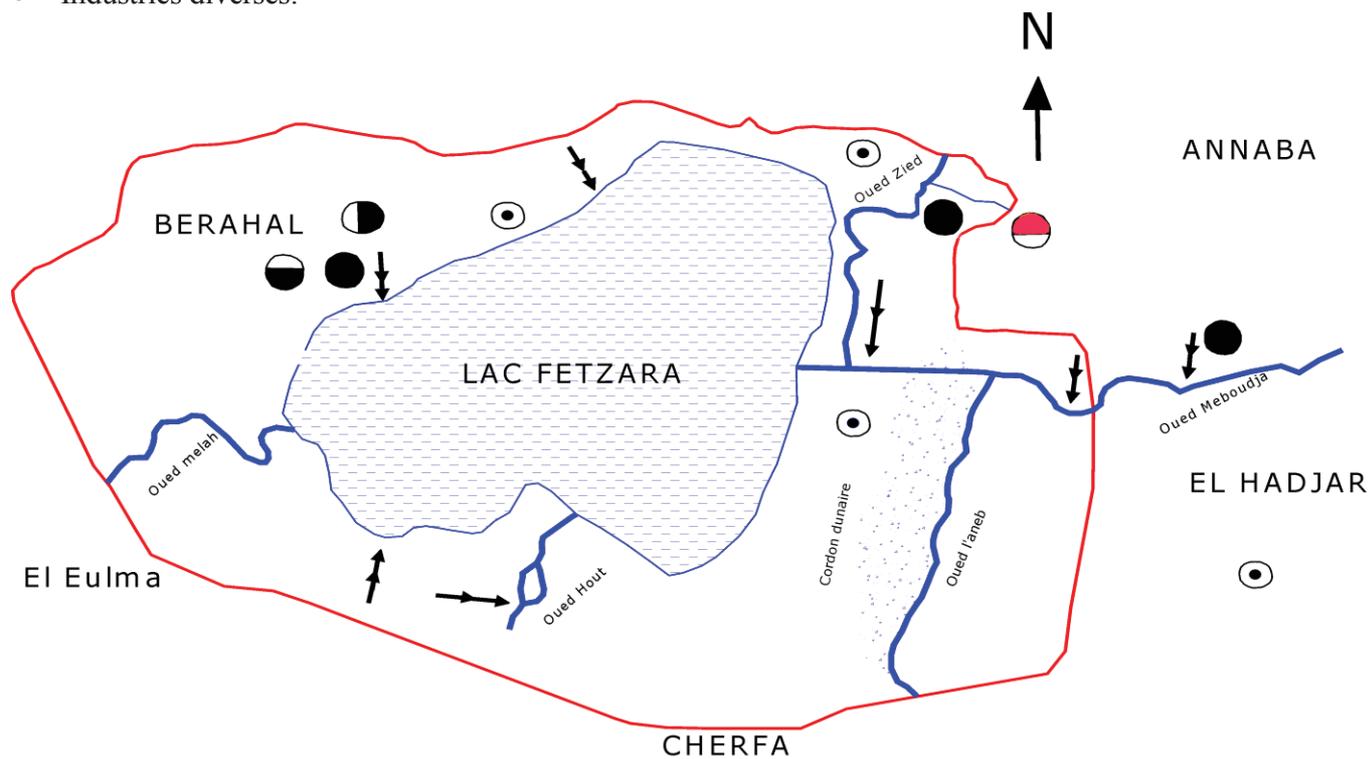
Elle est très importante avec les différentes installations, ces entreprises industrielles sont réparties dans cinq zones industrielles :

- ✓ Zone industrielle de Kalitoussa à Berrahal
- ✓ Zone industrielle de Chaiba
- ✓ Zone industrielle de Pont Bouchet
- ✓ Zone industrielle de Allelick
- ✓ Complexe sidérurgique Mittal Steel

D'autres entreprises sont disséminées dans la plaine. Ces différentes entreprises sont classées suivant leur activité et leur degré de pollution (Fig.8) en :

- Industries particulièrement polluantes (Sider, Fertial, Orelait et Geni-Sider) ;
- Industries alimentaires et agro-alimentaires (Agrifed,...etc.) ;
- Entrepôt et entreprises de prestation ;

- Industries diverses.



Légende:

- Industrie particulièrement polluante
- ⊙ Pollution organique
- ◐ Entreprise de maintenance et entrepôts des produits chimiques
- ◑ Entreprise diverses
- ⊘ Lac
- ◕ Décharge urbaine
- ➔ Rejet

Echelle: 0 1 2 Km

Figure 8 : Carte d'occupation du sol par l'industrie, (Juin 2012).

### **I. 5. Conclusion**

La zone d'étude se localise dans le sous bassin versant du lac Fetzara qui est un système endoréique et qui fait partie du bassin versant Côtier Constantinois Centre.

D'après les levés géologiques effectués sur le terrain durant l'étude d'impact de la décharge publique, ainsi que, les études réalisées dans les régions limitrophes notamment sur le massif de l'Edough et le lac Fetzara on constate : qu'il s'agit d'un massif métamorphique d'âge ancien (primaire) qui a été affecté ultérieurement par la phase alpine d'âge Miocène inférieur.

Aujourd'hui, on rencontre un socle métamorphique occupant le substratum et donne lieu à un socle compact et rigide surtout la partie profonde non exposée aux conditions climatiques, le socle métamorphique possède une couverture d'âge crétacé constituée de calcaire marneux gréseux (Vila J.M., 1980) et une deuxième couverture très importante, c'est la nappe numidienne déposée durant la phase du miocène inférieur.

Une fois le grès numidien mis en place (Djebel Hadjar Ediss et Berka Zerga) la région a connu une régression de la mer vers le Nord et vers le Sud (lac Fetzara) ; conséquence de ce mouvement c'est l'exposition de la région aux conditions climatiques et ruissellement au niveau de la surface et à des mouvements d'équilibre (néotectonique) en profondeur. Pour la région de Berka Zerga, il résulte la naissance d'un sous bassin versant avec plusieurs cours d'eau orientés vers le lac Fetzara.

**CHAPITRE II :**  
**HYDRO-CLIMATOLOGIE**

## II. 1. Introduction

L'étude hydro-climatologique nécessite des renseignements bien précis sur les différents facteurs et les éléments qui régissent les variations climatiques et hydriques.

Les facteurs qui déterminent le climat sont la précipitation, l'humidité, la température et le vent. La distribution de ces facteurs, dans le temps et dans l'espace, influence l'évaporation et la transpiration. En effet, ils permettent d'évaluer quantitativement les variations du régime hydrologique.

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule dans ce système qu'elle permet d'identifier le volume des ressources d'eau superficielle ainsi que les nappes souterraines. Ceci implique la connaissance des paramètres suivants : les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement qui conditionnent le bilan.

### II. 1. 1. Le bassin Côtiers Constantinois Centre

On localise la zone d'étude dans le bassin versant côtiers constantinois centre qui a une superficie de l'ordre de 4962 km<sup>2</sup> (P.N.E 2000), soit 48.5% de la superficie totale du bassin Côtiers Constantinois. Selon le recensement de 1998, on y compte 886 240 habitants, répartis sur 58 communes et 05 wilayas. Le bassin versant se caractérise par une agriculture traditionnelle et moderne intéressant les cultures maraîchères, les céréales et l'arboriculture. L'irrigation mixte y est souvent pratiquée. L'industrie est concentrée autour des agglomérations principales : Collo et Tamalous dans la partie Ouest, Skikda et El Harrouch au Centre, Azzaba et Berrahal dans la partie Est.

- **Pluviométrie** : Sur le bassin, les précipitations varient en moyenne de 650 mm à 1800 mm, pour l'ensemble du bassin il existe 17 stations pluviométriques et 05 stations hydrométriques suivies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).
- **Hydrographie** : Le bassin versant se caractérise par un chevelu hydrographique dense totalisant un réseau de plus de 4200 km et compte plus de 44 oueds principaux (Fig.9).

La zone d'étude est localisée dans le sous bassin versant du lac Fetzara qui porte le numéro de côte (03 13), (Fig.9).

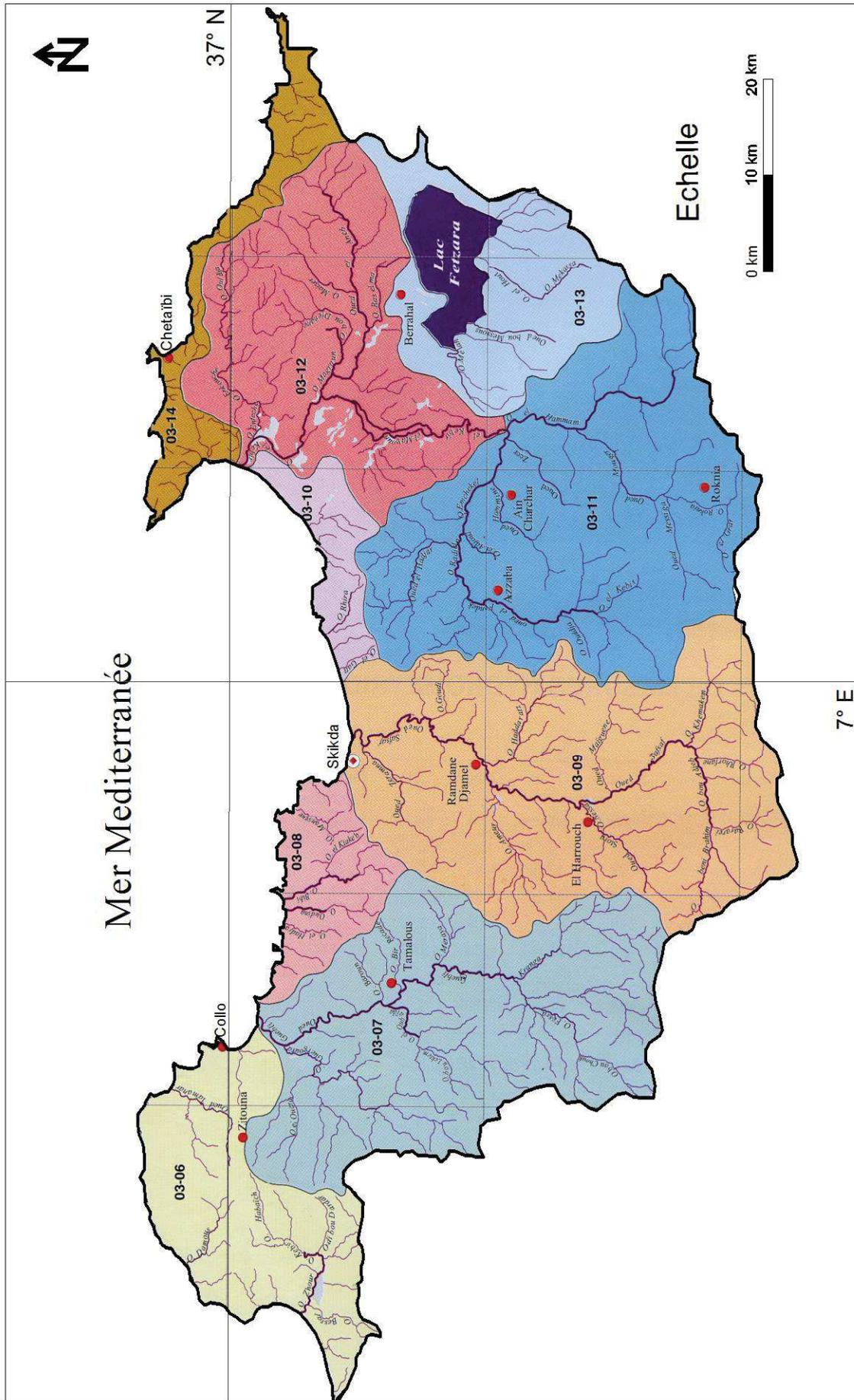


Figure 9 : Bassin versant Côtiers Constantinois Centre.

**Tableau 3 : ressources en eau superficielles et souterraines du bassin versant Côtiers Constantinois Centre. (P.N.E 2000)**

<b>B.V Côtiers Constantinois Centre</b>		
<b>Ressources souterraines</b>	Superficie (km <sup>2</sup> ) : 4962	Potentialités des nappes (hm <sup>3</sup> /an): 32.5
<b>Ressources superficielles (hm<sup>3</sup>/an), (selon P.N.E, 2000)</b>	324.16	
<b>Barrages</b>	Nombre : 04	Capacité (hm <sup>3</sup> /an) : 312
<b>Retenues collinaires</b>	Nombre : 101	

### II. 1. 2. Caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara

Le réseau hydrographique du sous bassin (Fig.9) est constitué de quatre oueds qui sont :

- Oued Mellah : il prend sa source aux alentours de l'oued El Kebir Ouest, d'une longueur à peu près de 08 km ; il draine une surface de 47 km<sup>2</sup> du Sud-Ouest vers le Nord-Est en se reliant au canal d'assèchement au contact du lac Fetzara.
- Oued El Hout : il prend sa source au niveau des collines de Ain Berda. C'est le plus long cours d'eau qui alimente le lac Fetzara (10 km de longueur), il s'écoule du Sud vers le Nord et draine une surface de 81 km<sup>2</sup>.
- Oued Zied : il prend sa source à Kef Sebâ, la direction de l'écoulement est du Nord vers le Sud-Ouest sur une longueur d'environ 10.5 km, il draine une surface de 19 km<sup>2</sup>.
- Oued Bou Messous : il a une longueur de 09 km, il s'écoule du Sud vers le Nord.

**Tableau 4 : Quelques caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara.**

<b>Sous bassin versant du lac Fetzara</b>			
<b>Numéro de côte</b>	03 13		
<b>Potentiel des nappes (en hm<sup>3</sup>/an), selon P.N.E</b>	13.4		
<b>Superficie (Km<sup>2</sup>)</b>	515		
<b>Retenues collinaires</b>	Nombre : 31	Capacité (m <sup>3</sup> ) : 2563000	Destination : irrigation
<b>Alimentation en eau potable</b>	Nombre de réservoirs : 17	Volume (m <sup>3</sup> ) : 5920	

Tous ces oueds se collectent au niveau du lac Fetzara, ils sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été.

Le drainage du lac Fetzara est effectué tout au long de l'année quel que soit le débit par le canal principal, l'eau est évacuée vers l'oued Meboudja puis oued Seybouse vers la mer.

## II. 2. Les paramètres climatiques

L'analyse climatique c'est l'un des outils qui permet de déterminer les ressources hydriques dans une zone précise ; les facteurs climatiques tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration nous permettent d'étudier les caractéristiques du bassin hydrographique ainsi que d'expliquer quantitativement le régime hydrologique, dans le temps et dans l'espace.

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont les enregistrements pluviométriques d'une période de 32 ans (1981 à 2013) collectées auprès des trois stations météorologiques (Berrahal, Ain Berda et les Salines) (Tab.5).

**Tableau 5 : Caractéristiques des stations de mesure.**

Station	Code	X	Y	Longitude	Latitude	Alt. (m)	Période d'observation
Salines	60360	955.2	403.8	7°49 E	36°50 N	3	1981-2013
Ain Berda	140606	937.6	387.75	7°35 58 E	36°41 28 N	100	1981-2013
Berrahal	31302	923.35	405.56	7°45 E	36° 84 N	33	1981-2013

Sources : ONM d'Annaba 2017

### II. 2. 1. Les précipitations

Toutes les eaux météoriques qui arrivent au sol sous quelques formes que ce soit ; de la pluie, de la neige, de la grêle, de la rosée, sont regroupés sous le terme de précipitations.

#### II. 2. 1. 1. Les précipitations moyennes mensuelles

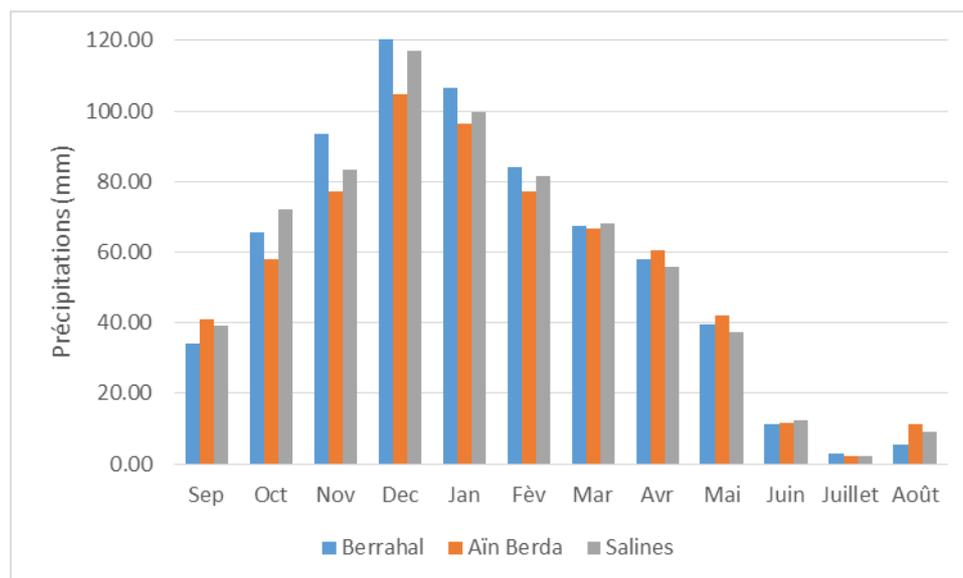
Le calcul de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré sur un grand nombre d'années ou dite précipitations moyennes mensuelles donne un aperçu sur les variations mensuelles pluriannuelles des précipitations.

Les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations sont présentées dans le tableau N° 6 :

**Tableau 6 : Précipitations moyennes mensuelles (1981 – 2013).**

Stations	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
<b>Berrahal</b>	34.22	65.72	93.34	128.15	106.48	84.06	67.49	57.98	39.42	11.30	2.98	5.62	696.75
<b>Ain Berda</b>	40.95	58.02	77.22	104.62	96.54	77.21	66.52	60.51	41.91	11.75	2.25	11.18	648.67
<b>Les Salines</b>	39.03	71.97	83.34	116.96	99.55	81.48	67.96	55.95	37.30	12.31	2.36	8.96	677.19

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Fig.10) au niveau des trois stations Berrahal, Ain Berda et les Salines, montre une hétérogénéité remarquable des précipitations d'un mois à l'autre avec un maximum de l'ordre de : 128.15 mm à Berrahal, 104.62 mm à Ain Berda et 116.96 mm aux Salines au mois de Décembre, et un minimum de 2.98 mm, 2.25 mm et 2.36 mm aux trois stations respectivement pendant le mois de juillet.

**Figure 10 : Précipitations moyennes mensuelles pour les trois stations (1981–2013).**

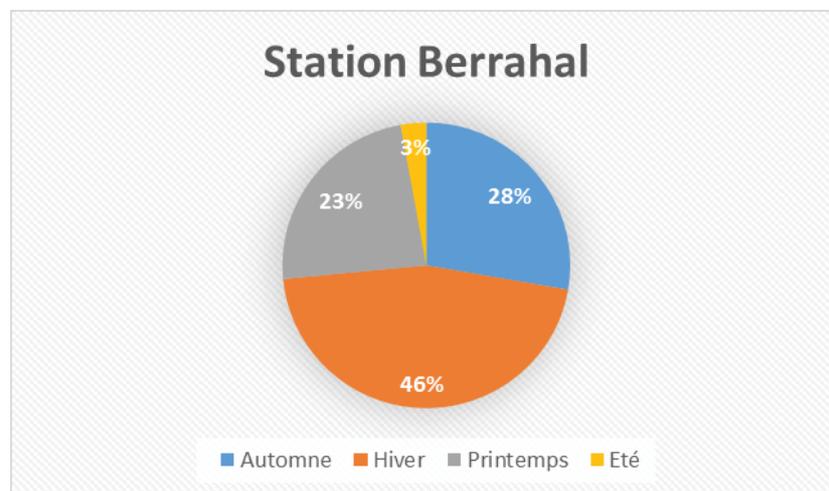
### II. 2. 1. 2. Répartition saisonnière des précipitations

Il est connu que le taux des précipitations diffère d'une saison à l'autre. Dans l'objectif de déterminer ces quantités nous nous sommes intéressés aux précipitations saisonnières (**Automne** : Septembre, Octobre, Novembre, **Hiver** : Décembre, Janvier, Février, **Printemps** : Mars, Avril, Mai, **Été** : Juin, Juillet et Août), cette répartition est présentée dans le tableau N° 7 :

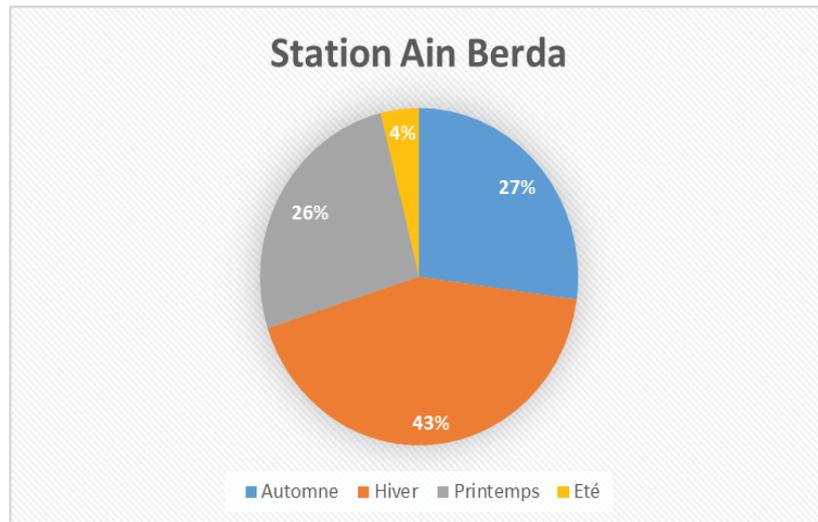
**Tableau 7 : Répartition saisonnière des précipitations (1981-2013).**

Stations	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
<b>Berrahal</b>	193.28	26.97	318.69	44.48	164.89	23.01	19.90	2.78
<b>Ain Berda</b>	176.19	25.19	278.37	39.80	168.94	24.16	25.18	3.60
<b>Les salines</b>	194.35	28.96	297.99	44.41	161.22	24.03	23.64	3.52

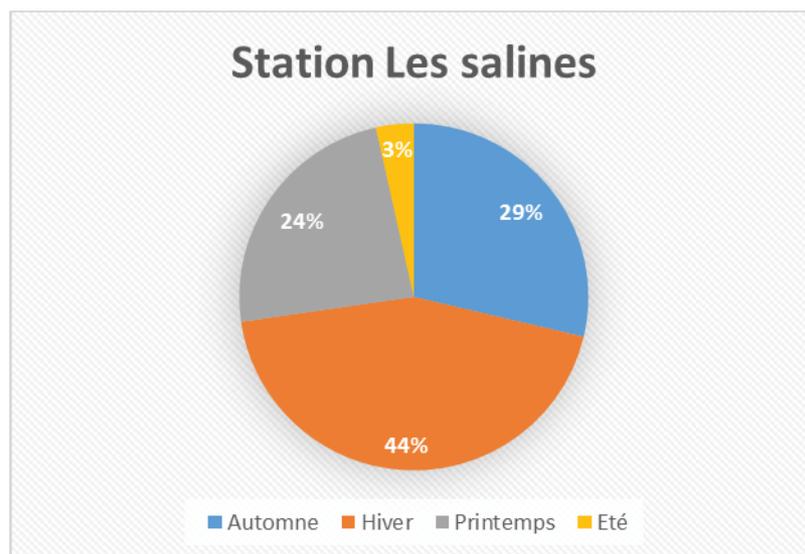
Selon le tableau précédent (Tab.7) nous observons une saison hivernale de forte pluviosité avec 318.69 mm, 278.37 mm et 297.99 mm, soit 44.48 %, 39.80 % et 44.41 % du total annuel respectivement pour les trois stations. En Automne les précipitations sont de l'ordre de 193.28 mm soit 26.79 % à la station Berrahal, 176.19 mm soit 25.19 % à la station de Ain Berda et 194.35 mm soit 28.96 % à la station des Salines du total annuel, ainsi que les précipitations en Printemps sont de l'ordre de 164.89 mm soit 23.01 %, 168.94 mm soit 24.16 % et 161.22 mm soit 24.03 % du total annuel respectivement pour les trois stations. La pluviométrie enregistrée dans la saison sèche est la plus faible par rapport aux autres saisons, Elle est respectivement de l'ordre de 19.90 mm soit 2.78 %, 25.18 mm soit 3.60 % et 23.64 mm soit 3.52 % de la pluviosité annuels. On conclut que le régime climatique est de type HAPE (Fig.11, 12 et 13).



**Figure 11 : Répartition saisonnière des précipitations à la station de Berrahal (1981-2013).**



**Figure 12 : Répartition saisonnière des précipitations à la station de Ain Berda (1981-2013).**



**Figure 13 : Répartition saisonnière des précipitations à la station des Salines (1981-2013).**

### II. 2. 1. 3. Précipitations moyennes annuelles

Les variations des précipitations de chaque année durant la période de 32 ans (1981-2013) sont présentées dans le tableau N° 8. Nous pouvons exprimer cette variation à partir du coefficient pluviométrique CP (Fig.14) pour déterminer les années excédentaires et déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série d'années à une station donnée.

Nous avons deux cas :

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Si  $CP > 1$  : année excédentaire.

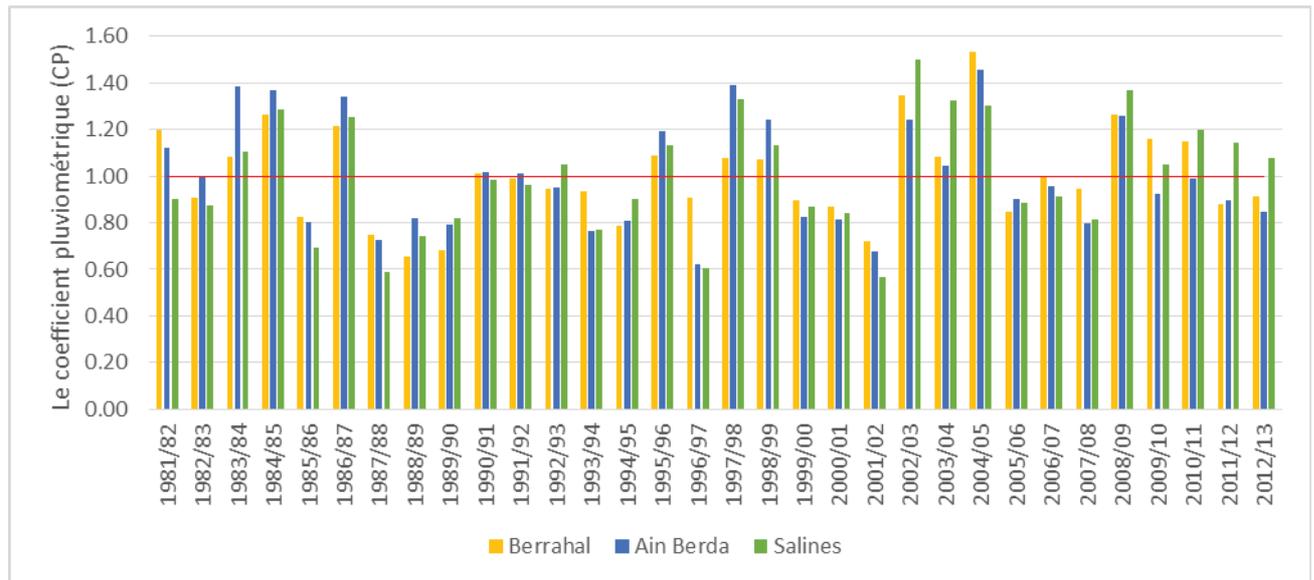
Si  $CP < 1$  : année déficitaire.

**Tableau 8 : Les précipitations annuelles et les coefficients pluviométriques des trois stations (1981–2013).**

an	Les précipitations annuelles (mm)			Le coefficient pluviométrique (CP)		
	Berrahal	Ain Berda	Les Salines	Berrahal	Ain Berda	Les Salines
1981/82	833.7	760.4	585.1	1.20	1.12	0.90
1982/83	634.0	678.1	567.1	0.91	1.00	0.87
1983/84	756.2	937.8	717.4	1.09	1.38	1.11
1984/85	879.1	927.0	833.4	1.26	1.37	1.29
1985/86	573.9	543.0	448.4	0.82	0.80	0.69
1986/87	847.0	909.3	813.6	1.22	1.34	1.26
1987/88	519.6	491.0	382.1	0.75	0.72	0.59
1988/89	454.7	557.0	480.1	0.65	0.82	0.74
1989/90	473.7	535.0	530.9	0.68	0.79	0.82
1990/91	704.9	689.3	638.6	1.01	1.02	0.99
1991/92	687.9	684.6	623.7	0.99	1.01	0.96
1992/93	660.6	644.1	680.6	0.95	0.95	1.05
1993/94	650.6	519.7	500	0.93	0.77	0.77
1994/95	547.6	548.3	585.5	0.79	0.81	0.90
1995/96	757.6	807.0	734.6	1.09	1.19	1.13
1996/97	632.4	422.8	391.8	0.91	0.62	0.60
1997/98	749.5	941.0	863	1.08	1.39	1.33
1998/99	748.1	841.0	735	1.07	1.24	1.13
1999/00	622.9	559.6	562.1	0.89	0.83	0.87
2000/01	605.1	550.7	547.1	0.87	0.81	0.84
2001/02	503.5	460.3	368.2	0.7	0.7	0.6
2002/03	937.7	842.1	973.0	1.3	1.2	1.5
2003/04	754.5	708.0	858.9	1.1	1.0	1.3
2004/05	1068.9	987.7	842.9	1.5	1.5	1.3
2005/06	590.7	612.5	574.2	0.8	0.9	0.9
2006/07	698.5	648.1	592.1	1.0	1.0	0.9
2007/08	658.2	539.7	528.4	0.9	0.8	0.8
2008/09	879.8	853.6	888.5	1.3	1.3	1.4
2009/10	806.7	627.1	680.5	1.2	0.9	1.0
2010/11	802.3	670.4	775.6	1.2	1.0	1.2
2011/12	613.4	608.0	742.7	0.9	0.9	1.1
2012/13	635.5	575.3	699.5	0.9	0.8	1.1

**Remarque :**

Année excédentaire	Année déficitaire
--------------------	-------------------



**Figure 14 : Les variations du coefficient pluviométrique pour les trois stations (1981–2013).**

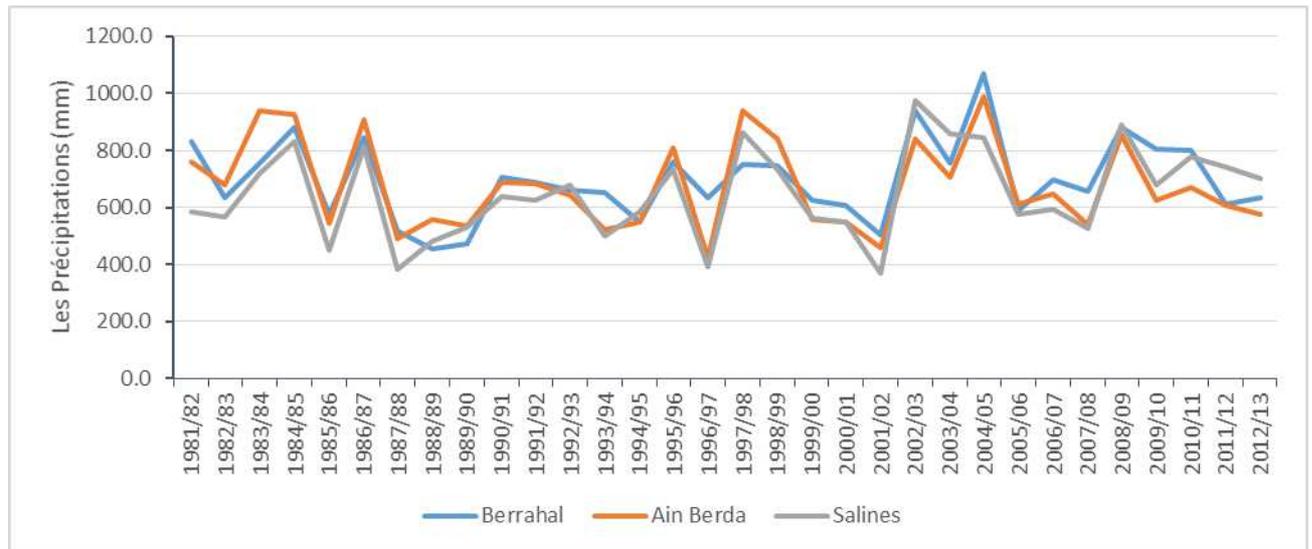
Sachant que : Les précipitations moyennes annuelles de chaque station sont :

- Station de Berrahal :  $\bar{P} = 696.5$  mm
- Station de Ain Berda :  $\bar{P} = 677.5$  mm
- Station des Salines :  $\bar{P} = 648.3$  mm

A partir de ces données (Tab.8) on constate que les années déficitaires sont plus nombreuses que les années excédentaires aux stations de Ain Berda et les Salines, par contre à la station de Berrahal, les années excédentaires sont égaux aux années déficitaires.

### II. 2. 1. 3. 1. Variations des précipitations annuelles

Durant les années 1988/1889, 1996/1997 et 2001/2002 les stations de Berrahal, de Ain Berda et les Salines respectivement ont enregistré la plus faible pluviométrie par rapport aux autres années avec des précipitations de l'ordre de 454.7 mm pour la station de Berrahal, 422.8 mm pour la station de Ain Berda et 368.2 mm pour la station des Salines. De plus la pluviométrie maximale a été enregistrée en 2004/2005 avec un total de précipitation de 1098.9 mm et 987.8 mm pour les stations de Berrahal et de Ain Berda respectivement et durant l'année 2002/2003 pour la station des Salines (973.0 mm) (Fig.15).



**Figure 15 : Variations des précipitations annuelles des stations de Berrahal, de Ain Berda et des Salines (1981–2013).**

## II. 2. 2. La température

La température de l'air du sous bassin du lac Fetzara a été analysée à partir des données recueillies de la station des salines. Les données nous ont permis de comprendre le climat de la région étudiée ainsi que l'estimation de l'évapotranspiration. La température dépend de plusieurs facteurs telle que l'altitude, où il est admis en Algérie selon SELTZER (1946) une diminution du gradient thermique de (-0.5 °c) chaque fois que l'altitude s'élève de plus de 100m.

### II. 2. 2. 1. La température moyenne mensuelle

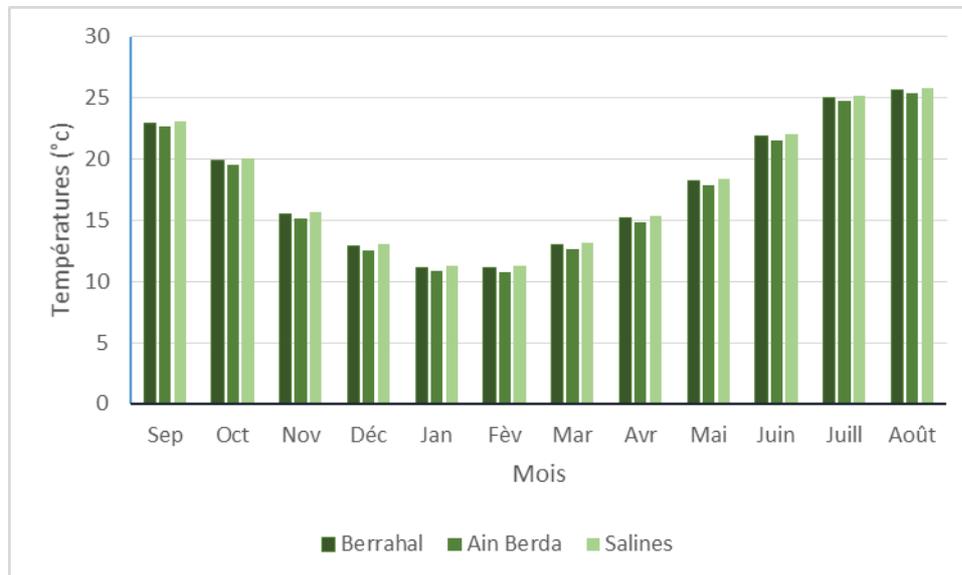
L'évolution des valeurs mensuelles de la température durant la période (1981-2013) est illustrée dans le tableau N° 9.

**Tableau 9 : La température moyenne mensuelle (1981-2013).**

Station	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
<b>Berrahal</b>	22.96	19.86	15.49	12.87	11.14	11.12	12.99	15.19	18.2	21.86	25.05	25.68
<b>Ain Berda</b>	22.63	19.53	15.15	12.54	10.81	10.79	12.65	14.86	17.86	21.52	24.72	25.35
<b>Salines</b>	23.11	20.01	15.64	13.02	11.29	11.27	13.14	15.34	18.35	22.01	25.20	25.83

Selon l'histogramme (Fig.16) des variations interannuelles de la température moyenne mensuelle, on constate que la température de l'air connaît une régularité entre les trois stations, elles varient entre 26.42 (Août) et 11.32 °C (Février) pour la station de Berrahal.

Quant à celles de la station de Ain Berda et les Salines elles varient respectivement entre 25.90 C°, 25.80 °C (Août) et 11.23°C, 10.71C° au mois de Janvier. Les moyennes mensuelles maximales s’observent en général pendant le mois d’Août pour les trois stations.



**Figure 16 : Histogramme de la température moyenne mensuelle aux stations de Berrahal, Ain Berda et des Salines (1981-2013).**

### II. 2. 2. 2. Température moyenne annuelle

Le tableau N° 10 montre les moyennes annuelles de la température sur une période de 32 ans pour les trois stations de mesure, ces valeurs sont 18.29 °C pour Berrahal, 18.04 °C à Ain Berda et 17.82 °C aux Salines.

**Tableau 10 : La température moyenne annuelle (1981–2013).**

Année	Berrahal	Ain Berda	Salines	Année	Berrahal	Ain Berda	Salines
1981/82	18.54	18.21	18.69	1997/98	17.87	17.53	18.02
1982/83	16.92	16.58	17.07	1998/99	17.79	17.46	17.94
1983/84	17.39	17.06	17.54	1999/00	18.13	17.79	18.28
1984/85	17.53	17.19	17.68	2000/01	17.81	17.48	17.96
1985/86	17.66	17.32	17.81	2001/02	17.56	17.23	17.71
1986/87	17.64	17.31	17.79	2002/03	18.40	18.06	18.55
1987/88	18.73	18.39	18.88	2003/04	17.53	17.20	17.68
1988/89	17.43	17.09	17.58	2004/05	17.24	16.90	17.39
1989/90	18.49	18.16	18.64	2005/06	17.60	17.27	17.75
1990/91	17.55	17.22	17.70	2006/07	17.94	17.61	18.09
1991/92	17.02	16.68	17.17	2007/08	17.45	17.12	17.60
1992/93	17.68	17.35	17.83	2008/09	17.48	17.14	17.63
1993/94	16.79	16.45	16.94	2009/10	17.57	17.23	17.72
1994/95	18.15	17.82	18.30	2010/11	17.46	17.12	17.61
1995/96	18.44	18.10	18.59	2011/12	17.79	17.45	17.94
1996/97	18.00	17.67	18.15	2012/13	16.91	16.58	17.06

### II. 3. Diagramme Ombrothermique

Le diagramme Ombrothermique est établi en combinant les variations des températures et les précipitations moyennes mensuelles ( $P=2T$ ). Il a été développé par H. Gaussen et F. Bagnouls et met en évidence les périodes sèches et humides.

D'après les enregistrements de nos stations, on déduit deux périodes (Fig.17, 18 et 19) :

- Une saison humide qui s'étend de la fin du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai pour les trois stations étudiées.
- Une saison sèche et chaude qui débute du mois de Mai (13.0 °C, 17.9 °C et 13.1 °C) jusqu'au mois de Septembre (23.0 °C, 22.6 °C et 23.1 °C) respectivement pour les trois stations étudiées.

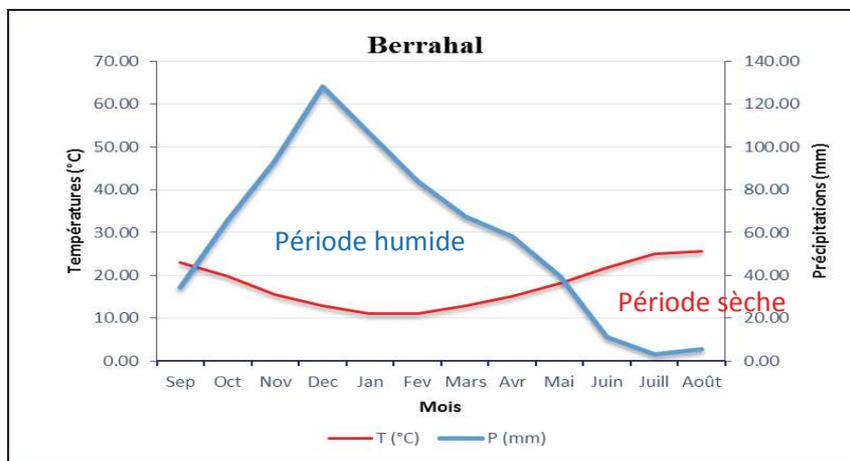


Figure 17 : Diagramme Ombrothermique de la station de Berrahal (1981–2013).

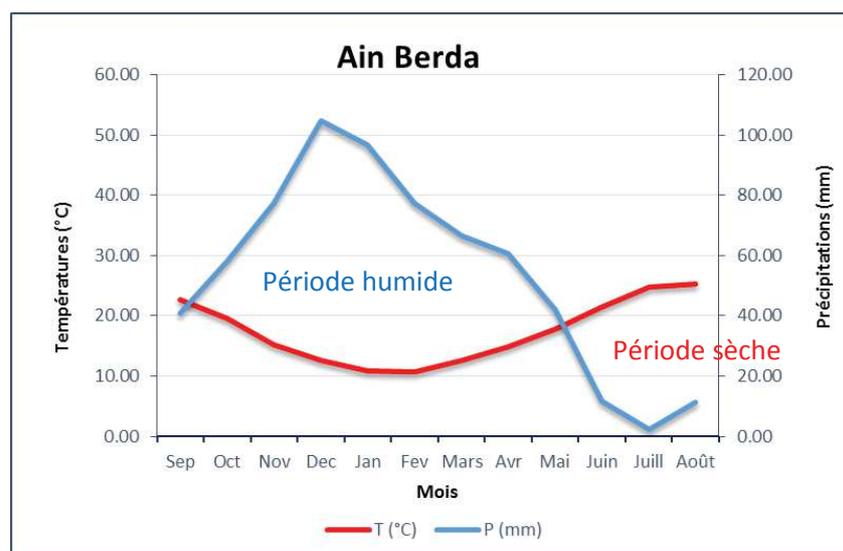


Figure 18 : Diagramme Ombrothermique de la station de Ain Berda (1981–2013).

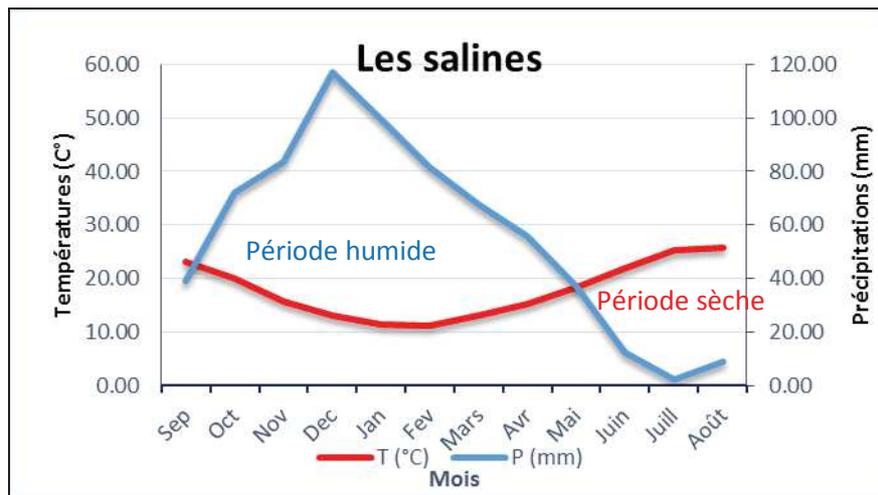


Figure 19 : Diagramme Ombrothermique de la station des Salines (1981-2013).

#### II. 4. Climagramme de Louis Emberger

Afin de caractériser le climat du bassin étudié, nous avons calculé le quotient pluviométrique d'EMBERGER ( $Q_2$ ) qu'il dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes des températures minimales et maximales.

$$Q = \frac{P}{\left[ \frac{(M+m)(M-m)}{2} \right]} \times 1000$$

Où :

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/ Kelvin).

m : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin).

Le résultat est indiqué dans le tableau N°11 :

Tableau 11 : Paramètres du climagramme d'Emberger.

stations	P (mm)	M (K)	m (K)	T° moy. minima	Q	Type de climat
Les salines	677.19	280.74	298.32	7.74	133.04	Subhumide

D'après les résultats figurant dans le tableau 11 on peut déduire que le sous bassin versant du lac Fetzara se caractérise par un climat subhumide (Fig.20).

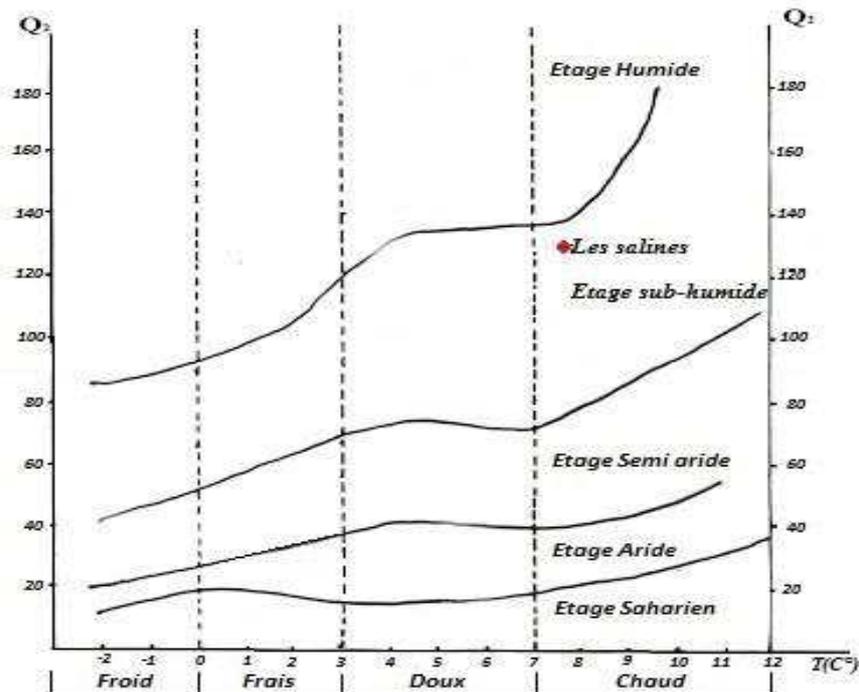


Figure 20 : Climagramme d'Emberger de la station des Salines.

D'après les diagrammes Ombrothermiques des stations de Berrahal, de Ain Berda et des Salines et le climagramme d'Emberger pour la station des Salines, nous pouvons conclure que le sous bassin du lac Fetzara est soumis à un climat méditerranéen subhumide, caractérisé par deux saisons ; un hiver doux et humide et par un été chaud et sec.

## II. 5. Notion du bilan hydrique

Le bilan d'eau global correspond à une équation entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan du bassin étudié, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration).

### II. 5. 1. Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration constitue un des éléments du bilan hydrologique qui représente la quantité d'eau à l'atmosphère sous forme de vapeur, l'évapotranspiration englobe deux processus, l'évaporation (physique) et la transpiration par les plantes (biologique).

## II. 5. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle s'identifie au déficit d'écoulement et peut se calculer à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie et la température.

L'évapotranspiration réelle dépend de plusieurs facteurs selon la formule utilisée, mais les plus importants sont la quantité de pluie tombée dans le bassin mais également la réserve maximale en eau dans le sol, le couvert végétale et la température de l'air.

Il est à rappeler que dans le cas où l'évapotranspiration potentielle est égale aux précipitations ceci implique que l'évapotranspiration potentielle représente l'évapotranspiration réelle.

L'excédent des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle est emmagasiné dans le sol. Ce qu'il augmente les réserves (RU) jusqu'à ce que ce dernier soit saturé.

Pour le calcul de L'ETR trois formules sont utilisées :

- Formule de Turc ; Formule de Coutagne ; Formule de Thornthwaite.

### A/ Formule de Turc

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

L : Pouvoir évaporant.

Les résultats sont portés dans le tableau suivant :

**Tableau 12 : ETR annuelle selon la méthode de Turc.**

Station	P (mm)	T (C°)	L	ETR (mm/an)
Berrahal	696.75	17.70	1019.91	595.99
Ain Berda	648.67	17.37	996.08	563.72
Salines	677.19	17.85	1030.77	586.84

**B/ Formule de Coutagne**

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Cette formule n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \text{ Pour } \lambda = \frac{1}{0.8+0.14T}$$

Avec :

**ETR** : L'évapotranspiration réelle en mm.

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm.

**T** : Température moyenne annuelle en °C.

Les résultats sont portés dans le tableau N°13:

**Tableau 13 : ETR annuelle selon la méthode de Coutagne.**

Station	P (m)	T (C°)	$\lambda$	ETR (mm/an)
Berrahal	0.69675	17.70	0.31	548.67
Ain Berda	0.64867	17.37	0.31	518.46
Salines	0.67719	17.85	0.30	538.19

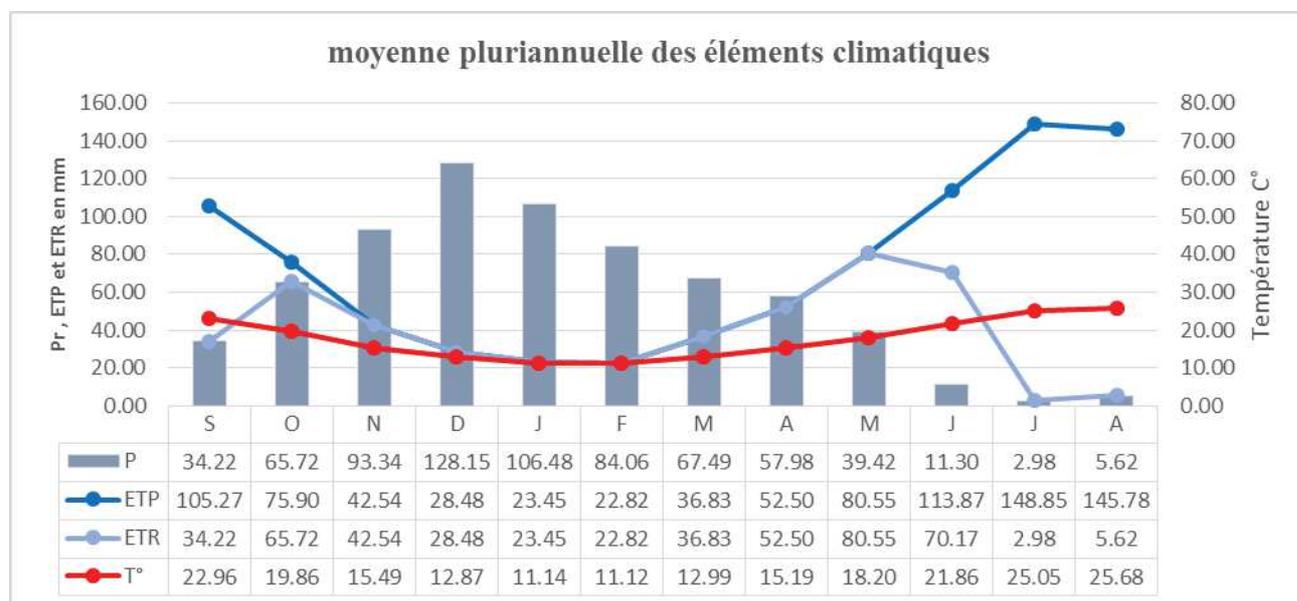
**II. 5. 3. L'interprétation du bilan hydrique**

Les bilans hydriques des trois stations (tableaux 14, 15 et 16) et (Fig.21, 22, 23, 24, 25 et 26) et avec la méthode de Thornthwaite montrent que : la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum 100 mm de Décembre à Avril. Elle diminue à partir du mois de Mai jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin, caractérisant le déficit agricole (DA) qui s'étale à Cinq (5) mois.

L'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (148.85 mm à Berrahal, 146.72 mm à Ain Berda et 149.77 mm aux Salines), son minimum au mois de Février (22.82 mm à Berrahal et 22.47 mm à Ain Berda et 22.98 mm aux les Salines). L'Excédent à partir du mois de Décembre et atteint son maximum au mois de Janvier (83.08 mm, à Berrahal 73.45 mm à Ain Berda et 75.95 mm aux Salines), et s'étale jusqu'au mois d'Avril. L'épuisement du stock commence au mois de Mai et se termine au mois d'Octobre avec un déficit agricole maximum au mois de Juillet où l'irrigation devient nécessaire.

