

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2017

Faculté des sciences de la terre
Département de Géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Géologie

Option : *Eau et Environnement*

Par

HAOULI Zouina

Inventaire et mise en évidence de polluants, potentiels toxiques des eaux de lixiviation des mines d'Oum Teboul et d'Azzaba sur la qualité des ressources en eaux.

DIRECTEUR DE THESE: N. KHERICI Professeur (U.B.M. Annaba)

DEVANT LE JURY

Président : ZOUINI Derradji ,Professeur,Université Badji Mokhtar Annaba

Examineurs : LARABA Abdelaziz,professeur,Université Badji Mokhtar Annaba

DERRADJI ELFadel, ,Professeur,Université Badji Mokhtar Annaba

KACHI Slimane, Professeur,Université 8 mai 1945Guelma

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la patience et la force pour réaliser ce travail.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement et profondément Monsieur le Professeur KHERICI Nacer qui m'a encadré durant plusieurs années, pour sa disponibilité et sa patience. Pour son aide, son soutien et ses idées scientifiques précieuses.

Je tiens également à remercier, Mrs ,Zouini Derradji Professeur à l'université d'Annaba. De m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse, ainsi que LARABA Abdelaziz Professeur à l'université d'Annaba, DERRADJI El Fadel Professeur à l'université d'Annaba, KACHI Slimane , Professeur à l'université de Guelma, trouvent mes vifs remerciements de juger ce travail.

Je remercie spécialement Mme le professeur KHERICI-Bousnoubra Houria pour son aide et je lui exprime ici toute ma gratitude.

Je profite de l'occasion pour remercier tous les gents de (ANRH) Constantine , spécialement le Chef de Service Mme BENLAHRACHE Mounira pour son aide précieuse dans le domaine de l'analyse d'eaux.

Je remercie tous mes collègues et amies qui m'ont soutenue et m'ont encouragée pour accomplir ce travail

Si par mégarde, j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tout.

C'est à ma famille que je dédie ce travail.

Houina

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

ملخص

Abstract

Introduction générale

Chapitre I : L'identification des deux régions

I. Situation géographique	1
II. Cadre climatique	1
II.1. Température.....	2
II.2. Précipitations	2
III. Contexte géologique.....	3
IV.1. Minéralisations et historique des travaux miniers de la région d'Azzaba.....	6
IV.2. Minéralisations et historique des travaux miniers de la région d'Oum Teboul	8

Chapitre II : L'inventaire de polluants sur les deux sites

I. Introduction.....	11
II. Méthodologie.....	11
II.1. Echantillonnage.....	11
II.2. Lieu d'échantillonnage.....	12
III. Inventaire de la pollution physico chimique.....	13
III.1. Les paramètres physico chimique (mesure in situ).....	14
III.1.1. Température(T).....	14
III.1.2. Conductivité électrique (CE).....	16
III.1.3. Potentiel d'Hydrogène (pH).....	17
III.1.4. Potentiel d'oxydo-réduction(Eh).....	19
III.1.5. Oxygène dissous(O ₂).....	20
III.2. Eléments minéraux(les éléments majeurs).....	21
III.2.1. Calcium (Ca ⁺²).....	22
III.2.2. Magnésium (Mg ⁺²).....	23
III.2.3. Chlorure (Cl ⁻).....	24
III.2.4. Sodium (Na ⁺).....	26
III.2.5. Potassium (k ⁺).....	27
III.2.6. Sulfates (SO ₄ ⁻²).....	28
III.2.7. Bicarbonates (HCO ₃).....	29
III.3. Les éléments organiques.....	31
III.3.1. Les éléments nutritifs.....	31
III.3.1.1. Les différents formes de l'Azote.....	31
III.3.1.2. Les nitrates (NO ₃ ⁻).....	32
III.3.1.3. les nitrites (NO ₂ ⁻) ou azote nitreux.....	33
III.3.1.4. L'Ammonium (NH ₄ ⁺).....	34
III.3.2. Les nutriments	35
III.3.2.1. la demande chimique en oxygène(DCO).....	35
III.3.2.2. la demande biologique on oxygène(DBO5).....	36
III.2.3. Les éléments mineurs naturels.....	38

III.2.3.1. Phosphate (PO ₄).....	38
IV. Inventaire de pollution par les éléments métalliques en traces.....	39
IV.1. Le fer.....	39
IV.2.Zinc.....	41
IV.3.Cuivre.....	42
IV.4. Cadmium.....	43
IV.5. Mercure.....	44
IV.6.L'arsenic.....	45
V. Détermination et calcul de la pollution organique des eaux des régions d'études....	46
V.1.Présentation du logiciel Aquakit.....	46
V.2.Mode d'emploi du logiciel.....	46
V.3.Exemple d'application Aquakit	46
V.4.Les indicateurs de pollution organique	46
V.6.Les indicateurs d'eutrophisation.....	48
VI. Salinité des eaux d'irrigations et salinisation (Risque du sodium : SAR).....	49
VII. Inventaire de pollution bactériologique	53
VIII. Conclusion.....	55

Chapitre III: La caractérisation des eaux des deux sites d'étude d'un point de vue minéralogique, chimique et microbiologique

I.Introduction.....	57
II. Caractérisation chimique des deux sites	58
II.1. La composition chimique globale par logiciel Aquakit.....	58
II.1.1Présentation du logiciel Aquakit.....	58
II.1.2.Mode d'emploi du logiciel Aquakit.....	58
II.1.3.La composition chimique globale.....	58
II.2.Faciès chimique des eaux étudiées.....	61
III.2.1. Description de Diagramme de Piper.....	61
II.2.2.les faciès chimiques des eaux étudié par Diagramme de Piper	61
II.2.3. Description Diagramme de Schoeller-Berkaloff	62
II.2.4.les faciès chimiques des eaux étudié par diagramme de Schoeller Berkaloof	63
III .caractérisation minéralogique des eaux des deux sites	64
III.1. Description de logiciel PHREEQC.....	64
III.2.La caractérisation des minéraux.....	65
III.2.1.Les minéraux carbonatés	65
III.2.2.Les minéraux évaporitiques.....	66
III.2.3.Les minéraux de fer	67
III.2.4 .Les minéraux de Zinc.....	68
III.2.5. Les minéraux de cadmium	69
IV. Caractérisation bactériologique des deux sites.....	70
IV.1 Les paramètres bactériologiques	70
IV.1.1.Les bactéries aérobies revivifiables à une température de 22°C, de 37°C	70
IV.1.2.Les bactéries coliformes.....	70
IV.1.3. Les bactéries et spores de bactéries sulfito-réductrices.....	70
IV.1.4.Les entérocoques / Escherichia Coli	70
IV.2. Caractérisation bactériologique	70
V. Conclusion.....	73

Chapitre VI : Prédiction de drainage minier acide (DMA)et évaluation leur impact sur l'environnement et notamment les ressource en eau

I. Introduction	75
------------------------------	-----------

II. Description de drainage minier acide (DMA) (étude bibliographique).....	75
II.1.Minéraux neutralisants.....	77
II.2.Prédiction du potentiel de génération d'acide.....	78
III.Principe de la prédiction utilisée pour les deux sites d'études.....	81
III.1.La caractérisation des minéraux	82
III.2.Prédiction de drainage minier acide	84
IV.Evaluation l'impact de drainage minier acide sur l'environnement et notamment les ressources en eau.....	84
V.Conclusion	86

ChapitreV: Traitement du DMA

I. Introduction.....	87
II. Techniques des traitements de DMA	87
II.1. Techniques de traitements actifs.....	87
II.2. Techniques de traitements passifs.....	87
III. Revue des systèmes de traitement passif (tiré par Monique Melanson).....	88
III.1.Technique de marais épurateur construit.....	88
III.1.1 Technique marais anaérobie.....	88
III.1.2 Technique marais aérobie.....	89
III.1.3. Technique marais à écoulement vertical.....	90
III.2 Technique Drain calcaire anoxique.....	91
III.3 Technique Phytoremédiation.....	92
III.4. Technique Système de biosorption.....	93
III.5. Technique Bioréacteur.....	94
IV. Traitements passif potentiels pour la mine Oum Teboul	95
IV.1 Le fer.....	96
IV.2 Le Ph.....	96
IV.3 Les métaux.....	96
IV.4 Les matières en suspension.....	97
V.Conclusion.....	97
Conclusion générale	98
Bibliographie	

Liste des figures

Fig.1.Image satellitaire présente les deux zones d'étude.....	1
Fig .2 : Histogramme des moyennes mensuelles des températures en(°C) des deux stations Azzaba période(1990-2011)et Ain Assel période(2003-2013).....	2
Fig .3 : Histogramme des moyennes mensuelles des précipitations en (mm) des deux stations Azzaba période (1990-2011)et Ain Assel (période2003-2013).....	3
Fig.4.Carte géologique de la région d'Azzaba de J.M. Vila (1980).(tiré par Nechem 2009).....	4
Fig .5 : Extrait de la carte géologique régionale d'Oum Teboul J.M.Vila(1980) (tiré par Bentouili 2007).....	5
Fig.6 : Le croquis de la mine(1884).....	8
Fig.7.Image satellitaire présente les stations de prélèvement de la région d'Azzaba	14
Fig.8.Image satellitaire présente les stations de prélèvement de la région d'Oum Teboul.	14
Fig.9 : Histogramme des températures mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.....	15
Fig.10 : Histogramme des températures mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.....	15
Fig.11 : Histogramme des conductivités mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.....	16
Fig.12: Histogramme des conductivités mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.....	17
Fig.13 : Histogramme des pH mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.....	18
Fig.14 : Histogramme des pH mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba...18	
Fig.15 : Histogramme des Eh mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.....	19
Fig.16 : Histogramme des Eh mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.....	20
Fig.17 : Histogramme des O ₂ mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.....	21
Fig.18 : Histogramme des O ₂ mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba...21	
Fig.19 : Histogramme des Calcium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul....22	
Fig.20 : Histogramme de calcium des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	22
Fig.21 : Histogramme de magnésium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul....23	
Fig.22 : Histogramme de magnésium des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	24
Fig.23 : Histogramme des chlorures des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	25
Fig.24 : Histogramme des chlorures des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	25
Fig.25 : Histogramme de sodium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	26
Fig.26 : Histogramme de sodium des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	26
Fig.27: Histogramme de potassium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	27
Fig.28 : Histogramme de potassium des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	27
Fig.29 : Histogramme des sulfates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	28
Fig.30 : Histogramme des sulfates des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	29
Fig.31: Histogramme des bicarbonates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.30	
Fig.32 : Histogramme des bicarbonates des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	30
Fig.33.Cycle de l'azote dans l'eau.....	31

Fig.34 : Histogramme des nitrates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul....	32
Fig.35 : Histogramme des nitrates des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	32
Fig.36 : Histogramme des nitrites des eaux analysées de la région d'Oum Teboul...	33
Fig.37 : Histogramme des nitrites des eaux analysées de la région d'Azzaba....	33
Fig.38 : Histogramme d'ammonium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	34
Fig.39 : Histogramme d'ammonium des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	34
Fig.40 : Histogramme de DCO des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	36
Fig.41 : Histogramme de DCO des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	36
Fig.42 : Histogramme DBO5des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	37
Fig.43 : Histogramme de DBO5des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	37
Fig.44 : Histogramme d' O.Phosphates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul...	38
Fig.45 : Histogramme des O.Phosphates des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	38
Fig.46 : Histogramme de fer total des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	4
Fig.47: Histogramme de Fer totale des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	40
Fig.48 : Histogramme de zinc des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	41
Fig.49 : Histogramme de zinc des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	41
Fig.50 : Histogramme de cuivre des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	42
Fig.51 : Histogramme de cuivre des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	43
Fig.52 : Histogramme de cadmium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	44
Fig.53 : Histogramme de mercure des eaux analysées de la région d'Azzaba.....	44
Fig.54 : Histogramme d'arsenic des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.....	45
Fig.55.Exemple de l'application de logicielle Aquakit.....	46
Fig.56.Diagramme de Riverside et Wilcox.....	50
Fig.57. résultats de Diagramme de Riverside.....	51
Fig.58.Résultats de diagramme de Wilcox.....	52
Fig.59.composition chimique des eaux pour les stations (a) P1 ,(b)P2, (c)P3,(d)P4 (e)P5,(f)P6,(g)P7,(h)P8,(i)P9,(j)P10,(k)P11,(l)P12.....	60
Fig .60.Diagramme de Piper.....	61
Fig.61.Diagramme de Piper de la région d'Azzaba	62
Fig.62.Diagramme de Schoeller Berkaloof.....	63
Fig.63.Diagramme de Schoeller Berkaloof pour les eaux étudié.....	64
Fig.64: État des minéraux carbonatés dans l'eau dans la région d'Oum Teboul (a) dans la région d' Azzaba (b).....	66
Fig.65: État des minéraux évaporitiques dans l'eau dans la région de Oum Teboul (a) dans la région d'Azzaba (b).....	67
Fig.66: État des minerais de fer dans l'eau dans la région d'Oum Teboul (a), dans la région de Azzaba (b).....	68
Fig.67: Etat des minéraux de zinc dans l'eau dans la région de Oum Teboul (a), dans la région de Azzaba (b).....	69
Fig.68: État des minéraux de cadmium dans l'eau dans la région de Oum Teboul.....	69
Fig.69: Schéma d'un marais à écoulement vertical (modifié de Brunet 2000).....	91
Fig.70 .Drain calcaire anoxique en construction (tiré de Brunet 2000).....	92
Fig.71. Phytoaccumulation du nickel par une plante (tiré de United Nations Environment Programme (2005).....	93

Liste des tableaux

Tableau. 1 : les réserves minérales en 1965 (B.A.RE.M).....	9
Tableau. 2 : les réserves minérales en 1966 (Techno Export).....	9
Tableau.3.Les coordonnées réelles des sites d'étude.....	13
Tableau.4.les différents éléments chimiques entrant dans le classement de la pollution organique.	47
Tableau.5. Tableau résume les résultats d'application du logicielle Aquakit sur les analyses des zones d'étude.....	47
Tableau.6.Tableau résume les résultats du logicielle Aquakit pour l'eutrophisation.....	48
Tableau.7.les différents état d'utilisations des eaux pour l'irrigation.....	50
Tableau .8 : Grille de la qualité (IQM).....	53
Tableau.9: Les résultats obtenus après l'interprétation par IQM	54
Tbleau.10.Caractérisation bactériologique de la région Oum Teboul.....	71
Tableau.11. Caractérisation microbiologique de la région d'Azzaba	71
Tableau. 12.Réactions d'oxydation par l'oxygène et par le fer ferrique des principaux minéraux sulfurés (Walder et Schuster 1998; Bussière et al. 2005 de Rimstidt 1994).....	77
Tableau.13. Critères d'interprétation des essais statiques (tiré de:Villeneuve, 2008).....	79
Tableau.14.Dispositifs expérimentaux des différents essais cinétiques avec leurs descriptifs (résumé de Villeneuve 2004; NEDEM 1991).....	80
Tableau.15. l'état de saturation des eaux	82

Résumé

Les impacts sur l'environnement causés par les mines abandonnées représentent un fléau mondial puisque peu politique exige la réhabilitation des sites. En effet, l'Algérie devrait être à l'abri de ce drame, lorsque le propriétaire est introuvable ou non solvable, l'État hérite très souvent de ces sites et des problématiques liées comprenant notamment la production de drainage minier acide ; Ce dernier est une problématique réelle puisqu'elle rejette dans l'environnement et des caractérisées fortes acidités et une concentration élevées en métaux aux écosystèmes avoisinants. C'est le cas par exemple Oued El-Eurg, voisin du site minier d'Oum Teboul et Oued Fendek voisin du site minier d'Azzaba.

L'objectif principal sera en premier lieu et de faire un inventaire et une mise en évidence des polluants existants dans les cours d'eaux avoisinants des rejets des mines d'Oum Teboul et d'Azzaba, par la suite voir le potentiel toxique de ces rejets et leur impact sur les ressources en eaux de ces régions. Ainsi dans les travaux de recherche, il est nécessaire de faire des caractérisations minéralogiques chimiques et bactériologiques pour mieux comprendre les mécanismes de transfert des polluants et prédiction de DMA . Ensuite en vue de minimiser les impacts du drainage acide sur l'environnement, il faut le recueillir, le traiter et le neutraliser de ce fait, il importe de trouver des solutions à la fois efficaces sur le plan environnemental et réalisables sur le plan économique.

Dans le but d'atteindre notre objectif, deux séries d'échantillonnages ont été réalisé pour effectuer des analyses physicochimiques et bactériologiques sur les deux régions d'études.

Les résultats obtenus indiquent l'existence du DMA dans le canal de rejet minier d'Oum Teboul et Oued El-Eurg dus aux résidus miniers abandonnés provoque des valeurs excessifs en fer, zinc, cuivre , sulfate , la diminution de pH , l'augmentation d'Eh et le manque de la pollution microbiologique, due au milieu acide, qui causait la mort de la vie aquatique et bactériologique. En plus ils représentent des pollutions importantes dans les deux régions au niveau des eaux des oueds dues essentiellement au déversement des rejets urbains, agricoles, résidus miniers abandonnés.

Mots clés : pollution, ressources en eaux, Résidus miniers, DMA, qualité, Oum Teboul, Azzaba.

ملخص :

المخاطر البيئية الناجمة عن المناجم المهجورة تمثل آفة عالمية في العديد من المجتمعات بدور رئيسي في الاقتصاد والتنمية وفي قطاع التعدين, إذ أن السياسة تتطلب إعادة تأهيل هذه المواقع.

وفي الواقع, فإن الجزائر ينبغي أن تكون في مأمن من هذه المأساة وبالتأكيد تراث كثيرا من هذه المواقع بما في ذلك إشكالية تصريف الحمض المنجمي حيث يعتبر مشكلة حقيقية في البيئة و النظم الايكولوجية المحيطة إذ تحتوي على كميات عالية من المعادن وتتسم بدرجة حموضة عالية. ونعطي مثلا لذلك وادي العرق المجاور لمنجم أم الطبول ووادي فندق المجاور لعزابة.

والهدف الرئيسي هو في المقام الأول, حصر أو تحديد الملوثات الموجودة في مجاري نفايات المناجم القريبة من موارد مياه هذه المناطق بعد إثبات إمكانية سمية هذه الانبعاثات وهكذا في البحوث من الضروري أن نعرف الطبيعة و الخصائص الجيولوجية الكيميائية و البكتريولوجية حيث تساعدنا في فهم آليات نقل الملوثات. بعد ذلك من اجل التقليل من الآثار الحمض المنجمي على البيئة من الضروري إيجاد حلول فعالة بيئيا وقابلة للتنفيذ على الصعيد الاقتصادي.

النتائج تشير إلى وجود الحمض المنجمي في قناة صرف مياه منجم أم الطبول ووادي العرق المجاور بسبب القيم المفرطة من الحديد والزنك والنحاس، الكبريتات، وانخفاض درجة الحموضة، وزيادة الأكسدة المحتملة وعدم التلوث الميكروبي، ويرجع ذلك إلى الوسط الحمضي الذي تسبب في وفاة الحياة المائية والبكتريولوجية. وبالإضافة إلى ذلك فهي تبرز تلوث هام في المنطقتين في مياه الأودية ويرجع ذلك أساسا إلى تصريف النفايات الحضرية والزراعية، مخلفات المهجورة.

الكلمات المفتاحية :

التلوث, والموارد المائية, مخلفات التعدين, الحمض المنجمي, عزابة, أم الطبول.

Abstract

The environmental impact caused by abandoned mines is a global disaster because some policies may require site rehabilitation. Indeed, Algeria should be protected from this tragedy when the owner is not found or not solvent, the State very often inherits these sites that are related to problems including in particular the production of acid mine drainage. The latter is a real problem since it rejects in the environment and characterized strong acidity and a high concentration of metals to the neighboring ecosystems. This is the case, for example, with wadi Eurg near the mining site of Uum Teboul and wadi Fendek near the Azzaba mining site.

The main objective will be to carry out an inventory and identification of the pollutants existing in the rivers adjacent to the discharges of the Uum Teboul and Azzaba mines, and subsequently, even the toxic potential of these And their impact on the water resources of these regions. Thus in the research work it is necessary to make chemical and bacteriological mineralogical characterizations to better understand the mechanisms of transfer of pollutants and prediction of AMD. Second, in order to minimize the impacts of acid drainage on the environment, it must be collected, processed and neutralized thereby, it is important to find solutions that are both environmentally effective and economically feasible. In order to achieve our objective, two sets of sampling were carried out to perform physicochemical and bacteriological analyzes on the two study regions.

The results obtained indicate the existence of the DMA in the channel of mining rejection of Umm Teboul and Wadi El-Eurg due to mine tailings abandoned causes excessive values in iron, zinc, copper, sulphate ,the decline in pH , the increase of Eh and the lack of microbiological pollution, due to the acid environment, which caused the death of the aquatic life and bacteriological weapons. In addition they represent important pollution in the two regions at the level of the waters of the wadis due primarily to the disposal of urban discharges, agricultural, tailings abandoned.

Key words: pollution, water resources, Mining residues, DMA, quality, Uum Teboul, Azzaba.

Introduction générale

Pendant de nombreuses années, la préservation de l'environnement et l'idée de l'évolution attirant toutes les attentions humaines, que ce soit d'un point de vue des émissions atmosphériques, des ressources énergétiques limitées aussi de la pollution des sols et des eaux. La croissance continue des besoins en eau pour la consommation humaine et l'agriculture font du renouvellement et la protection de cette ressource est un enjeu majeur. Parmi les pollutions qui influencent les milieux aquatiques, les drainages de mine constituent l'une des plus préoccupantes.

Les activités de l'industrie minière provoquent forcément un impact sur l'environnement de par leur nature. En effet la détérioration grave des écosystèmes dues à la fermeture des sites miniers a été laissée à l'abandon sans planification convenable et à l'absence de contrôle. Ainsi d'importantes quantités de résidus miniers riches en métaux lourds tels que Pb, Zn, Cd, Sb, As et Hg sont soumis aux vicissitudes climatiques spécifiques de ces régions permettant de constituer des zones de forte pollution. (Sebei, 2007 ; Boussen, 2010 ; Chakroun et al., 2006 ; Ghorbel et al., 2010). En plus l'acidification des cours d'eau et la libération des métaux lourds en fortes concentrations dans le milieu récepteur causé par le drainage minier acide sont d'un danger décisif et datent pendant l'exploitation minière depuis longtemps. Afin de trouver des solutions remédiables de ce problème il est nécessaire de bien comprendre tous les mécanismes à la base de la formation du drainage acide.

Comme tous les pays, l'Algérie subit dans le passé des sérieux problèmes environnementaux et notamment la pollution des ressources en eau provoquée par l'exploitation minière de certains gisements, tel que la mine d'Oum Teboul près de la frontière tunisienne et la mine mercurielle d'Azzaba. Aujourd'hui, malgré la fermeture des mines d'Oum Teboul et d'Azzaba de plusieurs années, le problème de la pollution des eaux provoquée par les résidus miniers abandonnés existe encore. De ce fait l'objectif principal de notre travail sera en premier lieu est de faire un inventaire et une mise en évidence des polluants existants dans les eaux avoisinées de ces mines d'Oum Teboul et d'Azzaba, par la suite voir le potentiel toxique et leur impacts sur les ressources en eau de ces régions.

Pour atteindre le but recherché (inventaires de la pollution des eaux avoisinées des mines abandonnées d'Oum Teboul et d'Azzaba) nous avons développé cinq chapitres et on utilise plusieurs outils chimiques et statistiques pour interpréter les données obtenues.

Le premier chapitre : Identification des deux régions qui comportent la situation géographique, le contexte géologique et la minéralisation et historique des travaux miniers des deux régions.

Le deuxième chapitre : l'inventaire des polluants consiste à faire l'évaluation de la pollution physicochimique, la pollution par les métaux lourds à partir des résultats des analyses dont on fait la comparaison de ces résultats avec la norme OMS aussi on évalue la pollution organique où on utilisait le logiciel Aquakit pour calculer l'IPO et l'eutrophisation, on utilise le diagramme Riverside et Willcox pour évaluer le risque de salinité SAR et en fin la pollution bactériologique à l'aide de méthode IQM de Bovesse et Depelchin (1980).

Le troisième chapitre : Se consacre à la caractérisation chimique, minéralogique, bactériologique pour mieux comprendre les mécanismes biogéochimiques pour cela on utilise la modélisation hydrochimique, qui nécessite l'utilisation du logiciel Aquakit pour la composition chimique, diagramme de Piper et Schoeller Berkaloff pour obtenir le faciès chimique ; logiciel Phreeqc pour évaluer l'état de saturation des minéraux. Pour la caractérisation bactériologique on s'est basé sur les analyses bactériologiques pour identifier les bactéries dans ces eaux.

Le quatrième chapitre : Consiste à faire une prédiction de drainage minier acide avec la modélisation hydrochimique à l'aide du logiciel Phreeqc et évalue leur impact.

Le cinquième chapitre : Présente les différentes techniques de traitement du DMA et établir ces technique pour remédier le DMA dans la région d'Oum Teboul et des recommandations pour limiter la contamination des eaux issues des résidus abandonnés.

Le présent travail se termine par une conclusion générale faisant ressortir les résultats de l'étude.

I. Situation géographique des zones d'étude

La zone d'Azzaba se trouve à proximité de l'oued Fendek dans le Nord-Est de l'Algérie, elle appartient à la partie orientale de la série Numidique. Au Sud-Est et à 32 Kms du chef-lieu de wilaya de Skikda, elle est située à 80 Kms au Nord-Est de Constantine et à 70 Kms d'Annaba (**Fig.1**).

La deuxième région d'étude appartient à la commune d'Oum Teboul appelée Essouarekh दौर d'El -Kala, wilaya d'El Tarf , d'une superficie de l'ordre de 87,35km² limitée : Au Nord, par la mer méditerranée, à l'Est, par la frontière algéro- tunisienne, au Sud par les deux commune Ramel-Essouk et El Aioun et à l'Ouest par la ville d'El-Kala(**Fig.1**) .



Fig.1. Image satellitaire présentant les deux zones d'étude.

II. Cadre climatique

La région d'Azzaba est caractérisée par un climat méditerranéen sec et un hiver pluvieux et modéré. La moyenne annuelle des précipitations atmosphériques est de l'ordre de 700 à 800 mm, où le maximum est enregistré aux mois de Décembre-Février.

La région d'Oum Teboul est méditerranéen subtropical, caractérisé par la chaleur et l'humidité en été, et un hiver doux et pluvieux. Les précipitations peuvent variées entre 167 et 1043 mm. Ceci permet de classer la région d'Oum Teboul parmi les zones humides, à cause de sa situation bordière avec le lac Tonga.

II .1. Température

La température est un élément essentiel qui conditionne le climat d'une région, elle permet de déterminer l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement interviennent dans le développement du rythme-biologique des végétaux et facilitent l'établissement du bilan hydrique. La figure(2) représente les températures moyennes mensuelles enregistrés aux deux stations d'Azzaba (1999-2011) et d'Ain Assel(2003-2013).

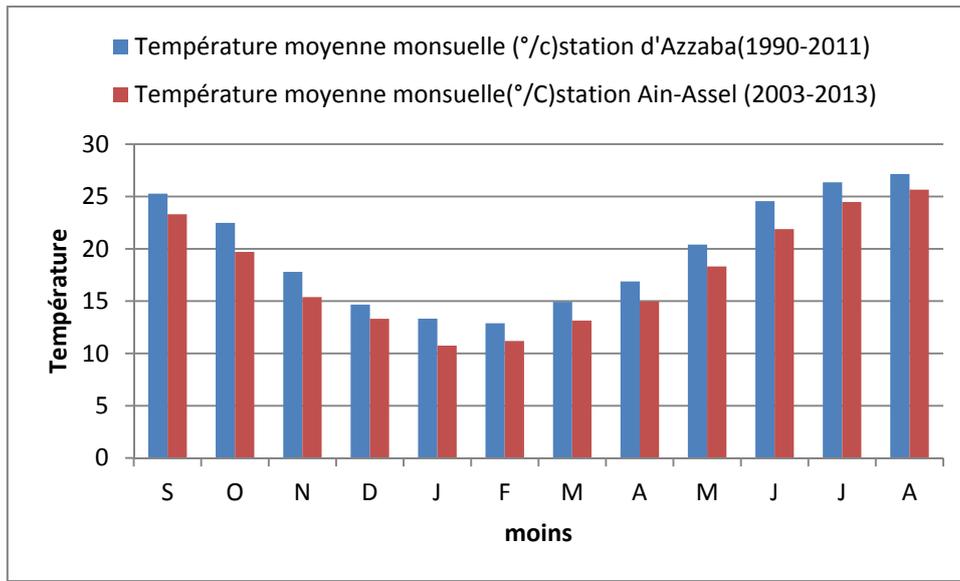


Fig .2 : Histogramme des moyennes mensuelles des températures en(°C) des deux stations :Azzaba (1990-2011)et Ain Assel (2003-2013)

D'après l'histogramme des moyennes mensuelles des températures (fig.2) on remarque deux saisons thermiques, l'une chaude et l'autre froide pour les deux zones d'étude. La saison froide est d'une température moyenne mensuelle inférieure à 20°C du mois de novembre au moins d'avril, les plus basses températures s'observent en décembre, janvier et février aux deux stations.

La saison chaude est marquée par une augmentation progressive de la température caractérisée par des moyennes mensuelles dépassants les 20°C de juin à septembre avec des maxima enregistrés aux mois de juillet et aout, cette forte température peut engendrer une sécheresse provoquant de forte évaporation et ainsi un manque d'écoulement important.

II. 2. Précipitations

Les précipitations constituent un facteur très important dans l'étude climatologique, elles conditionnent le régime des cours d'eaux et l'alimentation des nappes souterraines.

La figure (3) représente les précipitations moyennes mensuelles (mm) dans les stations d'Azzaba et d'Oum Teboul (période1990-2011).

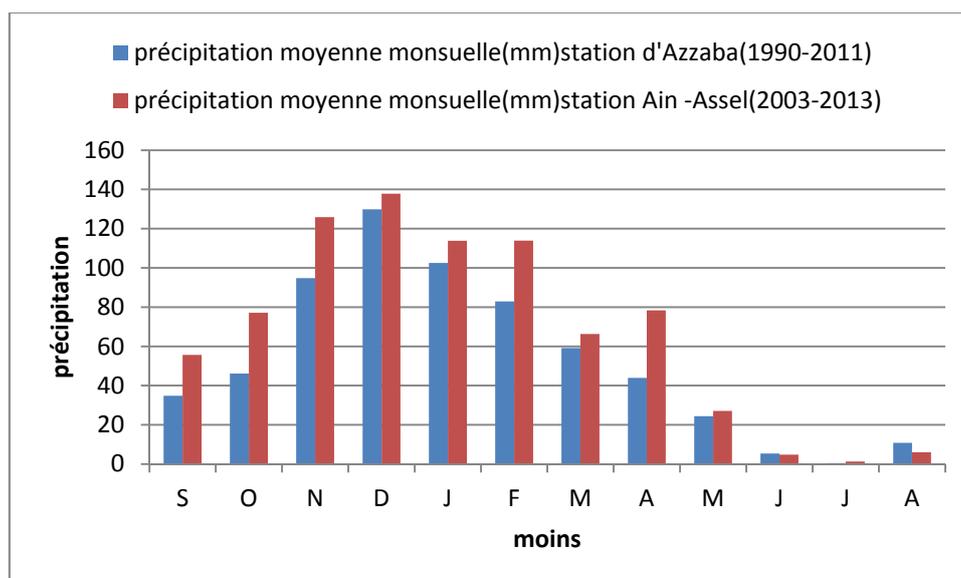


Fig .3 : Histogramme des moyennes mensuelles des précipitations en (mm) des deux stations : Azzaba (1990-2011) et Ain Assel (2003-2013) .

D'après l'histogramme des précipitations mensuelles des stations d'Azzaba et d'Ain Assel (fig.3), on enregistre le maximum des précipitations au mois de décembre d'une hauteur de 130mm-138mm, par contre le mois le plus sec est celui de juillet où les précipitations sont nulles donc on constate, que la saison hivernale est la plus pluvieuse.

III. Contexte géologique

Les deux zones d'étude font partie de l'ensemble géologique du Tell-algérien nord-oriental qui s'étend de la région du Constantinois à la frontière algéro-tunisienne, et qui possède l'une des structures les plus plissées et les plus compliquées de l'Afrique du Nord, lié à l'orogénèse alpine périméditerranéenne.

Les gisements mercuriels d'Azzaba sont situés sur le flanc nord de la chaîne calcaire, au Sud de la ville d'Azzaba. La zone minéralisées' étend sur 24 kms de long et de 1 à 2,5 Kms de large (Fig.4). Cette zone comporte des parties plissées, des écaillés, des blocs tectoniques tardifs.

Les principales unités structurales qui caractérisent la géologie de la région sont : le socle kabyle, la dorsale kabyle (chaîne calcaire), les flyschs maurétanien et massylien, le nummulitique II et l'Oligo-Miocène kabyle (O.M.K), et enfin l'Oligo-Miocène, avec tous les problèmes que pose son allochtonie. Le terme de Nummulitique II désigne, pour J.F. RAOULT (1974), les dépôts postérieurs à la phase fini-lutétienne et qui atteignent l'Oligocène supérieur (**Benhamza,2007**).

L'étude géologique détaillée du secteur du Kef Oum Teboul a permis de tirer les résultats suivants.

De perspective lithostratigraphique, les deux secteurs présentent :

-un ensemble allochtone, qui comporte deux complexes; le complexe de Flysch à micro brèche (où son assise inférieure affleure uniquement dans la partie Sud-Est d'El-Aioun), et le complexe Numidien, qui est caractérisé par son assise supérieure gréseuse dont ses structures ont une disposition interne simple avec une pente douce (presque horizontale) (**Fig.5**).

-un ensemble autochtone post-nappe, qui renferme la nappe Miocène qui se développe dans sa grande partie dans le secteur d'El-Aioun, recouvert par des dépôts quaternaires.

Du point de vue tectonique, la région d'étude englobe deux types de fractures : non minéralisées, et minéralisées; dont les plus favorables à la minéralisation sont celles de direction Est-Ouest (**Bentouili,2007**).

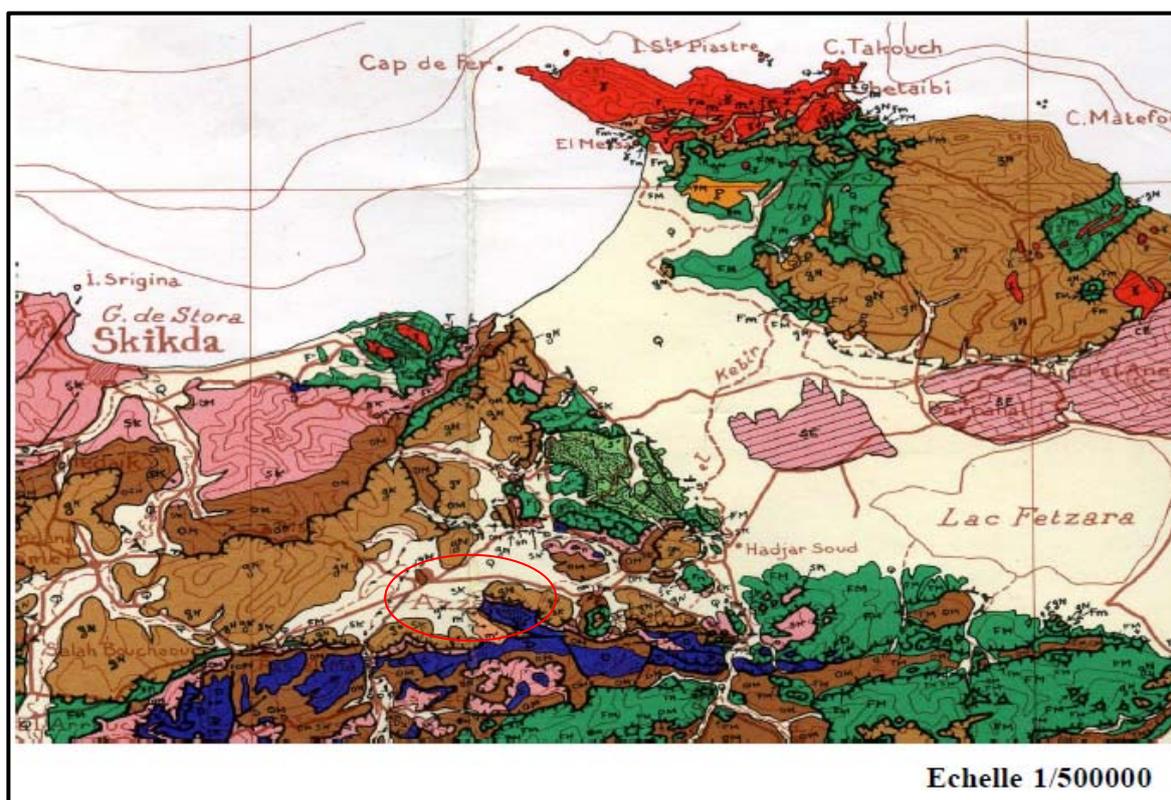


Fig.4 . Carte géologique de la région d'étude d' Azzaba de J.M. Vila (1980).(tiré par Nechem 2009)

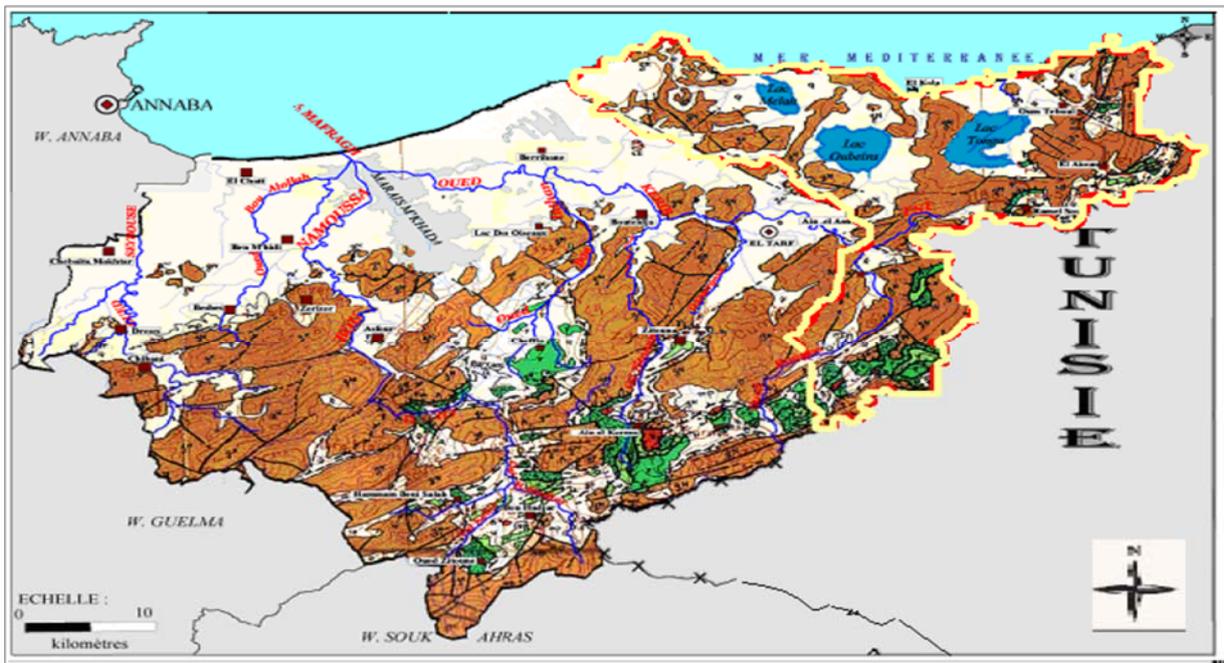
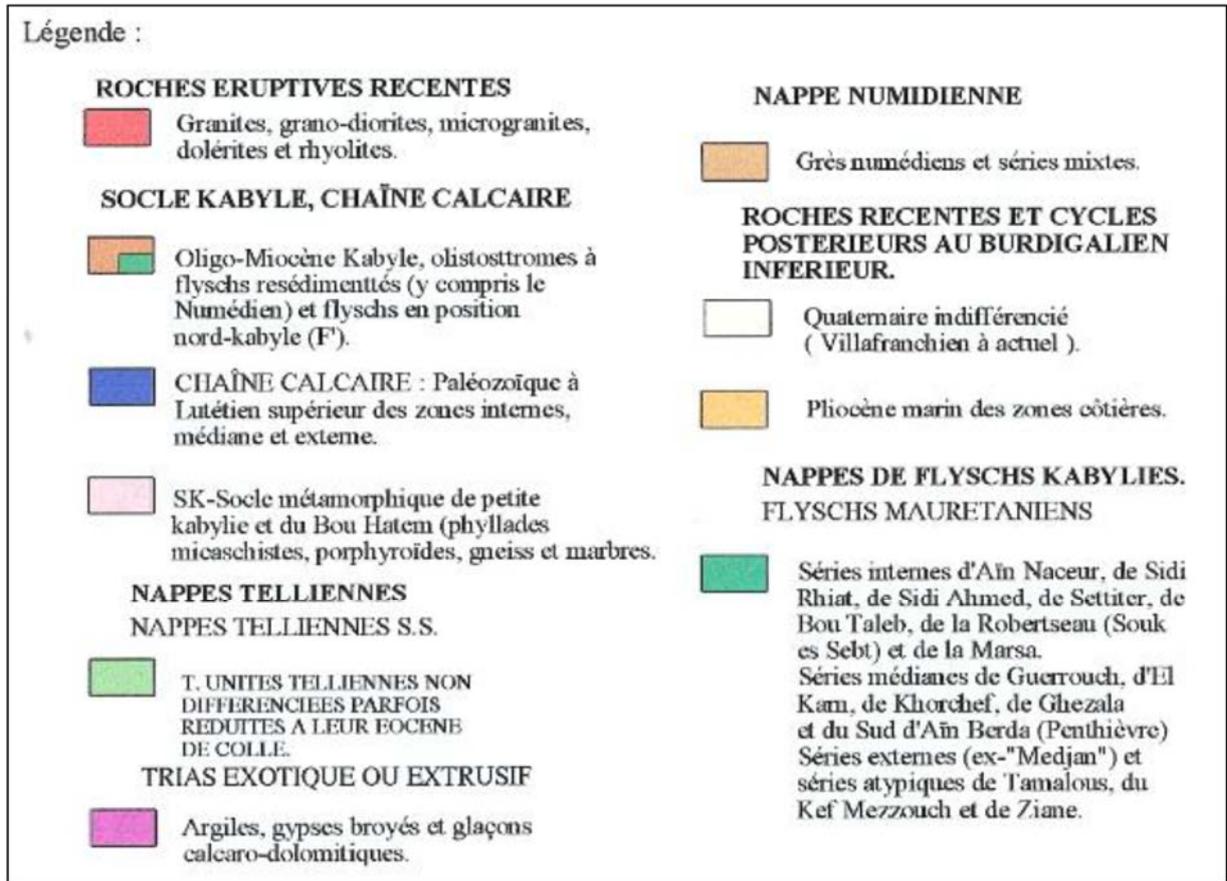


Fig. 5 : Extrait de la carte géologique régionale de la région Oum Tebouh J.M.Vila (1980) (tiré par Bentouili 2007)



VI.1 Minéralisations et historique des travaux miniers de la région d'Azzaba

Depuis longtemps les premiers travaux géologiques réalisés dans la région d'Azzaba. Le gisement de barytine, mercuro-polymétallique de Grayer a été connu dès l'époque romaine. Les ruines romaines et les vestiges d'anciennes mines sont les principaux témoins (Bekhouché, 2009).

