

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année 2014

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Modélisation des écoulements et de transport de
masse dans une région industrielle : Exemple de
la nappe de Berrahal, Nord-Est Algérien.

Option : Hydrogéologie

Par : **KHELFAOUI Hakim**

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

CO-DIRECTEUR DE THÈSE : CHAFFAI Hicham Professeur U.B.M., Annaba

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT : DJABRI Larbi Professeur U.B.M., Annaba

EXAMINATEURS : BAALI Fethi Maître de conférences A, Univ. Tébessa
FEHDI Chems Eddine Maître de conférences A, Univ. Tébessa
MAOUI Amar Maître de conférences A, Univ. Guelma

نمذجة التدفق و النقل الشامل في منطقة صناعية (مثال حال طبقة المياه الجوفية في منطقة برحال، شمال شرق الجزائر)

ملخص

خلال العقد الماضي ، شهدت منطقة برحال تطورا كبيرا في التنمية الصناعية و الاقتصادية، التي تركت أثرا إيجابيا على تسيير جيد للاقتصاد في المنطقة والبلاد، يدل على ذلك إنشاء منطقة صناعية في غرب برحال، والتي تحوي عشرات من الشركات في مختلف الأنشطة الصناعية والتجارية. ومع ذلك، فإن هذه التنمية الاقتصادية لم تأخذ في الاعتبار تأثير تصريف النفايات الصناعية على نوعية المياه الجوفية والتربة في المنطقة ، حيث لم يكن هناك دراسة تأخذ في الاعتبار صون و حماية البيئة، على الرغم من أن هذه المنطقة لديها إمكانات مهمة من مصادر المياه تتميز بوجود مناطق رطبة كبحيرة فتزارة و طبقات مياه جوفية واسعة النطاق.

و تحقيقا لهذه الغاية، فإن قابلية تلوث المياه الجوفية و التربة تطرح بشدة، علاوة على ذلك ، فإن نتائج التحاليل الفيزيائية و الكيمائية للتربة والمياه بينت أن لديهما نوعية رديئة خصوصا في بعض المعادن الثقيلة شديدة السمية على صحة الإنسان والبيئة ، فضلا عن كمية التمعدن المفرطة خصوصا في المياه الجوفية، و انتشار هذا التلوث إلى التربة مما سيؤدي إلى تدهور مستويات جودتها والتي أظهرت أيضا مستويات عالية جدا في بعض المعادن الثقيلة تم قياسها في مواقع مختلفة و خاصة بالقرب من التصريفات الصناعية ، مما يؤكد تأثير هذه التصريفات على النظام البيئي في المنطقة. و من جهة أخرى فإن تحديد المناطق المتأثرة بتصريف النفايات الصناعية قد تم إظهاره عن طريق نموذج رقمي لجريان المياه الجوفية وانتقال المعادن الملوثة التي تحملها عبر نظام انتقالي بواسطة البرنامج MODFLOW.

وبالإضافة إلى ذلك، فقد أظهرت لنا هذه الدراسة أن تأثير البنية الجيولوجية للمنطقة نفسها يؤثر إيجابيا على التلوث ، وذلك راجع الى غنى المنطقة بمناجم معدنية طبيعية. ومن أجل تحسين ومعالجة نوعية المياه و التربة، و تقديم تقييم مفصل للمخاطر على صحة الإنسان، شرعنا في عرض ومناقشة مختلف طرق التحاليل الكيمائية و ردود الفعل اللازمة من أجل الحفاظ على هذا النظام الإيكولوجي.

الكلمات المفتاحية : التلوث، النفايات، التربة، المعادن الثقيلة، نموذج ، برحال

Modeling of flow and mass transport in an industrial area (example of groundwater table of Berrahal, Algérian NE)

Abstract

During the last decade, the region of Berrahal has experienced a major industrial and economic development, which has left a positive impact on the good running of the economy of the region and the country evidenced by the creation of an industrial zone in the West of Berrahal, which includes dozens of companies in various industrial and commercial activities. However, this economic development has not taken into account the effect of industrial waste discharges on the quality of groundwater and soil of the region, where no study concerning the preservation and protection of the environment has been taken into account, although this region has an important potential of water characterized by the presence of wetlands such as Fetzara lake and extended aquifers.