**Tableau 14 : Bilan hydrique à la station de Berrahal pour la période (1981-2013).**

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23.0	10.1	1.0	105.3	34.2	-71.0	-0.7	0.0	0.0	34.2	71.0	0.0
O	19.9	8.1	1.0	75.9	65.7	-10.2	-0.1	0.0	0.0	65.7	10.2	0.0
N	15.5	5.5	0.9	42.5	93.3	50.8	1.2	50.8	50.8	42.5	0.0	0.0
D	12.9	4.2	0.8	28.5	128.2	99.7	3.5	49.2	100.0	28.5	0.0	50.5
J	11.1	3.4	0.9	23.4	106.5	83.0	3.5	0.0	100.0	23.4	0.0	83.0
F	11.1	3.4	0.9	22.8	84.1	61.2	2.7	0.0	100.0	22.8	0.0	61.2
M	13.0	4.2	1.0	36.8	67.5	30.7	0.8	0.0	100.0	36.8	0.0	30.7
A	15.2	5.4	1.1	52.5	58.0	5.5	0.1	0.0	100.0	52.5	0.0	5.5
M	18.2	7.1	1.2	80.5	39.4	-41.1	-0.5	-41.1	58.9	80.5	0.0	0.0
J	21.9	9.3	1.2	113.9	11.3	-102.6	-0.9	-58.9	0.0	70.2	43.7	0.0
J	25.1	11.5	1.2	148.8	3.0	-145.9	-1.0	0.0	0.0	3.0	145.9	0.0
A	25.7	11.9	1.2	145.8	5.6	-140.2	-1.0	0.0	0.0	5.6	140.2	0.0
Annuel	17.7	84.0		876.8	696.7	-180.1				465.9	410.9	230.9

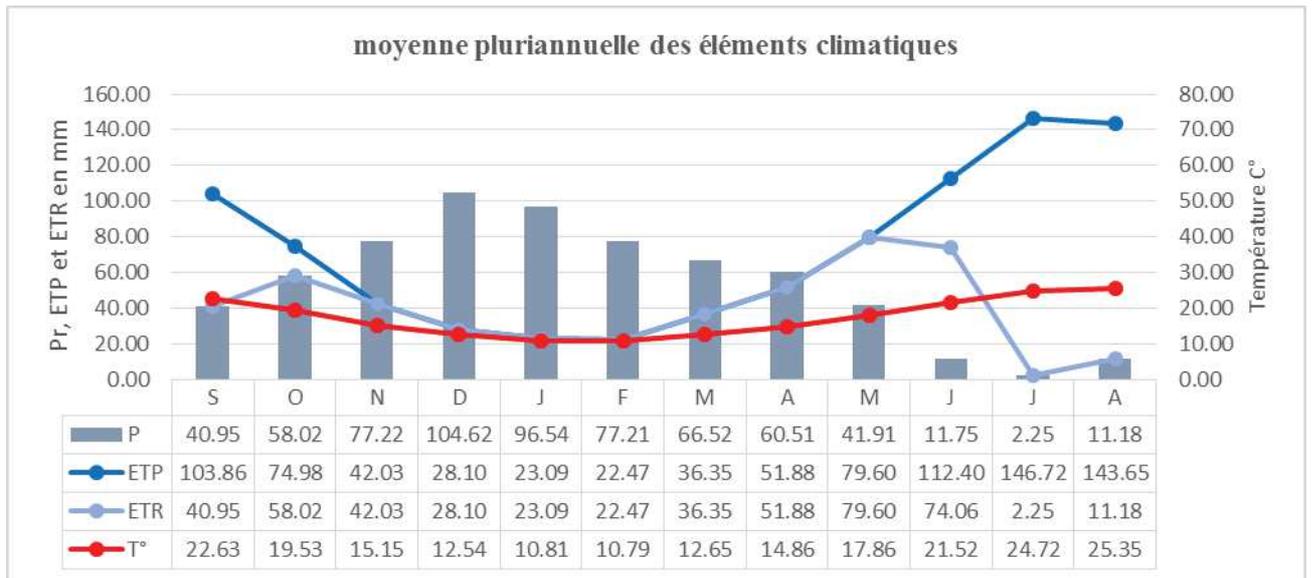
**Figure 21 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Berrahal pour la période (1981-2013).**



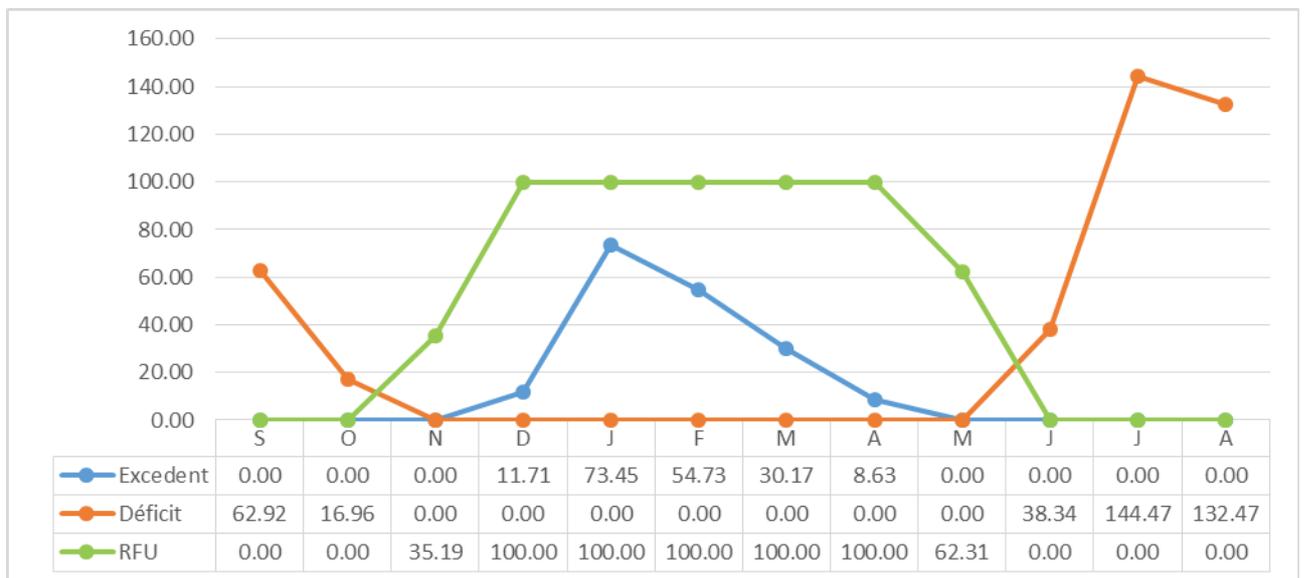
**Figure 22 : Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Berrahal (1981-2013).**

**Tableau 15 : Bilan hydrique à la station de Ain Berda pour la période (1981-2013).**

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	22.6	9.8	1.0	103.9	40.9	-62.9	-0.6	0.0	0.0	40.9	62.9	0.0
O	19.5	7.9	1.0	75.0	58.0	-17.0	-0.2	0.0	0.0	58.0	17.0	0.0
N	15.2	5.4	0.9	42.0	77.2	35.2	0.8	35.2	35.2	42.0	0.0	0.0
D	12.5	4.0	0.8	28.1	104.6	76.5	2.7	64.8	100.0	28.1	0.0	11.7
J	10.8	3.2	0.9	23.1	96.5	73.5	3.2	0.0	100.0	23.1	0.0	73.5
F	10.8	3.2	0.9	22.5	77.2	54.7	2.4	0.0	100.0	22.5	0.0	54.7
M	12.7	4.1	1.0	36.3	66.5	30.2	0.8	0.0	100.0	36.3	0.0	30.2
A	14.9	5.2	1.1	51.9	60.5	8.6	0.2	0.0	100.0	51.9	0.0	8.6
M	17.9	6.9	1.2	79.6	41.9	-37.7	-0.5	-37.7	62.3	79.6	0.0	0.0
J	21.5	9.1	1.2	112.4	11.7	-100.7	-0.9	-62.3	0.0	74.1	38.3	0.0
J	24.7	11.2	1.2	146.7	2.3	-144.5	-1.0	0.0	0.0	2.3	144.5	0.0
A	25.3	11.7	1.2	143.6	11.2	-132.5	-0.9	0.0	0.0	11.2	132.5	0.0
Annuel	17.4	81.7		865.1	648.7	-216.5				470.0	395.2	178.7



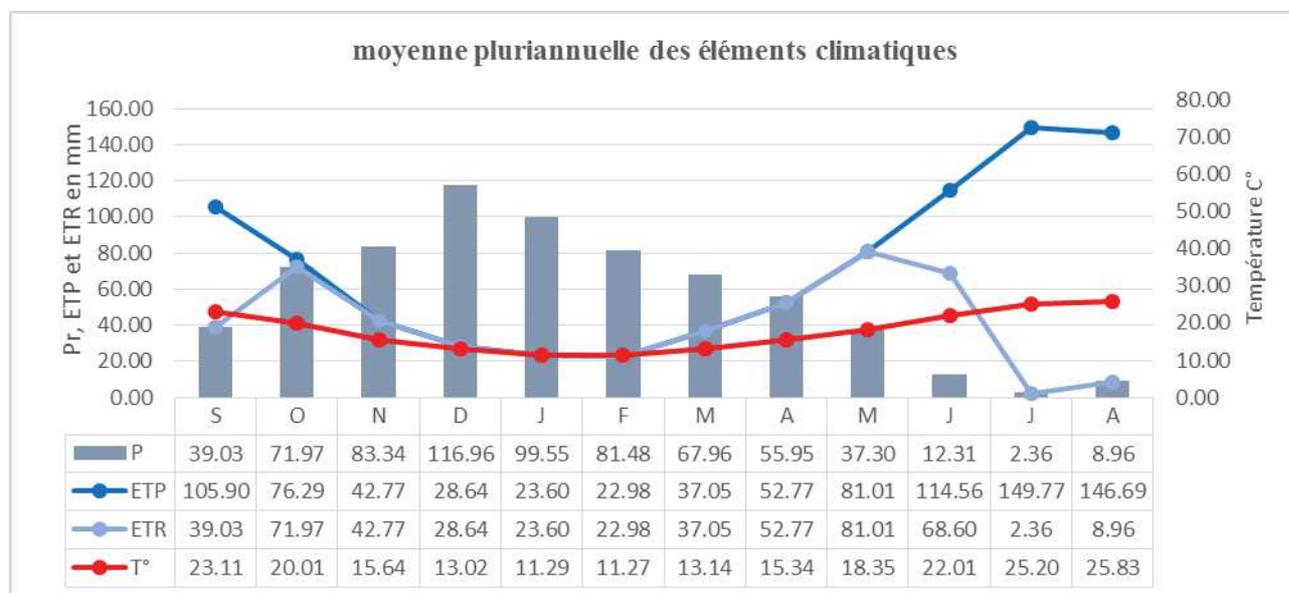
**Figure 23 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Ain Berda pour la période (1981-2013).**



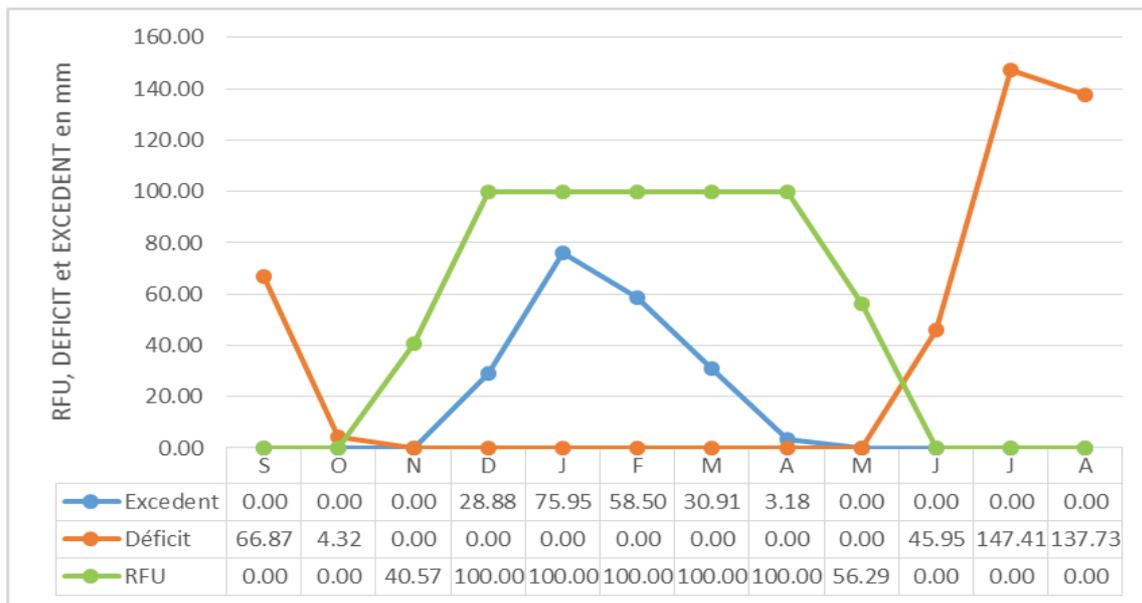
**Figure 24 : Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Ain Berda (1981-2013).**

**Tableau 16 : Bilan hydrique à la station des Salines pour la période (1981-2013).**

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23.1	10.2	1.0	105.9	39.0	-66.9	-0.6	0.0	0.0	39.0	66.9	0.0
O	20.0	8.2	1.0	76.3	72.0	-4.3	-0.1	0.0	0.0	72.0	4.3	0.0
N	15.6	5.6	0.9	42.8	83.3	40.6	0.9	40.6	40.6	42.8	0.0	0.0
D	13.0	4.3	0.8	28.6	117.0	88.3	3.1	59.4	100.0	28.6	0.0	28.9
J	11.3	3.4	0.9	23.6	99.6	76.0	3.2	0.0	100.0	23.6	0.0	76.0
F	11.3	3.4	0.9	23.0	81.5	58.5	2.5	0.0	100.0	23.0	0.0	58.5
M	13.1	4.3	1.0	37.1	68.0	30.9	0.8	0.0	100.0	37.1	0.0	30.9
A	15.3	5.5	1.1	52.8	56.0	3.2	0.1	0.0	100.0	52.8	0.0	3.2
M	18.4	7.2	1.2	81.0	37.3	-43.7	-0.5	-43.7	56.3	81.0	0.0	0.0
J	22.0	9.4	1.2	114.6	12.3	-102.2	-0.9	-56.3	0.0	68.6	46.0	0.0
J	25.2	11.6	1.2	149.8	2.4	-147.4	-1.0	0.0	0.0	2.4	147.4	0.0
A	25.8	12.0	1.2	146.7	9.0	-137.7	-0.9	0.0	0.0	9.0	137.7	0.0
Annuel	17.9	85.0		882.0	677.2	-204.9				479.7	402.3	197.4



**Figure 25 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station des Salines pour la période (1981-2013).**



**Figure 26 : Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station des Salines (1981-2013).**

#### II. 5. 4. Comparaison des résultats des trois méthodes

Selon les résultats des trois méthodes de Turc, Coutagne et Thornthwaite (présentés dans le tableau N° 17), on distingue que les valeurs de l'ETR de ces trois méthodes sont assez proches.

**Tableau 17 : Résultats des valeurs de l'ETR par les trois méthodes.**

Station	Méthode	Turc	Coutagne	Thornthwaite
Berrahal		595.99	548.67	465.88
Ain Berda		563.72	518.46	469.98
les Salines		586.84	538.19	479.75

L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des trois méthodes pour aboutir à une meilleure approche à l'estimation de l'E.T.R. Ce qui par la suite fera ressortir la formule qui est mieux appropriée dans le sous bassin du lac Fetzara.

La formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée, contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.

L'ETR est surestimée pour tous les mois de l'année par ailleurs, la méthode de Thornthwaite s'avère plus adaptée, puisqu'il y a similitude des conditions dans lesquelles a été émise avec celles qui règnent dans notre région d'étude.

## II. 6. Estimation de la lame d'eau écoulee

### II. 6. 1. Le ruissellement

Afin d'estimer le ruissellement, on doit appliquer la formule de Tixeront-Berckaloff qui est :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Sachant que :

**P** : Précipitation moyenne en m.

**R** : Ruissellement en m.

**ETP** : Evapotranspiration potentiel en m.

**Tableau 18 : Le Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckalof.**

Station	P (m)	ETP (m)	R(m)
Berrahal	0.6967	0.8768	0.1466
Ain Berda	0.6487	0.8651	0.1216
Salines	0.6772	0.8820	0.1330

### II. 6. 2. Infiltration efficace

L'infiltration efficace est déduite de l'équation du bilan hydrique :

$$Ie = P - ETR - R$$

**Tableau 19 : Les valeurs de l'infiltration efficace.**

	P (mm)	ETR		R		Ie	
		(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%
Berrahal	696.75	465.88	66.86	146.65	21.05	84.22	12.09
Ain Berda	648.67	469.98	72.45	121.56	18.74	57.14	8.81
Salines	677.17	479.75	70.85	133.05	19.65	64.38	9.51

A partir du tableau N° 19, on remarque que l'infiltration efficace ( $I_e$ ) varie d'une région à l'autre, elle est importante dans la région de Berrahal qui est la région la plus proche géographiquement de notre zone d'étude.

## II. 6. Evaluation de la sécheresse météorologique

La région du sous bassin versant du lac Fetzara recèle des potentialités hydriques importantes, Les ressources en eaux superficielles sont constituées par les eaux de surface tel que : les cours d'eau et l'étendue libres (le lac). Les principaux oueds qui drainent notre bassin sont l'oued Zied dans la partie Nord-Est , l'oued El Hout dans partie Sud et l'oued El Mellah dans la partie Ouest, ainsi que leurs affluents, qui sont moins importants mais qui jouent un rôle complémentaire dans l'écoulement superficiel, l'alimentation et surtout le drainage des nappes superficielles, Cette région renferme également des ressources en eau souterraines (Foufou A 2008., Habes S 2012., Zahi F.2014).

L'apport de la surveillance et le diagnostic de la sécheresse hydrique est intéressant dans l'étude hydro-climatologique (Djellouli F. 2016., Benaissa A. 2017., Haied N. 2017), les calculs ont été basés sur les données climatiques enregistrées sur une période de 44 ans.

### II. 6. 1. Définition de la sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel récurrent associé à une disponibilité déficitaire des ressources en eau sur une grande zone géographique et s'étend sur une période de temps considérable (Rossi G., 2000).

### II. 6. 2. La Classification de la sécheresse

Les sécheresses sont généralement classées en quatre catégories (Wilhite, D.A., et al 1985) qui inclut :

- **La sécheresse météorologique** : définie comme un manque de précipitations sur une région pendant une période de temps (Pinkeye, S., 1966).
- **La sécheresse hydrologique** : est liée à une période de sécheresse touchant les ressources hydriques superficielles et souterraines ce qui les rend insuffisantes pour les diverses utilisations de l'eau données par un système de gestion des ressources en eau (Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G., 1980).
- **La sécheresse agricole** : en général, se réfère à une période avec une baisse de l'humidité du sol résultant une mauvaise récolte, sans aucune référence aux ressources en eau de surface (Haied N. 2017).

- **La sécheresse socio-économique** : est associée à l'échec des systèmes de ressources en eau pour répondre à la demande en eau résultant des sécheresses associées à l'offre et à la demande d'un bien économique (eau) . (AMS ., 2004).

### II. 6. 3. Les indices de sécheresse

Il existe plus de 150 indices de sécheresse (Zargar A. et al. 2011). Un certain nombre d'indices a été développés pour quantifier la sévérité de la sécheresse, chacun avec ses propres forces et faiblesses (Mishra AK. et al 2010). Ils comprennent l'indice de sécheresse de Palmer, l'indice d'anomalie des précipitations, les déciles, l'indice d'humidité des cultures, l'indice la sécheresse de Bhalme et Mooly, l'indice d'approvisionnement en eau de surface, l'indice des précipitations nationales, l'indice des précipitations normalisés, l'indice de réclamation de la sécheresse et l'indice de reconnaissance de la sécheresse.

Afin d'évaluer et surveiller la sécheresse météorologique dans le but de prouver l'existence et d'adopter le meilleur scénario pour un essai de gestion, notamment, celle des infrastructures telles que les centres d'enfouissement techniques. On va utiliser l'Indice des précipitations normalisées (SPI) et l'Indice de reconnaissance de la sécheresse (RDI), le premier indice se base sur les précipitations moyennes mensuelles seulement et le second en plus des précipitations moyennes mensuelles, il se base aussi sur l'évapotranspiration potentielle déterminée à l'aide des températures moyennes mensuelles.

### II. 6. 4. Evaluation et surveillance de la sévérité de la sécheresse

En raison de l'augmentation de la demande en eau et du changement climatique imminent, ces dernières années ont été particulièrement axées sur les scénarios de sécheresse dans le monde. Comme un risque naturel, la sécheresse est mieux caractérisée par de multiples paramètres pour définir le type de sécheresse (météorologiques, hydrologiques, agricoles ou socio-économique).

Dans notre étude la sécheresse va être étudiée dans le but de prouver son existence, et pour évaluer l'étendue sur le plan temporelle.

### II. 6. 4. 1. Les caractéristiques de la sécheresse météorologique

- A- La durée :** selon la région, la durée de la sécheresse peut varier d'une semaine à quelques années. En raison de la nature dynamique de la sécheresse, une région peut subir des sorts humides et secs simultanément en tenant compte des différents pas de temps (NCDC. 2010).
- B- L'intensité :** c'est le rapport de la magnitude de la sécheresse par sa durée.
- C- La sévérité :** deux usages sont prévus pour la sévérité de la sécheresse : le degré du déficit de précipitation, ou le degré d'impact résultant du déficit (Wilhite, D.A. 2004).
- D- La fréquence (période de retour) :** la fréquence ou la période de retour d'une sécheresse est définie comme le temps moyen entre les événements de sécheresse qui ont une gravité égale ou supérieure à un seuil.

### II. 6. 4. 2. Les indices de la sécheresse météorologique

Les indices de sécheresse météorologiques sont des mesures quantitatives qui caractérisent les niveaux de sécheresse en assimilant les données d'une ou plusieurs variables comme la précipitation et l'évapotranspiration en une seule valeur numérique (Mishra AK. 2010).

Il n'existe pas d'indice unique pouvant prévoir la sécheresse, les indices de sécheresse météorologiques simplifient les fonctions climatiques complexes et peuvent quantifier les anomalies climatiques quant à leur sévérité, leur durée et leur fréquence.

Parmi les indices météorologiques les plus connus il y a l'indice des précipitations normalisées (SPI) et l'indice de la reconnaissance de la sécheresse (RDI), ces deux indices vont être utilisés dans notre étude.

#### a- L'indice des précipitations normalisées

Le S P I dérivé du mot anglais Standardized Precipitation Index, c'est l'indice météorologique le plus connu, il est basé uniquement sur les données des précipitations. Il compare les précipitations avec leurs moyennes pluriannuelles et peut être calculé pour n'importe quelle zone. Une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et sa valeur atteint une intensité inférieure de -1, la durée sèche se termine lorsque le SPI devient positif. (McKee TB, 1993).

Parmi ces avantages, il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps ainsi qu'il présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents, par contre il ne repose que sur les relevés des précipitations et ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

Le calcul de cet indice se fait à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{SPI} = (\text{pi} - \text{pm})/\sigma$$

Sachant que :

Pi : est la Précipitation de l'année i ;

Pm : la Précipitation moyenne ;

$\sigma$  : la Déviation standard ou écart type.

**Tableau 20 : Valeurs de l'indice SPI.**

2.0 et plus	Extremement humide
De 1.5 à 1.99	Très humide
De 1.0 à 1.49	Modérément humide
De -0.99 à 0.99	Proche de la normale
De -1.0 à -1.49	Modérément sec
De -1.5 à -1.99	Très sec
-2 et moins	Extremement sec

Source : l'organisation météorologique mondiale.

**Tableau 21 : Probabilité d'occurrence.**

Indice SPI	Catégorie	Nombre de fois sur 100 ans	Fréquence
De 0 à -0.99	Légère sécheresse	33	1 fois tous les 3 ans
De -1.00 à -1.49	Sécheresse modérée	10	1 fois tous les 10 ans
De -1.5 à -1.99	Grande sécheresse	5	1 fois tous les 20 ans
< -2.0	Sécheresse extrême	2	1 fois tous les 50 ans

Source : l'organisation météorologique mondiale.

### **b- L'indice de la reconnaissance de la sécheresse**

Le R D I dérivé du mot anglais Reconnaissance Drought Index (Tsakiris G, et al 2005) ; il quantifie le déficit de précipitation pendant plusieurs pas de temps, précisément il se base sur les données de la précipitation et de l'évapotranspiration, il est calculé comme suit :

$$RDI = \frac{Y^{(i)} - \bar{Y}}{\hat{\sigma}_y}$$

**Tableau 22 : Classification de la sécheresse selon les indices météorologiques SPI et le RDI. (Zarch MAA, et al 2011)**

Catégories	Sécheresse météorologique	
	SPI	RDI
Extrêmement sec	$\leq -2$	$RDI < -2$
sévèrement sec	$[-1,5 \text{ à } -1,99]$	$-2 \leq RDI \leq -1,5$
Modérément sèche	$[-1 \text{ à } -1,49]$	$-1,5 \leq RDI \leq -1$
Ordinaire	$[-0,99 \text{ à } 0,99]$	$-0,5 \leq RDI \leq +0,5$
Modérément humide	$[1 \text{ à } 1,49]$	$+1 \leq RDI \leq +1,5$
Très humide	$[1,5 \text{ à } 1,99]$	$+1,5 \leq RDI \leq +2$
Extrêmement humide	$\geq +2$	$RDI > +2$

### c- Evaporation potentielle (ETP) selon la Méthode de Thornthwaite

Thornthwaite (1948) a conçu une méthodologie pour estimer l' $ET_0$  pour une végétation courte avec un approvisionnement en eau adéquat dans certaines parties des États-Unis. La procédure utilise la température moyenne de l'air et le nombre d'heures de lumière du jour, et est donc classée comme méthode à base de température. L' $ET_0$  mensuel peut être estimé selon Thornthwaite (1948) par l'équation suivante :

$$Et_0 = ET_0 sc \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{dm}{30} \right)$$

## II. 6. 4. 3. Evaluation et surveillance de la sévérité de la sécheresse météorologique

### II. 6. 4. 3. 1. Corrélation entre le SPI et le RDI

L'analyse de la sécheresse et de la durée des séquences de sécheresse observées dans le sous bassin du lac Fetzara est réalisée selon les cinq pas de temps choisies 1, 3, 6, 9 et 12 mois dans la station météorologique des salines.

Le tableau 24 et la figure 26 représentent les valeurs moyennes du coefficient de la corrélation (R) entre le SPI et le RDI pour la station des Salines durant la période de 1972

jusqu'à 2016 et pour différentes échelles de temps, la valeur du coefficient de corrélation la plus faible est enregistrée pour le pas de temps trois (3) mois ( $R = 0.89$ ), par contre la valeur la plus forte est de 0.97 pour le pas de temps 12 mois.

La corrélation est considérée comme parfaite quand le coefficient  $R$  prend des valeurs proches de 1, ce qui signifie que les deux indices utilisés sont bien adaptés à notre étude de sécheresse (Fig.27) (Tab.23).

**Tableau 23 : Coefficient de corrélation entre le SPI et le RDI pour différents pas de temps.**

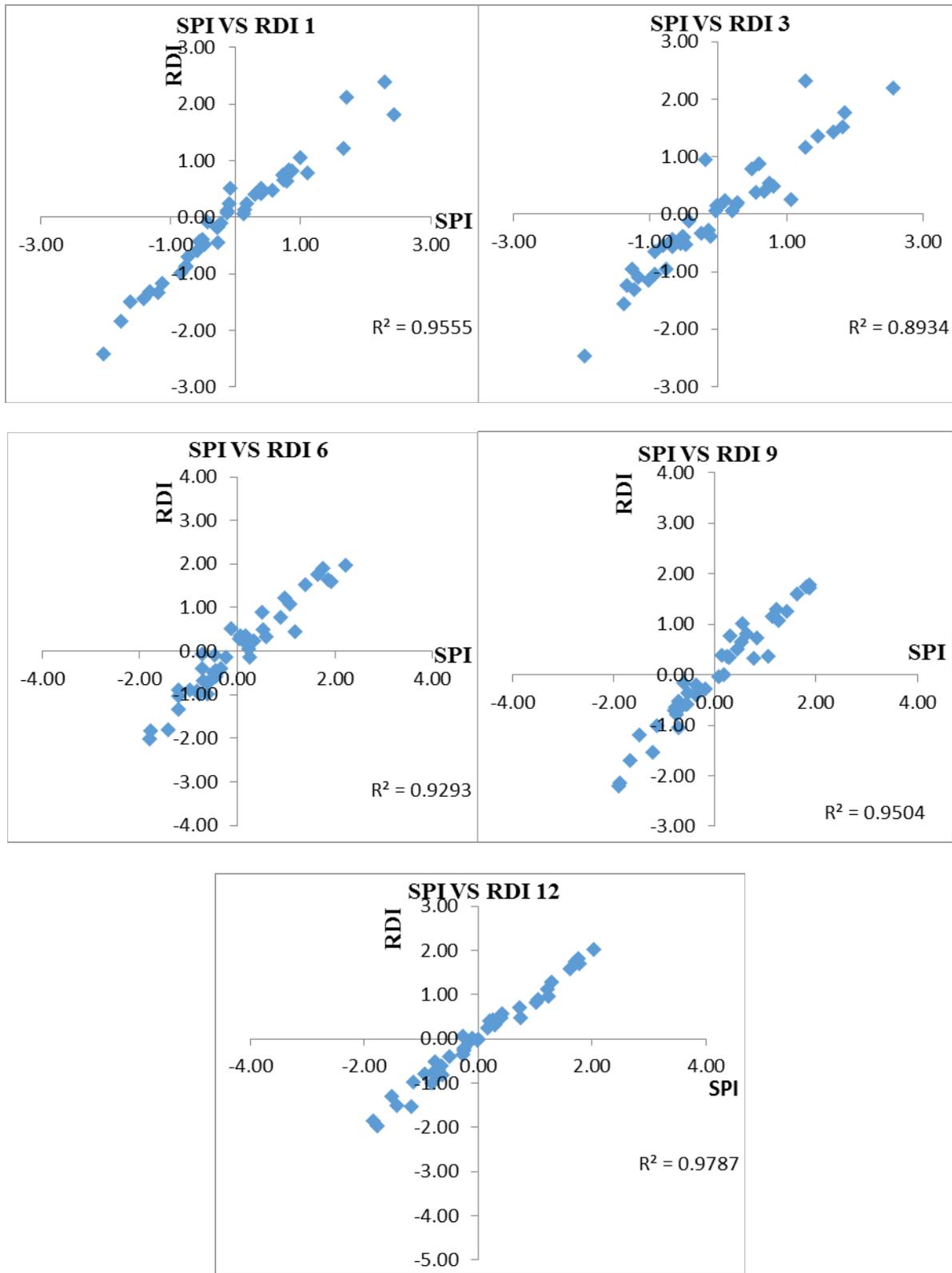
Pas de temps	Coefficient de corrélation (R)
SPI 1 vs RDI 1	0.95
SPI 3 vs RDI 3	0.89
SPI 6 vs RDI 6	0.92
SPI 9 vs RDI 9	0.95
SPI 12 vs RDI 12	0.97

#### II. 6. 4. 3. 2. Interprétation des résultats

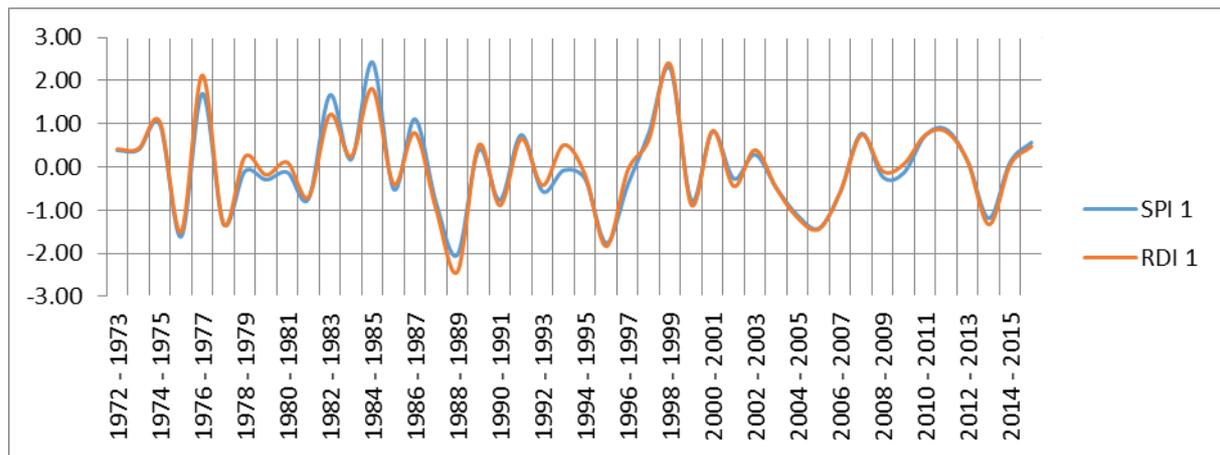
On peut identifier les années de sécheresse (sévérité, durée) à partir de l'SPI et l'RDI pendant la période de 1972 jusqu'à 2016 dans le sous bassin versant du lac Fetzara.

##### a- La sécheresse météorologique pour le court terme

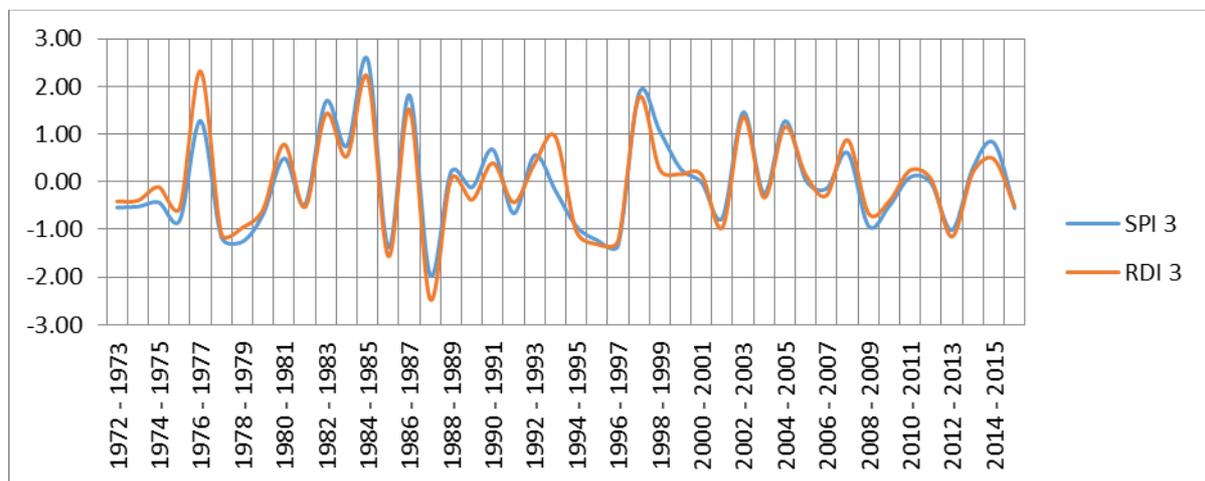
Les figures (28 et 29) présentent la comparaison entre les SPI et les RDI pour la station des Salines dans la période de 1972 à 2016 pour le court terme (un pas de temps de 1 et 3 mois). Concernant la durée maximale de la sécheresse dans un pas de temps d'un mois, il est de 4 ans successifs entre 2003 et 2007 par contre au pas de 3 mois on observe deux séquences de sécheresse qui s'allongent de trois années consécutives, l'une de 1977 à 1980, l'autre de 1994 à 1997, Les SPI et les RDI montrent presque la même sévérité qui est une sévérité modérée à extrême. La sévérité maximale de la sécheresse s'observe respectivement durant la période allant de 1987 jusqu'à 1989 ( $SPI = -2$ ), c'est une sécheresse extrême qui se répète tous les 50 ans selon le tableau N° 21.



**Figure 27 : Diagramme du coefficient de corrélation entre SPI et RDI pour la station des Salines (1972-2016).**



**Figure 28 : Comparaison des SPI 1 et RDI 1 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 1 mois.**

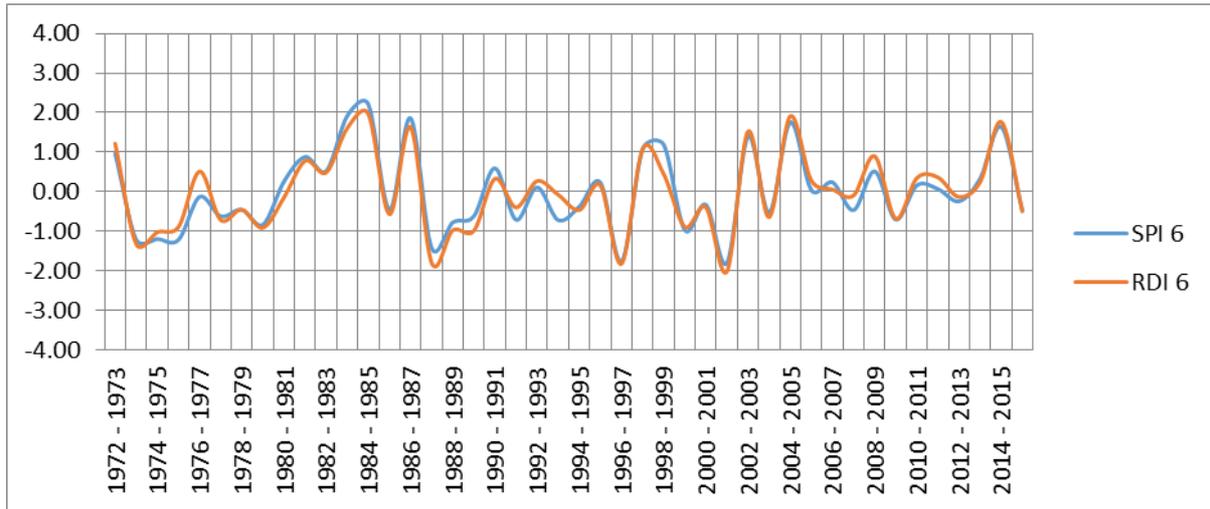


**Figure 29 : Comparaison des SPI 3 et RDI 3 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 3 mois.**

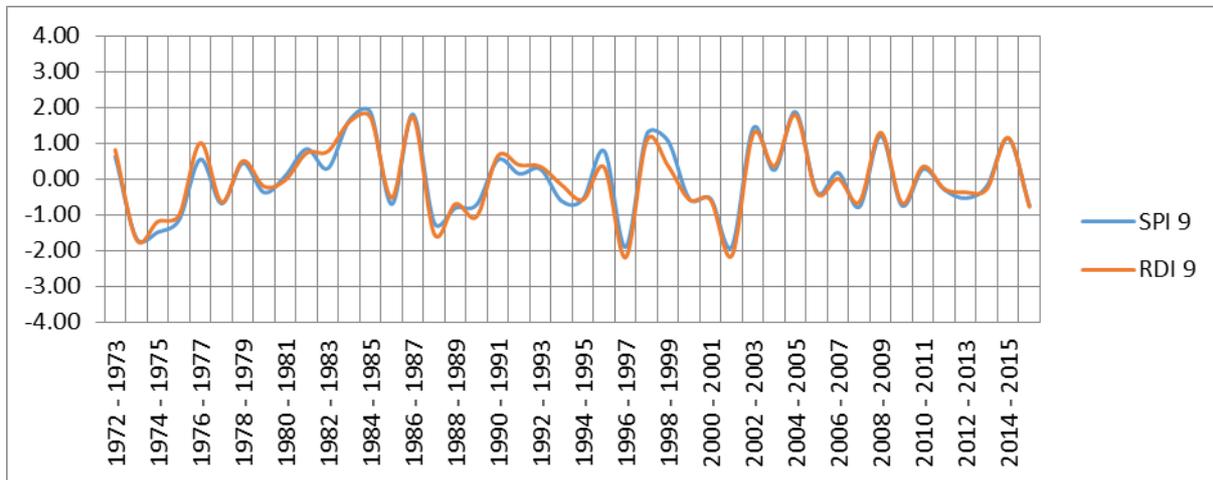
#### **b- La sécheresse météorologique pour le moyen et le long terme :**

Selon les figures 30, 31 et 32 les SPI et les RDI à des pas de temps de 6, 9 et 12 mois (moyen et long terme) ont montré presque les mêmes durées de sécheresse.

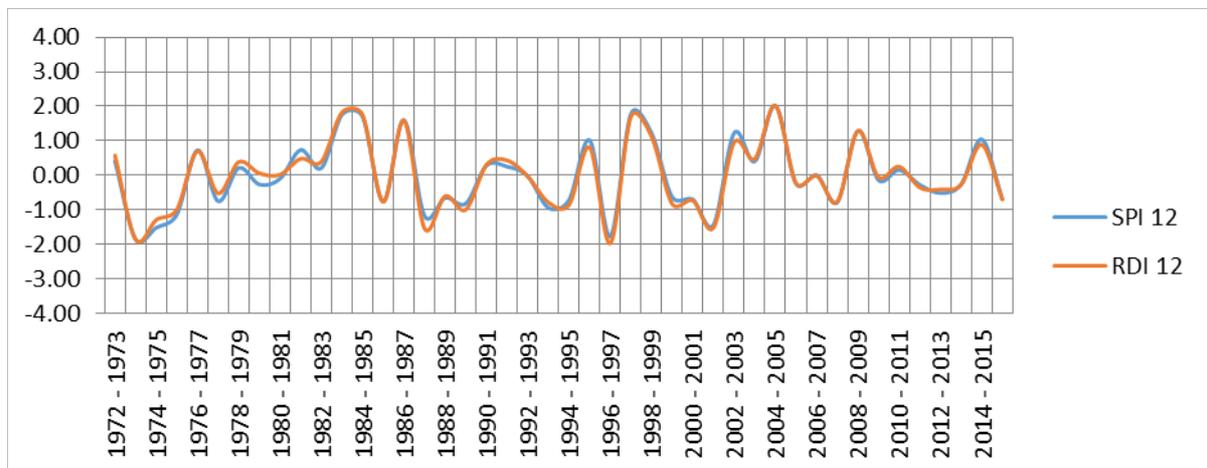
Dans ces pas de temps les séquences de sécheresse les plus longues (3 années successives) s'observent durant les années 1973 à 1976, 1987 à 1990 et 1999 jusqu'à 2002 d'une sévérité modéré à extrême, cette sévérité est de  $-2$  pendant les années 2001 à 2002 et 1973 à 1974 pour le pas de temps 9 et 12 mois respectivement. Concernant les années sèches nous avons recensé 10 ans secs pour les pas de temps 6, 9 et 12 mois.



**Figure 30 : Comparaison des SPI 6 et RDI 6 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 6 mois.**



**Figure 31 : Comparaison des SPI 9 et RDI 9 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 9 mois.**



**Figure 32 : Comparaison des SPI 12 et RDI 12 pour la station des Salines (1972-2016) avec un pas de temps de 12 mois.**

A partir de cette surveillance et cette évaluation de la sécheresse météorologique dans le sous bassin versant du lac Fetzara, on peut distinguer que les deux indices montrent les mêmes durées de sécheresse. On ce qui concerne la sévérité de sécheresse le RDI présente des sévérités un peu plus élevées que celles présentées par le SPI.

On peut conclure que la période allant de 1987 à 2007 (30 ans) c'est la période la plus sèche ce qui traduit que notre région d'étude a connu une sécheresse pendant cette période.

## **II. 7. Conclusion :**

D'une superficie de 515 km<sup>2</sup> le sous bassin du lac Fetzara (03-13) est drainé par trois cours d'eaux principaux (Oued Zied où Nord-Est, Oued El Mellah à l'Ouest et Oued El Hout où Sud) qu'ils convergent vers le marais et rejoignent la mer par un exutoire unique qui est le canal de drainage.

Les données climatiques attribuent à la région un climat méditerranéen Subhumide caractérisé par deux saisons distinctes l'une pluvieuse et humide et l'autre sèche et chaude.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 677.99 mm (Salines), 696.75 mm (Berrahal) et 648.67 mm (Ain Berda), et des températures annuelles moyennes de l'ordre de 17,91°C (Salines).

La formule du bilan hydrique de Thornthwaite montre que la majeure partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration (465.9 mm pour Berrahal, 470.0 mm pour la station de Ain Berda et 479.7 mm pour les Salines).

La reconstitution du stock commence à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum 100 mm de Décembre à Avril. Elle diminue à partir du mois de Mai jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin, caractérisant le déficit agricole (DA) qui s'étale à Cinq (5) mois (402.3 mm dans les Salines, 410.9 mm à Berrahal et 395.2 à Ain Berda).

La surveillance et l'évaluation de la sécheresse à l'aide des indices météorologiques le SPI et le RDI ont montré que les 3 périodes de sécheresse qu'a connu notre sous bassin d'une sévérité modérée à extrême concerne l'agriculture et l'hydrologie en même temps et que la région d'étude peut subir d'autres périodes de sécheresse dans le futur.

**CHAPITRE III :**  
**HYDROGEOLOGIE**

### III. 1. Introduction :

Pour un meilleur diagnostic de la pollution et une maîtrise de la ressource en eau, il est nécessaire d'identifier les différents systèmes aquifères, de bien connaître les caractéristiques hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques des nappes rencontrées dans le sous bassin versant du lac Fetzara, ainsi que les processus qui conditionnent l'alimentation des nappes, le sens d'écoulement des eaux souterraines et les relations existantes entre les différents systèmes (Nappes-Oueds-Lac).

Selon la bibliographie et les études géologiques et hydrogéologiques effectuées antérieurement dans la région d'étude (Zenati N., et al., 2010, Zahi F., 2014, Khalfaoui H., 2007), l'examen de la carte hydrogéologique de la région d'Annaba nous a permis de distinguer que le sous bassin versant du lac Fetzara contient deux types de systèmes aquifères, dont les potentialités hydrauliques sont différentes et qui reflètent leurs caractéristique hydrogéologiques et hydrodynamiques, ainsi que leurs importances (Rouabhia A., et al., 2007).

### III. 2. La nappe des alluvions récentes et actuelles (superficielle) :

La nappe superficielle est répandue sur la majorité de la plaine d'Annaba, (fig.33 et 34). D'après la géomorphologie de la région, nous pouvons diviser la nappe en deux régions communiquant entre elles à travers le cordon dunaire d'El Kantra, dont la texture est différente (sables).

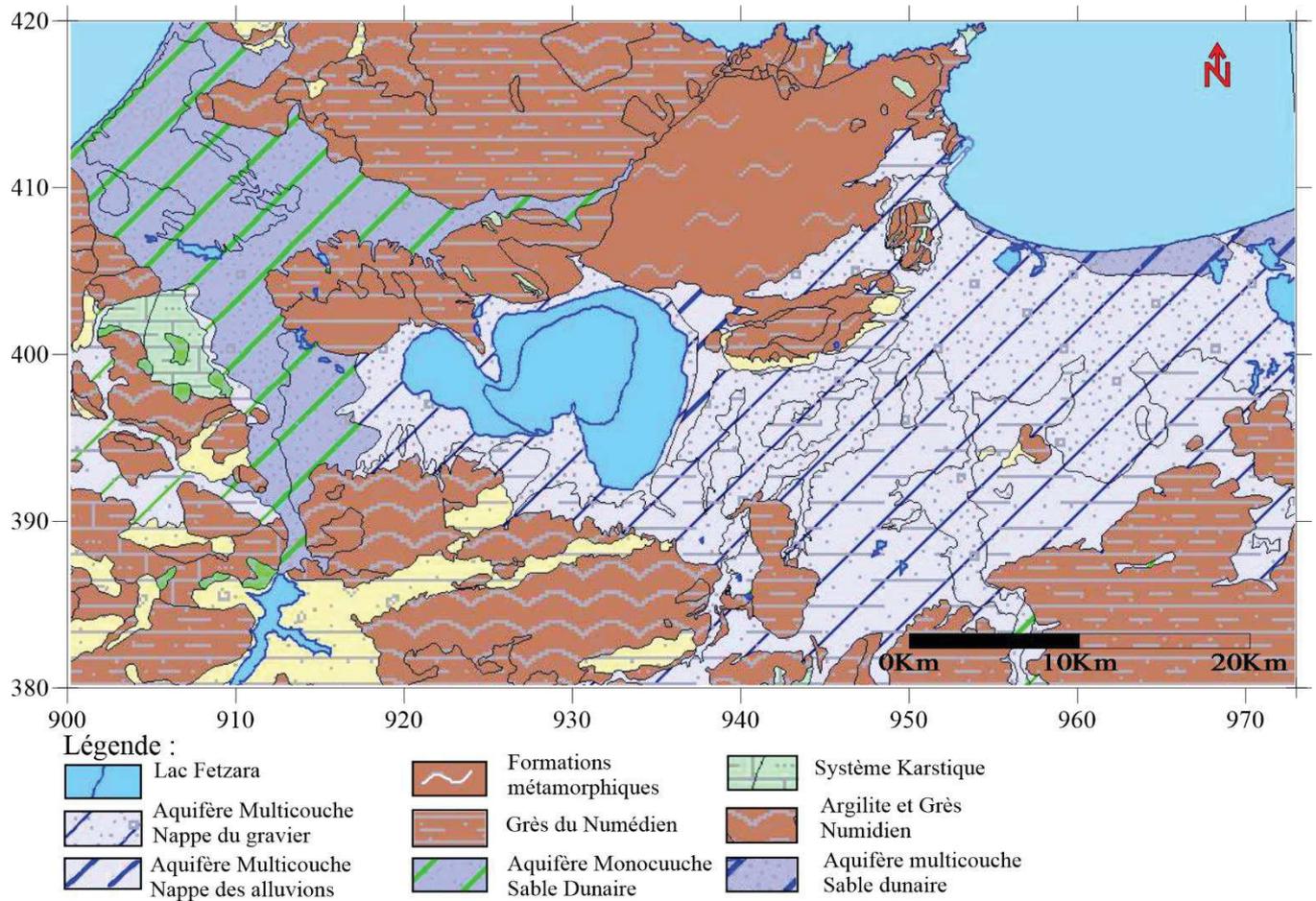
- La région Est présente une nappe superficielle continue localisée dans la plaine Ouest d'El Hadjar ainsi que dans la région d'Allélick. Elle est limitée par les alluvions de haut niveau et les grès numidiens au Sud, le massif dunaire de Bouteldja au Nord, les argiles et les grès numidiens à l'Est et le cordon dunaire d'El Kantra à l'Ouest.

- La région Ouest est une nappe superficielle discontinue qui entoure le lac Fetzara. Elle est limitée par le Tell Nord Guelmien au Sud, le massif de l'Edough au Nord, le cordon dunaire d'El Kantra à l'Est et par la plaine de Guerbes à l'Ouest. La lithologie de cette nappe est constituée par des alluvions récentes (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse. Elle est caractérisée par des valeurs de transmissivité oscillant entre  $2.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (Zenati N., et al., 2010), son épaisseur varie entre 2 et 10 m, donc à potentialités hydrauliques très limitées. La capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est moyenne d'ordre de 0.05 à 0.10 m/j.

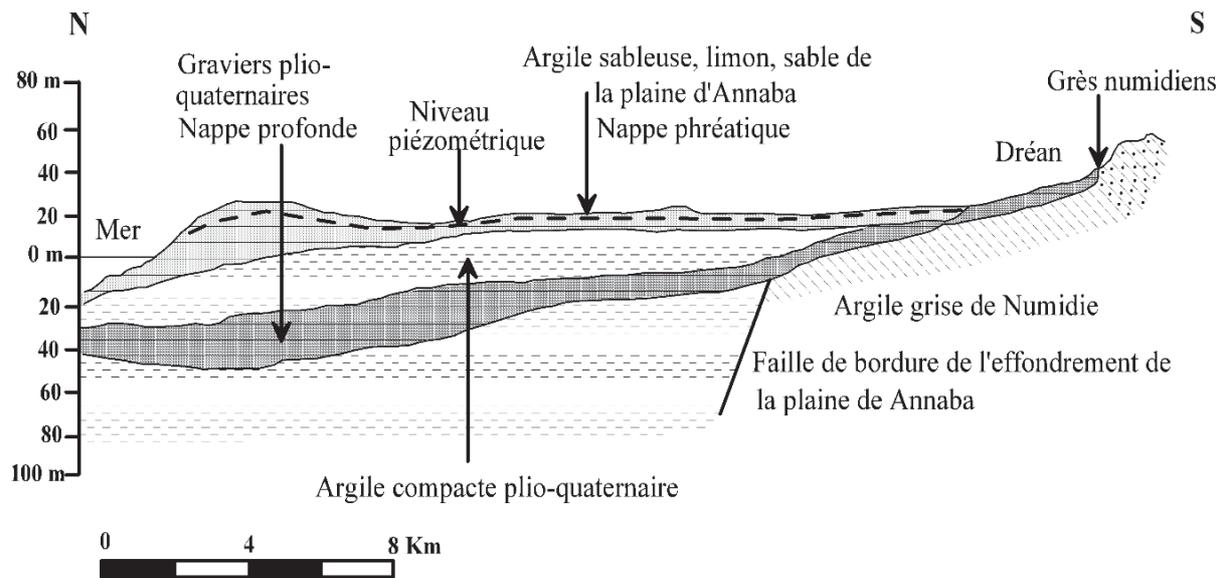
La nappe superficielle est fortement exploitée par des puits surtout et quelques forages. L'alimentation de cette nappe se fait par les précipitations et par les crues des oueds (Zenati, N., 1999 ; Belhamra A., 2001).

### III. 3. La nappe des gneiss altérés

Elle se localise dans la région Nord-Est du lac Fetzara, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et Beleleita (Fig.33 et 34). La nappe est alimentée par les eaux de pluie, son épaisseur moyenne est de 15 m. Elle est exploitée par des puits et des forages pour divers usages (industrie, élevage, alimentation humaine), avec un débit moyen des captages d'ordre de 2 l/s et elle est caractérisée par une perméabilité qui oscille entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s (DerradjiF., et al., 2005).



**Figure 33 : Extrait de la carte hydrogéologique de l'Algérie du Nord. (ANRH, Département Hydrogéologie)**



**Figure 34 : Coupe schématique du système aquifère de la région d'Annaba.** (In Derradji F., et al., 2005)

### III. 4. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe superficielle :

On estime généralement qu'un aquifère est très intéressant à exploiter si sa transmissivité est au moins égale à  $150 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ . Les résultats montrent que la transmissivité varie entre  $2.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  dans la plaine Ouest d'El Hadjar (Ferroum A., 2015). En revanche, la nappe qui entoure le lac a une transmissivité variant entre  $0.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (Foufou A., 2017, Habes S., 2012). A l'exception de certaines régions où la productivité est intéressante, la nappe présente dans l'ensemble une productivité très faible et ne peut être exploitée que pour l'irrigation. Le tableau 24 illustre la transmissivité et la perméabilité de quelques puits dans la nappe superficielle à l'Est du lac Fetzara.

**Tableau 24 : Paramètres hydrodynamiques de quelques points situés dans la nappe superficielle des sables et graviers à l'Est du lac Fetzara.** (D'après Zénati N., 1999)

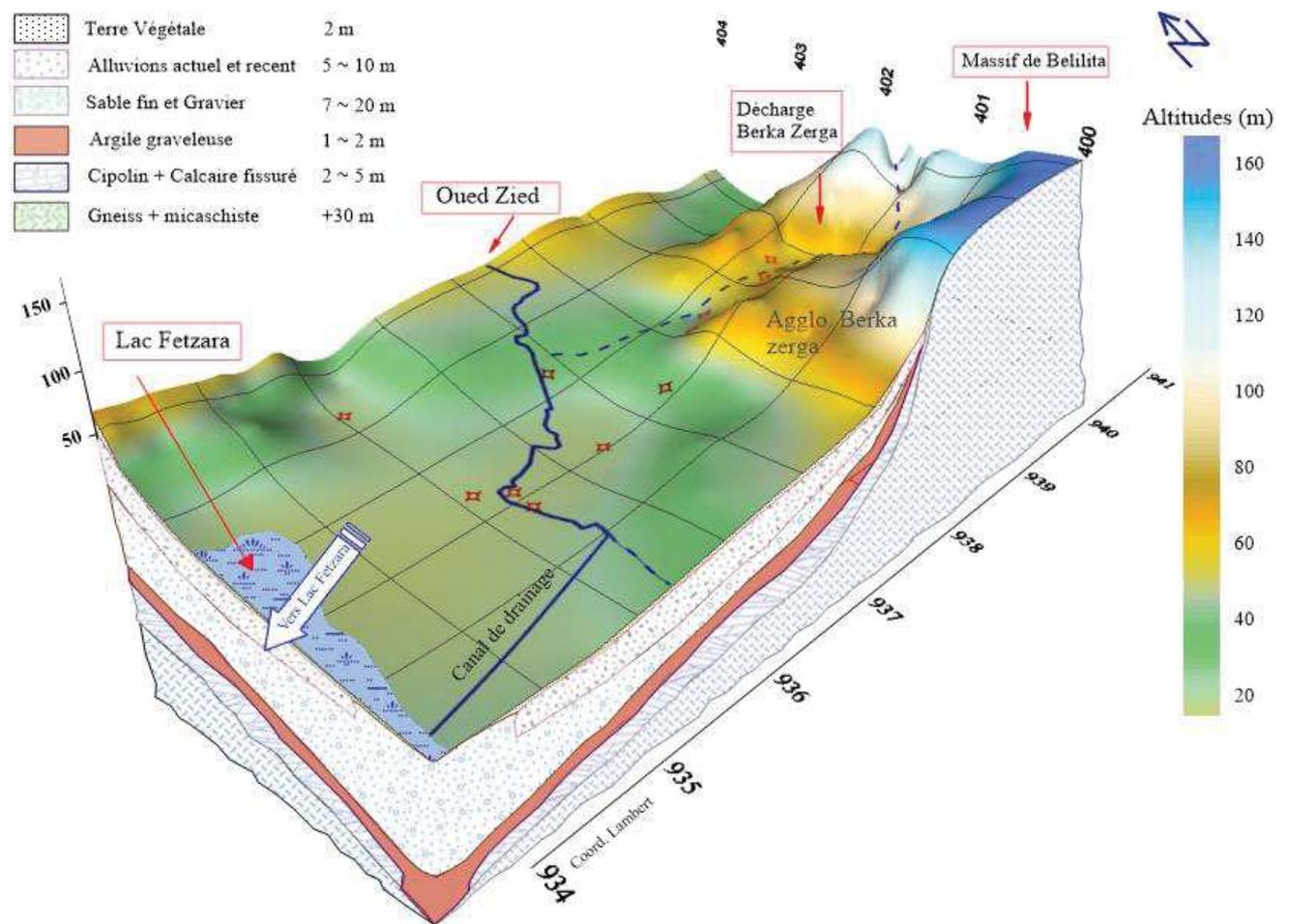
Nappe superficielle des sables et graviers	Coordonnées (Lambert en m)		Transmissivité ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Perméabilité ( $\text{m}/\text{s}$ )
	X	Y		
	935600	395400	$14 \times 10^{-3}$	/
	930200	403650	$0,17 \times 10^{-3}$	/
	929600	392700	$1,3 \times 10^{-3}$	/
	946000	405800	/	$8,5 \times 10^{-4}$
	949000	401100	/	$14 \times 10^{-4}$
	950250	402900	/	$12,6 \times 10^{-4}$

**III. 5. Les caractéristiques hydrodynamiques de la Nappe des cipolins :**

A titre comparatif (insuffisance des données dans la zone de la plain de Oued Zied), le tableau 25 représente les principales caractéristiques hydrodynamiques des aquifères similaires dans la grande plaine d’Annaba (Fig. 35)

**Tableau 25 : Paramètres hydrodynamiques de l’aquifère des Cipolins.**

Aquifères	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient d’emmagasinement
Nappe des cipolins	5.10 <sup>-3</sup> à 5.10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>



**Figure 35 : Bloc-diagramme montrant les horizons aquifères de la plaine de l’Oued Zied.**

**III. 6. Etude de la piézométrie :**

L’observation des cartes réalisées, nous montre d’après l’allure générale des courbes isopiezies que la nappe suit le modèle topographique (Fig.37). L’allure des surfaces piézométriques montre des zones d’alimentation au Nord, à l’Est et au Sud-est de la nappe. Elles sont caractérisées par des courbes isopiezies divergentes, donc, à concavité orientée vers l’amont

et à faible espacement. Ce dernier indique un écoulement rapide. L'écoulement souterrain diverge vers l'Ouest et vers le lac Fetzara. L'alimentation de la région Nord de la nappe s'effectue à partir des massifs de l'Edough et de Beleliétapar les précipitations atmosphériques.

Les interprétations des cartes piézométriques de la nappe superficielle (libre) de l'Oued Ziedmontrent une très forte interaction entre l'Oued, le lac et le système aquifère, deux types d'échanges semblant exister entre la nappe d'une part et le Lac et l'Oued d'autre part. Le premier met en évidence une alimentation du Lac par la nappe (débordement de la nappe) et l'Oued Zied, durant la période des hautes eaux, quant au second, il montre un drainage de la nappe par l'Oued Zied et par le lac Fetzara pendant les basses eaux, ce résultat coïncide avec les études faites par (RouabhiaA., et al., 2007; Zenati N., 1999 et 2010) dans cette région.

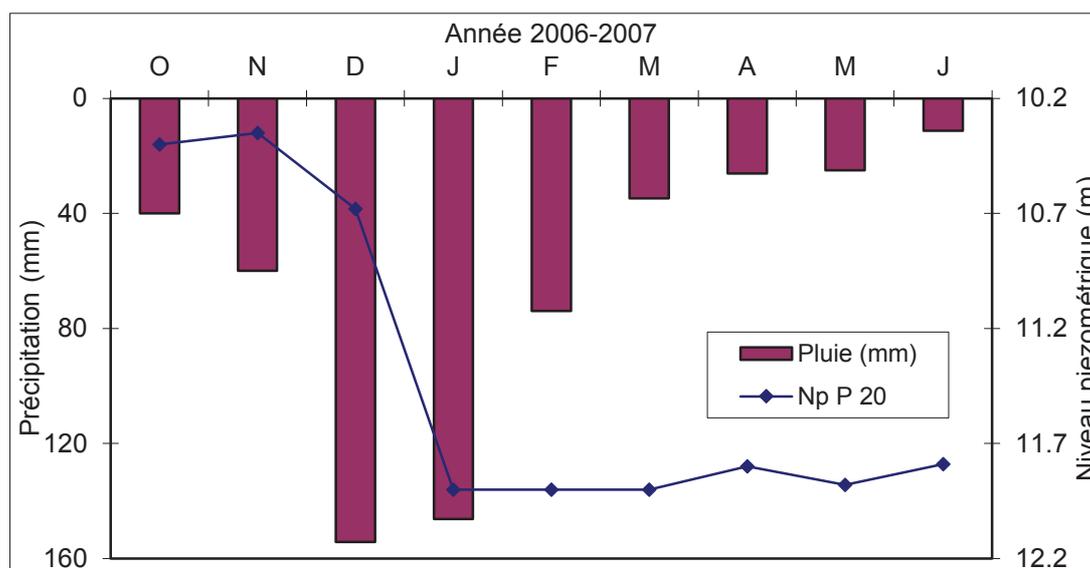
Les périodes de sécheresse enregistrées ont provoquées des extractions fortes d'eau dans les puits ce qui a provoqué des changements dans la direction de circulation de l'eau souterraine. En plus, la recharge provenant des précipitations a diminué aussi.

Les mesures piézométriques réalisées nous permettent de déterminer la réponse de la nappe aux précipitations enregistrées. A cet effet, nous avons comparé l'évolution du niveau piézométrique au niveau de quelques puits avec les précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la station des Salines durant la période des mesures piézométriques (octobre 2005- Juin 2006), période durant laquelle nous avons une persistance de la sécheresse météorologique (Fig.36).