En 1850, ce même gisement a fait l'objet de travaux de creusement de galerie effectué par Bayer. Depuis et durant toute l'époque coloniale plusieurs travaux ont été réalisés.

En 1853, le gisement de mercure de Ras El Ma a été mis en évidence, son exploitation a débuté en 1861 et s'est achevée en 1950 avec des périodes d'interruption.

En 1881 Tissot a fait une étude par itinéraires de reconnaissance reportés sur la première carte géologique du département de Constantine avec une notice explicative.

Le premier levé géologique au 1/50.000 des feuilles de Jemmapes (Azzaba) N°32, de Hammam Meskoutine N° 53 et celle de Saint Charles (Ramdane Djamel) N° 31 au 1/30.000 a été effectué par Delau durant la période allant de 1932 à 1937.

Les résultats ont été présentés dans une monographie, publiée en 1938. Delau a apporté certaines précisions concernant la stratigraphie et a essayé de donner une explication aux structures tectoniques de la région.

En 1952, sur la demande du BRGM (bureau de la recherche géologique et minière), la firme (Crelus) a exécuté des travaux géophysiques par la méthode (TURAM) sur le gisement de Mra-Smaet mis en évidence deux groupes d'anomalies, l'un d'eux lié à de petites ruptures, l'autre à des filons poly métalliques.

Plus tard, les travaux de Durand Delga(1955) ont été d'une grande importance pour la compréhension de la structure et du développement paléogéographique de l'Algérie du Nord.

En 1962 Kiek en a publié le schéma tectonique de l'Algérie du Nord, où il a mis en relief cinq nappes tectoniques et de grandes failles.

Au milieu des années soixante, en collaboration avec l'université de Paris, Raoult et Vila ont commencé à effectuer des études structuro- paléogéographiques dans la partie Est de la Chaîne Numidique et des régions limitrophes. Ces travaux ont été poursuivis jusqu'à 1972 et furent achevés par l'établissement du levé géologique au 1/25000.

En 1964 par décret présidentiel a été crée le BAREM (Bureau Algérien de la recherche et d'exploitation minière), devenu en 1967 SONAREM (Société Nationale de la recherche et d'exploitation minière) qui a conclue un contrat avec l'URSS concernant l'exécution des travaux de prospection géologique dans la région.

Pendant la période 1966-1970 les travaux de recherche et le levé géologique effectués par les soviétiques sur une vaste superficie (90 Km²) de la pente Nord de la chaîne Numidique ont permis de délimiter la zone Nord Numidique, de découvrir les gisements de mercure et de mettre en évidence 27 indices mercuriels, poly métalliques et de cuivre.

L'exploitation des gisements ISMAIL, M'RASMA I et II et GUENICHA situés à 6 Km de la ville de Azzaba wilaya de Skikda, qui ont servi de base à l'implantation du complexe mercuriel de Azzaba, dont les travaux ont été finalisés en 1971. Le complexe mercuriel de Azzaba (CMA), qui a pour activité la production du mercure, utilise comme matière première du cinabre (HgS) et en consomme **65.000tonnes/An**. Les réserves de ces derniers ont diminué ces temps-ci, rendant leur exploitation caduque.

Le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement a annoncé, le 07 - 05 - 2006 , la fermeture du complexe mercuriel parce que il détient un stock de déchets spéciaux dangereux, le plus important sur le territoire national, constitué d'un million de tonnes de scories de minerai de mercure qui sont entreposées aux sein de l'usine à l'air libre et dans des conditions non conformes aux normes environnementales Ainsi, faute d'entrants, la production n'arrivait plus à couvrir les charges dont les salaires et autres frais de fonctionnement. L'unité s'est retrouvée alors en cassation de paiement et a perdu la raison économique de son existence.

VI.2. Minéralisations et historique des travaux miniers de la région d'Oum Teboul

Les premiers renseignements sur les travaux géologiques effectués correspondent aux années 50 du XIX siècle. Etant découvert en 1845, le gisement polymétallique de Kef Oum Teboul, reste et jusqu'à présent, le plus important sur tout le territoire.

L'exploitation du gisement avait commencé en 1849, malgré l'insécurité du secteur, par un négociant marseillais. De grosses dépenses à cette époque, alors, furent engagées route, voie ferrée de la mine à La Messida où fut construite une fonderie, assèchement du lac Tonga (Fig.6).

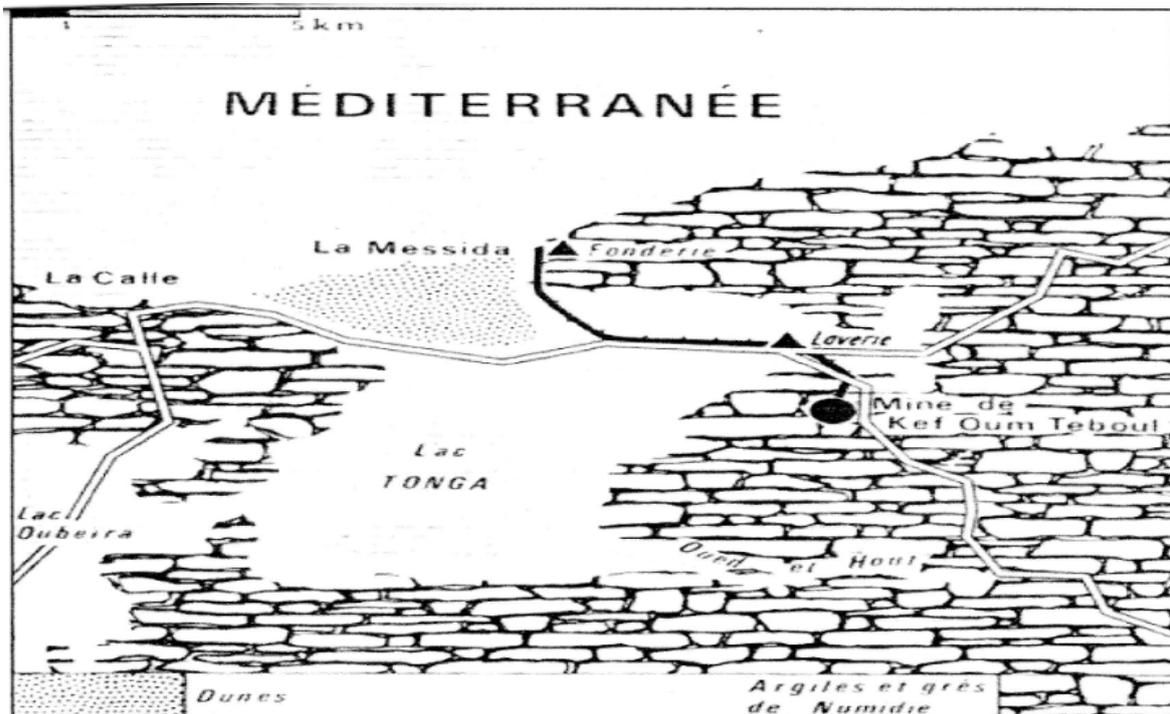


Fig.6 : Le croquis de la mine(1884).

320 milles tonnes des minerais riches ont été extraits durant la période de 1849-1914.

L'exploitation été portée essentiellement sur le filon principal et le filon de cuivre à travers les galeries, des travers-bancs et une bure. Elle est faite avec remblais complets, ou par gradins renversés dans les parties étroites du gîte, soit par tranchées horizontales lorsque l'étendue du remplissage dépassait 2,5m, encouragés par l'allure régulière du gîte dans les niveaux supérieures. Les renseignements concernant le rythme d'extraction du minerai au cours des années postérieures manquent.

La prospection et l'exploitation du gisement comprenaient plusieurs périodes:

En 1857 à 1893 a été exploité les colonnes de l'Est de l'Ouest et du centre.

En 1899 à 1903 l'exploitation a été reprise par une société nouvelle après un chômage

qui a duré jusqu'au mois de mars 1907, la société Rochette a repris les travaux.

En 1939 la société «Pennârroye» établit un projet de la mine après avoir résolu le problème du traitement de minerai au laboratoire. Les travaux de remise en état débutèrent en 1941.

Après l'indépendance et en, 1965, le «B.A.R.E.M» a entrepris les premières recherches géologiques, qui ont prouvé les quantités de minerai.(Tableau.1).

Tableau .1: les réserves minérales en 1965 (B.A.RE.M).

Catégorie	Quantité de minerai(tonnes)	Cu%	Zn%	Pb%
C₁(certaines)	452421	2.33	0.69	0.15
C₂(possibles)	676482	2.48	1.04	0.23

Les recherches complémentaires (1966) ont été entreprises par une société bulgare (Techno Export) où les ressources minérales sont évaluées selon le prélèvement des échantillons effectué sur les niveaux d'extraction et les forages minéralisés avec une maille de «100x100 mètre ».

Le mur inférieur de minéralisation n'a pas été atteint. Il y a des potentiels qui peuvent augmenter les ressources en profondeur et dans les deux flancs du filon principal.

Les ressources évaluaient seulement pour le filon principal (selon des normes soviétiques), sont résumées dans le (Tableau.2) comme suit:

Tableau .2 : les réserves minérales en 1966 (Techno Export).

Catégorie de ressource	Selon la classification Algérienne	Evaluation (estimation) en « mille tonne»	Cu (%)	Zn (%)
B	Mesurée	36.3	2.79	2.07
C1	Indiquée	1375.5	2.42	0.9
B+C1	Mesurée+ Indiquée	1411.8	2.43	0.9
C₂	présumée	872.0	2.52	1.18

En 1967 la « SONAREM », a entrepris les travaux de déblayage, et de nettoyage, des travers bancs (1250 m).

En 1969, l'accès de la mine est devenu possible.

Le 30 /06 / 1969, un contrat à été signé entre la « SO.NA.R.E.M » d'une part, et la société « techno export » d'autre part, pour le dénoyage, nettoyage, déblayage, du «bures » ,des anciennes galeries aux niveaux 10-14-16, prolongation du 16 ème niveau de 50 m, creusement au 18^{ème} niveau d'un travers-banc de 90m et de 100m de galerie dans la direction ouest, creusement d'une cheminée entre les niveaux 14 et 10 Est, de longueur 95m, et section 5 m.

Sur le dépôt, une augmentation des ressources de catégorie « C₂» a été atteinte par (Neserenko 1977-81), et elle se présente comme suite

* 1045.1 mille tonnes de Cuivre

* 13.0 mille tonnes de Zinc

* 8.5 mille tonnes de plomb

Selon les résultats obtenus, le flanc sud de dépôt montre une potentialité minière très importante.

Les travaux et l'entretien de la mine ainsi que l'exhaure ont été maintenus jusqu'au décembre 1982, A cette date, la mine a provoqué des gaz suite à plusieurs éboulements à travers plusieurs niveaux, et elle est devenue impraticable à son accès. Le 03/04/1983, une commission à sa tête la direction générale était de passage au niveau de l'unité pour la fermeture de cette mine et dégager son pléthore.

Enfin, à l'heure actuelle il est impossible de pénétrer dans la mine (**Bekkar,2009**) .

I. Introduction

Actuellement, la pollution des eaux est devenue un phénomène mondial qui pose un danger grave pour l'environnement et qui nécessite une lutte continue, comme beaucoup de produits agricoles et industriels sont de plus en plus responsables de la parution de cette pollution. L'exploitation minière de métaux de base (Cu, Pb, Zn, Hg) est comptée parmi les activités industrielles génératrices de sérieux problèmes de pollution métallique des ressources en eau. En plus de leur charge en métaux lourds, les résidus qui en résultent sont enrichis en sulfures de fer (pyrite et pyrrhotite) qui sont économiquement non exploitables par ces industries.

En effet, la pollution de l'eau, quel que soit sa nature (organique, chimique ou microbiologique) peut avoir des résultats néfastes en se traduisant par des effets très spécifiques résultant aux conditions environnementales propres dans les milieux aquatiques (Ramade, 2002). Elle peut s'avérer provenant par de nombreuses substances différentes qui ne sont pas totalement analysées ou qui ne sont que de transit dans le milieu étudié. On outre, les analyses chimiques des eaux permettent seulement l'identification des polluants potentiels mais ne peuvent pas confirmer leur effet toxique sur la santé humaine et l'environnement.

Les deux sites d'étude sont des régions rurales contenant une zone minière abandonnée, a connu dans le passé une forte pollution environnementale notamment la pollution des eaux superficielles et souterraines par les métaux lourds à cause des rejets de mine. Dans ce contexte s'inscrit notre objectif de travail ; dans le but de faire une évaluation et un diagnostic actualisé de la pollution physicochimique, organique, bactériologique et la pollution par les métaux lourds dans les eaux superficielles et souterraines pour les deux sites d'étude (OumTeboul et Azzaba).

II. Méthodologie

II.1. Echantillonnage

Tenant compte des différents cours d'eaux et puits éventuels connectés et sous influencés par les résidus miniers proches de la mine d'Oum Teboul et la mine de mercure d'Azzaba, l'échantillonnage a été réalisé au mois de novembre 2014 a été mené sur six (6) stations de prélèvement à chaque site. Les six (6) stations sont réparties spatialement à trois (3) stations pour les eaux superficielles (oued) et trois (3) stations pour les eaux souterraines (puits). La position a été déterminée à l'aide d'un GPS.

L'échantillon d'eau a été prélevé au mois de novembre 2014, cette période était sèche. Les paramètres physico-chimiques : la température(T), le potentiel hydrogène (pH), la conductivité

électrique (CE) et l'oxygène dissous (O_2), sont mesurés in situ à l'aide d'un appareil multi paramètre (WTW 3026).

Les échantillons d'eau destinés aux analyses des éléments chimiques majeurs et en traces (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cu , Hg , Fe^{3+} , As , Zn , Cd) sont pris dans des bouteilles en plastique, pour conserver les paramètres organiques (NH_4^+ , PO_4^- , NO_3^- , NO_2^-) 2 gouttes de $HgCl_2$ ont été ajoutées pour 1,5 litre d'eau et 1 goutte de l'acide nitrique (HNO_3) pour 0,5l d'eau pour les échantillons destinés à l'analyse des éléments en trace.

Les analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Constantine.

L'échantillonnage destiné aux analyses des éléments bactériologiques des eaux de surface et des puits a été conservé dans des bouteilles en verre stérilisées et transportées dans une glacière à $4^\circ C$ vers le laboratoire (Horizon à Annaba).

Le sodium et le potassium ont été dosés par spectrométrie à flamme et les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , NH_4^+ , PO_4^-) ont été mesurés par la méthode colorimétrique (auto-analyseur Skalar).

Les éléments en trace (Zn^{3+} , Cu , Fe^{3+} , As^{3+} , Cd) ont été analysés à l'aide d'un spectromètre à plasma inductif (ICP-échantillonnage), la caractérisation et l'évaluation du degré de contamination organique à savoir la demande biochimique en oxygène (DBO_5) a été faite par la méthode de dilution ou méthode respirométrique (DBO-mètre), la demande chimique d'oxygène DCO a été mesurée par DCO-mètre rat2- oxydation à chaud en présence de dichromate de potassium.

- Les bactéries aérobies ont été analysées par la méthode (NFT90-401),
- Les bactéries sulfite-réducteur en dénombrement /ml ont été analysées par la méthode (Gélose VF),
- Les Coliformes (NPP) /100ml et Coliformes thermotolérants (NPP) /100ml ont été analysés par la méthode (NFT90-413),
- Les Escherichia coli ont été dénombrés par la méthode (NFT90-414), les Staphylocoques pathogènes par la méthode (NFT90-421) et les Streptocoques du groupe D (NPP) /50ml par la méthode (NFT90-411).

II.2. Lieu d'échantillonnage

Douze (12) stations de prélèvement (P1 à P12) réparties dans les zones d'étude, six (6) stations pour la zone d'Azzaba et six (6) stations pour la zone d'Oum Teboul ; dont trois (3) stations pour les eaux superficielles (Oued) et trois (3) stations pour les eaux souterraines (puits). Les coordonnées des points de prélèvement ont été déterminées par un GPS.

Les stations de prélèvement des échantillons :

P1, P2, P3 : eau de puits Oum Teboul au voisinage de la mine d'Oum Teboul.

P4 : eau du canal qui sort de la mine d'Oum Teboul.

P5 : point d'eau de l'oued Eurg Oum Teboul.

P6 : eau de point de la jonction de l'oued Eurg avec le canal de minerai qui sort de la mine d'Oum Teboul.

P7 : point d'eau de l'oued Fendek amont, l'Ouest de la mine d'Azzaba.

P8 : point d'eau de l'oued Zebda Azzaba nord de la mine.

P9 : eau de puits situé au nord de mine (Azzaba.)

P10 : eau de puits situé au Sud de mine (Azzaba).

P11 : eau de puits se localise dans la partie Est de la mine d' Azzaba.

P12 : point d'eau de l'Oued Fendek aval Azzaba.

Tableau.3. Les coordonnées réelles des sites d'étude :

Point	Longitude	Latitude	Altitude
P1	8.558	36.879	60.599
P2	8.565	36.884	59.099
P3	8.571	36.885	70.000
P4	8.570	36.880	70.699
P5	8.570	36.884	56.000
P6	8.570	36.884	58.099
P7	7.067	36.700	173.300
P8	7.066	36.702	161.600
P9	7.067	36.704	157.100
P10	7.061	36.703	166.800
P11	7.065	36.715	156.600
P12	7.083	36.727	136.500

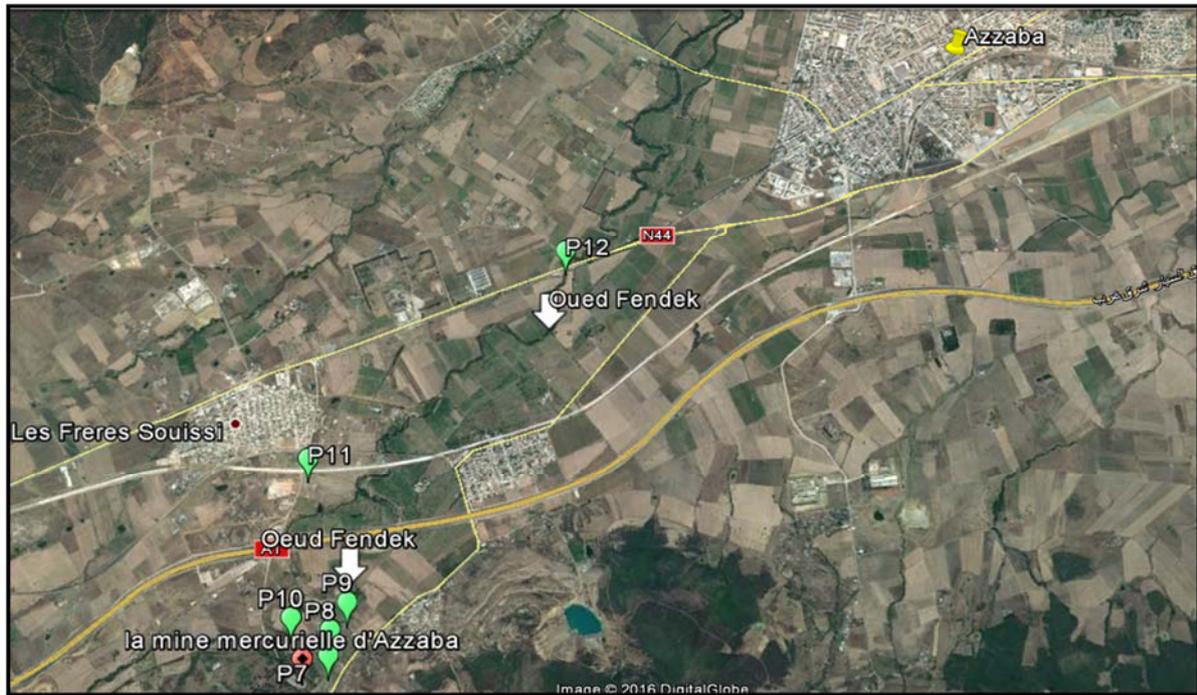


Fig.7.Image satellitaire présente les stations de prélèvement de la région d'Azzaba .

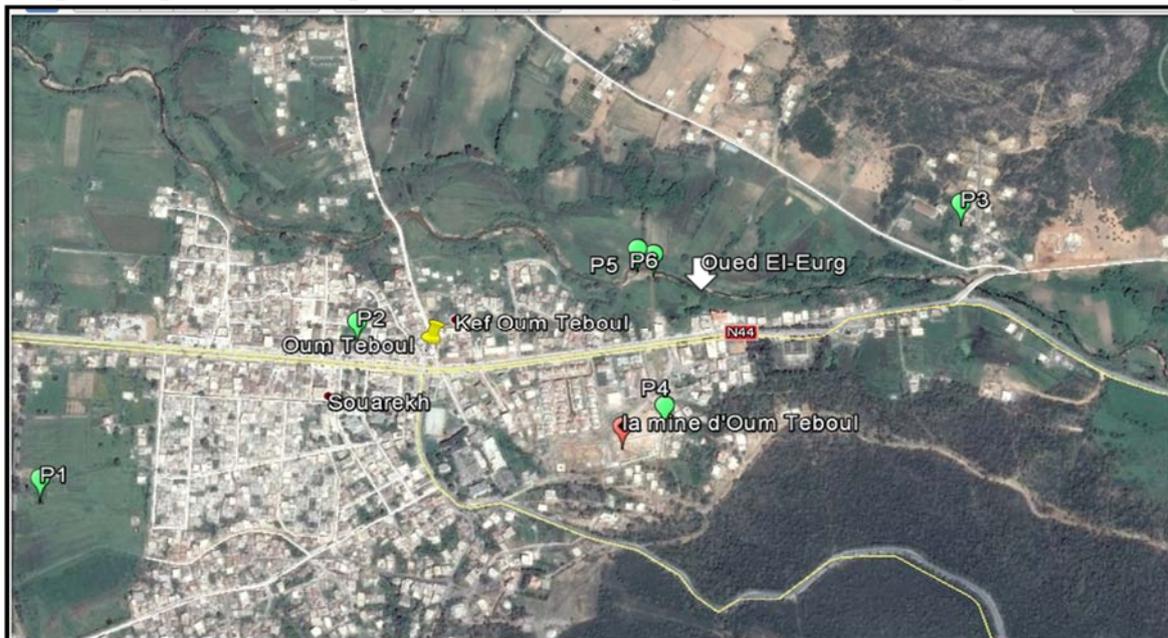


Fig.8.Image satellitaire présente les stations de prélèvement de la région d'Oum Teboul.
III. Inventaire de la pollution physico chimique

III.1.Les paramètres physico chimique (mesure in situ)

III.1.1.Température(T)

La température est un facteur essentiel dans l'étude et le contrôle des eaux qu'elles soient souterraines ou superficielles. Les eaux souterraines gardent généralement une température constante mais celle des eaux de surface varie selon particulièrement les facteurs saisonniers.

En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, la dissociation des sels dissous et la détermination du pH, elle peut déterminer l'origine de l'eau et les mélanges éventuels,... etc.

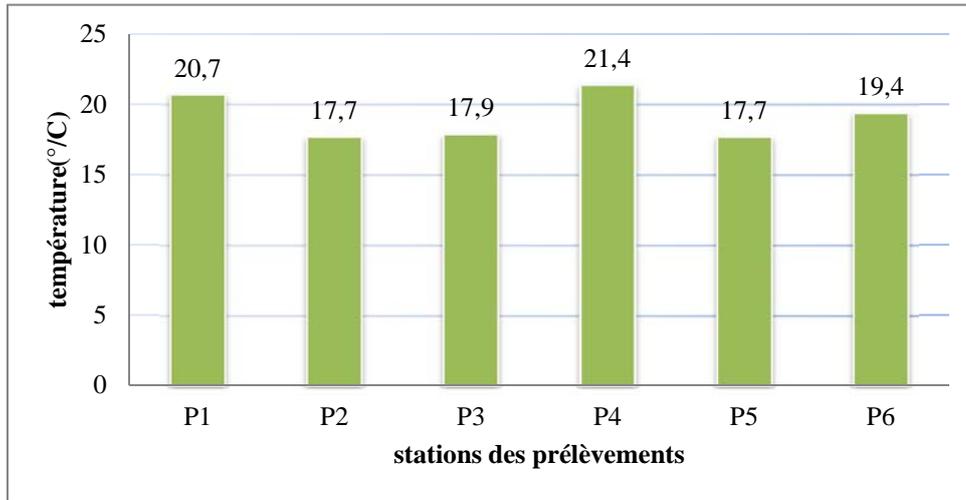


Fig.9 : Histogramme des températures mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul

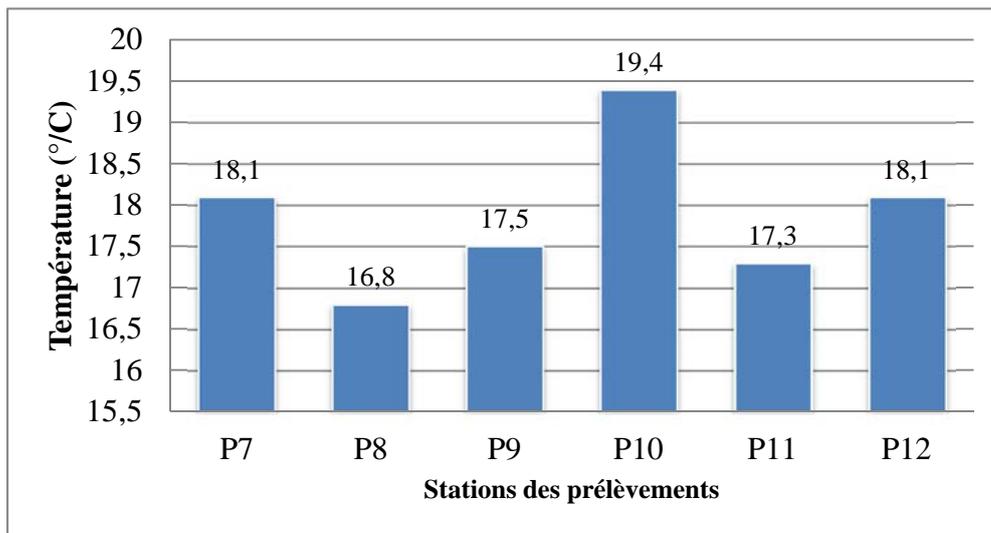


Fig.10 : Histogramme des températures mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.

les histogrammes ci-dessus(Fig.9, Fig.10) montrent que les températures varient entre [17,7- 21,4](°C) dans la région d'Oum Teboul, et des températures variant entre [16-19,4](°C) dans la région d'Azzaba, donc on note que les valeurs de températures enregistrées sont à la norme et ne dépassent pas la norme OMS 25(°C). On peut dire que ces variations peuvent être en fonction de la température saisonnière, la nature géologique et la profondeur de l'oued pour les eaux superficielles et les profondeurs des puits pour les eaux souterraines. La température joue un rôle important dans la composition chimique et l'activité bactérienne.

III.1.2. Conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique est responsable de donner des informations concernant la concentration de l'eau en sels dissous. Son augmentation résulte souvent des pH hors normes, une salinité élevée. Les altérations de la conductivité sont aussi en fonction de la température de l'eau, elle est considérable lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'estimer la quantité de sels dissous dans l'eau (Pescod, 1985 ; Rodier, 1984).

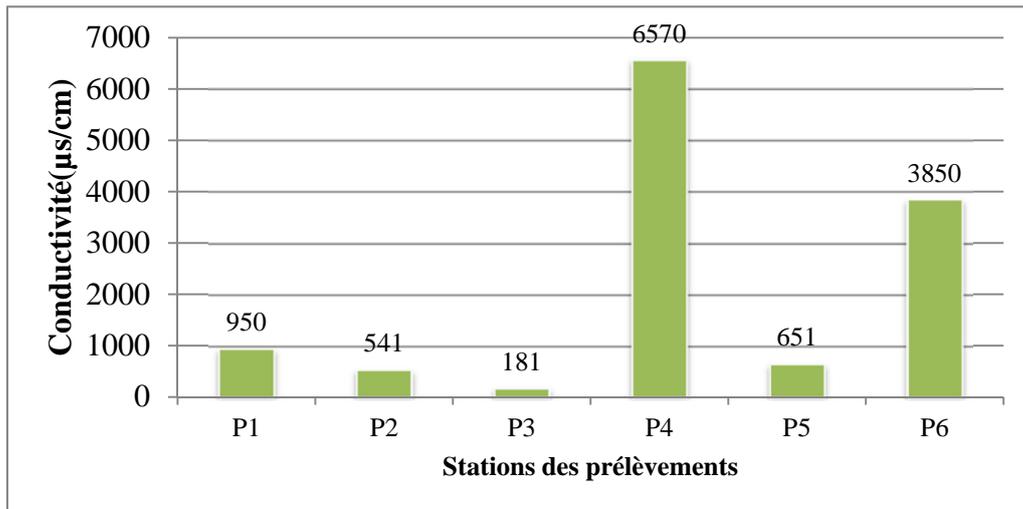


Fig.11 : Histogramme des conductivités mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.

Les résultats enregistrés de la conductivité pour les deux régions indiquées dans les figures 11, 12 on remarque pour la région d'Oum Teboul (Fig.11) des variations pour les eaux souterraines s'échelonnent entre 950 et 181 µs/cm ces valeurs restent admissibles par rapport à la norme OMS 1500 (µs/cm). Tandis que les eaux superficielles (le canal P4 et Oued El-Eurg P6) les résultats varient entre 3850 et 6570 µs/cm ces valeurs qui dépassent la norme admissible indique la contamination de ces eaux et la rendre inutile.

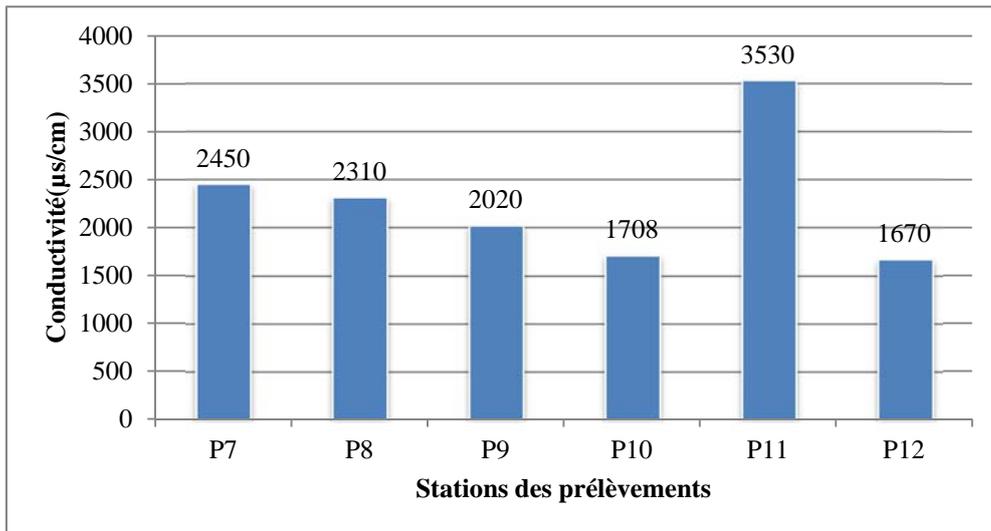


Fig.12: Histogramme des conductivités mesurées des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.

Pour la région d'Azzaba (Fig.12), les résultats obtenus des eaux souterraines et superficielles indiquent des valeurs variant entre 1670 et 3530 µs/cm ces valeurs dépassent la norme OMS standard (1500µ/cm). Notant que les prélèvements d'eaux sont chargés de sels minéraux qui peuvent être d'origine naturelle (calcium, magnésium, sodium, potassium). Cette minéralisation naturelle liée à la nature des sols.

III.1.3.Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH présente une notion très importante pour la détermination de l'agressivité de l'eau, il est le logarithme décimal de l'inverse de sa concentration en ions d'hydrogène (H_3O^+) il est neutre à la valeur de sept (7), selon qu'il soit supérieur ou inférieur à cette valeur, on dit qu'il est basique ou acide. L'eau est un solvant pour presque tous les ions et le pH permet de comparer les ions les plus solubles dans l'eau. Pour les eaux naturelles, le pH est compris entre 6 et 8.

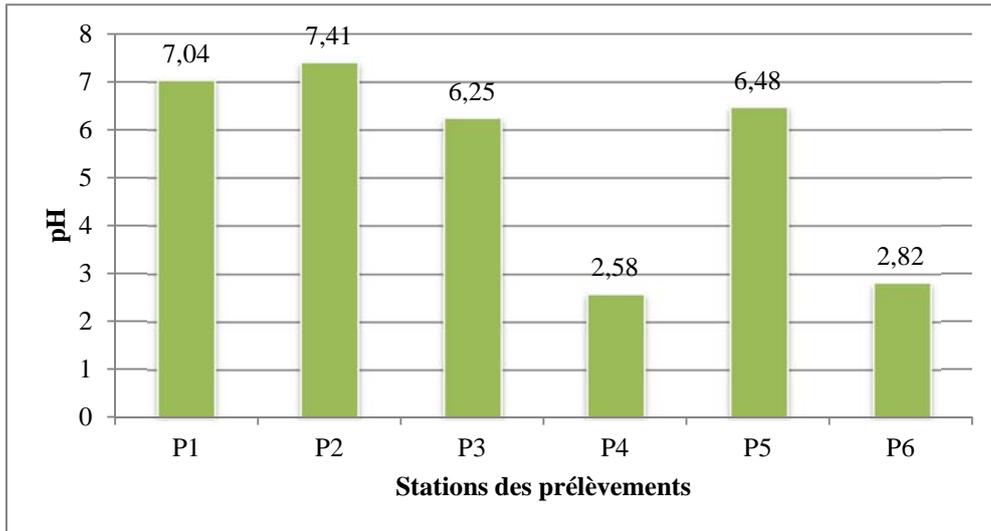


Fig.13 : Histogramme des pH mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.

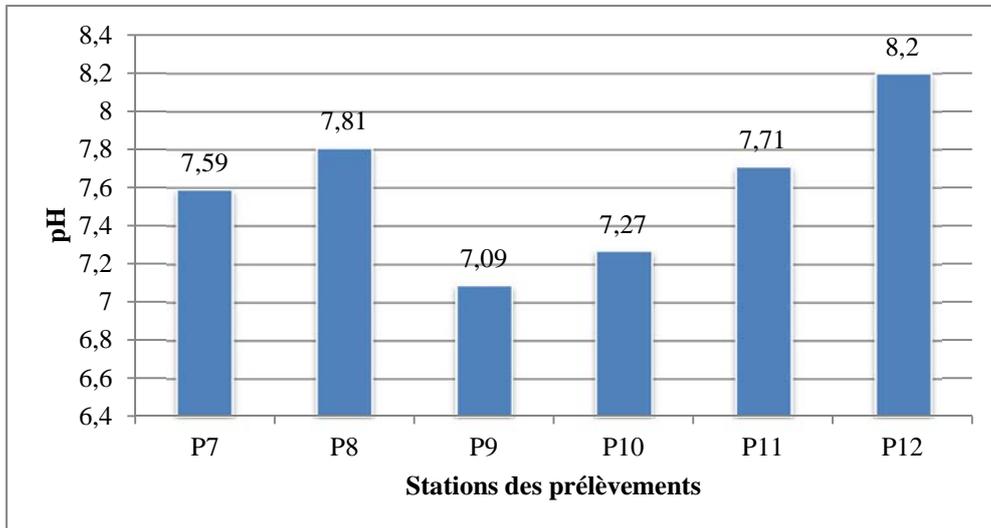


Fig.14: Histogramme des pH mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans la figure (Fig.13), montrent que les valeurs de pH des eaux souterraines de la région d'Oum Teboul P1(7.04), P2 (7.41)et P3(6.25) sont des valeurs ne dépassent pas la norme pH entre 6et 8.Tandis que les valeurs enregistrées des eaux superficielles sont hors normes P4(2.58) et P6 (2.82) ce sont des mesures de pH différent de la valeur habituelle du cours d'eau. Ces différentes valeurs peuvent avoir comme origine les rejets industriels.

Pour la région d'Azzaba les valeurs de pH enregistrées des eaux souterraines et superficielles indiquées dans la figure 14 sont comprises entre 7.09et 8.2.Ces valeurs sont normales parce qu'elles sont dans l'intervalle des eaux naturelles pH(6-8).

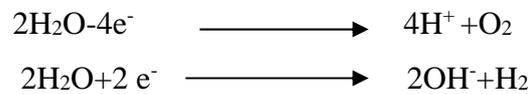
III.1.4. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Le potentiel d'oxydo-réduction (exprimé en volts ou millivolts) permet de mesurer l'état d'oxydo-réduction de l'eau. Connaissant sa valeur et celle du pH, il est possible de déterminer les formes chimiques présentes dans le milieu. Ce paramètre nous permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et le sens des réactions chimiques (oxydation ou réduction) (Champ & al, 1979 ; Sarrazin & Verdaguer, 1991)

Un potentiel **rédox positif** signifie qu'une substance est un agent oxydant. Plus la mesure est élevée, plus elle est oxydante.

Au contraire, un potentiel **rédox négatif** indique qu'une substance est un agent réducteur. Plus la mesure est basse, plus elle est antioxydante.

L'eau peut contribuer à des réactions d'oxydo-réduction, suivant les deux équations.



Les phénomènes d'oxydo-réduction jouent un rôle considérable en chimie minérale qu'en chimie organique.