To this end , the vulnerability of ground water, surface water and soil is imposed, moreover, the results of physicochemical analyzes of the soil and water show that they have a bad quality especially in some heavy metals highly toxic to human health and the environment, as well as excessive mineralization, this pollution is transmitted to the soil and leads to the deterioration of its quality, also very high levels in some heavy metals are measured at different locations and especially near industrial discharges , confirming the impact of these releases on the ecosystem of the region. The delimitation of sectors affected by the discharges from the industrial area has been demonstrated by the development of a model of subterranean flows and transport of pollutants in transitory regime using MODFLOW software. In addition, this study has shown us that the effect of the geological structure of the region itself positively affects the contamination, as a natural enrichment and mineralization encountered in some heavy metals. The available data on soil and groundwater contamination was used to develop a concept model for the contaminated regions and to identify the exposure scenarios to pollution.

For the improvement and remediation of water and soil's quality and detailed assessment of the risks to human health in front of this situation, we just present and discuss the various methods of chemical analyzes and necessary reactions for proper preservation of the ecosystem.

Keywords: *Pollution, waste, soil, heavy metals, model, Berrahal.*

Modélisation des écoulements et de transport de masse dans une région industrielle (Exemple de la nappe de Berrahal, Nord-Est Algérien)

Résumé

Durant la dernière décennie, la région de Berrahal a connu un développement industriel et économique important, avec un effet positif sur toute l'économie régionale et du pays, matérialisé par la création d'une zone industrielle à l'Ouest de Berrahal, qui englobe des dizaines d'entreprises de différentes activités industrielles et commerciales. Néanmoins, ce développement économique n'a pas pris en compte l'effet des déchets et des rejets industriels sur la qualité des eaux souterraines et du sol et aucune étude concernant la préservation et la protection de l'environnement n'a été prise en compte, malgré un potentiel hydrique important caractérisé par la présence de zones humides tel que le lac Fetzara et des aquifères étendus.

A cet effet, la vulnérabilité des eaux souterraines, superficielles et le sol est très imposée, les résultats des analyses physicochimiques de ces eaux et du sol montrent leur mauvaise qualité et surtout la présence de métaux lourds très toxiques pour la santé humaine et l'environnement. Une minéralisation excessive s'est transmise vers les sols et conduit à la détérioration de sa qualité, des teneurs également très élevées en quelques métaux lourds sont mesurées à différents endroits et surtout à proximité des rejets industriels, ce qui confirme l'impact des ces rejets sur l'écosystème de la région.

La délimitation des secteurs touchés par les rejets de la zone industrielle a été démontrée par l'élaboration d'un modèle des écoulements souterrains et de transport de polluants en régime transitoire à l'aide du logiciel MODFLOW. En outre cette étude montre que l'effet de la structure géologique de la région influe elle-même négativement sur cette contamination, avec une minéralisation et un enrichissement naturel en quelques métaux lourds.

En vue de l'amélioration et de la remédiation de la qualité des eaux et du sol et l'évaluation détaillée des risques sur la santé humaine, on examinera les différentes modalités des analyses chimiques et les réactions nécessaires pour une bonne préservation de cet écosystème.

Mots clés : Pollution, rejets, sol, métaux lourds, modèle, Berrahal

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude, avant tout à DIEU tout puissant qui m'a aidé et donné le courage pour mener à bien ce travail.

Merci à mon directeur de thèse le Professeur Azzedine HANI et mon co-directeur le professeur Hicham CHAFFAI, qui m'ont confié ce travail et accompagné. Je leur suis reconnaissant de m'avoir formé, orienté et corrigé, merci profondément pour leurs conseils ainsi que pour leurs gentillesse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Je remercie tout particulièrement Messieurs les membres du jury :

- Le professeur Larbi DJABRI de l'université Badji Mokhtar-Annaba, d'avoir endossé le rôle de président de jury lors de la soutenance ;
- Messieurs ; BAALI Fethi et FEHDI Chems Eddine, Maîtres de conférences A, de l'université de Tébessa, ainsi que monsieur MAOUI Amar, Maître de conférences A, de l'université de Guelma, d'avoir examiné et évalué ce travail.

Merci à monsieur Jacques MUDRY, professeur à l'université de Franche-Comté d'avoir bien voulu m'accueillir, m'aider, me diriger durant toute ma période de stage chez lui.