Le tableau 26 contenant les résultats obtenus montre que la surface piézométrique oscille entre 1.85 et 4.06 m de profondeur pendant la période des basses eaux (Novembre 2005), à cause de l'effet du pompage intensif dans certains puits à usages domestique et agricole. Cependant, cette profondeur est d'environ 0.6 et 1.9 m au cours de la période des hautes eaux (Mai 2006), grâce aux apports pluviométrique cumulant 460 mm durant les six (6) mois précédents. Durant cette période, le niveau piézométrique la nappe se confond avec la surface topographique dans la majorité des puits grâce à la saturation de la nappe. A la fin du mois de Juin 2006, et à cause des faibles apports pluviométrique (11mm), la profondeur augmente et varie entre 0.75 et 2.41 m (Tab.22).

**Tableau 26 : Fluctuations de la profondeur de la surface piézométrique (Octobre 2005-Juin 2006).**

Campagnes	NS (m)			Pluie (mm)
	Min	Max	Moy.	
<b>Octobre 2005</b>	1.8	4.05	<b>3.3</b>	<b>40</b>
<b>Novembre 2005</b>	1.85	4.06	<b>3.3</b>	<b>60</b>
<b>Décembre 2005</b>	1.15	3.9	<b>2.6</b>	<b>154.2</b>
<b>Janvier 2006</b>	0.6	2.4	<b>1.2</b>	<b>146.2</b>
<b>Février 2006</b>	0.61	2.1	<b>1.2</b>	<b>73.9</b>
<b>Mars 2006</b>	0.6	2	<b>1.1</b>	<b>34.8</b>
<b>Avril 2006</b>	0.65	1.92	<b>1.1</b>	<b>26.1</b>
<b>Mai 2006</b>	0.65	1.9	<b>1.1</b>	<b>25</b>
<b>Juin 2006</b>	0.75	2.41	<b>1.3</b>	<b>11.3</b>



**Figure 36 : Variation de la profondeur de la surface piézométrique en fonction des précipitations (2006-2007).**

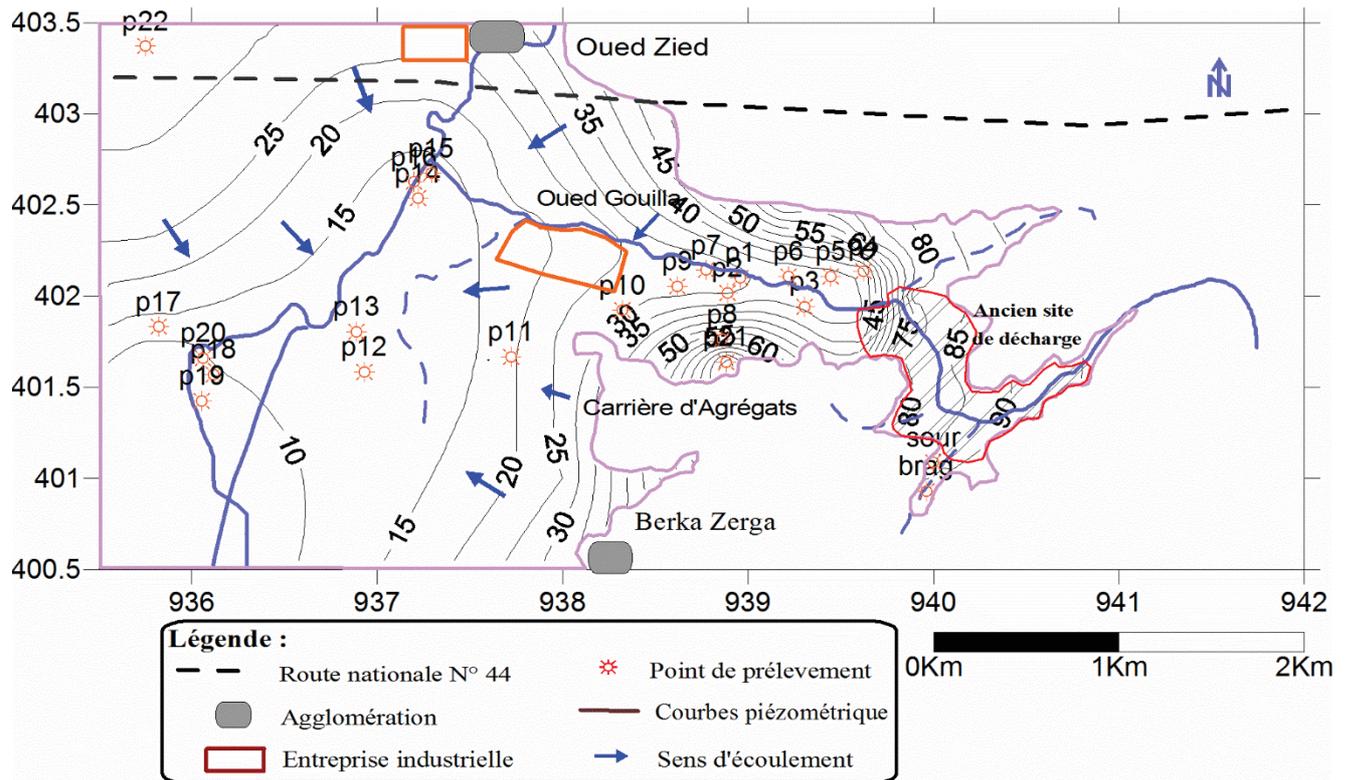


Figure 37 : Carte piézométrique du mois d'Octobre 2005.

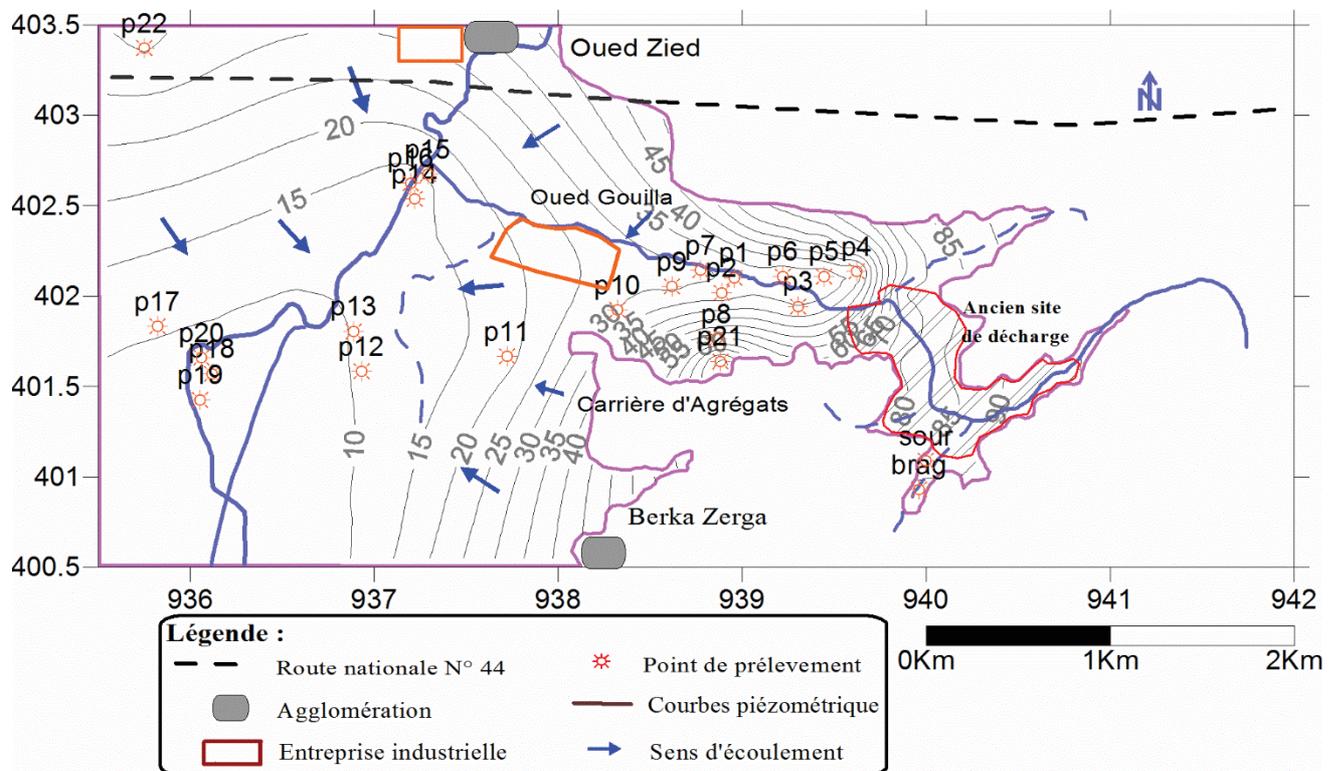


Figure 38 : Carte piézométrique du mois de Décembre 2005.

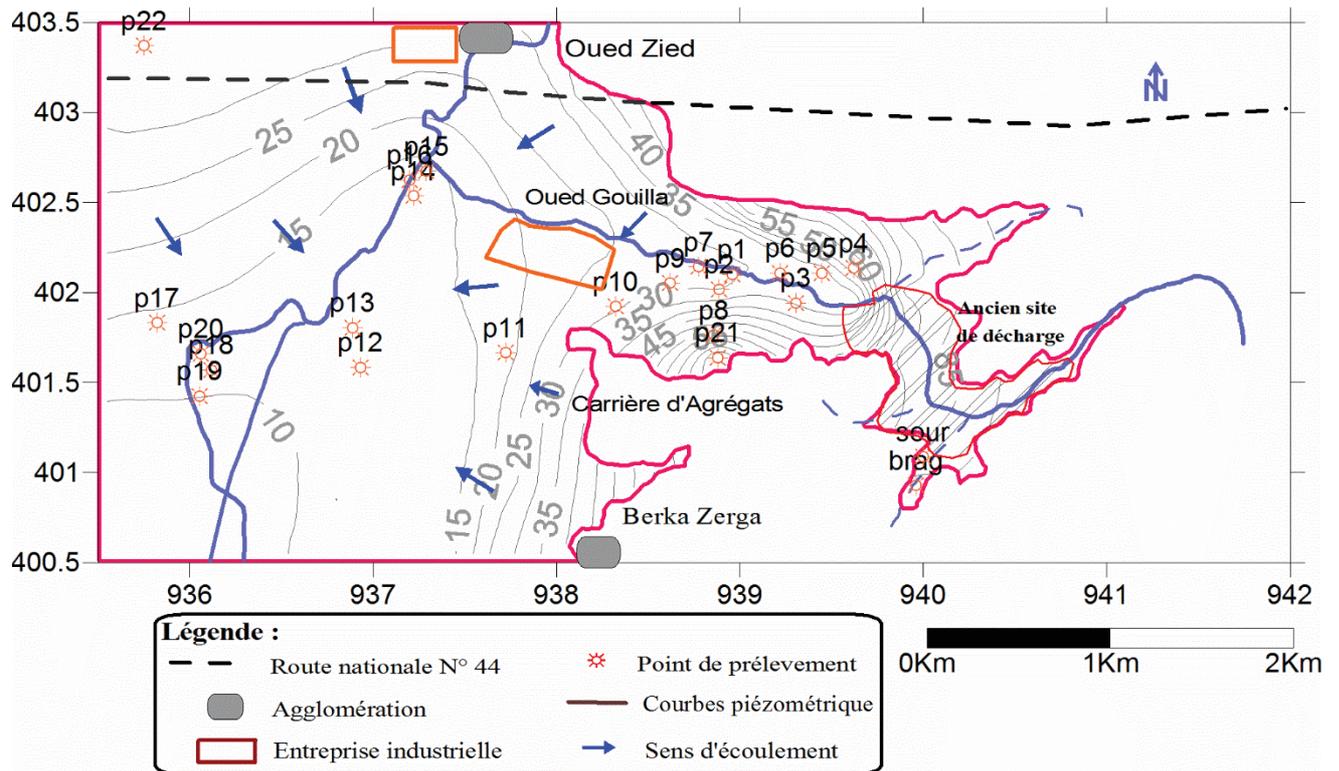


Figure 39 : Carte piézométrique du mois de Janvier 2006.

### III. 7. Gradient hydraulique

Il est calculé d'après la formule suivante :

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Tel que :

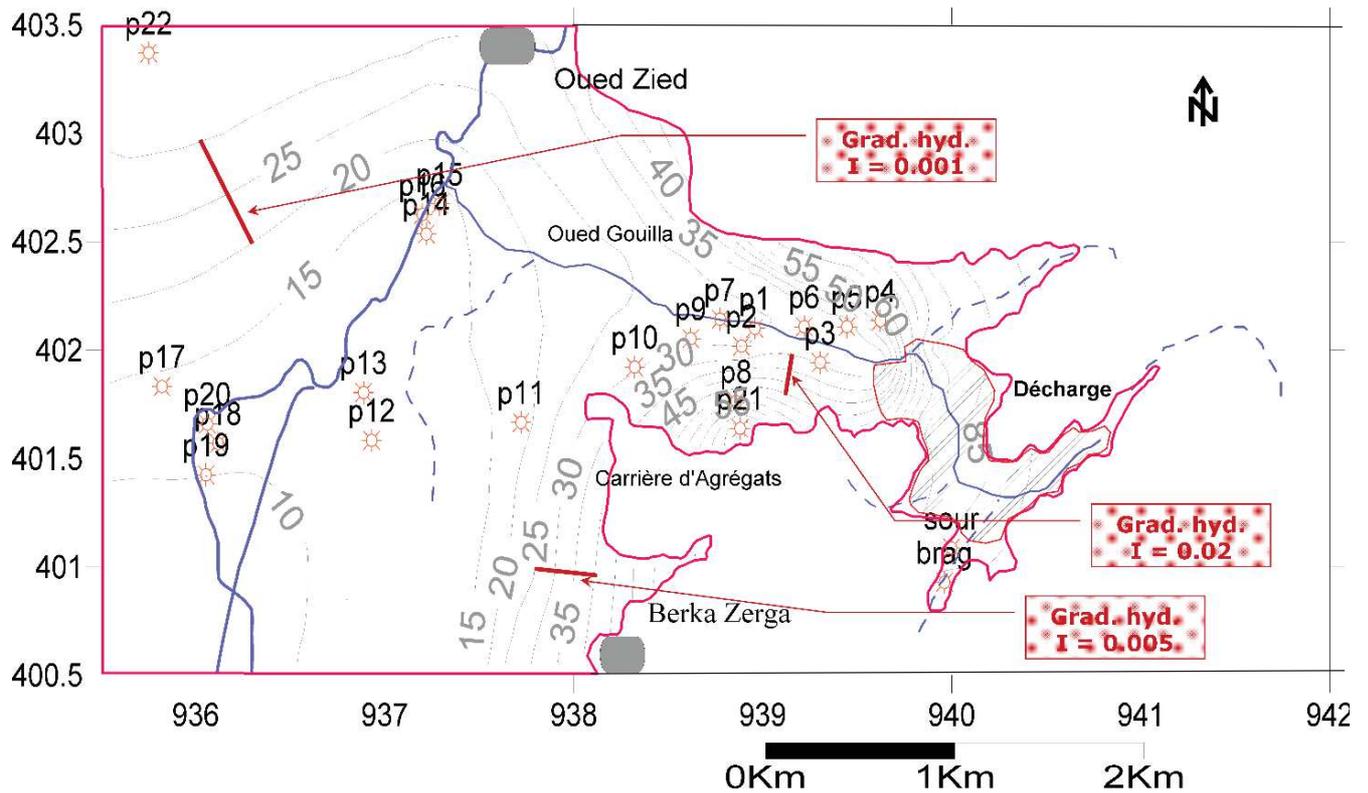
$i$  : gradient hydraulique.

$h_1$  : la charge en amont (m).

$h_2$  : la charge en aval (m).

$L$  : distance entre  $h_1$  et  $h_2$  (m).

L'allure des cartes piézométriques montre que l'espacement des courbes isopièzes diffère d'une région à l'autre en fonction de la valeur du gradient hydraulique. Cette variation est en relation avec la nature de l'écoulement et donc du gradient hydraulique. Puisque toutes les cartes piézométriques présentent la même allure des courbes de niveaux, on s'intéressera ici seulement à celle du mois de Juin 2006 pour les calculs et la représentation du gradient hydraulique (Fig. 40).



**Figure 40 : Mesures du gradient hydraulique (moi de Juin 2006).**

La figure 40 représente le gradient hydraulique dans trois (03) secteurs différents on remarque que :

- Les piémonts des collines sont caractérisés par de fortes valeurs, qui sont de l'ordre de 0.02. Vers le Nord-Est, au niveau de la vallée de l'oued Gouilla, affluent de l'oued Zied, les courbes isopièzes sont très serrées, cette zone est marquée par des pentes fortes vers moyennes.
- Le secteur Sud-Est où se concentre l'agglomération urbaine de Berka Zerga, est caractérisé par des valeurs moyennes du gradient hydraulique de l'ordre de 0.05 à cause des pentes moyennes à faibles.
- Par contre, dans le centre de la plaine, et du côté du lac Fetzara, le gradient hydraulique est caractérisé par de faibles valeurs de l'ordre de 0.001 et les courbes isopièzes sont plus espacées.

### III. 7. Conclusion :

Du point de vue hydrogéologique, le bassin versant du lac Fetzara occupe la région Ouest de la plaine d'Annaba. La nappe de la plaine de l'oued Zied contient dans son sous-sol un système aquifère discontinu composé de la superposition de deux horizons (la nappe superficielle et la nappe profonde semi captive).

La nappe superficielle (libre) de l'oued Zied est contenue dans des alluvions récentes et actuelles. Elle est composée d'une lithologie argilo sableuse et argilo limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10 m, dont les potentialités hydrauliques sont très limitées. Cette nappe est exploitée par un nombre important de puits destinés à l'irrigation, l'industrie et l'élevage.

La deuxième nappe aquifère (appelée profonde) est constituée de cipolins et calcaires fissurés. Elle est semi-captive dans la vallée de l'oued Zied et se trouve à une profondeur de l'ordre de 10 m. Dans le secteur occidental, Cette dernière devient captive, sa profondeur augmente pour atteindre 20 m. Sur toute son étendue, l'épaisseur de la nappe profonde varie de 2 à 5 m.

L'aperçu piézométrique nous montre que le sens de l'écoulement est orienté vers le centre de la plaine de l'Est vers l'Ouest (lac Fetzara). L'alimentation des eaux souterraines se fait par les précipitations atmosphériques dans la période des hautes eaux. L'interprétation des cartes piézométriques montrent une très forte interaction entre l'Oued, le lac et les systèmes aquifères ; dans tous les cas, la nappe superficielle est drainée par l'oued Zied vers le lac.

Les périodes de sécheresse enregistrées ont provoquées des extractions fortes d'eau dans les puits ce qui a provoqué des changements dans la direction de circulation de l'eau souterraine. En plus, la recharge provenant des précipitations a diminué aussi.

On note aussi, que la région est caractérisée par des gradients hydrauliques faible dans la partie centrale ce qui représente une forte perméabilité indiquant, ainsi une probable exposition de la nappe à toute forme de pollution.

**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.

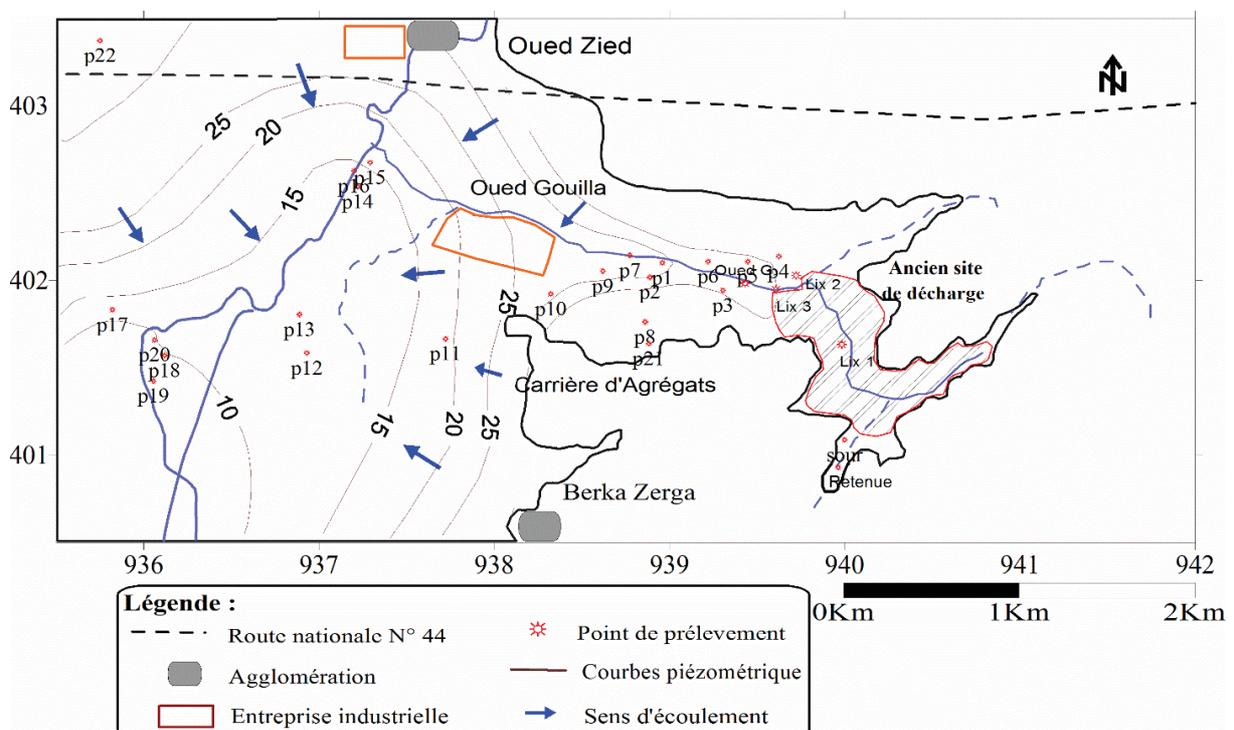


Figure 41 : Carte piézométrique et inventaire des points d'échantillonnage (Juin 2012).

### 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 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

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 (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>) 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 Ca<sup>2+</sup> (mg/l)**

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

#### **Le magnésium Mg<sup>2+</sup> (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<sup>-</sup>(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<sup>+</sup> (mg/l)**

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

#### **Les Sulfates SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (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 <sup>2+</sup> (mg/l)	151.82	59.4	393.7	95.07	200	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	55.92	16.8	118.1	34.25	150	150
Na <sup>+</sup> (mg/l)	122.46	18.8	522.7	116.68	200	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	14.24	2	51.5	15.94	20	12
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	195.48	19.8	645.9	165.39	500	250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	268.92	18.3	1487	351.5	400	250
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	380.46	135.9	1404.1	343.89	-	300
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (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).**

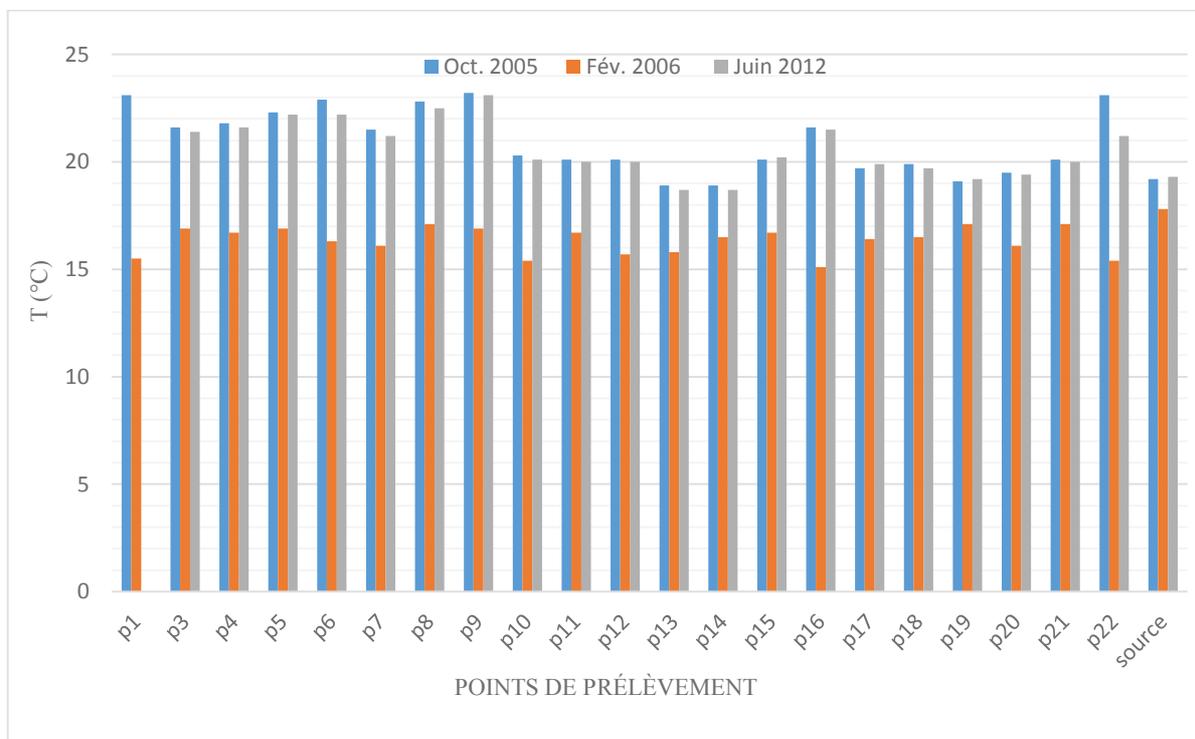
Point	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
BI	2.4%	2.0%	3.1%	2.3%	2.4%	2.0%	2.5%	2.2%	2.6%	2.0%
Point	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	
BI	1.3%	2.2%	2.0%	2.1%	-2.0%	2.0%	1.2%	2.9%	2.5%	

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

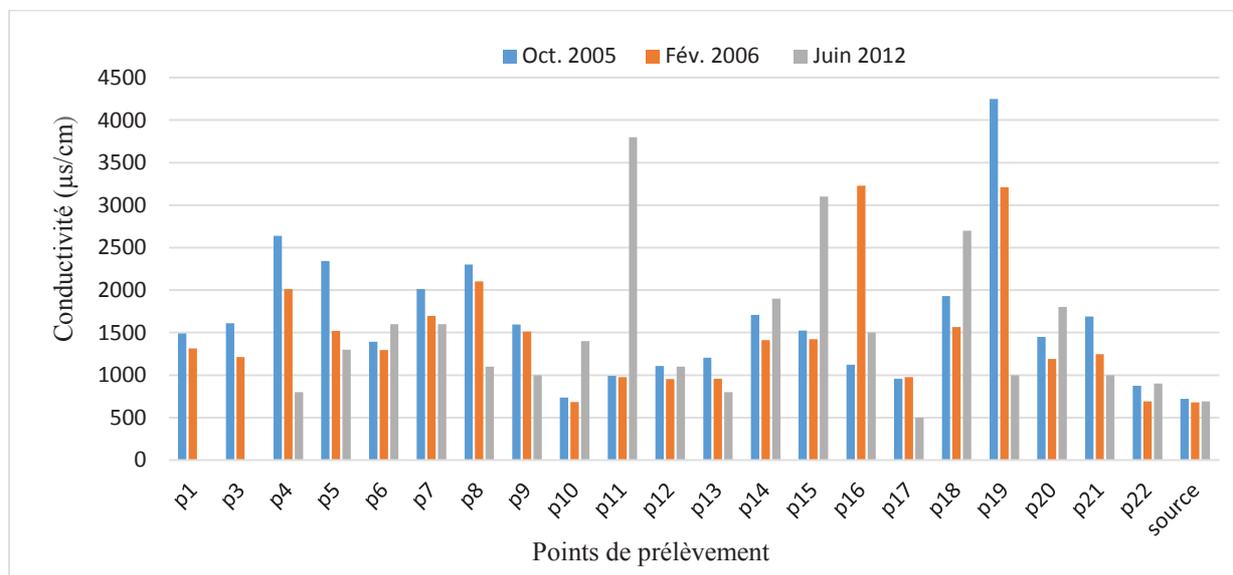
La mesure de la conductivité est un procédé simple à mettre en œuvre, elle permet d'apprécier la qualité de sels dissous dans l'eau. Une conductivité élevée traduit soit des pH anormaux, soit une salinité élevée. A 20° C, les eaux ne doivent pas être corrosives.

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

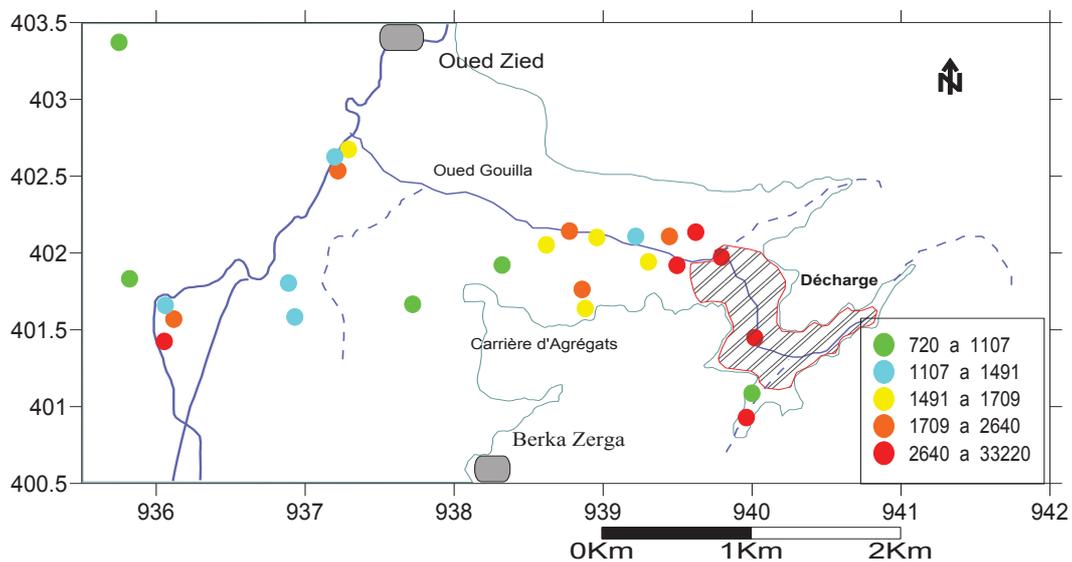


**Figure 43 : Variations spatiales de la conductivité électrique des eaux de la nappe de l'Oued Zied.**

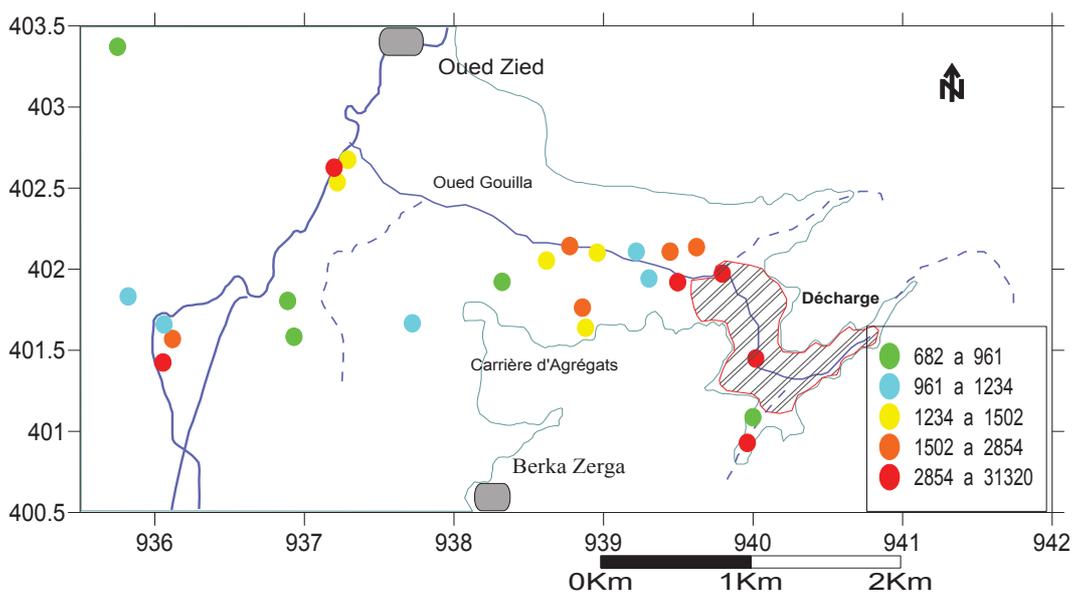
#### IV. 4. 1. 3. Cartes de répartition des conductivités électriques

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.**

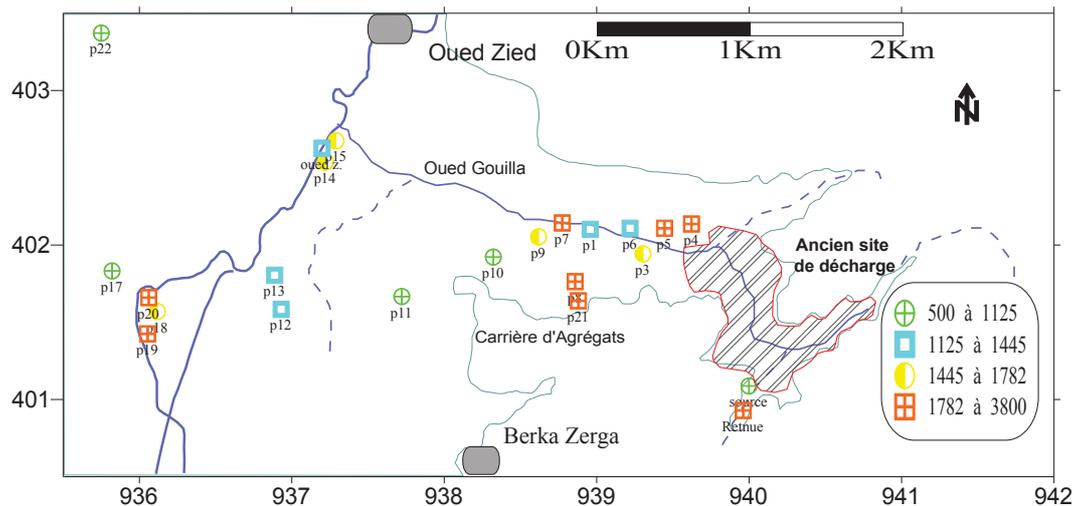


Figure 46 : Carte des conductivités ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Campagne de Juin 2012.

## 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  $\text{H}^+$  :  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ .

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)

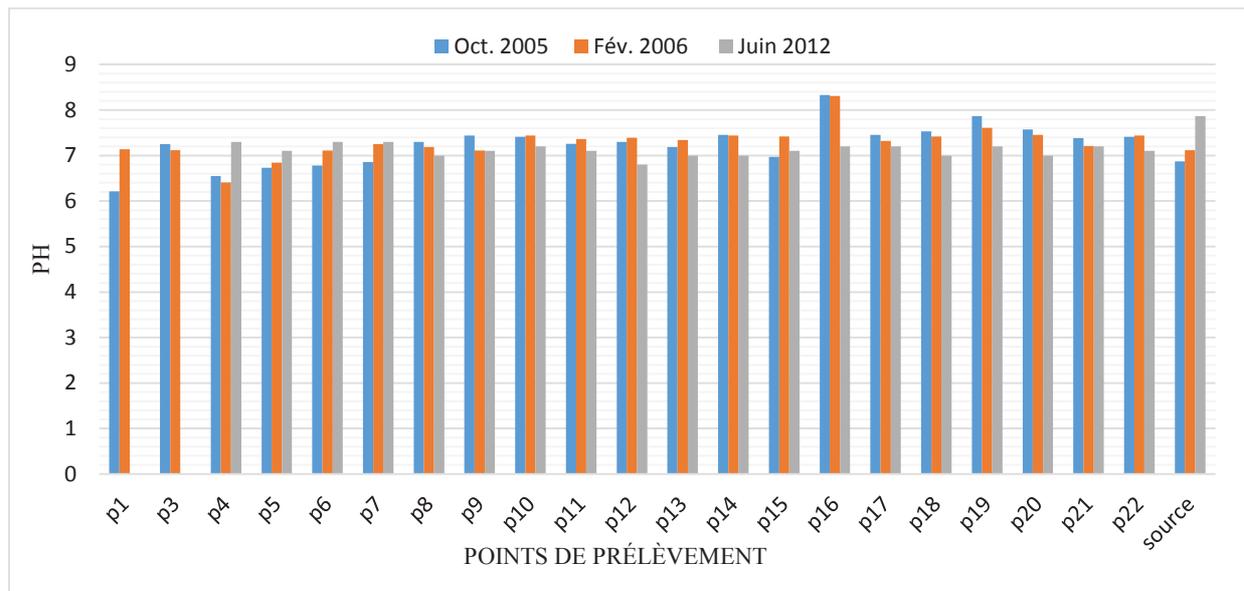


Figure 47 : Variations du pH des eaux de la nappe.

#### 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).

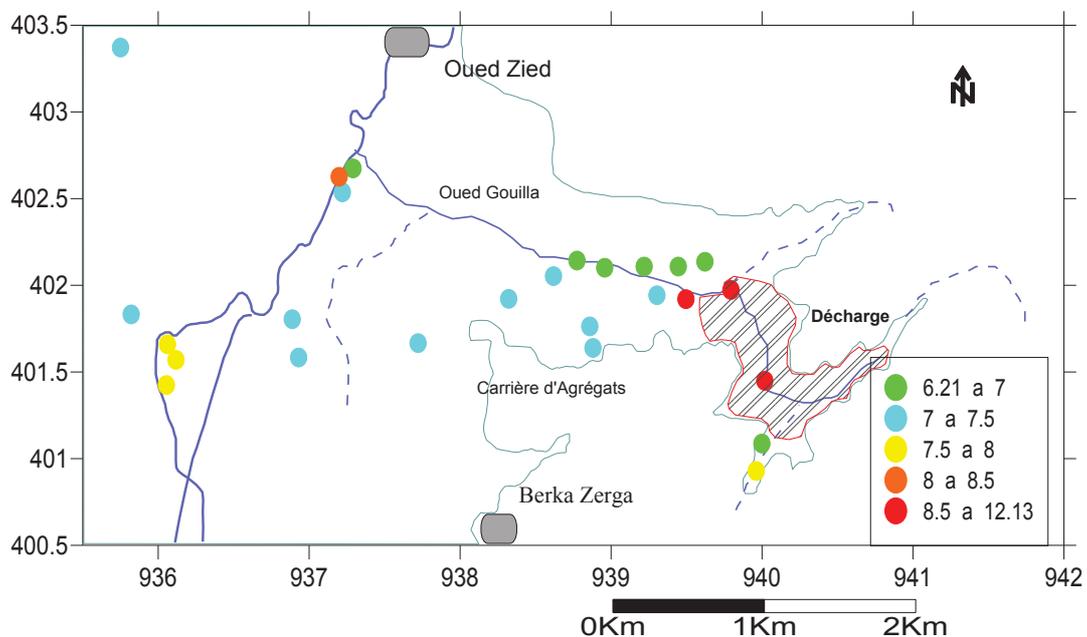


Figure 48 : Carte du pH, Campagne d'Octobre 2005.

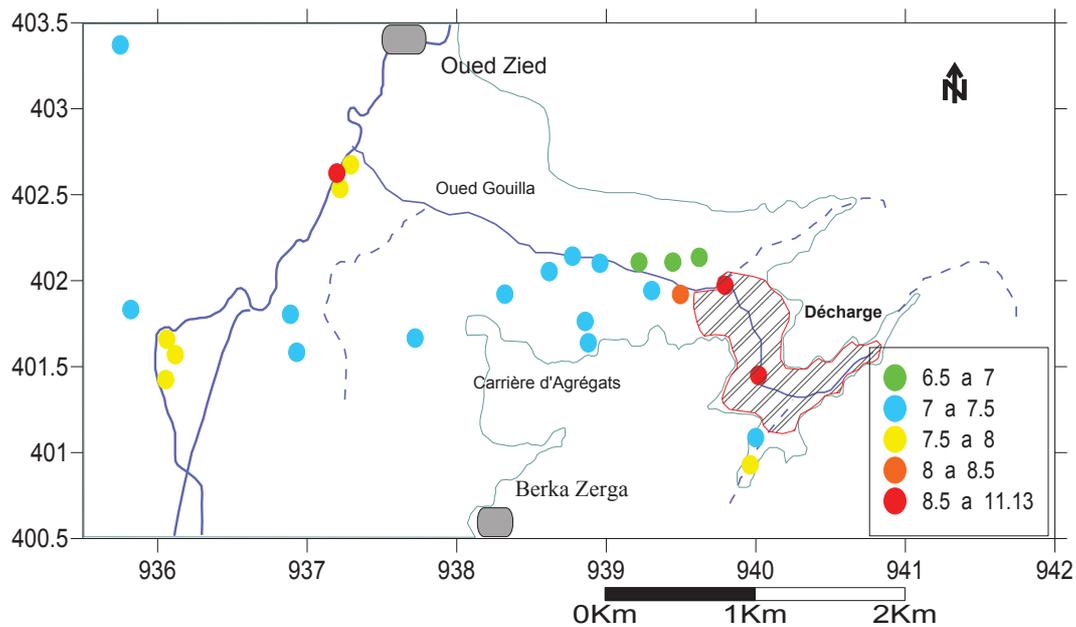


Figure 49 : Carte du pH, Campagne de Février 2006.

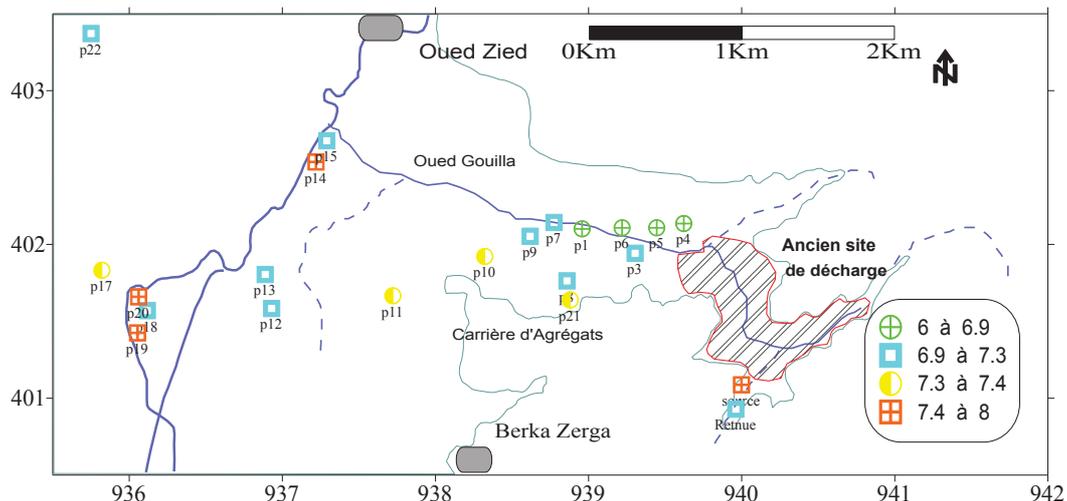


Figure 50 : Carte du pH, Campagne de Juin 2006.

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 ≈ 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.

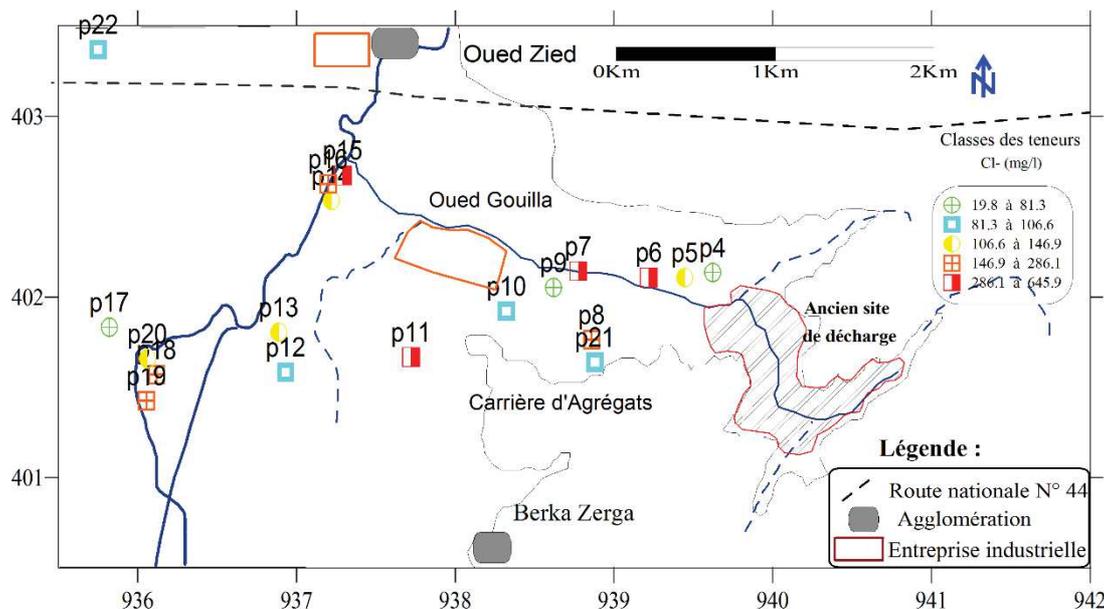


Figure 51 : Carte de répartition des teneurs en Cl<sup>-</sup> (mg/l), Campagne de Juin 2012.

#### IV. 4. 3. 2. Les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

Les sulfates proviennent des roches sédimentaires et métamorphiques : Les marnes, les argiles, schistes pyriteux, évaporites, (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O gypse, CaSO<sub>4</sub> anhydrite), célestine SrSO<sub>4</sub>, barytine BaSO<sub>4</sub>, algésite PbSO<sub>4</sub>, glauberite Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. 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 [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] ≈ 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).

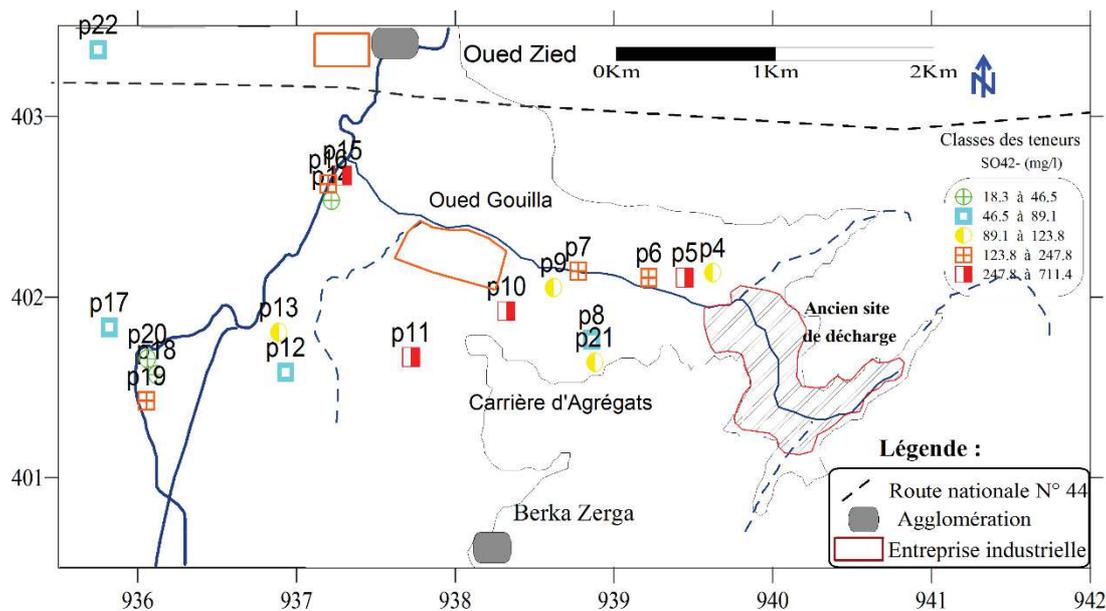
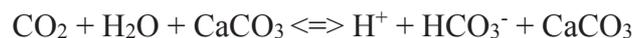


Figure 52 : Carte de répartition des teneurs en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/l), Campagne de Juin 2012.

IV. 4. 3. 3. Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

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



La présence des carbonates est donc contrôlée par le pH du milieu (-log<sub>10</sub> [H<sup>+</sup>]), lui-même contrôlé par la pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>). Une baisse de la pCO<sub>2</sub> augmente l'alcalinité. Dans les eaux naturelles l'alcalinité, exprimée en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, varie de 10 à 350 mg/l (Rodier J., et al., 2005).

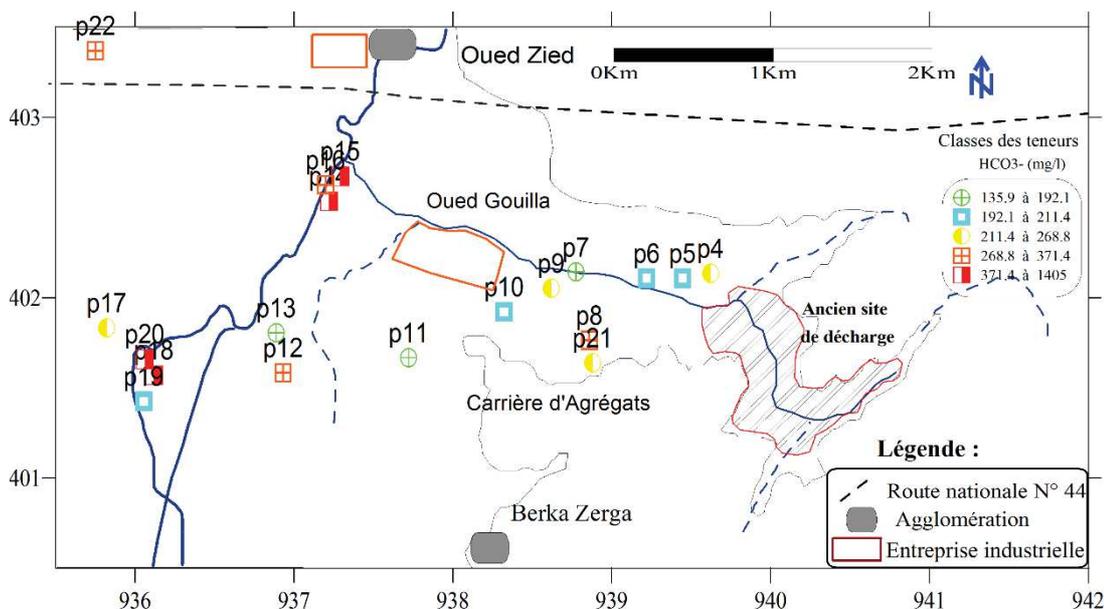


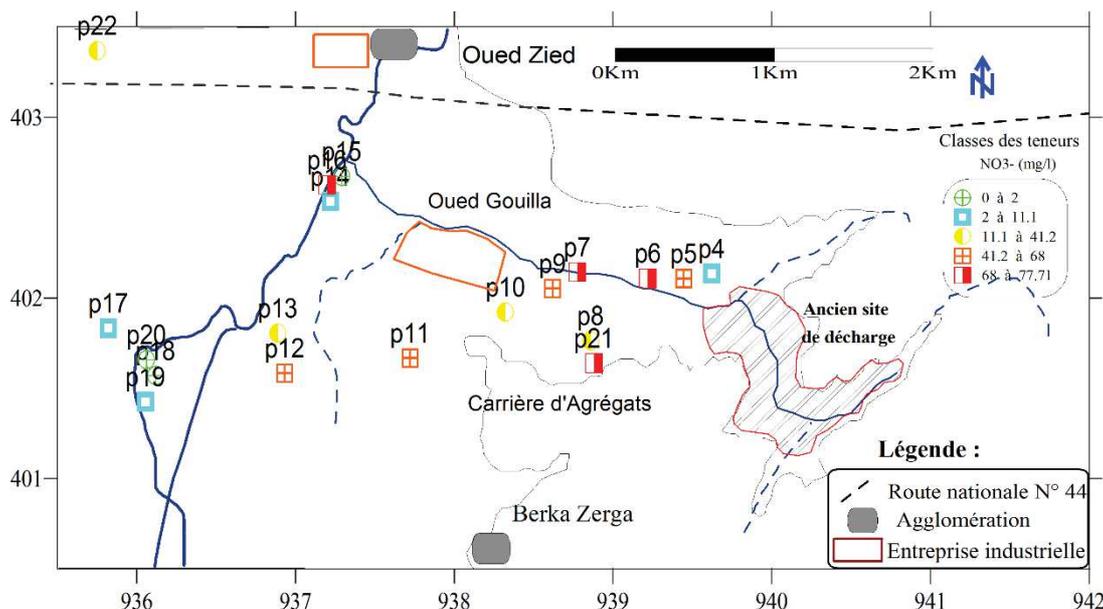
Figure 53 : Carte de répartition des teneurs en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l), Campagne de Juin 2012.

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 ( $\text{NO}_3^-$ )

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  $\text{NO}_3^-$  ; 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.



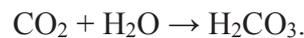
**Figure 54 : Carte de répartition des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  (mg/l), Campagne de Juin 2012.**

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 (Ca<sup>2+</sup>)

Le calcium est très abondant dans les calcaires CaCO<sub>3</sub> dans les dolomies CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, la calcite CaCO<sub>3</sub>, l'aragonite CaCO<sub>3</sub>, le gypse CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, l'anhydrite CaSO<sub>4</sub>, fluorite CaF<sub>2</sub>, fluorapatite Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F, grès (dans le ciment) et les évaporites. Une teneur élevée de Ca<sup>++</sup> fait penser à un lessivage de gypse ou d'anhydrite. Une faible teneur de Ca<sup>++</sup> 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 Ca<sup>2+</sup>, signifie que le pH dépasse le 8 (pH ≥ 8). Dans les roches calcaires le CO<sub>2</sub> est le facteur essentiel de leurs dissolutions :



Dans les profondeurs le CO<sub>2</sub> attaque l'encaissant (la roche), arrivé en surface et y échappe, il se forme alors des travertins, la concentration du Ca<sup>++</sup> dépend de la pression de CO<sub>2</sub> (Tab.30).

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

Pression CO <sub>2</sub> ( en atmosphère)	3. 10 <sup>-4</sup>	3. 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>
[Ca <sup>2+</sup> ] (mg/l)	20	100	70

Dans les terrains calcaires et eau de surface [Ca<sup>2+</sup>] = 20 mg/l ; dans les terrains cristallins [Ca<sup>2+</sup>] = 2 à 10 mg/l ; Les terrains gypseuses [Ca<sup>2+</sup>] = 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.

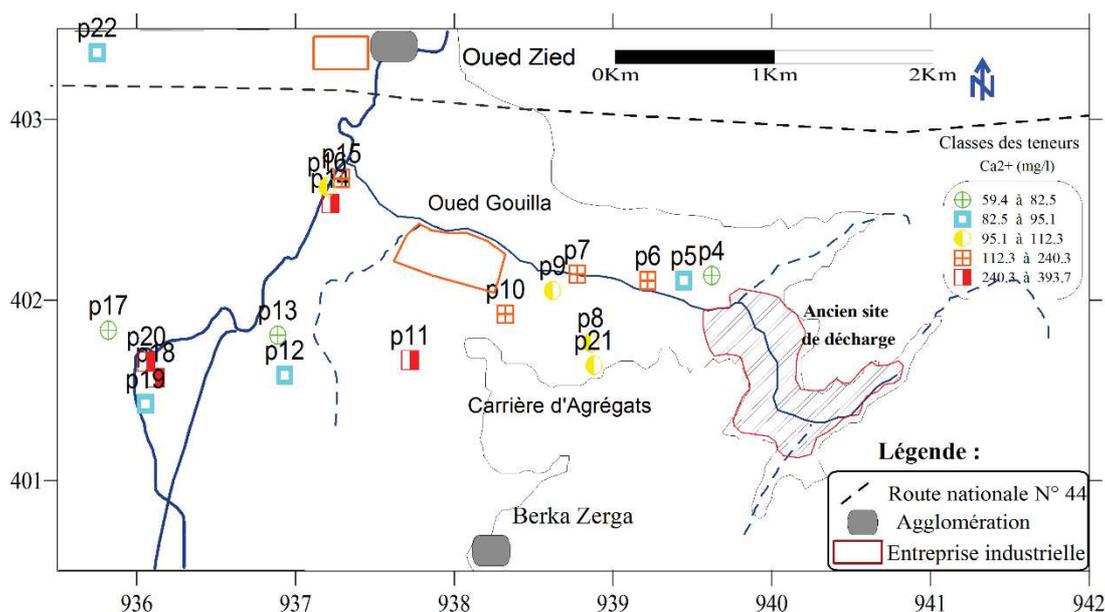


Figure 55 : Carte de répartition des teneurs en  $Ca^{2+}$  (mg/l), Campagne de Juin 2012.

#### IV. 4. 3. 6. Magnésium ( $Mg^{2+}$ )

Le magnésium se trouve dans les roches carbonatées tel que la dolomie, les évaporites ;  $MgSO_4$ ,  $Cl_2Mg$ . Quand la dolomie est attaquée, il n'est y a pas de solubilité sélective, il y a autant de  $Ca^{2+}$  que de  $Mg^{2+}$  ( $[Ca^{2+}] = [Mg^{2+}]$ ). Si toutes fois la quantité du calcium dépasse celle du magnésium, l'eau a obtenu sa minéralisation de calcaire ou du gypse. Par contre une teneur élevée en magnésium peut faire penser à une contamination de l'eau de mer, ou bien à des minéraux ferromagnésien ; la concentration en magnésium des eaux de mer  $[Mg^{2+}] \approx 1270$  mg/l ; Pour les eaux Karstiques  $\leq 3$ mg/l ; et pour les eaux en contact avec les évaporites  $\approx 66$  mg/l.