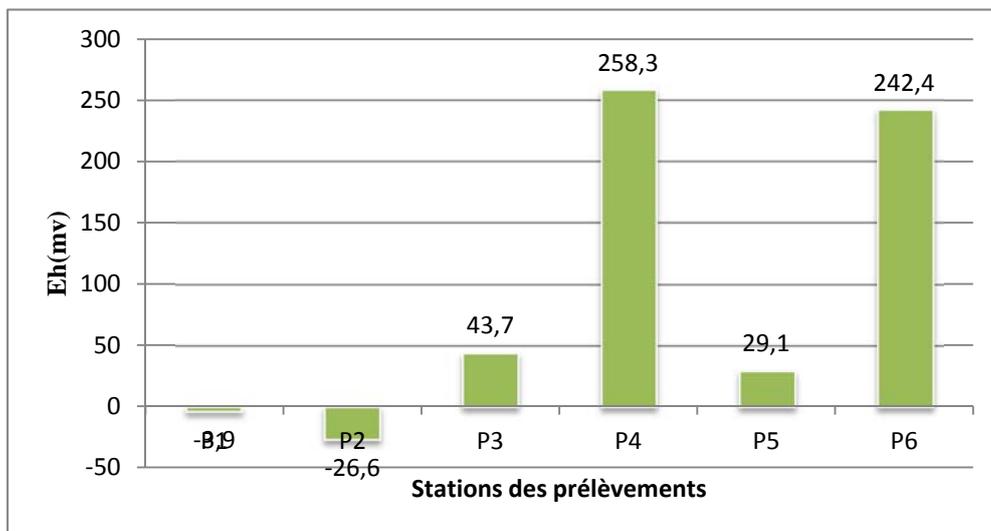


Fig.15 : Histogramme des Eh mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.

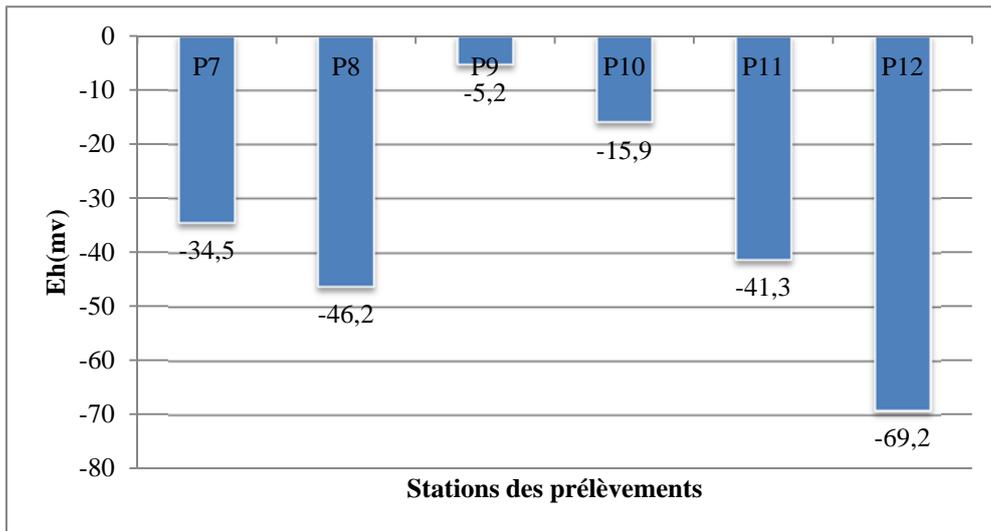


Fig.16 : Histogramme des Eh mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.

On remarque dans la région d'Oum Teboul (Fig.15) un potentiel rédox négatif pour les deux puits P1 (-3,9) et P2 (-26,6) ce qui signifie l'état des ions chimiques dans l'eau et le sens des réactions chimiques sont en état de réduction.

Le reste des stations P3(43,7), P4(258,3), P5(29,1), P6(242,4), le potentiel redox est positif ; qui sont accompagnées avec une baisse des concentrations en pH (P4 2.58) et (P6 2.82), ce qui indique qu'il y a une forte oxydation survenue de ces eaux et un phénomène de drainage minier marquée par la diminution du pH et l'augmentation du d'oxydoréduction (Eh).

Dans la région d'Azzaba(Fig.16), le potentiel redox enregistré est négatif pour toutes les stations de prélèvement ; donc on peut dire que les ions chimiques dans l'eau sont en état de réduction.(Milieu réducteur).

III.1.5.Oxygène dissous(O₂)

L'oxygène n'est pas un élément constitutif de l'eau, sa solubilité est en fonction de la température, et de la pression partielle de l'atmosphère, sa teneur dépasse rarement les 10 mg /l, en fonction de la nature de l'eau, ainsi, pour une eau superficielle, elle peut avoisiner la saturation contrairement aux eaux profondes qui contiennent très peu d'oxygène. A titre d'exemple, une eau saturée d'air, à 20°C et sous la pression normale, contient 9,1 mg /l. L'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau (Rodier ,1984) il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique.

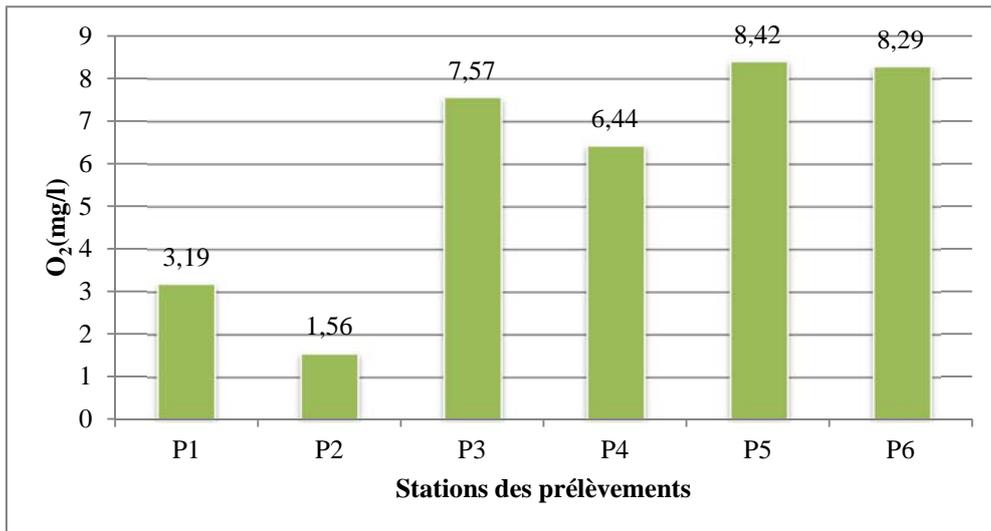


Fig.17 : Histogramme des O₂ mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Oum Teboul.

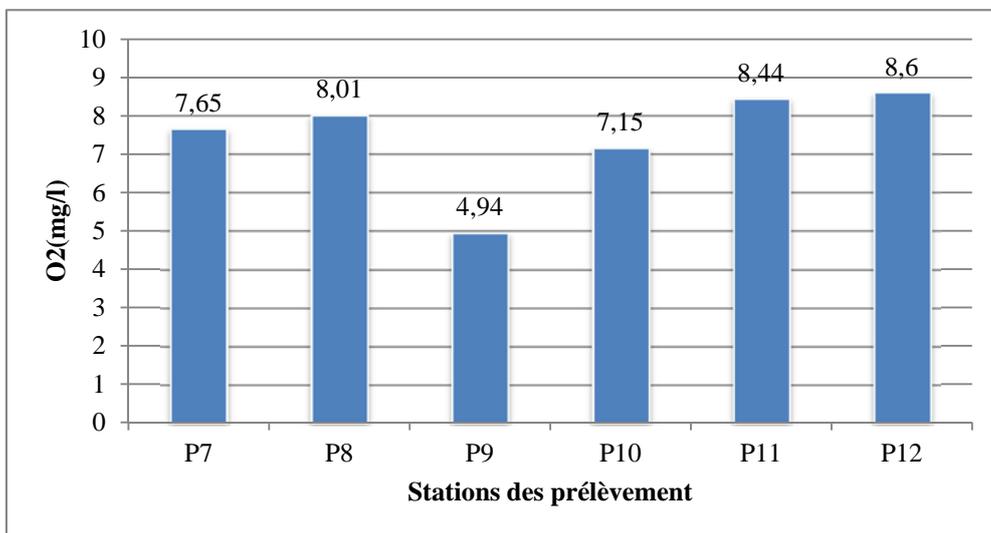


Fig.18: Histogramme des O₂ mesurés des eaux échantillonnées de la région d'Azzaba.

Les variations des teneurs en 'oxygène dissous sont comprises entre 1,56et8,42mg/l dans la région d'Oum Teboul (Fig.17), pour la région d'Azzaba les valeurs d'oxygène dissous varient entre 4,94et 8,6mg/l (Fig.18). la présence de l'oxygène dans l'eau favorise la diffusion à partir de l'air surtout par l'activité photosynthétique des végétaux aquatiques notamment des algues, c'est un indicateur important de pollution organique des eaux (servin-Reyssac & Valdeyron,1989).

III.2.Eléments minéraux(les éléments majeurs)

III.2.1.Calcium (Ca²⁺)

La présence des ions (Ca²⁺) dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃) et la dissolution des formations alluvionnaires gypseuses (CaSO₄). (Gasmi.2009)

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires, sous forme de carbonates. Ces sels se rencontrent dans presque toutes les eaux naturelles. Leur teneur dans l'eau, peut varier de 1 à 150 (mg/l), ses origines directement liées à la nature géologique des terrains traversés. Les sels de calcium sont obtenus en majorité lors de l'attaque de roches calcaires par l'anhydride carbonique dissous (CO₂). Il constitue l'élément cationique dominant des eaux superficielles. Le calcium est l'élément principal de la dureté de l'eau.

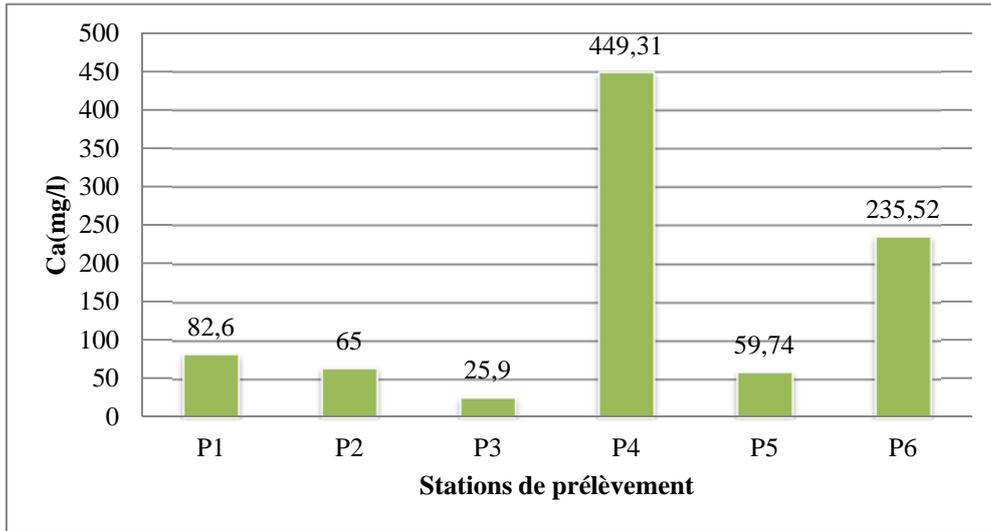


Fig.19 : Histogramme des Calcium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

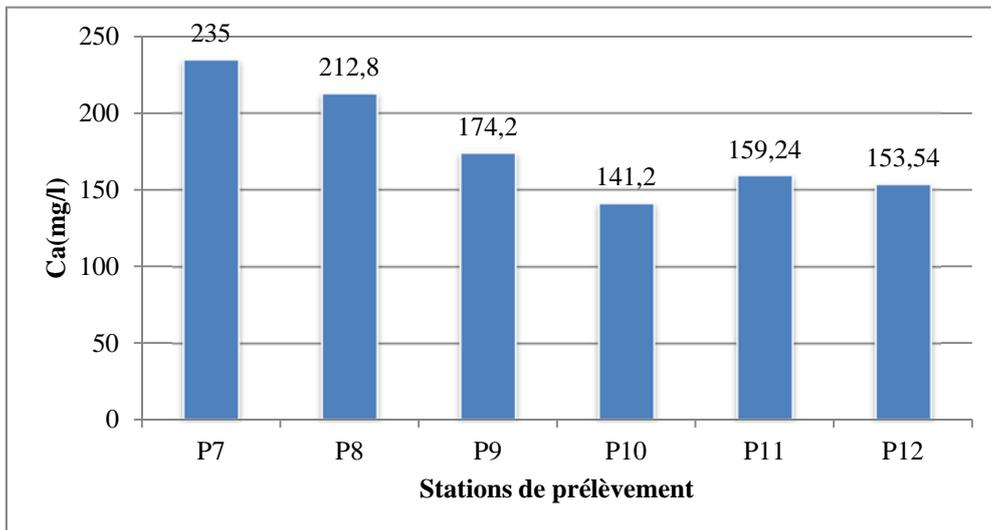


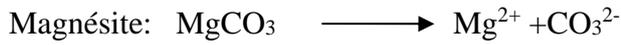
Fig.20: Histogramme de calcium des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats obtenus suite à l'analyse des ions de calcium sont présentés dans les figures 19 et 20, on remarque que les eaux de puits de la région d'Oum Teboul ne dépassent pas la norme standard OMS (100 mg/l) mais les eaux superficielles et tous les points de la région d'Azzaba (Fig.20) présentent des concentrations en [Ca²⁺] qui dépassent la norme. L'existence

de cet élément dans ces eaux a pour origine le lessivage des formations évaporitiques (dissolution de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$))

III.2.2. Magnésium (Mg^{2+})

Ayant des origines à celle du calcium cet élément provient de la dissolution de la formation carbonatée à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) et des formations sulfate en magnésium MgSO_4 .



Le magnésium est un élément très répandu dans la nature, dans de nombreux minéraux et dans les calcaires (2,1 % de l'écorce terrestre). Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes (quelques mg/l à plusieurs centaines de mg/l). La plupart des eaux naturelles présentent des teneurs comprises entre 5 et 10 mg/l. Cette concentration est en relation directe avec la nature géologique des terrains traversés. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonates (MgCO_3) et de bicarbonates (Mg_2HCO_3).

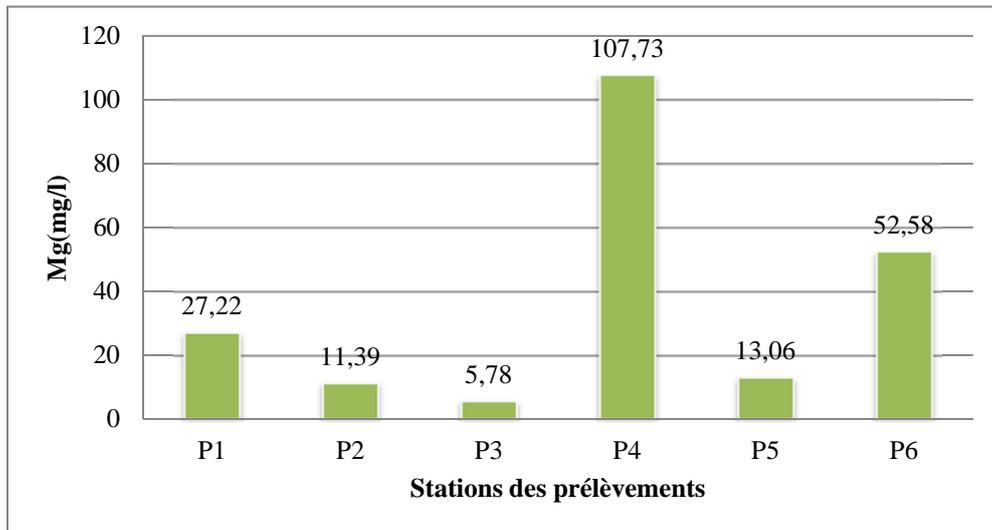


Fig.21 : Histogramme de magnésium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

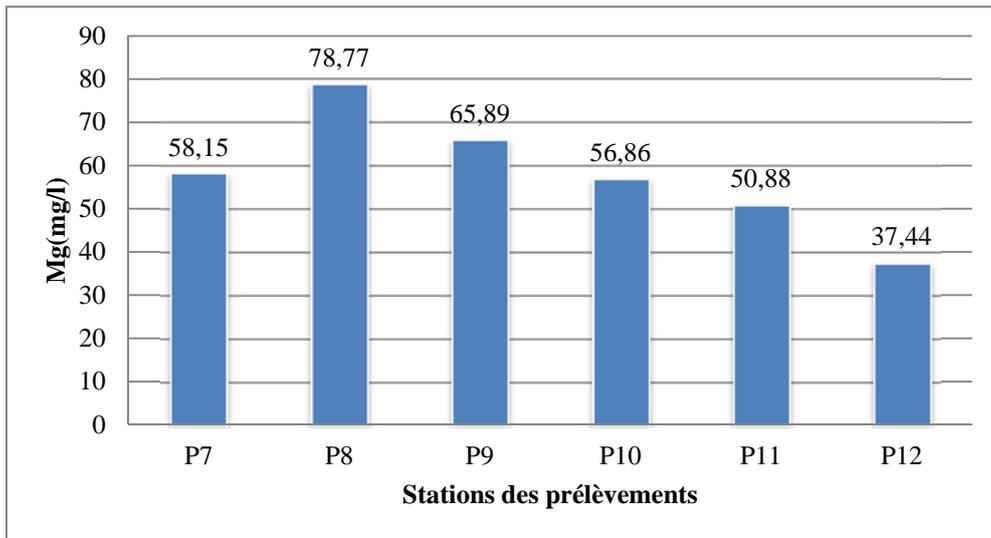


Fig.22 : Histogramme de magnésium des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans les figures au-dessus montrent des valeurs variant entre 5.78 et 107.73 mg/l, pour la région d'Oum Teboul (Fig.21) et entre 37.44 et 78.77 mg/l pour la région d'Azzaba (Fig.22) ces valeurs ne dépassent pas la norme OMS des eaux de surface (125 mg/l).

III.2.3. Chlorure (Cl⁻)

Les chlorures, très répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂), les ions chlorures (Cl⁻) dont la plus grande partie se trouve dans les océans, constituent environ 0,05 % de la lithosphère (partie solide de la sphère terrestre).

De façon générale, l'ion chlorure est présent dans toutes les eaux, à des concentrations variables. Dans les eaux de surface, il est présent en faible concentration. Dans les eaux souterraines, la teneur en ion chlorure peut atteindre quelques grammes par litre au contact de certaines formations géologiques.

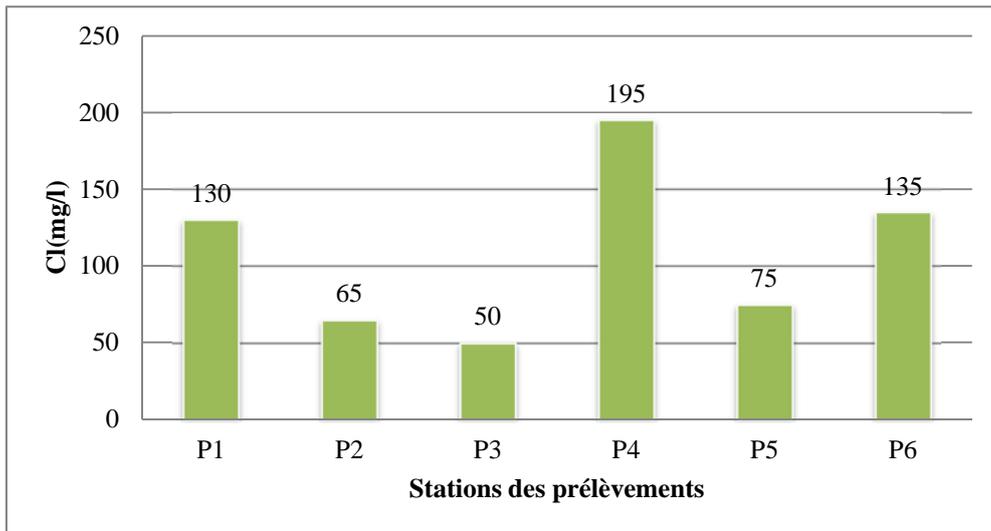


Fig.23 : Histogramme des chlorures des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

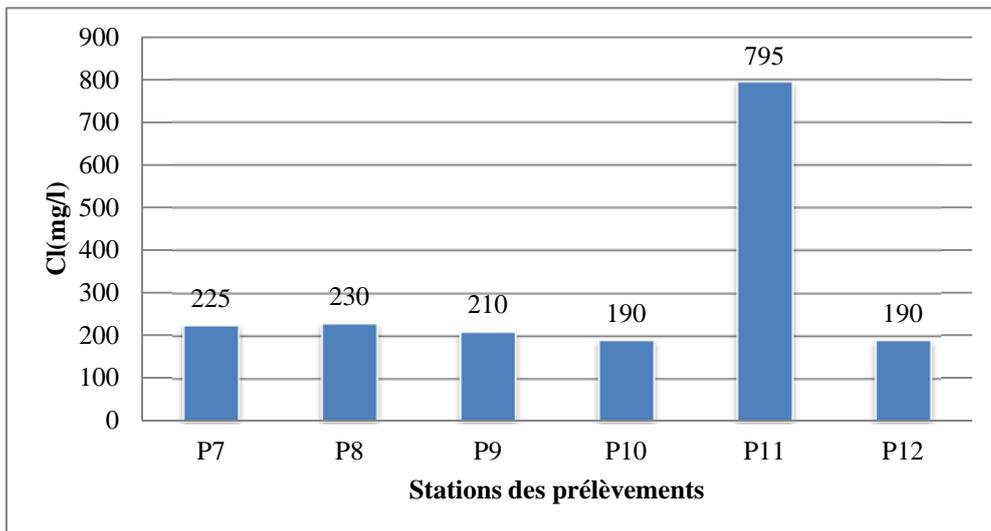


Fig.24 : Histogramme des chlorures des eaux analysées de la région d'Azzaba.

les concentrations représentées dans les figures 23 et 24 s'échelonne entre 50- 130 (mg/l) pour les puits de la région d'Oum Teboul (Fig.23)et entre 75 et 195mg/l pour les eaux superficielles les valeurs mesurées reste acceptable et ne dépasse pas la valeur limite de l'OMS (250mg/l);

pour la région d'Azzaba (Fig.24) on enregistre des variables entre 210et 795mg/l pour les prélèvements des puits , concernant les eaux d'Oued Fendek les concentrations enregistrées varient entre 190- 230(mg/l); ces valeurs sont inférieures à la norme OMS à l'exception de point de prélèvement (puits P11), on remarque une augmentation notable dans la concentration en chlorures (795 mg/l) qui peut être due à la dissolution importante de formation évaporite (halite).

III.2.4. Sodium (Na^+)

Sa présence dans l'eau est due au lessivage des formations géologiques contenant du chlorure de Sodium (NaCl) ou communément appelé « Sel ».

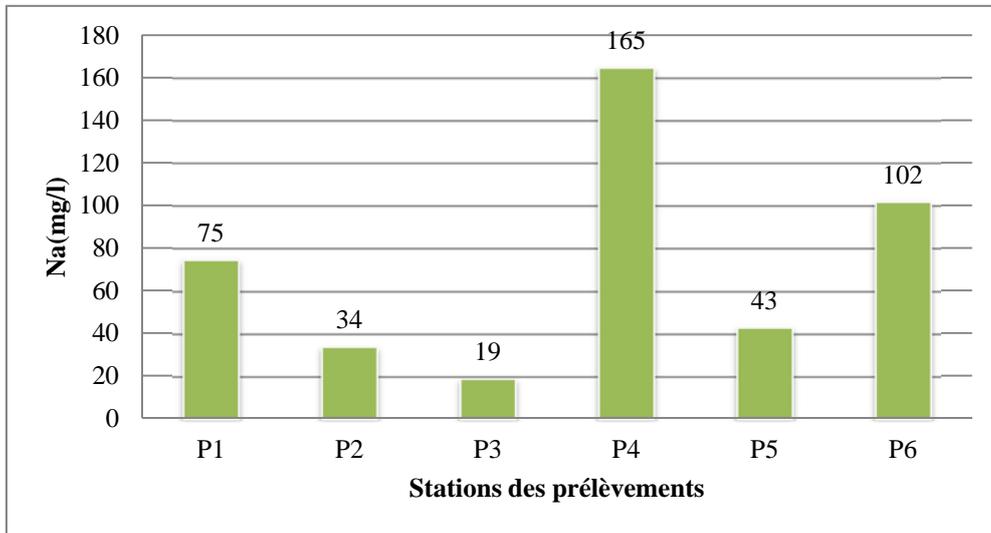


Fig. 25 : Histogramme de sodium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

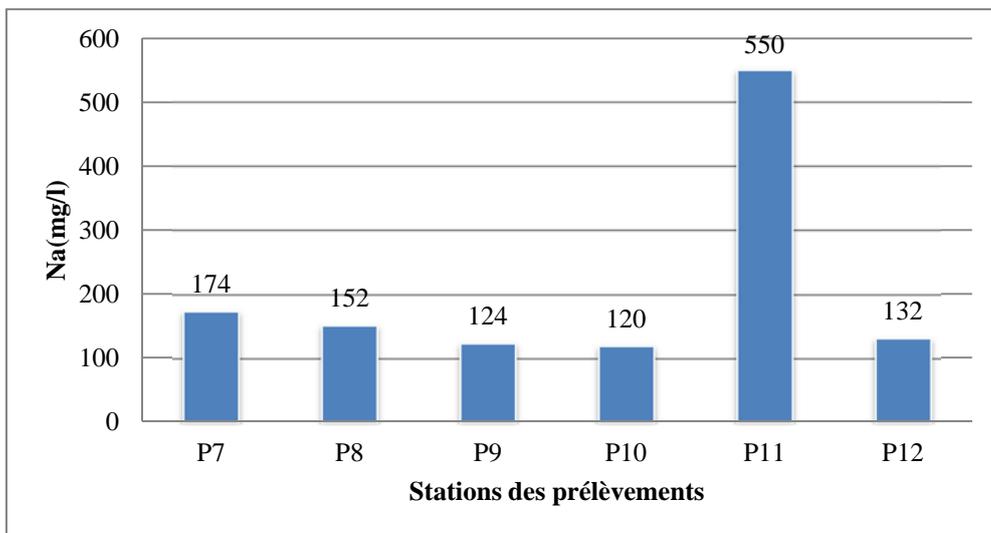


Fig. 26 : Histogramme de sodium des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans la figure 25 de la région d'Oum Teboul reflètent que les valeurs des concentrations de sodium sont comprises entre 19 et 75 mg/l pour les prélèvements des puits et s'échelonnent entre 43 et 165 mg/l pour les prélèvements des eaux superficielles. On peut conclure après la comparaison de ces valeurs avec la norme OMS (150 mg/l) que les teneurs en sodium présentées dans les points mesurés sont relativement acceptables et on enregistre en revanche une valeur forte qui dépasse la norme, au niveau du point P4 (165 mg/l) cela peut s'expliquer par l'effet de la dissolution de NaCl .

Pour les prélèvements de la région d'Azzaba(Fig.26) on enregistre des valeurs variant entre 120 et 550 mg/l et les pour eaux superficielles les valeurs enregistrées s'échelonnent entre 132 et 174 mg/l pour On y enregistre des fortes teneurs dépassant la norme pour les points P7(175 mg /l), P8(152 mg/l) et P11 (550 mg/l).Celles-ci sont dues à la nature géologique et la dissolution de (NaCl).

III.2.5.Potassium (k⁺)

La présence de cet élément dans les eaux provient de l'altération des roches silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimique, (NPK, a base d'azote, Potasse et Phosphore) retrouvés dans les eaux usées agricoles. Le potassium existe dans les eaux naturelles à raison de 10 à 15 mg/l.

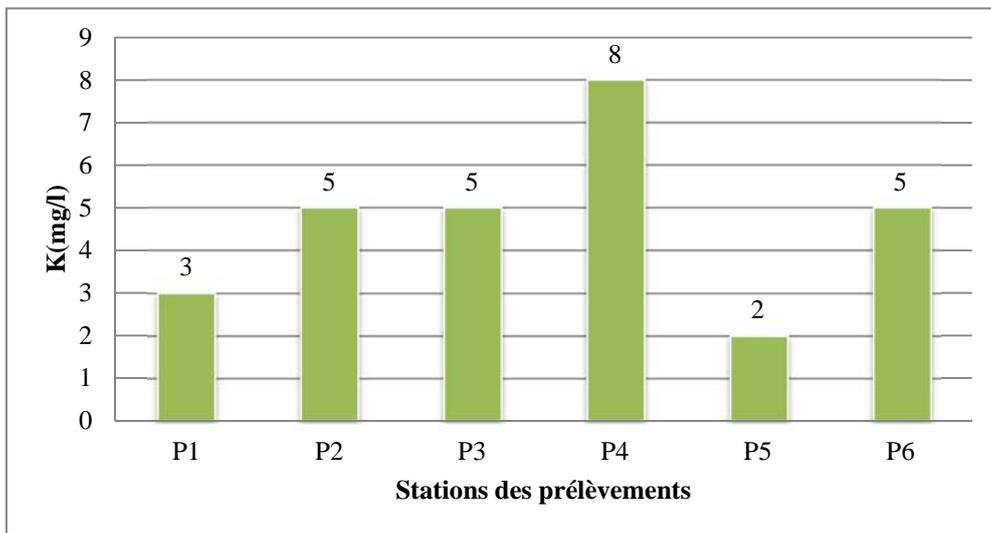


Fig.27: Histogramme de potassium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

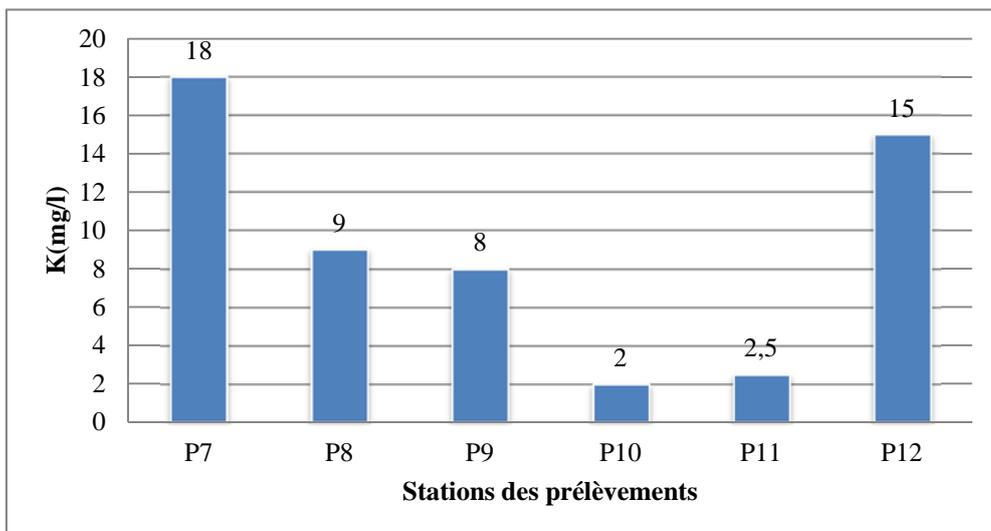


Fig.28 : Histogramme de potassium des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats enregistrés pour la région d'Oum Teboul(Fig.27) reflètent que les valeurs s'échelonnent entre 3 et 5mg/l pour les prélèvements des puits et présentent des concentrations compris entre 2 et 8mg/l pour les échantillons des eaux superficielles. Ces valeurs sont inférieures à la norme OMS standard (12mg/l).Les concentrations de la région d'Azzaba (Fig.28) sont relativement élevées et atteignent des valeurs oscillant entre 2et 25 (mg/l) pour les échantillons des puits, et entre 9 et 18mg/l pour les prélèvements des eaux d'Oued Fendek, on remarque que les teneurs dépassent la norme pour les points P7 (18 mg/l) et P12(15 mg/l).

III.2.6.Sulfates (SO₄²⁻)

Les sulfates, composés naturels des eaux, les ions sulfates (SO₄²⁻) sont liés aux cations majeurs : calcium, magnésium et sodium. A part ceux du plomb, du baryum et du strontium, la plupart des sulfates sont solubles dans l'eau. Ils peuvent néanmoins être réduits en sulfure, volatilisés dans l'air en hydrogène sulfure (H₂S), précipités en sel insoluble ou assimilés par des organismes vivants. La concentration en sulfates dans les eaux naturelles est très variable, mais ne dépasse généralement pas le gramme par litre.

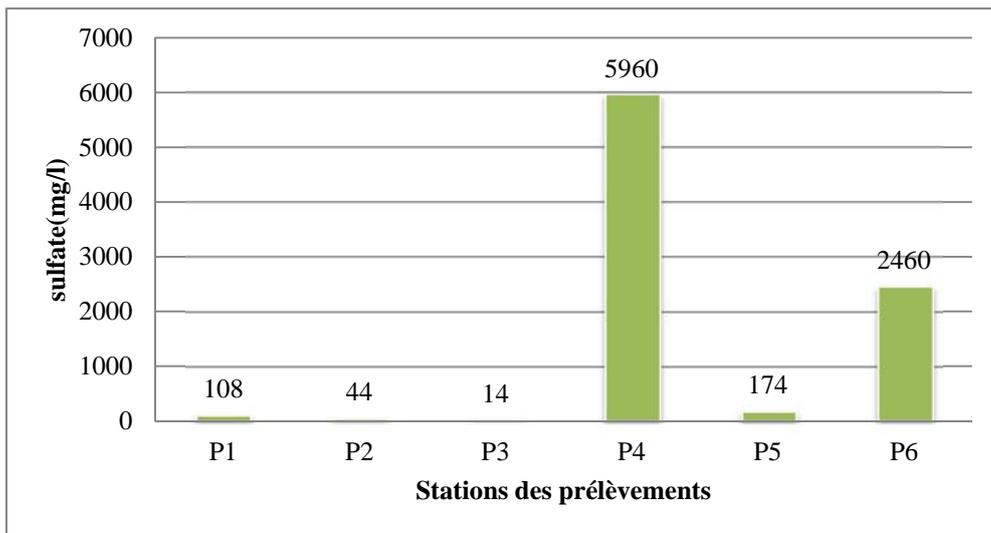


Fig.29 : Histogramme des sulfates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

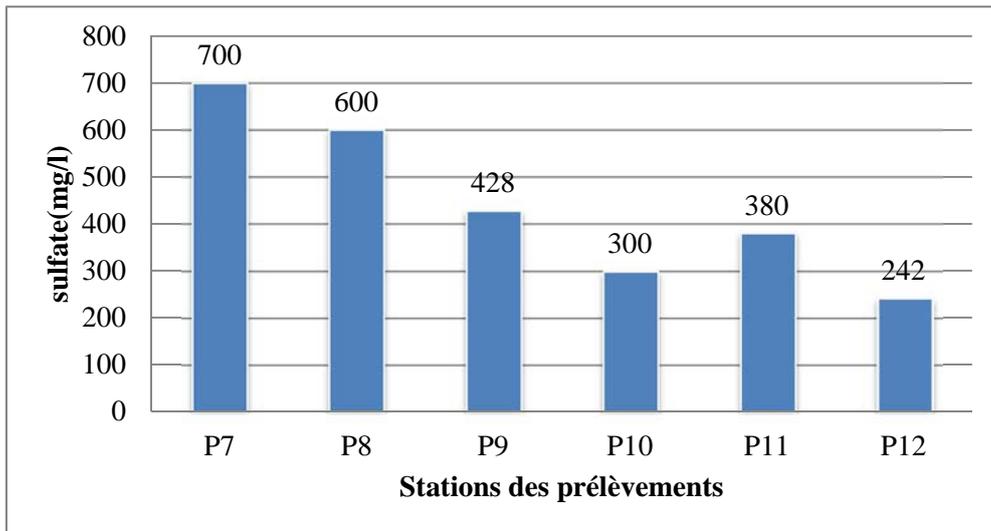


Fig.30: Histogramme des sulfates des eaux analysées de la région d'Azzaba.

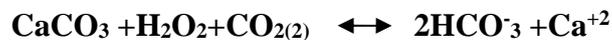
Les résultats de la région d'Oum Teboul indiqués dans la figure 29 montrent des variations des teneurs en sulfate s'échelonnent entre 14 et 108mg/l pour les prélèvements des puits, et varient entre 174et 5960mg/l pour les point d'eau des eaux superficielles donc les concentrations connaissent une augmentation importante dépassants la norme OMS standard (250mg/l) surtout aux niveaux des points P4 (5960 mg/l) et P6(2450 mg/l).

Pour la région d'Azzaba (Fig.30)on enregistre des valeurs varient entre 242et 700 mg/l ,pour les eaux superficielles et des concentrations compris entre 300 et 428mg/l ,pour les échantillons des puits, ces valeurs dépassent légèrement la norme .On note que cette situation est due à la dissolution de formations gypseuses d'une part et aux pesticides provenant des eaux d'irrigation d'autre part.

III.2.7.Bicarbonates (HCO_3)

La présence des bicarbonates dans l'eau due à la dissolution des formations carbonatés (cipolin, calcaire) pour des eaux chargés en gaz carbonique.

La réaction de dissolution est donnée par l'équation suivante



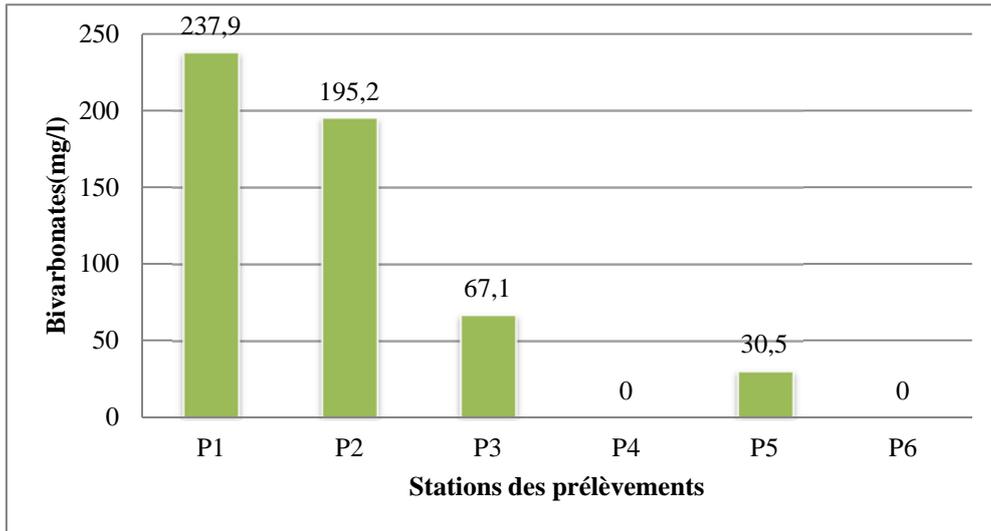


Fig.31: Histogramme des bicarbonates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

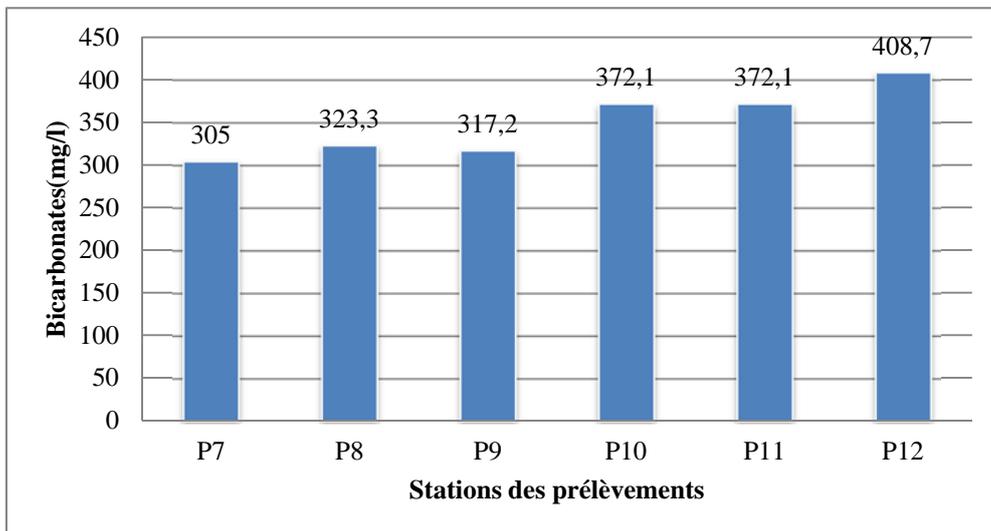


Fig.32 : Histogramme des bicarbonates des eaux analysées de la région d'Azzaba.