Merci à monsieur Rabah LAOUAR ; professeur à l'université Badji Mokhtar-Annaba.

Merci aux messieurs ; P. GALLICE et F. CHASPOUL du Laboratoire de Chimie Générale et Prévention des Risques et Nuisances Technologiques, de la faculté de pharmacie de Marseille, université de la Méditerranée.

Merci aux membres du Laboratoire de Ressource en Eau et Développement Durable (REDD) du département de Géologie, université d'Annaba.

Merci à monsieur Z. Abdelkrim; technicien supérieur au laboratoire d'hydrogéologie de l'université Mentouri-Constantine d'avoir m'aider à réaliser les analyses chimiques de l'eau, je remercie aussi tous le service de la station météorologique Les Salines et le responsable du service de l'ANRH d'Annaba ainsi que le chef service de l'ANRH de Constantine pour leurs aides. Ma reconnaissance et toute ma gratitude à tous les habitants de Berrahal, ainsi que les responsables des entreprises de la zone industrielle, qui m'ont autorisé à utiliser leurs puits et forages pour effectuer les prélèvements d'eau et les mesures hydrodynamiques.

Je tiens à remercier tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser cette thèse.

Mes remerciements à tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail directement ou indirectement, par leur amitié et leur sympathie, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Et pour finir, un grand merci à ma famille ; ma mère et mes frères et sœurs, pour m'avoir soutenu et toujours avoir cru en moi, et d'avoir fourni les matières premières nécessaires au maintien de mon intégrité morale et physique.

TABLBE DES MATIÈRES

Page

ملخص	II
Abstract	III
Résumé	IV
Remerciement	V
Table des matières	VI
Liste des tableaux	XI
Liste des figures	XII
Liste des abréviations	XVI
Introduction générale	1

Chapitre I : PRÉSENTATION DU CADRE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

I.1. Situation géographique	4
I.2. Le réseau hydrographique	4
I.3. Le relief	4
I.4. La végétation	4
I.5. La population	6
I.6. Infrastructure et équipement	6
I.6.1. Alimentation en eau potable	6
I.6.2. Assainissement	6
I.7. Type d'activité économique de la zone industrielle de Berrahal	6
I.7.1. Types des produits	9
I.7.2. Types des déchets	9

Chapitre II : CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES

II.1. Géologie régionale	11
II.1.1. Le complexe cristallophyllien	11
II.1.2. Subdivision du complexe	11
II.1.2.1. L'unité de base	11
II.1.2.2. L'unité intermédiaire	11
II.1.2.3. L'unité supérieure	12
II.1.3. Les roches ignées	15
II.1.3.1. Groupe microgranodioritique	15
II.1.3.2. Groupe rhyolitique	15
II.1.4. Les roches sédimentaires	16
II.1.4.1. Les flyschs ou grés numidiens	16
II.1.4.2. Les flyschs sénoniens	17
II.1.5. La tectonique	17
II.1.5.1. Accidents tectoniques importants	17
II.1.5.2. Petites fractures	17
II.1.6. La minéralisation	17
II.2. Géologie locale	18
II.2.1 : Les roches métamorphiques	18

VI

II.2.1.1 : L'unité de base	18
II.2.1.2 : L'unité intermédiaire	18
II.2.1.3 : L'unité supérieur	20
II.2.2 : les roches magmatiques	20
II.2.3 : les roches sédimentaires	20
II.2.4 : La tectonique	20
Conclusion	22

Chapitre III : ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE

III.1. Introduction	24
III.2. Délimitation des aquifères	24
III.3. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères	27
III.4 : Mesure de la piézométrie	27
III.4.1. Evolution de la piézométrie	31
III.4.2. Gradient hydraulique	31
Conclusion	33