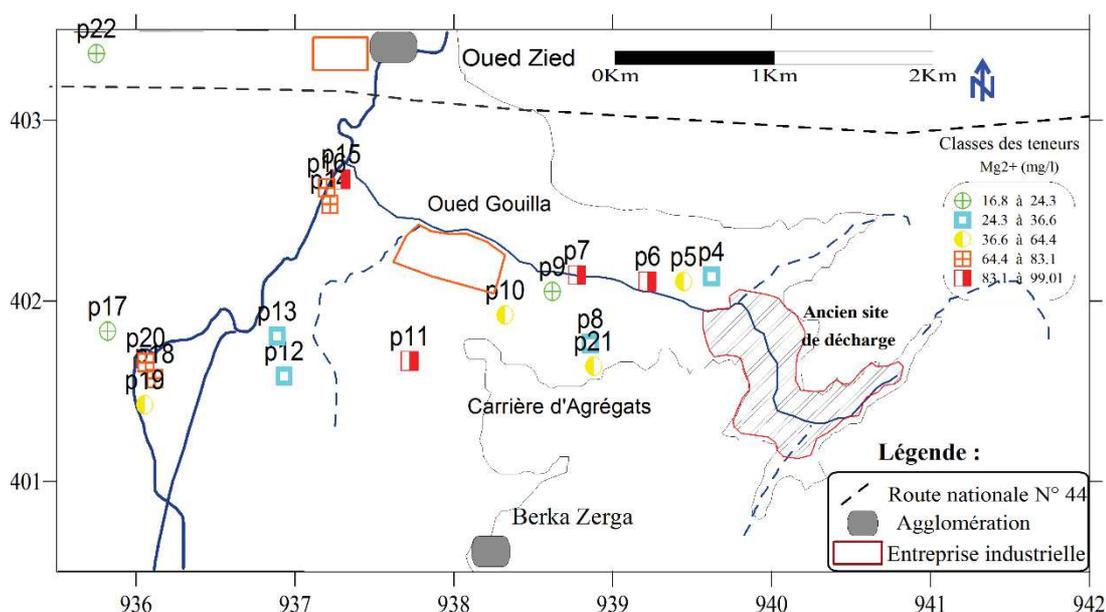


Figure 56 : Carte de répartition des teneurs en  $Mg^{2+}$  (mg/l), Campagne de Juin 2012.

La répartition spatiale des teneurs de magnésium dans la zone d'étude est identique à celle de calcium, la teneur maximum est enregistrée au niveau du Puits N°11 avec 118.1mg/l, et la valeur minimum est enregistrée au niveau du Puits N°17 avec 16.8 mg/l, qui se situent au centre de la plaine (Fig.56). L'origine du magnésium provient de la dissolution des roches calcaires sous l'influence du gaz carbonique dissous dans l'eau.

#### IV. 4. 3. 7. Sodium ( $\text{Na}^+$ )

Parmi les alcalins le sodium est le plus abondant, il représente 2,83% des éléments de l'écorce terrestre. Dans les roches sédimentaires, le sodium peut être présent dans les ciments de grès et dans les sables, dans les argiles jusqu'à saturation si elles sont exposées à l'eau de mer ou en zone aride, la plus importante source du sodium se trouve dans les évaporites, NaCl Halite,  $\text{Na}_2\text{SO}_4(10\text{H}_2\text{O})$  Mirabilite. La concentration du Sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans l'eau de mer  $\approx 10560$  mg/l.

Les concentrations en sodium des eaux de la plaine sont comprises entre 19.2 mg/l (Puits N°17) et 522.7 mg/l (Puits N°15), les valeurs les plus élevées supérieures à 150 mg/l se localisent dans la partie Centrale de la plaine en bordure avec le lac Fetzara (Fig.57).

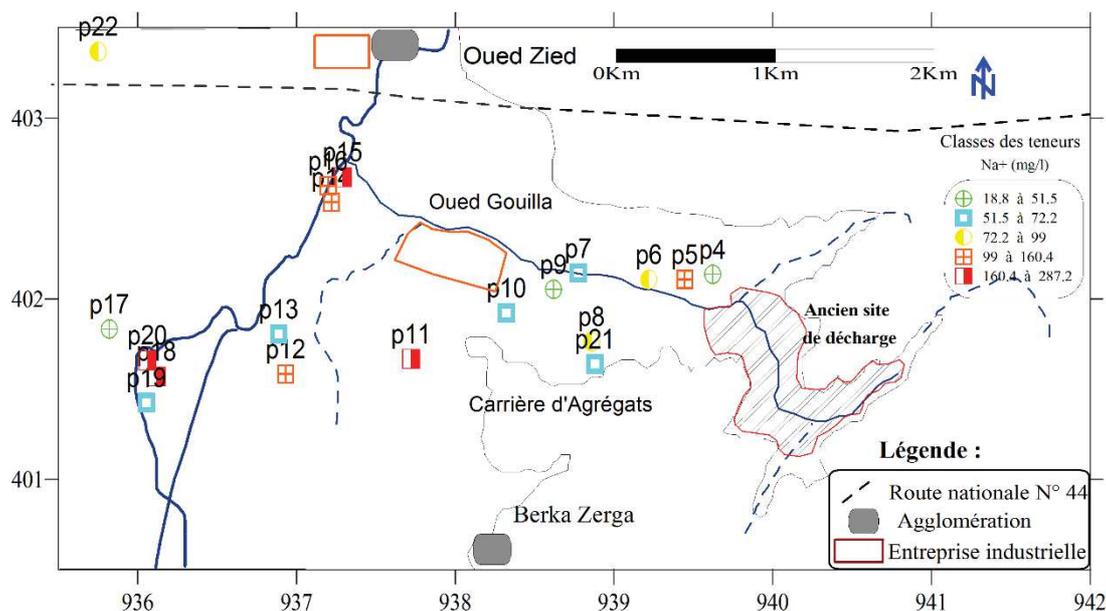


Figure 57 : Carte de répartition des teneurs en  $\text{Na}^+$  (mg/l), Campagne de Juin 2012.

#### IV. 4. 3. 8. Potassium ( $\text{K}^+$ )

Il représente 2,59 % des éléments de l'écorce terrestre ; la source potentielle du potassium provient des roches ignées, dans les roches sédimentaires le potassium se trouve dans les minéraux argileux, dans les grès, les sables, schiste et dans les évaporites on note KCl (sylvite). La teneur en Potassium [ $\text{K}^+$ ] ne dépasse pas 10 à 15 mg/l dans les eaux souterraines et elle de l'ordre de 380 mg/l dans les eaux de mer.

Les valeurs de potassium varient entre 02 mg/l pour le forage (Puits N°17) et 51.5 mg/l pour le forage (Puits N°15). Les résultats montrent que la plupart des points d'eau ont une concentration inférieure à la limite admissible de la potabilité de 12 mg/l (selon les normes l'OMS), (Fig.58).

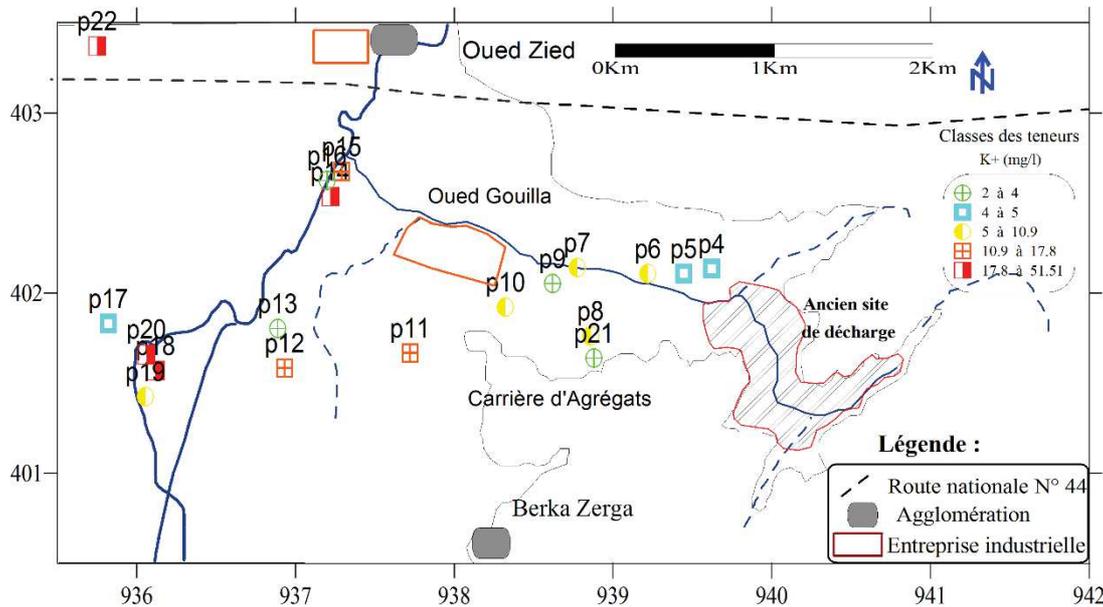


Figure 58 : Carte de répartition des teneurs en  $K^+$  (mg/l), Campagne de Juin 2012.

#### IV. 5. Faciès chimiques et classification des eaux

Les résultats d'analyses ont une signification en hydrogéologie dès l'instant où elles apporteront des renseignements sur la roche réservoir (composition géochimique) ainsi il est important d'ordonner les résultats d'analyses chimiques et de comprendre leur significations. Il s'agit d'une comparaison des compositions chimiques des points d'eaux analysées entre elles. Pour une meilleure vision et une meilleure identification des faciès et de l'aspect qualitatif des eaux souterraines, ainsi que son évolution, la représentation graphique des résultats d'analyse, reste un outil incontournable.

##### IV. 5. 1. Diagrammes de Stabler et Stiff

La représentation des analyses sur les diagrammes Stabler et Stiff permet la comparaison des point d'eau comme elle montre la variation spatiale des faciès chimiques de l'aquifère.

Deux types d'eau ont été distingués; le premier est carbonaté représenté par le faciès de bicarbonaté calcique et magnésien (Fig.59, 60), les points qui caractérisent ce type d'eau sont situés dans la partie nord et dans les limites d'alimentation de l'aquifère. Tandis que le deuxième type d'eau est représenté par l'eau salée (minéralisation élevée) dont le faciès prédominant est

chloruré calcique-magnésien et sulfaté calcique, c'est le cas des secteurs sud de la plaine et des bordures du lac Fetzara.

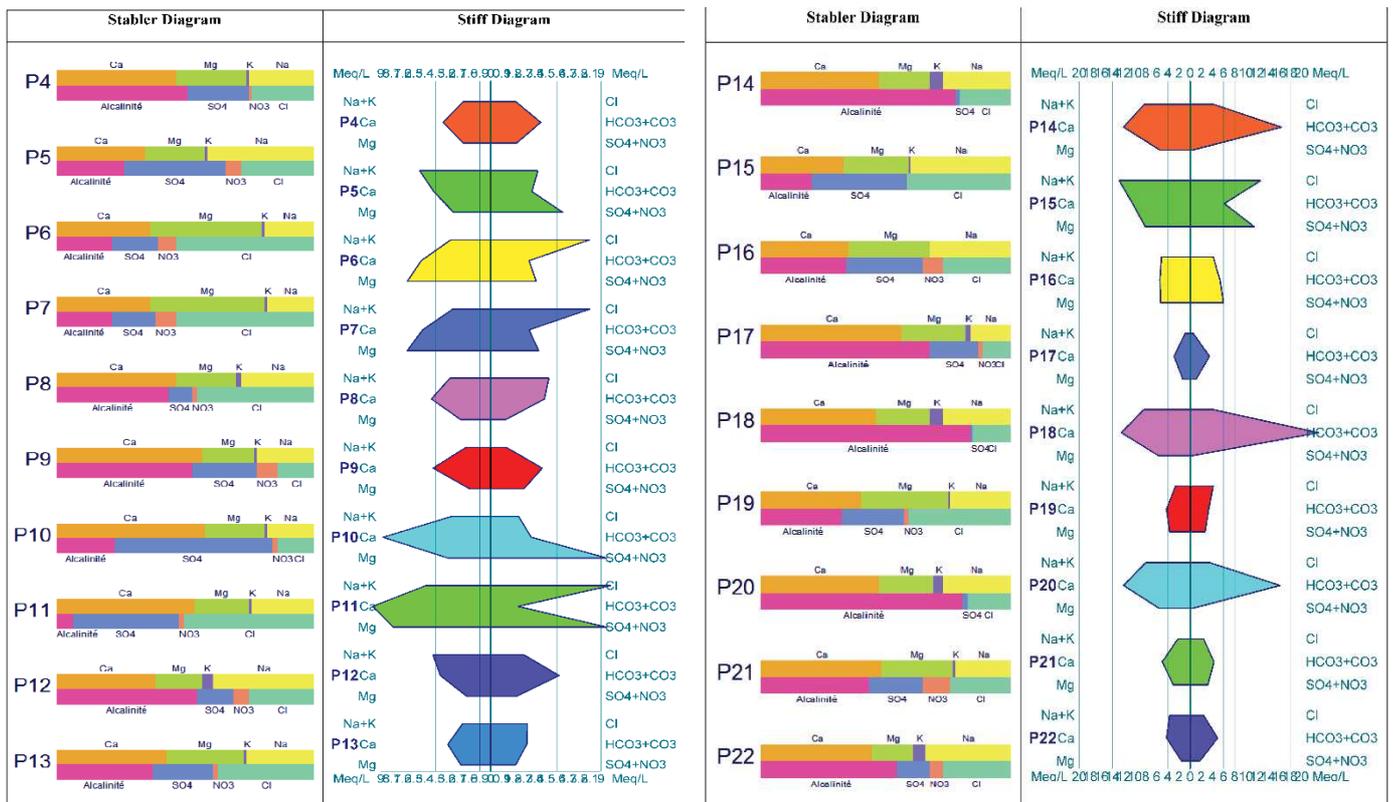


Figure 59 : Diagrammes de Stabler et Stiff des eaux de la plaine (Juin 2012).

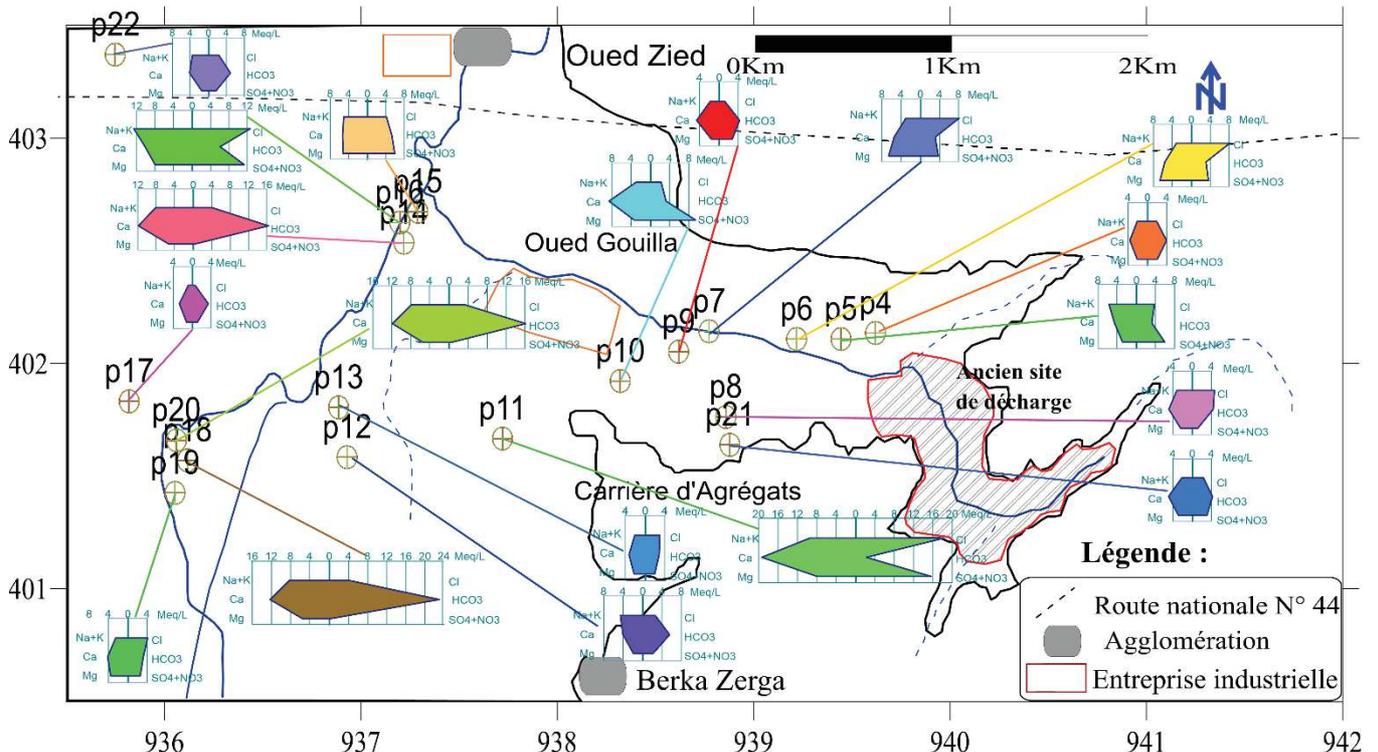


Figure 60 : Classification des eaux de la plaine selon diagramme Stiff (Juin 2012).

### IV. 5. 2. Diagramme de Piper

Le diagramme trilinéaire de Piper (Piper, 1944) évalue l'évolution de l'eau du système aquifère et la relation entre les types de roches réservoir et la composition de l'eau. La représentation des analyses sur le diagramme de Piper montre une variation des faciès chimiques des eaux de la nappe (Fig.61) (Hani A., 2003). On distingue deux type d'eau, le premier carbonaté représenté par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, les points qui caractérisent ce type d'eau se situent dans la partie Nord et dans les limites d'alimentation de l'aquifère. Tandis que le deuxième type d'eau est représenté par des eaux salifères (charge minérale élevée) présenté par un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, qui caractérise les zones Sud de la plaine et les bordures du lac Fetzara.

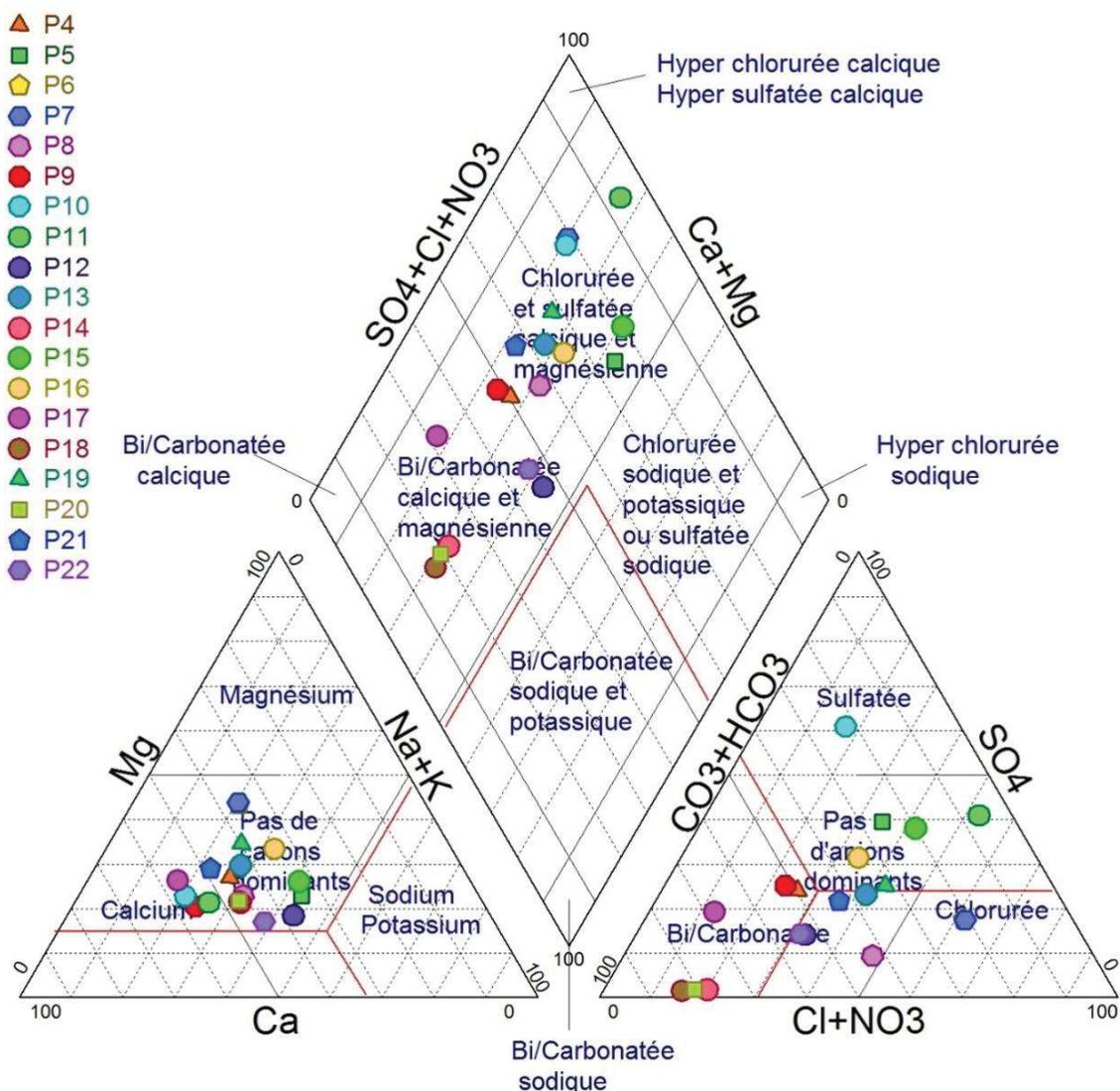


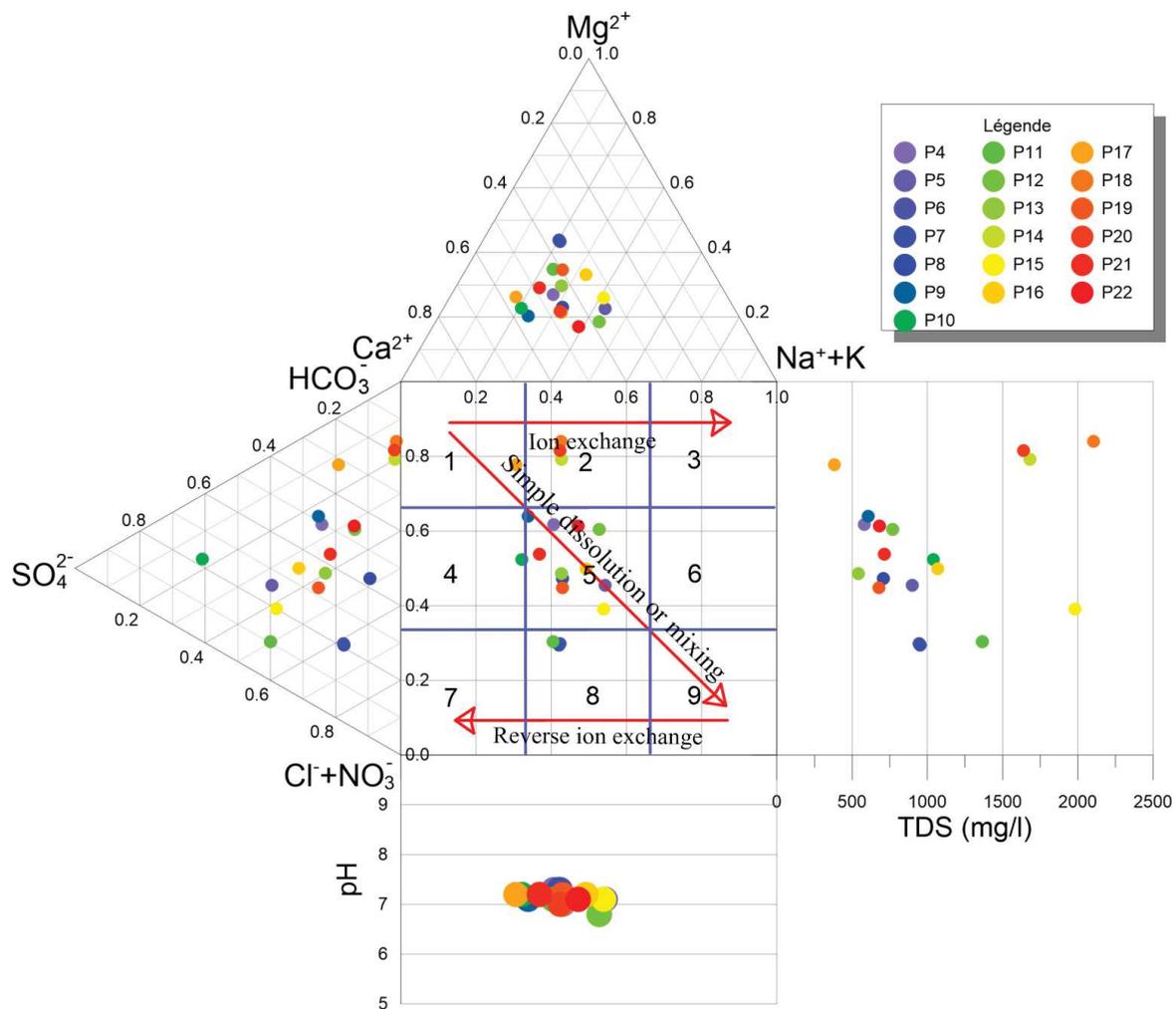
Figure 61 : Diagramme de Piper ; Eaux de la nappe libre de l'Oued Zied (Juin 2012).

### IV. 5. 3. Diagramme de Durov

Le diagramme de Durov (in Lloyd et Heathcoat 1985) construit sur la base des teneurs relatives (en méq/l) des ions majeurs en solution est avantageux par rapport au diagramme de Piper en révélant certains processus géochimiques qui pourraient affecter la genèse des eaux souterraines. Le diagramme de Durov illustre bien qu'il y a une dominance des eaux des champs cinq et deux (Fig.62). Le premier champ caractérise l'eau issue de la dissolution minérale 57.89 % représenté par onze échantillons et qui ne présente aucun cations ou anions dominant, en se basant sur de la classification de Lloyd et Heathcoat (1985) (Tab.31), cette eau peut être attribuée à une recharge récente et fraîche. Le second champ 15.79 % représenté par trois échantillons caractérisant l'eau de dominance des cations et anions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$ , qui indiquent une eau souterraine influencée par les formations carbonatées avec un échange de base de  $\text{Na}^+$ . Deux échantillons représentant 10.53 % de l'ensemble des eaux analysées se localisent dans le huitième champ qui indique une eau saturée en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dû à un échange de base inverse. Les deux échantillons restante qui représentent un pourcentage de 5.26 % pour chaque échantillons et qui se localisant dans le champ un et quatre, le premier représente l'eau de dominance des cations et anions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$ , ce ci indique que l'eau est contenue dans des formations aquifères calcareuses, sableuses. Ainsi que le second champ caractérise l'eau riche en  $\text{SO}_4^-$  et  $\text{Ca}^{++}$ , ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des formations gypsifères.

**Tableau 31 : Classification de l'eau de la plaine de l'Oued Zied basée sur le diagramme de Durov. (Lloyd et Heathcoat, 1985)**

Sl. No	Types de l'eau	No. d'échantillons (GW=17 ; SW=2)	%
1	$\text{HCO}_3^-$ et Ca dominant, ce ci indique fréquemment que les eaux sont contenues dans des formations aquifères calcareuses, sableuses, et d'autres types de formations aquifères.	01 (1 GW; 0 SW)	5.26
2	Cette eau est à dominance des ions Ca et $\text{HCO}_3^-$ . Une association avec la dolomite est présumée si le Mg est significatif. Cependant, ces échantillons dans lesquels Na est significatif, un échange important des ions est présumé.	03 (3GW; 0 SW)	15.79
3	$\text{HCO}_3^-$ et Na sont dominants, généralement ce ci indique un échange de base de l'eau, bien que la production du $\text{CO}_2$ en profondeur puisse générer $\text{HCO}_3^-$ où Na est dominant sous certaines conditions.	----	---
4	$\text{SO}_4$ domine, ou anion secondaire et Ca est dominant, Ca et $\text{SO}_4$ dominant, ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des dépôts de laves ou gypsifères, sinon des eaux de mélange ou indiquant une simple dissolution.	01 (1 GW; 0 SW)	5.26
5	Pas d'anion ou cation dominant, ce ci indique que la minéralisation de l'eau est due à une simple dissolution ou à un mélange.	11 (9GW;2 SW)	57.89
6	$\text{SO}_4$ domine, ou anion secondaire et Na est dominant, c'est un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et indique un mélange probable ou une influence rare de dissolution.	----	---
7	Cl et Na dominant, minéralisation fréquemment rencontrée sauf s'il y'a une pollution de couche aquifère. Sinon l'eau peut résulter d'un échange de base inverse du Na-Cl.	----	---
8	Cl l'anion dominant et Na le cation dominant, ce ci indique que les eaux souterraines sont liées à un échange de base inverse du Na-Cl.	02 (2 GW; 0 SW)	10.53
9	Cl et Na dominant, ce ci indique fréquemment qu'ils sont issus d'une dissolution.	----	---



**Figure 62 : Diagramme de Durov illustrant les processus hydrogéochimiques impliqués dans les eaux de la plaine de l'Oued Zied. (Lloyd et Heathcoat 1985)**

#### IV. 5. 4. Rapports caractéristiques

L'étude des variations des rapports donne des précieuses indications sur l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines. Les diagrammes de dispersion des différents éléments majeurs versus TDS (Fig.63) montrent que la minéralisation des eaux est principalement dominée par  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Cl}^-$ . Dans l'ordre de déchiffrer l'origine, les diagrammes de corrélation entre les éléments majeurs sont établis (Fig.64). Le  $\text{Ca}^{2+}$  est corrélé avec le Mg ( $R^2=0.51$ ) indiquant une origine évaporitique et/ou dolomitique. Pourtant, la majorité des points se trouvent au-dessus de la droite 1:1 (Fig.64) montrant ainsi un excès de Ca versus Mg. Celui-ci indique un autre processus géochimique qui affecte la teneur en cation.

Dans les secteurs Sud-Est de l'aquifère, les eaux souterraines (B.8, P.31 et P.33) montrent des teneurs élevées de  $\text{Ca}^{2+}$  (393.7 mg/l, Puits N°11) et de  $\text{Mg}^{2+}$  (Puits N°11 avec 118.1mg/l) qui peuvent être attribuées à l'effet de lessivage par les pluies des terrains calcaires dolomitiques.

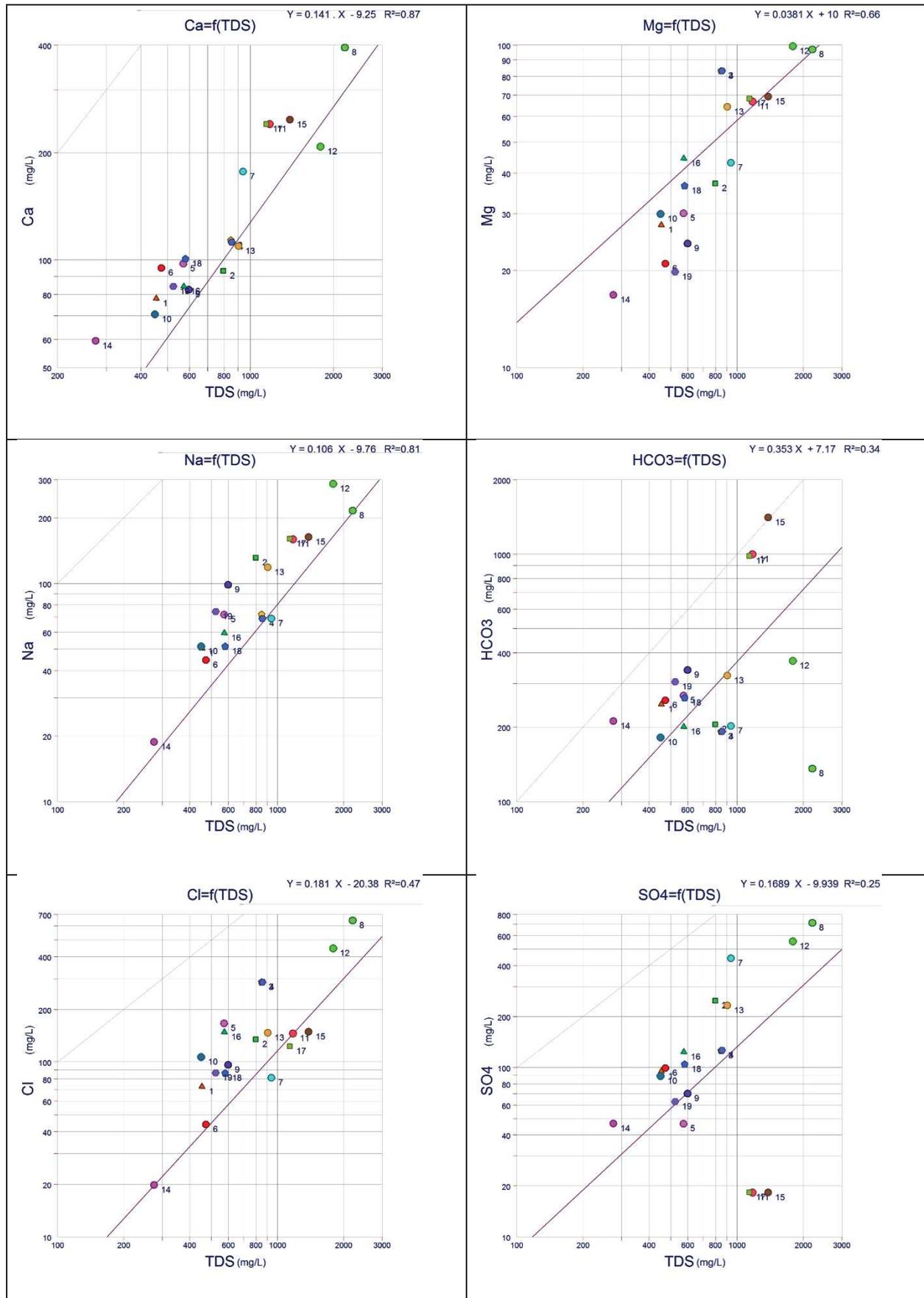


Figure 63 : Corrélation  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  et  $SO_4^{2-}$  versus TDS.

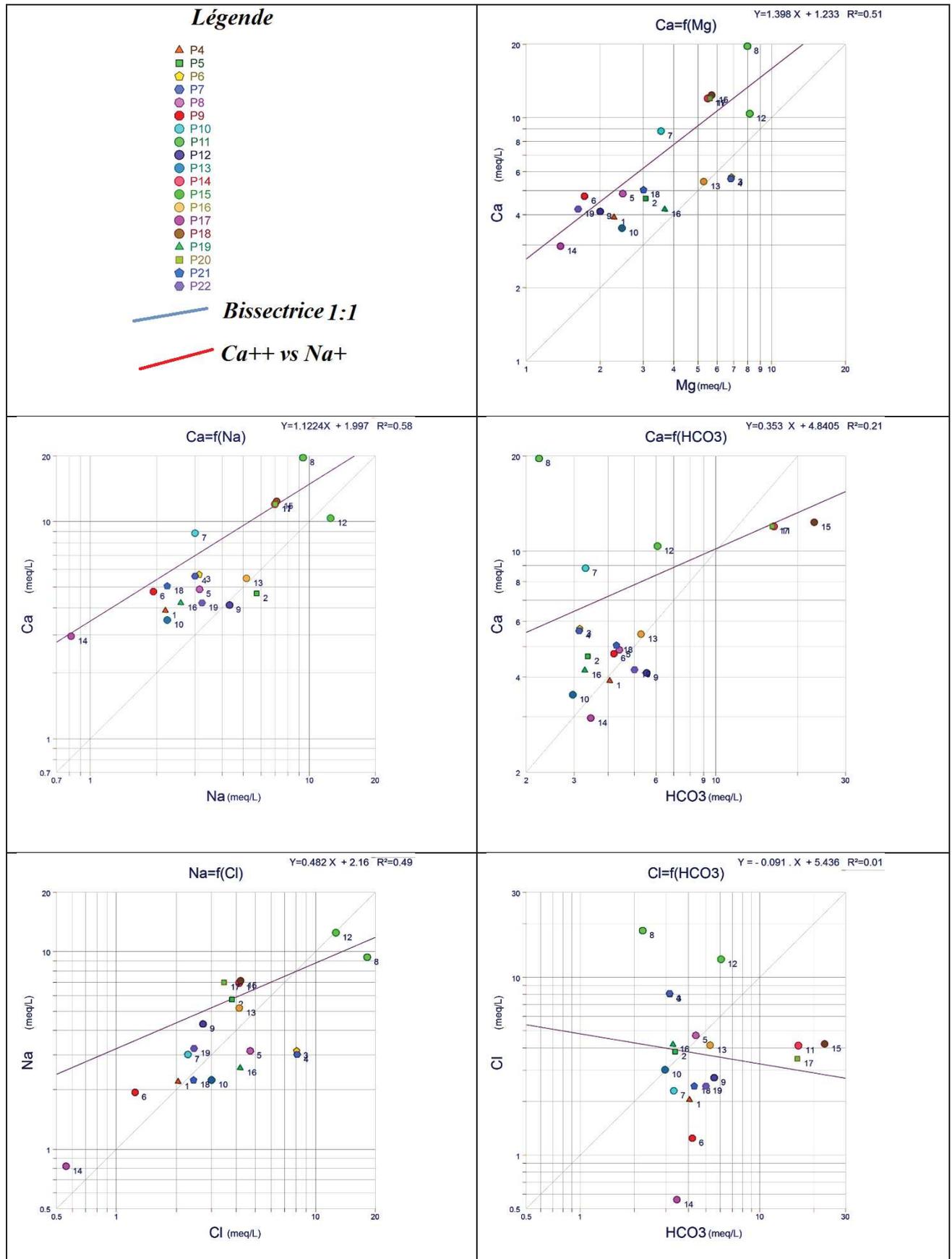


Figure 64 : Corrélation Ca<sup>2+</sup> vs Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> vs Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> vs HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> vs Cl<sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup> vs HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

### IV. 5. 5. Echanges de bases

Au cours de leurs trajets souterrains, les eaux entrent en contact avec différentes formations géologiques qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les eaux. Il y a un échange permanent entre les ions adsorbés dans les argiles et les ions en solution dans l'eau. L'indice d'échange de base est calculé selon la formule suivante :

$$\text{IEB} = \frac{\text{Cl}-(\text{Na}+\text{K})}{\text{Cl}}, \text{ les concentrations sont en méq/l}$$

Pour bien expliquer ce phénomène, nous avons essayé d'interpréter le diagramme  $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  Vs  $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$  avec un report de tous les points d'eau de la plaine.

**Tableau 32 : Indices d'échanges de Bases des analyses des eaux de la nappe de l'Oued Zied, (Juin 2012).**

Point	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
IEB	-0.124	-0.53	0.595	0.611	0.284	-0.625	-0.414	0.469	-0.727	0.229
Point	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	
IEB	-0.994	-0.016	-0.259	-0.647	-1.003	0.352	-1.315	0.052	-0.506	

Ce diagramme fait apparaître trois regroupements :

Le premier groupe se caractérise par un excès en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport aux ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  au niveau du point (P11) (Fig.65) ; ceci est dû certainement aux formations gypseuses qui fournissent plus d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  que ne peut consommer l'effet de la précipitation chimique ou l'effet de la fixation du calcium par les argiles.

Le deuxième groupe, englobe les sept (07) points d'eaux (36 %) présentant un état naturel (Fig.99). Ils sont caractérisés par un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport aux  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  et un excès en  $\text{Cl}^-$  par rapport au  $\text{Na}^+$  ; ce groupe explique la présence de deux faciès chimiques, l'un chloruré-calcique et magnésien.

Le troisième groupe, se caractérise par un excès des teneurs en sodium par rapport aux chlorures, qui englobe onze (11) points (58 % des points d'eau analysés), nous pouvons expliquer ce résultat par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration de ces derniers. Cet excès en sodium s'accompagne par un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport aux  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  (Fig.65), en effet dans un échange de bases lié aux minéraux argileux, il y a fixation d'un  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  après libération de deux  $\text{Na}^+$ .

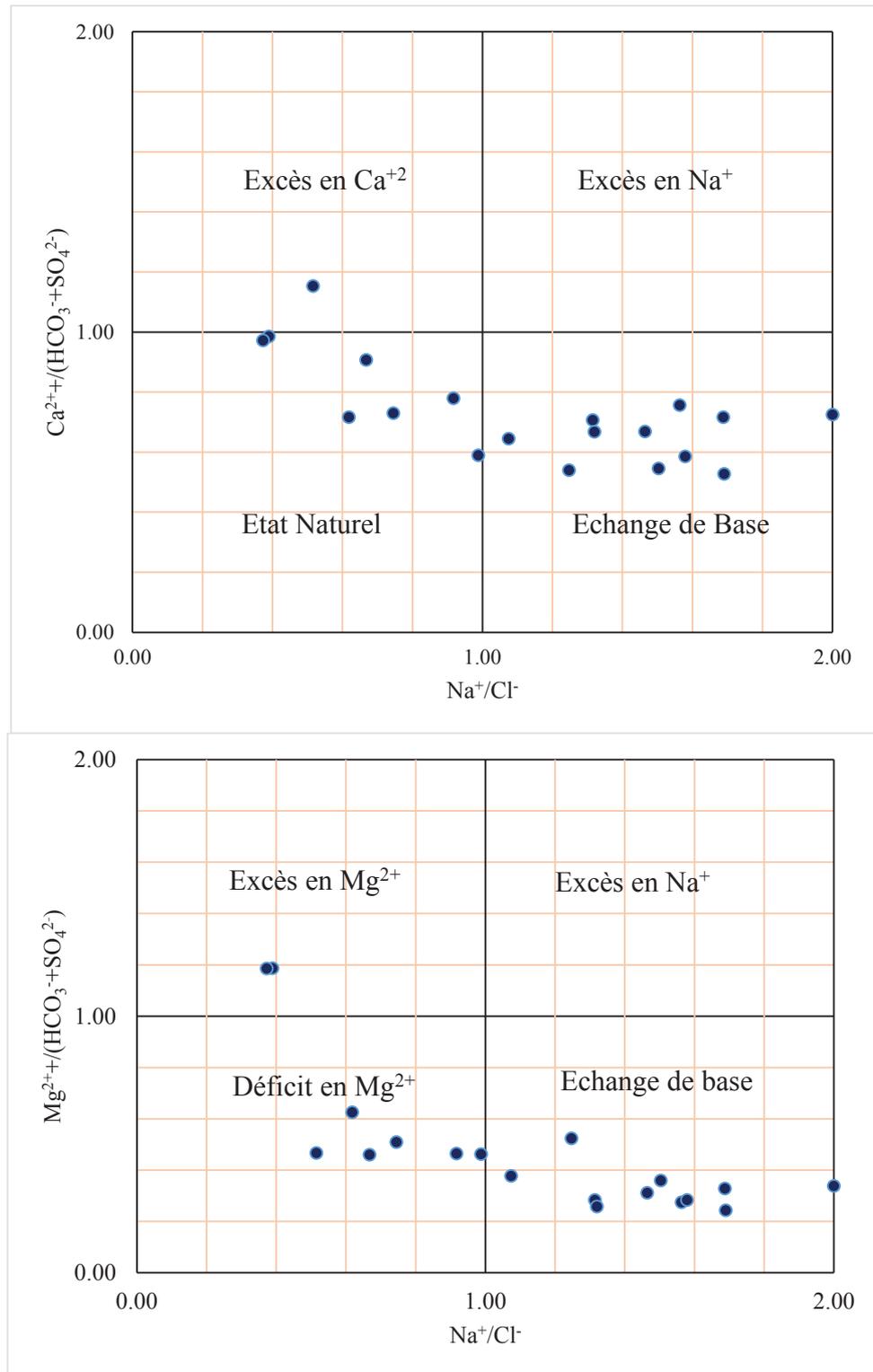


Figure 65 : Echanges de bases dans les eaux souterraines de plaine de l’Oued Zied (Juin 2012).

IV. 5. 6. Indice de saturation

Pour étudier l’interaction eau-roche, nous avons déterminé l’indice de saturation (IS) des minéraux. Le calcul de ce paramètre a été effectué pour la campagne de Juin 2012.

$$IS = \log (PAI.Ks^{-1})$$

Avec : PAI, produit d'activité ionique des espèces qui composent le minéral.

Ks, produit de solubilité du minéral.

Le résultat de calcul de cet indice, par le logiciel Phreeq, montre que plusieurs éléments chimiques sont susceptibles d'être impliqués dans le processus de précipitation / dissolution (Khelfaoui H., 2007).

Une solution est en équilibre avec une phase minérale lorsque :  $-0,5 < IS < 0,5$  (flux de dissolution égal au flux de précipitation).

La solution est dite sous-saturée lorsque  $IS < -0.5$  et sur-saturée lorsque  $IS > 0.5$ .

**Tableau 33 : Statistique descriptive des valeurs de l'indice de saturation (Juin 2012).**

	N. Actifs	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Anhydrite CaSO <sub>4</sub>	19	-1.77	-2.37	-0.70	0.47
Aragonite CaCO <sub>3</sub>	19	-0.05	-0.55	0.72	0.34
Calcite CaCO <sub>3</sub>	19	0.09	-0.41	0.86	0.34
Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	19	0.09	-0.84	1.53	0.68
Gypse CaSO <sub>4</sub> :2H <sub>2</sub> O	19	-1.55	-2.15	-0.48	0.47
Halite NaCl	19	-6.57	-8.00	-5.52	0.57

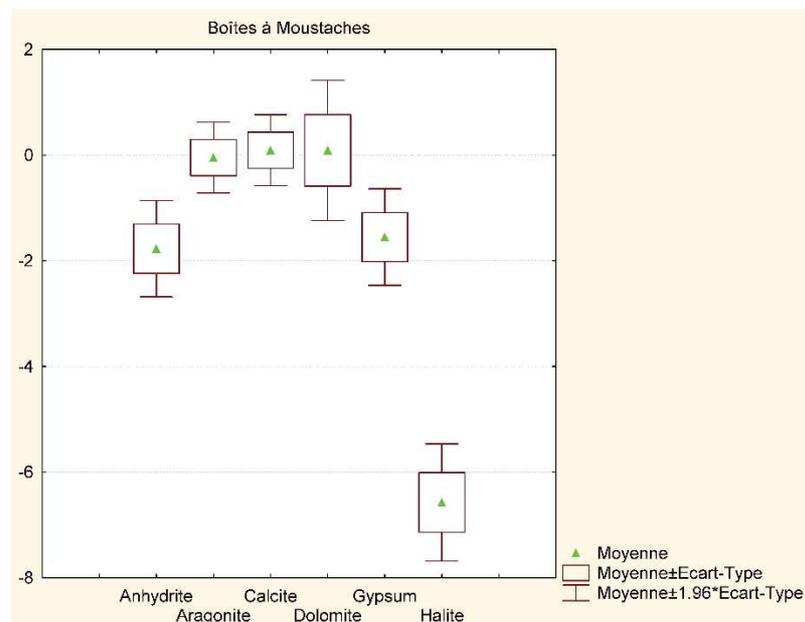
**Tableau 34 : Evolution des indices de saturation des minéraux, campagne Juin 2012.**

	Anhydrite CaSO <sub>4</sub>	Aragonite CaCO <sub>4</sub>	Calcite CaCO <sub>4</sub>	Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Gypse CaSO <sub>4</sub> :2H <sub>2</sub> O	Halite NaCl
P4	-1.87	-0.08	0.06	0.03	-1.65	-7.03
P5	-1.47	-0.35	-0.21	-0.48	-1.25	-6.36
P6	-1.73	-0.09	0.05	0.31	-1.52	-6.3
P7	-1.74	-0.1	0.04	0.31	-1.52	-6.32
P8	-2.11	-0.25	-0.11	-0.38	-1.89	-6.52
P9	-1.77	-0.18	-0.04	-0.38	-1.55	-7.3
P10	-1.04	-0.04	0.11	-0.06	-0.82	-6.87
P11	-0.7	-0.07	0.07	-0.12	-0.48	-5.52
P12	-1.99	-0.43	-0.29	-0.75	-1.77	-6.62
P13	-1.93	-0.55	-0.41	-0.84	-1.71	-6.85
P14	-2.35	0.59	0.73	1.26	-2.13	-6.27
P15	-1.01	0.12	0.26	0.55	-0.79	-5.55
P16	-1.49	-0.01	0.14	0.39	-1.27	-6.38
P17	-2.2	-0.31	-0.17	-0.54	-1.98	-8
P18	-2.37	0.72	0.86	1.53	-2.15	-6.26
P19	-1.77	-0.26	-0.12	-0.17	-1.55	-6.65
P20	-2.35	0.58	0.73	1.27	-2.13	-6.34
P21	-1.77	-0.06	0.08	0.07	-1.55	-6.95
P22	-2.01	-0.15	-0.01	-0.3	-1.79	-6.78

Les résultats montrent que, les indices de saturation du groupe des carbonates (aragonite, calcite et dolomite) sont souvent entre  $-0,5 < IS < 0,5$ . Ces minéraux se trouvent à l'état de l'équilibre de flux.

Les évaporites (anhydrite, gypse et halite) présente un indice de saturation inférieur à  $-0,5$  (dissolution dans l'eau), ils se trouvent à l'état de sous saturation. Les concentrations en  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$  sont très importantes dans l'eau, la halite possède un indice de saturation largement sous-saturé ( $> -6$ ), néanmoins la teneur en NaCl est importante dans certains secteurs étudié (Faciès chloruré sulfaté calcique et sodique dominant), à cause de la nature géologique et la forte évaporation (Tab.33 et 34), (Fig.66).

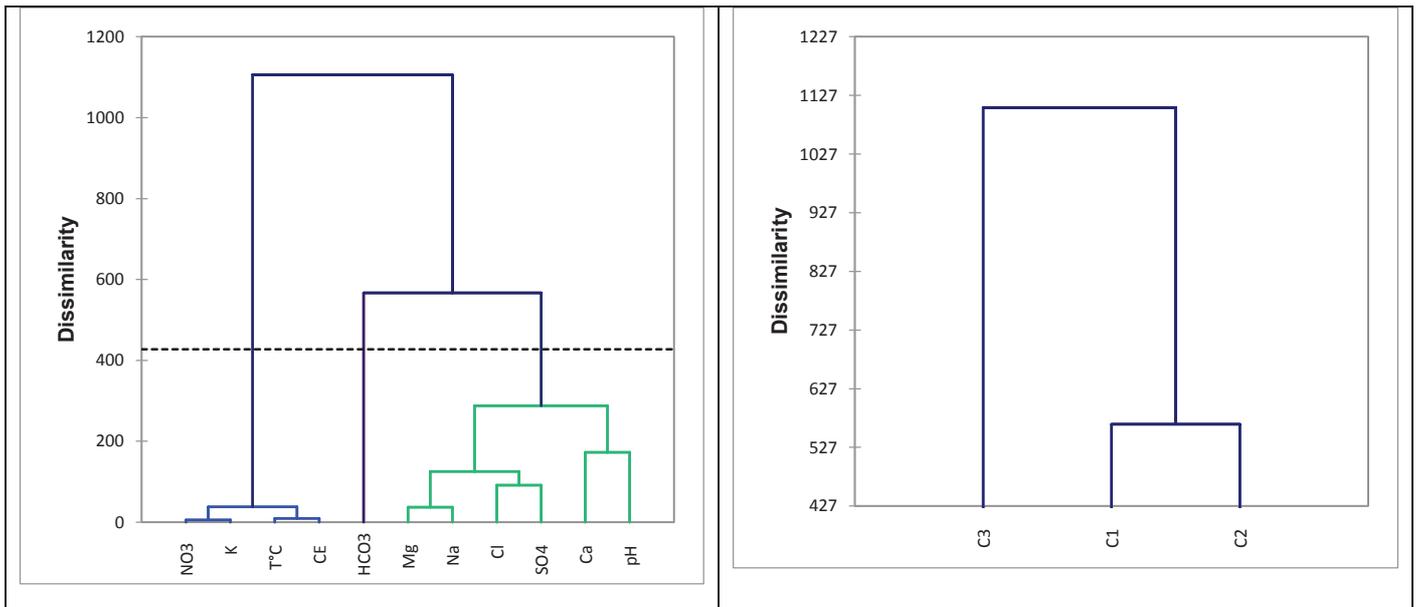
L'état de sursaturation où  $IS > 0,5$  (précipitation des minéraux dans l'eau) n'apparaît que rarement comme dans le cas de quelques points du groupe des minéraux carbonatés (aragonite, calcite et dolomite), (Tab. 33 et 34) (Fig.66).



**Figure 66 : Boîtes à moustache des indices de saturation en Calcite, Dolomite, Gypse, Anhydrite et Aragonite des eaux de l'aquifère de l'Oued Zied (Juin 2012).**

#### IV. 5. 7. Classification hiérarchique

La méthode statistique de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été utilisée pour l'étude des phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux. La CHA est une technique qui mesure la dissimilarité ou la similarité entre les échantillons afin de définir un critère d'agrégation des classes (Templ et al. 2008). Les classes ainsi obtenues produisent un arbre binaire de classification appelé "dendrogramme".



**Figure 67 : Valeurs propres et pourcentage de variabilité exprimée.**

Le dendrogramme (Fig.67) résulte de la classification ascendante hiérarchique (CAH) et met en évidence trois regroupements des variables. Le premier groupe regroupe les eaux caractérisées par des concentrations élevées en  $\text{HCO}_3^-$  traduisant un enrichissement par les formations carbonatées. La seconde famille incluant les eaux riches en éléments chimiques majeurs analysés ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) explique le phénomène de lessivage et d'échange de bases.

Le troisième regroupement une famille d'eau caractérisée par des valeurs élevées en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{T}^\circ\text{C}$  et  $\text{CE}$  justifier par une minéralisation liée aux apports superficiels d'origine anthropique.

#### IV. 6. Aptitude des eaux de la nappe à l'irrigation

Parmi les échanges ioniques qui existent dans le sol, est celui relatif à l'échange Sodium–Calcium, cet indice est important en raison de son action sur la stabilité des sols argileux en culture irriguée (Suarez D., et al., 2006), (Todd K.,1980).

L'eau destinée pour l'irrigation, riche en sodium et pauvre en calcium, s'appauvrira en sodium par échange ionique au contact d'un sol argileux. La concentration en sodium de l'argile augmentera jusqu'à la saturation. Cette saturation du milieu argileux peut avoir une incidence négative sur la stabilité du sol (Banton O., et al., 1999, Bakalowicz M., 2013).

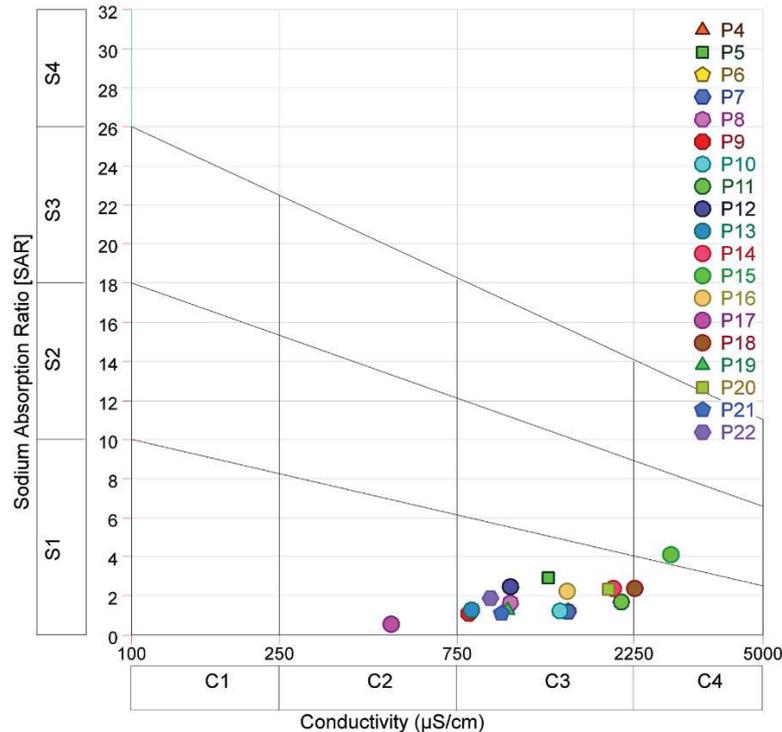
Le coefficient d'absorption du sodium (S.A.R) s'obtient par la formule suivante :

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{(rCa + rMg)/2}}$$

Où rNa, rCa et rMg sont des concentrations exprimées en méq/l

Les classifications des eaux d'irrigation suivant les valeurs du SAR sont (Fig.68) :

- SAR<10 : Eaux utilisées avec peu de danger d'alcalinisation.
- 10<SAR<18 : Eaux utilisées avec un danger appréciable d'alcalinisation.
- 18<SAR<26 : Eaux utilisées peuvent provoquer un danger d'alcalinisation.
- SAR>26 : Eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort.



**Figure 68 : Diagramme de Richards SAR (USSL 1954) des eaux de la nappe libre de l'Oued Zied, Juin 2012.**

Le diagramme de Richards propose quatre classes de SAR en fonction de leurs salinités exprimées par la conductivité électrique.

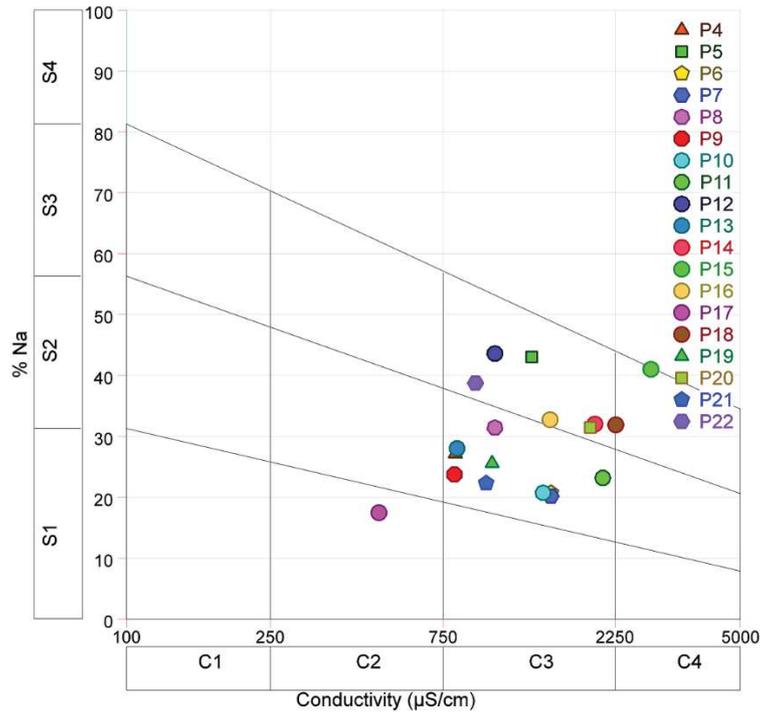
L'observation du diagramme montre que les eaux de la nappe se répartissent en trois classes ;

- 1) Classe C3S1 : présente 63.15% des échantillons.
- 2) Classe C4 S1 : présente 31.57% des échantillons
- 3) Classe C2S1 : présente 5.26% des échantillons.