La figure 31 montre des variations importantes enregistrées pour les puits de la région d'Oum Teboul et sont de l'ordre de 67,1 à 237,9 mg/l. Concernant les eaux superficielles les résultats montrent des valeurs faibles à nulles de (HCO_3) dans tous les prélèvements sauf au Niveau du point P5 (30,5 mg/l).

Pour la région d'Azzaba (Fig.32) les valeurs enregistrées entre 305 et 408,7 mg/l, sont des valeurs importantes suite à la dissolution des formations calcaires.

III.3. Les éléments organiques

III.3.1. Les éléments nutritifs

III.3.1.1. Les différentes formes de l'Azote

L'Azote est un élément essentiel de la matière vivante. La quantité et la forme chimique de cet élément dans le milieu aquatique y conditionnent le développement de la vie, il peut présenter sous deux formes :

- Une forme organique non oxydée et peu soluble (protéines, acides aminés, urée...)
- Une forme minérale soluble, résultant de la dégradation de la forme organique par hydrolyse.

L'azote minéral se présente en solution ionique dans l'eau sous 3 formes principales :

- L'azote ammoniacal (ammoniac NH_3 et ammonium NH_4^+)
- Les nitrites NO_2^-
- Les nitrates NO_3^- , azote ammoniacal et nitrites sont oxydables, les nitrates constituent la forme oxydée finale.

L'azote est présent tout le long du cours d'eau sous la forme minérale et les trois formes chimiques (nitrates, nitrites et ammonium).

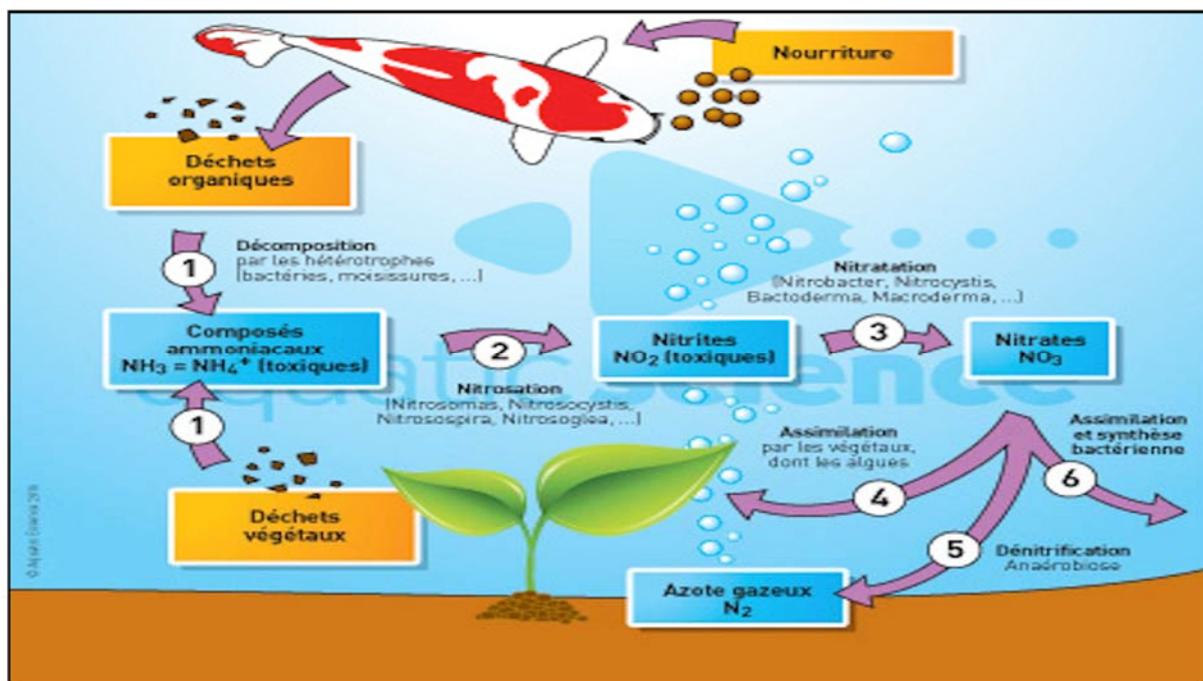


Fig.33. Cycle de l'azote dans l'eau

III.3.1.2. Les nitrates (NO_3^-)

Ils représentent la forme la plus oxygénée de l'azote c'est une forme très soluble sa présence est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques (Ihadi&al,1996 ;Fryar&al ,2000). L'azote sous cette forme, est un sel nutritif utilisable par la majorité des végétaux.

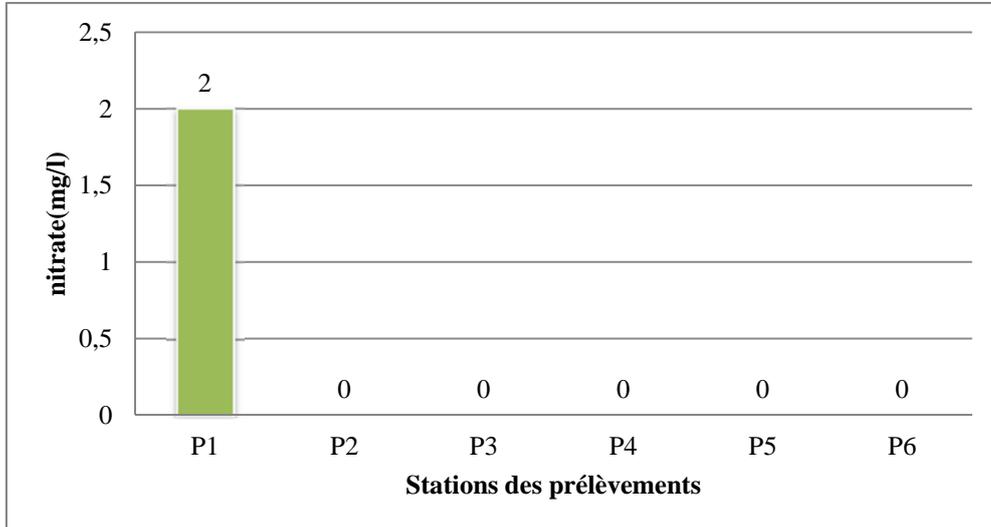


Fig.34: Histogramme des nitrates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

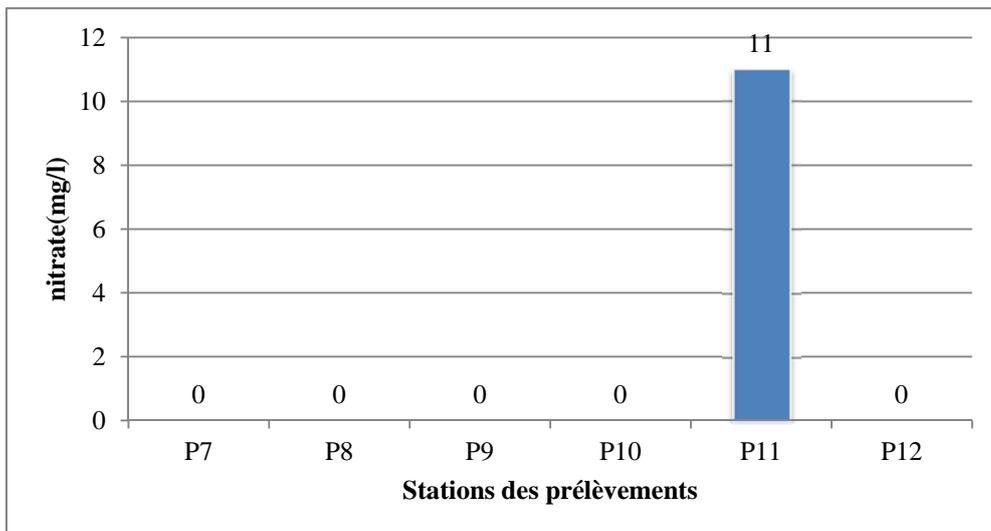


Fig.35 : Histogramme des nitrates des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans les figures 34 et 35 montrent l'absence des teneurs en nitrates (NO_3^-) dans les prélèvements des eaux des deux régions à l'exception des deux points P1 à la région d'Oum Teboul (Fig.34) avec une valeur de 2 (mg/l) et P11 à la région d'Azzaba (Fig.35) avec une valeur de 11 (mg/l) ces valeurs restent faibles et ne dépassent pas la norme limite de l'OMS (50 mg/l). Les concentrations nulles en nitrate que l'on trouve sont anormales parce que la plupart des eaux naturelles contiennent normalement des nitrates à des doses faibles de quelques milligrammes par litre. Donc on justifie notre résultat dû à la réduction des nitrates en

diazote N_2 à cause des conditions mauvaises de la conservation de notre échantillonnage en milieu anaérobie (Fig. 33).

III.3.1.3. les nitrites (NO_2^-) ou azote nitreux

L'azote nitreux représente une forme moins oxygénée et moins stable représentant ainsi la forme de passage entre les nitrates et l'ammonium il s'agit d'une forme toxique les nitrites sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium (Aghzar & al ; 2001).

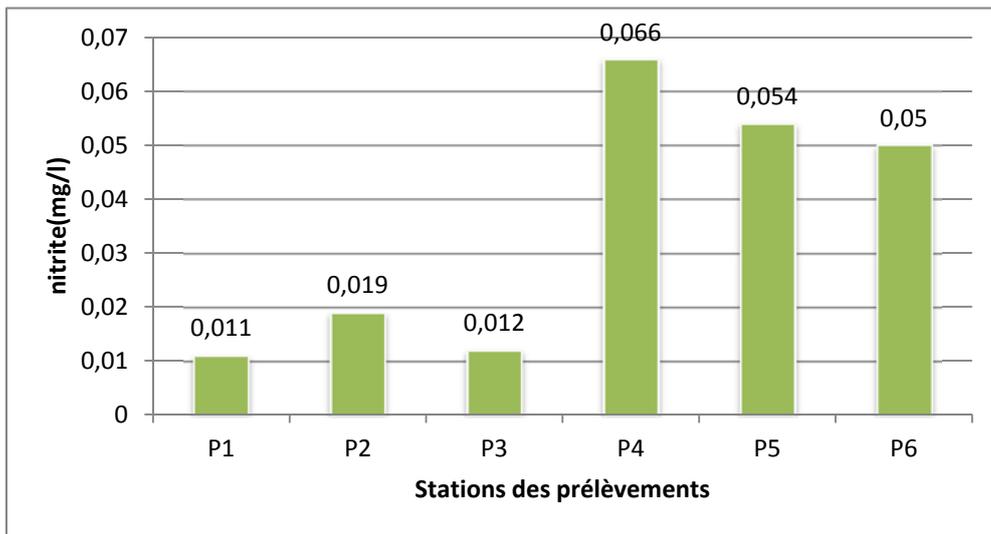


Fig.36: Histogramme des nitrites des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

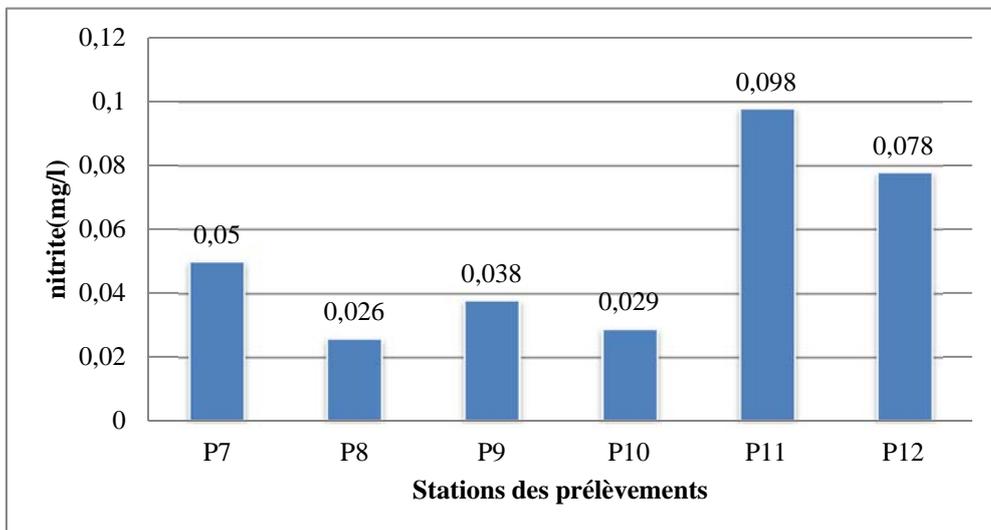


Fig.37 : Histogramme des nitrites des eaux analysées de la région d'Azzaba.

L'analyse des histogrammes établis dans la Figure 36 montre que les concentrations en nitrites dans la région d'Oum Teboul varient entre 0.011 et 0.019 mg/l pour les prélèvements des puits et entre 0.05 et 0.066 mg/l pour les eaux de l'Oued.

Pour la région d'Azzaba (Fig.37) les concentrations en nitrites mesurées sont de l'ordre de 0,026 à 0,078 mg/l pour les eaux de l'Oued et entre 0,029 et 0,098 mg/l pour les échantillons

des puits. Donc toutes les valeurs obtenues pour les deux régions ne dépassent pas la norme OMS (0,1 mg/l).

III.3.1.4.L'Ammonium (NH₄⁺)

C'est la forme de l'azote la plus toxique sa présence dans l'eau est liée soit par les rejets urbaines et industriels dans les oueds qui donnent des concentrations élevées, soit par la réduction des forme azotés (nitrates et nitrites) en condition réduites.

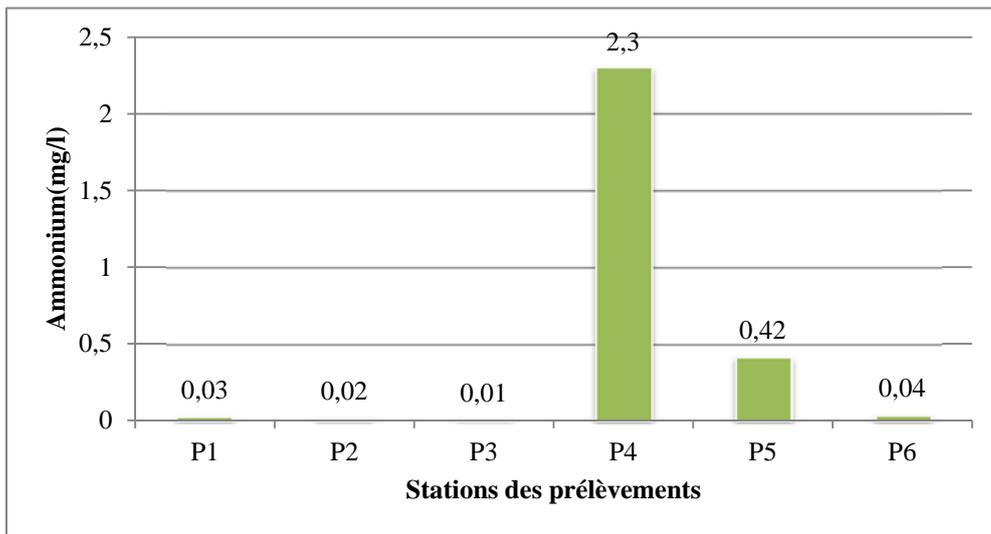


Fig.38: Histogramme d'ammonium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

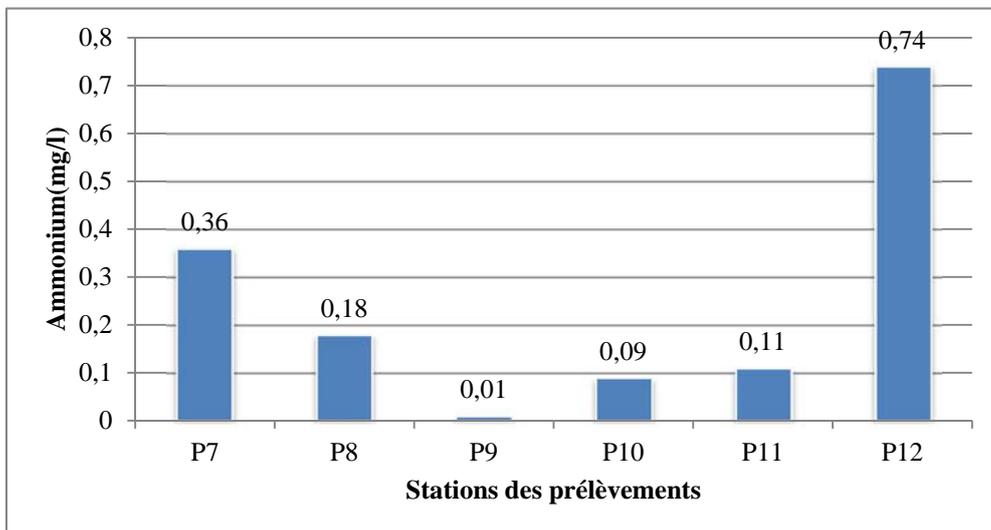


Fig.39 : Histogramme d'ammonium des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans la figure(Fig.38) de la région d'Oum Teboul reflètent des variations faibles s'échelonnent entre 0,01 et 0,03mg/l pour les eaux des puits et des valeurs varient entre 0,04 et 2,3 mg/l pour les eaux de l'oued à l'exception de point P4 (2,3mg/l) dont la valeur de concentration en ammonium dépasse la norme limite de l'OMS (0,5mg/l).

Pour la région d'Azzaba (Fig.39) les variations s'échelonnent entre 0,01 et 0,11 mg/l pour les eaux des puits et entre 0,18 et 0,74 mg/l pour les eaux de l'Oued On enregistre en revanche une valeur forte au niveau de point P12(0,74mg/l) dépassant la norme OMS (0,5mg/l).

III.3.2. Les nutriments

Les nutriments essentiels pour les plantes : ce sont des substances nécessaires pour le métabolisme et la photosynthèse des plants comprenant les macronutriments (N,P,K, Ca²⁺, Mg²⁺, et s) et les micronutriments(Fe ,Mn ,B ,Cu, Mo, Zn et Si).

Les sources urbaines de nutriments incluent les eaux usées domestiques, les déchets industriels .Les sources rurales incluent celles de l'agriculture de la gestion des forêts et des logements ruraux Il s'agit d'un ensemble de substances organiques dont la dégradation implique une consommation de l'oxygène dissous dans l'eau (oxydation), ce qui a des conséquences directes sur la vie aquatique et l'importance de ces pollutions est estimée par deux mesures.

III.3.2.1. la demande chimique en oxygène(DCO)

la DCO (Demande Chimique en Oxygène)est la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables dans les conditions de l'essai contrairement à la DBO5 ou l'oxydation se fait lentement par l'activité des microorganismes, l'oxydation, la mesure de la DCO , est provoqué à l'aide d'un oxydant(bichromate de potassium)et des conditions données (ébullition ,catalyseur,...) alors que la DBO5 ne mesure que la matière organique naturellement et rapidement dégradable , la DCO permet de mesurer la majeure partie de la matière organique biodégradable, et peu dégradable c'est pourquoi les valeurs permet d'évaluer le caractère biodégradable de la matière organique .

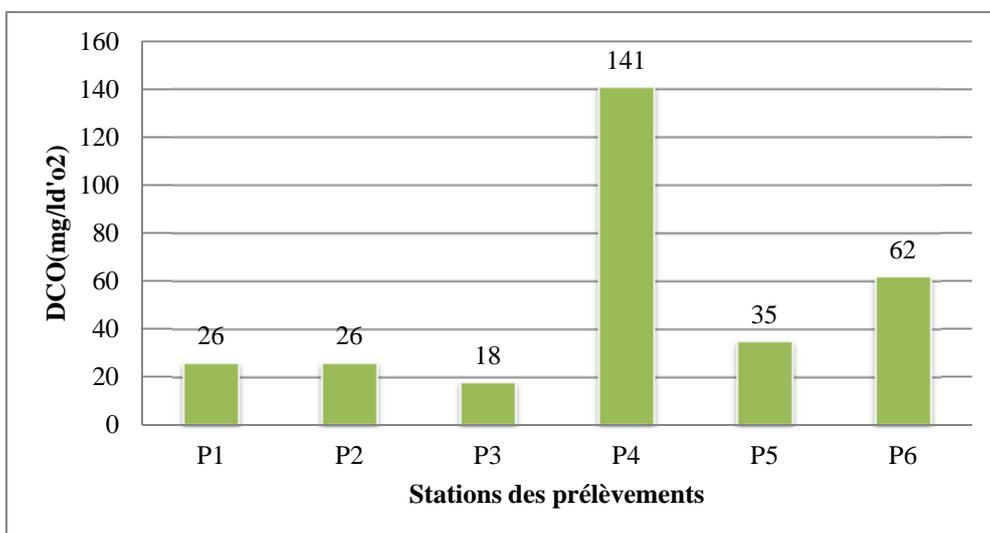


Fig.40: Histogramme de DCO des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

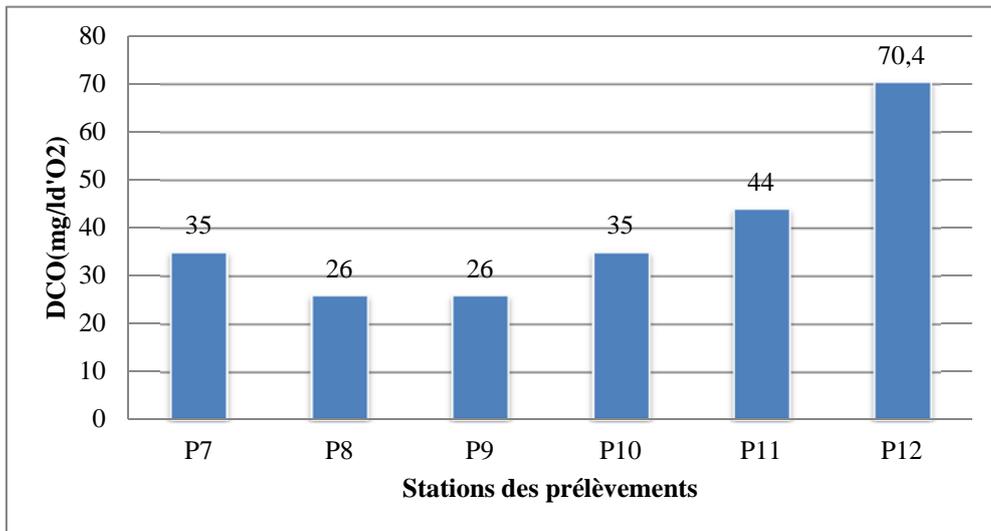


Fig.41 : Histogramme de DCO des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats enregistrés des concentrations en (DCO) dans la région d'Oum Teboul (Fig.40) montrent que les teneurs sont de l'ordre de 18 à 25mg/l d'O₂ pour les eaux des puits et varient entre 35 et 18mg/l d'O₂ pour les eaux de surface.

Pour la région d'Azzaba Fig.41 les valeurs sont comprises entre 26 et 44mg/l d'O₂ pour les prélèvements des puits. Concernant les échantillons d'eaux analysés de l'Oued les valeurs obtenues varient entre 26 et 70,6mg/l d'O₂.

III.3.2.2. la demande biologique en oxygène (DBO5)

La DBO5 (Demande Biologique en Oxygène) est la quantité d'oxygène utilisée pendant 5 jours par la dégradation naturelle, parmi les substances organiques consommatrices d'oxygène, on trouve l'azote, le phosphore et le carbone. L'effet principal d'un apport de matière organiques dégradables dans le milieu naturel est la consommation d'oxygène qui en résulte. En effet, la présence de microorganismes dans les eaux permet la dégradation en éléments plus simples de certaines substances plus complexes d'origine naturelle (végétaux ou animaux morts) ou artificielles (eaux usées) ou, cette activité de dégradation ou autoépuration, est consommatrice d'oxygène il nous a paru évident d'évaluer cette pollution organique en quantité d'oxygène demandée, la DBO5 exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation des matières organiques avec le concours des microorganismes dans des conditions données et sur une période fixée à cinq jours. Elle est obtenue par une différence entre le taux d'oxygène de l'eau mesuré immédiatement et celui mesuré après un temps d'incubation à une température de 20°C. (Gasmi.2009).

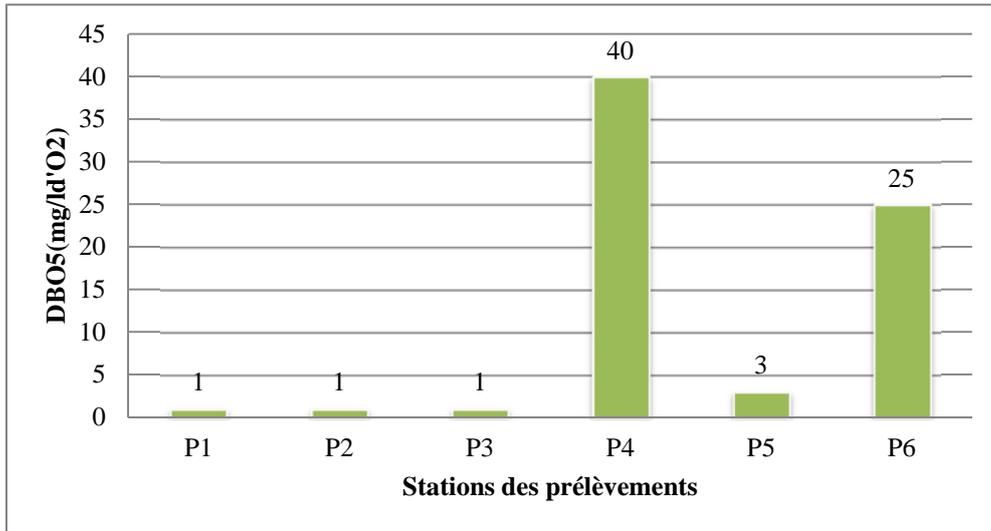


Fig.42: Histogramme DBO5 des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

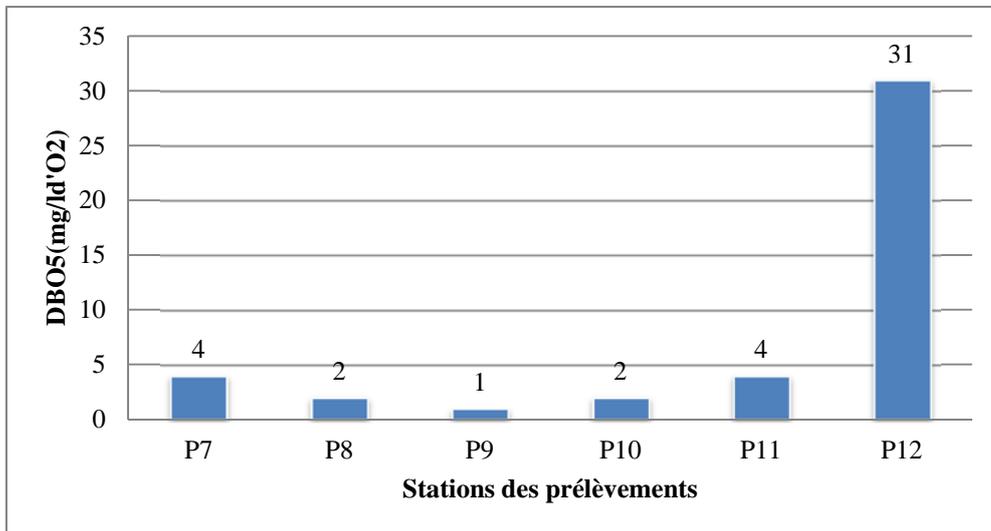


Fig.43 : Histogramme de DBO5 des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Au niveau des eaux de la région d'Oum Teboul (Fig.42) les concentrations observées sont nettement faibles à nulles (1 mg/l d'O₂), pour les eaux des puits par ailleurs on enregistre des valeurs variant entre 3 et 40 mg/l d'O₂) dans les prélèvements des eaux superficielles P4 (40 mg/l d'O₂) et P6 (25 mg/l d'O₂) ces fortes teneurs en (DBO₅) permettent alors de classer ces eaux de mauvaise qualité. La méthode d'indice de pollution organique (IPO) (Ipo, leclercq & maquet, 1987) fait ressortir que les eaux des deux points P4 et P6 représentent une forte pollution organique et indique une pollution faible au niveau de point P5 (3 mg/l d'O₂).

Pour la région d'Azzaba (Fig.43) on constate que ses valeurs oscillent dans l'intervalle de 1 à 4 mg/l d'O₂ pour les eaux des puits et pour les eaux d'Oued les valeurs sont comprises entre 4 et 31 mg/l d'O₂ d'après l'indice de pollution organique (IPO) on peut dire que les eaux de la

région étudiée (Azzaba) représentent une pollution très forte aux niveaux P12, pollution faible aux niveaux P7, P11 et une pollution nulle au niveaux P8, P9, P10.

III.2.3. Les éléments mineurs naturels

III.2.3.1. Phosphate (PO_4)

Comme l'azote, le phosphate est un élément essentiel à la vie aquatique. Il peut se trouver sous différentes formes oxydées méta HPO_3 , pyro $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ et ortho H_3PO_4 . En milieu aqueux les formes méta et pyro tendent vers la forme ortho pour des pH compris entre 5 et 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphates sont données :

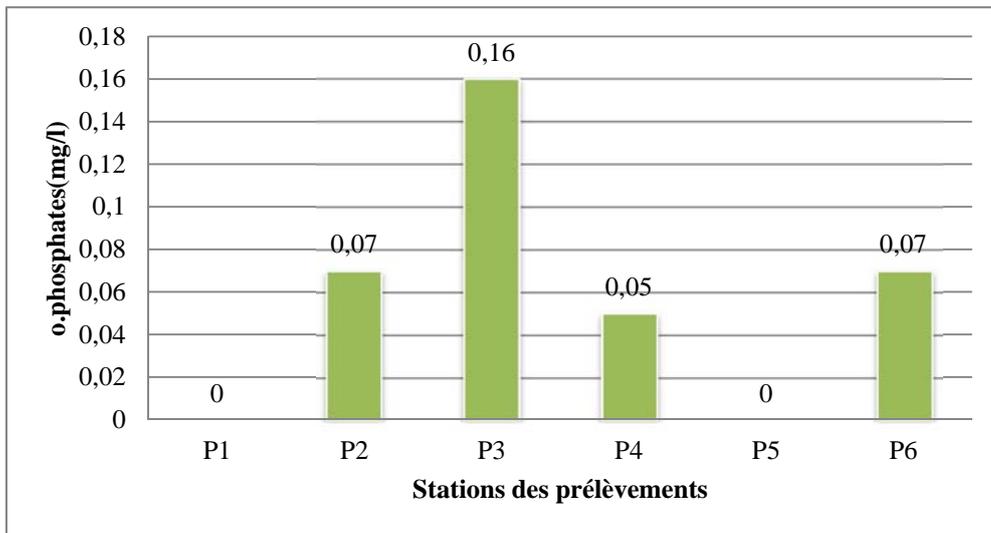
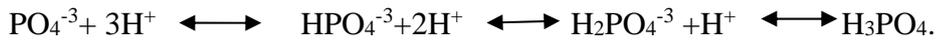


Fig.44: Histogramme d'O. Phosphates des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

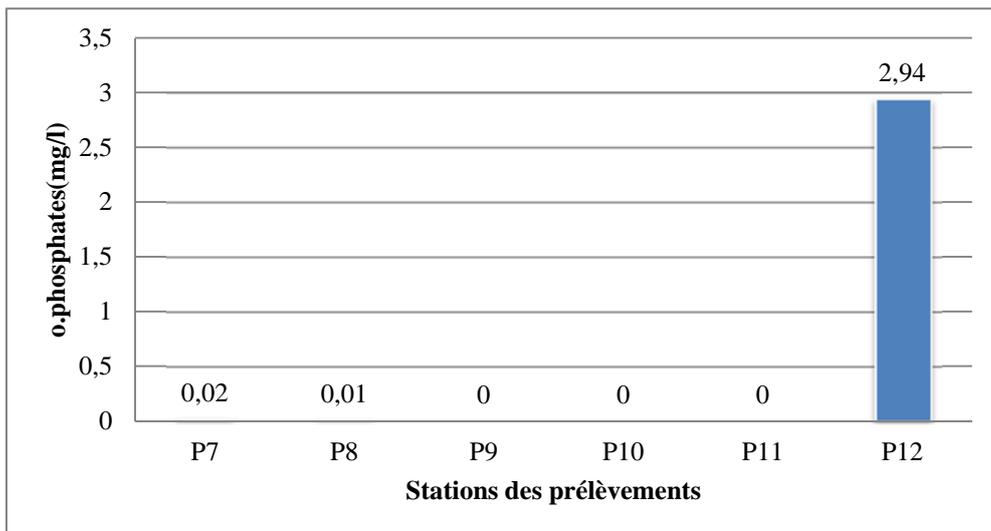


Fig.45 : Histogramme des O. Phosphates des eaux analysées de la région d'Azzaba.

On enregistre pour les eaux de la région d'Oum Teboul (Fig.44) des valeurs variant entre 0 et 0,16 mg/l aux niveaux des prélèvements des puits, les résultats concernant les

mesures des concentrations en O. Phosphates des eaux de l'Oued ont montré que les teneurs varient entre 0 et 0,07 mg/l.

Pour les eaux de la région d'Azzaba(Fig.45) les résultats de notre étude ont révélé que toutes les teneurs en O. Phosphates dans les échantillons d'eau des puits analysés sont nuls, exceptées celles des eaux de l'Oued dont les valeurs varient entre 0,01 et 2,94 mg/l et dépassent légèrement au. la norme OMS(2,68mg/l) au niveau de point P12 (2,94mg/l) ,cette disponibilité des ortho phosphates peut être expliquée soit par les apports d'engrais chimique, ou les rejets urbain dans l'oued, ses origine peut être due aussi à la précipitation des minéraux phosphatés (apatite) par leur facile solubilité dans un milieu réducteur chargé en sels minéraux (klippers,1999 ,Galvescloutier& al , 2001).

IV. Inventaire de pollution par les éléments métalliques en traces

Il est assez difficile de prévoir l'évolution des métaux dans l'environnement, car ils peuvent subir un grand nombre de transformations (oxydation, réduction, complexion,etc.), cette évolution dépend fortement du milieu. En effet, la migration des métaux lourds vers la nappe phréatique est en fonction de nombreux paramètres:

- la forme chimique initiale du métal,
- la perméabilité du sol et du sous-sol,
- la porosité du sol,
- le pH: dans un milieu acide, les métaux risquent de se solubiliser, alors quedans un milieu alcalin, ils peuvent former des hydroxydes métalliques,
- l'activité biologique: certains micro-organismes ont la capacité d'ingérerdes métaux, alors que d'autres les solubilisent par acidogénèse,
- le potentiel redox du sol,
- la composition minéralogique du sol: il peut y avoir formation de composés,
- la teneur en matières organiques du sol:(complexation des métaux par les substances humiques).

Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes: les eaux usées domestiques et industrielles, la production agricole, les polluants atmosphériques, les anciennes décharges, l'utilisation de substances dangereuses pour l'eau, la navigation, etc.

IV.1. Le fer

Le fer est un élément lourd, toxique, il peut avoir une origine naturelle provenant des terrains traversés (formations alluvionnaires) ou une origine industrielle.

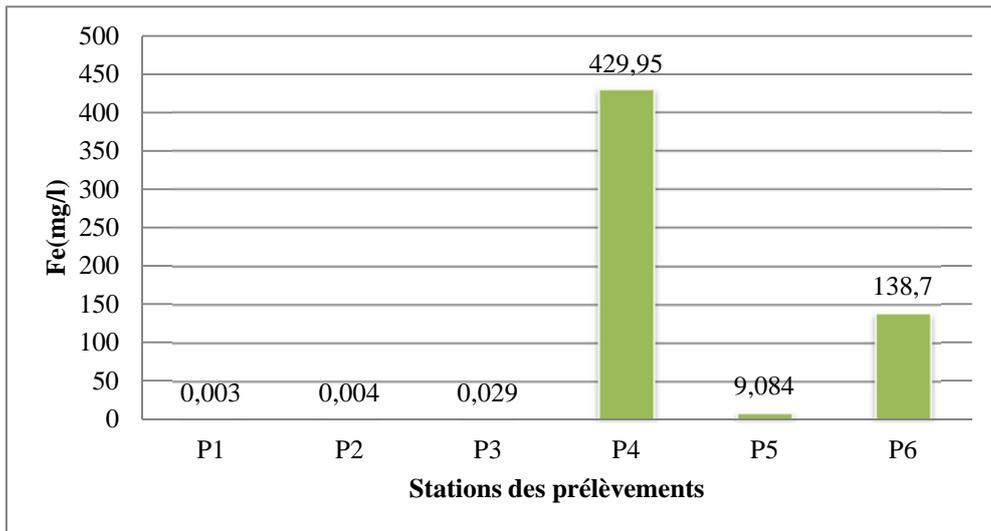


Fig.46: Histogramme de fer total des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

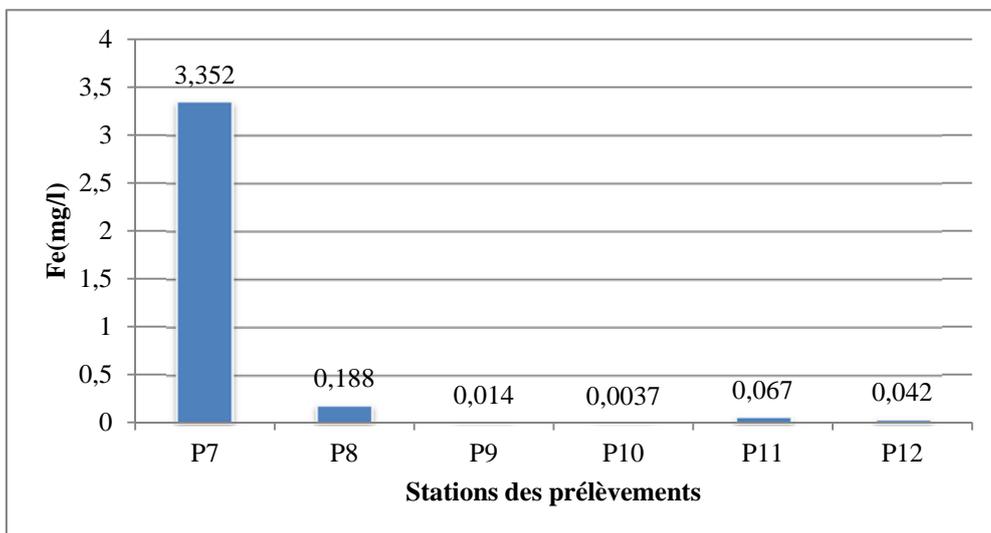


Fig.47: Histogramme de Fer totale des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans la figure 46 des eaux de la région d'Oum Teboul montrent des valeurs s'échelonnent entre 0,003 et 0,02 mg/l pour les eaux des puits et entre 9,084 et 429,95 mg/l pour les eaux superficielles. Notant que les valeurs enregistrent des teneurs qui dépassent les normes surtout au niveau P4 (429,95 mg/l) et P6 (138,7 mg/l) ceci est essentiellement dû aux résidus minier abandonné on peut dire que les eaux du site étudié sont très acides cette situation peut être expliquée par le processus chimiques entre le fer, l'eau, et l'air ce qui résulte le phénomène du drainage minier acide. Alors les eaux superficielles contaminées sont posées une menace sérieuse sur la population et l'environnement et surtout les faunes et flore et les animaux qui boivent au niveau d'Oued.

Pour les eaux de la région d'Azzaba (Fig.47) on enregistre des valeurs varient entre 0,0037 et 0,067 mg/l, dans les prélèvements des puits ces concentrations restent inférieures à la norme.

Aux niveaux des eaux de l'Oued les valeurs sont comprises entre 0,042 et 3,352 mg/l et elles dépassent légèrement donc on remarque la norme OMS, ces eaux n'auraient donc aucun impact sur environnement.

IV.2.Zinc

Il est très souvent associé au plomb et au cadmium dans les minerais naturels où il représente une teneur s'échelonnant de 4 à 20%. Le minerai principal est la blende (ZnS). L'apport en zinc dans le milieu aquatique est en partie dû à la métallurgie et à la combustion des énergies fossiles.