Chapitre IV : CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES

IV.1. Introduction	35
IV.2. Caractéristiques morphométriques du bassin versant	35
IV.2.1. Le bassin versant (BV) Côtiers Constantinois.....	35
IV.2.1.1. Potentialité en eau de surface et souterraine	37
IV.2.1.2. Caractéristiques du bassin Côtiers Constantinois Centre	37
IV.2.1.2.1. Caractéristiques de sous bassin versant du lac Fetzara	39
IV.3. Caractéristiques climatiques	41
IV.3.1. Cadre climatique	41
IV.3.2. Analyse des précipitations	41
IV.3.2.1. Variations des précipitations dans le temps	43
IV.3.2.1.1. Variations annuelles	43
IV.3.2.1.2. Variations moyennes mensuelles	44
IV.3.2.1.3. Variations des précipitations saisonnières	45
IV.3.3. Analyse des températures	47
IV.3.3.1. Variations des températures dans le temps	47
IV.3.3.1.1. Variations moyennes mensuelles	47
IV.3.4. Diagrammes ombrothermiques	48
IV.3.5. L'humidité	48
IV.3.6. Détermination du type du climat (Indice de Martonne E. De)	50
IV.3.7. Le bilan hydrique.....	51
IV.3.7.1. Estimation des paramètres du bilan.....	51
IV.3.7.1.1. L'évaporation/l'évapotranspiration	51
IV.3.7.1.2. Le ruissellement	53
IV.3.7.1.3. L'infiltration	53
IV.3.7.2. Représentation graphique du bilan d'eau	55
Conclusion	56

Chapitre V : CARACTÉRISTIQUES PHYSICOCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES ET DU SOL

V.1. Introduction	58
V.2. Analyses physicochimiques des eaux	58
V.2.1. Echantillonnage, matériels et méthodes d'analyse	58
V.2.2. Résultats et discussion	63
V.2.2.1. Cartes de distribution spatiale des paramètres physiques et DBO5 des eaux souterraines	63
V.2.2.2. Cartes de distribution spatiale des cations majeurs des eaux souterraines	63
V.2.2.3. Cartes de distribution spatiale des anions majeurs et de nitrites des eaux souterraine.....	66
V.2.2.4. Cartes de distribution spatiale des métaux lourds des eaux souterraines.....	68
V.2.2.5. Valeurs du pH et concentrations en DBO5, Pb, Fe, Cu, Ni et Mn des rejets liquides de la zone industrielle de Berraha.....	71
V.2.2.6. Méthodes d'élimination des métaux lourds dans l'eau	72
V.2.2.7. Les faciès chimiques des eaux souterraines	73
V.3. Analyses chimiques du sol	74
V.3.1. Définitions – Abréviations	74
V.3.1.1. Définition d'un site pollué	74
V.3.1.2. Terminologie relative aux éléments chimiques	74
V.3.1.2.1. Éléments traces	74
V.3.2. L'utilisation de métaux	75
V.3.3. Les formes des éléments traces métalliques dans les sols	75
V.3.3.1. Mobilité	76
V.3.3.2. Biodisponibilité	76
V.3.3.3. Solubilité	76
V.3.3.4. Stabilité	76
V.3.3.5. Volatilité	77
V.3.4. Contexte conceptuel	77
V.3.4.1. Processus naturels	77
V.3.4.1.1. Fond géochimique (FG)	77
V.3.4.1.2. Fond pédogéochimique naturel	77
V.3.4.2. Divers apports	78
V.3.5. Echantillonnage, traitement des échantillons	78
V.3.5.1. Préparation des échantillons, méthode de dosage	80
V.3.6. Résultats et discussion	80
V.3.6.1. Le chrome (Cr)	80
V.3.6.2. Le manganèse (Mn)	81
V.3.6.3. Le fer (Fe)	83
V.3.6.4. Le cobalt (Co)	84
V.3.6.5. Le nickel (Ni)	85
V.3.6.6. Le zinc (Zn)	87
V.3.6.7. Le cuivre (Cu)	88
V.3.6.8. Le cadmium (Cd)	90