En générale, les eaux de la nappe libre de la plaine de l'Oued Zied sont admissibles à médiocres, pouvant être utilisées à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

Les sels dissous dans les eaux, s'accumulent dans la zone racinaire près de la plante. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Afin

d'éviter ce risque, on doit classer les eaux d'irrigations suivants les valeurs de la conductivité(Fig.69) (Wilcox L.,1948, Richards L. A., 1954).



**Figure 69 : Diagramme de Richards (USSSL 1954) (%Na<sup>+</sup>) des eaux de la nappe de l'Oued Zied, Juin 2012.**

Les classifications des eaux d'irrigations suivant les valeurs de la conductivité sont :

- Conductivité en  $\mu\text{S/cm}$  inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation ;
- Conductivité variant entre 700 et 3000  $\mu\text{S/cm}$ , la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- Conductivité supérieure à 3000 $\mu\text{S/cm}$ , la restriction pour l'irrigation est forte.

En l'appliquant aux eaux de la région d'étude, nous remarquons que toutes les eaux de la nappe libre de l'Oued Zied demandent une restriction légère à moyenne.

#### IV. 7. Conclusion

La représentation graphique et la cartographie du chimisme des eaux analysées, montre que les concentrations des ions majeurs reflètent l'environnement géologique. Les eaux carbonatées, représentées par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, se situés au Nord-Est de la plaine, ce qui confirme que les apports de ces deux éléments est la dissolution des calcaire-dolomitiques qui affleurent dans la bordure Est de la nappe aquifère (les calcaires de djebel Bélilita). Les eaux salifères présentant un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, caractérise la quasi-totalité des eaux souterraine du système aquifère, ceci est du

probablement à l'effet de l'évaporation dans les zones où le niveau statique de la nappe aquifère est peu profond.

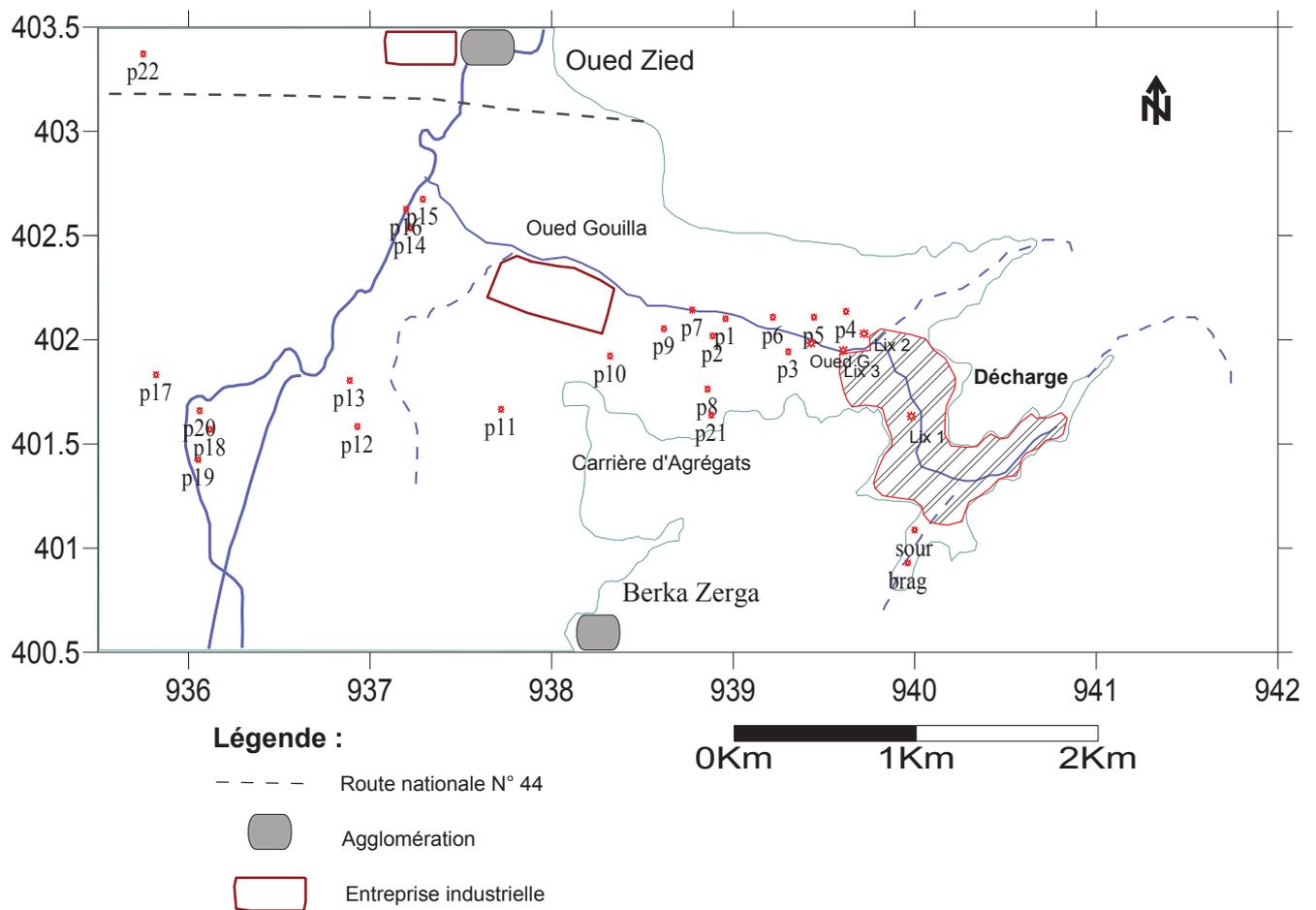
Le phénomène d'échange de bases et les processus de dissolution/précipitation des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) sont généralement à l'origine de la variation des concentrations des cations des eaux. La dissolution de l'halite contribuerait à la salinisation des eaux de l'aquifère étudié. Ceci est en accord avec l'état de sous-saturation des eaux vis-à-vis ce minéral. La technique statistique CAH confirment les résultats obtenus par l'approche hydrochimique.

Les risques de salinisation et d'alcalinisation ne sont pas indépendants. Ce dernier est d'autant plus grand que la salinité est importante. Le diagramme de Wilcox permet de faire une première classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation. Concernant nos secteurs étudiés ; Trois classes peuvent être présentées. Les eaux de la catégorie  $C_2S_1$  peuvent être utilisées sur presque n'importe quel sol et pour n'importe quelle culture. Celles de la catégorie  $C_3S_1$  doivent être utilisées avec précaution. Alors que celles de la catégorie  $C_4S_1$  doivent pratiquement toujours être rejetées.

**CHAPITRE V :**  
**DIAGNOSTIC DE LA POLLUTION**

### V. 1. Introduction

Le dépouillement et l'analyse des données géologiques, hydrogéochimiques et hydrodynamiques permettent de déterminer l'évolution de la nappe superficielle (libre) et de comprendre le comportement et l'influence des éléments chimiques sur la qualité de l'eau. A fin déterminer l'impact de la décharge urbaine de Berka Zerga sur la qualité des eaux de la nappe, l'interprétation des analyses a pour but de diagnostiquer l'état de la pollution, d'effectuer des comparaisons spatio-temporelles et de mettre en évidence les différents facteurs pouvant jouer un rôle primordial dans l'établissement de la genèse et l'origine de la contamination du milieu et des eaux souterraines.



**Figure 70 : Carte d'inventaire des points d'échantillonnage.**

### V. 2. Matériels et méthode d'échantillonnage

Les métaux lourds de la campagne d'échantillonnage 2006 sont dosés au laboratoire de la faculté des sciences de la terre de l'université de Badji Mokhtar Annaba, par spectrophotomètre à absorption atomique à flamme de marque AA. 6601F Shimadzu, concernant les échantillons de la campagne 2012 sont dosés au sein du laboratoire de la raffinerie de Skikda.

Un suivi a été réalisé durant la période d'étude avec des opérations de contrôles et vérifications des concentrations des métaux lourds (Pb, Cr, Fe, Cu, Zn). Les analyses effectuées se rapportent aux eaux prélevées dans les puits captant la nappe, les eaux de l'Oued Gouilla et l'Oued Zied, ainsi dans trois points caractérisant les eaux des lixiviats de la décharge elle-même.

### V. 3. Interprétation des résultats

#### V. 3. 1. Les caractéristiques physico-chimiques des lixiviats

##### V. 3. 1. 1. Températures

Elles varient entre 15°C et 21.4°C, le maximum est observé au point Lix.01 (Fig.71) durant le mois d'Octobre, le minimum au point Lix.03 durant le mois de Février. La température des Lixiviats est influencée par les conditions météorologiques, elle augmente en générale en passant de Février vers Octobre.

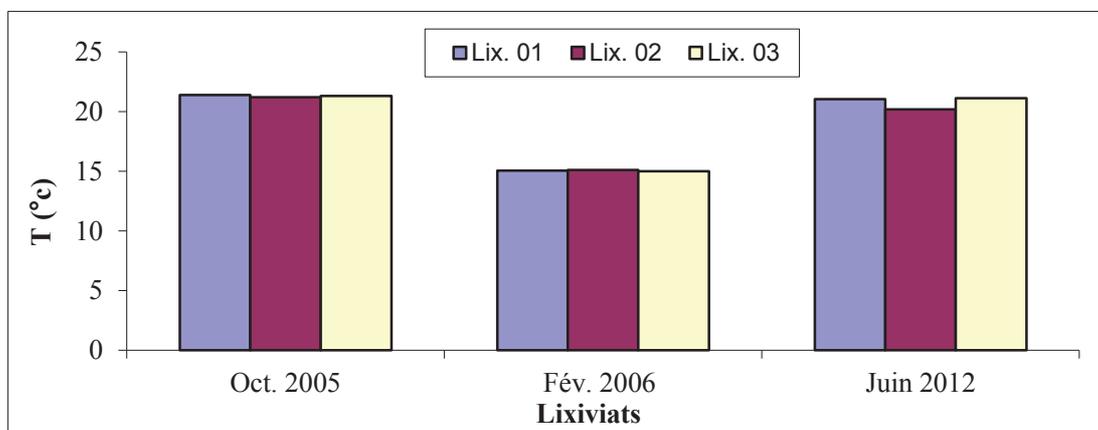


Figure 71 : Variations des températures des lixiviats de la décharge de Berka zerga.

##### V. 3. 1. 2. Le pH

Pour le pH des lixiviats (Fig.72), il est trop basique. Le maximum est observé au point Lix.02 (pH = 10.21) durant le mois de Juin 2012, le minimum au point Lix.03 durant le mois de Février 2006 (pH = 8.21).

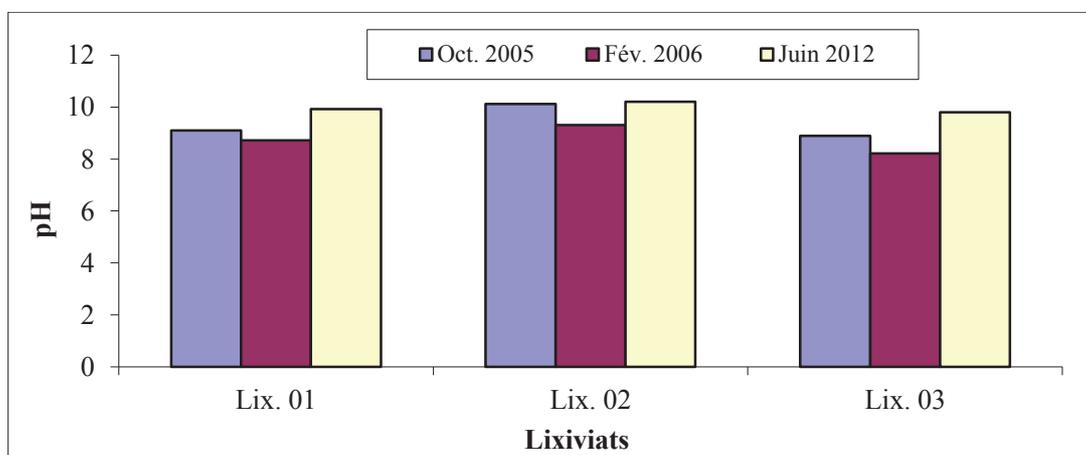


Figure 72 : Variations du pH des lixiviats de la décharge de Berka zerga.

### V. 3. 1. 3. La conductivité électrique

La conductivité des lixiviats est très forte ce qui influe sur la qualité des eaux de la nappe, car ces lixiviats sont déversée directement dans les eaux de l'Oued Gouilla. Les plus faibles valeurs sont observées au point Lix.03 avec 21600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durant le mois de Juin 2012 (Fig.73), la plus forte valeur est enregistrée au mois d'Octobre 2005 37370  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , c'est l'effet de la précipitation. La conductivité augmente durant les basses eaux, où la forte évaporation et la faible précipitation induisent une hyper concentration en éléments chimiques.

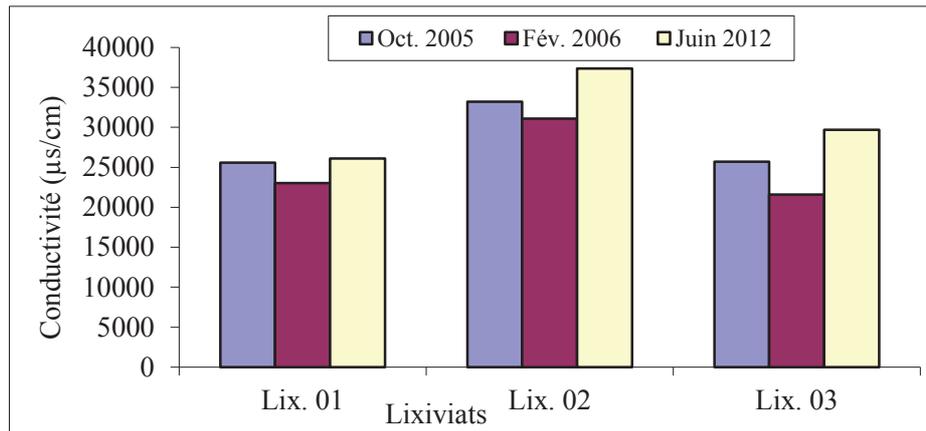


Figure 73 : Conductivités électriques des lixiviats de la décharge de Berka zerga.

### V. 3. 2. Les métaux lourds

Les métaux et les métalloïdes sont présents à l'état de trace dans la croûte terrestre. On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse 5  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Leur présence dans les eaux naturelles résulte des processus naturels (érosion et altération, émissions volcaniques, diffusion d'aérosols à partir des sols et de l'eau de mer) et de l'activité humaine. Cette dernière est aujourd'hui considérée comme la principale source de contamination des eaux par les métaux. L'importance relative des sources de contamination anthropique (industrielle, domestique ou agricole) est variable selon l'élément considéré et l'occupation des sols sur le bassin versant.

Tableau 35 : Comparaison des normes internationales de métaux lourds pour les eaux de consommation (OMS, États-Unis, CEE, France). (Callier et al. 2002)

Métaux lourds ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Pays	États-Unis	OMS (2011)	CEE (03/11/1998)	FRANCE	Limite qualité	Concentrations maximales d'origine naturelle
Plomb		15	10	10	50	50	<1
Zinc		5 000	3 000	/	5 000	5 000	/
Cuivre		1300	1 000	2 000			24
Fer		300	300	200	200	200	/
Chrome			50	50			6.9

La décharge publique de Annaba est localisée dans la plaine de l'Oued Zied, elle génère par ses lixiviats des concentrations élevées en métaux lourds ; Cuivre, Plomb, Chrome, Zinc et Fer total. Les concentrations obtenues dans les puits limitrophes de la décharge sont très élevées et dépassent largement les normes de rejets des effluents (Tab.35 et 36).

**Tableau 36 : Les normes de rejets des lixiviats.**

Paramètre	T°C	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	DBO <sub>5</sub>	Cr	Cu	Pb	Fe	Zn
<b>Normes de rejets OMS recommandés (mg/l)</b>	30	5.5-8.5	1000	200	2	0,6	4	10	7
<b>Normes de rejets Algérienne (mg/l) 2013</b>	30	5.5-8.5	2800	200	0.5	0.3	1	5	5

Les origines naturelles et anthropiques de ces métaux lourds sont présentées dans le tableau 37 (Benessam S., et al., 2015). Elles ont été tirées de la bibliographie et sélectionnées en fonction des formations géologiques et des produits anthropiques présents dans notre zone d'étude.

**Tableau 37 : Sources anthropique et naturelle des métaux lourds.** (Laperche et al. 2004, Baize D., 1997)

	Origines naturelles				Origines anthropiques
	Type de roche		Teneurs en mg/kg		
			Moyenne	Gamme de teneurs	
<b>Plomb (Pb)</b>	Métamorphique	Marbre	3.9	0.9 à 7	-Carburants
		Gneiss et Schiste	17.6	0.4 à > 100	-Batterie et piles -Canalisation
	Sédimentaire	Grès	9.8	< 1 à > 50	-Etc..
<b>Zinc (Zn)</b>	Gneiss		40	40 à 120	-pigments -Ordures -Agriculture -Etc..
	Argiles, Schistes				
<b>Cuivre (Cu)</b>	Argiles, Schistes			45 à 70	Carburants
<b>Fer (Fe)</b>	Argile,			3 à 15	
	Schiste, Micaschiste, Gneiss			0.5 à 1.5	
<b>Chrome (Cr)</b>	Gneiss, Muscovite		150	100 à 200	

### V. 3. 2. 1. Le Plomb

En dehors des zones des gisements plombifères, le plomb est un constituant naturel largement répandu dans la croûte terrestre (Tab.37).

Les valeurs relevées témoignent d'une contamination irrégulière et parfois importante des eaux de la nappe. En effet, la valeur minimale de 0,003 mg/l est enregistrée au niveau du point P15 pendant le mois de Juin et une valeur maximale de 0,083 mg/l (0,01 mg/l c'est la limite de potabilité) est enregistrée au niveau du point P16 au mois d'Octobre (Fig.74).

Pour les lixiviats la valeur minimale de 0,98 mg/l est enregistrée au niveau du point Lix.3 pendant le mois d'Octobre et une valeur maximale de 2,46 mg/l est enregistrée au niveau du point Lix.2 en Février (Fig.75), on remarque que même les teneurs en plomb des lixiviats dépassent largement les normes des rejets des effluents (1 mg/l).

Cependant, l'analyse détaillée des teneurs en Pb montre que les faibles valeurs ont été enregistrées au niveau des points situées dans le centre de la plaine, loin de toute source de pollution, tandis que les concentrations les plus élevées ont été relevées au niveau des points situées à proximité de l'Oued Zied (P 16) ou à côté de la décharge.

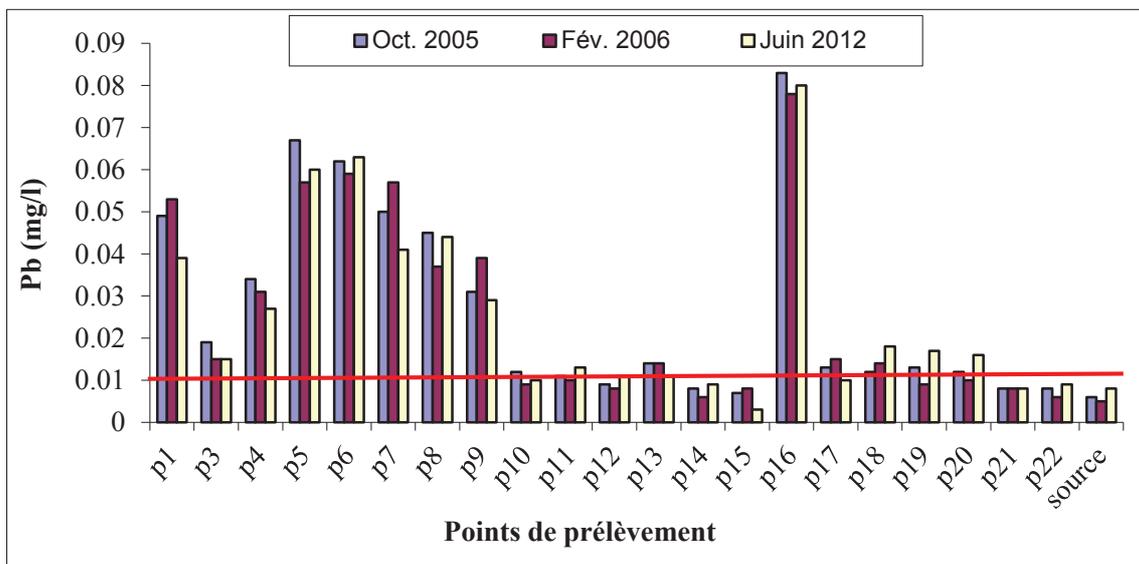


Figure 74 : Variations de la teneur en plomb des eaux de la nappe.

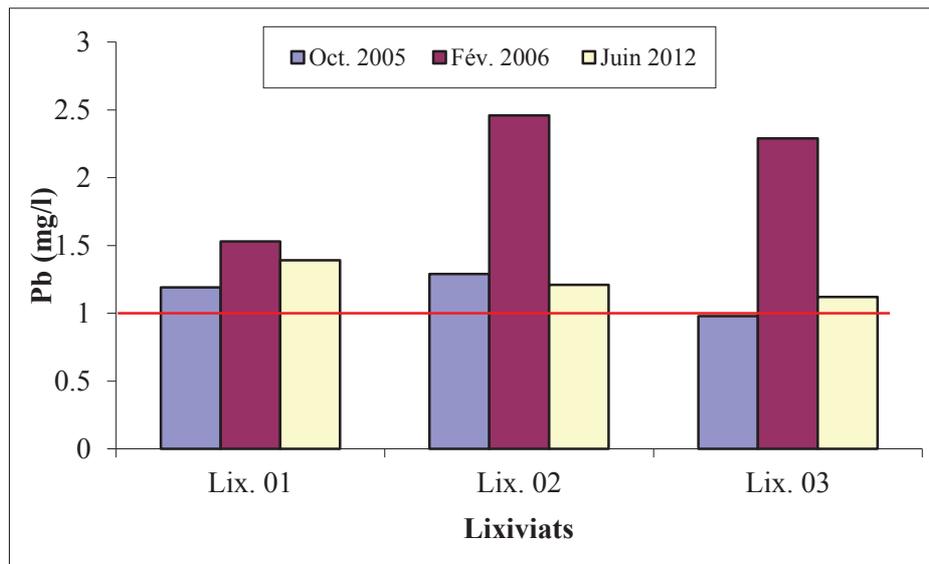


Figure 75 : Variations de la teneur en plomb des lixiviats.

V. 3. 2. 2. Cartes des teneurs en Plomb

Les teneurs en plomb suivent pratiquement la même répartition que celle du cuivre, les points qui se trouvent dans la décharge sont les plus chargés. La teneur en plomb dans la plaine est forte mais elle reste inférieure par rapport aux concentrations des points situés à proximité de la décharge (Fig. 76, 77, 78).

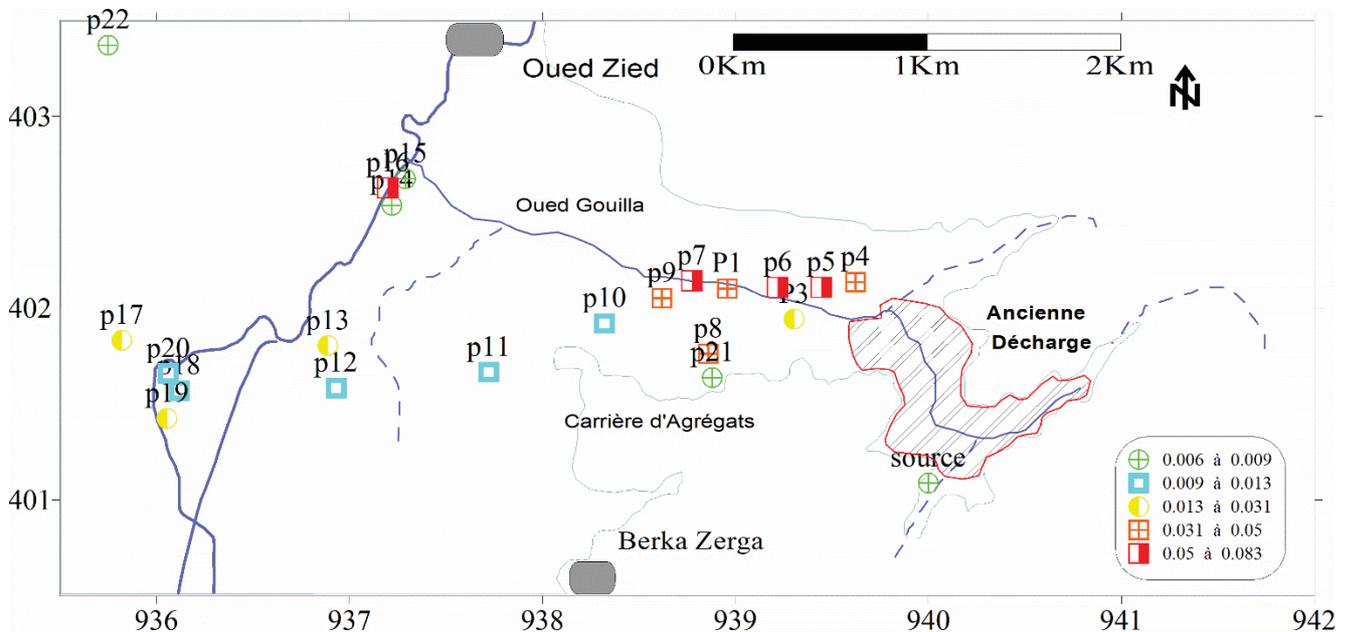


Figure 76 : Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.

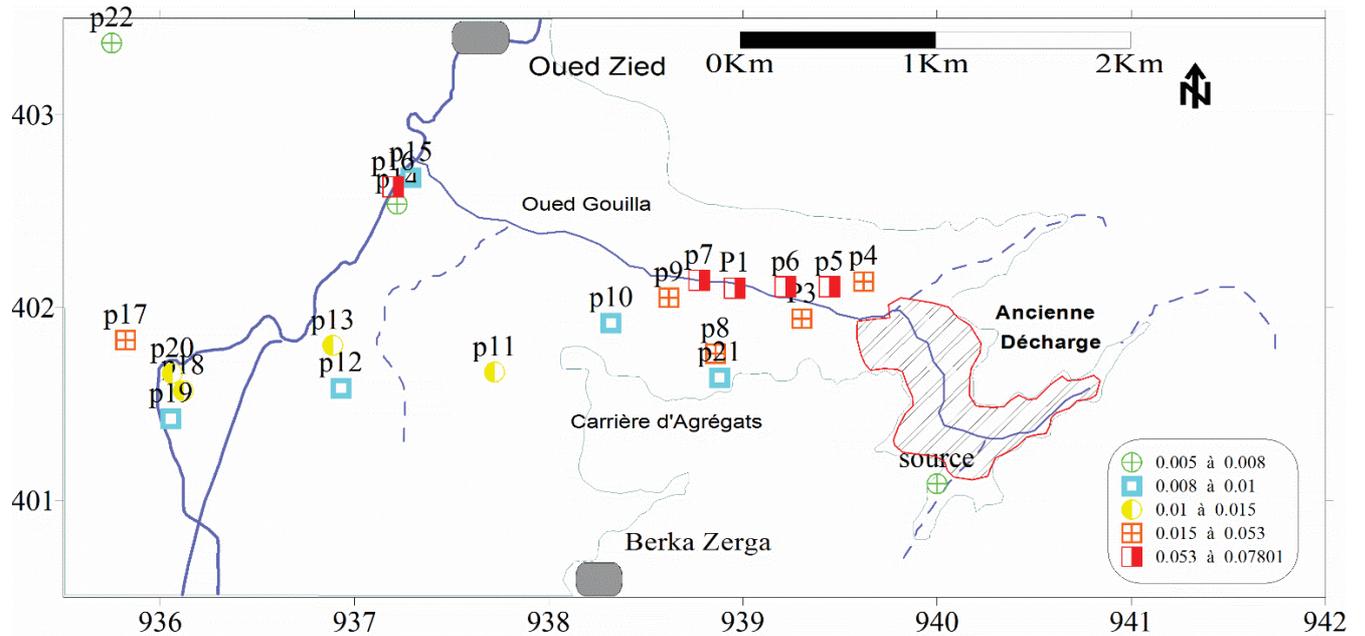


Figure 77 : Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne de Février 2006.

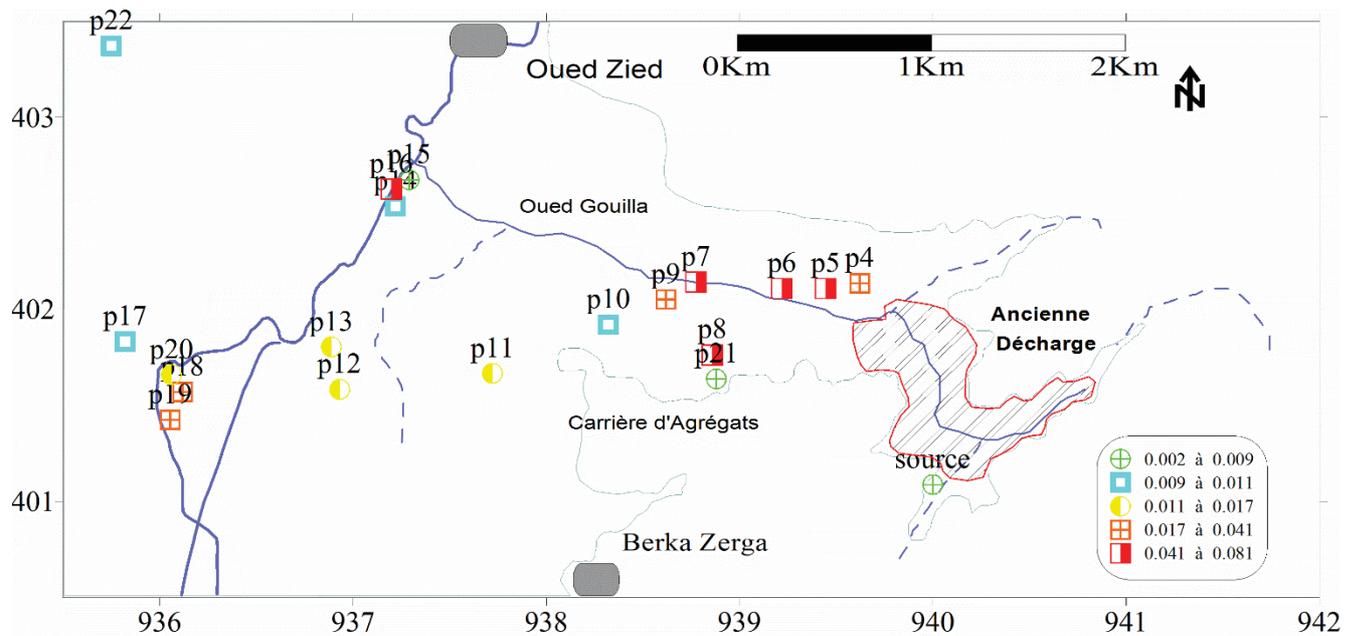


Figure 78 : Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne de Juin 2012.

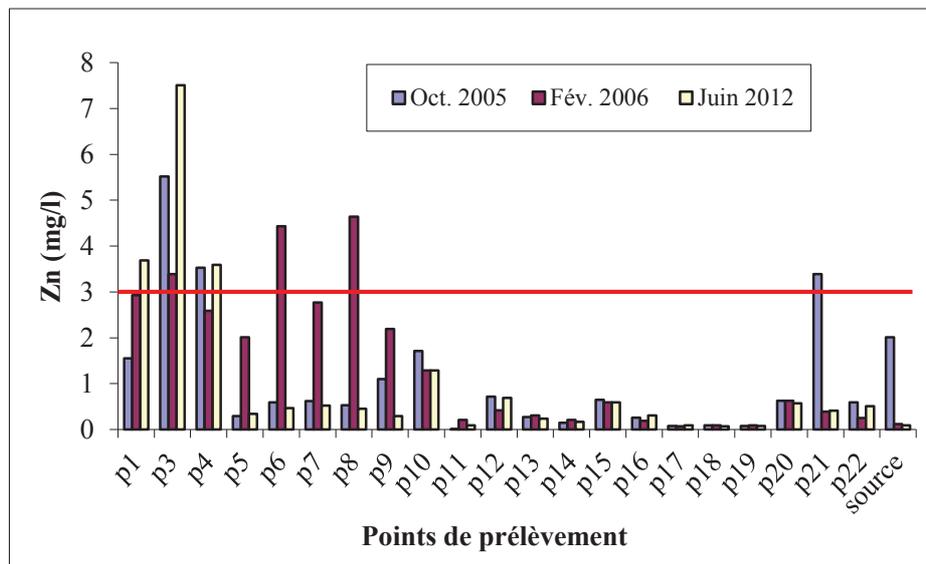
### V. 3. 2. 3. Le Zinc

La teneur moyenne en zinc de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg. Le zinc est facilement adsorbé par les minéraux argileux, les carbonates ou hydroxydes (Hickey, M. G., 1984) ont montré que la plus grande proportion de zinc dans des sols et sédiments contaminés était associée aux oxydes de fer et de manganèse. De point de vue électrochimique, le Zinc est un réducteur vis-à-vis de la plupart des métaux de l'Aluminium et du magnésium.

Les teneurs en zinc indiquent des concentrations importantes particulièrement au niveau des points P3, P4, P7, P8 et P9, avec des valeurs respectives de 7,51 mg/l ; 2,59 mg/l ; 2,77 mg/l ; 4,64 mg/l ; et 2,19 mg/l. Ces points se trouvent à proximité de la décharge, ce qui explique les fortes teneurs. Pour les autres points, les valeurs oscillent entre 0,01 mg/l et 2,01 mg/l (Fig. 79).

Par ailleurs, et malgré cette présence notable du zinc dans ces eaux, les teneurs enregistrées restent inférieures à la concentration maximale admissible (CMA) recommandée par l'OMS pour l'élément zinc dans les eaux d'alimentation (3 000 µg/L).

Pour les lixiviats on a enregistré des fortes teneurs, la plus faible valeur a été observée pendant le mois d'octobre (6,4 mg/l). La valeur maximale est enregistrée durant le mois février au point Lix.1 (56,01 mg/l) (Fig. 80), on que même les teneurs en zinc des lixiviats dépassent largement les normes des rejets des effluents.



**Figure 79 : Variations de la teneur en zinc des eaux de la nappe.**

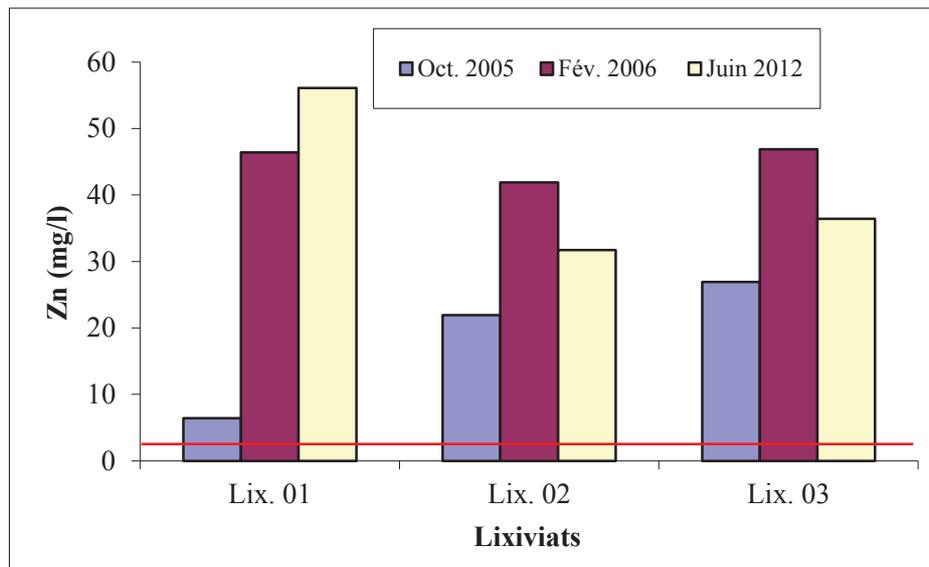


Figure 80 : Variations de la teneur en Zinc des lixiviats.

V. 3. 2. 4. Cartes des teneurs en Zinc

Les teneurs les plus élevées des eaux des puits échantillonnés ne dépassent pas la norme préconisée par l’OMS 3 mg/l, seuls les teneurs des points P7 et P9 qui se trouvent à proximité de la décharge urbaine marquent une légère augmentation par rapport à la norme, pour les concentrations des lixiviats elles dépassent largement la norme. (fig. 81, 82, 83).

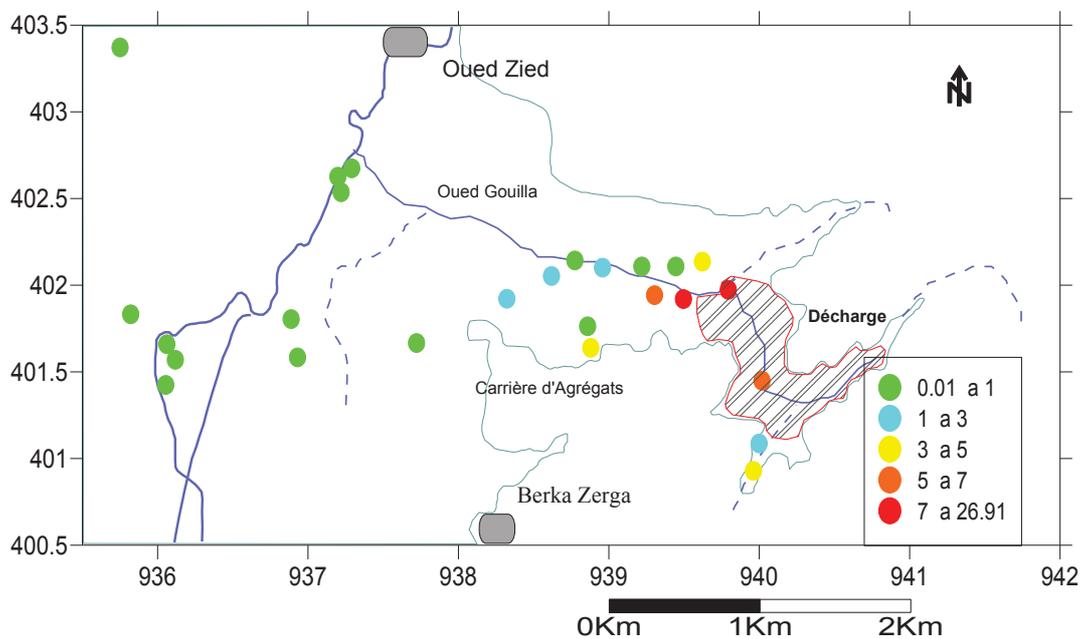


Figure 81 : Carte des teneurs en Zn (mg/l), Campagne d’Octobre 2005.

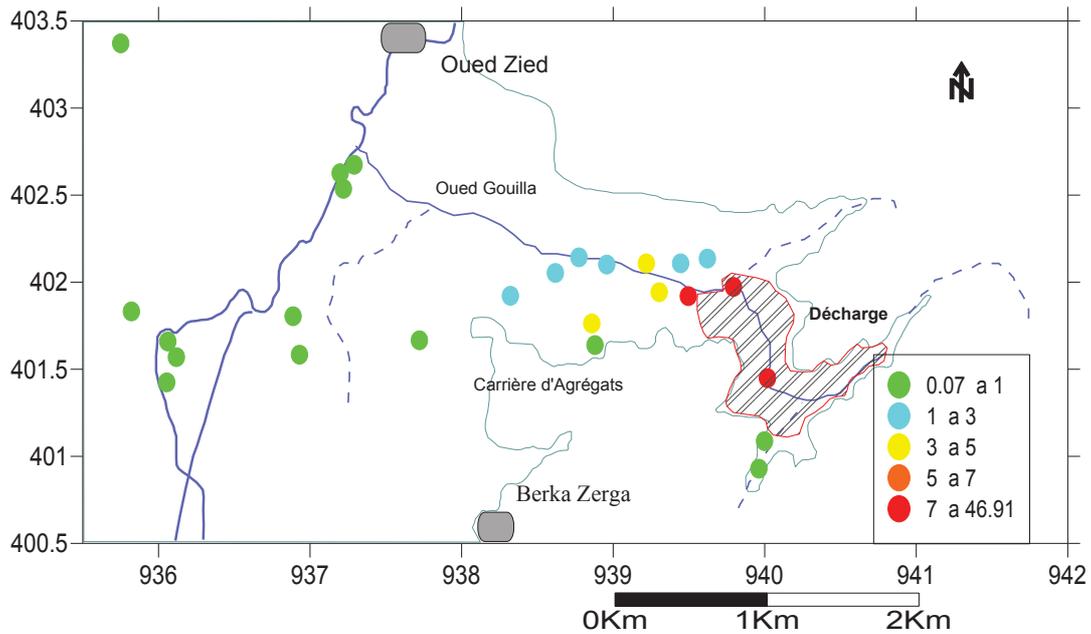


Figure 82 : Carte des teneurs en Zn (mg/l), Campagne de Février 2006.

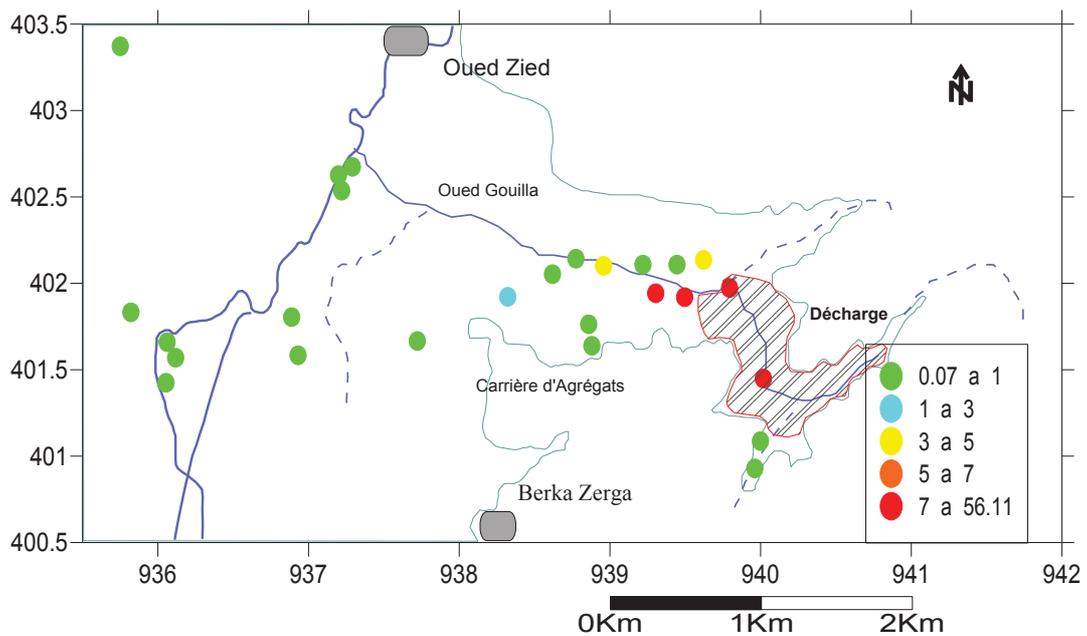


Figure 83 : Carte des teneurs en Zn (mg/l), Campagne de Juin 2012.

V. 3. 2. 5. Le Cuivre

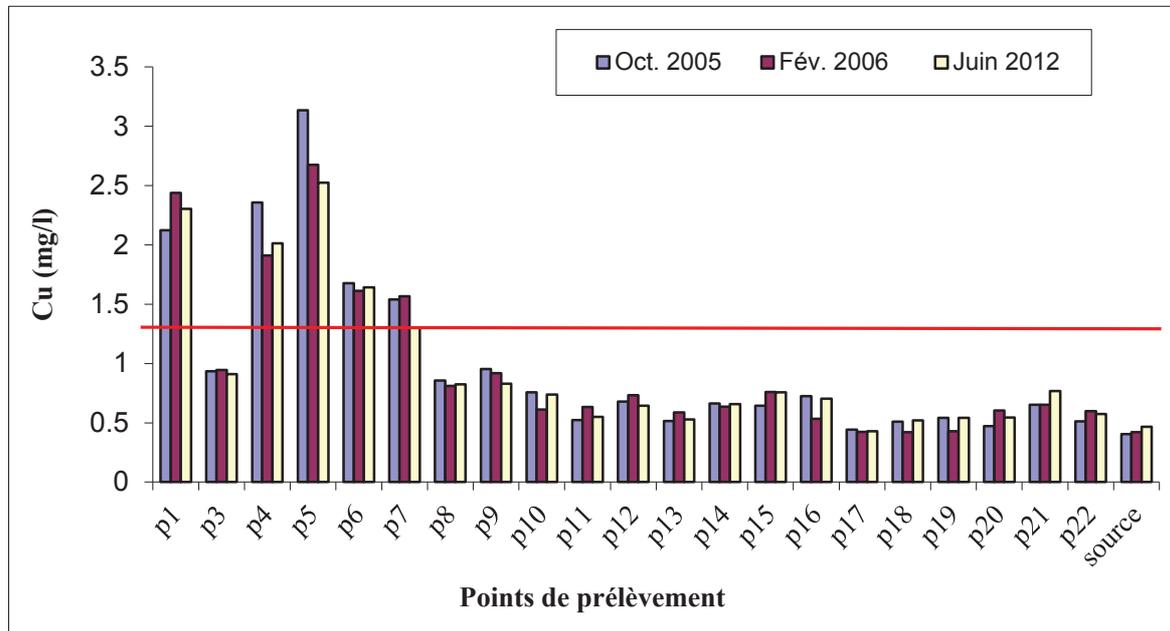
La composition moyenne de la croûte terrestre en cuivre serait comprise entre 45 et 70 mg/kg. (Alloway B.J., 1975) Le cuivre est un élément chalcophile qui se trouve associé à des sulfures, avec le plomb, le cadmium et le zinc. Il est habituellement présent en petites quantités dans des minerais de zinc. Le cuivre est assez fréquemment retrouvé dans la nature, par exemple sous forme de Chalcopyrite. Ses caractéristiques chimiques n'autorisent cependant pas

l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Elles sont donc plutôt d'origine anthropique (Chemaou El Fehri. I., 2016).

Les valeurs relevées témoignent d'une contamination importante des eaux de la nappe. En effet, la valeur minimale de 0,40 mg/l est enregistrée au niveau de la source pendant le mois d'Octobre, elle est trois fois inférieure à la concentration maximale admissible (CMA) recommandée par l'OMS pour le Cuivre dans les eaux d'alimentation (1300 µg/L), une valeur maximale de 2,67 mg/l est enregistrée au niveau du point P5 au mois d'Octobre (Fig. 12).

Pour les lixiviats, la valeur minimale de 25,67 mg/l est enregistrée au niveau du point Lix.1 (Juin 2012) et une valeur maximale de 51,77 mg/l est enregistrée au niveau du point Lix.2 (Février).

Géographiquement, la répartition des teneurs en Cuivre montre que les concentrations les plus élevées ont été relevées au niveau des points situés à proximité de l'Oued Zied et de la décharge alors que les faibles valeurs, qui restent largement supérieures à la norme, ont été enregistrées au niveau des points situés au centre de la plaine, loin de toute source de pollution. L'origine de ces teneurs serait de nature géologique.



**Figure 84 : Variations de la teneur en cuivre des eaux de la nappe.**

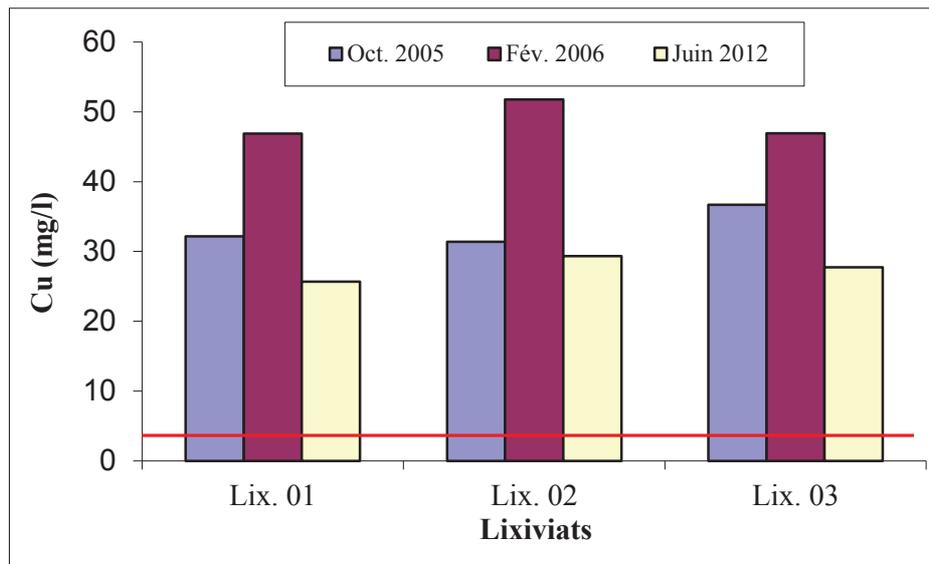


Figure 85 : Variations de la teneur en cuivre des lixiviats.

V. 3. 2. 6. Cartes des teneurs en Cuivre

Les plus fortes teneurs se localisent au niveau de la décharge et sur ses bordures. La concentration diminue de l’Est vers l’Ouest suivant le sens d’écoulement de l’oued Gouilla. Au centre de la plaine, les concentrations en Cuivre sont relativement fortes et marquent de légères variations au cours de la deuxième campagne mais les éléments retrouvent leur teneur originelle au cours des campagnes de juin 2012, (Fig. 86, 87, 88).

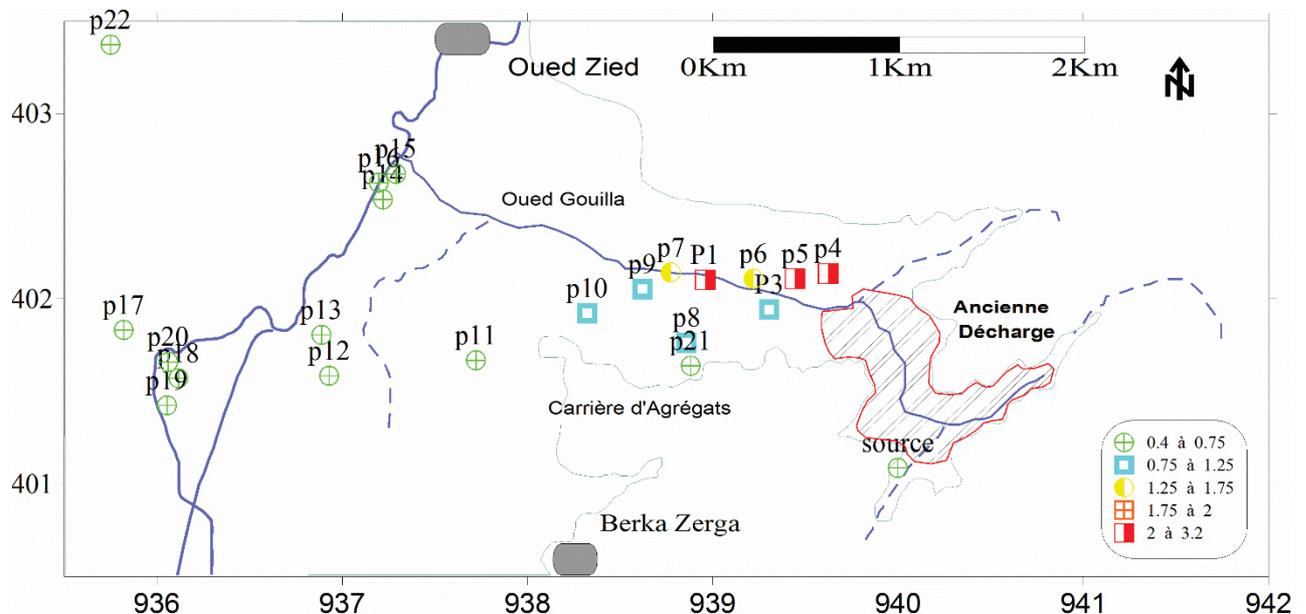


Figure 86 : Carte des teneurs en Cu (mg/l), Campagne d’Octobre 2005.

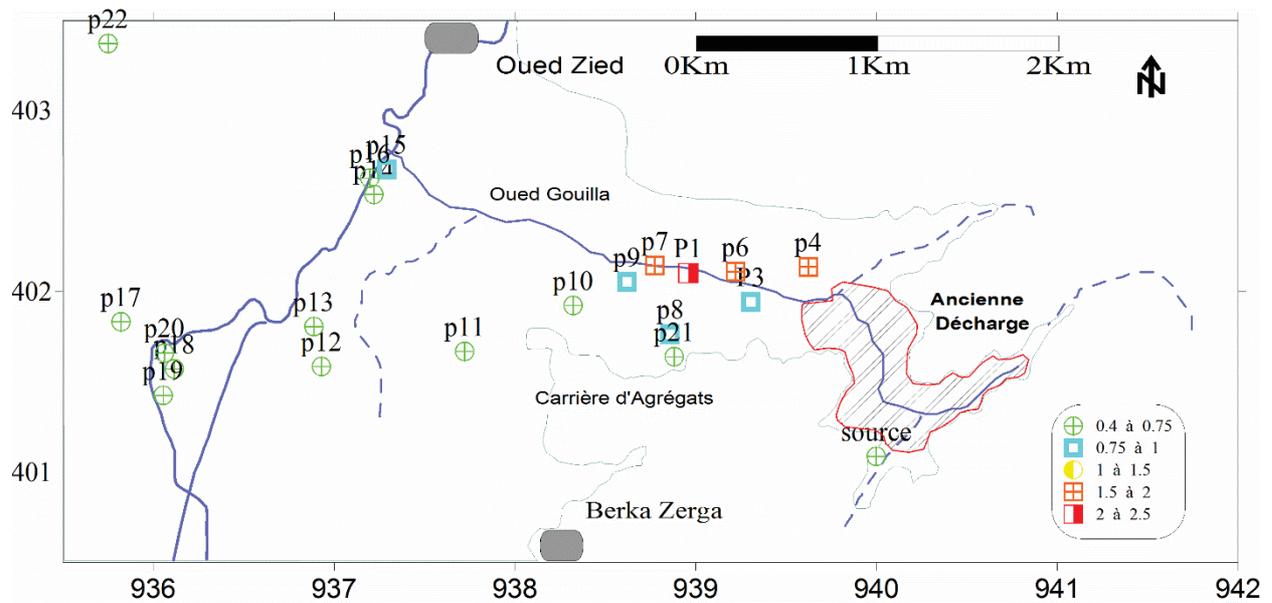


Figure 87 : Carte des teneurs en Cu (mg/l), Campagne de Février 2006.

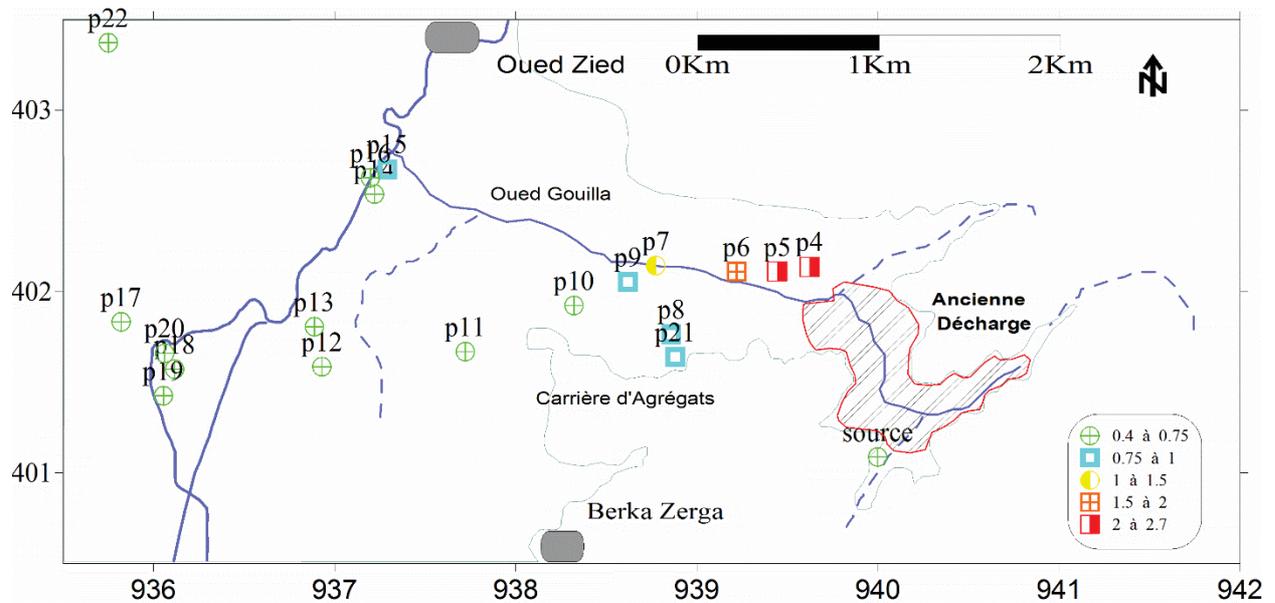


Figure 88 : Carte des teneurs en Cu (mg/l), Campagne de Juin 2012.