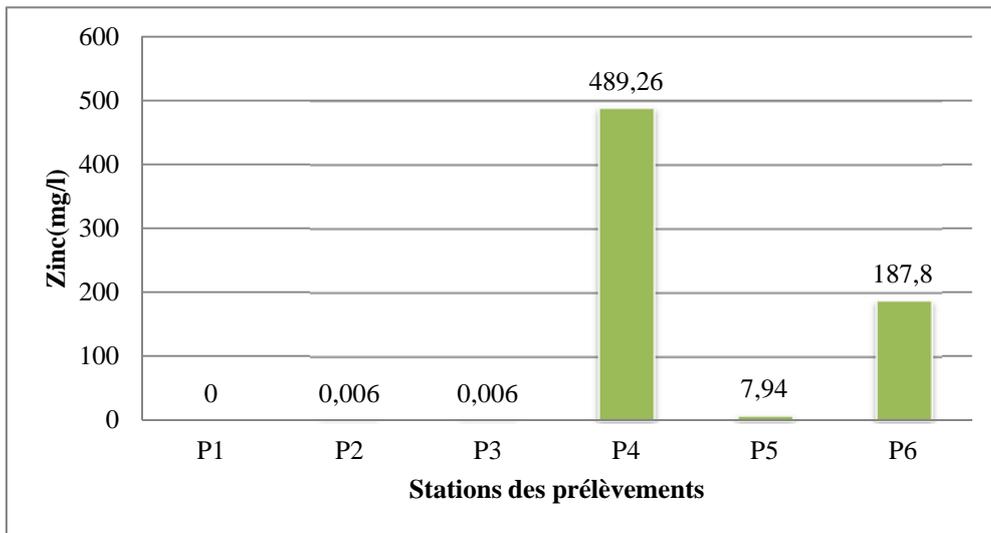


Fig.48: Histogramme de zinc des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

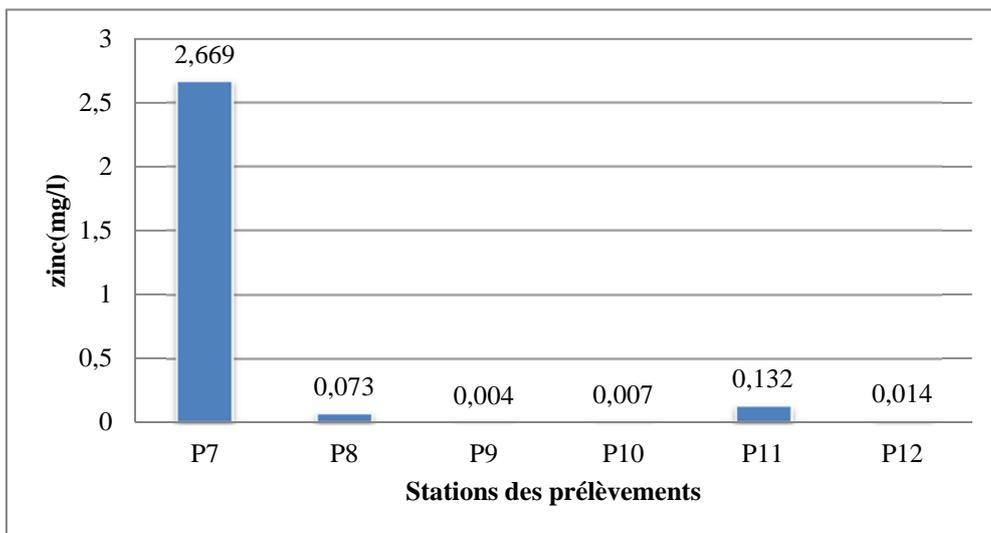


Fig.49 : Histogramme de zinc des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats obtenus (Fig.48) des eaux des puits de la région d'Oum Teboul ont montré que les valeurs de zinc s'échelonnent entre 0 et 0,06 mg/l, les concentrations en zinc présentent dans les eaux de surface varient entre 7,94 et 489,6 mg/l, l'augmentation des teneurs en zinc au niveau des eaux superficielles indique la présence d'une pollution par ce dernier qui peut être due aux résidus miniers abandonnés.

Pour les prélèvements des puits de la région d'Azzaba (Fig.49) on enregistre des valeurs variant entre 0,004 et 0,132 mg/l et des valeurs s'échelonnent entre 0,014 et 2,669 mg/l pour les échantillons de l'Oued. Les concentrations en zinc se trouvent faibles dans tous les points. donc on peut conclure que les eaux de la région d'Azzaba ne sont pas polluées par le zinc. et sa présence liée à la nature des roches de la région.

IV.3. Cuivre

Le cuivre est présent naturellement dans l'environnement, mais il est aussi abondamment utilisé dans les domaines industriels et domestiques. Il peut être détecté dans les eaux de surface, les eaux souterraines ou l'eau de mer. Sa présence fait suite à l'érosion du sol ou des rochers, de la dislocation du sol, ou encore à des activités anthropogéniques, telle que l'activité minière ou agricole, et les effluents provenant des usines de traitement des eaux usées (ATSDR, 2004; Cal EPA, 2008).

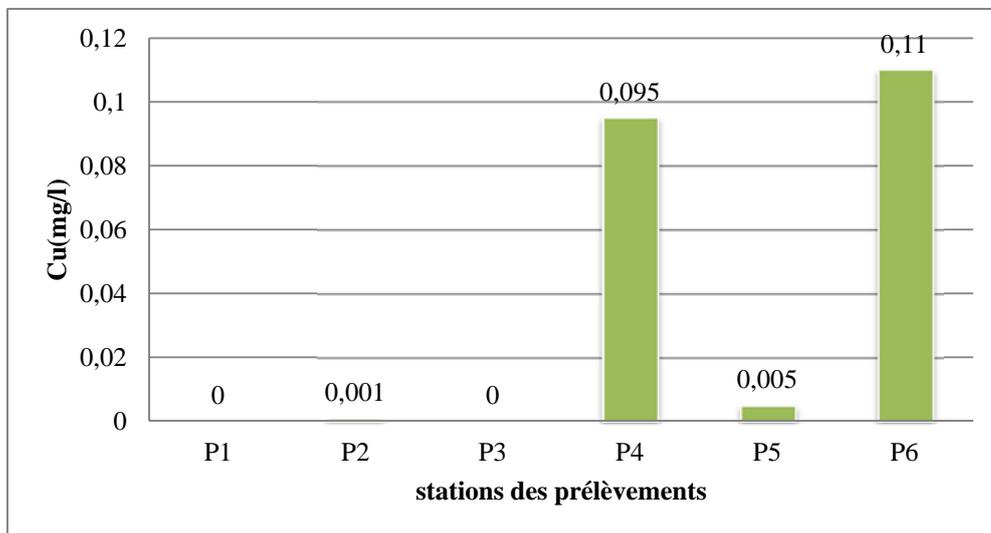


Fig.50: Histogramme de cuivre des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

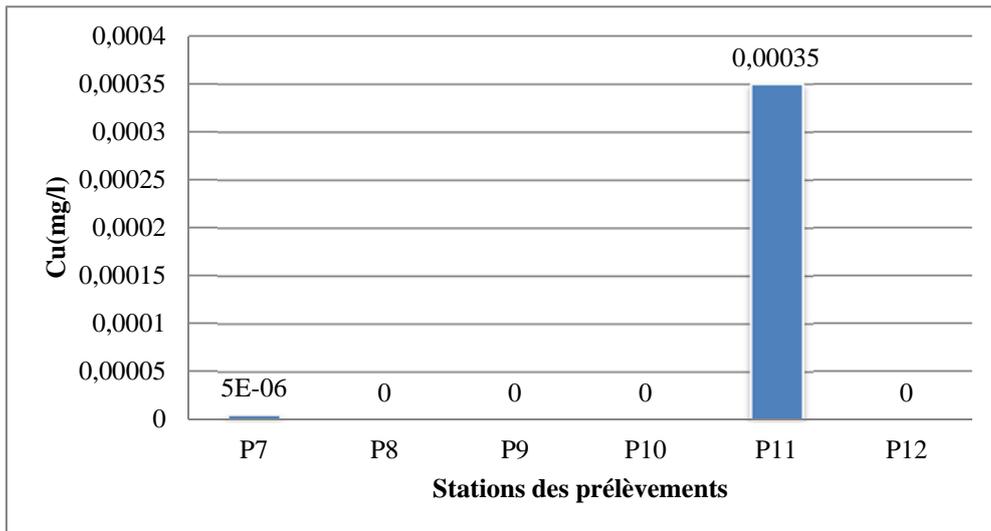


Fig.51 : Histogramme de cuivre des eaux analysées de la région d'Azzaba.

La figure 50 montre des valeurs variant entre 0 et 0,001 mg/l pour les eaux des puits de la région d'Oum Teboul tandis que les valeurs enregistrées dans les eaux superficielles sont comprises entre 0,05 et 0,11 mg/l, dépassant la norme OMS (0,005mg/l), ces fortes teneurs indiquent le lessivage des résidus miniers de l'ancienne mine abandonnée. La figure (Fig. 51) de la région Azzaba montre des valeurs nulles sauf P7 (0,005mg/l) et P11 (0,35mg/l) dues à la nature de roche de cette région.

IV.4. Cadmium

Il est également associé au minerai de zinc où il représente un faible pourcentage (0,01 à 0,05%). Il n'existe pas de minerai de Cd en quantité suffisamment grande pour être exploitable. Les activités métallurgiques, la combustion des produits pétroliers ainsi que la fabrication et l'épandage d'engrais phosphatés sont à l'origine de la contamination des différentes matrices, principalement l'eau, le sol et les sédiments. Pour des teneurs supérieures au ($\mu\text{g/L}$), des inhibitions de croissances peuvent être observées chez le phytoplancton. Chez l'homme, même à de faibles concentrations, il peut provoquer des dysfonctionnements urinaires (Chiffolleau, 2001).

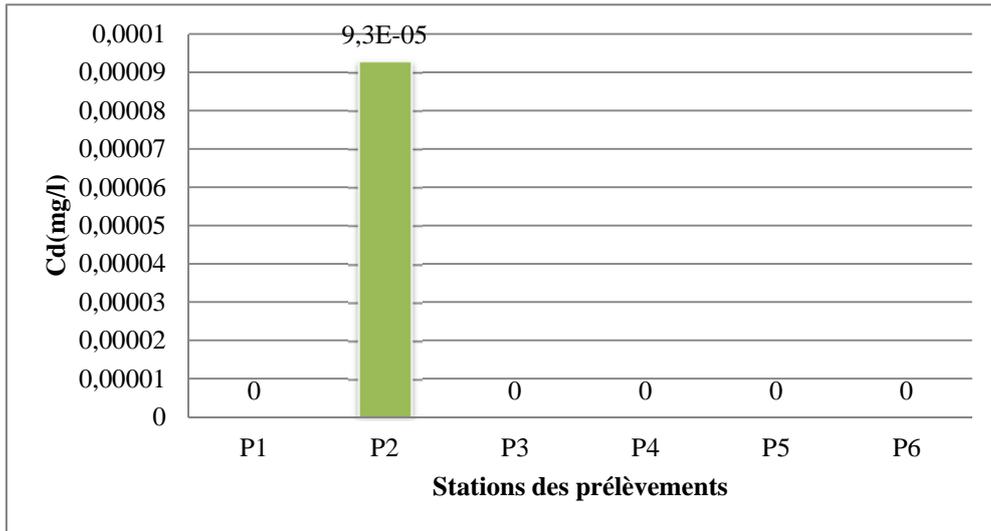


Fig.52: Histogramme de cadmium des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

A l'exception de point d'eau P2(0,00009) qui est presque nulle, les valeurs de cadmium dans la région Oum Teboul(Fig.52) indiquent que les eaux étudiées ne sont pas assujetties à un risque de pollution par ce métal

IV.5. Mercure

L'importance de l'accumulation du mercure dans les milieux naturels et sa toxicité élevée ont fait que ce métal soit l'un des polluants les plus dangereux.

Le mercure peut avoir des répercussions nocives sur l'environnement en polluant l'eau, le sol et l'atmosphère et finissent par atteindre les végétaux, animaux et l'homme (KECK G., 1979).

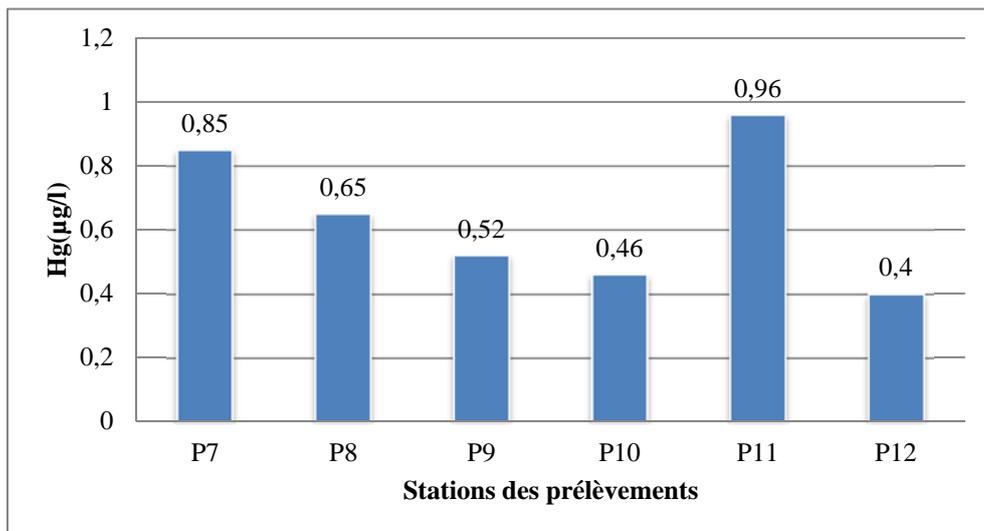


Fig.53 : Histogramme de mercure des eaux analysées de la région d'Azzaba.

Les résultats indiqués dans la figure 53 montrent que les valeurs s'échelonnent entre 0,46 et 0,98 ($\mu\text{g/l}$) pour les eaux des puits et entre 0,4-0,85 ($\mu\text{g/l}$) pour les eaux d'oued Fendek, donc les valeurs indiquent que le mercure existe dans les eaux de la région mais avec de faibles teneurs qui ne dépassent pas la norme OMS ($1\mu\text{g/l}$). La présence de mercures dans les eaux étudiées est due à la nature des roches de cette région et au résidu minier abandonné.

IV.6.L'arsenic

La présence de cet élément non métallique dans l'environnement est due aux rejets d'eaux résiduelles industrielles, traitement de minerais arsenicaux (cuivre), combustion de charbon ou de déchets, utilisation d'engrais phosphatés, d'herbicides, d'insecticides et de détergents. Dans les eaux minérales, l'arsenic d'origine naturelle atteint parfois des teneurs de 10 mg/L.

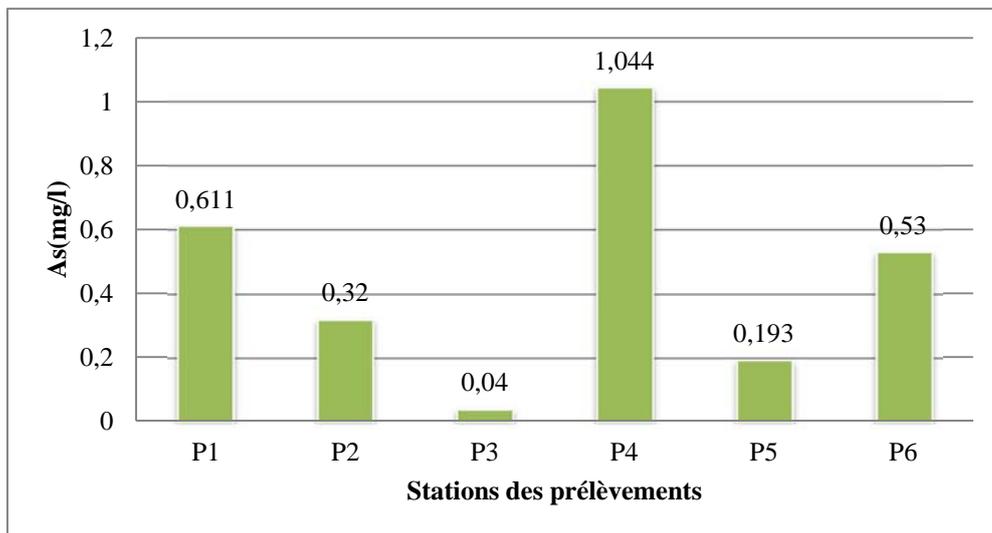


Fig.54: Histogramme d'arsenic des eaux analysées de la région d'Oum Teboul.

Les résultats indiqués dans la figure 54 montrent des variations qui sont de l'ordre de 0,04 à 0,611(mg/l) pour les prélèvements des puits et des valeurs variant entre 0,193et 1,044mg/l pour les eaux superficielles ; donc il y a un dépassement léger sur la norme dans tous les points qui est dû à la nature des roches et le lessivage des résidus miniers de la mine abandonnés.

V. Détermination et calcul de la pollution organique des eaux des régions d'études :

Pour caractériser la pollution organique au niveau des eaux d'Azzaba et Oum Teboul on utilise un logiciel nommé Aquakit.

V.1.Présentation du logiciel Aquakit

Aquakit est un logiciel renferme trois petits programme « Aquexmono », « Aquexmulti » , « Aquex simple» préparé à partir d'un tableau Excel permet de formuler les données d'Aquakit de les encoder et de les présenter en graphique pour faciliter les interprétations.

V.2.Mode d'emploi du logiciel

Le mode d'emploi est simple il suffit de faire remplir la feuille Excel par les résultats des différents éléments de l'analyse chimique, les calculs et les représentations graphiques se font automatiquement.

V.3.Exemple d'application Aquakit

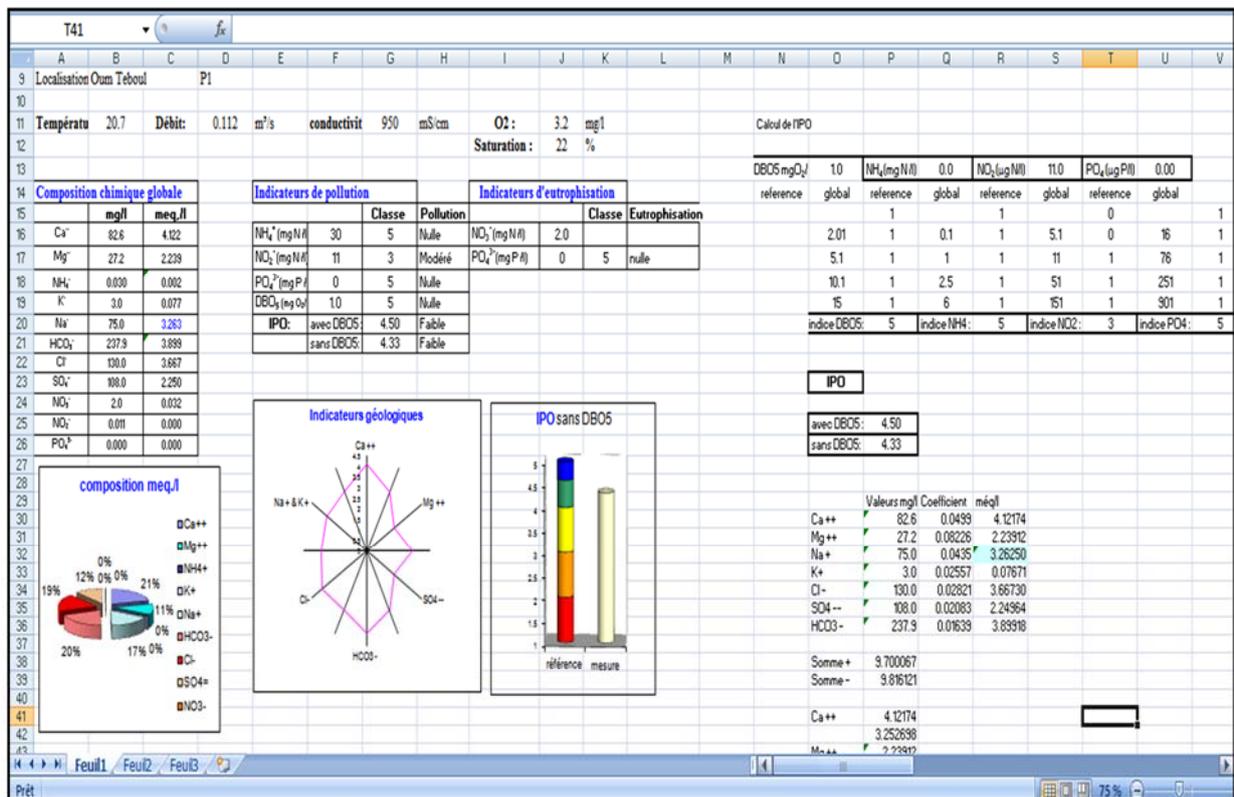


Fig.55.Exemple de l'application de logicielle Aquakit

V.4.Les indicateurs de pollution organique

Le principe de l'indice de pollution organique (IPO) est de répartir les valeurs des éléments polluants en 5 classes, puis de déterminer, à partir de ses propres mesures, le numéro de classe correspondant pour chaque paramètre puis d'en faire la moyenne.

Tableau.4. les différents éléments chimiques entrant dans le classement de la pollution organique.

Paramètres	DBO5	Ammonium	nitrites	phosphates	I.P.O	Pollution organique
Classes	mg-O ₂ /l	mg -N/l	µg-N/l	µg-P/l		
5	< 2	< 0.1	5	15	5.0 – 4.6	Nulle
4	2 – 5	0,1– 0.9	6 – 10	16 – 75	4.5 – 4.0	faible
3	5.1 – 10	– 2.4	11 – 50	76 – 250	3.9 – 3.0	Modérée
2	10.1 – 15	2.5 – 6.0	51 – 150	251 – 900	2.9 – 2.0	Forte
1	> 15	> 6	> 150	> 900	1.9 – 1.0	Très forte

Les résultats calculés par Aquakit représentés dans le tableau 5 ci_dessous

Tableau. 5. Tableau résume les résultats de l'application du logiciel Aquakit sur les analyses des eaux des deux zones d'étude (OumTboul,Azzaba)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
NH₄⁺ (µg N/l)	30	20	10	2300	420	40	360	180	10	90	110	740
Classe	5	5	5	3	4	5	4	4	5	5	4	4
Pollution	Nulle	Nulle	nulle	modéré	faible	nulle	Faible	faible	nulle	Nulle	faible	Faible
NO₂⁻ (µg N/l)	11	19	12	66	54	50	100	100	38	29	98	78
Classe	3	3	3	2	2	3	2	2	3	3	2	2
Pollution	Modéré	Modéré	modéré	forte	forte	Modéré	Forte	forte	Modéré	modéré	forte	Forte
PO₄³⁻ (µg N/l)	0	70	160	50	0	70	60	60	0	0	0	2940
Classe	5	4	3	4	5	4	4	4	5	5	5	1
Pollution	Nulle	Faible	modéré	faible	nulle	faible	Faible	faible	nulle	Nulle	nulle	Très forte
DBO5 (mg O ₂ /l)	1	1	1	40	3	25	4	2	1	2	4	31
Classe	5	5	5	1	4	1	4	5	5	5	4	1
Pollution	Nulle	Nulle	nulle	très forte	faible	très forte	Faible	nulle	nulle	Nulle	faible	très forte
IPO classe	4.5	4.25	4	2.5	3.75	3.25	3.5	3.75	4.5	4.5	3.75	2
Pollution	Faible	Faible	faible	forte	Modéré	modéré	Modéré	modéré	faible	faible	modéré	forte

dans le tableau 5 la méthode d'IPO fait ressortir que les eaux des deux régions étudiées représentent une pollution faible aux niveaux des stations P1, P2, P3, P9, P10, une pollution modéré dans les stations P5,P6 ,P7,P8 ,P11, Par ailleurs les stations P4et P12 représentent une pollution forte la mauvaise qualité des eaux dans ces stations P4 et P12 se traduit essentiellement par intensité de la pollution pendant les périodes sèches avec la diminution de la vitesse d'écoulement et le réchauffement des eaux prendre en compte les principales sources de pollution qui sont représentées dans les deux points par les rejets directs des eaux usées urbaines ,industrielles et les angaries utilisées dans l'agriculture.

La présence de cette forte pollution dans les eaux de surface entraîne un développement massif d'algues et des bactéries qui caractérisent le phénomène d'eutrophisation.

V.6. Les indicateurs d'eutrophisation

Ces indicateurs regroupent les nitrates et surtout les phosphates : ils représentent les stades finals de la dégradation des polluants de l'azote et du phosphore dans les eaux de la rivière.

Ils n'ont pas un caractère toxique direct pour les êtres vivants de la rivière, mais ils peuvent provoquer un déséquilibre de l'écosystème en favorisant un développement anarchique des plantes aquatiques. Tableau.6. Tableau résume les résultats du logiciel Aquakit pour l'eutrophisation.

	NO³⁻ (mg /l)	PO₄³⁻(μ/l)	Classe	eutrophisation
P1	2	0	5	nulle
P2	0	70	4	faible
P3	0	160	3	modéré
P4	0	50	4	faible
P5	0	0	5	nulle
P6	0	70	4	faible
P7	4.2	60	4	faible
P8	4.2	60	4	faible
P9	0	0	5	nulle
P10	0	0	5	nulle
P11	11	0	5	nulle
P12	0	2940	1	Très forte

Les résultats représentés dans le tableau 6 indique une eutrophisation nulle dans les stations P1, P5 ,P9 ,faible dans les stations P2, P4 , P6 ,P7 ,P8,modéré dans la station P3et très forte dans la station P12. Cette classification d'eutrophisation est due à l'apport excessif en nutriment et en matière organique biodégradable issus de l'activité humaine .Ces nutriments proviennent principalement des phosphates il entraine une multiplication en surface du phytoplancton cette multiplication excite les bactéries aérobies qui sont présente en profondeur et consomment progressivement tout l'oxygène des eaux profonds qui ne peuvent pas se ré-oxygéner en raison du faible brassage des eaux.

VI. Salinité des eaux d'irrigations et salinisation (Risque du sodium : SAR)

Les eaux d'irrigation ne sont utilisées que si elles sont dans les critères de développement agricole. La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre essentiel pour le rendement des cultures et le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement.

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. D'autres problèmes, pour les récoltes, provoquées par un excès de Na, qui sont la formation de lit de croûte de graines, une saturation temporaire à la surface du sol, un pH élevé et une possibilité accru de présence de maladies, des herbes, d'érosion des sols, de manque d'oxygène(asphyxie) et de disponibilité nutritive insatisfaisante.

L'index de qualité des eaux d'irrigation, est déterminé par le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium. (Kherici.B.H)

Le SAR est défini par l'équation suivante :

$$\text{SAR} = [\text{rNa}^+] / \sqrt{[(\text{rCa}^{++} + (\text{rMg}^{++})/2)]}$$

Na⁺: Sodium

Ca²⁺: Calcium

Mg²⁺: Magnésium

les unités sont exprimées en méq/L

Le diagramme de Riverside et Wicox (Fig.II .49) permet de mieux gérer la qualité des eaux en fonction des classes du SAR et de la salinité.

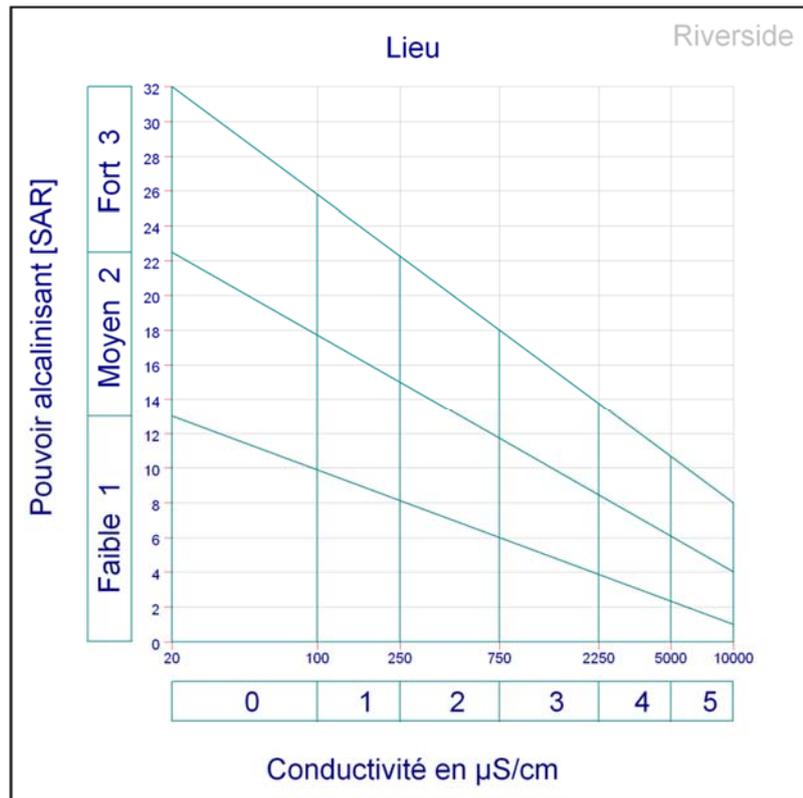


Fig.56.Diagramme de Riverside et Wilcox

Tableau.7.les défèrent état d'utilisations des eaux pour l'irrigation

Degrés	Qualité	Classe	État d'utilisation
1°	Excellente	C1-S1	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2°	Bonne	C2-S1	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
3°	Admissible	C3-S1,S2,S3	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
4°	Médiocre	C4 -S1,S2	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
5°	Inapte	C5-S1,S2,S3,S4	Inutilisable

Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR

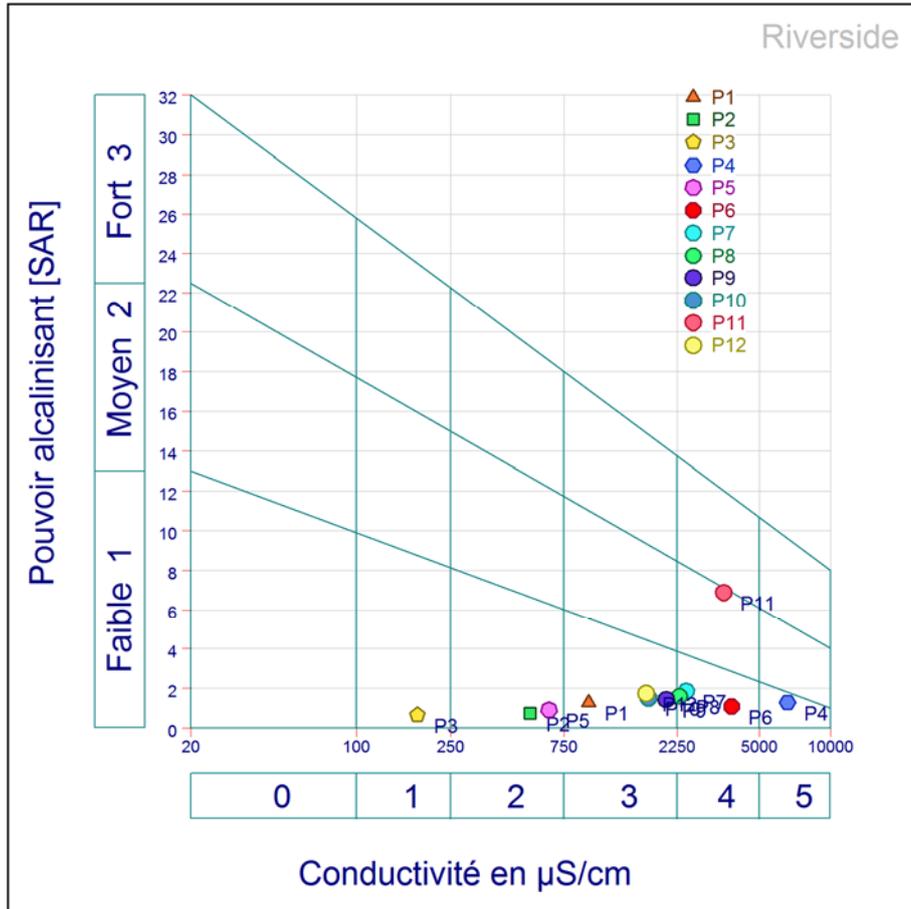


Fig.57. résultats de Diagramme de Riverside

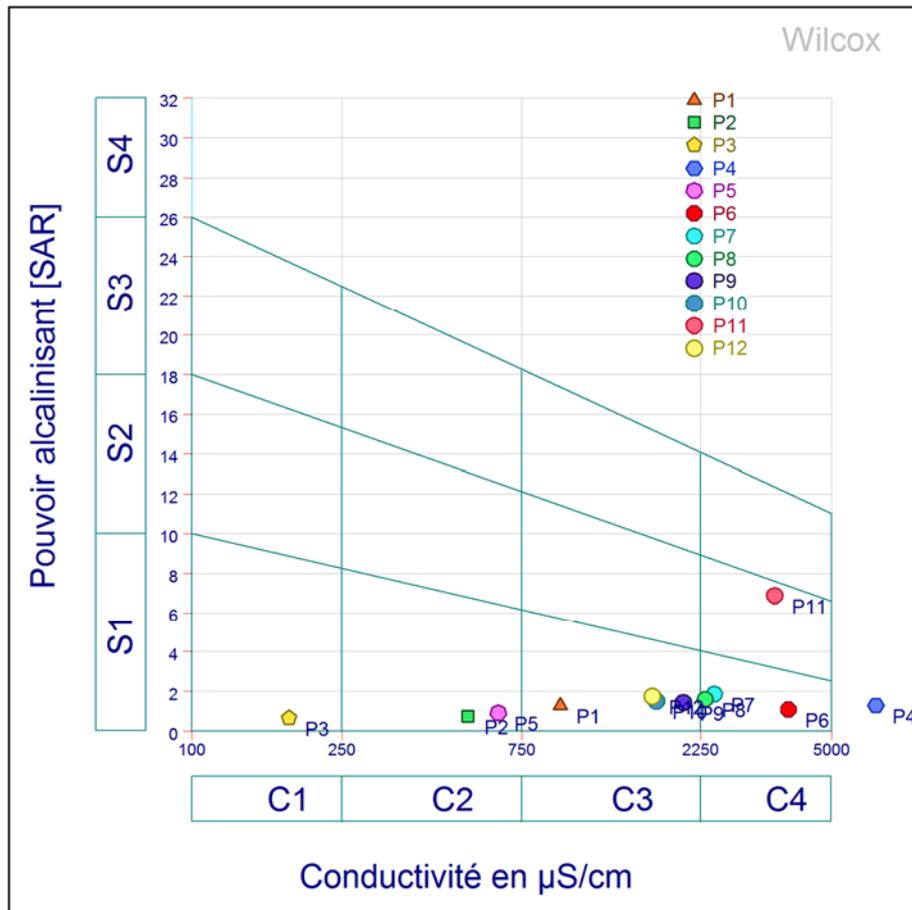


Fig.58.Résultats de diagramme de Wilcox

Les diagrammes Riverside et Wilcox de la classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du nous ont permis de déduire que les eaux des deux régions, appartiennent généralement à la première et deuxième classe. En général la classification de ces eaux est comme suit : -Excellente, favorable à l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols (P3) ;

-Bonne, convenable à l'irrigation de culture tolérante aux sels, son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles (P2, P5) ;

-Acceptable, la salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés (P1, P12, P10, P9) ;

-Médiocre,- ,fortement minéralisées, pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels, bien drainées et bien lessivées (P7,P8,P6) ;

-Qualité médiocre, fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité (p11) ;

-Qualité inapte(Inutilisable) (p4) peut être expliquée par la forte propagation des eaux usées provenant des rejets urbains et de résidus miniers abandonnées.

VII. Inventaire de pollution bactériologique :

La pollution microbiologique est due aux bactéries d'origine fécale et provient principalement des eaux usées et des élevages agricoles.

La mauvaise qualité microbiologique de l'eau peut être induite par des activités anthropiques ou par des phénomènes naturels. Dans la plupart des cas, la pollution s'entend comme un dépassement aux normes, définies en fonction des usages de l'eau. Elle perturbe les conditions de vie et l'équilibre du milieu aquatique et compromet les utilisations de l'eau.

La méthode de traitement de données est basée sur l'indice de contamination fécale (Bovesse et Depelchin, 1980). La classification des paramètres pollués se fait selon cinq classes de qualité correspondant aux couleurs standards.

Pollution nulle couleur bleu

Pollution faible couleur vert

Pollution modérée couleur jaune

Pollution forte couleur orangé

Pollution très forte couleur rouge

Le suivi des analyses dans les différents points a fait l'objet d'un traitement de données selon la méthode de Bovesse et Depelchin (1980). La caractérisation de la qualité hydrobiologique des eaux se base sur l'indice de contamination. Le principe est de répartir les valeurs des éléments polluants en 05 classes et de déterminer à partir de ses propres mesures le numéro de classe correspondant pour chaque paramètre pour en faire la moyenne (Tableau.II.2).

Tableau .8: Grille de la qualité (IQM)

Les limites des classes ont été établies par BOVESSE & DEPELCHIN (1980).

Classe n°	Bact. tot./ml	colif. f./ml	strepto. f./ml	IQM	Contamination fécale
5	<2000	<100	<5	4,3-5,0	Nulle
4	2000-9000	100-500	5-10	3,5-4,2	faible
3	9000-45000	500-2500	10-50	2,7-3,4	modérée
2	45000-360000	2500-20000	50-500	1,9-2,6	forte
1	>360000	>20000	>500	1,0-1,8	très forte

Tableau.9 : classification des eaux des deux régions (Oum Teboul et Azzaba) par IQM

	Bact. tot./ml	class	colif. f./ml	Class	strepto. f./ml	Class	moyenne	IQM
P1	43	5	0	5	3	5	5	Pollution nulle
P2	5.10^5	1	20	5	560	1	2,33	Pollution modérée
P3	$4,2.10^3$	4	15	5	600	1	3,33	Pollution faible
P4	15	5	0	5	0	5	5	Pollution nulle
P5	46	5	0	5	0	5	5	Pollution nulle
P6	50	5	0	5	0	5	5	Pollution nulle
P7	6.10^3	4	0	5	0	5	4,66	Pollution nulle
P8	$5,5.10^3$	4	2	5	0	5	4,66	Pollution nulle
P9	$4,7.10^3$	4	10	5	0	5	4,66	Pollution nulle
P10	55	5	0	5	0	5	5	Pollution nulle
P11	5.10^5	1	50	5	510	1	2,33	Pollution modérée
P12	6.10^5	1	48	5	568	1	2,33	Pollution modérée

L'interprétation des résultats obtenus (Tableau 9) selon l'indice de qualité microbiologique (IQM) des eaux souterraines (puits) et des eaux superficielles (Oued) dans les deux régions étudiée montrent que la classification des eaux de la région d'Oum Teboul représentent une pollution microbiologique modéré(P2) à faible et nulle (P3), (P1), ses résultats sont directement liée à la minéralisation et à la température des eaux qui influent sur les Conditions de vie des bactéries.

Pour les eaux superficielles on enregistre une pollution nulle pour les points P4, P5 et P6, l'absence de la pollution microbiologique due aux valeurs de pH acides enregistrées dans ces stations qui influent sur la vie aquatique et bactériologique.

dans la région d'Azzaba on enregistre une pollution microbiologique modérée (P11) à nulle (P9, P10) , les eaux superficielles (Oued Fendek) représentent une pollution nulle (P7, P8) à modéré (P12) ceux-ci pourraient signifier par l'influence de la température et la minéralisation des eaux.

VIII. Conclusion

L'inventaire de pollution sur les deux sites étudiés nécessite l'interprétation des résultats des analyses effectuée sur les eaux des deux régions.

Les résultats obtenus lors des analyses des échantillons d'eau de la région d'Oum Teboul enregistrent des fortes valeurs de conductivité, des valeurs du pH acide dépassant la norme et des valeurs élevées en sulfate au niveau deux stations des eaux de surface. Les eaux de ces dernières présentent aussi une pollution organique très forte par la DBO5. La pollution par les éléments en traces métalliques est très forte dont les eaux se trouvent aussi contaminées par quelques éléments polluants tels que le fer, le zinc et le cuivre. À partir de ces résultats les fortes teneurs en ETM et la diminution du pH, et l'augmentation de la conductivité on peut conclure que cette situation est due aux résidus miniers abandonnés d'ancienne mine d'Oum Teboul provoquant du drainage minier acide. L'absence de la pollution microbiologique dans les prélèvements mesurés due au milieu acide, ce dernier peut détruire la vie aquatique et bactériologique, suite à leur diffusion au niveau des eaux.