V.3.6.9. Le mercure (Hg)	91
V.3.6.10. Le plomb (Pb)	93
V.3.6.11. L'aluminium (Al)	94
V.3.6.12. Le vanadium (V)	96
V.3.6.13. L'arsenic (As)	97
V.3.6.14. Le rubidium (Rb)	99
V.3.6.15. Le strontium (Sr)	100
V.3.6.16. L'yttrium (Y)	101
V.3.6.17. Le molybdène (Mo)	103
V.3.6.18. L'étain (Sn)	104
V.3.6.19. L'antimoine (Sb)	105
V.3.6.20. Le césium (Cs)	107
V.3.6.21. Le baryum (Ba)	108
V.3.6.22. Le lanthane (La)	110
V.3.6.23. Le cérium (Ce)	111
V.3.6.24. Le néodyme (Nd)	112
V.3.6.25. Le samarium (Sm)	114
V.3.6.26. L'euporium (Eu)	115
V.3.6.27. Le gadolinium (Gd)	116
V.3.6.28. Le dysprosium (Dy)	117
V.3.6.29. Le tungstène (W)	119
V.3.6.30. Le thorium (Th)	120
V.3.6.31. L'uranium (U)	121
V.3.7. Interprétation statistique des résultats	123
V.3.7.1. Analyse en composantes principales (ACP)	123
V.3.7.1.1. Cercle F1-F2, plan F1-F2	123
V.3.7.1.2. Cercle F1-F3, plan F1-F3	124
V.3.8. Quelques techniques de dépollution du sol	127
V.3.8.1. Méthodes d'élimination de la pollution du sol applicables in situ	127
V.3.8.1.1. L'électrocinétique	127
V.3.8.2. Méthodes d'immobilisation de la pollution dans le sol applicables in situ.....	128
V.3.8.2.1. Stabilisation par traitement chimique	128
V.3.8.2.2. Immobilisation par procédés physiques	128
V.3.8.2.3. Consolidation par les végétaux	128
Conclusion	129

Chapitre VI : MODÉLISATION

VI.1. Introduction	131
VI.2. Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive à l'aide d'un modèle mathématique MODFLOW: Impact des activités de la zone industrielle sur les eaux	131
VI.2.1. Considérations théoriques	131
VI.2.2. Discrétisation du modèle	132
VI.2.3. Les conditions aux limites	133
VI.2.4. Cadre hydrogéologique du domaine étudié.....	134
VI.2.5. Modélisation en régime transitoire.....	135

VI.2.5.1. Le modèle conceptuel.....	135
VI.2.5.2. Calage du modèle hydrodynamique	136
VI.2.5.3. Ajustement des valeurs de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement.....	137
VI.2.5.4. Modèle de transport de masse	139
VI.3. Evaluation de risque sur la santé liée aux activités dans la zone industrielle de Berrahal...	140
VI.3.1. Contexte et objectifs	140
VI.3.2. Méthodologie.....	141
VI.3.3. Sélection des substances à prendre en compte.....	142
VI.3.3.1. Les substances analysées.....	142
VI.3.3.2. Comportement des substances dans l'environnement.....	143
VI.3.3.2.1. Les métaux lourds.....	143
VI.3.3.3. La relation dose-effet.....	145
VI.3.3.3.1. Les métaux lourds.....	145
VI.3.3.3.2. Calculs des concentrations utilisées dans le modèle.....	147
VI.3.4. Définition du schéma conceptuel.....	147
VI.3.4.1. Occupation des sols sur le site.....	147
VI.3.4.2. Cibles au contact de la pollution.....	148
VI.3.4.3. Voies de transfert des polluants depuis le sol.....	148
VI.3.4.4. Représentation du schéma conceptuel.....	148
VI.3.5. Modalités de calcul du risque.....	149
VI.3.5.1. Cadre et objectifs.....	149
VI.3.5.2. Méthodologie.....	149
VI.3.5.2.1. La dose journalière d'exposition.....	149
VI.3.5.2.2. Les fiches de calcul.....	151
VI.3.5.2.3. Le modèle RISC 4.....	152
VI.3.5.2.4. Caractéristiques des cibles.....	152
VI.3.5.3. Résultats.....	152
VI.3.5.3.1. Résultats du calcul des Doses Journalières d'Exposition et des indices de risque.....	153
Conclusion.....	158
Conclusion générale	159
Bibliographie	162
Annexes	167
Articles publiés	195
Article 1: Use of discriminant statistical analysis to determine the origin of an industrial pollution type in the aquiferous system of the area of Berrahal, Algeria.....	
Article 2 : Impact des rejets industriels sue les eaux de la région de Berrahal (NE Algérien)...	