V. 3. 2. 7. Le Chrome

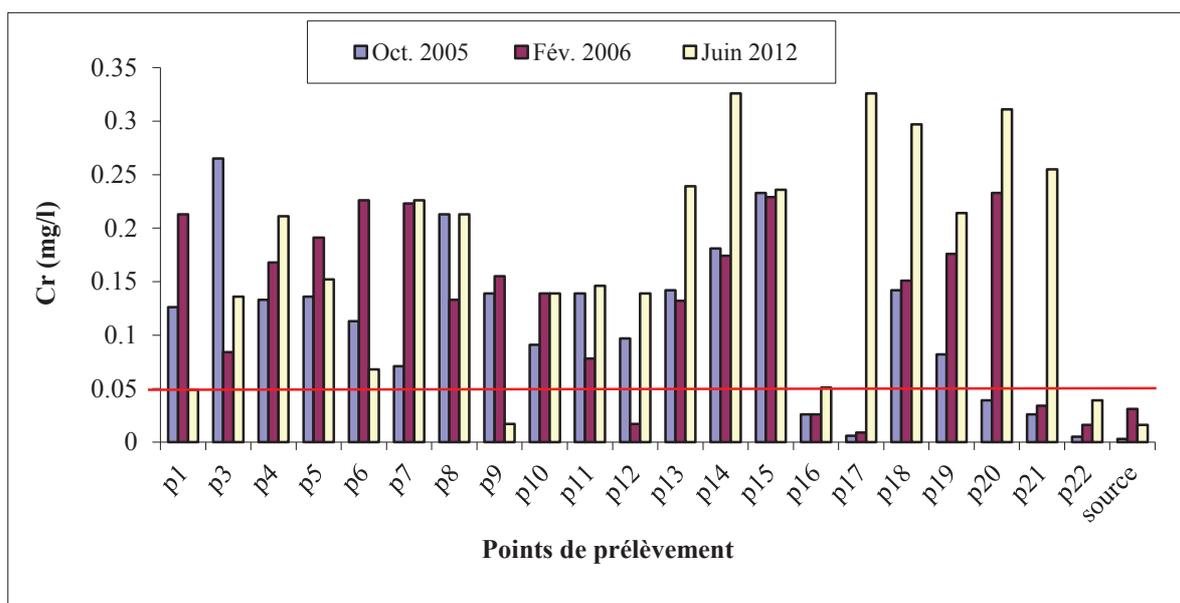
Le Chrome est présent naturellement dans les roches magmatiques et dans les sédiments calcaires et argileux. Dans les eaux naturelles, il peut provenir essentiellement de filons métallifères (chromite). Cependant, la présence de chrome dans les eaux naturelles est assez rare, du fait de sa faible solubilité. Sa présence dans les eaux est en général due aux rejets d'eaux usées.

A l'état pur, le chrome n'est utilisé que pour la fabrication d'aciers spéciaux, et pour le traitement de surface (dépôts anticorrosion dans l'industrie automobile, et chromage). Ces sels

sont utilisés comme pigments pour l'industrie textile, la céramique, la verrerie. Les dérivés du chrome se retrouvent dans l'eau essentiellement sous forme oxydée : le chrome trivalent (Cr III) et le chrome hexavalent (Cr VI).

Les valeurs relevées témoignent d'une contamination importante des eaux de la nappe. En effet, la valeur minimale de 0,003 mg/l est enregistrée au niveau de la source d'eau pendant le mois d'Octobre, une valeur maximale de 0,326 mg/l est enregistrée au niveau du point P17 au mois de Juin (Fig. 89), la concentration du Chrome dans les échantillons de la troisième campagne est supérieure à la norme recommandée par l'OMS (0.05 mg/l) pour l'élément Chrome dans les eaux d'alimentation.

Pour les lixiviats, la valeur minimale de 2,39 mg/l est enregistrée au niveau du point Lix.1 et une valeur maximale de 9,13 mg/l est enregistrée au niveau du point Lix.1, les deux valeurs ont été enregistrées durant le mois d'Octobre (Fig.90), on remarque que les teneurs en élément de Chrome dépassent largement les normes préconisées pour les effluents (2 mg/l).



**Figure 89 : Variations de la teneur en Chrome des eaux de la nappe.**

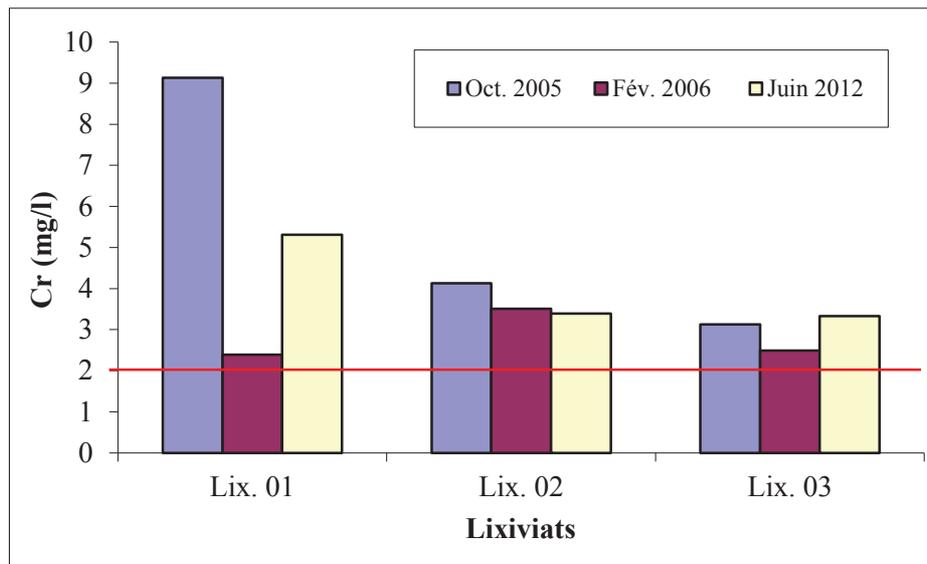


Figure 90 : Variations de la teneur en Chrome des lixiviats.

V. 3. 2. 8. Cartes des teneurs en Chrome

Les teneurs les plus élevées se localisent à la limite de la décharge publique, on remarque une augmentation de la concentration des points P6 et P7 durant la deuxième campagne, les points qui se trouvent au centre de la plaine ne varient pas mais la teneur est supérieure à la CMA préconisée par l’OMS, pour les eaux potable. (Fig.91, 92, 93).

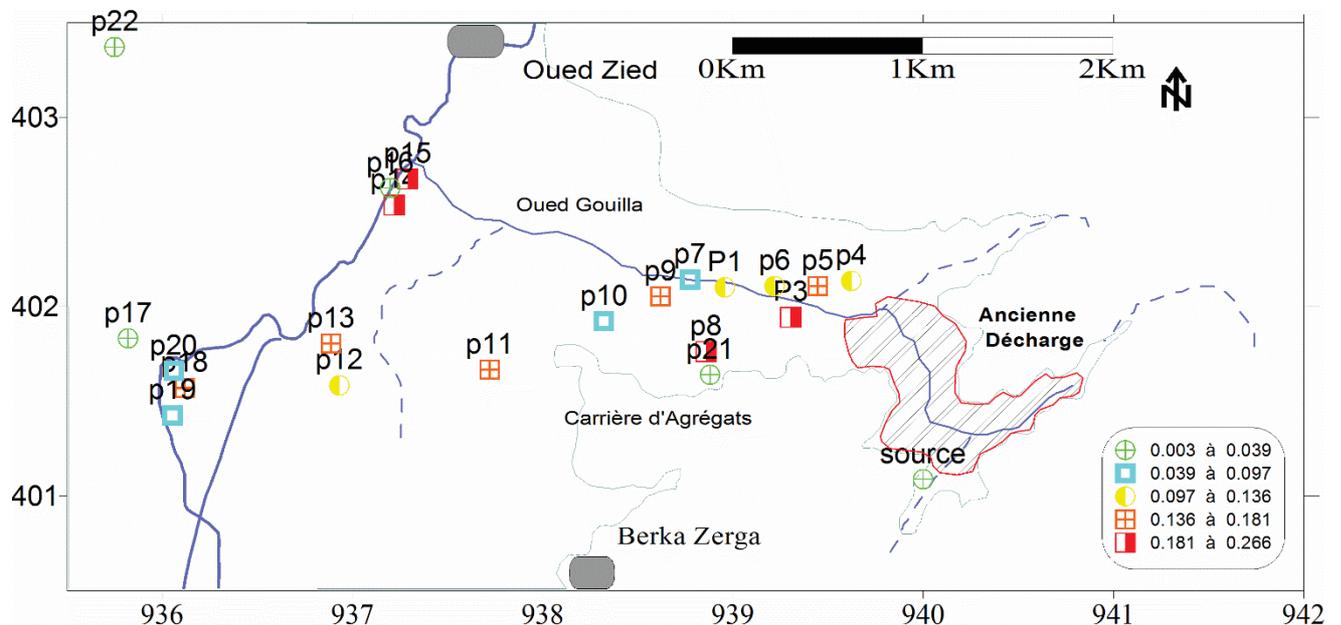


Figure 91 : Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne d’Octobre 2005.

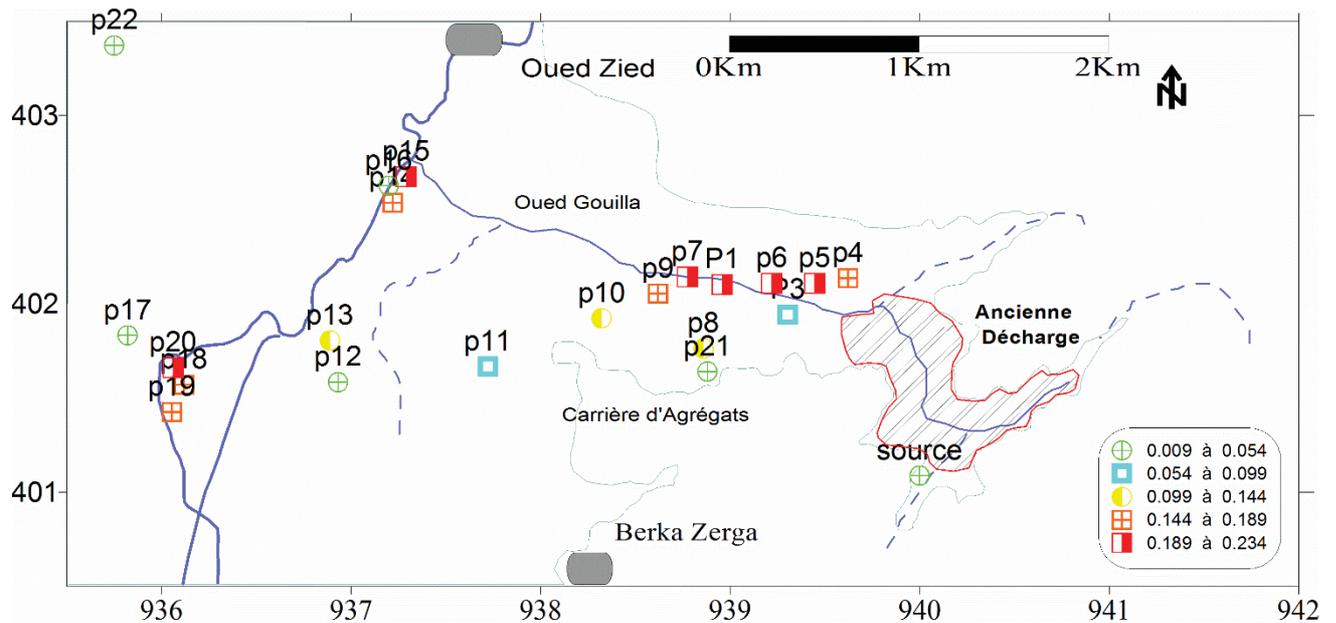


Figure 92 : Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne de Février 2006.

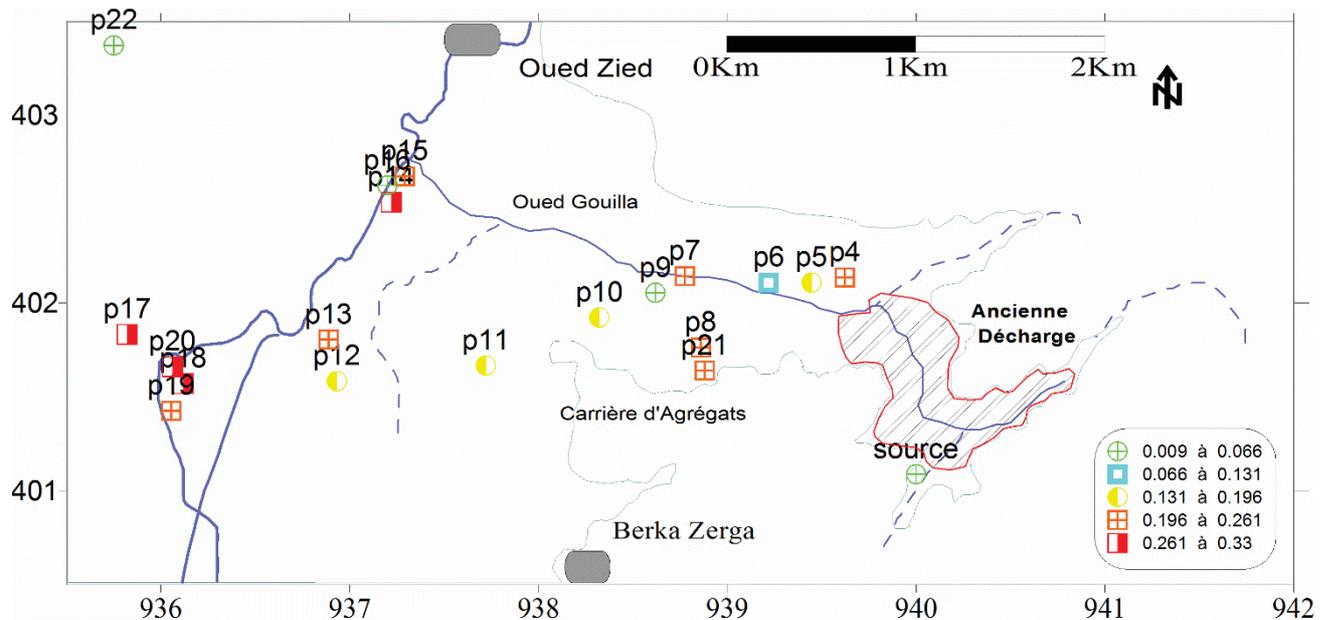


Figure 93 : Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne de Juin 2012.

V. 3. 2. 9. Le Fer

La présence de fer dans les eaux souterraines est d'origine multiple, le fer sous forme de pyrite (FeS) est couramment associé aux roches sédimentaires déposées en milieu réducteur (marnes, argiles) et aux roches métamorphique. Le fer se trouve à de fortes concentrations dans les eaux des cuirasses d'altération de socle.

Les résultats permettent de constater des teneurs très élevées en fer, de l'ordre de 1,013 mg/l et 0,956 mg/l respectivement au niveau des points P1 et P3 (Compagne du Fév. 2006). Cependant, à l'exception des points d'eau P4, P5, P9 et P16 dont les teneurs dépassent largement la norme (0,2 mg/l), tous les points échantillonnés présentent des valeurs inférieures à la CMA préconisée par l'OMS, pour les eaux de boisson (Fig.94).

Pour les lixiviats les teneurs sont également très élevées ; de 97,88 mg/l à 124,39 mg/l, alors que la norme exigée pour les effluents est de 10 mg/l (Fig.95).

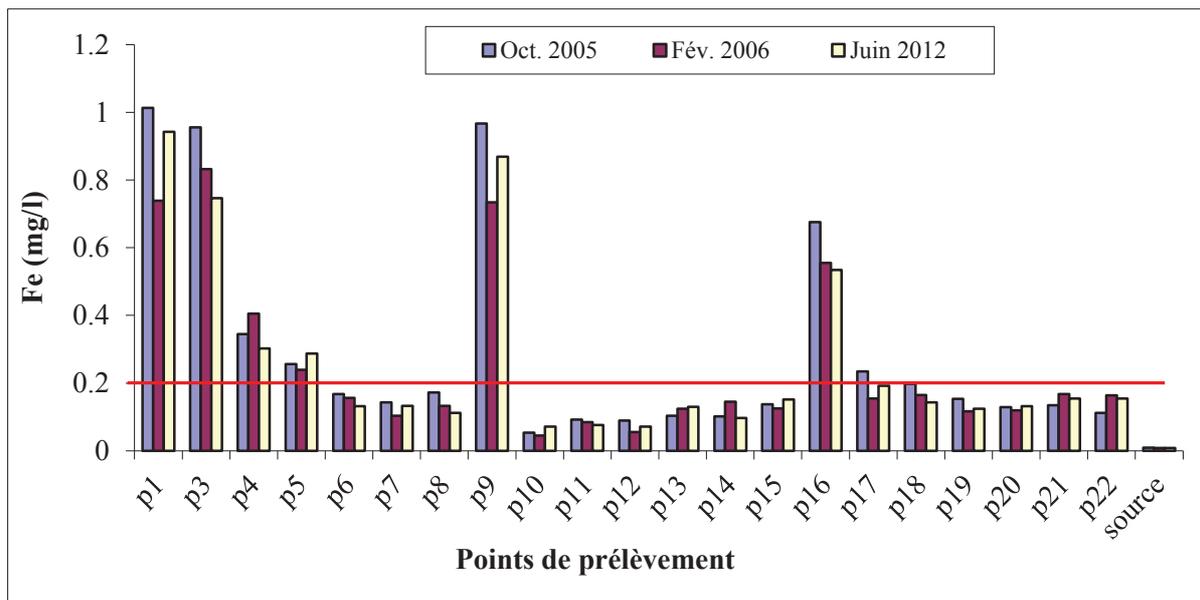


Figure 94 : Variations de la teneur en fer des lixiviats.

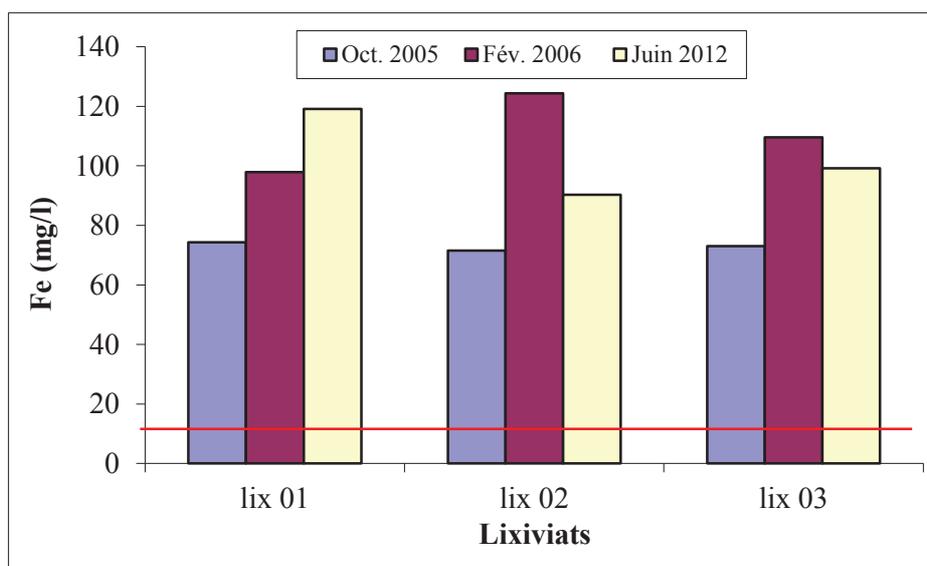


Figure 95 : Variations de la teneur en fer des lixiviats.

V. 3. 2. 10. Cartes des teneurs en Fer

Les eaux des puits qui se trouvent sur les bordures de la décharge ainsi que celles qui se trouvent à proximité de l'Oued Zied, qui sont sous l'effet direct des effluents de la décharge, présentent des teneurs élevées en fer, en particulier le point P16 et P9. Le centre de la plaine est caractérisé aussi par des teneurs élevées (origine naturelle) mais à un degré moindre que la décharge, (Fig. 96, 97, 98).

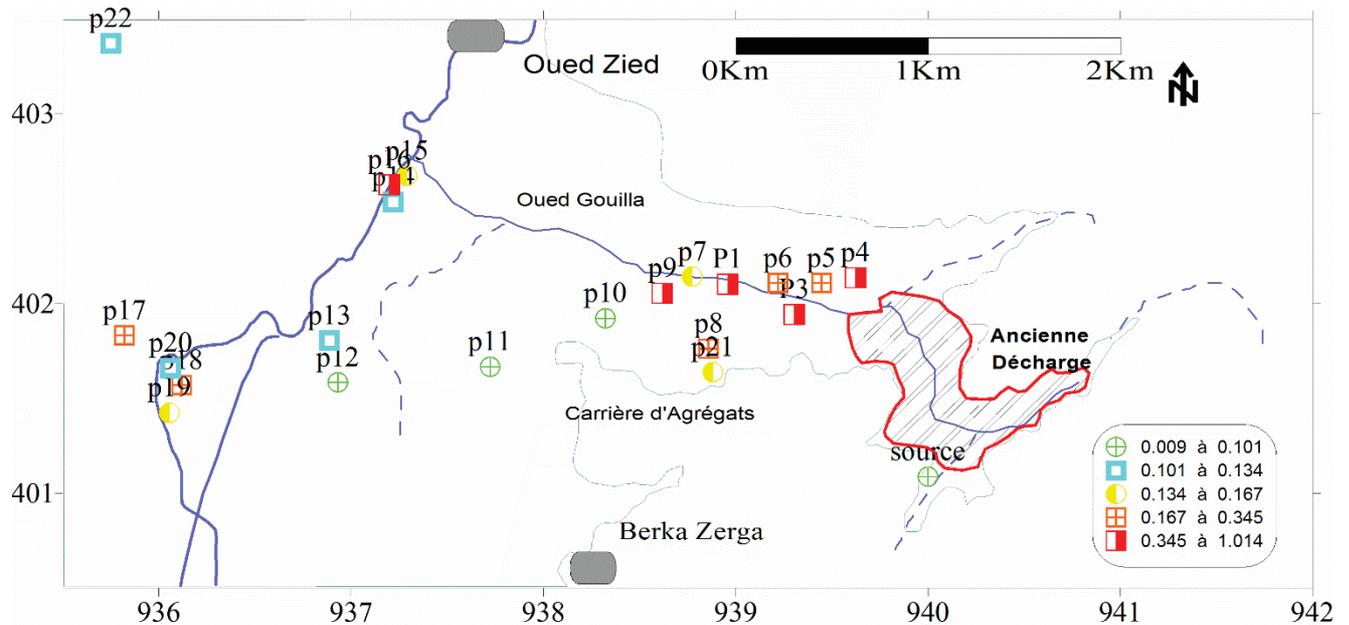


Figure 96 : Carte des teneurs en Fe (mg/l), Campagne d'Octobre 2005.

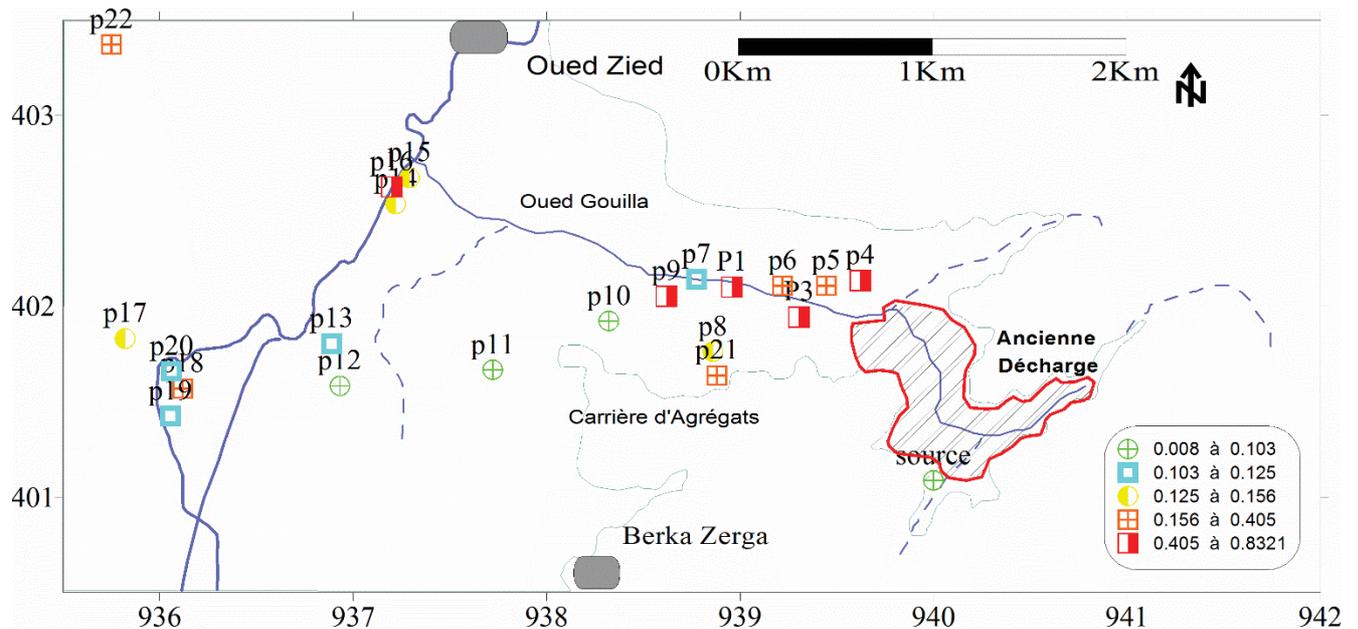


Figure 97 : Carte des teneurs en Fe (mg/l), Campagne de Février 2006.

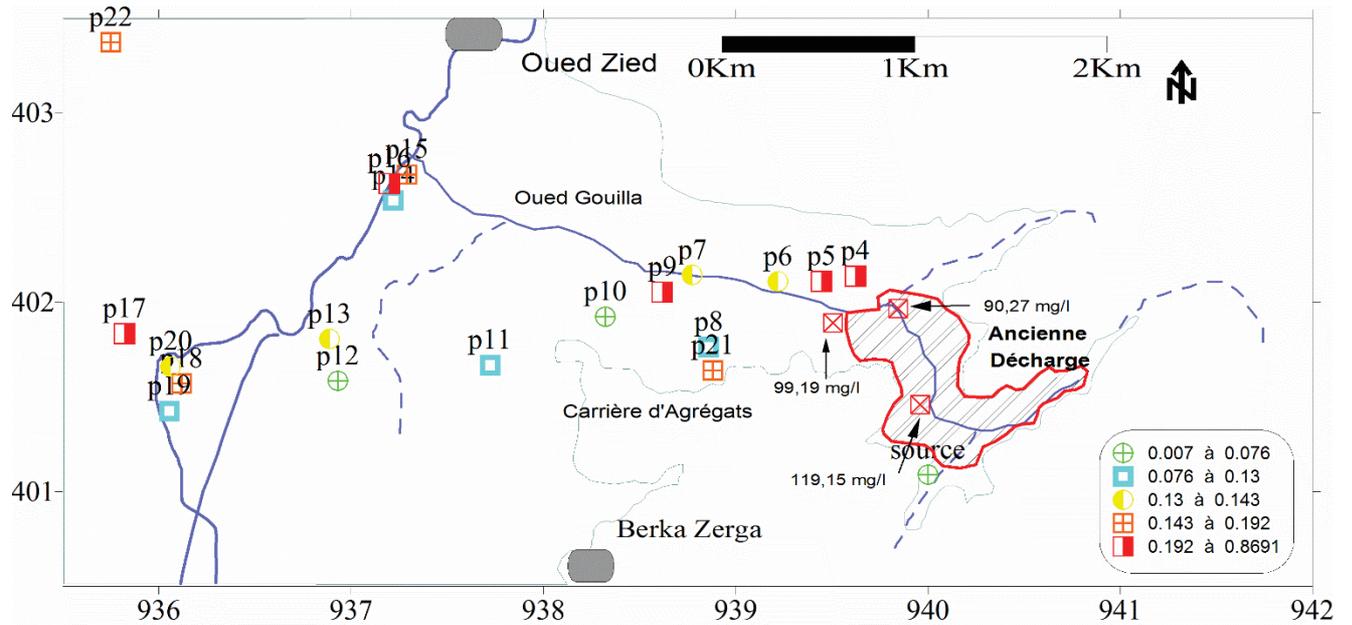


Figure 98 : Carte des teneurs en Fe (mg/l), Campagne de Juin 2012.

**V. 4. Carte de répartition de la DBO5**

Les valeurs élevées de la DBO<sub>5</sub> sont localisées sur la bordure de la décharge et au niveau des lixiviats. On remarque que les valeurs diminuent selon le sens d'écoulement de l'oued Gouilla (de la décharge vers le lac Fetzara). La forte valeur à proximité de l'oued Zied (P 16) serait due aux rejets urbains et à l'usine agroalimentaire qui se trouve dans l'agglomération de l'oued Zied (rejets direct des effluents dans l'oued Zied sans aucun traitement au préalable), (Fig.99).

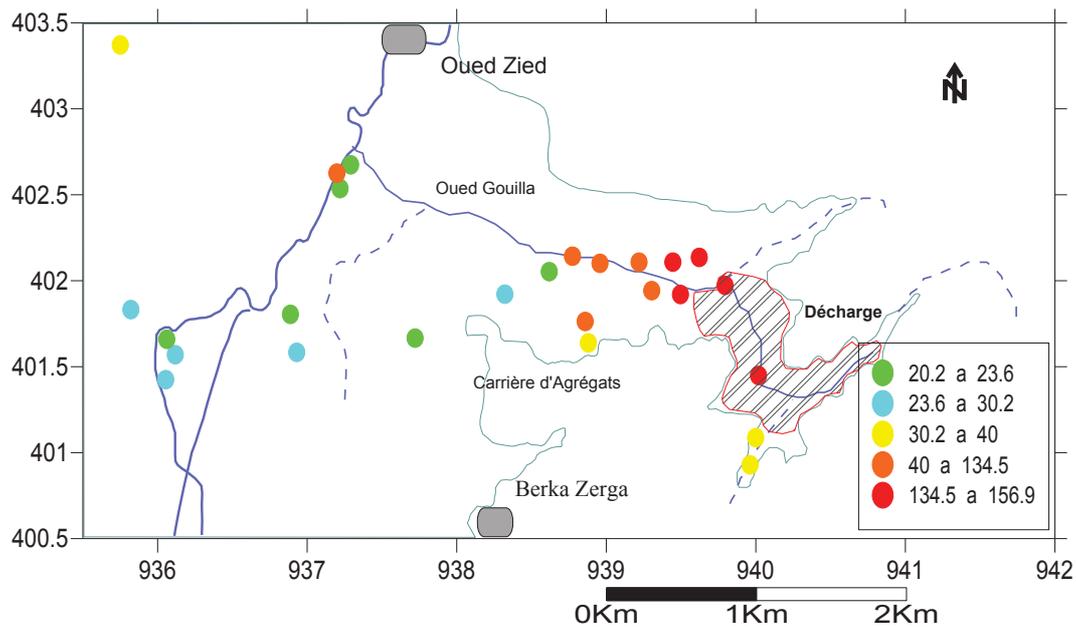


Figure 99 : Carte des valeurs de la DBO<sub>5</sub> (mg/l), Campagne de Juin 2012.

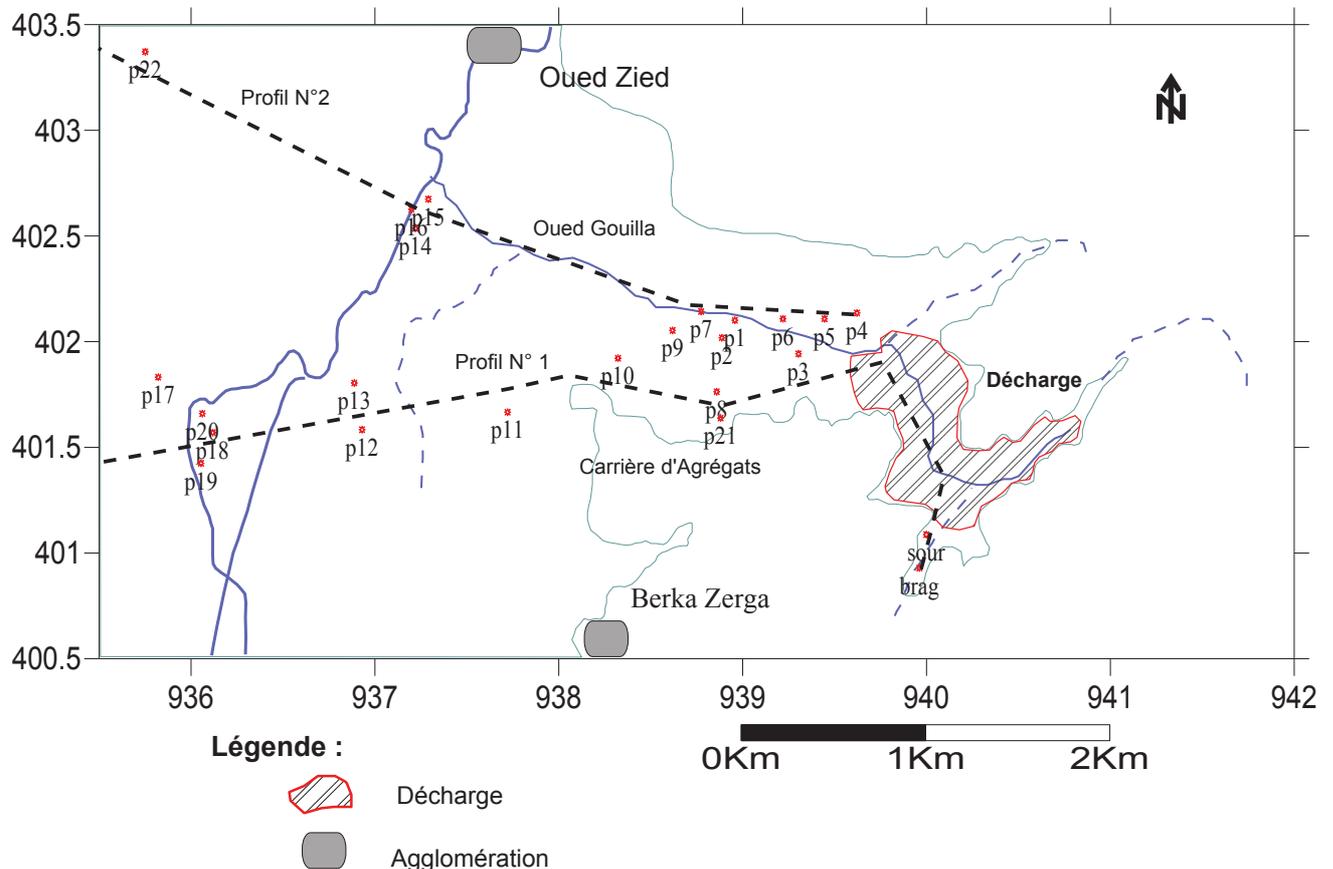
**V. 5. Répartition spatiale des teneurs**

Pour mieux comprendre l'évolution des teneurs dans l'espace, nous avons réalisé deux profils qui comportent des échantillons alignés du point le plus proche par rapport à la décharge jusqu'au point le plus loin, selon le sens d'écoulement des eaux évacuées au niveau du lac Fetzara, (Fig.100).

Sur ces profils on s'intéresse à l'évolution des teneurs des métaux lourds, de la conductivité, du pH et du niveau piézométrique par rapport à la distance décharge urbaine.

**Tableau 38 : Points retenus pour les deux profils.**

Profil 1	distance (km)	Profil 2	distance (km)
Lix. 01	1,18	Lix. 02	0,50
P21	3,09	P4	0,79
P08	3,12	Lix. 03	0,86
P10	3,88	P5	1,00
P11	4,64	P6	1,29
P12	5,64	Oued G.	1,36
P13	5,72	P7	1,83
P18	6,69	P15	3,85
P20	6,76	P14	3,88
P19	6,80	P16	3,96
P17	7,08	P22	6,66



**Figure 100 : Carte des tracés des profils N°1 et N°2.**

**V. 5. 1. Selon le profil N°1**

Si on compare les valeurs des trois campagnes selon le profil 1, le pH ne varie pas dans temps mais il reste basique dans les points qui se localisent dans la plaine, alors que l'alcalinité est bien claire dans la décharge.

Concernant la conductivité électrique on note que selon le même profil, les eaux du puits (P19) garde une forte conductivité pendant les trois campagnes de mesure. L'analyse détaillée montre que les puits de la plaine possèdent une valeur élevée de la conductivité, et cela s'explique par la nature géologique qui influence la qualité des eaux.

En ce qui concerne les métaux lourds la concentration en fer est trop élevée dans la nappe. La même constatation peut être également tirée pour tous les autres éléments sauf pour le zinc. D'une manière détaillée, on peut remarquer que la concentration des métaux lourds au puits (P 8) est trop élevée par rapport aux autres points, ce qui peut être due au lessivage des déchets de la décharge.

L'évolution spatiale de la pollution biochimique dans la troisième campagne, selon le profil 1, montre que les eaux de la plaine possèdent une qualité biochimique acceptable alors que les points qui se trouvent à proximité de la décharge présentent une qualité beaucoup plus dégradée.

En conclusion, selon le profil 1, les zones situées en aval de la décharge et dans la plaine de l'oued Zied présentent de fortes teneurs en métaux lourds (Pb, Cu, Cr). Ces dernières dérivent directement des déchets et des rejets de la décharge pour arriver par la suite selon le sens d'écoulement vers la plaine.

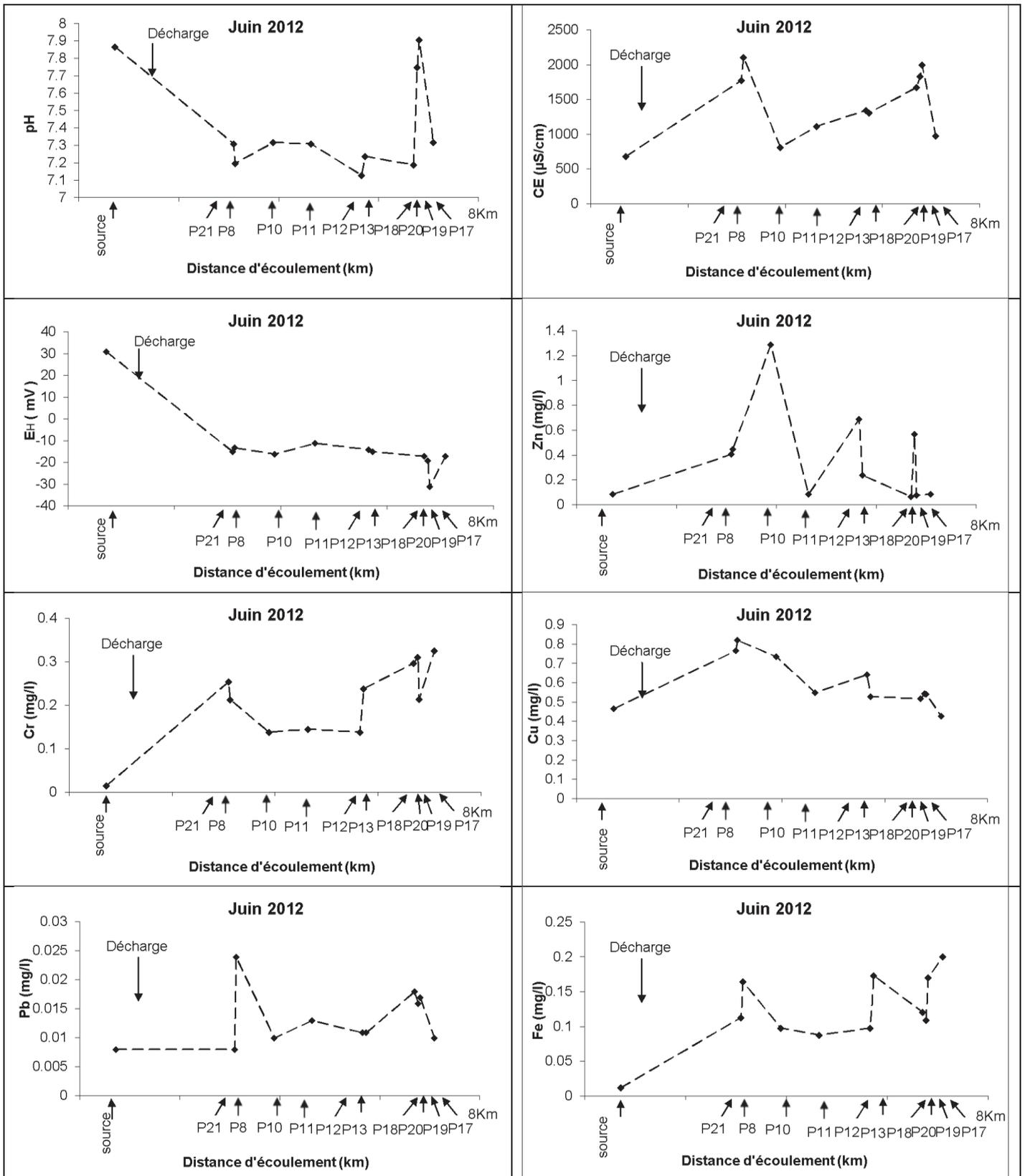
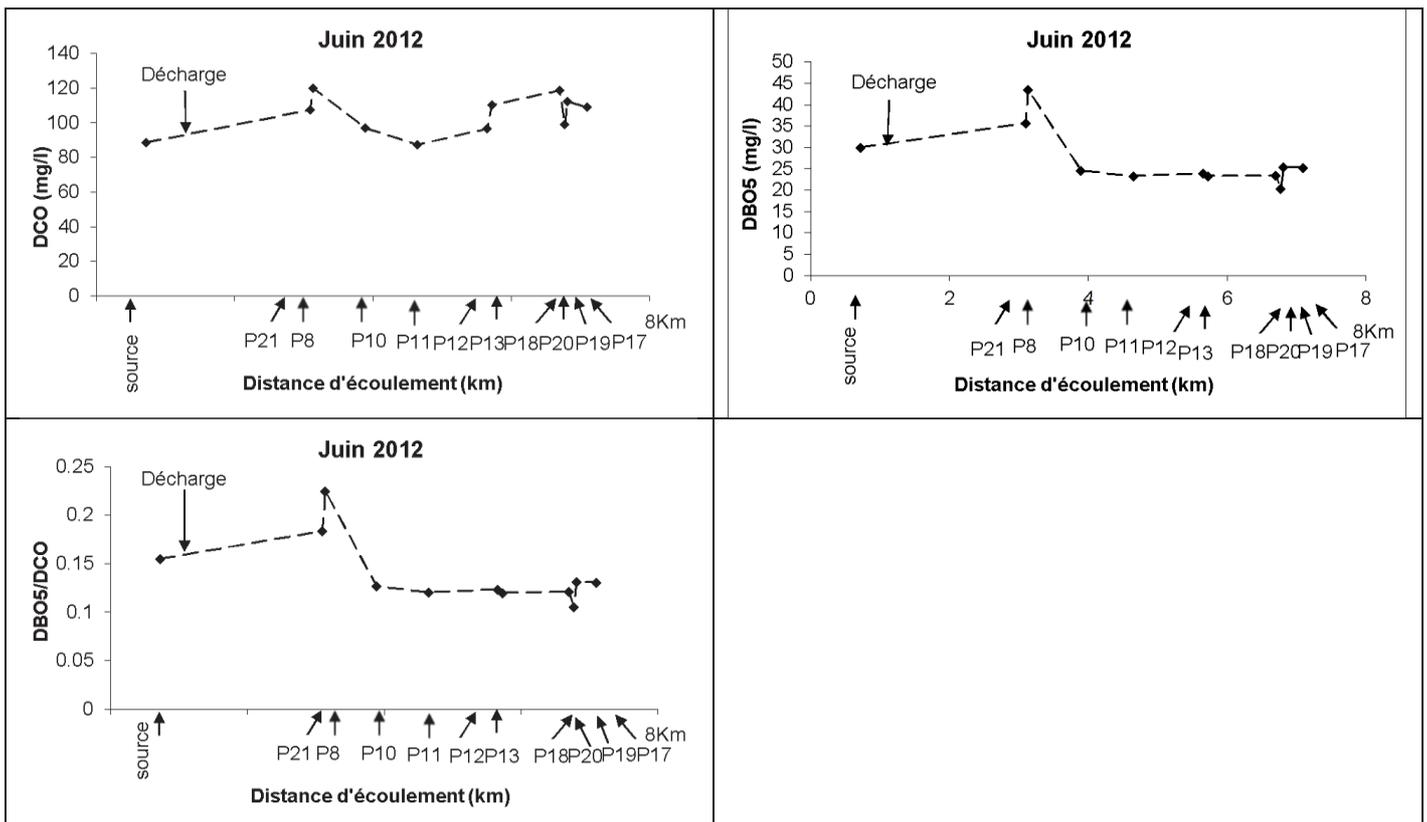


Figure 101 : Variations spatiales des différentes teneurs de la troisième campagne selon le profil N°1.



**Figure 102 : Variations spatiales de la pollution biochimique dans la troisième campagne selon le profil N°1**

### V. 5. 2. Selon le profil N°2

Comme pour le profil 1, si on compare les valeurs des trois campagnes le pH ne varie pas à l'échelle du temps, mais il reste basique dans les points qui se localisent dans la plaine.

La conductivité électrique des eaux des puits qui se trouvent dans la zone limitrophe de la décharge garde des fortes valeurs durant les trois campagnes de mesure. L'analyse plus fine du profil N°2 montre que les puits P15, P14 et P16 possèdent une valeur élevée de la conductivité, et cela s'explique par le lessivage de l'encaissant.

Les teneurs en métaux lourds dans les puits P4, P5, P1, et P7 sont trop élevées par rapport à la teneur du puits (P22) qui se trouve très loin de la décharge ce qui démontre l'influence du lessivage des déchets de la décharge dans l'augmentation des concentrations en métaux lourds.

Quant aux variations spatiales de la pollution biochimique dans la troisième campagne, on remarque que la qualité de l'eau des points situés à proximité de la décharge est dégradée alors que le point P22 possède une qualité biochimique acceptable.

On peut conclure que les eaux de la plaine sont contaminées par les métaux lourds (Pb, Cu, Cr) véhiculés par les eaux lessivant les déchets de la décharge de Berka Zerga.

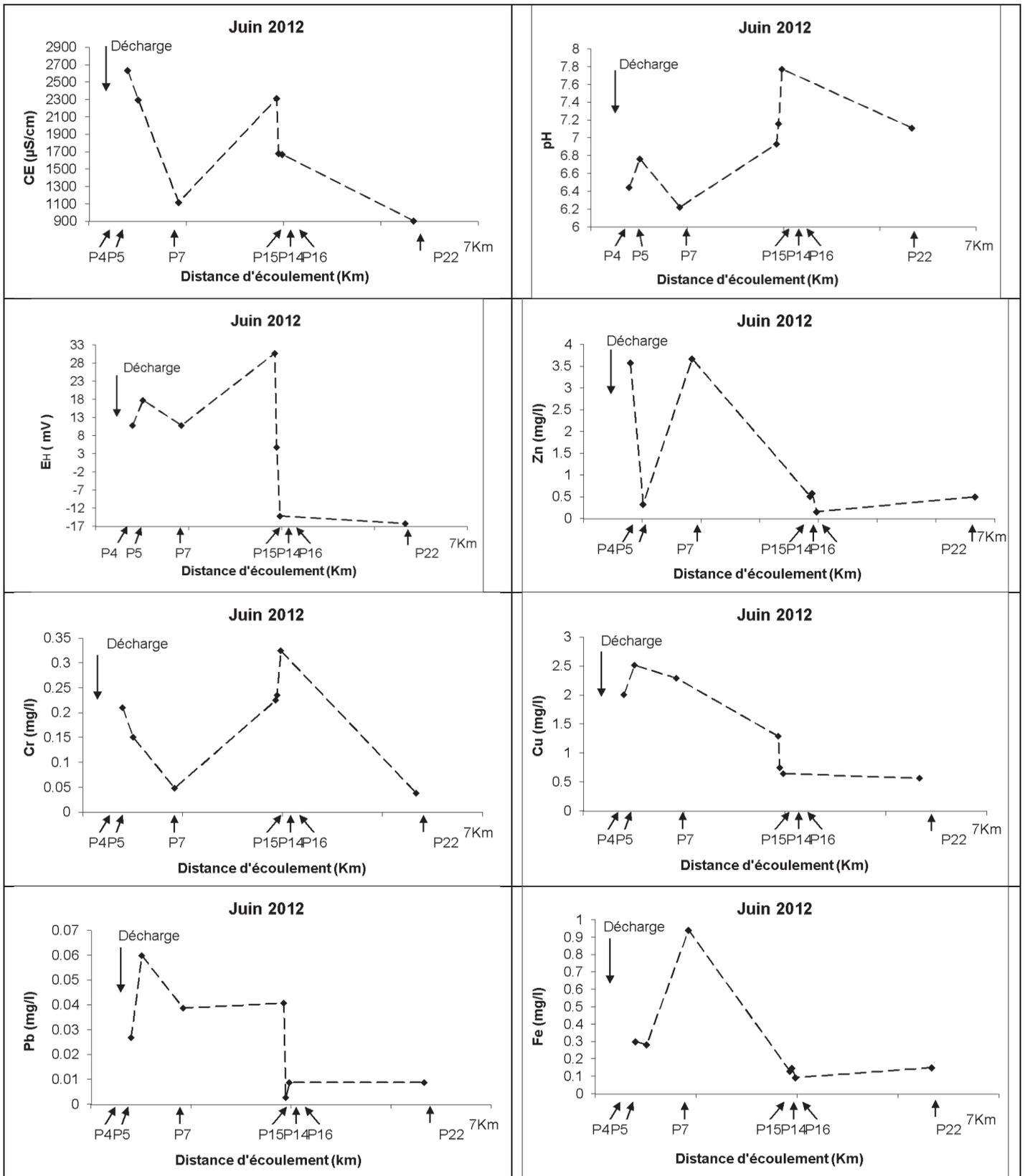
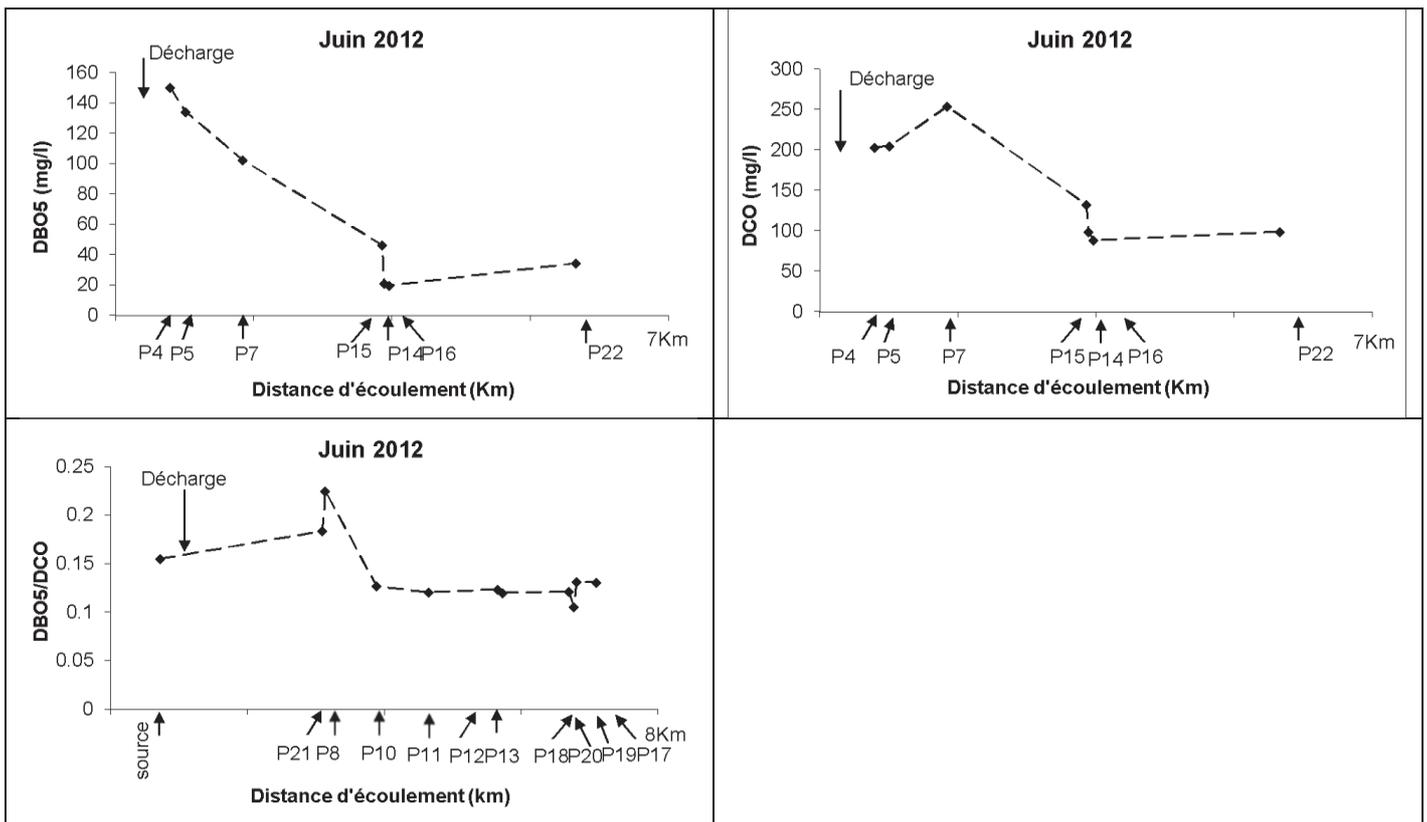


Figure 103 : Variations spatiales des différentes teneurs de la troisième campagne selon le profil N°2



**Figure 104 : Variations spatiales la pollution biochimique dans la troisième campagne selon le profil N°2**

### V. 6. Evolution temporelle

Pour caractériser l'évolution des teneurs dans le temps, nous avons choisi les points P5, P7, P14, et P17 (dans la plaine), les points Lix.1, Lix.2, Lix.3 (dans la décharge) et un point de l'Oued Gouilla. Les éléments concernés par le suivi qui a été effectué au mois d'Octobre 2005, Février 2006 et Juin 2006 sont le pH, CE, Zn, Cu, Cr, Pb et Fe.

D'une manière générale, les concentrations des métaux lourds dans les lixiviats et dans les eaux de la nappe sont variables. La concentration des métaux lourds augmente pendant la période des hautes eaux dans les lixiviats de la décharge alors que les teneurs sont relativement faibles dans les puits captant la nappe et qui sont situés plus ou moins loin de la décharge. A l'inverse, durant les basses eaux, la concentration en métaux lourds augmente dans les eaux de la nappe et diminue dans les lixiviats de la décharge, c'est l'effet de la précipitation atmosphérique.

Par conséquent, l'influence des précipitations est importante pour le transfert des polluants de la décharge vers la nappe.

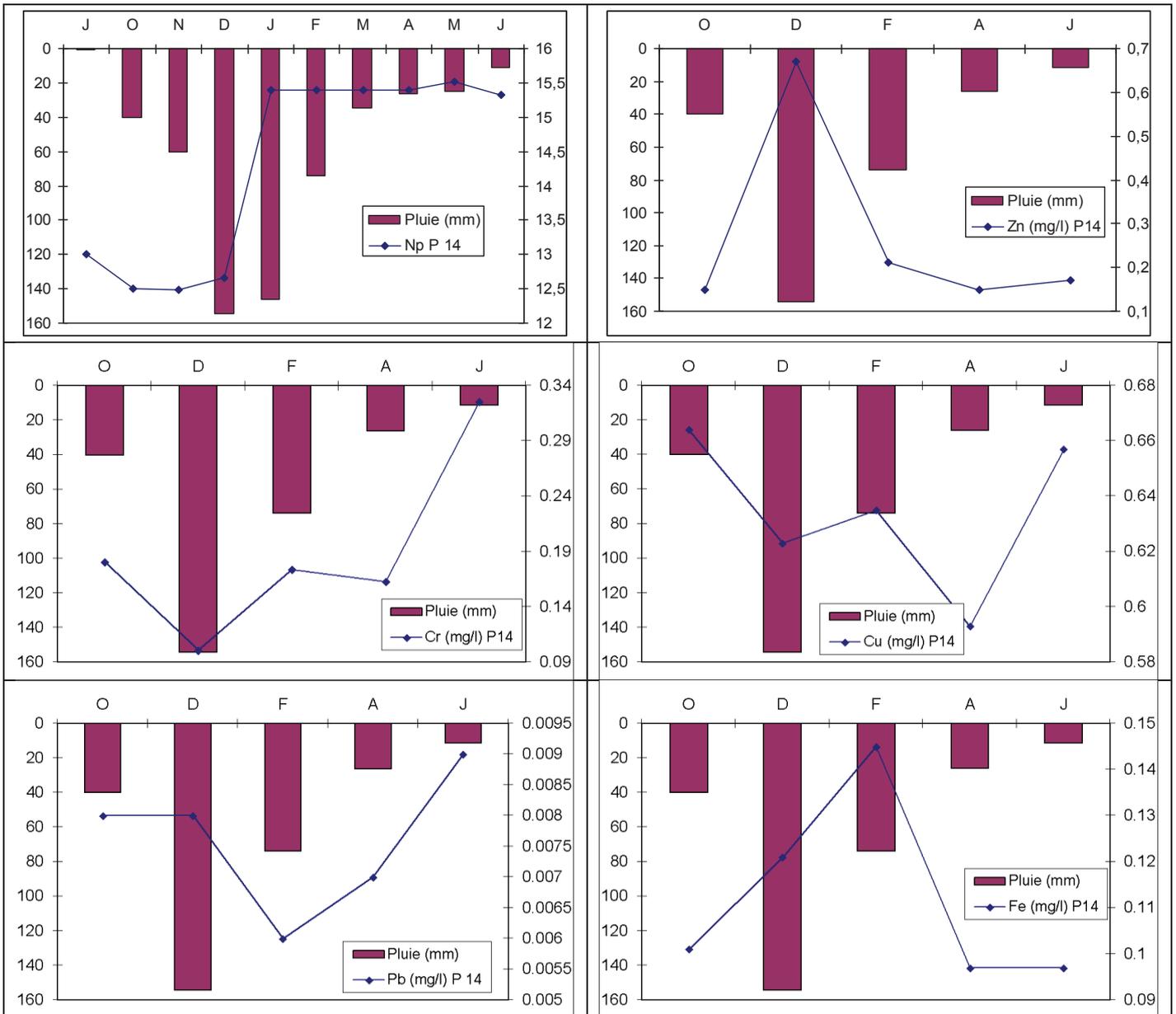


Figure 105 : Variations temporelles des teneurs en métaux lourds dans le puits P14.