L'étude qui a porté essentiellement sur l'évaluation de la qualité des eaux de la région d'Azzaba, il ressort quelles paramètres physico-chimiques indiquent des dépassements sur la norme OMS au niveau des eaux souterraines et superficielle, les résultats obtenus des valeurs de conductivité ont montré que la minéralisation des eaux est naturelle et liée à la nature des sols.

Les eaux étudiées ont montré des valeurs relativement élevées en DBO5 ces fortes valeurs seraient liées à une forte oxydation des composés inorganiques oxydables.

Pour les éléments en traces métalliques on enregistre deux valeurs de fer supérieures à la norme OMS standard mais ces valeurs ne posent pas un danger sur l'environnement. Le mercure existe dans les eaux de la région mais avec de faibles teneurs qui ne dépassent pas la norme OMS (1µg/l), la présence de cet métal dans les eaux étudiées est due à la nature des roches de cette région et au résidu minier abandonné de la mine mercurielle de cette région.

La méthode d'IPO fait ressortir que les eaux étudiées représentent une pollution organique forte due au rejet urbain, agricole et industriel dans les deux stations. Par conséquent cette pollution

peut engendrer le phénomène d'eutrophisation du milieu. Les résultats enregistrés pour l'évaluation de risque de salinité par le diagramme wilcox confirme les mesures trouvés par Reverside .d'après cette évaluation on peut classer les eaux de la région d'étude comme suit : une qualité médiocre due aux rejets urbaines et agricoles ; qualité inutilisable due aux rejets urbain et de résidus miniers abandonnées concernant la pollution microbiologique les concentrations sont relativement faible à nulle représentant une pollution faible à modéré ceux-ci pourrait signifier par l'influence de la température et la minéralisation des eaux.

I. Introduction

La caractérisation des eaux se sert de définir les différentes caractéristiques quelque soient ses compositions, chimique, minéralogique et bactériologique dans le but de connaître leur nature et origine à l'aide de l'étude hydrochimique.

En effet l'hydrochimie intéressée à l'étude des mécanismes chimiques qui influence l'arrangement et le mouvement des composés chimiques des eaux. Pour cela l'hydrochimie se sert principalement de la chimie (thermodynamique, acides-bases, précipitations-dissolutions, oxydation- réduction, interactions entre différentes phases, ...etc.), mais aussi de la biologie et de la géologie. Elle établit des modèles propres tels les modèles de la dissolution du dioxyde de carbone, la précipitation et la dissolution des minéraux (oxydes, dioxydes, carbonates, etc.), la spéciation des métaux, les interactions solides-liquides. Comme on peut classer dans l'hydrochimie les techniques et protocoles d'échantillonnage des eaux, l'étude de la pollution des milieux aquatiques et la plus part des applications qui sont devenues des sciences complètes au vu de leur complexité (Stumm, Morgan, 1981).

De nombreux modèles sont employés par les hydrochimistes, afin de trouver des solutions des systèmes d'équilibre complexes et classer selon le calibre des données expérimentales et vérifier des scénarios. Fréquemment un modèle exige une base de données identifiant les constantes d'équilibres des phases minérales d'une eau.

Dans ce chapitre on utilise deux modèles hydrochimiques pour la caractérisation chimique et minéralogique et on utilise le logiciel Aquakit pour interpréter la composition chimique globale, le diagramme de piper et Schoeller Berkaloff pour obtenir le faciès chimique des eaux étudiées et le logiciel Phreeqc pour caractériser l'état des minéraux dans l'eau et les interactions solides-liquides. La caractérisation microbiologique se consacrent à l'identification et à la caractérisation des micro-organismes dans les eaux ; à l'étude de leur origine et de leur évolution ; à définir leurs caractéristiques, dans ce but on fait des analyses bactériologiques pour caractériser les microorganismes qui existent dans les eaux étudiées. Enfin, à partir de la caractérisation minéralogique, chimique et bactériologique on peut révéler et prédire les caractéristiques des eaux étudiées et leurs origines.

II. Caractérisation chimique des deux sites :

II.1. La composition chimique globale par logiciel Aquakit

II.1.1. Présentation du logiciel Aquakit

Ce logiciel inclure trois petits programme « Aquexmono », « Aquexmulti », « Aquexsimple » préparant à partir d'un tableau Excel permettant de formuler les données d'Aquakit de les encoder et de les exposer en graphique afin de faciliter les interprétations.

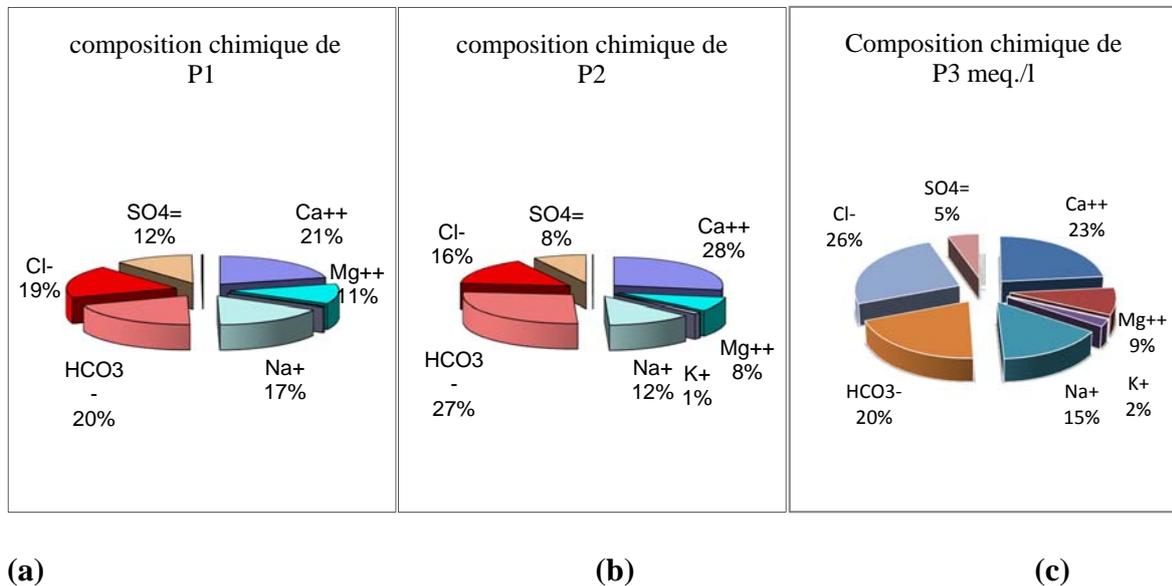
II.1.2. Mode d'emploi du logiciel Aquakit

Les calculs et les représentations graphiques se font automatiquement après le remplissage de la feuille Excel par les résultats des différents éléments de l'analyse chimique.

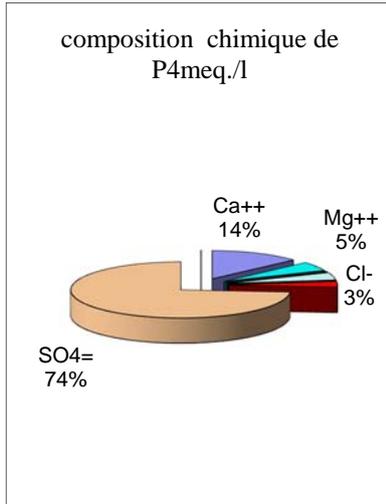
II.1.3. La composition chimique globale

Les concentrations des principaux ions sont exposer dans un graphique en secteurs (exprimées en milliéquivalents/litre) cette présentation permet de vérifier l'égalité entre la charge électrique totale des ions positifs et celle des ions négatif.

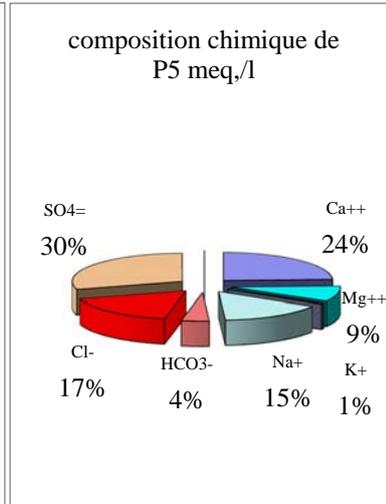
L'application du logiciel Aquakit sur les résultats d'analyses des deux régions Azzaba et Oum Teboul donne les secteurs graphiques de la composition chimique des eaux des stations d'étude (Fig.59)



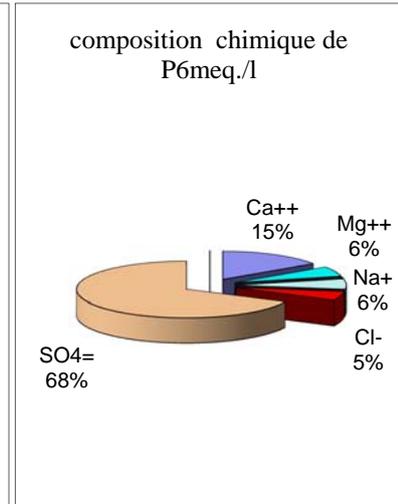
Chapitre III : Les caractérisations des deux sites d'un point de vue chimique, minéralogique et microbiologique



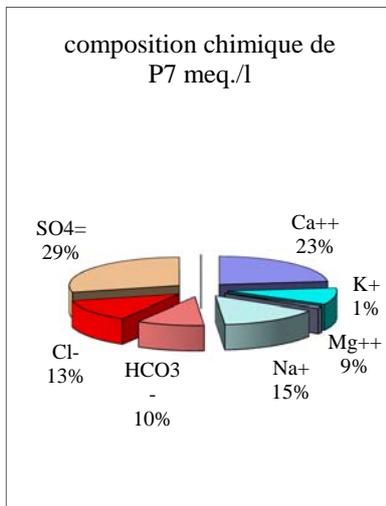
(d)



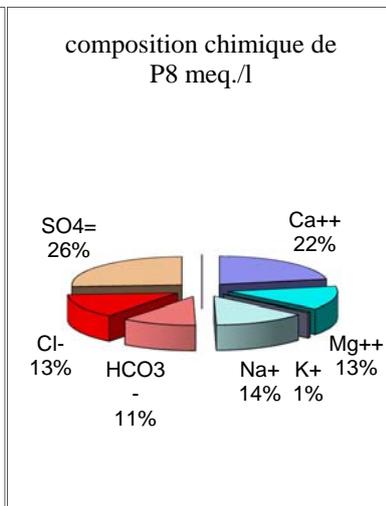
(e)



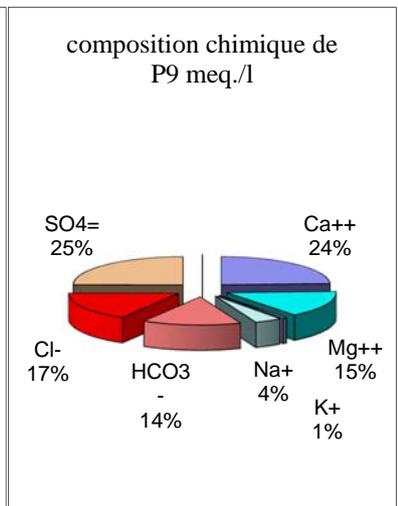
(f)



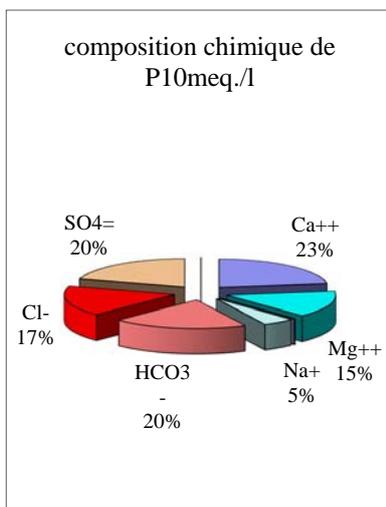
(g)



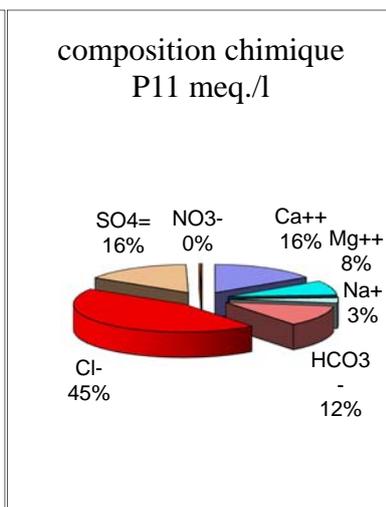
(h)



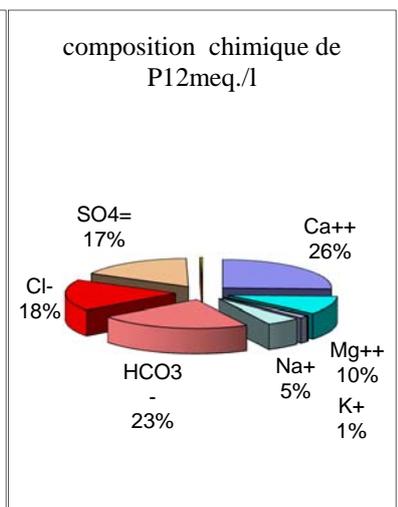
(i)



(j)



(k)



(l)

Fig.59.Composition chimique des eaux pour les stations (a) P1 ,(b)P2, (c)P3,(d)P4 (e)P5,(f)P6,(g)P7,(h)P8,(i)P9,(j)P10,(k)P11,(l)P12.

Selon la composition chimique des différentes stations de prélèvement on remarque dans la région d'Oum Teboul:

Le calcium et le sodium sont les éléments les plus dominants des cations avec une variante entre 14 et 28% de Ca^{++} et entre 6 et 17% de Na^+ .

Les bicarbonates et chlorures sont les éléments les plus dominants des anions dans les stations P1, P2, P3 avec une variante entre 16et 26%de Cl^- et ente 20et 27%de HCO_3^- cette présence est due au lessivage des évaporites et aux rejets urbains.

Les sulfates sont les anions les plus dominants dans les stations P4, P5, P6 avec une variante entre 30et 74% de SO_4^{--} cette présence de sulfates parvenue par les eaux résiduaires urbaines et minières.

Les sulfates et chlorures sont les anions les plus dominants dans les stations de la région d'Azzaba avec une variante entes16et 29% de SO_4^{--} et entre 13 et 45% de Cl^- .Ces valeurs sont dues aux engrais phosphatés azotés et sulfurés à cause de leur solubilité dans l'eau, ces derniers sont parvenus dans les eaux du cours d'eaux soit par lessivage des terres agricoles, soit par les eaux résiduaires urbaines ou industrielles.

Le calcium, magnésium et sodium sont les cations les plus dominants dans les stations P7 et P8 avec les variations suivantes :

Ca^{++} entre 22 et 23%

Mg^{++} entre 9 et 13%

Na^+ entre 14et 15%

L'origine de ces trois éléments est purement géologique elle est due au contexte géologique de la région d'étude.

Le calcium et magnésium sont les cations les plus dominants dans les stations P9, P10, P11, P12 avec une variante entre 16 et 26% de Ca^{++} et entre 8 et 15% de Mg^{++} ces valeurs sont dues à l'origine géologique de la région.

II.2. Faciès chimique des eaux étudiées

III.2.1. Description de Diagramme de Piper

Ce diagramme est une façon de représentation graphique permettant de caractériser le faciès hydro chimique d'une eau, l'évolution de l'élément chimique ainsi que leur genre (Piper 1944).

La dominance anionique ou cationique d'une eau permettant de préciser à partir la position relative d'un résultat analytique sur chacun des deux triangles de diagramme. Il est utile de ce programme est qu'il fait la détection d'un même graphique de nombreuses analyses aux groupements familiaux permettant analogues à ce pourrait être intéressant particulièrement le contrôle de la qualité de l'eau dans les études régionales de comparaison entre les différents points.

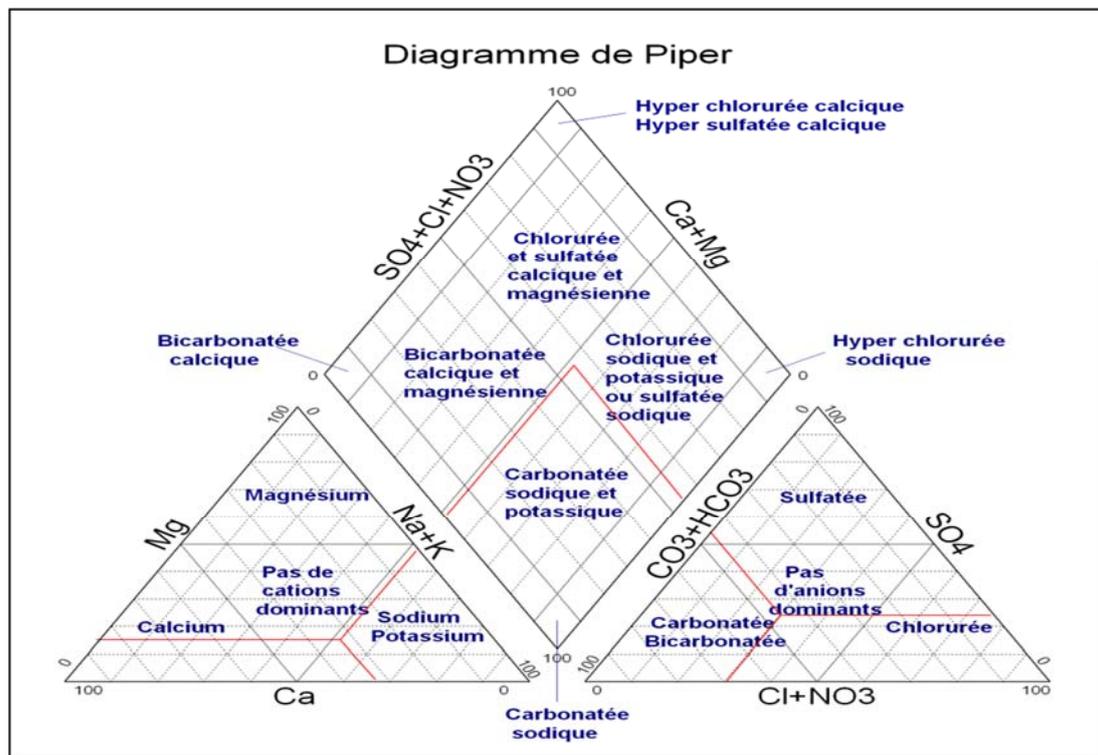


Fig .60. Diagramme de Piper

II.2.2. Les faciès chimiques des eaux étudiées par Diagramme de Piper

Les analyses d'eau des deux sites d'étude représentées sur le diagramme de Piper (Fig.61) qui donne une idée sur le faciès chimique des eaux et met en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux.

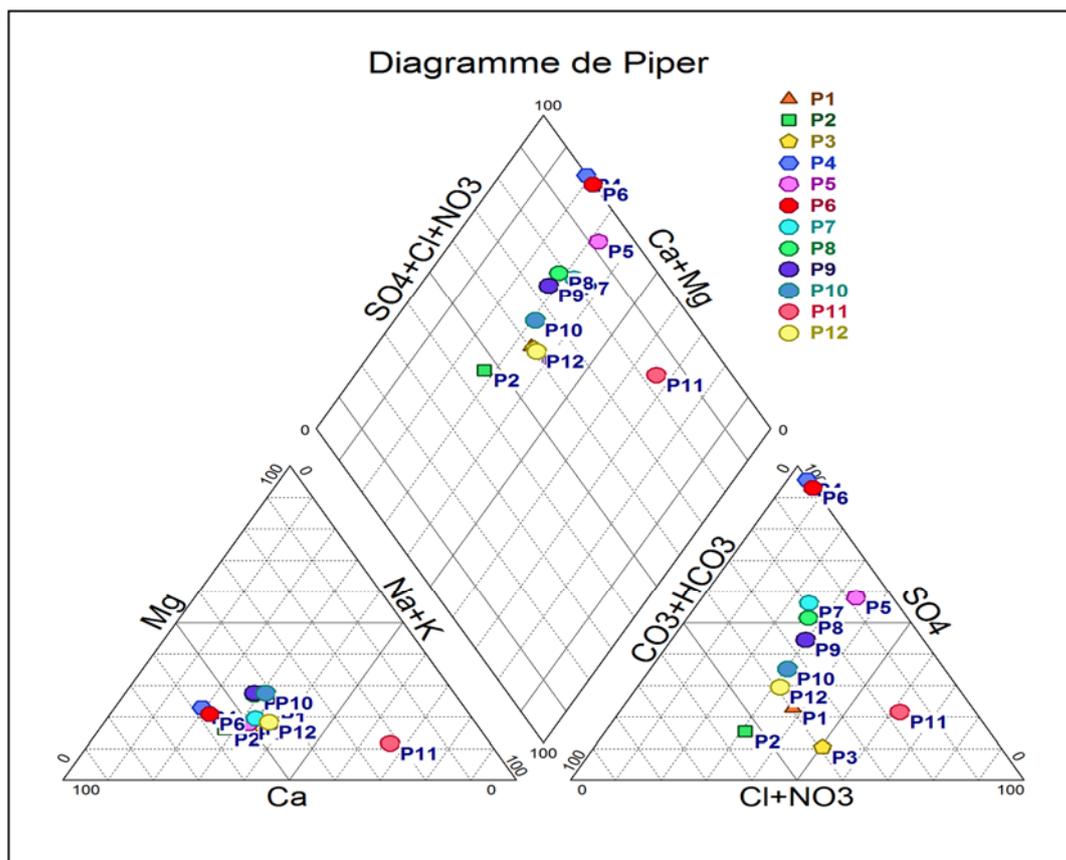


Fig.61. Diagramme de Piper de la région d'Azzaba .

L'interprétation des paramètres chimiques des deux régions d'étude Oum Teboul et Azzaba, avec le diagramme de Piper (Fig.61) montre les résultats des faciès chimiques.

Pour la région d'Oum Teboul d'après le diagramme de Piper, on observe les stations P1, P3, P4, P5, P6 concentrés au pôle de faciès chloruré et sulfaté calcique magnésien, sauf P2 concentré au pôle de faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

Pour la région d'Azzaba on enregistre d'après Piper, que les stations P7, P8, P9, P10, P12 sont aussi concentrées au pôle de faciès chloruré et sulfaté calcique magnésien, sauf P11 concentré au pôle de faciès chloruré sodique et potassique.

II.2. 3. Description Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff employé un papier semi-log, où les quantités en réactions sont portées sur l'axe des y à échelle Log et les éléments chimiques majeurs sont portés à pas réguliers, sur l'axe des X à échelle arithmétique. Chaque ligne brisée expose une analyse. Cependant le diagramme ne peut contenir plus de 10 analyses ; au-delà les lignes brisées sont confondues et le faciès ne peut pas être lu correctement.

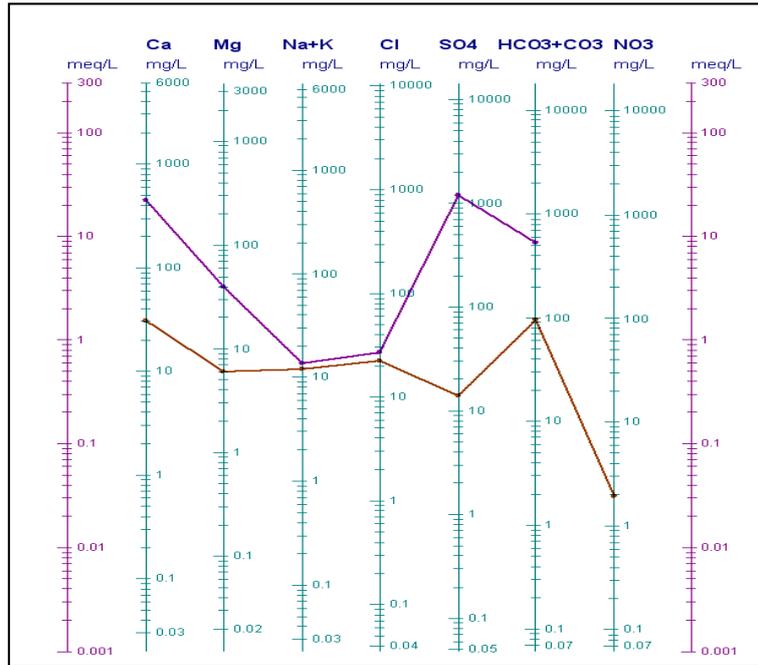


Fig.62. Diagramme de Schoeller-Berkaloof

Analyse 1 — : faciès chimique sulfaté-calcique

Analyse 2 — : faciès chimique bicarbonaté calcique

II.2.4. les faciès chimiques des eaux étudié par diagramme de Schoeller Berkaloof

Selon le diagramme de Scholler Berkallof (Fig .63) on sort que les faciès chimique des eaux étudié comme suite :

P1, P2 et P12 : faciès bicarbonaté calcique

P3 : faciès chloruré calcique

P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10 : faciès sulfaté calcique

P11 : faciès chloruré sodique et potassique

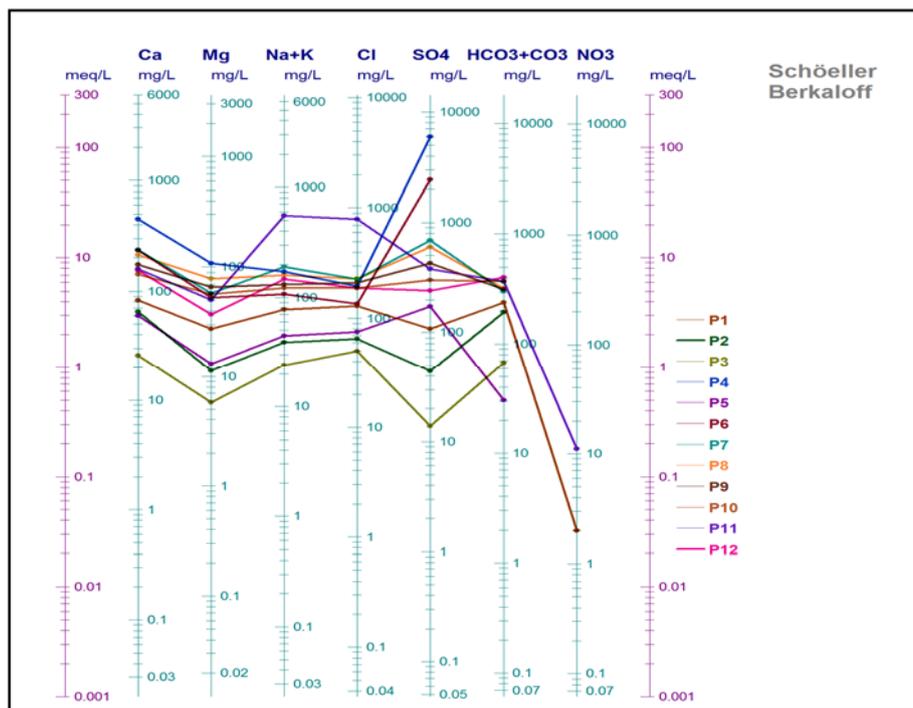


Fig.63. Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les eaux étudiées

III .Caractérisation minéralogique des eaux des deux sites

III.1. Description de logiciel PHREEQC

Phreeqc est un programme puissant pour la modélisation hydrogéochimique de la spéciation chimique en solution aqueuse. Il est aussi utilisé pour déterminer les équilibres de charge et les états de saturation des phases minérales (Parkhurst, 1999).

La loi d'action de masse fait conduire à l'équilibre minéral-solution et intervenir la constante d'équilibre K de la réaction de dissolution/précipitation et l'activité des ions en solutions.

Par exemple la réaction de dissociation de calcite en solution est la suivante



Le code Phreeqc calcule la spéciation aqueuse des éléments chimiques même que les indices de saturation (SI) de la solution pour des différentes espèces minérales.

Pour une phase solide donnée, l'indice de saturation SI est défini comme le rapport du produit d'activité ionique (IAP) par le produit de solubilité (K).

$$\text{SI} = \text{IAP} / \text{K}$$

L'état de saturation d'une solution est directement déduit du logarithme de SI :

- si $\log \text{SI} > 0$, la solution est sursaturée et la phase minérale est susceptible de précipiter,

- si $\log SI=0$, la solution est à l'équilibre avec la phase minérale considérée, les concentrations des espèces en solution sont contrôlées par cette phase minérale,
- si $\log SI < 0$, la solution est sous-saturée et la phase minérale est susceptible de s'y dissoudre.(Ghorbel.2012)

III.2.La caractérisation des minéraux

Les minéraux trouvés dans notre simulation à l'aide du logiciel phreeqc sont les minéraux carbonatés, les minéraux évaporitiques, les minéraux de fer, les minéraux de zinc et les minéraux de cadmium.

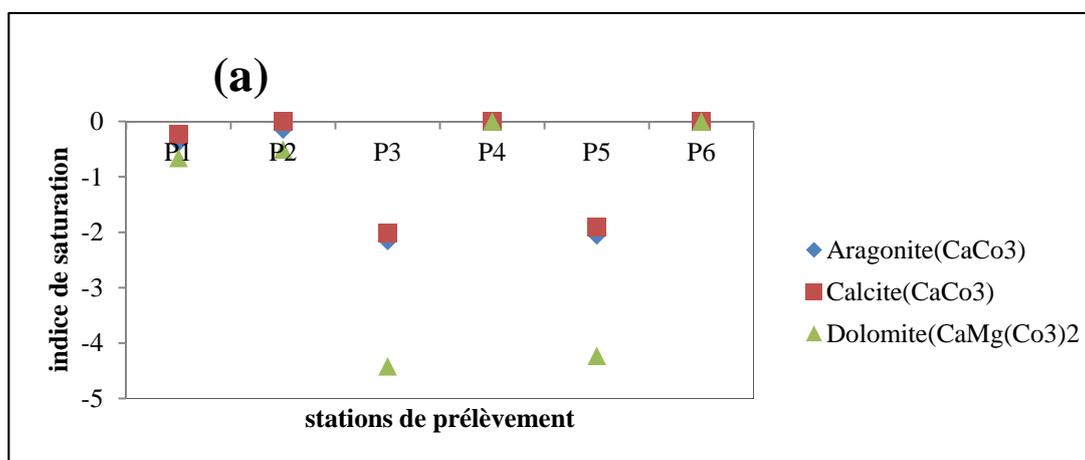
La modélisation géochimique que nous effectuerons sera basée sur des réactions de dissolution-précipitation. Ces réactions contrôlent la composition de la solution par les minéraux.

III.2.1.Les minéraux carbonatés :

Les minéraux carbonatés sont des minéraux sédimentaires complexé d'un grand pourcentage de carbonate; fréquemment du carbonate de calcium($CaCO_3$).

Les minéraux carbonatés (Aragonite, Calcite, Dolomite) de la région d'Oum Teboul sont absents dans les points de recherches P4 et P6 et présents dans P1, P2, P3, P5 avec un indice de saturation négative indiquant une sous-saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux en calcium (Ca), magnésium (Mg) et carbonate(CO_3).

Pour la région d'Azzaba les minéraux carbonatés(Aragonite,Calcite,Dolomite)sont en sursaturation dans les points de recherches P7,P8,P9,P10,P11etP12 permettant ainsi une sédimentation sous forme d'Aragonite, calcite et dolomite,sauf l'Aragonite est en sous saturation dans P9 permettant une dissolution et un enrichissement des eaux par le Ca , CO_3 .



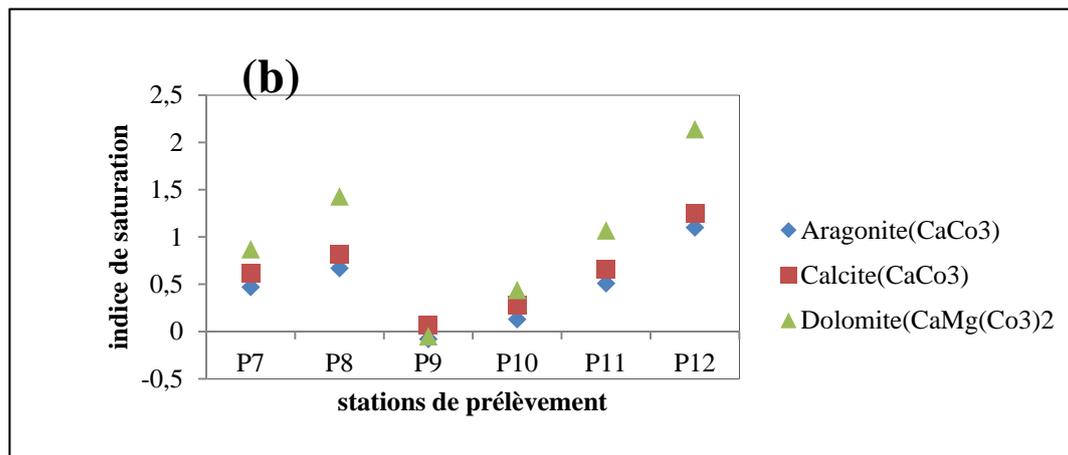


Fig.64: État des minéraux carbonatés dans l'eau dans la région d'Oum Teboul (a) dans la région d'Azzaba (b)

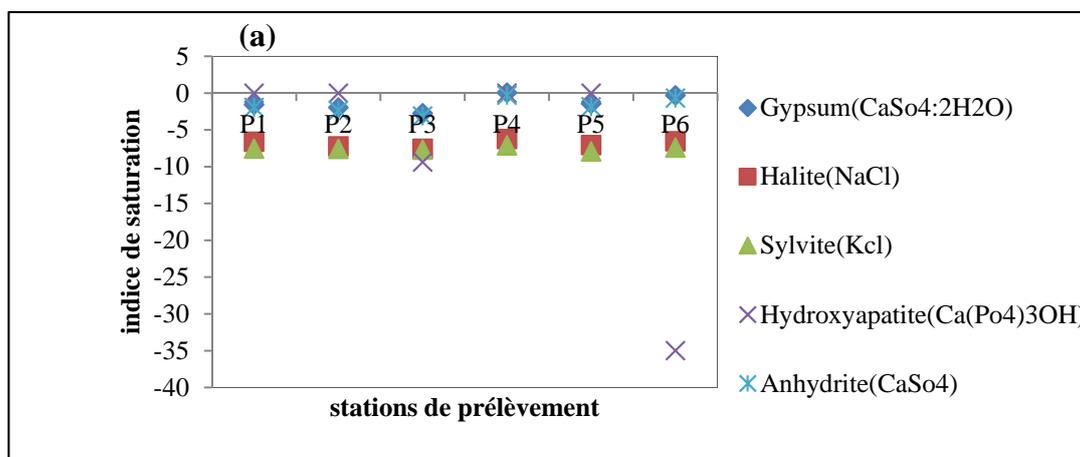
III.2.2. Les minéraux évaporitiques

Ce sont des sédiments d'origine chimique qui précipitent à partir de l'eau par évaporation et concentration progressive en sels dissous.

Les principaux minéraux évaporitiques sont le gypse (Ca, SO₄.2H₂O), l'anhydrite (CaSO₄) et la halite (NaCl).

Dans la région d'Oum Teboul la présence des minéraux évaporitiques Halite, Gypsum, Anhydrite, Sulvite Hydroxyapatite dans les eaux superficielles P5, P6, P4 et les eaux souterraines P1, P2, P3 avec un indice de saturation négative provoquant une dissolution et un enrichissement des eaux en Na, Cl, PO₄, SO₄, Ca.

Dans la région d'Azzaba les minéraux évaporitiques sont en sous-saturation provoquant la dissolution et l'enrichissement des eaux en Na, Cl, PO₄, SO₄, Ca, sauf l'hydroxyapatite dans P12 est en sursaturation donc il y a une sédimentation sous forme d'hydroxyapatite.



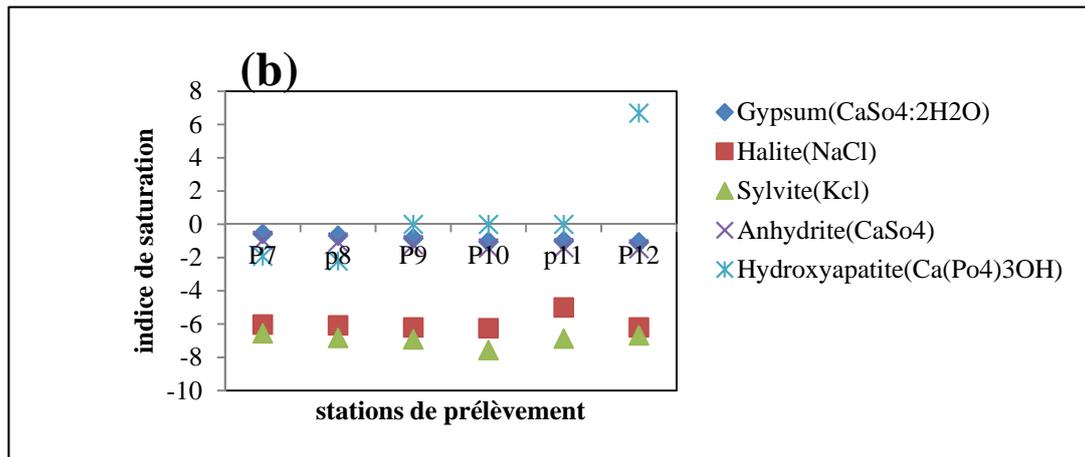


Fig.65:État des minéraux évaporitiques dans l'eau dans la région de Oum Teboul (a) dans la région d'Azzaba (b)

III.2.3. Les minéraux de fer

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite.

Dans la région d'Oum Teboul on trouve les minéraux ferreux suivants : la jarosite-K, le $\text{Fe}(\text{OH})_3$, la Goethite et Hematite, la jarosite-K est en sous-saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux en fer et en sulfates dans P1, P2, P3 et en sursaturation dans P4, P5, P6 provoquant une sédimentation sous forme de jarosite-K, une sédimentation surtout sous forme d'Hématite. La Goethite et Hematite sont en sursaturation dans toutes les stations de prélèvement permettant ainsi une sédimentation surtout sous forme d'Hématite.

Dans la région d'Azzaba les minéraux ferreux existants sont la jarosite-K, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethite et Hematite. La jarosite-K est en sursaturation dans P7 provoquant une sédimentation sous forme de jarosite-K ; mais dans P8, P9, P10, P11, P12 la jarosite-K est en sous-saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux en fer et en sulfates. $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethite et Hematite sont en sursaturation permettant ainsi une sédimentation surtout sous forme d'Hématite.

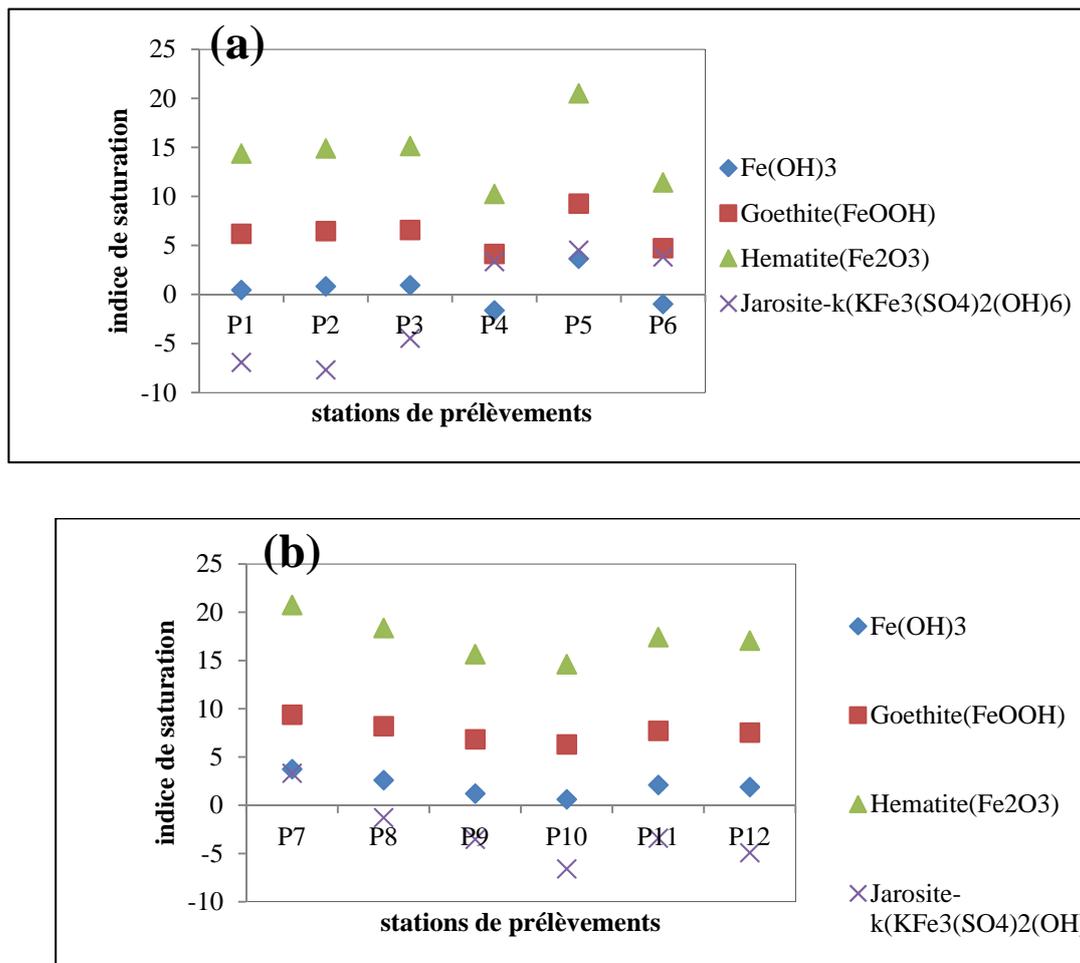


Fig.66: État des minerais de fer dans l'eau dans la région d'Oum Teboul (a), dans la région de Azzaba (b)

III.2.4 .Les minéraux de Zinc

Dans la région d'Oum Teboul les minéraux de Zinc Smithsomite sont présents en sous-saturation dans P2,P3,P5 et absents dans P1,P4 et P6 et le Zn(OH)₂ présent dans P4,P3,P6 en sous-saturation provoque une dissolution et un enrichissement des eaux de Zn et CO₃.