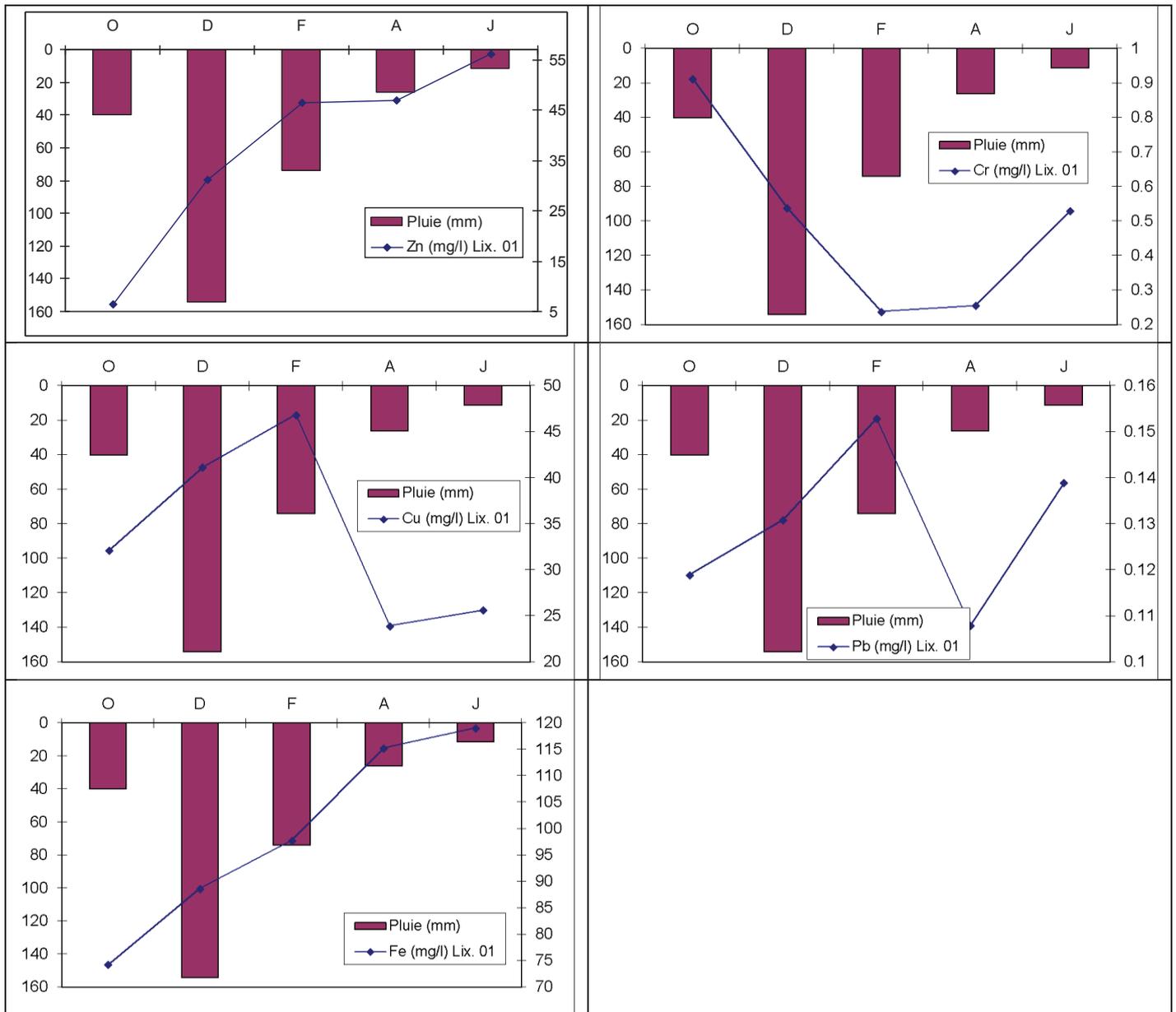


Figure 106 : Variations temporelles des teneurs en métaux lourds dans le point Lix. 1.

V. 7. Conclusion

Les lixiviats générés par l’ancienne décharge d’Annaba qui s’infiltrent dans la zone non saturée de la nappe libre de l’Oued Zied peuvent altérer la qualité des ressources en eau existantes. Le diagnostic de la pollution nous a permis de mettre en évidence la présence d’un gradient de contamination métallique amont-aval dans les eaux de la nappe. Les polluants sont présents à des concentrations d’importance variable d’un point de prélèvement à l’autre. Néanmoins, la globalité des résultats montre que les points de prélèvement situés à proximité de la décharge ont révélé une contamination significative par les métaux lourds analysés. En revanche, les points de prélèvements localisés au Nord-Ouest de la plaine, ne témoignent d’aucune pollution importante par ces métaux.

L'absence, dans la quasi-totalité des cas, de traitement préalable des rejets industriels serait en grande partie responsable de la contamination des eaux souterraines de la région, par les métaux lourds analysés. De même, les lixiviats de la décharge contribueraient à la pollution métallique, d'autant plus que l'ancienne décharge, n'est pas conçue selon les normes d'une décharge contrôlée : système d'étanchéité, collecteur des lixiviats et de biogaz.

**CHAPITRE VI :**  
**CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION**

## VI. I. Introduction

Pour cartographie la pollution métallique dans la plaine de l'Oued Zied, l'utilisation des indices de la qualité des eaux et son impact sur l'homme et l'environnement, est une approche très pratique. Cette dernière permet de faire la synthèse de données complexes de l'eau et faciliter la présentation des résultats de traitement de ces données sous forme de cartes de répartition sectorielle.

Dans ce cadre, deux méthodes sont utilisées : La première concerne l'impact direct de la décharge de Berka Zega sur les eaux ; elle se base sur l'indice de la pollution des eaux par la décharge (LWPI). La deuxième, réalisée pour l'ensemble de la plaine, consiste à l'évaluation détaillée de risque de la charge métallique (EDR) sur la santé des consommateurs de l'eau souterraine pour calculer l'indice de risque (IR).

## VI. 2. Indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI)

### VI. 2. 1. Présentation de l'indice

L'indice de la qualité de l'eau (WQI : de l'Anglais Water Quality Index) est utilisé pour déterminer l'influence d'une décharge sur la qualité de l'eau. La nouvelle formulation de cet indice est l'indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI de l'Anglais Landfill Water Pollution Index) (Gibrilla A., et al., 2011, Alobaidy AHMJ., et al., 2010). LWPI est calculé suivant l'équation ci-dessous (Talalaj IA., 2014) :

$$LWPI = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i * S_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Où, -  $w_i$  est le poids du ième polluant du lixiviat,

-  $n$  est le nombre de polluants analysés dans le lixiviat,

-  $S_i$  est le poids du sous-indice du ième polluant du lixiviat.  $S_i$  est donné par

l'Équation ci-dessous :

$$S_i = \frac{C_{pi}}{C_{bi}}$$

$C_{pi}$  est la concentration du ième paramètre dans chaque échantillon d'eau polluée et  $C_{bi}$  est la concentration du ième paramètre de l'échantillon en amont des eaux polluées (Last S., et al., 1984). Pour le pH,  $S_i$  est calculé en plaçant au dénominateur la valeur la plus petite du pH :

$$S_i = \frac{C_p}{C_b} \quad si \ C_b < C_p$$

$$S_i = \frac{C_b}{C_p} \quad si \ C_p < C_b$$

Les valeurs des poids  $W_i$  des éléments métalliques d'une décharge ont été calculées pour huit (8) paramètres selon le Ministère de la Régulation de l'Environnement concernant les décharges en Pologne (Regulation of Minister of Environment concerning landfill 2013) (Sawyer C., et al., 1967). La régulation des valeurs du poids pour analyser ces paramètres résulte des travaux et des analyses pris en considération par plusieurs auteurs (OMS., 2004, Richards LA., 1954). Le poids (de) trois (3) est affecté aux ETM parce qu'il n'y a pas fréquemment des problèmes de pollution métallique des eaux dus aux décharges (OMS., 2004, Suarez D., 2006). Le poids 2 est affecté au pH car les faibles valeurs du pH peuvent provenir d'autres sources de pollution et non de la décharge (effluents domestiques, les engrais, les cours d'eau etc.). L'interprétation des valeurs de LWPI est donnée dans le Tableau 39.

**Tableau 39 : Classes de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par les décharges (LWPI). (Last S., et al., 1993)**

LWPI	Interpretation
$LWPI \leq 0,77$	Eau non polluée
$0,77 < LWPI \leq 1,53$	Eau modérément polluée, subissant un faible impact de la décharge
$1,53 < LWPI \leq 3,83$	Eau polluée avec un impact visible de la décharge
$LWPI > 3,83$	Eau fortement polluée, fort impact de la décharge

## VI. 2. 2. Résultats obtenus

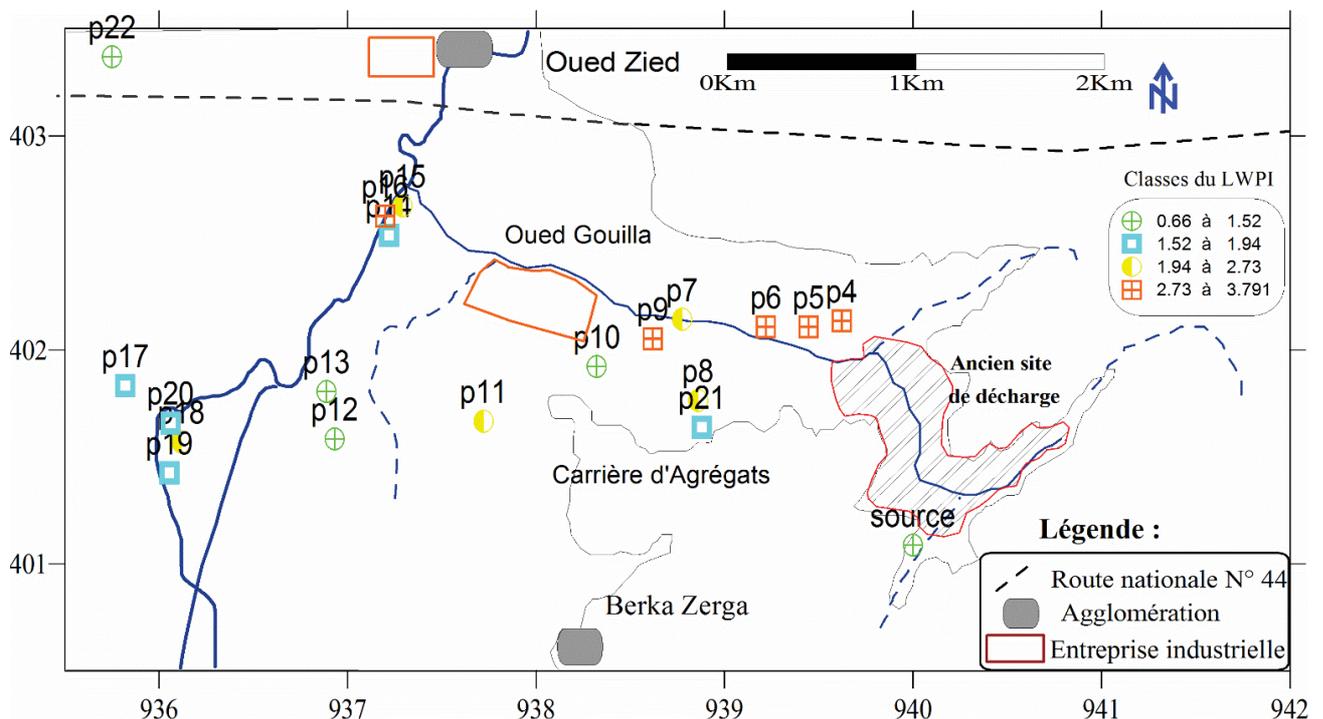
L'indice de pollution des eaux par la décharge LWPI a été déterminé dans les puits proches de la décharge et dans la plaine de l'Oued Zied (Tab.39, 40). Les points d'eau qui se situent aux alentours de l'ancienne décharge affichent des valeurs LWPI entre ( $1,53 < LWPI \leq 3,83$ ) ce qui représente un nombre de 14 échantillons et un pourcentage élevé des points analysés 70%. Ces valeurs suggèrent que les eaux sont polluées et subissent un impact significatif des lixiviats (Christensen TH., et al., 2001).

**Tableau 40 : Classification de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par la décharge de Berka Zerga (LWPI). (Last S., et al., 1993)**

LWPI	$LWPI \leq 0,77$	$0,77 < LWPI \leq 1,53$	$1,53 < LWPI \leq 3,83$	$LWPI > 3,83$
Interprétation	Eau non polluée	Eau modérément polluée, subissant un faible impact de la décharge	Eau polluée avec un impact visible de la décharge	Eau fortement polluée, fort impact de la décharge
Points	1	5	14	0
Pourcentage %	5%	25%	70%	0%

L'atténuation de l'influence du lixiviat sur les eaux des puits au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la décharge est remarquée, ce qui représente un pourcentage de 30%. Les valeurs de LWPI obtenues pour les eaux de la plaine de l'Oued Zied montre que les eaux collectées à ces puits sont modérément polluées et subissent un faible impact de la décharge ( $0,66 < LWPI \leq 1,53$ ). On note un pourcentage nul des eaux fortement polluée par les lixiviat.

La figure 107 montre la distribution spatiale des valeurs du LWPI basée sur les échantillons des eaux des puits de la plaine ainsi que les eaux de l'Oued Zied. Les résultats de l'indice démontrent que la décharge de Berka Zerga influence significativement la contamination métallique des eaux des puits échantillonnés et que cette influence s'atténue progressivement en s'éloignant de la décharge. Concernant les eaux de l'Oued Zied (P16) on remarque que malgré l'éloignement de ce point par rapport au site de la décharge, nous avons obtenu une forte valeur du LWPI, cela s'explique par le fait des percolations des eaux superficielles dans des secteurs pollués, où l'opération de saturation des eaux en éléments en traces métalliques se fait durant la période pluvieuse avec une convection directe de la charge polluante.



**Figure 107 : répartition de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par la décharge de Berka Zerga LWPI (Juin 2012).**

### **VI. 3. Utilisation de l'Indice de Risque (IR)**

#### **VI. 3. 1. Evaluation du risque (EDR) sur la santé**

La notion de risque fait appel à celle de nuisance. Une nuisance est tout ce qui fait du tort, qui agresse et qui perturbe. C'est un produit ou un phénomène susceptible d'agresser l'homme et la nature en général (la flore et la faune) et d'altérer leur équilibre.

Bien que le terme nuisance soit surtout utilisé pour les produits chimiques et certains phénomènes physiques, il est possible d'affirmer qu'une nuisance engendre un risque lorsqu'elle atteint un certain seuil insupportable par l'organisme humain.

Sur la base des résultats d'analyses de notre travail, on va essayer, d'une part, de mettre en relief la toxicité des E.T.M., d'autre part de quantifier le risque de leur pollution.

L'étude de risque a pour objectif :

- D'identifier les différents types de risques qui peuvent découler de la pollution.
- De quantifier ces risques.
- De définir les buts de réhabilitation pour mettre en conformité le site avec la réglementation sur l'environnement.
- De déterminer les actions qui vont réduire le risque pour le rendre acceptable.

#### **VI. 3. 1. La toxicité des métaux lourds**

##### **VI. 3. 1. 1. Le Chrome (Cr)**

###### **VI. 3. 1. 1. 1. Impact sur l'environnement**

Le chrome existe principalement dans la nature sous forme de dérivées. Le principal minerai est le chrome de fer ou chromite. Le chrome pur est obtenu par réaction d'aluminium et d'oxydes (III) de chrome (aluminothermie) par électrolyse ou à partir d'iodure de chrome.

Le chrome est utilisé comme catalyseur dans la synthèse de l'ammoniac, dans la fabrication d'aciers chromés, d'aciers de fabrication, d'aciers inoxydables et d'alliages ainsi que pour chromage galvanique. Des complexes organiques sont utilisés comme colorant de développement dans la photographie couleur. Les dérivées inorganiques du chrome sont utilisées comme pigments. Les sels de chrome (VI) connaissent une très large utilisation dans les produits de conservation du bois et la tannerie.

Les quantités de chrome détectées dans l'hydrosphère, la pédosphère, l'atmosphère et la biosphère sont liées pour l'essentiel à des émissions d'origine industrielle.

Les déchets contenant du chrome sont considérés comme problématiques en raison de leur comportement dans les couches profondes du sol lorsqu'ils sont stockés dans des décharges. En milieu alcalin, on estime que la stabilité des chromes peut atteindre 50 ans, et qu'ils peuvent migrer vers les nappes aquifères, même au travers des sols cohérents. La combustion des boues contenant des composants chromiques doit être évitée en raison du risque de formation de chromâtes.

#### **VI. 3. 1. 1. 2. Impact sur la santé**

Il existe deux formes du chrome (trivalent et hexavalent). Le chrome métal et le chrome trivalent ne sont pas toxiques. Le chrome hexavalent qui entraîne des inflammations muqueuses et des ulcères est cancérigène. On note également le risque de cancer important pour les embryons et les fœtus concernant le chrome VI. Les intoxications chromiques peuvent entraîner des altérations du tube gastro-intestinal. Le composé peut s'accumuler dans le foie, les reins, la glande thyroïde et dans la moelle osseuse.

#### **VI. 3. 1. 2. Le Plomb (Pb)**

Le plomb est un élément chimique dense et ductile. Il est généralement associé au zinc dont le minerai est appelé « galène ».

D'importantes quantités du plomb sont utilisées dans les batteries et dans les gaines des câbles électriques, ainsi que dans l'industrie pour garnir les conduites, les réservoirs et les dispositifs à rayons X. Il est utilisé aussi comme adjuvant dans les essences.

##### **VI. 3. 1. 2. 1 Impact sur la santé**

Le plomb est introduit dans le corps sous quelques formes reste très toxique. Ses effets se font généralement sentir après une période d'accumulation du métal dans l'organisme.

Les enfants sont particulièrement exposés à l'intoxication, même pour des concentrations minimales, le plomb peut retarder le développement moteur, altérer la mémoire et provoquer des problèmes d'audition et des troubles de l'équilibre. L'empoisonnement par le plomb se manifeste par l'anémie, la faiblesse, la constipation, la colique et la paralysie, en particulier des poignets et des chevilles.

#### **VI. 3. 1. 3. Le Fer total (Fe)**

Le fer est le métal le plus largement utilisé par l'industrie métallurgique (fontes, aciers,...).

**VI. 3. 1. 3. 1. Impact sur l'environnement**

Dans l'eau, le fer est présent avec une concentration très faible qui peut être augmentée suite au lessivage des terrains riches en fer ou à cause d'une pollution industrielle. Le fer se trouve dans l'eau sous une forme dissoute ou en solution colloïdale. Cet élément présente un danger de toxicité assez modéré pour la vie aquatique. Cette toxicité est difficile à préciser car elle est fonction de l'état chimique du métal et de la présence du précipité de l'hydroxyde de fer qui tend à se déposer sur les branchies des poissons et entraîner leur colmatage.

**VI. 3. 1. 3. 2. Impact sur la santé**

L'ingestion d'une forte dose d'un sel de fer peut produire une intense altération des muqueuses digestives se traduisant par des douleurs abdominales, de vomissement et une diarrhée souvent sanglante. Les intoxications sévères peuvent entraîner des complications hémorragiques, des brûlures chimiques de tube digestif pouvant conduire à la mort.

**VI. 3. 1. 4. Le Cuivre (Cu)**

C'est un métal mou et ductile de couleur rouge caractéristique. Il existe dans la nature à l'état pur ou combiné à différents éléments notamment au Soufre. Il est largement utilisé en plomberie et dans l'industrie électrique.

**VI. 3. 1. 4. 1. Impact sur l'environnement**

Concernant les végétaux, une forte dose de cuivre provoque des lésions réticulaires des racines et formation de nombreuses radicules brunâtres. Le cuivre s'accumule dans les parois cellulaires.

Pour les poissons, l'effet toxique du cuivre est très remarquable, il provoque une altération des branchies des poissons et retarde la ponte de ces derniers.

**VI. 3. 1. 4. 2. Impact sur la santé**

Le cuivre est un élément essentiel pour l'homme. Cependant, de très grosses doses peuvent avoir des effets sur la santé. Une exposition à long terme à des poussières de cuivre peut irriter les sinus, la bouche et les yeux et entraîner des maux de tête, des nausées et des diarrhées. Il peut aussi entraîner des dégâts au niveau du foie et des reins, voir même un décès. L'intoxication chronique est marquée par un amaigrissement et des difficultés respiratoires surtout pour les enfants en bas âge.

**VI. 3. 1. 5. Le Nickel (Ni)**

Le nickel est un métal de couleur blanche argentée, malléable et ductile, son utilisation est très diverse : pièces de monnaie, automobiles, aviations,... etc.

**VI. 3. 1. 5. 1. Impact sur l'environnement**

Le nickel est un oligo-élément important pour la croissance des plantes. La présence du nickel est influencée par la présence d'autres éléments. Ainsi, la présence simultanée de cuivre, de zinc et de nickel aurait pour effet d'accroître la toxicité aigüe vis-à-vis de certains poissons (truite arc en ciel).

**VI. 3. 1. 5. 2. Impact sur la santé**

L'exposition répétée aux dérivées inorganiques du nickel peut produire une irritation des voies respiratoires (des rhinites et ulcérations de la cloison nasale, bronchite chronique,... etc).

Les dermatoses allergiques au nickel sont très fréquentes chez les ouvriers exposés (Eczéma de contact). Certains sels de nickel sont irritants pour la peau.

Une longue exposition au nickel peut provoquer des atteints et le cancer des poumons. Le nickel est très toxique par ingestion et peut induire de graves maladies digestives.

**VI. 3. 1. 6. Le Zinc (Zn)**

Le zinc est une substance très commune qui est présent naturellement dans l'air, l'eau et le sol, c'est un élément essentiel (à faibles doses) pour l'organisme humain.

**VI. 3. 1. 6. 1. Impact sur l'environnement**

Le zinc en fortes concentrations dans un sol, seul un nombre limité de plantes a des chances de survivre. C'est pourquoi il n'y a pas beaucoup de diversité des plantes près des usines manipulant du zinc. Du fait de ces effets sur les plantes le zinc est une sérieuse menace pour la production des terres agricoles. Enfin le zinc peut interrompre l'activité du sol, car il a une influence négative sur l'activité des micro-organismes et les vers de terre. De ce fait, La décomposition de la matière organique peut être sérieusement ralentie.

**VI. 3. 1. 6. 2. Impact sur la santé**

Le zinc est un élément essentiel pour la santé de l'homme. Lorsqu'on absorbe trop peu de zinc on peut alors avoir une perte de l'appétit, une diminution des sensations de goût et d'odeur, les blessures cicatrisent lentement et on peut avoir des plaies. Les carences en zinc

peuvent aussi provoquer des problèmes lors des naissances. Trop de zinc peut tout de même provoquer des problèmes de santé importants, comme des crampes d'estomac; des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie.

### VI. 3. 2. Evaluation des risques des métaux lourds sur la santé

L'étude des risques est basée sur les étapes suivantes :

- ◆ Définition des concentrations d'exposition.
- ◆ Estimation des doses journalières d'exposition (DJE).

#### VI. 3. 2. 1. Définition des concentrations d'exposition

La première phase de l'analyse des risques consiste à l'estimation des concentrations en polluants présents dans l'environnement aux différents points d'exposition. Dans le cadre de cette étude, les concentrations employées pour l'estimation des risques sont les concentrations des métaux lourds (chrome, plomb, fer total, cuivre et nickel) observés dans les secteurs étudiés.

#### VI. 3. 2. 2. Estimation des doses d'exposition

Après l'estimation des concentrations des métaux lourds, l'analyse des risques s'appuie sur l'estimation des doses d'exposition des individus à ces métaux.

##### VI. 3. 2. 2. 1. Dose journalière d'exposition (DJE) : Est donnée par la relation suivante

La dose journalière d'exposition est la dose de substance reçue par l'organisme rapportée au poids de l'individu et au nombre des jours d'exposition. Elle a pour but de définir une quantité de polluant administrée, exprimée en mg/kg/j. Le calcul de la DJE pour les différents scénarios se déroule toujours en appliquant des équations adaptées pour chacune des voies d'exposition. Les équations se présentent de la manière suivante :

$$DJE = \frac{C \times Q \times F_{sp} \times De \times Fe}{P \times T}$$

Tel Que :

**DJE** : Dose journalière d'exposition (mg/kg/j). **C** : Concentration dans le milieu d'exposition (mg/ kg). **Q** : Quantité ingérée (kg). **F<sub>sp</sub>** : Facteur d'absorption. **De** : Durée d'exposition (années). **Fe** : Fréquence d'exposition (j/an). **P** : Poids de l'individu (Kg).

**T** : Période du temps sur laquelle l'exposition est moyennée (j).

### VI. 3. 2. 2. 2. DJE pour le contact dermique avec le sol

L'équation utilisée pour le calcul de la dose journalière d'exposition due au contact dermique est basée sur des hypothèses de fraction de peau exposée, de la fraction du sol qui adhère à la peau et des propriétés de la peau à absorber le composant chimique.

La DJE pour la voie d'exposition par contact dermique est estimée par l'équation suivante :

$$DJE = \frac{Cs \times Sa \times Fs \times SL \times 0.000001 \times EF \times Z}{Bw \times 365}$$

Tel que :

**DJE** : Dose journalière exposée. **Cs** : Concentration du composé dans le sol (mg/kg). **Sa** : Surface de peau (cm<sup>2</sup>). **Fs** : Facteur d'adsorption. **SL** : Facteur climatique (sans dimension). **EF** : Fréquence d'exposition (j/an). **Z** : Poids du corps (Kg). **Bw** : Fraction de peau exposée.

### VI. 3. 2. 2. 3. Dose journalière acceptable (DJA)

La dose journalière acceptable présente la quantité de substance chimique que peut ingérer un homme par jour au cours de sa vie sans aucun risque appréciable pour sa santé.

### VI. 3. 3. Estimation du risque

L'estimation du risque est différente en fonction de la substance qui est cancérigène ou non cancérigène.

#### VI. 3. 3. 1. Estimation du risque non cancérigène

L'estimation du risque non cancérigène est exprimée par le rapport entre la dose journalière d'exposition (DJE) et la dose journalière acceptable (DJA).

Le rapport est appelé indice de risque (IR) :

$$IR = \frac{DJE}{DJA}$$

Si « IR » est inférieur à 1, alors le risque toxique est considéré comme acceptable.

#### VI. 3. 3. 2. Estimation du risque cancérigène

L'introduction des données dans le logiciel risk4 nous a permis de dégager les observations suivantes:

Le risque cancérigène est estimé par la notion d'excès de risque individuel (ERI) qui est obtenu par multiplication de la dose journalière d'exposition par l'excès de risque unitaire (ERU); soit une probabilité d'attraper un cancer de 1 sur 1 million comme niveau de risque

certainement acceptable. Si par contre la valeur atteint  $10^{-4}$ , le risque sera considéré comme certainement inacceptable en terme de santé publique.

Dans ce travail, en fonction de la disponibilité de données, nous avons pris en considération le scénario de l'usage eaux souterraines pour les populations des agglomérations urbaines de l'Oued Zied et de Berka Zerga.

Les résultats obtenus par le logiciel RISK4 sur les deux catégories de la société (adultes et enfants) sont illustrés dans le tableau N°41 et les histogrammes (Fig.108 et Fig.109), ainsi les cartes des risques qui correspondent à chaque secteur (Fig.110 et Fig.111).

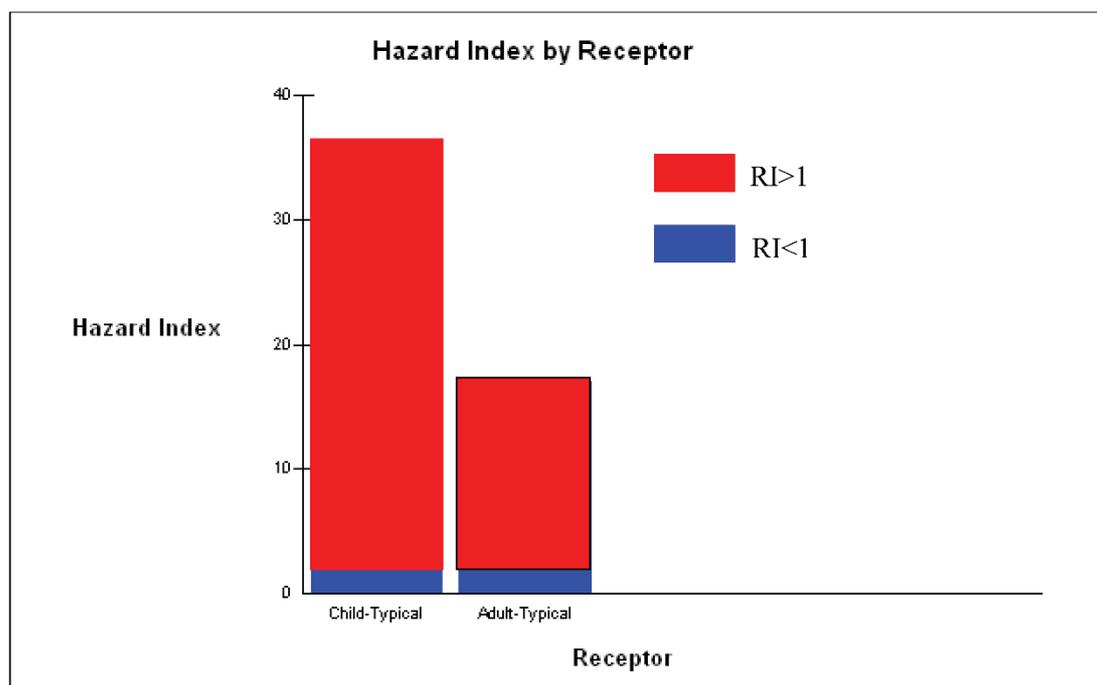
**Tableau 41 : Indice du risque total pour l'usage des eaux souterraines (plaine de l'Oued Zied et La décharge de Berka Zerga), Juin 2012.**

point d'eau	Indice du Risque							
	Cr		Pb		Cu		Zn	
	enfant	adulte	enfant	adulte	enfant	adulte	enfant	adulte
P4	$2.2 \cdot 10^{+1}$	$1.1 \cdot 10^{+1}$	2.5	1.2	$1.7 \cdot 10^{+1}$	8.2	$5.2 \cdot 10^{-1}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$
P5	$1.6 \cdot 10^{+1}$	7.6	5.3	2.5	$2.2 \cdot 10^{+1}$	$1 \cdot 10^{+1}$	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
P6	6.6	3.1	/	/	$1.4 \cdot 10^{+1}$	6.6	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$
P7	$2.4 \cdot 10^{+1}$	$1.1 \cdot 10^{+1}$	3.6	1.7	$1.2 \cdot 10^{+1}$	5.8	$4.8 \cdot 10^{-2}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$
P8	$2.3 \cdot 10^{+1}$	$1.1 \cdot 10^{+1}$	3.8	1.8	6.1	2.9	$3.9 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$
P9	2.1	1.0	2.6	1.2	7	3.3	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
P10	$1.5 \cdot 10^{+1}$	7.1	$9.8 \cdot 10^{-1}$	$4.6 \cdot 10^{-1}$	6.5	3.0	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$8.6 \cdot 10^{-2}$
P11	$1.5 \cdot 10^{+1}$	7.1	1.2	$5.4 \cdot 10^{-1}$	4.7	2.2	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
P12	$1.4 \cdot 10^{+1}$	6.8	1.1	$5 \cdot 10^{-1}$	5.4	2.5	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$5.2 \cdot 10^{-2}$
P13	$2.6 \cdot 10^{+1}$	$1.2 \cdot 10^{+1}$	1.1	$5 \cdot 10^{-1}$	4.4	2.1	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
P14	$3.6 \cdot 10^{+1}$	$1.7 \cdot 10^{+1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	$3.8 \cdot 10^{-1}$	5.5	2.6	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
P15	$2.6 \cdot 10^{+1}$	$1.2 \cdot 10^{+1}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	6.5	3.1	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
P16	5.5	2.6	7.2	3.4	6.1	2.9	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
P17	$3.6 \cdot 10^{+1}$	$1.7 \cdot 10^{+1}$	$8.9 \cdot 10^{-1}$	$4.2 \cdot 10^{-1}$	4.0	1.9	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
P18	$3.3 \cdot 10^{+1}$	$1.6 \cdot 10^{+1}$	1.6	$7.5 \cdot 10^{-1}$	4.3	2.0	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
P19	$2.5 \cdot 10^{+1}$	$1.2 \cdot 10^{+1}$	1.6	$7.5 \cdot 10^{-1}$	5.2	2.5	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
P20	$3.4 \cdot 10^{+1}$	$1.6 \cdot 10^{+1}$	1.5	$7.1 \cdot 10^{-1}$	4.3	2.0	$2.2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
P21	$2.8 \cdot 10^{+1}$	$1.3 \cdot 10^{+1}$	7.9	3.7	6.1	2.9	$1.9 \cdot 10^{-1}$	$8.6 \cdot 10^{-2}$
P22	/	/	$8 \cdot 10^{-1}$	$3.8 \cdot 10^{-1}$	4.3	2.0	$2.2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Lix1	$5.6 \cdot 10^{+1}$	$2.6 \cdot 10^{+1}$	$1.2 \cdot 10^{+1}$	5.9	$2.3 \cdot 10^{+2}$	$1.1 \cdot 10^{+2}$	$8.2 \cdot 10^{-2}$	$3.8 \cdot 10^{-2}$
Lix2	$3.7 \cdot 10^{+1}$	$1.8 \cdot 10^{+1}$	$1.2 \cdot 10^{+1}$	5.5	$2.6 \cdot 10^{+2}$	$1.2 \cdot 10^{+2}$	4.5	2.1
Lix3	$3.6 \cdot 10^{+1}$	$1.7 \cdot 10^{+1}$	$1.1 \cdot 10^{+1}$	5.1	$2.4 \cdot 10^{+2}$	$1.1 \cdot 10^{+2}$	5.3	2.5

L'évaluation du risque des éléments chimiques dans la plaine de l'Oued Zied montre un IR pour le chrome et pour le cuivre qui dépasse largement le seuil toléré. Le puits P17 présente un risque avec une moyenne d'IR de l'ordre de 36 et 17 respectivement pour l'enfant et l'adulte (Fig.108).

Cependant pour le plomb, il est souvent inacceptable sauf aux puits (P10, P14, P15, P17 et P21). Il faut signaler que l'IR est inacceptable chez l'enfant et acceptable chez l'adulte au niveau des puits (P10, P11, P12, P13, P14, P17, P18, P19, P20 et P22).

L'IR pour l'élément zinc est tolérable dans tous les points pour les deux catégories de la population étudié.



**Figure 108 : Indice du risque total du Cr dans la plaine de L'Oued Zied, Juin 2012.**

A la proximité de la décharge de Berka Zerga, L'IR est mesuré pour les lixiviats de la décharge en trois points d'exposition. Les valeurs de l'IR enregistrées sont énormément supérieures à la norme tolérable à l'exception du zinc où nous avons marqué un IR acceptable pour les deux catégories (adulte et enfant) pour le scénario étudié (Tab.42).

**Tableau 42 : Indice du risque total pour les Lixiviats (Décharge de Berka Zerga), Juin 2012.**

Actives N.	Enfant	Moy.	Min.	Max.	Ecart-type	Adulte	Moy.	Min.	Max.	Ecart-type
3	<b>Cr</b>	43.00	36.00	56.00	11.27	<b>Cr</b>	20.33	17.00	26.00	4.93
3	<b>Pb</b>	11.67	11.00	12.00	0.58	<b>Pb</b>	5.50	5.10	5.90	0.40
3	<b>Cu</b>	243.33	230.00	260.00	15.28	<b>Cu</b>	113.33	110.00	120.00	5.77
3	<b>Zn</b>	3.29	0.08	5.30	2.81	<b>Zn</b>	1.55	0.04	2.50	1.32

Ces forts indices confirment bien l'importante contamination des eaux par ces éléments toxiques. Le lixiviat Lix2 montre l'indice du risque le plus fort de l'ordre de 260 et 120 respectivement, pour l'enfant et l'adulte, autrement dit ce point est le plus exposé au risque de pollution (Fig.109).

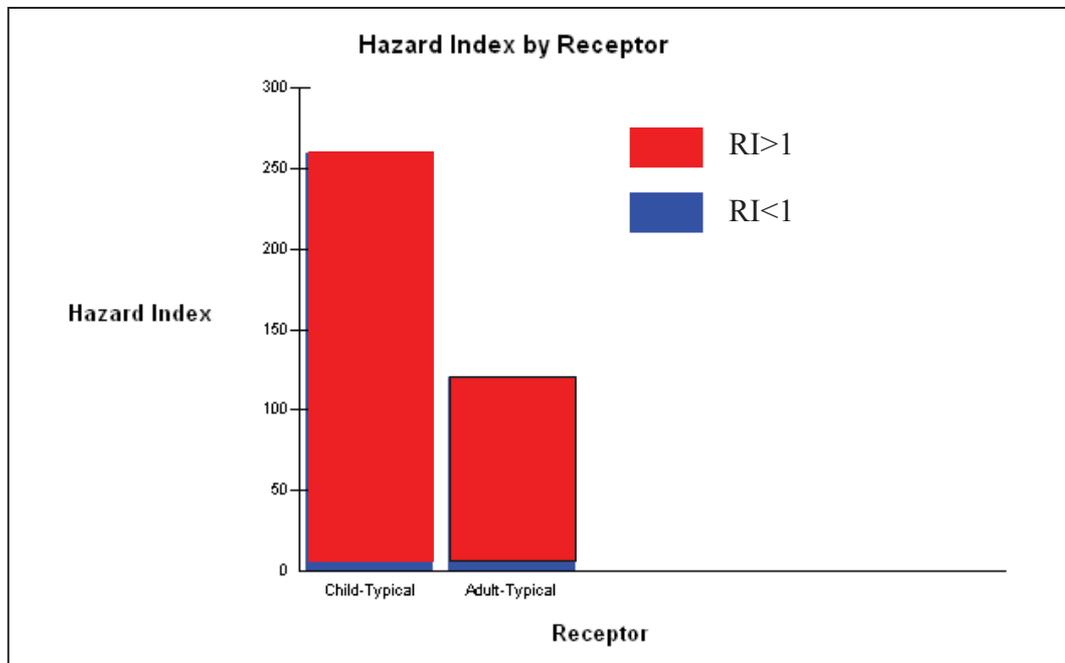


Figure 109 : Indice du risque total du Cu dans la décharge de Berka Zerga, Juin 2012.

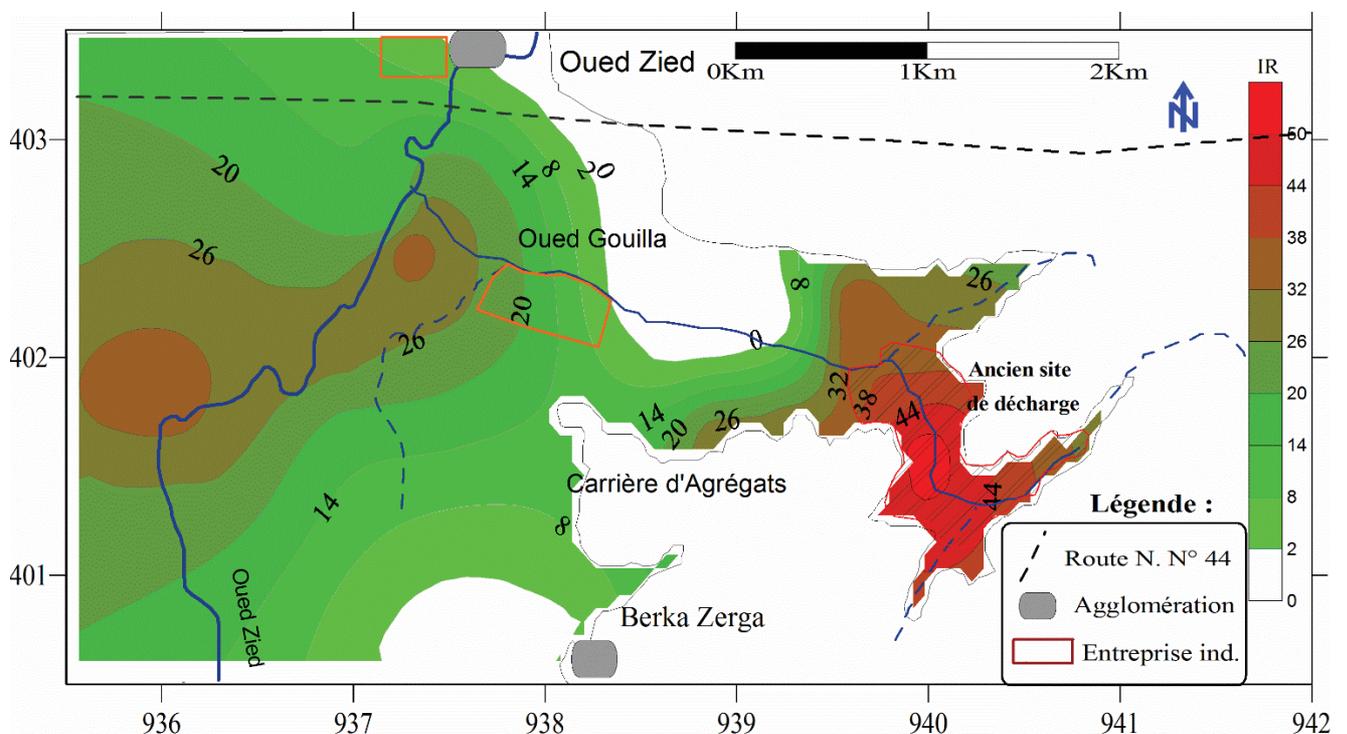
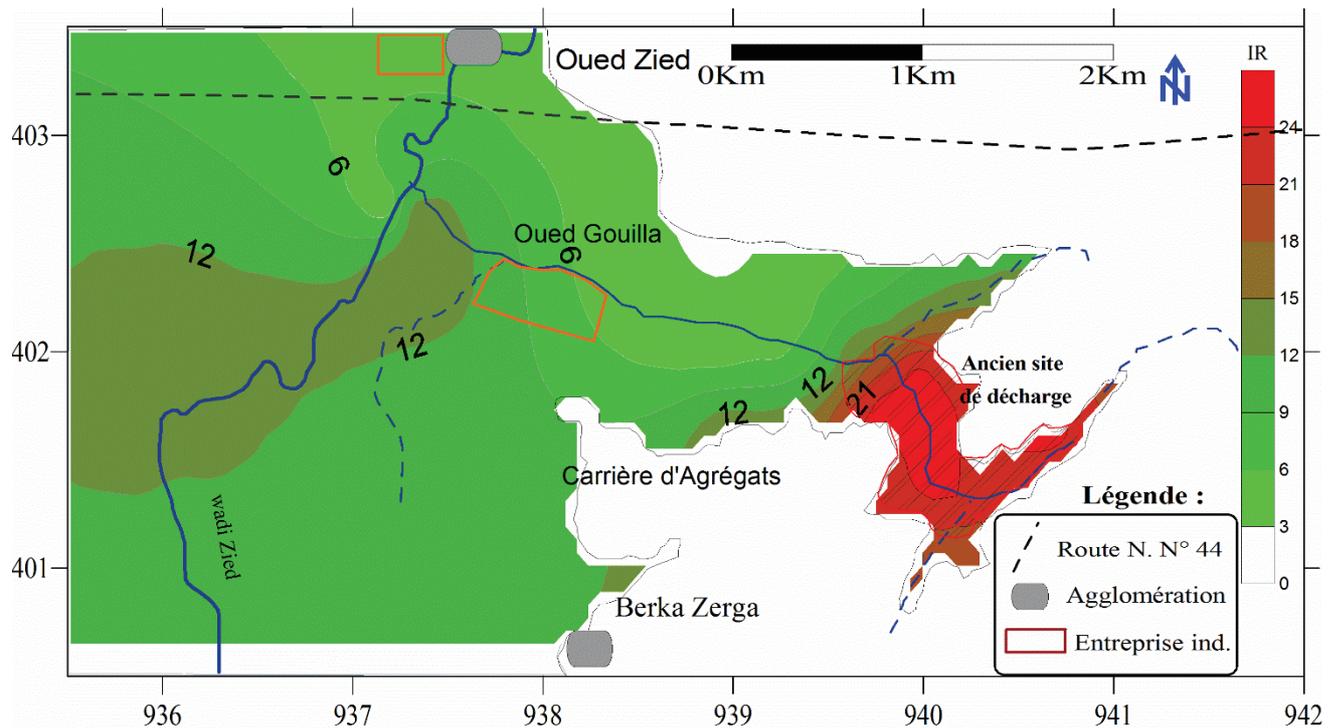


Figure 110 : Carte de L'IR du Cr pour l'enfant (plaine de l'Oued Zied), Juin 2012.



**Figure 111 : Carte de L'IR du Cr pour l'adulte (plaine de l'Oued Zied), Juin 2012.**

Les cartes (Fig.110 et Fig.111) montrent que les eaux souterraines de la plaine de l'oued Zied sont exposées au risque de contamination cancérigène par les métaux lourds et plus particulièrement, par l'élément chrome. Au niveau de la plaine hors du site de la décharge, On constate que L'IR augmente dans le sens d'écoulement des Oueds (Oued Gouilla et Oued Zied), il devient important après leur confluence (34 pour l'enfant et 12 pour l'adulte) dans la partie Ouest près du lac Fetzara (effet de la stagnation). Par contre et dans le secteur Est et à proximité de la décharge publique, le secteur est considéré comme le plus pollué, l'IR des lixiviats représente le risque maximum (50 pour l'enfant et 24 pour l'adulte) prouvant ainsi le risque considérable engendré par ces eaux fortement chargées par les éléments en traces métalliques.

#### VI. 4. Conclusion

Les valeurs calculées de l'indice de pollution des eaux par les lixiviats (LWPI) montrent que les points d'eau situés en aval de l'ancienne décharge sont fortement pollués, tandis que les eaux souterraines de la plaine de l'Oued Zied sont modérément contaminées et présentant un impact peu significatif de ( $0,66 < LWPI \leq 1,53$ ). Nous notons que l'LWPI est un outil d'identification des dangers. L'utilisation du LWPI devrait tenir compte d'autres facteurs tels que la quantité des lixiviats générés, les périodes d'exposition, la profondeur de l'aquifère, le type de sol, la population affectée, etc.

Le traitement des données des éléments chimiques (métaux lourds) par le logiciel RISK4, montre qu'au niveau de la plaine de l'Oued Zied, L'IR est inacceptable pour les deux catégories (enfant, adulte) dans le cas du chrome et du cuivre. Cependant pour le plomb, il est inacceptable pour l'enfant et acceptable pour l'adulte dans certains puits. Dans le cas du zinc, l'indice du risque ne pose aucun danger. A l'inverse de tous les secteurs étudiés, celui de la décharge de Berka Zerga pose un vrai risque pour les deux catégories.

**CHAPITRE VII :**  
**MODELISATION GEOSTATISTIQUE DE**  
**LA POLLUTION METALLIQUE**

### VII. 1. Introduction

Le suivi et l'estimation du degré de pollution des eaux par les différents contaminants rend nécessaire l'analyse et l'exploitation et le traitement des données géologiques, hydrogéochimiques et hydrodynamiques. A partir de la bibliographie récente, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'estimation et la cartographie de la pollution des eaux souterraines, tels que ; l'apport des profils des variations des concentrations. L'analyse de données multivariées (Analyse en Composante Principale) et l'estimation géostatistique. Ces techniques vont être appliquées sur les données des campagnes d'analyses chimiques. Nous présentons ici, une synthèse sur les méthodes utilisées :

### VII. 2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en composante principale (ACP) est l'une des plus anciennes méthodes de l'analyse factorielle. Elle est utilisée pour l'analyse des données qui sont représentées sous formes de tableaux de  $n$  individus et  $p$  variables. En présence d'un nuage de points des variables dans un espace à  $n$  dimensions, on cherchera à saisir et comprendre la dispersion des points c'est-à-dire la signification des différents allongements des nuages de points. L'ACP peut s'utiliser dans des situations nombreuses et variées pour savoir comment se structurer les variables, quelles sont celles qui sont associée, quelles sont celles qui ne le sont pas, quelles sont celles qui «vont dans le même sens», quelles sont celles qui s'opposent. L'ACP permettra de regrouper selon les mêmes facteurs les échantillons présentant des caractères d'origine ou d'évolution similaire. L'ACP permettra de distinguer les associations entre les différents éléments métalliques responsables à la pollution de la nappe, et de déterminer les principaux facteurs agissants sur ses éléments. Le facteur qui présente le maximum d'inertie (I) (maximum de dispersion de l'information), est alors choisi pour le calcul de ses individus.

Dans notre étude, l'ACP a été employé pour déterminer le facteur qui contrôle l'ensemble des variables responsables à la pollution métallique (Belkhiri L., et al., 2015). Les scores factoriels des individus sur ce facteur vont être calculés, donc, chaque score factoriel d'un individu va présenter une composante multivariable reflétant un degrés de la pollution. La cartographie géostatistique plus tard sera faite sur ces scores factoriels. Cette technique a été employée également dans le domaine pétrolier pour la caractérisation pétrophysiques des réservoirs pétroliers (Souadnia,S., et al., 2017).

Cependant cette application dans le domaine hydrogéologique ouvre une fenêtre pour une cartographie multivariable du degré de pollution en tenant compte des composantes de la pollution issues de l'ACP.

### **VII. 3. La cartographie krigéante (méthode géostatistique)**

Le néologisme "géostatistique" a été inventé par Georges Matheron en 1962. Le préfixe "géo" fait référence au domaine des sciences de la terre, qui est historiquement celui où la géostatistique s'est développée. Les champs d'application actuels concernent des domaines très variés (géologie minière, hydrogéologie, climatologie, sciences sociales, ... etc.).

La désinence "statistique" se réfère à l'utilisation de méthodes probabilistes. L'originalité de la géostatistique par rapport à la statistique classique est la prise en compte de la dépendance entre les observations lorsque celles-ci sont situées dans l'espace. Toutefois, les méthodes géostatistiques ne sont pas exclusivement probabilistes : il existe une branche, connue sous le nom de "géostatistique transitive", qui ne fait pas appel au concept des processus aléatoires (Xavier Emery, 2001).

La géostatistique est connue depuis près de 40 ans dans les mines d'or du Witwatersrand où Daniel Krige proposa une correction statistique à la manière traditionnelle d'estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'un nombre limité d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. La théorie était formulée 10 ans plus tard par Georges Matheron (1971), qui introduisit un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé " le variogramme " et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelée " le krigeage ".

L'avenir de la géostatistique semble brillant. Avec toutes les expériences et les développements des trente dernières années, la géostatistique est devenue une alternative possible aux méthodes géométriques traditionnelles de l'estimation des nappes. D'autres disciplines qui utilisent des données distribuées spatialement (Eau, environnement, hydrologie, hydrogéologie, océanographie) ont commencé à l'adopter.

#### **VII. 3. 1. Notions de la géostatistique**

Matheron (1971), définit la géostatistique de la façon suivante : "la géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des

phénomènes naturels". Une fonction aléatoire (F.A)  $Z(x)$  est un ensemble de variable aléatoire  $Z(x_i)$ , définie en chaque point  $x_i$  du gisement  $G$ :

$$Z(x) = \{Z(x_i), \forall x_i \in G\}$$

Un phénomène minéralisé peut être caractérisé par la répartition dans l'espace d'un certain nombre de grandeurs mesurables, que nous appelons "variables régionalisées"(V.R).

Ces variables ont une structure d'auto-corrélation qui dépend du module et de la direction du vecteur séparant deux points de mesure. Mathématiquement, une variable régionalisée est une fonction du point  $x$ . Cette fonction est généralement irrégulière et montre deux aspects complémentaires (Matheron G., 1973).

- Un aspect aléatoire qui explique les irrégularités locales ;
- Un aspect structuré qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle.

Si au point  $x_i$  de l'espace, la V.R  $z(x_i)$  est considéré comme valeur unique (valeur vraie) alors la géostatistique étudiera la corrélation spatiale de la V.R et la structure de cette variable dans l'espace. C'est la **géostatistique transitive** (Chauvet, 1999).

Le choix constitutif, de la géostatistique minière consiste à interpréter chaque valeur de la variable régionalisée  $z(x)$ , comme une réalisation particulière d'une variable aléatoire  $Z(x_i)$  implanté au point  $x_i$ , donc plusieurs réalisations sont possibles. C'est la **géostatistique intrinsèque**.

Ce choix constitutif fondamental conduit à des solutions cohérentes et acceptables pour divers problèmes pratiques miniers posés, tel que le problème de l'estimation des réserves locales et récupérables (Belkhiri L., 2017).

### VII. 3. 2. Variogramme

Soit deux variables aléatoire,  $z(x)$  et  $z(x+h)$  mesurées en 2 points " $x$ " et " $x+h$ " (Fig. 112), la variabilité entre ces deux points (Fig.112) se caractérise par une fonction notée  $2\gamma(x, h)$  appelée variogramme (Journel et Huijbregts, 1978).



Figure 112 : Représentation schématique des points de mesure de la variable.

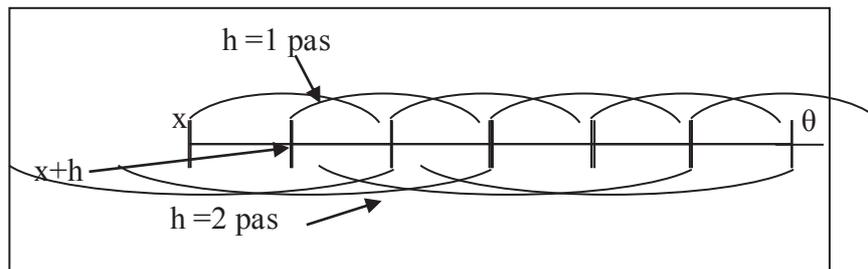
Le variogramme théorique est défini comme étant l'espérance quadratique de la variable aléatoire  $[z(x) - z(x+h)]$  soit:

$$E = \left\{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \right\} = 2\gamma(x, h)$$

En général, le variogramme  $\gamma(x,h)$  (ou semi-variogramme) est une fonction à la fois du point  $x$  et du vecteur  $h$  (Fig. 113) mais l'estimation de ce variogramme nécessite plusieurs réalisations, or en pratique on ne dispose que d'une seule réalisation, soit le couple  $[z(x) , z(x+h)]$  de mesure effectuées aux points  $x$  et  $x+h$ , d'où l'introduction de l'hypothèse intrinsèque: le variogramme ne dépend que du vecteur  $h$  en module et en direction et non du point  $x$ . En admettant cette hypothèse, le variogramme sera estimé par la formule :

$$2\gamma(h, \theta) = \frac{1}{N(h, \theta)} \sum_{i=1}^{N(h, \theta)} [z_i(x) - z_i(x+h)]^2$$

Où  $N(h, \theta)$  est le nombre de couples  $[z(x), z(x+h)]$  séparé par une distance  $h$  suivant une direction  $\theta$ . Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme graphique (Fig.114).



**Figure 113 : Estimation du variogramme.**

**a) Propriétés du variogramme directionnel**

On fixe une direction en partant de l'origine  $h = 0, \gamma(x, h) = 0$ , en général le variogramme croît avec le module du vecteur  $h$ . Cette croissance caractérise le degré de continuité de la variable étudiée (Fig.114).

Généralement, la stabilisation du variogramme est marquée au delà d'une certaine valeur de  $h$  notée  $a$  et appelée portée du variogramme. Ce dernier reste inchangé au-delà de  $h = a$  et ne dépend plus de l'inter-distance entre les valeurs : les mesures ne sont plus corrélées. La portée " $a$ " donne alors un sens à la notion de zone d'influence d'un échantillon ou d'un sondage. Cette portée n'est pas forcément la même dans toutes les directions de l'espace. Elle permet donc de détecter une éventuelle anisotropie ou isotropie dans la structure de la minéralisation.

Le variogramme croît jusqu'à une certaine limite appelé palier puis s'aplatit, mais il peut également croître indéfiniment (effet de dérive).

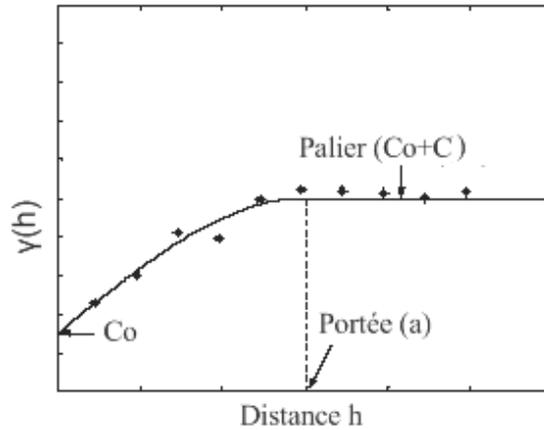


Figure 114 : Représentation graphique du variogramme.

**b) Schéma théorique et ajustement des variogrammes**

Une fois le variogramme expérimental est calculé, il faut alors déterminer un modèle mathématique qui lui correspond et qui doit être opérationnel et simple à l'emploi : C'est l'ajustement du variogramme expérimental. Les schémas théoriques d'usage courant sont classés en schémas à palier, schémas sans palier et schémas à effet de trous (Fig.115).

- Schéma à palier, présente

➤ Un comportement linéaire à l'origine :

○ Schéma sphérique:  $\gamma(h) = \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \dots \dots \dots \forall h \in [0, a]$   
 $\gamma(h) = 1 \dots \text{pour} \dots h \geq a$

○ Schéma exponentiel :  $\gamma(h) = 1 - e^{-h/a} \dots \dots \dots \forall h \geq 0$

➤ Un comportement parabolique à l'origine :

○ Schéma gaussien:  $\gamma(h) = 1 - e^{-h^2/a}$

- Schéma sans palier

➤ Schéma en puissance :  $\gamma(h) = h^\lambda \dots \dots \dots \forall h > 0, \dots 0 < \lambda < 2$

➤ Schéma logarithmique :  $\gamma(h) = a \cdot \log(h) \dots \dots \dots \forall h > 0, \dots a = \text{constant} > 0$

➤ Schéma à effet de trou  $\gamma(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h} \dots \dots \dots \forall h > 0, \gamma(h) = \frac{h^2}{6} \dots \dots \dots h \rightarrow \infty$

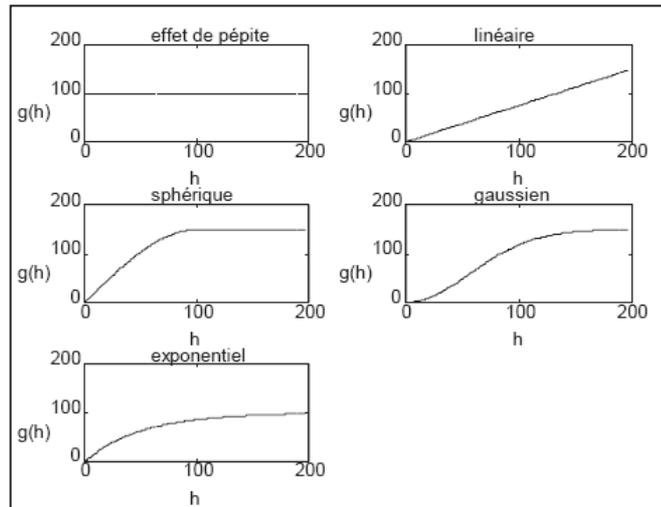


Figure 115 : Schémas théoriques d'ajustement des variogrammes. (In Marcotte D., 1997)

VII. 3. 3. La variance d'estimation

Si  $Z$  est la valeur "vraie" inconnue que l'on cherche à estimer par  $Z^*$ , l'erreur commise est  $(Z - Z^*)$ . Les valeurs  $Z, Z^*, Z - Z^*$  sont prise comme des réalisations particulières de V.A (variable aléatoire) ou F.A (fonction aléatoire)  $Z, Z^*, Z - Z^*$ .