La présence des minéraux de zinc de la région d'azzaba est en sous saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux par le zinc.

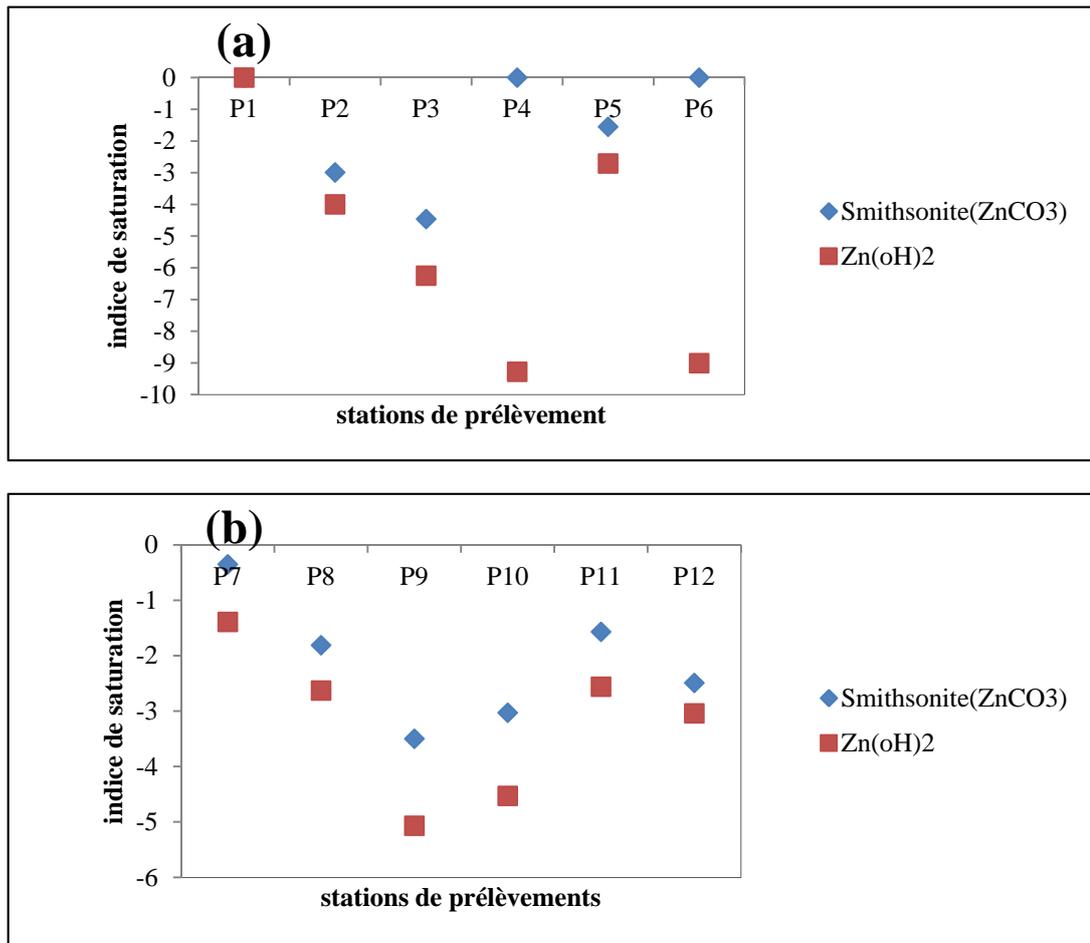


Fig.67: Etat des minéraux de zinc dans l'eau dans la région d' Oum Teboul (a), dans la région d'Azzaba (b)

III.2.5. Les minéraux de cadmium :

Les minéraux de cadmium : Otavite, Cd(OH)₂, CdSO₄ sont absents dans P1, P3, P4, P5, P6 et présents dans P2 de façon en sous-saturation permettant une dissolution et un enrichissement de Cd, CO₃, SO₄.

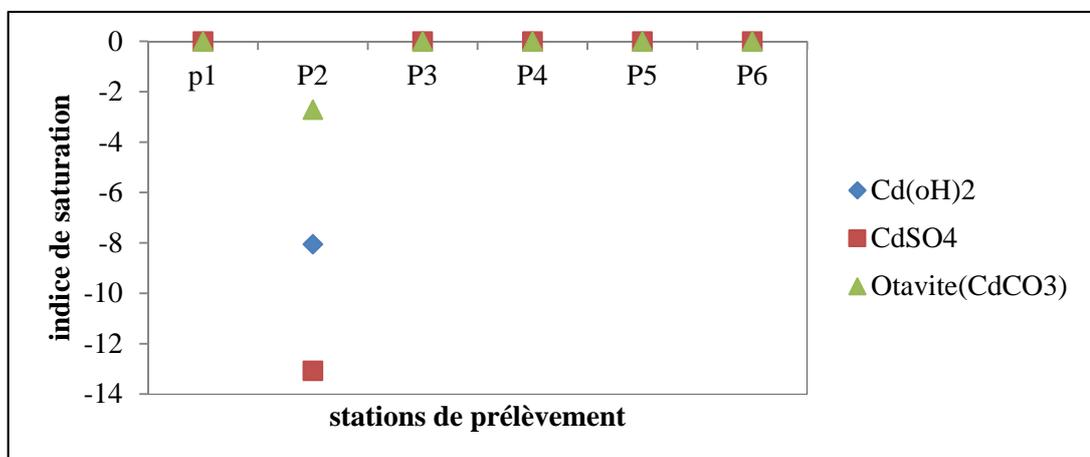


Fig.68: État des minéraux de cadmium dans l'eau dans la région d'Oum Teboul

IV. Caractérisation bactériologique des deux sites

IV.1 Les paramètres bactériologiques

Plusieurs paramètres bactériologiques sont recherchés dans les eaux dans le but d'identifier les caractéristiques bactériologiques de ces eaux.

IV.1.1. Les bactéries aérobies revivifiables à une température de 22°C, de 37°C

Ces germes ne sont pas dangereux pour la santé permettant de savoir l'état microbiologique du réseau: entretien, stagnation de l'eau : une valeur pas normale (plus de 10 fois la valeur classique) démontré d'une eau peu renouvelée ou polluée (dysfonctionnement du traitement de désinfection).

IV.1.2. Les bactéries coliformes

Les coliformes sont des germes d'origine fécale et environnementale donc elles ne sont pas un bon indicateur de contamination fécale mais leur présence en sortie de production indique un mauvais fonctionnement de la désinfection. De plus, la présence de coliformes exige l'obligation de corriger le traitement et de vérifier l'état des installations de distribution.

IV.1.3. Les bactéries sulfite-réductrices

Les bactéries sulfite-réductrices sont des bactéries anaérobies, ce sont les sulfates qui remplacent l'oxygène pour la respiration cellulaire. Elles sont normalement présentes dans les sols, rivières et dans les systèmes digestifs des animaux ainsi que dans les matières fécales, mais en plus petites quantités que les *Escherichia coli*.

IV.1.4. Les entérocoques / Escherichia Coli

Ce sont des germes témoins d'une contamination fécale, l'eau a été souillée par des matières fécales et peut donc contenir des bactéries, virus ou parasites pathogènes pour l'homme...

IV.2. Caractérisation bactériologique

Les tableaux ci-dessous (Tbleau.10, Tbleau.11) montrent les résultats des analyses bactériologiques d'eau des deux régions d'étude.

Tbleau.10. Caractérisation bactériologique de la région Oum Teboul.

paramètre	Norme	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Bactérie aérobies revivables à 22° C sans dilution	<10 ²	43	5 .10 ⁵	4,2.10 ³	15	46	50
Bactérie aérobies revivables à 37° C sans dilution	20	17	25.10 ⁴	3,3 .10 ³	02	33	30
Bactéries sulfito-réducteurs-Dénombrement /ml	Abs	Abs	05	03	Abs	Abs	Abs
Bactéries sulfito-réducteurs-Dénombrementl20/ml	<5	Abs	15	25	Abs	Abs	01
Coliformes (NPP)/100ml	<10	02	10 ²	50	Abs	01	05
Coliformes thermotolérants (NPP)/ 100ml	Abs	Abs	20	15	Abs	Abs	Abs
Escherichia coli	Abs	Abs	Présence	Présence	Abs	Abs	Abs
Streptocoques du groupe D (NPP)/50ml	Abs	Abs	Présence	Présence	Abs	Abs	Abs

Tableau.11. Caractérisation bactériologique de la région d'Azzaba .

paramètre	Norme	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Bactérie aérobies revivables à 22° C sans dilution	<10 ²	6.10 ³	5,5 .10 ³	4,7 .10 ³	55	5.10 ⁵	6.10 ⁵
Bactérie aérobies revivables à 37° C sans dilution	20	66	56	3,8 .10 ³	51	6.10 ⁵	5.10 ⁵
Bactéries sulfito-réducteurs-Dénombrement /ml	Abs	Abs	Abs	02	Abs	24	12
Bactéries sulfito-réducteurs-Dénombrementl20/ml	<5	04	Abs	10	Abs	10 ²	67
Coliformes (NPP)/100ml	<10	08	10	42	Abs	155	124
Coliformes thermotolérants (NPP)/ 100ml	Abs	Abs	02	10	Abs	50	48
Escherichia coli	Abs	Abs	Présence	Présence	Abs	Présence	Présence

Streptocoques du groupe D (NPP)/50ml	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Présence	Présence
--------------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	----------	----------

D'après l'interprétation des résultats bactériologiques indiqués dans les deux tableaux on enregistre pour la région d'Oum Teboul l'existence des bactéries aérobies revivifiables à 22°C et 37°C avec des variations entre 15 et 5.10^5 à 22°C et des variations entre 2 et 25.10^4 à 37°C. Dans la région d'Azzaba, on enregistre l'existence des bactéries aérobies revivifiables à 22°C et à 37°C avec des variations entre P10(55) et P12(6.10^5) à 22°C et entre P10(51) et P11(6.10^5) à 37°C ;

Pour les bactéries sulfato-réductrices on enregistre dans la région d'Oum Teboul l'absence de ces bactéries dans les eaux de P1, P4, P5, P6 et leur présence avec des valeurs faibles P2(5) et P3(3) dénombrements/ml.

Dans les eaux de la région d'Azzaba on enregistre l'absence des bactéries sulfato-réductrices pour les eaux de P7, P8, P10 et leur présence avec des valeurs faibles entre P9(2) et P11(24) dénombrements /ml.

Les bactéries sulfito-réducteurs sont normalement présentes dans les sols, rivières et dans les systèmes digestifs des animaux ainsi que dans les matières fécales, mais en plus petites quantités que les *Escherichia coli*. Leur absence dans une nappe souterraine ou une nappe alluviale est un signe d'efficacité de la filtration naturelle.

Les clostridium sulfito-réducteurs sont des germes capables de se reproduire et de se maintenir très longtemps dans l'eau sous une forme végétative :

Leur présence dans l'eau, en l'absence de germes fécaux, peut être interprétée comme un défaut de protection de la nappe contre la présence d'une flore bactérienne étrangère,

Pour les coliformes on enregistre des variations entre P4(00) et P2(100) dans la région d'Oum Teboul et des variations entre P10(00) et P11(155) dans les eaux de la région d'Azzaba.

Pour les coliformes thermotolérants on enregistre l'absence de ce genre de bactéries dans les eaux étudiées de la région d'Oum Teboul sauf au niveau P2(20) NPP /100 ml et P3(15)NPP/100 ml.

Pour la région d'Azzaba on enregistre l'absence de coliformes thermotolérants dans les eaux de P7 et P10 et la présence avec une variation entre P8(02) et P11(50). La présence de ces coliformes, vivants dans les intestins d'animaux ou humains, dans l'eau constitue un bon test de contamination des eaux par les matières fécales.

Les coliformes fécaux sont donc des organismes indicateurs de la qualité de l'eau. Pour *Escherichia coli* on enregistre leur présence dans les eaux de P2 et P3 et l'absence dans les eaux de P1, P4, P5 et P6 de la région d'Oum Teboul.

Pour la région d'Azzaba la présence d'*Escherichia coli* dans les eaux de P8, P9 et P12 et l'absence dans les eaux de P7 et P10.

La présence d'*Escherichia coli* dans l'eau indique une contamination récente par des matières fécales.

Pour les streptocoques du groupe on enregistre leur absence dans les eaux de P1, P4, P5 et P6 et leur présence dans les eaux de P2 et P3 de la région d'Oum Teboul. Pour la région d'Azzaba on enregistre la présence de streptocoque du groupe dans les eaux de P11 et P12 et l'absence dans les eaux de P7, P8, P9, P10 et P11.

Les streptocoques du groupe D susceptibles de contaminer les eaux d'approvisionnement sont plutôt typiques des déjections animales, comme *Streptococcus bovis*. Les streptocoques fécaux sont des hauts normales de l'intestin de l'homme et des animaux à sang chaud. Leur recherche associée à celle des coliformes fécaux constitue un bon indice de contamination fécale. Ils témoignent d'une contamination d'origine fécale ancienne tandis que les coliformes fécaux témoignent d'une contamination d'origine fécale récente. Pour les eaux superficielles les paramètres bactériologiques sont absents bien que l'existence des bactéries dans les eaux des oueds est normale, on justifie l'absence de ces paramètres due au pH acide de ces eaux résultant de la mort des bactéries.

Pour la région d'Azzaba l'existence des bactéries dans les eaux de P11, P12 dus à la pollution fécale et les conditions qui ont permis leur reproduction.

Les streptocoques du groupe D susceptibles de contaminer les eaux d'approvisionnement sont plutôt typiques des déjections animales, comme *Streptococcus bovis*.

V. Conclusion

En peut conclure d'après nos résultats obtenus pour la caractérisation minéralogique chimique et bactériologique pour les deux régions d'étude Oum Teboul et Azzaba, que l'identification des caractéristiques minéralogiques à l'aide du logiciel phreeqc qui nous donne l'état de saturation des minéraux dans l'eau et à partir de ce dernier il en sort que les minéraux trouvés dans notre zone d'étude sont les minéraux carbonatés, les minéraux évaporitiques; les minéraux de fer, les minéraux de zinc et les minéraux de cadmium .

Pour la caractérisation chimique le logiciel Aquakit donne la composition chimique des eaux, le diagramme de Piper et Schoeller Berkaloff ont donné une idée sur les faciès

chimiques des eaux et ont mis ainsi en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux. On trouve pour la région d'Oum Teboul un faciès chloruré et sulfaté calcique magnésien et un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

Pour la région d'Azzaba un faciès sulfaté calcique et un faciès bicarbonaté calcique. Pour la caractérisation bactériologique révèle l'existence des bactéries suivantes : Bactéries aérobies revivifiables, Bactéries sulfato-réducteurs, Coliformes, Coliformes thermotolérants, Escherichia coli et Streptocoques du groupe D dans les eaux étudiées ; les paramètres microbiologiques obtenus sont des indicateurs qui révèlent la présence possible d'une contamination bactériologique.

I.Introduction

Le DMA représente une problématique environnementale importante provenant des mines abandonnées. La prédiction, la protection et la supervision du drainage minier acide (DMA) associé à l'oxydation des minéraux sulfureux, tels que la pyrite et la pyrrhotite. Lorsqu'ils sont exposés aux conditions de surface, ces minéraux sont possible réagir avec l'eau et l'oxygène atmosphérique pour constituer un lixiviat acide favorisant la dissolution des métaux et autres polluants probablement générer des effets nocifs sur l'environnement. Le défi environnemental essentiel qui expose l'industrie minière est la supervision de ces eaux acides, qui portent habituellement une forte concentration de métaux lourds éventuellement toxiques.

Les méthodes de prédictions du drainage minier acide comme les essais statiques (titrage acide base), les essais cinétiques (essais en cellules d'humidité, essais en colonnes etc.) et la modélisation hydrogéochimique se sont énormément dupliqués au fil des ans et font partie des outils utilisés par le géologue spécialisé dans le domaine de l'environnement minier. Ces outils obligent une base des données solides et effectives en minéralogie, géochimie, thermodynamique, hydrogéochimie, hydrogéologie, informatique et mathématique. PHREEQC est un programme puissant pour la modélisation hydrogéochimique de la spéciation chimique en solution aqueuse. Il est aussi utilisé pour déterminer les équilibres de charge et les états de saturation des phases minérales (Parkhurst.1999). Le but de cette étude est de présenter l'application du logiciel PHREEQC dans la modélisation des interactions eaux-roches ainsi que dans la gestion de drainage minier acide.

II.Descreption de drainage minier acide (DMA) (étude Bibliographique)

Le DMA est le résultat de l'oxydation naturelle de minéraux sulfurés qu'on retrouve dans les rejets miniers solides, lorsque ceux-ci sont exposés à l'air et à l'eau. La pyrite et la pyrrhotite sont les deux minéraux sulfurés souvent trouvés en contact dans les rejets miniers. La réaction d'oxydation caractéristique de la pyrite sous l'action de l'eau et de l'oxygène engendrant du DMA est présentée aux équations 1 à 4. Cette oxydation se développent en trois étapes (Lawson 1982 ; Evangelou 1995; Gray 1996; Blowes et al. 1998; Nicholson et al. 1998; Mylona et al. 2000; Rimstidt et Vaughan 2003) .

A-Oxydation directe de la pyrite par l'oxygène et l'eau à des pH près de la neutralité

(5 < pH < 7). Cette oxydation (équations 1) libère du fer ferreux (Fe⁺²) en solution.



B-Oxydation du fer ferreux (Fe^{+2}) : la libération des ions H^+ (équation 1) acidifie progressivement le milieu et favorise l'oxydation du fer ferreux Fe^{+2} en fer ferrique Fe^{+3} (équation 2). À des pH relativement élevés (pH~5), le fer ferrique s'hydrolyse et précipite sous forme d'hydroxyde, en libérant davantage d'acidité (H^+) dans l'eau (équation 3). Cette réaction peut être favorisée par l'activité bactérienne (exp. *Thiobacillus ferrooxidans*).



Une fois le pH est suffisamment bas (pH<3), le fer ferrique ne précipite plus, reste en solution et devient un agent oxydant et marque le début du processus d'oxydation indirect de la pyrite (équation 4).

C-Oxydation indirecte de la pyrite par le Fe^{+3} (pH< 3 où le fer est soluble)



La réaction globale de l'oxydation de la pyrite est quelques fois présentée par l'équation (5) (Aubertin M. et al. 2002) ou l'équation (6) (Morin et al. 1995), combinant ainsi les réactions de dissolution par oxydation de la pyrite et précipitation du fer:



Le pourcentage d'oxydation de la pyrite par le fer ferrique est examiné par celui de l'oxydation du fer ferreux en ferrique. Si le pH en dessous de 3, l'oxydation de la pyrite par le Fe^{3+} est de 10 à 100 fois plus rapide que son oxydation par 1 'oxygène (Mylona et al. 2000). La réaction d'oxydation de la pyrite sous l'action de l'oxygène (équation 1) conduit à la formation de 2 moles de H^+ pour une mole de pyrite, alors que la réaction d'oxydation indirecte. (Bussière et al. 2005).

La pyrrhotine joue un rôle similaire à celui de la pyrite dans la formation du DMA toutefois de plus grande ampleur dans les premiers stades de l'oxydation. En effet, le pourcentage d'oxydation de la pyrrhotine est de 20 à 100 fois plus élevé que la pyrite à l'air libre (Nicholson et Scharer 1994). L'association de la pyrite et la pyrrhotite est possible dans les rejets miniers à des quantités parfois considérables d'arsénopyrite, surtout dans les gisements aurifères (où Au est souvent associés à As). L'existence de la chalcopryrite, la sphalérite et la galène est susceptible dans les rejets miniers mais à des quantités résiduelles nettement inférieures après leur concentration pour les métaux de bases. Le Tableau 12 présente leurs réactions d'oxydation par l'oxygène et le Fe^{3+} près de la neutralité. En principela

chalcopryrite, la sphalérite (non ferrifère) et la galène n'exposent pas d'acidité (équations 9 à 11).

Cependant, leur oxydation sous l'action du Fe^{3+} génère de l'acidité comme le montrent les équations (14) à (16) dans lesquelles différentes réactions chimiques se produisent (Kleinman et autres, 1981).

Tableau 12-Réactions d'oxydation par l'oxygène et par le fer ferrique des principaux minéraux sulfurés (Walder et Schuster 1998; Bussièrre et al. 2005 de Rimstidt 1994)

Minéraux sulfurés	Réactions d'oxydation	Equation
<u>Oxydation des minéraux sulfurés sous l'action de l'oxygène (pH neutre)</u>		
Pyrrhotite	$Fe_{(1-x)}S + (2-1/2x)O_2 + x H_2O \rightarrow (1-x)Fe^{+2} + SO_4^{2-} + 2x H^+$	(7)
Arsénopyrite	$4FeAsS + 11O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe^{+2} + 4H_3AsO_3 + 4SO_4^{2-}$	(8)
Chalcopryrite	$CuFeS_2 + 4O_2 \rightarrow Cu^{+2} + Fe^{+2} + 2SO_4^{2-}$	(9)
Sphalérite	$ZnS + 2O_2 \rightarrow Zn^{+2} + SO_4^{2-}$	(10)
Galène	$PbS + 2O_2 \rightarrow Pb^{+2} + SO_4^{2-}$	(11)
<u>Oxydation des minéraux sulfurés sous l'action du Fe^{+3} (pH acide)</u>		
Pyrrhotite	$Fe_{(1-x)}S + (8-2x)Fe^{+3} + 4 H_2O \rightarrow (9-3x)Fe^{+2} + SO_4^{2-} + 8 H^+$	(12)
Arsénopyrite	$FeAsS + 11 Fe^{+3} + 7H_2O \rightarrow 12Fe^{+2} + H_3AsO_3 + 11H^+ + SO_4^{2-}$	(13)
Chalcopryrite	$CuFeS_2 + 16Fe^{+3} + 8H_2O \rightarrow Cu^{+2} + 17Fe^{+2} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$	(14)
Sphalérite	$ZnS + 8Fe^{+3} + 4H_2O \rightarrow Zn^{+2} + 8Fe^{+2} + SO_4^{2-} + 8H^+$	(15)
Galène	$PbS + 8Fe^{+3} + 4H_2O \rightarrow Pb^{+2} + 8Fe^{+2} + SO_4^{2-} + 8H^+$	(16)

II.1. Minéraux neutralisants

Il existe des minéraux acidivores dans les rejets miniers peuvent influencer la qualité des rejets acides. Les minéraux neutralisants les plus efficaces sont les carbonates. Aussi la calcite, la dolomite, l'ankérite ou la magnésite sont tous des minéraux qui ont la capacité de neutraliser l'acide sulfurique (Lottermoser, 2010). Les carbonates réagissent avec l'acide sulfurique pour produire du bicarbonate, des sulfates et différents ions métalliques (Villeneuve, 2004). La seconde famille de minéraux qui ont la capacité de neutraliser les rejets acides est la famille des silicates (anorthite, chlorite, biotite, plagioclase, etc.). Ces minéraux se dissolvent de façon congruente ou incongruente et consomment les ions H^+ lors de la réaction. Lorsque le silicate se dissout complètement en une composante soluble, il s'agit d'une dissolution congruente. Lorsque le silicate est altéré en une autre phase stable

qui précipite, il s'agit de la dissolution incongruente. (Bussièrès et autres, 2005)

Malgré que les carbonates soient plus réactifs que les silicates, les actions de ces derniers sur la neutralisation des rejets acides sont tout de même significatives. Au contraire au mécanisme d'oxydation, l'action des minéraux acidivores est indépendante de la concentration d'oxygène ou de la présence d'eau (Lottermoser, 2010). Le pH est cependant un facteur déterminant sur l'action de ces minéraux. Donc, les silicates ont très peu d'impact lorsque le pH est près de la neutralité, mais jouent un rôle important à un pH faible. La dissolution de certains minéraux à des pH spécifiques peut influencer la qualité des eaux dans les rejets miniers, mais la réaction inverse peut se produire lorsque le pH est modifié (Moncur et autres, 2005).

II.2. Les techniques de prédiction du drainage minier acide

Il existe des techniques de prédiction du potentiel de génération acide (PGA) des rejets miniers permettant de déterminer, si ces rejets seront générateurs de DMA avant même le début des opérations. Donc la prédiction du PGA est une étape dynamique dans le développement des mesures d'endiguement, de traitement et de contrôle des rejets miniers. Le PGA permettant de jauger les meilleures moyennes réalisables pour la gestion durable des rejets et dans les pratiques d'amélioration qui étant mises en œuvre. Il compte plusieurs procédures de prédire le PGA, soit à l'aide d'essais statiques, d'essais cinétiques ou par la modélisation géochimique (Villeneuve, 2004).

L'essai statique dépend sur la détermination du potentiel d'acidité maximal (PAM) en mesurant le pourcentage de soufre qui se trouve dans l'échantillon. Le titrage d'une autre portion de l'échantillon jusqu'à un pH de 3,5 permet de mesurer, quant à lui, le potentiel de neutralisation brut (PN). Ces deux mesures permettent de déterminer le potentiel de neutralisation net (PNN) : $PNN = PN - PAM$ (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2006). Lorsque le pourcentage de soufre est supérieur à 0,3 % et que le PNN est inférieur ou égal à 20 kg/tonne de carbonate de calcium ($CaCO_3$) l'échantillon est considéré éventuellement générateur d'acide. Un rapport d'étape créé pour le compte d'Osisko expose les critères d'interprétation des essais statiques qui ont été effectués pour la Canadian Malartic. Ces critères sont présentés au tableau 13 pour le PNN et pour le PN/potentiel d'acidification (PA).

Malgré que les essais statiques admettent d'expertiser un échantillon ponctuel, ils ne permettent que très peu d'information sur l'évolution de la stabilité chimique de ces rejets après à son transposition dans l'environnement (Villeneuve, 2004).

Depuis longtemps l'essai cinétique admet de calculer le PGA des matériaux examinés et de contrôler les résultats obtenus par les essais statiques. L'essai cinétique est effectué en cellule d'humidité ou en colonne, les échantillons sont exposés à l'air sec et humide à quelques jours d'intervalle. Après ces jours, on fait un rinçage en utilisant de l'eau déminéralisée. Cette eau est ensuite récupérée. Les analyses effectuées sur l'eau de rinçage portent notamment sur le pH, l'acidité, l'alcalinité, la concentration de métaux ou encore le potentiel d'oxydoréduction (Villeneuve, 2008). Donc l'objectif de cette technique est l'oxydation des rejets pour pouvoir mesurer le PGA à long terme et déterminer les taux de lixiviation des métaux lourds.

Tableau.13. Critères d'interprétation des essais statiques (tiré de : Villeneuve, 2008)

$\%S_{\text{sulture}} < 0,3 \%$	Non-acidogène
$\%S_{\text{sulture}} > 0,3 \%$	Poursuivre avec PNN
Critères pour le PNN	
$\text{PNN} < 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$	Acidogène
$20 < \text{PNN} < 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$	Incertain, poursuivre avec PN/PA
$\text{PNN} \geq 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$	Non-acidogène
Critères pour le PN/PA	
$\text{PN/PA} < 1$	Acidogène
$1 < \text{PN/PA} < 2$	Possiblement acidogène
$2 < \text{PN/PA} < 4$	Peu de chances d'être acidogène
$\text{PN/PA} > 4$	Non-acidogène

Tableau 14-Dispositifs expérimentaux des différents essais cinétiques avec leurs descriptifs (résumé de Villeneuve 2004; NEDEM 1991).

Mini-cellule d'altération	Cellule d'humidité	Essais en colonne	Cellules de terrain
			
<ul style="list-style-type: none"> -Méthode de Cruz et al.(2001) -Buchner de 10 cm de diamètre -67 g de rejet déposé sec dans le Buchner -Cycles de l'essai : <ul style="list-style-type: none"> * rinçage le premier jour (lundi) * 2 jours à l'air libre * rinçage le 3ème jour jeudi) * 3 jours à l'air libre - Durée de l'essai variable : de 20 à 40 rinçages, voire plus selon les objectifs de l'étude -Rinçage avec 50 ml d'eau déionisée (2x par semaine) -Rejets ex posés à l'air ambiant entre les rinçages 	<ul style="list-style-type: none"> -Méthode normée ASTM -Cellules en Plexiglas <ul style="list-style-type: none"> -1 kg de rejet mis en place sec -Cycles de l'essai: <ul style="list-style-type: none"> * rinçage le premier jour (lundi) * 3 jours d'air sec * 3 jours d'air saturé en humidité -Durée de l'essai variable: de 20 à 40 rinçages, voire plus selon les objectifs de l'étude - Rinçage avec 500 ml ou 1 L d'eau dé ionisée -Deux dimensions de cellules existent: <ul style="list-style-type: none"> * pour les stériles Diamètre=10.2cm, hauteur=20.3 cm * pour les rejets de concentrateur D=20.3cm, h=10.2 cm -Le protocole ASTM propose des équations pour l'interprétation des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> -Colonnes: 14 cm diamètre -Hauteur de la colonne variable selon les objectifs de l'étude (0,7m à 2 m) : recouvrement mono ou multicouches, stabilisation, ennoiment -Mise en place des rejets humides (tels que échantillonnés sur le terrain) -Plaque en céramique sous l'échantillon pour pouvoir si mu 1er une nappe phréatique (profondeur variable selon les objectifs de l'étude) -12 rinçages voire plus selon les objectifs de l'étude Rinçage avec 2 L d'eau dé ionisée -Permet d'étudier des scénarios de restauration 	<ul style="list-style-type: none"> -La taille des parcelles est variable (20 à 30 m²) -Généralement placée à des endroits retirés loin des perturbations qui peuvent être liées à la circulation de la machinerie lourde près des installations minières -Le poids des rejets et de l'ordre de quelques centaines de kg -Les cycles mouillage-séchage dépendent de la météorologie du site minier -La durée du test cinétique en parcelle de terrain dépend des objectifs de l'étude.

La troisième méthode qui admet d'examiner le PGA et la modélisation géochimique employée pour prédire les réactions liées au DMA. Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour y arriver : les modèles d'équilibre thermodynamique, les modèles de transfert de masse, les modèles mixtes de transfert de masse et d'écoulement, les modèles de support et les modèles empiriques d'ingénierie (Villeneuve, 2004). Avec cette méthode, il est potentiel de déterminer les faits de dissolution/précipitation, de diffusion et de catalyse connexe au DMA (Aubertin et autres, 2002).

Plusieurs de ces méthodes peuvent être utilisées sur un même échantillon pour confirmer ou infirmer les résultats d'un test en particulier afin d'examiner le PGA des rejets miniers. A titre d'exemple les tests cinétiques admettent d'intensifier les résultats des essais statiques, alors que les modèles mathématiques peuvent prédire des scénarios qui n'ont pas été testés ou simplement supporter les deux autres tests.

Dans la présente étude, nous proposons de faire un inventaire des points de pollution potentiels ou réels dans les deux régions et faire un échantillonnage des eaux pour effectuer des analyses chimiques en vue de caractériser le milieu par des interprétations thermodynamiques pour une mise en évidence du drainage minier acide à partir de la prédiction de la modélisation géochimique en utilisant le logiciel (Phreeqc). Ce dernier permet de caractériser les minéraux existants dans les eaux indiquant le DM (Drainage Minier Acide (DMA) : pH inférieur à 5, drainage Minier Neutre (DMN): pH proche de la neutralité ($5 < \text{pH} < 8$).

Les résultats obtenus dans les eaux superficielles et souterraines indiquent l'existence du DMA dans le canal de rejet minier et Oued El Eurg d'Oum Teboul.

III. Principe de la prédiction utilisée pour les deux sites d'études.

La modélisation géochimique est un instrument de prévention de l'évolution d'un système d'interaction eau/roche. Elle donne l'évolution chimique de la solution aqueuse et de l'assemblage minéralogique en équilibre avec cette solution sur la base d'une composition chimique de fluide initial et d'une minéralogie initiale,

La modélisation permet d'examiner l'effet de certains paramètres physico-chimiques sur l'évolution du système. Dans le cas du devenir des déchets miniers des mines d'Oum Teboul et d'Azzaba, la modélisation géochimique permet de préciser les mécanismes qui contrôlent la mobilité des métaux en solution et d'évaluer les concentrations maximales en métaux dans les eaux de drainage sous contrôle de la précipitation de phases minérales porteuses de métaux.

III.1. La caractérisation des minéraux :

On a déjà vu la caractérisation minéralogique dans chapitre 3. Les minéraux trouvés dans notre simulation à l'aide du logiciel phreeqc sont les minéraux carbonatés, les minéraux évaporitiques, les minéraux de fer, les minéraux de zinc et les minéraux de cadmium.

Le tableau (Tableau.15) ci-dessous résume les résultats trouvés par logiciel phreeqc et reflète l'état de saturation des eaux.

Le degré de saturation de l'eau peut être estimé par le calcul de l'indice de saturation (S. I) qui atteint la valeur zéro quand la solution est en équilibre avec une phase solide. Un indice de saturation positive indique une sursaturation, et un indice négatif indique une sous-saturation vis-à-vis des minéraux.

Tableau.15. Etat de saturation des eaux

Les minéraux		Etat de saturation											
		Région d'Oum Té Boul						Région d'Azzaba					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Les minéraux carbonatés	Aragonite(CaCo3)	-	-	-	0	-	0	+	+	-	+	+	+
	Calcite(CaCo3)	-	0	-	0	-	0	+	+	+	+	+	+
	Dolomite(CaMg(Co3)2)	-	-	-	0	-	0	+	+	+	+	+	+
Les minéraux évaporitiques	Gypsum(CaSo4:2H2)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	Halite(NaCl)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sylvite(Kcl)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hydroxyapatite(Ca(Po4)3OH)	0	0	-	0	0	-	-	-	0	0	0	+
	Anhydrite(CaSo4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
les minéraux de fer	Fe(OH)3	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+
	Goethite(FeOOH)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Hematite(Fe2O3)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Jarosite-k(KFe3(SO4)2(OH)6)	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
les minéraux de zn	Smithsonite(ZnCO3)	0	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-
	Zn(oH)2	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
les minéraux de Cd	Cd(oH)2	0	-	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/
	CdSO4	0	-	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/
	Otavite(CdCO3)	0	-	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/

Les minéraux carbonatés (Aragonite, Calcite, Dolomite) de la région d'Oum Teboul sont absents dans les points de recherches P4 et P6 et présents dans P1, P2, P3, P5 avec un indice de saturation négative indiquant une sous-saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux en calcium (Ca), magnésium (Mg) et carbonate (CO_3).

Pour la région d'Azzaba les minéraux carbonatés (Aragonite, Calcite, Dolomite) sont en sursaturation dans les points de recherches P7, P8, P9, P10, P11 et P12 permettant ainsi une sédimentation sous forme d'Aragonite, Calcite et Dolomite. Sauf l'Aragonite est en sous saturation dans P9 permettant une dissolution et un enrichissement des eaux par le Ca, CO_3 .

Les principaux minéraux évaporitiques sont le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'anhydrite (CaSO_4) et la halite (NaCl).

Dans la région d'Oum Teboul la présence des minéraux évaporitiques Halite, Gypsum, Anhydrite, Sulvite Hydroxyapatite dans les eaux superficielles P5, P6, P4 et les eaux souterraines P1, P2, P3 avec un indice de saturation négative provoquant une dissolution et un enrichissement des eaux en Na, Cl, PO_4 , SO_4 , Ca.

Dans la région d'Azzaba les minéraux évaporitiques sont en sous-saturation provoquant la dissolution et l'enrichissement des eaux en Na, Cl, PO_4 , SO_4 , Ca, sauf l'hydroxyapatite dans P12 est en sursaturation donc il y a une sédimentation sous forme d'hydroxyapatite.

Dans la région d'Oum Teboul on trouve les minéraux ferreux suivants : la Jarosite-K, le $\text{Fe}(\text{OH})_3$, la Goethite et Hematite, la Jarosite-K est en sous-saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux en fer et en sulfates dans P1, P2, P3 et en sursaturation dans P4, P5, P6 provoque une sédimentation sous forme de Jarosite-K une sédimentation surtout sous forme d'Hematite.

La Goethite et Hematite sont en sursaturation dans toutes les stations de prélèvement permettant ainsi une sédimentation surtout sous forme d'Hematite.

Dans la région d'Azzaba les minéraux ferreux existants sont la Jarosite-K, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethite et Hematite. La Jarosite-K est en sursaturation dans P7 provoque une sédimentation sous forme de Jarosite-K ; mais dans P8, P9, P10, P11, P12 la Jarosite-K est en sous-saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux en fer et en sulfates.

$\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethite et Hematite sont en sursaturation permettant ainsi une sédimentation surtout sous forme d'Hematite.

Dans la région d'Oum Teboul les minéraux de Zinc Smithsonite présents en sous-saturation dans P2, P3, P5 et absents dans P1, P4 et P6 et le $\text{Zn}(\text{OH})_2$ présent dans P4, P3, P6 en sous-saturation provoque une dissolution et un enrichissement des eaux en Zn et CO_3 .

La présence des minéraux de zinc de la région d'azzaba est en sous saturation permettant ainsi une dissolution et un enrichissement des eaux par le zinc.

Les minéraux de cadmium : Cd(OH)_2 , CdSO_4 sont absents dans P1 et P3, P4, P5, P6 et présents dans P2 de façon en sous-saturation permettant une dissolution et un enrichissement de Cd , CO_3 , SO_4 .

III.2. Prédiction de drainage minier acide

Le mécanisme de formation du DMA est lié à la mise en présence de sulfures (S^{-2} et S_2^{-2}), de soufre (S^0) ou de thioles ($\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$) avec de l'eau et de l'oxygène. Le minéral sulfuré le plus commun présent dans les sites miniers est la pyrite (FeS_2). L'oxydation de la pyrite est la cause principale du drainage minier acide (Rose et Cravotta, 1998 ; Razowska, 2001). Mais d'autres minéraux sulfurés participent également au phénomène du DMA, comme la sphalérite (ZnS), la galène (PbS), la chalcopryrite (CuFeS_2), la pyrrhotite (Fe_7S_8) et l'arsénopyrite (FeAsS).

Dans notre résultat le pH de P4 et P6 est respectivement de 2,58 et 2,82 avec l'absence des minéraux carbonatés et la présence des minéraux de fer Fe(OH)_3 et les minéraux de zinc Zn(OH)_2 , indiquent que ces eaux sont polluées avec le DMA.

Le reste des stations ne subissent de DMA à cause du pH neutre enregistré dans ces stations et la présence des minéraux carbonatés, ce qui peut être un facteur de la neutralisation de ces milieux.

IV. Evaluation l'impact de drainage minier acide sur l'environnement et notamment les ressources en eau

La plupart des résidus miniers contenant des matières en suspension, composée normalement d'une combinaison de silicates, d'oxydes, de carbonates et de sulfates. Pourrait causer une mortalité considérable chez les poissons à partir des bouchages sur leurs branchies, déformation sur leur habitat, polluant les sédiments ou limitant la pénétration de la lumière dans les eaux réceptrices.

L'écoulement des résidus minier riches en métaux et au pH acide résulte une dégradation de la qualité de l'eau et des sédiments. Cette détérioration progressive de leur habitat cause des modifications dans la communauté des macro-invertébrés benthiques et des poissons.

Alors le degré d'acidité et la présence de métaux toxiques même en faible concentrations pose un impact sur la vie aquatique qui provoque la mort immédiate des poissons à la léthargie, des effets touchant le développement, le comportement ou la capacité

à se reproduire. Les métaux mobiles dans l'eau, peuvent immigrer loin, polluants les eaux superficielles et souterraines sur de grandes distance et pour de longues durées (Aubertin et al. 2002).

Dans notre étude, les résultats obtenus pour la région d'Oum Teboul ont démontré que le site minier d'Oum Teboul génère encore un effluent très acide (pH entre 2,58 et 2,82) des eaux de P4 et P6 malgré sa fermeture en 1983 (trente ans après la cessation de toute activité minière). Les principales stations contaminées de la région d'Oum Teboul P4 et P6 sont fortement acidifiées ainsi que très polluées par les métaux lourds (Fe, Cu et Zn).

L'étude précise que le fer le zinc et le cuivre sont les métaux les plus problématiques sur l'ensemble du complexe minier d'Oum Teboul avec des concentrations excessives dans les eaux de P4 (429,95 mg/l) et P6 (138,7 mg/l) pour le fer, pour le zinc on enregistre des valeurs entre P4 (489,26 mg/l) et P6 (187,8 mg/l) et aussi on remarque un dépassement sur la norme OMS pour le cuivre dans ses stations avec des valeurs entre P4 (0,095 mg/l) et P6 (0,11 mg/l) ceci ne se traduit que ces concentrations du fer et zinc et cuivre dans les stations P4 et P6 qui plus élevée que les critères pour la protection de la vie aquatique.

Ces métaux ont eu des impacts majeurs sur la vie aquatique de ces stations ainsi que sur P4 et P6 on remarque le manque du nombre et de la biomasse des organismes benthiques par rapport à l'amont de Oued El Eurg (Berryman *et al.* 2003).

En plus

le DMA peut provoquer des effets néfastes aux sols avoisinants par l'érosion éolienne ou hydrique des résidus miniers non-confinés, et ce, en les rendant moins aptes au développement et au maintien de la végétation alors ces effets montrent clairement au niveau des sols par la couleur rouge brique anormale remarquable dans la zone de mine d'Oum Teboul et les terres agricoles avoisinant où ont été touchés considérablement selon que l'enquête que nous avons eu avec les paysans qui ont confirmé qu'elles étaient devenues impropres à l'agriculture à cause la pollution engendré par les résidus de la mine abandonnées. Ce lixiviat affecte aussi la flore terrestre par la libération de métaux lourds et d'ions H^+ qui nuisent à leur croissance en réduisant l'efficacité de leurs activités physiologiques. (Monique. 2006).

Le DMA de la mine Oum Teboul contient des fortes concentrations de métaux lourds, l'abandon du site pendant de nombreuses années s'avère particulièrement inquiétant pour la santé de la communauté locale parce que le DMA peut affecter sur la santé humaine, et ce, par

la libération de métaux qui peuvent pénétrer dans la nappe souterraine et, possiblement, contaminer des sources d'approvisionnement en eau potable.

V. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce travail ont permis de faire une évaluation et un inventaire de drainage minier acide dans les eaux souterraines et superficielles dans deux divers sites des mines abandonnées.

La simulation des paramètres physico-chimiques avec le logiciel Phreeqc a permis de caractériser les minéraux existants dans les eaux étudiées et la prédiction de drainage minier acide à partir de cette caractérisation .

L'interprétation montre que la zone minière de la région d'Oum Tébol est soumise à un drainage minier acide important surtout au niveau des eaux superficielles du fait de l'existence des minéraux de fer surtout $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et des minéraux de zinc dans P6et P4avec $\text{pH} < 5$.

La zone minière de la région d'Azzaba n'a pas subit un drainage minier acide au niveau des eaux superficielles et souterraines à cause des résultats du pH neutre et des minéraux carbonatés présentant des concentrations élevées comparativement à des minéraux de fer et de zinc responsable de drainage minier acide.

I.Introduction

En considération, de réduire le drainage acide et leurs impacts sur l'environnement, il vaut mieux le capter, le traiter, le contrôler et l'équilibrer. Si l'effluent n'est ni capté, ni traité, il peut causer la pollution des eaux souterraines et superficielles de la région, et établir, potentiellement, à court, moyen ou long terme, un problème pour la faune, la flore et finalement pour la santé humaine. De ce fait, des solutions doivent être apportées à la fois efficaces sur le plan environnemental et exécutable sur le plan économique. Cependant le traitement du DMA expose un désavantage économique parce qu'il n'est pas facile de trouver la période réelle du temps durant laquelle la production de l'effluent acide persiste dans un site. A titre d'exemple, le site d'Oum Teboul engendre jusqu'à ce jour un effluent très acide, et ce malgré sa fermeture en 1983.

II.Techniques des traitements de DMA :

De nos jours, des techniques de restauration existent de plus en plus adéquates furent répandus, particulièrement dans les conditions dramatiques les plus dangereux des mines fermées ou abandonnées.

II.1. Traitements actifs

L'ancienne technique de traitement des résidus miniers est un traitement chimique ou autrement de traitement actif (MEND 1999). Ce système de traitement se base sur la collecte des eaux de lixiviation provenant des parcs à résidus miniers et les transférer vers un bassin où elles sont traitées chimiquement. D'une manière générale, les procédés incluent l'ajout de chaux pour augmenter le pH, l'oxydation des ions métalliques par l'aération en solution et la favorisation des agglomérations par l'ajout de flocculant et la précipitation. Bien que l'efficacité des traitements actifs, ils sont restés pas bien appliqués pour traiter les eaux de lixiviation des résidus miniers abandonnés puisqu'ils exigent couramment une installation très chère et un entretien perpétuel pour assurer la fiabilité du système d'opération(Monique2006). Par conséquent, il n'est ni pratique, ni économique de considérer un traitement chimique comme un outil de supervision à long terme pour la mine d'Oum Teboul, et d'autre part, le traitement engendre une quantité importante de boues dont la disposition peut être problématique.

II.2. Traitements passifs

Pour éviter la primordiale difficulté présentée par le traitement actif, ils existent des traitements passifs sont plus proposés pour les sites miniers abandonnés. Ils exposent des solutions qui exigent en général un coût moins cher, un entretien minime et qui sont

acceptables au plan environnemental à long terme (Brunet 2000). Ces processus d'épuration naturel confortent les réactions chimiques et biologiques, qui ont lieu naturellement dans l'environnement. L'hypothèse des procédés de traitement passif consiste à faire canaliser les résidus miniers via des matériaux ou systèmes vivants qui produisent suffisamment d'alcalinité, pour équilibrer l'acidité ainsi réduire la concentration en métaux. Les procédés passifs appliquent habituellement des réactions stimulées par des bactéries anaérobies ou aérobies.

Les traitements passifs sont privilégiés par rapport aux traitements actifs de:

- une consommation faible en énergie et en réactif;
- l'utilisation en eau nulle ou faible;
- les quantités de boues engendrées sont diminuées ;
- des matériaux naturels ou de matières résiduelles sont utilisées au lieu de produits chimiques;
- une apparence esthétique idéale(Monique2006).

III. Les techniques des traitements passifs (tiré par Monique Melanson 2006)

III.1.Marais épurateurs construits.

Un processus passif efficace pour la réduction de l'acidité et l'élimination des métaux et de filtration de l'effluent minier dans un marais. Les marais épurateurs construits (MEC) sont des systèmes écologiques conçus pour rétablir les divers mécanismes physiques, chimiques et biologiques que l'on retrouve dans les marais naturels. L'effet Conjoint d'une matière organique, de bactéries et de plantes démunies, stabiliser et précipiter les contaminants, à fin d'améliorer la qualité de l'eau et de dégrader l'acidité.

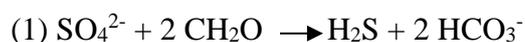
Ils existent trois types de MEC, des marais anaérobies et des marais aérobies non semblables par leurs aspects qui exercent des conditions d'oxygénation et des réactions chimiques et biologiques différentes. Un marais à écoulement vertical est un autre type de MEC s'inspirant du marais anaérobie et des réactions qui s'y découlent.

III.1.1 Marais anaérobie

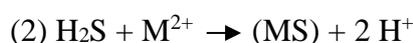
Le marais anaérobie ou la tourbière signifiant, un terrain acide constitué de matière organique en dissolution où règnent des conditions réductrices. Il vise particulièrement à accroître le pH de l'effluent, à traiter et précipiter les métaux.Ce type de marais est habituellement construit pour traiter un effluent comportant une acidité nette (Hedinet *al.* 1994;Brunet 2000).Tandis qu'un prétraitement devra être appliqué, si l'acidité de l'effluent est supérieure à 300 mg/L, pour assurer la survie de la flore bactérienne.

L'installation d'un marais anaérobie exige la contribution d'une matière organique, de bactéries et parfois de plantes. La flore d'un marais anaérobie représente une utilité considérablement, que celle d'un marais aérobie puisqu'elle aide le substrat à se débarrasser de l'oxygène de l'eau, constitue et maintient les conditions réductrices. Ce milieu anoxique aide les mécanismes chimiques et microbiens qui créent l'alcalinité, de ce fait accroissant le pH. L'épaisseur de l'eau dans ce genre de marais devrait se poursuivre entre 0 et 10 cm (Brunet 2000). Pour assurer le bon fonctionnement du marais le débit de l'effluent à traiter doit être faible et constant. Ensuite le marais doit être entouré d'une couche d'argile ou d'une géomembrane, bien que l'effluent ne s'infiltré pas dans le sol et n'atteigne pas la nappe phréatique et garantit l'étanchéité,

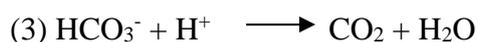
La méthode de révoation des métaux dans un marais anaérobie est en majorité suivie par les bactéries sulfato-réductrices qui se rejoignent naturellement dans ces espace anoxiques. Les expériences dirigées par Machemer *et al.* (1993) mettre en évidence qu'en existence de conditions réductrices, les bactéries sulfato-réductrices précipitent les métaux suivant deux réactions résumées par deux équations, la première justifie une réduction des sulfates (SO_4^{2-}) existant dans l'effluent à traiter en sulfure d'hydrogène (H_2S). Cette réaction exécute par l'oxydation de composés organiques, naturellement trouvés dans la matière organique (exposé par la formule chimique CH_2O).



Les métaux dissous (M) précipitent sous forme de sulfures métalliques solides (MS) à l'aide des sulfures d'hydrogène. Cette réaction est constatée par l'équation 2. Le substrat remplacé parla quantité de métaux précipitée après quelques années pour garantir le rendement et le bon fonctionnement du marais.



Les ions bicarbonates résultent de l'équation (1) vont après utiliser les ions H^+ dans l'effluent, ce qui va s'exprimer par un accroissement global du pH (équation 3).



III.1.2 Marais aérobie

Le marécage est l'équivalent naturel du marais aérobie, ce là signifiant une zone humide où le sol est proportionnellement d'une couche relativement épaisse d'eau (environ 45 cm) (Brunet 2000).

Les marais aérobies favorisent un milieu oxydant. Les réactions d'oxydation produisent la précipitation des métaux sous forme d'oxydes et surtout d'hydroxydes.

Ce genre de marais est exploité pour précipiter les métaux, notamment le fer et le manganèse. De la même méthode des marais anaérobies, les métaux précipités pénètrent dans le substrat, qui doit être possiblement remplacés après quelques années afin de garantir le rendement et le bon fonctionnement du système.

L'acidité de l'effluent augmente par les processus d'oxydation du marais aérobie en relâchant une quantité importante d'ions H^+ . A l'inverse au marais anaérobie qui est apte d'équilibrer ces ions H^+ par l'intervention de bactéries sulfato-réductrices, le marais aérobie ne peut surveiller le pH de façon autosuffisante.

Des espèces propres plantent dans les marais aérobies. La flore du marais aérobie se dépose particulièrement à l'apparence esthétique, à la contribution de matière organique et à la régularité de la distribution d'évacuation de l'effluent (Brunet 2000).

Le rendement des marais aérobies est dominant, lorsque l'eau transportée soumise à une alcalinité nette, autrement dit une eau contenant assez d'alcalinité pour équilibrer l'acidité provoqué par les processus d'oxydation (Brunet 2000; Hallberg et Johnson 2004). Un prétraitement doit être nécessairement employé pour traiter un effluent exécutant une forte acidité. Ce type de marais nécessite une couche d'argile ou une géomembrane pour éviter l'infiltration de l'effluent dans le sol comme le marais anaérobie.

III.1.3. Marais à écoulement vertical

Le marais à écoulement vertical visant à apporter remède les problèmes des marais épurateurs à traiter les eaux trop acides. Il composant d'un drain calcaire anoxique et d'un marais anaérobie.

La composition du fond d'un marais à écoulement vertical représenté par une couche de calcaire recouverte par un substrat organique. Premièrement, l'effluent se pénétré par le substrat organique où les bactéries sulfato-réductrices précipitent les métaux et accroître le pH. Ensuite, la dissolution du calcaire engendre encore plus d'alcalinité lorsque l'effluent se pénétré dans la couche de calcaire.

L'effluent est évacué par des drains plongés dans la couche de calcaire au fond du marais parce que ce marais fonctionne à écoulement vertical, (fig.69). Pour garantir l'étanchéité ce type de marais doit être protégé à l'aide d'une couche d'argile ou d'une géomembrane.

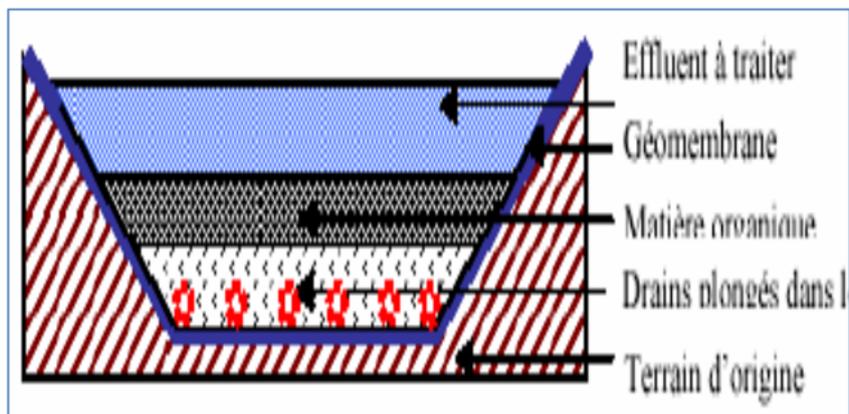


Fig.69. Schéma d'un marais à écoulement vertical (modifié de Brunet 2000)

Lorsque le fer ferrique (Fe^{3+}) existe dans un effluent avec des concentrations considérables, l'hydroxyde de fer provoquant d'enrober les grains de calcaire, diminuant leur pouvoir de neutralisation, et causant un colmatage au niveau des drains d'évacuation. Pour diminuer l'accumulation de précipités dans le substrat, le calcaire et plus particulièrement les drains. Un prétraitement est donc nécessaire à appliquer ; Pour assurer une meilleure performance du marais, aussi allonger la durabilité de ses composantes (substrat, calcaire et drains) un minimum d'entretien doit être appliqué.

III.2 Drain calcaire anoxique

Puisque tous les processus de traitement passif ne sont pas établis pour traiter un effluent très acide, on utilise souvent un drain calcaire anoxique (DCA) comme prétraitement pour augmenter l'alcalinité. Un DCA est un drain enterré, rempli de calcaire concassé et dépourvu d'oxygène (Fig 70). Il est entouré d'une géomembrane et recouvert d'une couche d'argile pour garantir l'étanchéité.

Le traitement d'un DCA assimile à la dissolution des carbonates, ce qui réduit l'acidité et par conséquent, accroître le pH. Les équations 4, 5 et 6 constatent les réactions de calcaire avec l'eau acide pour équilibrer les ions H^+ :

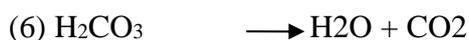
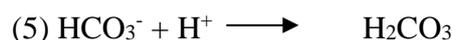
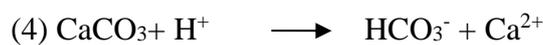




Fig.70. Drain calcaire anoxique en construction (tiré de Brunet 2000)

Le milieu où l'oxygène est disparu d'un DCA prévient l'oxydation des métaux dissous à l'intérieur du drain.

À la sortie du drain, les précipités métalliques se construisent, donc uniquement autrement dit au contact de l'oxygène. De ce fait un DCA doit être continuée d'un bassin de sédimentation ou d'un marais épurateur qui va autoriser la précipitation des métaux. Pour assurer le rendement du drain à long terme, le calcaire doit être possiblement remplacé.

Malgré le fait qu'un DCA produit l'alcalinité à une dépense franchement moins élevée que les marais, deux contraintes majeures limitent son applicabilité à long terme, soit la présence d'oxygène dissous et une forte concentration de Fe^{3+} ou de Al^{3+} (Hedin et Nairn 1992). Le DMA péricule d'absorber de l'oxygène dissous avant son arrivée dans le drain même si le milieu anoxique du système soustrait l'imprégnation de l'oxygène dans le drain. Donc, si l'effluent à traiter possède une forte concentration d'ions Fe^{3+} ou Al^{3+} ainsi qu'une quantité importante d'oxygène dissous, les métaux dissous vont précipiter sous forme d'hydroxydes à l'intérieur du drain. Les grains de calcaire seront enrobés, diminuant l'aptitude d'alcalinisation du système et causant possiblement un colmatage du drain et la défaillance du système.

III.3 Phytoremédiation

La phytoremédiation est une nouvelle méthode pour traiter le DMA, toutefois son utilisation, de plus en plus répandue est en voie de rendre une alternative viable et perpétuelle pour résoudre les difficultés des traitements des sites pollués.

En effet, Il existe quelques plantes qui ont la fonctionnalité d'emmagasiner des concentrations considérables de métaux dans leurs tissus sans que leur développement, n'en soit affecté en fonction vitale (Fig.71). Ces plantes appelées des plantes hyper accumulatrices. Par processus de phyto accumulation, ces plantes sont capables

d'emmagasiner des métaux lourds par leurs racines et d'en transporter une certaine quantité vers leurs parties aériennes. Cette propriété d'hyperaccumulation a été développée par ces plantes au cours de l'évolution, dans des conditions défavorables et nuisibles des sites métallifères.

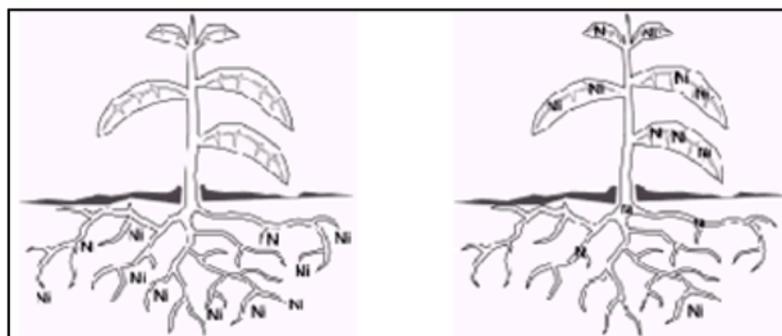


Fig.71. Phytoaccumulation du nickel par une plante (tiré de United Nations Environment Programme 2005)

Plus de 400 genres sont connues par leurs spécificités d'emmagasinement des métaux, certaines peuvent être concentrées jusqu'à 1,5 % de leur poids secs dans leurs parties aériennes. Malgré le fait que la majeure partie d'entre elles (300 genres) emmagasinent le nickel, plusieurs autres métaux sont susceptibles d'être accumulés, notamment le Cd, le Co, le Cu, le Zn, le Pb et le Mn. On peut dire une plante hyper accumulatrice à partir d'une certaine concentration dépendant du métal : plus de 1 000 mg/g de matière sèche dans les feuilles pour le Co, le Ni, le Cu et le Pb et plus de 10 000 mg/g pour le Zn et le Mn (Shallari 1997).

L'absorption de métaux par les plantes s'avère très avantageuse pour traiter les effluents miniers, puisque ces processus exigent peu d'entretien avec faible dépense et jouissent d'une admissibilité environnementale sans doute, puisque le paysage devient agréable grâce à l'implantation d'un couvert végétal (reverdissement et floraison). La possibilité de recyclage des résidus riches en métaux ainsi que les faibles coûts associés à la phytoremédiation expose l'importance augmentant pour son croissance.

III.4. Système de biosorption

D'après de nombreuses études, la concentration des métaux lourds dans le DMA pouvant produire à l'aide de la variété de microorganismes, entre autres des bactéries, des algues et des moisissures. En effet La biosorption est une méthode de traitement compté sur la récupération des métaux en présence de biomasse. Les processus de biosorption visent à enlevant d'ions métalliques en solution par l'adsorption des métaux à la surface des microorganismes ou à l'intérieur de leur cellule.

Ils existent certains processus physico-chimiques sont en jeu au cours du traitement par biosorption, soit l'adsorption de surface, la complexation, l'échange d'ions et la précipitation. Pour assurer un bon rendement du système, il faut une liaison étroite entre le DMA et les microorganismes pour garantir le maximum d'adsorption et les échanges ioniques.

Il ya deux types de biomasse, vivante ou non-vivante. La première est utilisée pour traiter les milieux polluée non pas acides, par contre, la deuxième utilisé pour traités les milieux très acides. La biomasse vivante est généralement composée d'algues et de plantes qui peuvent être cultivées, mais la plupart du temps recueillis dans le milieu naturel. Selon Brunet (2000), il peut s'agir : d'algues marines du genre *Ulva*; d'algues bleue-vertes du genre *Spirulina*; d'herbes du genre *Lemna*; de tourbe du genre *Sphagnum*; de l'algue *Chlorellavulgaris* (nom commercial *AlgaSORB*).

Malgré les bénéfices d'un système de biosorption, utilisant une biomasse morte ou vivante produit un ceci majeur : le changement des biomasses qui doivent être éliminé périodiquement et qui sont inutilisables. Ces boues peuvent être considérées comme des déchets toxiques ou dangereux, ce qui signifie que le stockage et le traitement peut être coûteux.

III.5. Bioréacteur

Les bioréacteurs sou réacteurs microbiens sont établis pour accroître le pH de l'effluent et pour précipiter les métaux sous forme de sulfures métalliques par des mécanismes microbiens anaérobies. Ces processus sont basés sur le principe du marais anaérobie, mais sont manqués des plantes, puisque la matière organique est apportée de l'extérieur. Par comparaison aux marais épurateurs construits qui utilisent un composant de processus microbiens et plantes (adsorption et absorption), des bioréacteurs basent entièrement de l'activité microbienne.

Le bioréacteur est une cuve contenant une couche de matériau organique tel que le compost de champignons pour soutenir la croissance de micro-organismes effectuant le traitement des eaux de DMA. Pour accroître l'alcalinité de l'effluent une couche de calcaire soit déposée ou mélangée avec la matière organique.

IV. Traitements passif potentiels pour la mine d'Oum Teboul

D'après l'étude de Monique de la mine abandonnée d'Austi au Canada et avant de déterminer la possibilité d'appliquer un système passif potentiel pour la mine d'Oum Teboul, il est nécessaire d'évaluer les particularités du drainage minier acide (DMA).

Les résultats obtenus dans notre étude concernant la région d'Oum Teboul, les eaux de stations P4 et P6 sont très contaminées par des métaux, plus particulièrement le fer avec des concentrations excessives dans P4(429,95mg/l) et P6(183,7mg/l), le zinc aussi enregistre des valeurs de 489.26mg/l pour le P4 et 187,8mg/l pour le P6 et pour le cuivre les valeurs sont de 0.095mg/l pour P4 et 0.11mg/l pour le P6

Ceci se traduit que ces concentrations du fer et zinc et cuivre dans les stations P4 et P6 sont plus élevées que les critères pour la protection de la vie aquatique.

En plus d'être contaminés par les métaux, les deux stations P4 et P6 comportent une acidité élevée avec des pH respectifs de 2,58 et 2,82. L'ensemble de ces résultats donne une estimation de la qualité du DMA sur le site de la mine d'Oum Teboul, fera le sujet de cette étude et utilisera d'un site potentiel pour le système de traitement passif.

Le système de traitement passif possible devra être mesuré d'effectuer quatre tâches essentielles afin de garantir le maintien d'un traitement approprié

1. la précipitation de fer dissous en quantité importante;
2. traitement des déchets liquides ayant une acidité élevée et à accroître son pH ;
3. la précipitation d'un ensemble de polluants inorganiques (métaux);
4. l'enlèvement des matières en suspension (polissage).

D'après Monique 2006 on va traiter quatre paramètres problématiques du DMA de la mine d'Oum Teboul, soit le fer, l'acidité, les métaux et les matières en suspensions et déterminer les techniques qui sont en mesure de remédier.

Il convient de comparer et analyser les différentes techniques exposées dans ce chapitre pouvant précipiter le fer, diminuer l'acidité, précipiter les métaux et enlever les matières en suspensions. Ces technologies seront comparées selon leur efficacité techniques, leur coût, leur niveau d'entretien et leur application sur d'autres sites miniers (Monique 2006).

IV.1 Le fer

La première étape de la séquence de traitements passifs est le prétraitement du fer parce que les résidus miniers du site d'Oum Teboul en contiennent une forte concentration.

On propose trois techniques pour précipiter le fer : le drain calcaire anoxique (DCA), le marais aérobie et le bassin de sédimentation. On choisit la troisième technique pour notre cas, puisque la concentration d'oxygène dissous et de fer ferrique dans le DMA de la mine d'Oum Teboul est supérieure à 1 mg/L, le fer risque de précipiter à l'intérieur du drain, ce qui pourrait potentiellement recouvrir le calcaire et défavoriser à l'écoulement de l'effluent donc, on ne peut pas utiliser le DCA.

L'applicabilité d'un marais aérobie comme prétraitement du fer est rejetée parce que le pH est faible indique un milieu trop acide pour que les plantes puissent survivre.

S'il n'y a pas de plantes, la présence d'un substrat est inutile, car comparativement à un marais anaérobie qui base essentiellement de l'action bactérienne (qui en retour a besoin d'un substrat pour s'alimenter), le marais aérobie emploie la matière organique pour fixer les métaux précipités et alimenter les plantes. (Monique 2006).

IV.2 Le pH

Pour la deuxième étape de la séquence de traitements passifs on choisit l'augmentation du pH parce que les techniques ne peuvent supporter un effluent comportant un pH inférieur à 5,5

On propose trois techniques pour augmenter le pH du DMA: le DCA, le marais à écoulement vertical et le bioréacteur. Le premier traitement expulse la majorité du fer dans le DMA, le DCA peut être très efficace comme prétraitement du pH, car il est capable d'accepter et de traiter les eaux acides du site d'Oum Teboul.

Les deux techniques le marais à écoulement vertical et le bioréacteur peuvent aussi précipiter les métaux mais ne fonctionnent pas à pH inférieur à 5,5.

IV.3 Les métaux

On choisit la précipitation des métaux à l'étape troisième du traitement. On adopte que la technique favorable pour cette étape est le marais à écoulement vertical malgré son efficacité, ce type de marais expose un risque de colmatage qui ne présente pas les marais à écoulement horizontal. La dissolution du substrat organique par les bactéries risque de recouvrir les grains de calcaire dans le fond du marais et causer un colmatage des drains d'évacuation. Pour ce la, ce type de marais exige un niveau considérable d'entretien pour garantir le bon fonctionnement du système (Monique 2006).

IV.4 Les matières en suspension

On propose, pour décanter les MES, un simple bassin de sédimentation, car il est moins coûteux, comparativement à un marais à écoulement horizontal malgré que les deux techniques sont efficaces pour traiter les MES.

V. Conclusion

On conclut par une recommandation consistante en une combinaison de quatre traitements, l'un après l'autre, pour traiter le DMA de la région d'Oum Teboul permettant de précipiter une quantité importante de fer dissous par le bassin de sédimentation, de diminuer l'acidité via la technique de DCA, d'enlever une gamme de polluants inorganiques (métaux) par le marais à écoulement vertical et de précipiter les matières en suspensions via un bassin de sédimentation.

Conclusion générale :

Les deux anciens sites miniers d'Oum Teboul et d'Azzaba, représentatives des sites miniers abandonnés du Nord-Est de l'Algérie, ont été choisis comme des sites pilotes pour mettre en évidence les polluants potentiels toxiques provoqués par les résidus de ces mines de l'environnement et notamment les ressources en eaux avoisinées de ces sites.

L'inventaire de pollution sur les deux sites basés sur l'interprétation des résultats des analyses effectuées sur les eaux des deux régions.

Pour la région d'Oum Teboul on constate des résultats excessifs tel que : la diminution de pH, l'augmentation d'Eh et les valeurs excessives en fer, zinc, cuivre et en sulfate, ces valeurs dues aux résidus miniers abandonnés de l'ancienne mine d'Oum Teboul provoquant le drainage minier acide et contaminent les eaux de ces stations, ce qui explique le manque de la pollution microbiologique de ces derniers, due au milieu acide, qui causait la mort de la vie aquatique et bactériologique.

Pour la région d'Azzaba, les résultats des éléments en traces métalliques, on enregistre deux valeurs de fer supérieures à la norme OMS standard, mais ne pose pas un danger pour l'environnement. Le mercure existe dans les eaux de la région, mais avec des valeurs faibles ne dépassant pas la norme OMS (1µg/l), ces valeurs de mercure dues à la nature des roches et au résidu minier abandonné de la mine mercurielle dans cette région. L'utilisation du logiciel Aquakit démontre une forte pollution organique dans deux stations due au rejet urbain, agricole et industriel. Cette forte pollution engendre une eutrophisation du milieu d'où une prolifération algale et de phytoplanctons.

Les résultats obtenus pour la caractérisation minéralogique chimique et bactériologique pour les deux régions d'étude d'Oum Teboul et d'Azzaba, que l'identification des caractéristiques minéralogiques à l'aide du logiciel Phreeqc, qui nous donne l'état de saturation des minéraux dans l'eau et à partir de ce dernier en note que les minéraux trouvés dans notre zone d'étude sont les minéraux carbonatés, les minéraux évaporitiques, les minéraux de fer, les minéraux de zinc et les minéraux de cadmium.

Pour la caractérisation chimique le logiciel Aquakit donne la composition chimique des eaux, le diagramme de Piper et Schoeller Berkloff donnent une idée sur les faciès chimiques des eaux et mettre ainsi en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux. On trouve dans la région d'Oum Teboul faciès chlorurée et sulfatée calcique magnésienne et faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

Dans la région d'Azzaba on note faciès sulfaté calcique, faciès bicarbonaté calcique. Donc on note que les résultats confirment, que ces faciès proviennent de la nature des devants rencontrés.

Les résultats obtenus de ce travail ont permis de faire une évaluation et un inventaire de drainage minier acide dans les eaux souterraines et superficielles dans les deux sites des mines abandonnées. La simulation des paramètres physico-chimiques avec le logiciel Phreeqc a permis de caractériser les minéraux existants dans les eaux étudiées et la prédiction de drainage minier acide à partir de cette caractérisation et on constate que la zone minière de la région d'Oum Teboul est soumise à un drainage minier acide important surtout au niveau des eaux superficielles du fait de l'existence des minéraux de fer surtout $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et des minéraux de zinc dans P6 et P4 avec $\text{pH} < 5$.

Pour remédier à la pollution enregistrée aux niveaux des eaux de la région d'Oum Teboul, on propose une recommandation consistant à une combinaison de quatre traitements l'un après l'autre, permettant de précipiter une quantité importante de fer dissous, de diminuer l'acidité, d'enlever une gamme de contaminants inorganiques (métaux) et de précipiter les matières en suspensions. Le système de traitement recommandé est basé sur le modèle des processus naturels. Tous comme les autres systèmes de traitement passif, un certain niveau d'entretien est nécessaire afin de permettre un traitement efficace des eaux.

Références bibliographique :

BEKKAR. S. (2009). Les indices polymétalliques de kef Oum Teboul : Etude pétrographique et métallogénique .Page (1-13).Mémoire d'ingénieur d'état en géologie. Université Badji Mokhtar Annaba.

BELOUCIF. N. (2007) .Etude géochimique de l'indice du Djebel Raout-Lassoued (Azzaba, Algérie nord-orientale) .page(2-7) .Mémoire de Magister en géologie .Université Mentouri Constantine .

BENHAMZA.M.(2007) .Contribution de la géophysique a l'étude de hydrogéologique mercurielle nord numidique (AZZABA) ; détermination de degré de pollution .Page88.Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

Bentouli M.Y.(2007). Inventaire et qualité des eaux des sources du parc national d'El Kala (N.Est Algérien). Page(9-13) .Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar Annaba.

BLOWES D.W., JAMBOR J. L., HANTON –FONG. Ch. J. (1998). Geochemical, mineralogical and microbiological characterization of a sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailings impoundment, Joutel, Québec. Applied Geochemistry, Vol. 13, No 6, page (687-705).

BUSSIERE, B., AUBERTIN, M., ZAGURY, G.J., Potvin, P., BENZAAZOUA, M., (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées. Symposium 2005 sur l'environnement et les mines. Rouyn-Noranda.

BRUNET.J.F. (2000). Drainages Miniers Acides : Contraintes et remèdes et l'état des connaissances. Rapport BRGM/RP-50504-FR, Page299.

CHEVALIER.P. (2002). Technologies d'assainissement et prévention de la pollution, Sainte-Foy (Québec), Télé-Université, page440.

CLAUDINE.B. (1993) .Stabilité et réactivité des carbonates à très hautes pression et température : Implications pour le stockage du carbone dans le manteau terrestre .Page 230. Mémoires de géosciences Rennes .Université de Rennes.

DUSHENKOV .V., KUMAR.P.B.A.N., MOTTO. H. et RASKIN, I. (1995). Rhizofiltration : the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams, Environmental Science and Technology, vol. 29, no 5, page(1239-1245).

FAULKNER. F.P. et RICHARDSON.I.C.J. (1990). Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils, Constructed Wetlands for Wastewater Treatment :Municipal, Industrial and Agricultural, Page(41-72).

GAZEA, B., ADAM. K., KONTOPOULOS. A. (1996). A Review of Passive Systems for the Treatment of Acid Mine Drainage, Minerals Engineering, vol. 9, no 1, p. 23-42.;Goulet et Pick 2001).

GHORBEL BEN ABID. M .(2012) . Contamination métallique issue des déchets de l'ancien site minier de Jebel Ressas : modélisation des mécanismes de transfert et conception de cartes d'aléa post-mine dans un contexte carbonaté et sous un climat semi-aride.

Evaluation du risque pour la santé humaine. Page(64-65). Thèse de doctorat. Université de Toulouse III - Paul Sabatier.

GRAY. N.F. (1996). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. Environmental Geology, 30 (1/2) March 1997.

GUASMI.I(2009) .Pollution des eaux et pouvoir auto épurateur de l'Oued Mejerda(Nord-Est Algérie).Page(89-103).Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

HALLBERG . K.B. et JOHNSON, D.B. (2004). Acid mine drainage remediation options : a review, Science of the Total Environment, vol. 338, p. 3-14.

HEDIN. R.S et NAIM. R.W . (1992). Designing and sizing passive mine drainage treatment systems, Proceedings of the Thirteenth West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, April 8-9, 1992, Morgantown, West Virginia.Skousen1997).

HEDIN.R. S. NAIRN . R. W. et KLEINMANN. R. L. P. (1994). Passive treatment of polluted coal mine drainage, Pittsburgh (Pennsylvania), Bureau of Mines Information Circular 9389, US Bureau of Mines, page35 .

KLEINMAN .R .L .P.,CRERA.D et PACELIL(1981).Biogéochimie de l'acidité des eaux de drainage et méthode de contrôle de la formation de l'acidité.Mining Engineering .Mars.Pge 300-304.

LOTTERMOSSER.(2010) . Mine wates characterization treatment and environmental impact.3^e édition,London.Springer.Page400.

LOWSON R. T. (1982). Aqueous pyrite oxidation by molecular oxygen. *Chemical Reviews*. 82(5), 461-497.Evangelou, V.P. (1995). Pyrite Oxidation and Its Control. CRC Press. 285p.

MACHEMER. S.D., Reynolds, J.S., LAUDON, L.S. et WILDEMAN, T.R. (1993). Balance of S in a constructed wetland built to treat acid mine drainage, Applied Geochemistry, vol. 8, p. 587-603.

MELGHIT.M .Qualité physico-chimique, pollution organique et métallique des compartiments Eau / Sédiments de l'Oued Rhumel,et des barrages Hammam Grouz et Beni HAROUN.Mémoire de Magister. Page(4-5).Université Mentouri de Constantine.

MINE ENVIRONNEMENT NEUTRAL DRAINAGE (1999). Review of Passive Systems for Treatment of Acid Mine Drainage, Report 3.14.1, sur le site de l'Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/NE/superfund/sites/elizmine/43547mend.pdf>. Consulté le 15 décembre 2005.

MONIQUE. M.(2006). Analyse d'un système de traitement passif pour le site de la mine Eustis. Page (12-53).Essai présenté en vue de l'obtention du grade de maître en Environnement (M.Env.) Centre universitaire de formation en environnement Université de Sherbrooke.

MOREL. J.L. BITTON. G. SCHWARTZ, C. et SCHIAVON, M. (1997). Bioremediation of soils and waters contaminated by micropollutants : which role for plants?, dans

MYLONA E., XENIDIS A, PASPALIARIS. I. (2000). Inhibition of acid generation from sulphidic wastes by the addition of small amounts of limestone. *Minerais Engineerieng*, Vol. 13, No. 10-1, page(1161-1175).

NECHEM .D.(2009). Qualité des eaux des sources thermales. Cas des sources du Djebel Safia (Hadjar Soud), Nord Est Algérien.. Page(23-24) .Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar Annaba.

NICHOLSON. R.V. GILLIHAM. R.W. and REARDON, E.J. (1988). Pyrite oxidation in carbonate buffered solution: 1. Experimental kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52,1077-1085.

NICHOLSON. R.V., SCHARER.J.M. (1994). Laboratory studies ofpyrrhotite oxidation kinetics. In: Alpers, C.N., Blowes, D.W. (Eds.), Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation. ACS Symposium Series, vol. 550, page(14-30). Washington, DC.

PARKHURST,D.L.etAPPELO,C.A.J.(1999).User's guide to PHREEQC .A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport,and inverse geochemical calculation. USGeologicalSurvey.326p.

PASCAL.C.(2014).Essai présenter au centre universitaire de formation en environnement et développement durable. En vue de l'Obtention du grade de maitre en environnement. Page (24-26).Université Sherbrook.

RAMADE.F.(2002). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement . 2ème Ed. *DUNOD*. Paris. Page 1075 .

RODOLPH.P.(1990). Le grand livre de l'eau, la manufacture, Cité des sciences. Paris .Page (160 – 370).

RIMSTIDT .J.D.et VAUGHAN.D .J(2003).Pyrite oxidation a stade of the art assesement of the reaction mechanism géochimica et cosmochica acta ,Vol67n°5. Page 873-880 .

- SAYAH LEMBAREK .Y.(1992)** .Reconnaissance de la nappe aquifère d'Oum Teboul « bassin versant de oued el –Eurg » .Page 17-19.Mémoire d'ingénieure d'état en hydrogéologie . Université Badji Mokhtar Annaba.
- SHALLARI, S (1997)**. Phytodisponibilité du nickel du sol pour l'hyperaccumulateur *Alyssum murale*, Thèse (Ph. D), l'Institut national polytechnique de Lorraine, page105.
- SHUTES. R.B.E., ELLIS, J.B., REVITT, D.M. et ZHANG.T. (1993)**. The use of *Typha latifolia* for heavy metal pollution control in urban wetlands, dans MOSHIRI, G.A. (1993). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Boca Raton (Florida), Lewis Publishers, Inc., page(407-414).
- STUMM .M. (1981)**, *Aquatic Chemistry* 2^d Edition, John Wiley & Sons Ed.
- VILLENEUVE.M.(2004)**.Evaluation du comportement géochimique à long terme de rejet minier à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essai cinétique.Thèse de doctorat.Ecole Polytechnique de Montréal .québec . Page576.
- VILLNEUVE.M . (2008)**. Canadien .Malartic. Caractérisation environnementale d'échantillons post –essais minéralogique in BAPE. projet minier aurifère .Canadian Malartic.
- ZELIKOFF, J.T. (1996)**. *Ecotoxicology : Responses, Biomarkers and Risk Assessment*, SOS Publications, Fair Haven, New-Jersey, page (37-74).