L'erreur aléatoire  $Z - Z^*$  est alors caractérisée par ses deux premiers moments.

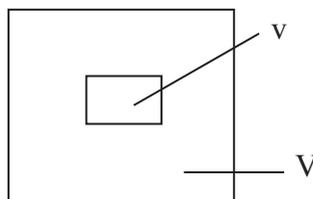
Moyenne  $b = E(Z - Z^*)$

Variance d'estimation  $\sigma^2 E = E(Z - Z^*)^2 - b^2$

Si  $b = 0$ , on dit que l'estimateur  $Z^*$  est sans biais, si non l'estimateur est biaisé.

Le formalisme géostatistique permet de déduire la variance d'estimation élémentaire d'une teneur moyenne  $ZV$  par une autre teneur moyenne  $Zv$  est

$$\sigma^2 E (V, v) = 2\bar{\gamma}(V, v) - \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(v, v)$$



Avec :

$\bar{\gamma}(V, v)$  : La valeur moyenne du variogramme entre un point appartenant au domaine  $V$  et un autre au domaine  $v$ ;

$\bar{\gamma}(V, V)$  : La valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au même domaine  $V$ ;

$\bar{\gamma}(v, v)$  : La valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au même domaine  $v$ .

La qualité d'une estimation de  $V$  par  $v$  dépend alors :

- de la géométrie du domaine à estimer : terme  $\bar{\gamma}(V, V)$  ;
- de la distance entre l'estimé et l'estimant : terme  $\bar{\gamma}(V, v)$  ;
- de la géométrie interne de l'estimant : terme  $\bar{\gamma}(v, v)$  ;
- Du degré de régularité du phénomène étudié : utilisation de la caractéristique structurale  $\gamma$ .

La formule générale précédente s'étend à la variance d'estimation de la teneur moyenne  $ZV$  d'un panneau  $V$  par une combinaison linéaire  $z^*$  des informations disponibles (Journel, 1978).

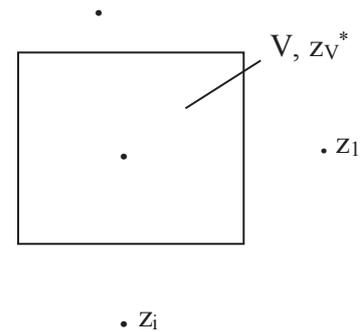
Par exemple si l'on dispose de  $N$  informations  $v_i$  de teneurs moyennes  $z(x_i)$ ,  $\lambda_i$  étant le pondérateur associé à l'information  $v_i$ . L'estimateur est :

$$z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i)$$

La variance d'estimation s'écrit alors :

$$\sigma^2_{E(v,v)} = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(V, v_i) - \bar{\gamma}(V, V) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \bar{\gamma}(v_i, v_j)$$

Le krigeage consiste à déterminer les pondérateurs  $\lambda_i$ .



#### VII. 4. L'estimation par la méthode géostatistique

##### a) *Système de krigeage ordinaire*

Ce système permet donc de retrouver les  $N$  pondérateurs  $\lambda_i$ . Ces derniers, dit pondérateurs de krigeage, donnent la variance d'estimation la plus petite possible et elle est appelée variance de Krigeage. Ce système est le suivant :

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(v_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{array} \right\} \forall i = 1..N \dots et \dots j = 1..N$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu - \bar{\gamma}(V, V)$$

- *Propriétés et remarques à propos du krigeage ordinaire*
  - Le système de krigeage ordinaire est un système à N+1 équations à N+1 inconnues qui sont les N pondérateurs  $\lambda_i$  et  $\mu$  qui est le paramètre de Lagrange.
  - Le krigeage ordinaire est un estimateur linéaire sans biais. C'est un interpolateur exact.
  - Le système et la variance de krigeage rendent compte des 4 faits suivants :
    - de la géométrie du domaine à estimer - terme de  $\bar{\gamma}(V, V)$ .
    - de la géométrie entre estimant et estimateur - terme de  $\bar{\gamma}(V, v_i)$ .
    - de la géométrie interne de l'information - terme de  $\bar{\gamma}(v_j, v_i)$ .
    - de la structure sous jacente - terme de  $\gamma(h)$ .

Ce concept permet donc de calculer la variance d'estimation d'un volume V à partir de différentes géométries et dispositifs. Nous allons donc utiliser cette propriété pour calculer les variances d'estimation de différentes configurations et avoir une idée sur la maille de prospection.

- *paramètres et plan type de krigeage*

Le plan type de krigeage ordinaire utilisé lors de l'estimation de la teneur d'un bloc d'exploitation de support V, à partir de l'ensemble des données des sondages de (échantillons) de support  $v_i$  en utilisant un variogramme expérimental ajusté, est de suivre les étapes suivantes (Journal et Huijbregts, 1978) :

- Déterminer le nombre maximal et minimal d'information nécessaire à un système de krigeage, pour mieux estimer le bloc;

- Le krigeage doit être effectué dans un voisinage restreint de forme sphérique ou ellipsoïdale définie par l'anisotropie zonale ; pour mettre le krigeage à l'abri de tous risques de biais et pour faciliter le regroupement de l'information à l'intérieur du voisinage (zone d'influence).

## VII. 5. Résultats obtenus

### VII. 5. 1. L'Analyse en Composantes Principale (ACP)

#### a) Matrice de corrélation

La matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques et les éléments constituant la pollution métallique, a été établie (Tab.43). La diagonalisation de cette matrice a permis d'extraire les facteurs de charges représentés par les valeurs propres pour chacun des facteurs (Tab.44, Fig.116). A partir de ce Tableau, on constate que les deux premiers facteurs F1 et F2 détiennent du maximum de la variabilité cumulée avec 51 %. C'est alors ces deux facteurs qui feront l'objet d'une projection des variables et des individus dans le but est de déterminer les associations des variables d'une part et le facteur qui contrôle la pollution métallique de la nappe.

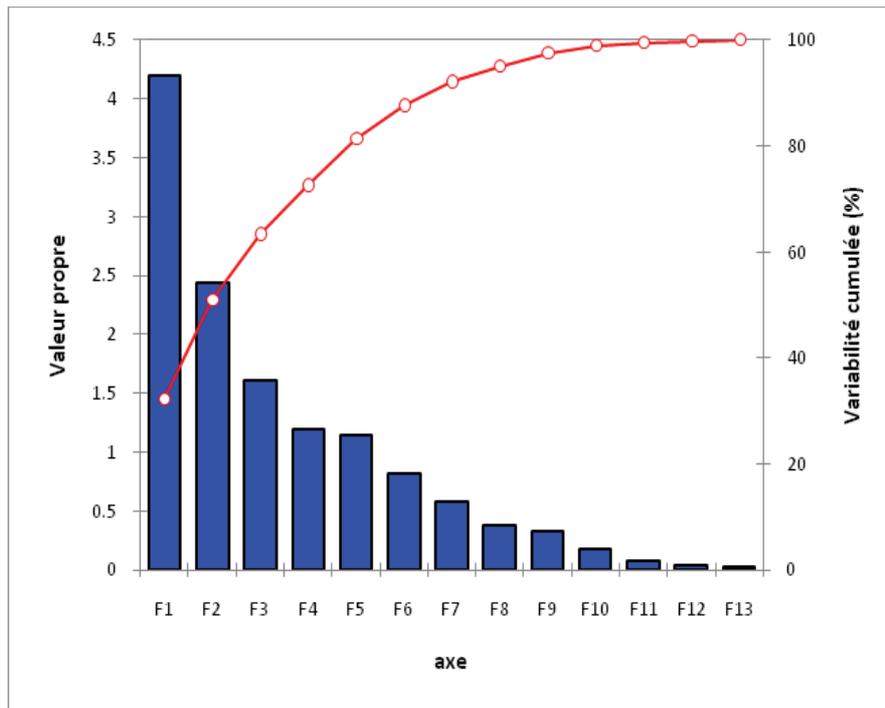
**Tableau 43 : Matrice de corrélation.**

Variables	CE	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Po <sub>4</sub> <sup>--</sup>	Zn	Cr	Pb	Cu	Fe
CE	<b>1</b>	0.33	<b>0.51</b>	0.21	0.35	<b>0.50</b>	0.18	-0.03	-0.06	0.23	0.25	0.28	0.04
Ca <sup>++</sup>	0.33	<b>1</b>	<b>0.60</b>	<b>0.52</b>	0.31	<b>0.57</b>	-0.16	-0.05	0.29	0.39	<b>0.57</b>	<b>0.53</b>	0.15
Mg <sup>++</sup>	<b>0.51</b>	<b>0.60</b>	<b>1</b>	0.32	<b>0.48</b>	<b>0.80</b>	0.07	-0.05	<b>0.48</b>	0.41	0.29	0.40	0.25
Na <sup>+</sup>	0.21	<b>0.52</b>	0.32	<b>1</b>	0.26	0.33	-0.27	0.16	0.10	0.29	-0.16	-0.29	-0.12
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.35	0.31	<b>0.48</b>	0.26	<b>1</b>	<b>0.50</b>	0.06	0.45	0.24	0.31	0.15	0.37	0.22
Cl <sup>-</sup>	<b>0.50</b>	<b>0.57</b>	<b>0.80</b>	0.33	<b>0.50</b>	<b>1</b>	-0.18	0.34	0.01	0.25	0.32	0.39	-0.07
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.18	-0.16	0.07	-0.27	0.06	-0.18	<b>1</b>	<b>-0.54</b>	0.25	-0.13	0.13	0.21	0.27
Po <sub>4</sub> <sup>--</sup>	-0.03	-0.05	-0.05	0.16	0.45	0.34	<b>-0.54</b>	<b>1</b>	-0.28	0.13	-0.26	-0.18	-0.19
Zn	-0.06	0.29	<b>0.48</b>	0.10	0.24	0.01	0.25	-0.28	<b>1</b>	0.20	-0.08	0.13	0.45
Cr	0.23	0.39	0.41	0.29	0.31	0.25	-0.13	0.13	0.20	<b>1</b>	0.21	0.20	0.40
Pb	0.25	<b>0.57</b>	0.29	-0.16	0.15	0.32	0.13	-0.26	-0.08	0.21	<b>1</b>	<b>0.84</b>	0.29
Cu	0.28	<b>0.53</b>	0.40	-0.29	0.37	0.39	0.21	-0.18	0.13	0.20	<b>0.84</b>	<b>1</b>	0.32
Fe	0.04	0.15	0.25	-0.12	0.22	-0.07	0.27	-0.19	0.45	0.40	0.29	0.32	<b>1</b>

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha=0.05$

**Tableau 44 : Valeurs propres.**

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
<b>Valeur propre</b>	4.19	2.44	1.61	1.20	1.14	0.82	0.58	0.38	0.33	0.17	0.08	0.04	0.02
<b>Variabilité (%)</b>	32.25	18.75	12.36	9.22	8.77	6.31	4.46	2.92	2.50	1.31	0.63	0.33	0.19
<b>% cumulé</b>	32.25	51.00	63.36	72.58	81.35	87.66	92.13	95.05	97.55	98.86	99.49	99.81	100.00

**Figure 116 : Totales des variances et Pourcentages cumulés.**

### VII. 5. 1. 2. Cercle FI-FII, plan FI-FII

Les principaux éléments indiquant la pollution (métallique), sont corrélés positivement avec le facteur de charge FI. Ce facteur contrôlant cette pollution présente le maximum de la variance de dispersion (51. %) (Fig.117 et Fig.118). Il correspond dans le plan des individus aux points (P4, P5, P6 ...etc.) qui se localisent aux bordures la décharge d'ordure. C'est l'axe de la minéralisation et de la pollution métallique.

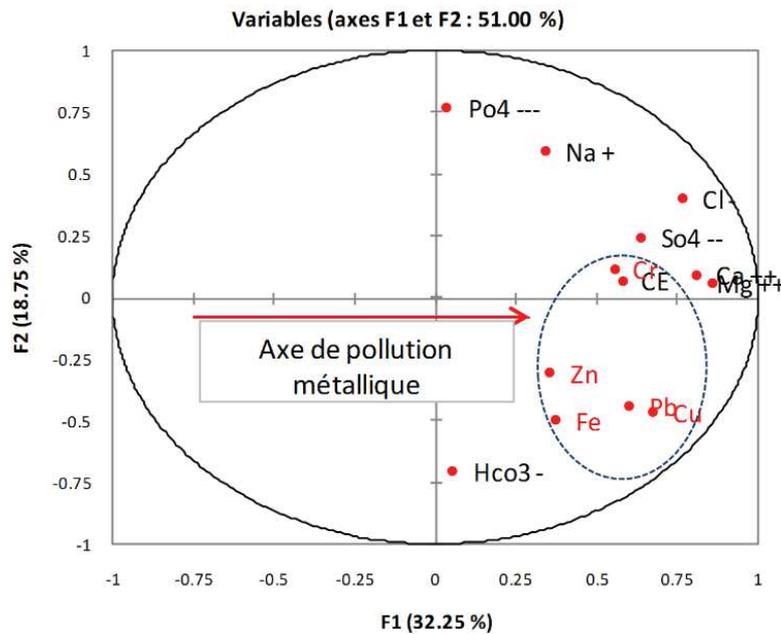


Figure 117 : Représentation de l'ACP selon les facteurs FI et FII

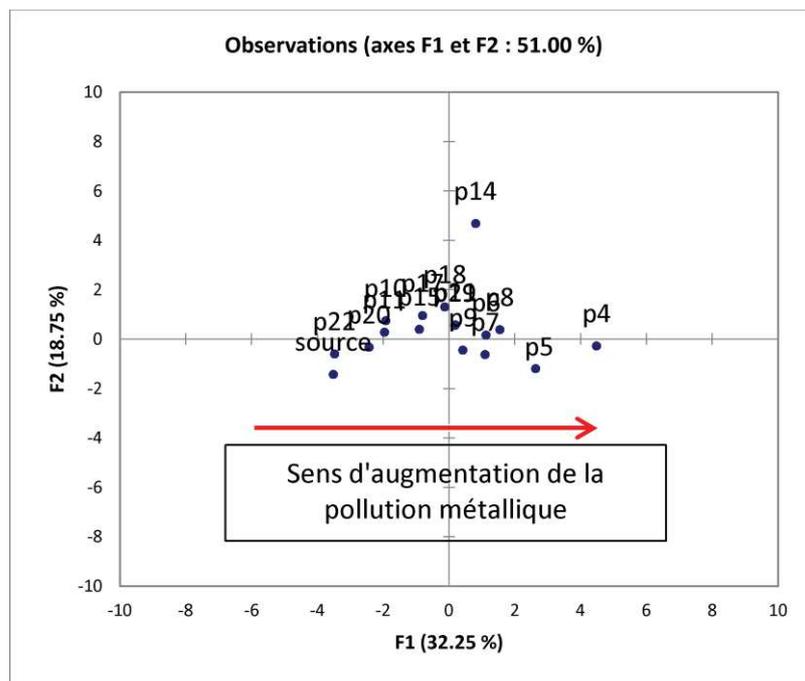


Figure 118 : Représentation de l'ACP selon les plans FI FII des individus

## VII. 5. 2. Modélisation géostatistique du degré de la pollution métallique

### VII. 5. 2. 1. Variable régionalisée

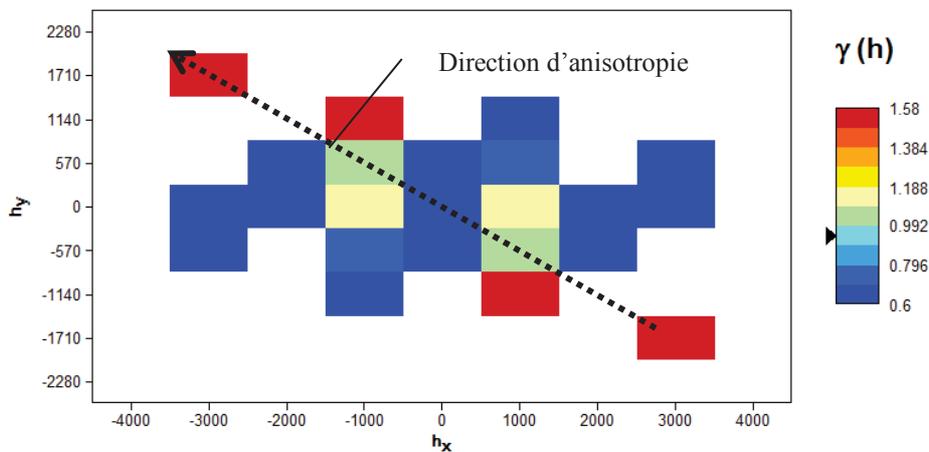
Sur la base de l'ACP, Nous constatons que le facteur de charge F1 représente l'axe de la pollution métallique. C'est-à-dire le facteur qui regroupe l'ensemble des éléments de la pollution métallique en même temps. Les scores factoriels des individus (échantillons des puits) par rapport ce facteur représente une composante multivariable des polluants

métalliques en chacun des puits. L'étude géostatistique est alors ramenée sur ces scores factoriels des individus comme étant une nouvelle variable régionalisée afin de modéliser la répartition des polluants métallique dans la nappe. D'une manière générale, les individus ayant des valeurs inférieurs à 0, représentent les eaux échantillonnées des puits non/ou faiblement pollués. Cependant les individus ayant des valeurs supérieurs à 0 sont les puits fortement pollués.

**VII. 5. 2. 2. Variographie des scores factoriels des individus**

**VII. 5. 2. 2. 1. Variographie de Surface**

Le variogramme de surface sur les scores factoriels des individus a été faite par le logiciel Variowin 2.2 (Pannatier Y., 1996). A partir de la figure 119, qui cartographie  $\gamma(h)$  a permis de mettre en évidence une direction d'anisotropie NW – SE (Dir. 135°). Cette direction est interpréter par le gradient de pollution où la variabilité du degré de la pollution métallique est grande le long de cette direction. Il s'agit du sens d'écoulement amont –aval qui véhicule les polluants métalliques.

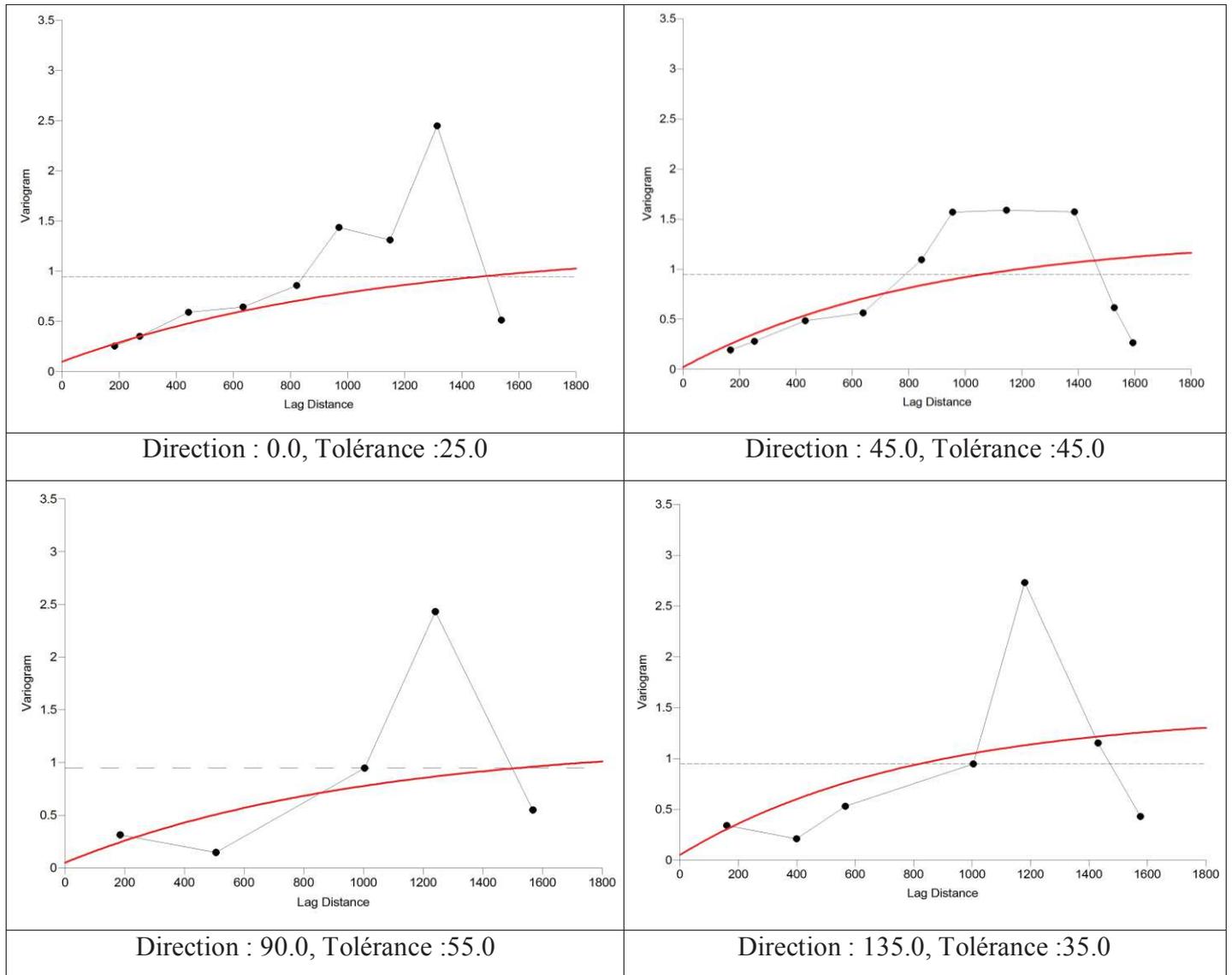


**Figure 119 : Variogramme de surface des scores factoriels des individus par rapport F1 montrant une anisotropie dans la direction NW-SE (Dir. 135°).**

**VII. 5. 2. 2. 2. Variogramme directionnels**

Les variogrammes directionnels des scores factoriels des individus du facteur (FI) ont été calculés dans les directions (0°, 45°, 90° et 135°) avec des tolérances ( $\pm 25^\circ$  à  $\pm 45^\circ$ ). Ces variogrammes ont été ajustés par des schémas de régionalisation exponentielle avec porté (a), palier (C) et effet de pépité (C<sub>0</sub>). (Fig.120, Tab.45). L'ajustement des cardiogrammes a été validé sur la base d'un minimum d'erreur par rapport la méthode de moindre carrée.

A l'aide de ces variogrammes, on constate une anisotropie dans la direction 135 indiquant de fortes variations. Cette direction indique le gradient de contamination métallique amont-aval. (Pannatier Yvan., 1996).



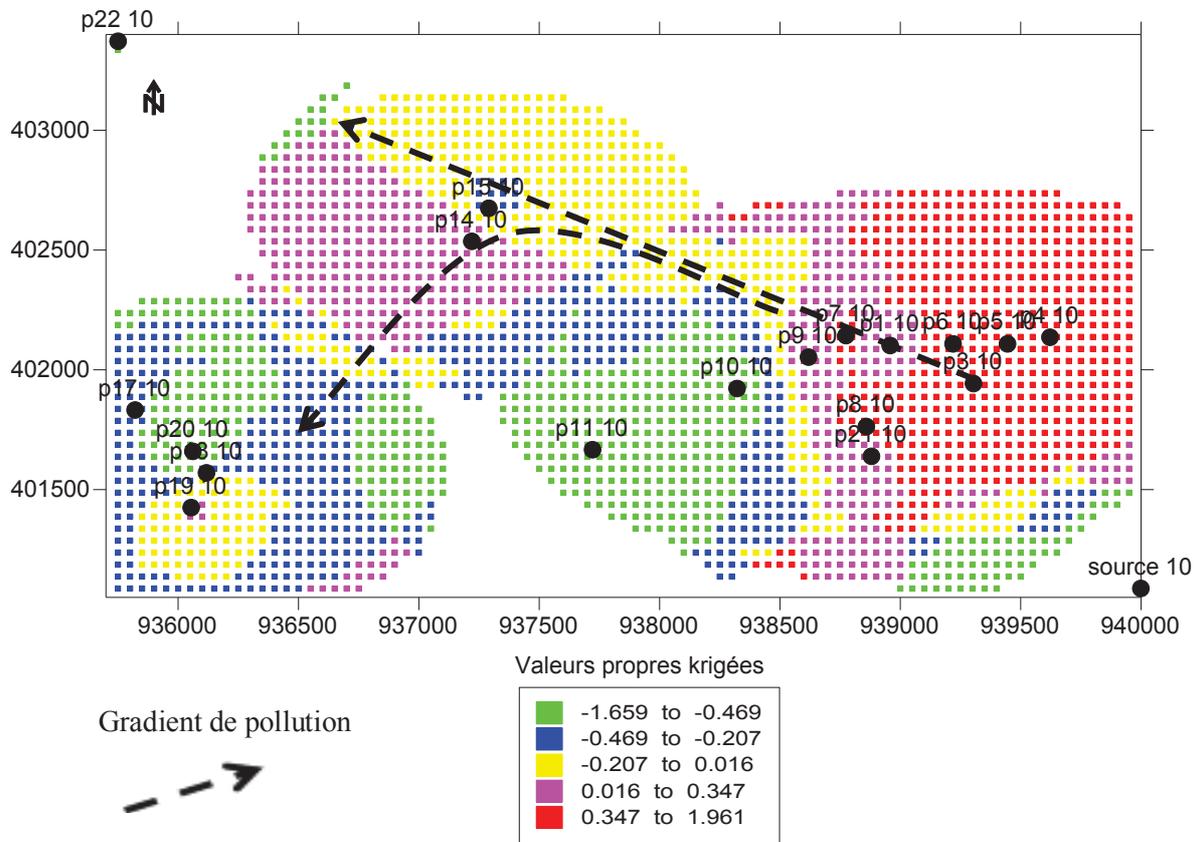
**Figure 120 : Variogrammes directionnels des scores factoriels des individus pour le facteur F1.**

**Tableau 45 : Récapitulatifs des variogrammes directionnels et leurs ajustements.**

<i>Direction</i>	<i>Model.</i>	<i>C<sub>0</sub></i>	<i>C</i>	<i>a (m)</i>
<i>0°</i>	Exp	0.10	1.15	1100
<i>45°</i>	Exp	0.02	1.30	850
<i>90°</i>	Exp	0.05	1.15	1000
<i>135°</i>	Exp	0.05	1.4	800

### VII. 5. 2. 3. Krigeage et cartographie

Les variogrammes ajustés ont pour le krigeage des scores factoriels des individus sur le facteur F1 qui indique l'axe de la pollution métallique (Theodossiou N., 2006). Le système de krigeage à deux dimensions des blocs 50x50m a été utilisé. Ceci a permis de présenter un modèle de blocs krigés avec le minimum de variance d'estimation et par conséquent un minimum d'erreur relative (Fig.121). Cette méthode a permis de proposer une cartographie qui prend en considération tous les éléments de la pollution métallique en même temps. L'établissement de cette carte nous a permis de mettre en évidence une évolution amont-aval du degré de la pollution métallique dans la zone d'étude.



**Figure 121 : Représentation de l'estimation locale du degré de pollution dans la nappe (Juin 2012).**

## VII. 6. CONCLUSION

La modélisation proposée dans cette étude repose sur les techniques géostatistiques krigéantes. Il ne s'agit pas d'une cartographie mono-élémentaire qui ne tient en compte qu'une seule variable mais plutôt une cartographie multivariable qui prend en considération tous les éléments responsable de la pollution métallique de la nappe. Pour cela deux étapes sont indispensables ; L'Analyse en Composantes Principale qui est une méthode statistique

multivariée permettant la détermination de l'axe de minéralisation métallique et par conséquent, la définition de la variable régionalisée pour la cartographie géostatistique. C'est le facteur F1 sur le quel les éléments de la pollution métallique sont très bien corrélés. Les scores factoriels des individus sont calculés et sur lesquels l'étude géostatistique est portée. L'analyse variographique a permis de mettre en évidence une anisotropie dans la direction NW-SE alors que les variogrammes directionnels ont été utilisés pour le krigeage ordinaire des scores factoriels dans la nappe à 2D.

Le modèle propose une estimation du degré de pollution en utilisant un maillage de 50\*50 m. Ce modèle montre un gradient de pollution métallique amont-aval avec une intensité en amont. Cette méthode présente l'intérêt d'une cartographie multi-variable qui tient en compte tous les éléments de pollution métallique en même temps en évitant la cartographie de chaque élément séparément où la vision du degré de pollution est restreinte.

## **CONCLUSION GENERALE**

**Conclusion générale**

La zone d'étude fait partie d'un système hydrique endoréique côtier, les résultats du travail réalisé sont les suivant :

Du point de vu géologique on rencontre un socle métamorphique occupant le substratum et donne lieu à un socle compact et rigide surtout la partie profonde non exposée aux conditions climatiques, le socle métamorphique possède une couverture d'âge crétacé constituée de calcaire marneux gréseux (vila, 1980) et une deuxième couverture très importante, c'est la nappe numidienne déposée durant la phase du miocène inférieur. Une fois le grès numidien mis en place (Djebel Hadjar Ediss et Berka Zerga) la région a connu une régression de la mer vers le Nord et vers le Sud (lac Fetzara) ; conséquence de ce mouvement c'est l'exposition de la région aux conditions climatiques et ruissellement au niveau de la surface et à des mouvements d'équilibre (néotectonique) en profondeur. Pour la région de Berka Zerga, il résulte la naissance d'un sous bassin versant avec plusieurs cours d'eau orientés vers le lac Fetzara.

D'une superficie de 515 km<sup>2</sup> le sous bassin du lac Fetzara (03-13) est drainé par trois cours d'eaux principaux (Oued Zied où Nord-Est, Oued El Mellah à l'Ouest et Oued El Hout où Sud) qu'ils convergent vers le marais et rejoignent la mer par un exutoire unique qui est le canal de drainage.

Les données climatiques attribuent à la région un climat méditerranéen Subhumide caractérisé par deux saisons distinctes l'une pluvieuse et humide et l'autre sèche et chaude. La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 677.99 mm (Salines), 696.75 mm (Berrahal) et 648.67 mm (Ain Berda), et des températures annuelles moyennes de l'ordre de 17,91°C (Salines).

La formule du bilan hydrique de Thornthwaite montre que la majeure partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration (465.9 mm pour Berrahal, 470.0 mm pour la station de Ain Berda et 479.7 mm pour les Salines).La reconstitution du stock commence à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum 100 mm de Décembre à Avril. Elle diminue à partir du mois de Mai jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin, caractérisant le déficit agricole (DA) qui s'étale à Cinq (5) mois (402.3 mm dans les Salines, 410.9 mm à Berrahal et 395.2 à Ain Berda).

La surveillance et l'évaluation de la sécheresse à l'aide des indices météorologiques le SPI et le RDI ont montré que les 3 périodes de sécheresse qu'a connu notre sous bassin d'une

sévérité modérée à extrême concerne l'agriculture et l'hydrologie en même temps et que la région d'étude peut subir d'autres périodes de sécheresse dans le futur.

Du point de vue hydrogéologique, la nappe de la plaine de l'Oued Zied contient dans son sous-sol un système aquifère discontinu composé de la superposition de deux horizons (la nappe superficielle et la nappe profonde semi captive). La nappe superficielle (libre) de l'Oued Zied est contenue dans des alluvions récentes et actuelles. Elle est composée d'une lithologie argilo sableuse et argilo limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10 m, dont les potentialités hydrauliques sont très limitées. Cette nappe est exploitée par un nombre important de puits destinés à l'irrigation, l'industrie et l'élevage. La deuxième nappe aquifère (appelée profonde) est constituée de cipolins et calcaires fissurés. Elle est semi-captive dans la vallée de l'Oued Zied et se trouve à une profondeur de l'ordre de 10 m. Dans le secteur occidental, Cette dernière devient captive, sa profondeur augmente pour atteindre 20 m. Sur toute son étendue, l'épaisseur de la nappe profonde varie de 2 à 5 m.

L'aperçu piézométrique nous montre que le sens de l'écoulement est orienté vers le centre de la plaine de l'Est vers l'Ouest (lac Fetzara). L'alimentation des eaux souterraines se fait par les précipitations atmosphériques dans la période des hautes eaux. L'interprétation des cartes piézométriques montrent une très forte interaction entre l'oued, le lac et les systèmes aquifères ; dans tous les cas, la nappe superficielle est drainée par l'oued Zied vers le lac.

Les périodes de sécheresse enregistrées ont provoquées des extractions fortes d'eau dans les puits ce qui a provoqué des changements dans la direction de circulation de l'eau souterraine. En plus, la recharge provenant des précipitations a descendu aussi. On note aussi, que la région est caractérisée par des gradients hydrauliques faible dans la partie centrale ce qui représente une forte perméabilité indiquant ainsi, une probable exposition de la nappe de toute forme de pollution.

La représentation graphique et la cartographie du chimisme des eaux analysées, montre que les concentrations des ions majeurs reflètent l'environnement géologique. Les eaux carbonatées, représentées par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, se situés au Nord-Est de la plaine, ce qui confirme que les apports de ces deux éléments est la dissolution des calcaire-dolomitiques qui affleurent dans la bordure Est de la nappe aquifère (les calcaires de djebel Bélilita). Les eaux salifères présentant un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, caractérise la quasi-totalité des eaux souterraine du système aquifère, ceci est du

probablement à l'effet de l'évaporation dans les zones où le niveau statique de la nappe aquifère est peu profond.

Le phénomène d'échange de bases et les processus de dissolution/précipitation des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) sont généralement à l'origine de la variation des concentrations des cations des eaux. La dissolution de l'halite contribuerait à la salinisation des eaux de l'aquifère étudié. Ceci est en accord avec l'état de sous-saturation des eaux vis-à-vis ce minéral. La technique statistique CAH confirment les résultats obtenus par l'approche hydrogéochimique.

Les risques de salinisation et d'alcalinisation ne sont pas indépendants. Ce dernier est d'autant plus grand que la salinité est importante. Le diagramme de Wilcox permet de faire une première classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation. Concernant nos secteurs étudiés ; Trois classes peuvent être présentées. Les eaux de la catégorie  $C_2S_1$  peuvent être utilisées sur presque n'importe quel sol et pour n'importe quelle culture. Celles de la catégorie  $C_3S_1$  doivent être utilisées avec précaution. Alors que celles de la catégorie  $C_4S_1$  doivent pratiquement toujours être rejetées.

Les lixiviats générés par l'ancienne décharge d'Annaba qui s'infiltrent dans la zone non saturée de la nappe libre de l'Oued Zied peuvent altérer la qualité des ressources en eau existantes. Le diagnostic de la pollution nous a permis de mettre en évidence la présence d'un gradient de contamination métallique amont-aval dans les eaux de la nappe. Les polluants sont présents à des concentrations d'importance variable d'un point de prélèvement à l'autre. Néanmoins, la globalité des résultats montre que les points de prélèvement situés à proximité de la décharge ont révélé une contamination significative par les métaux lourds analysés. En revanche, les points de prélèvements localisés au Nord-Ouest de la plaine, ne témoignent d'aucune pollution importante par ces métaux.

Cette étude contribue donc à mettre en évidence que les ressources en eaux souterraines de la région sont confrontées à un sérieux problème de pollution par les métaux lourds, notamment par le plomb et le fer. Les métaux lourds présents à des concentrations faibles sont à considérer également à cause des phénomènes de toxicité chronique et des effets d'interaction. Ils représentent ainsi des risques certains pour la santé des populations et pour la qualité des ressources naturelles.

Les valeurs calculées de l'indice de pollution des eaux par les lixiviats (LWPI) montrent que les points d'eau situés en aval de l'ancienne décharge sont fortement pollués, tandis que les eaux souterraines de la plaine de l'Oued Zied sont modérément contaminées et présentant un impact peu significatif de ( $0,66 < LWPI \leq 1,53$ ). Nous notons que l'LWPI est un outil d'identification des dangers. L'utilisation du LWPI devrait tenir compte d'autres facteurs tels que la quantité des lixiviats générés, les périodes d'exposition, la profondeur de l'aquifère, le type de sol, la population affectée, etc.

Le traitement des données des éléments chimiques (métaux lourds) par le logiciel RISK4, montre qu'au niveau de la plaine de l'Oued Zied, L'IR est inacceptable pour les deux catégories (enfant, adulte) dans le cas du chrome et du cuivre. Cependant pour le plomb, il est inacceptable pour l'enfant et acceptable pour l'adulte dans certains puits. Dans le cas du zinc, l'indice du risque ne pose aucun danger. A l'inverse de tous les secteurs étudiés, celui de la décharge de Berka Zerga pose un vrai risque pour les deux catégories.

La modélisation proposée dans cette étude repose sur les techniques géostatistiques krigéantes. Il ne s'agit pas d'une cartographie mono-élémentaire qui ne tient en compte qu'une seule variable mais plutôt une cartographie multivariable qui prend en considération tous les éléments responsable de la pollution métallique de la nappe. Pour cela deux étapes sont indispensables ; L'Analyse en Composantes Principale qui est une méthode statistique multivariée permettant la détermination de l'axe de minéralisation métallique et par conséquent, la définition de la variable régionalisée pour la cartographie géostatistique. C'est le facteur F1 sur lequel les éléments de la pollution métallique sont très bien corrélés. Les scores factoriels des individus sont calculés et sur lesquels l'étude géostatistique est portée. L'analyse variographique a permis de mettre en évidence une anisotropie dans la direction NW-SE alors que les variogrammes directionnels ont été utilisés pour le krigeage ordinaire des scores factoriels dans la nappe à 2D.

Le modèle propose une estimation du degré de pollution en utilisant un maillage de 50\*50 m. Ce modèle montre un gradient de pollution métallique amont-aval avec une intensité en amont. Cette méthode présente l'intérêt d'une cartographie multi-variable qui tient en compte tous les éléments de pollution métallique en même temps en évitant la cartographie de chaque élément séparément où la vision du degré de pollution est restreinte.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Références bibliographiques**

- Agence de bassin hydrographique. Constantinois -Seybouse- Mellegue, 2003.** Actualisation du Caneva 2003, Bassin Côtiers Constantinois.
- Aissa, D.E., 1985.** Etude des indices et gisements métallifères du massif de l'Edough (Annaba). Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. USTHB Alger, 134p.
- Alain, F., Jean François R., 1995.** Dictionnaire de géologie, 4<sup>e</sup> édition ; DUNOD.
- Allen, H.E., Hansen, D.J., 1996.** The importance of trace metal speciation to water quality criteria. *Water Environment Research*, 68, 42-54.
- Alloway, B.J., 1975.** Heavy metals in soils. Second Edition., Ed. Blakie Academic & Professional, Glasgow, 408 p.
- Alobaidy, A.H.M.J., Abid, H.S., Maulood, B.K., 2010.** Application of water quality index for assessment of Dokan Lake ecosystem, Kurdistan region, Iraq. *J. Water ResourProt.* 2: 792–798. doi: 10.4236/jwarp.2010.29093.
- Anonyme., 2004.** Etude agro-pédologique du lac Fetzara (B. N. E. D. E. R)
- A.P.H.A., 2005.** Standard methods for examination of water and wastewater 21st ed. American Public Health Association, Washington D.C.
- Baize, D., 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.
- Banton, O.M., Bangoy, L., 1999.** Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines, Presses de l'université du Québec, 460p.
- Bakalowicz, M., 2013.** Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Quoi de neuf ? Dix-neuvièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013.
- Belhamra, A., 2001.** Contrôle de la salinité des eaux du Lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire de Magister, option : Biologie et Physiologie des Organismes Marins. Univ. Annaba, 110 p.
- Belkhiri, L., Mounib, L., Sheikhy, Narany, T., Tiri, A., 2017.** Evaluation of potential health risk of heavy metals in groundwater using the integration of indicator kriging and multivariate statistical methods. *Groundwater for Sustainable Development* 4 12–22 Doi.org/10.1016/j.gsd.2016.10.003
- Belkhiri, L., Sheikhy, Narany, T., 2015.** Using Multivariate Statistical Analysis, Geostatistical Techniques and Structural Equation Modeling to Identify Spatial

- Variability of Groundwater Quality. *Water Resour Manage* 17 January 2015. DOI 10.1007/s11269-015-0929-7
- Benessam, S., Debieche, T.H., Amiour, S., Chine, A., Khelili, S., 2015.** Chimie des eaux du bassin versant de l'oued Nil (Nord-Est algérien). International Conference on African Large River Basins Hydrology, 26-30 Octobre 2015. Hammamet (Tunisia). 29 p.
- Boucheham A., Boulleghreif F., 1992.** Etude de la minéralisation ferrifère du gisement de beleleita (Edough). Mémoire d'ingénieur. Univ, Constantine, 59p.
- Caby, R., Hammor, D., 1992.** Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un « metamorphic core complex » d'âge miocène dans les maghrébides. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre, 314, série II, p 829-835.
- Cahier de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques., 2000.** n°04, septembre 2000.
- Callier, L., Clozel, B., Nowak, C., 2002.** Méthode de recherche de l'origine de pollution (s) dans les sols ou dans les eaux souterraines. BRGM RP-51260-Fr, 133p.
- Castany, G., 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris, France. 238p.
- Chauvet. P., 1999.** Aide mémoire de géostatistique linéaire application du domaine minier. Les presses de l'école des mines de Paris, 140 p.
- Chemaou-El-Fehri, I., 2016.** Pratiques agricoles dans la province de Khemisset : inventaire des pesticides, qualité des eaux souterraines et risques sanitaires. Thèse Doctorat Univ. Mohammed-V-Rabat, 205 p.
- Chofqi, A., Lhadi, E., Mania, J., Murdy, J., Veron, A., Younsi, A., 2004.** Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African Earth Sciences* pp 10.
- Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Jensen, D.L., Christensen, B.J., Baun, A., Albrechtsen, H., Heron, G., 2001.** Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *ApplGeochem*. 16:659–718. doi: 10.1016/S0883-2927(00)00082-2.
- Damy, P.C.,** Synthèse des connaissances sur l'origine et la disponibilité du cadmium dans les eaux continentales. Synthèse technique. AgroParisTech - Engref Montpellier et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. 35p
- Debieche, T.H., 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la seyouse – nord – est Algérien. Thèse de Doctorat, université de Franche -Compte, pp 197.

- Derradji, F., 2004.** Identification quantitative et qualitative des ressources en eau de la région de Annaba- El Tarf (Nord-Est Algérien). Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba. 237p.
- Djabri, L., Hani, A., Mania, J., Mudry J., 2000.** Conséquences des pratiques agricoles sur la qualité des eaux du bassin de la Seybouse (Est algérien). Actes du colloque ESRA'2000, Poitiers, S3, pp.39-42.
- Djabri, L., 1996.** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologique industrielle, agricole et urbaine. Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba, 261p.
- Djerrab, A., Gherbi, C., 1991.** Etude pétrologique et géochimique du magmatisme de l'Edough : conséquences métallogéniques (Pb-Zn-Cu). Mémoire d'ingénieur, univ. d'Annaba, 119p.
- Djorfi, S., Fougou A., Majour, H., Belloulou, L., Hani, A., Djabri, L., 2010.** Impact de décharge de Annaba sur la qualité des eaux de la plaine de l'Oued Zied. Communication Science et Technologie, Oran ; N°8- (Janvier 2010). pp. 151-157.
- Djorfi, S., Hani, A., Laouar, R., Djabri, L., 2008.** Impacts des rejets industriels sur la qualité du milieu et sur les eaux de la nappe superficielle. Cas de la région d'Annaba (Algérie). Bulletin du Service Géologique National, Alger ; Vol. 19 N°1- (2008). pp. 33-49.
- Durov, S.A., 1948.** Classification of natural waters and graphical representation of their composition. Dokl. Akad. Nauk. USSR. 59(1):87-90.
- Ferroum, Asma., 2015.** Caractérisation des eaux superficielles de la plaine d'El Hadjar. Mémoire de Magister, Hydrogéologie, Univ., Annaba. 92 p.
- FouFou, A., Djorfi, S., Lekoui, S., Hani, A., 2011.** Modélisation de la dégradation de la qualité des eaux ; Zone industrielle Meboudja, Annaba. Euro-Mediterranean Seminar in Environment and Industrial Safety, April 24 & 25 (2011), Oran, Algeria. 16 p.
- Gibrilla, A., Bam, EKP., Adomako, D., Ganyaglo, S., Osae, S., Akiti, T.T., Kebede, S., Achoribo, E., Ahiale, E., Ayanu, G., Agyeman, E.K., 2011.** Application of water quality index (WQI) and Multivariate analysis for groundwater quality assessment of the Birimian and cape coast Granitoid complex: Densu River basin of Ghana. Water Qual. Exposure Health. 3:63–78. doi: 10.1007/s12403-011-0044-9.
- Gleizes, G., Boulton, J., Bossière, G., Collome, P., 1988.** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérien). C ; R. Acad. Sci. Paris, t 306, série II, p 1001-1008.

- Habes, S., 2013.** Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; Cas : Lac Fetzara Nord - Est Algérien., Thèse Doct. en Sciences, Univ. Annaba, 198 p.
- Halitim, A., 1985.** Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doct. es Sciences, Univ. Rennes.
- Hammor, D., 1992.** Du panafricain au miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord-orientale) retracées par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (V/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et Ar<sup>39</sup>/Ar<sup>40</sup>). Thèse de doctorat, université de Montpellier II, 205p.
- Hani, A., 2003.** Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de doctorat d'état en géologie appliquée. Univ. Annaba, 214 p.
- Haou, F., 2001.** Ornithologie en Algérie, les espèces existantes au niveau du Lac Fetzara (Nord-Est algérien). Archives de la liste de discussion « ornithologique ».
- Hickey, M.G., Kittrick, J.A., 1984.** Chemical partitioning of cadmium, copper, nickel and zinc in soils and sediments containing high levels of heavy metals. J. Environ. Qual., 13, 372-376.
- Hilly, J., 1962.** Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer, (Est Constantinois), carte géologique Algérie. Bull, n°19, 399p. thèse de doctorat.
- Ilavsky, J., Snopkova, P., 1987.** Découverte d'Acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). Comptes rendus de l'académie des sciences, Paris 305 (serie II), 881-884.
- Joleaud, L., 1936.** Etude géologique de la région de Bône et de la Calle-pub. Service carte géologique. Algérie n°12. 200p.
- Journal, A.G., 1978.** Cours de géostatistique, 3eme année. Tome II, institut national polytechnique de Lorraine, France, 122p.
- Journal, A., Huijbregts, G., 1978.** Mining geostatistics. Academic Press, London, U. K, 600p.
- Khelfaoui H., 2007.** Impacts des rejets industriels sur les eaux souterraines. Cas de la région de Berrahal (Algérie). Mémoire de Magister, Univ. Annaba. 169 p.
- Kölle, W., Strebel, O., Bötther, J., 1990.** Reduced sulphur compounds in sandy aquifers and their interactions with groundwater. Proc. Dresden Symp, Groundwater Monitoring and management. IAHS publ. 173, 23-30.

- Laperche, V., Dictor, M.C., Clozel-Leloup, P., Baranger., 2004.** Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et des sols pollués. BRGM. 136 p.
- Laura, S., Philippe, B., Werner, S., 2000.** Chimie des milieux aquatiques ; chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement, 3<sup>e</sup> édition ; DUNOD, 567 p.
- Laouar, R., Boyce, A.J., Ahmed Said, Y., Ouabadi, A., Fallick, A.E., Toubal, A., 2002.** Stable isotope study of igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, Northeast Algeria, *Journal of African earth sciences* 35 pp. 271-283.
- Lloyd, J.A., Heathcote, J.A., 1985.** Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: An introduction. Oxford Uni. Press, New York, 296 p.
- Marre, A., 1992.** Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, étude géomorphologique, volume 1 & 2 O.P.U Alger, Algérie.
- Mariotti, A., 1994.** Dénitrification in situ dans les eaux souterraines, processus naturelles ou provoqués : une revue. *Hydrogéologie*, n° 3, pp. 43-68.
- Matheron, G., 1971.** La théorie des variables régionalisées et ces applications. Les cahiers de CMM5. Paris ENSMP, 212 p.
- Nafâa, K., 1985.** Nappes superposées en région côtière, hydrodynamique et hydrochimie (aquifère de Annaba) Nord Est algérien. Th. Doct. Ing. USTL, Montpellier, 159 p.
- Oeltzschner, H.J., 2006.** Abschluss und Rekultivierung der Deponie Berka Zerga bei der Stadt Annaba, Algerien. *J. Zeitschrift Müll und Abfall*, 38 Jg., Heft 2, S. 76-83. Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- O.M.S., 2004.** Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations, 3rd Ed., World Health Organization, Geneva, 515 p.
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Chkir, N., Carreira, P., Goumih, A., 2016.** Hydrogeochemical behavior of a coastal aquifer from Semi-Arid areas: Case of Barremian-Aptian aquifer of Essaouira Basin (Western Morocco), *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°25, Mars 2016, pp. 163-182.
- Pannatier, Y., 1996.** VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D. New York: Springer.
- Piper, A.M., 1944.** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, 25, 914–928.
- R.G.P.H., 2008.** Recensement Générale de la Population et de l'Habitats, Office nationale des statistiques.

- Richards, L.A., Sous la direction U.S.S.L.S. (United State Salinity Laboratory Staff), 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC (USA), 160p.
- Rodier, J., 2005.** Avec la collaboration de C. Bazin, J. –P. Broutin, P. Chambon, H. Champsaur, L., L'analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduaires ; eaux de mer, 9<sup>e</sup> édition. DUNOD, 1529p.
- Sawyer, C., MC-Carty, Y.P., 1967.** Chemistry and sanitary engineering. McGraw Hill. New York, p 518.
- Strebel, O., Bötcher, J., Fritz P., 1990.** Use of isotope fractionation of sulphate sulfure and sulphate-oxygen to asses bacterial desulfurisation in a sandy aquifer. J. Hydrology, 121, pp. 155-172.
- Souadnia, S., Mezghache, H., 2017.** Modélisations géostatistiques du faciès pétrophysiques du réservoir d'hydrocarbure de TAGI-Hassi Berkine Sud. Rev. Sci. Technol., Synthèse 34: 95-109.
- Suarez, D., Wood, J., Lesch, S., 2006.** Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. Agric water Manage; 86: 2006, pp150-64.
- Talalaj, I.A., 2014.** Assessment of groundwater quality near the landfill site using the modified water quality index. Environ Monit Assess. 2014 Jun; 186(6):3673-83.
- Templ, M., Filzmoser, P., Reimann, C., 2008.** Cluster analysis applied to regional geochemical data : Problems and possibilities. Applied Geochemistry, 23: 2198–2213.
- Theodossiou, N., Latinopoulos. P.J., 2006.** Environmental Modelling & Software 21, PP 991-1000.
- Thornthwaite, C.W., 1948.** An approach towards a rational classification of climate. Geographical Review 38, pp 55-94.
- Todd, K., 1980.** Groundwater hydrology. New York. 2ndedn. Wiley, 1980, p 510.
- Toubal, A., Toubal, O., 1998.** Roche-mère, sol et végétation du massif de l'Edough : segment de la chaîne alpine de l'Algérie orientale. Ecologie, t, 29 (1-2). 207-214.
- Turc, L., 1961.** Evaluation des besoins en eau d'irrigation ; évapotranspiration potentielle. Ann. Agr. n° 12. pp 13 - 49.
- Villa, J.M., 1970.** Le Dj. Edough ; un massif cristallin externe du Nord-Est de la Berberie/ Bull. Soc. Géol. Fr. 7-XII, n°5, p805-812.
- Villa, J.M., 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens. Thèse doctorat d'état, université Paris VI, 3 volumes, 650p.

- Wilcox, L., 1948.** The quality of water for agricultural use. US Dept. Agriculture Tech Bull 962. Washington.
- Xavier, E., 2001.** Géostatistiques linéaire, Ecole des mines de Paris, 405 p.
- Zahi, F., Djamai, R., Chaab, S., Djabri, L., Drouiche, A., Medjani, F., 2012.** Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Revue des Sciences et de la Technologie. Synthèse N°26, pp 86-95.
- Zenati, N., Messadi, D., 2010.** Utilisation de la géostatistique dans l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque d'une nappe superficielle à un polluant par infiltration verticale. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, Annaba, Algerie. Communication Science & technologie N° 8, pp 105-110.
- Zenati, N.E., 1999.** Relation nappe-lac, confirmation par l'hydrochimie, cas de la nappe superficielle de la plaine ouest d'El Hadjar lac Fetzara ; nord-est Algérien. Mémoire de magister. Univ. d'Annaba.

**ANNEXE**

## **Fonctionnement de la décharge**

### **I. La décharge de Berka Zrga**

Le mode d'élimination des déchets ménagers adopté dans la ville d'Annaba est la mise en décharge dans la décharge de Berka Zerga. Cette dernière est située sur le territoire de la commune d'El Bouni. En réalité c'est une décharge intercommunale. A ce titre elle recevait depuis environ 30 ans, différentes sortes de déchets, non seulement ceux de la commune d'El bouni mais aussi ceux de la ville d'Annaba, de Sidi Ammar et d'El Hadjar. Elle compte parmi les nombreuses décharges incontrôlées concernées par le PROGDEME17 (kehila et al., 2007). Elle devait être fermée pour les travaux de réhabilitation au début de l'année 2013. Un budget de 1 milliard de dinars lui a été consacré pour sa réhabilitation.

#### **I. 1. Les caractéristiques de la décharge de Berka Zerga**

La décharge de Berka Zerga est une décharge non-contrôlée compactée. Sa superficie totale près de 30 ha et la surface occupée par les anciens dépôts est d'environ 5 ha. Le déversement s'effectue à l'époque au centre de la décharge dans un ravin situé sur la partie basse du site. La hauteur moyenne de la couche d'ordures varie entre 5 à 25m d'épaisseur, ces couches d'ordures ont été couvertes par une couche de matériaux de protection.

La décharge est opérationnelle elle reçoit environ 200 tonnes/jour de déchets. Ces déchets de nature différente (ménagers, industriels et hospitaliers), sont mis en décharge après le réglage.

Pour parer à cette situation un CET a été aménagé et ouvert vers la fin de l'an 2012. Mais, ce dernier se trouve dépassé par les quantités déversées chaque jour, et les deux premiers casiers seront presque remplis vers juin 2014. Il est envisagé de démarrer les travaux d'aménagement de 5 autres casiers, selon la direction du centre d'enfouissement technique.

#### **I.2. Conditions d'exploitation**

L'APC d'El Bouni est l'organisme responsable à l'exploitation de la décharge et du contrôle du site. Les conditions d'exploitation sont :

- absence de système de récupération et de traitement des lixiviats.
- le chemin de circulation est dans un mauvais état et complètement inaccessible pendant la période pluviale.
- L'aménagement non adéquat du site.
- L'absence d'une couche imperméable sur l'ancienne zone d'enfouissement.
- Une faible degré de compactage (la porosité élevée) et l'éparpillement des déchets qui s'en suit.

- Le taux d'évaporation élevé on dehors de la période hivernale. Les précipitations entraîneraient un lessivage et une infiltration des lixiviats à travers la masse des déchets en se chargeant tant en matières minérales qu'on organiques. Ces effluents constituent une source de nuisance (pollution).

### **1. 3 Activité de valorisation**

Les activités de valorisation des déchets par récupération, on comptait 13 micros entreprises de jeunes qui récupèrent deux fractions seulement à savoir le (papier et carton) et les plastiques (PEHD, PET). Cependant, une bonne fraction de la récupération des déchets est faite à titre informel sur le lieu même de la décharge par une centaine de personnes de différents âges et qui échappent à tout contrôle (Chaniti H. 2014).

## **I. 4. Les lixiviats de décharge**

### **I. 4.1. Définition**

Le terme lixiviat désigne les eaux météoriques qui en percolant à travers une décharge, s'enrichissent en divers polluants minéraux et organique avant de devenir des eaux usées appelées lixiviats ou encore «percolats », «lessivats », ou «jus de décharge ». La lixiviation est la migration des substances solubles et le lessivage correspond à la migration des particules en suspension.

### **I. 4. 2. La composition**

La composition des lixiviats de décharge est très aléatoire est varie on fonction de la nature des déchets, l'âge de la décharge, la technique d'exploitation et les conditions climatique.

### **I. 4. 3. Classification des lixiviats**

Millot, 1986 a classé les lixiviats en trois grandes familles :

#### **I. 4. 3. 1. Les lixiviats jeunes**

- charge organique élevée (DCO > 20 g/l) ;
- biodégradabilité moyenne (DBO<sub>5</sub>/ DCO > 0,3) ;
- pH de l'ordre de 6,5 ;
- concentration importante en acide carboxylique (80 % de la charge organique) ;
- teneur élevée en métaux lourds (jusqu'à 2 g/l) ;
- COT/ DCO est proche de 0,3 ;
- concentration importante en acide gras volatil (AGV) et faible teneur en composés de haut poids moléculaire.

**I. 4. 3. 2. Les lixiviats intermédiaires**

- charge organique moyenne ( $3 < \text{DCO} < 15 \text{ g/l}$ ) ;
- biodégradabilité assez faible ( $\text{DBO}_5 / \text{DCO} \approx 0,2$ ) ;
- acides carboxyliques représentent 20 à 30 % ;
- pH proche de la neutralité ( $\text{pH} \approx 7$ ) ;
- diminution de la teneur en métaux.

**I. 4. 3. 3. Les lixiviats stabilisés**

- charge organique assez faible ( $\text{DCO} < 2 \text{ g/l}$ ) ;
- biodégradabilité très faible ( $\text{DBO}_5 / \text{DCO} < 0,1$ ) ;
- pH largement supérieur à 7,5 ;
- absence d'acide carboxylique ;
- concentration faible en métaux lourds ( $< 50 \text{ mg/l}$ ) ;
- présence de composés difficilement oxydables ( $\text{COT}/\text{DCO} = 0,4$ ) ;
- concentration très importante en composés à haut poids moléculaire ( $\text{PMA} > 5000$ ).