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 - Type d'activité économique des entreprises de la zone industrielle de Berrahal ...	8
Tableau 2 - Caractéristiques des forages implantés dans la région de Berrahal	27
Tableau 3 - Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine d'Annaba	27
Tableau 4 - Paramètres hydrodynamiques de quelques points situés dans la nappe libre des sables et graviers à l'Est du lac Fetzara (d'après Zénati, 1999)	27
Tableau 5 - Mesure du gradient hydraulique d'après la piézométrie du mois de mai 2007.....	32
Tableau 6 – Potentialité en eau de surface du bassin Côtier Constantinois	37
Tableau 7 - Tableau récapitulatif du bassin versant Côtiers Constantinois Centre	39
Tableau 8 - Quelques caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara (ANRH, 2000).	39
Tableau 9 - Coordonnées géographiques des stations météorologiques	41
Tableau 10 - Précipitations annuelles (mm) et coefficients pluviométriques des stations de Berrahal et des Salines (1981/1982-2005/2006)	42
Tableau 11 - Précipitations moyennes mensuelles (en mm), 1981/1982-2005/2006	44
Tableau 12 - précipitations moyennes saisonnières (en mm) pour les stations de Berrahal et les Salines, (1981/1982-2005/2006)	46
Tableau 13 - Températures moyennes mensuelles pour la station des Salines (en °C), 1981/1982-2005/2006	47
Tableau 14 - Variations des humidités relatives moyennes mensuelles (en %) de la station des Salines (1981/1982-2005/2006)	49
Tableau 15 - Variations des humidités relatives moyennes annuelles (en %) à la station des Salines (1981/1982-2005/2006)	49
Tableau 16 – Détermination des paramètres de la formule du bilan	53
Tableau 17 - Le bilan hydrique pour la station de Berrahal, Méthode de C. W. Thornthwaite (1955)	54
Tableau 18 - Le bilan hydrique pour la station des Salines, Méthode de C. W. Thornthwaite (1955)	54
Tableau 19 - Points d'échantillonnage des eaux souterraines pour analyses physicochimiques	59
Tableau 20 - Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable (2011)	61
Tableau 21 - Normes Algériennes des rejets	61
Tableau 22 - Méthodes de traitement de quelques métaux lourds dans les eaux	73
Tableau 23 - Éléments traces dans les roches et les sols	78
Tableau 24 - Valeurs propres et pourcentages cumulés	123
Tableau 25 – Limites de la zone d'étude par les coordonnées Lambert.....	135
Tableau 26 – Données d'entrée des caractéristiques hydrodynamiques pour la réalisation du modèle.....	136
Tableau 27 – Bilan hydrique calculé en régime transitoire.....	138
Tableau 27 – Bilan hydrique calculé en régime transitoire.....	143
Tableau 29 – Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 1.....	154
Tableau 30 - Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 2.....	155
Tableau 31 – Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 3.....	156
Tableau 32 – Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 4.....	157

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 - Situation géographique de la zone d'étude	05
Figure 2 - Les réseaux de la commune de Berrahal, Source PDAU 1998 (Plan Directeur D'aménagement et d'Urbanisme)	07
Figure 3 - Types des produits des entreprises d la zone industrielle de Berrahal	09
Figure 4 - Position structurale du massif de l'Edough dans l'orogène Alpin de la méditerranée sud occidentale, d'après Durand Delga, 1969, modifié	13
Figure 5 – Carte géologique du massif de l'Edough, Annaba (modifiée après Hilly, 1962), d'après Laouar R. <i>et al.</i> , (2002)	14
Figure 6 - Colonne lithologique du massif de l'Edough (D'après Aissa D. E., 1985).....	16
Figure 7 - Carte géologique schématique de la région de Berrahal D'après P.D.A.U, 1998 (Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de Berrahal)	19
Figure 8 - Coupes géologiques entre le massif de l'Edough et Aïn Berda	21
Figure 9 - Inventaire des forages et colonnes stratigraphiques réalisés à travers la région de Berrahal	25
Figure 10 - Bloc diagramme montrant les horizons aquifères de la partie Est de la zone d'étude	26
Figure 11 - Piézométrie du mois de novembre 2006	29
Figure 12 - Piézométrie du mois de janvier 2007	29
Figure 13 - Piézométrie du mois de mars 2007	29
Figure 14 - Piézométrie du mois de mai 2007	29
Figure 15 - Piézométrie du mois de septembre 2009	30
Figure 16 - Piézométrie du mois de janvier 2010	30
Figure 17 - Piézométrie du mois de mai 2010	30
Figure 18 - Mesures de gradient hydraulique	32
Figure 19 - Bassin versant des Côtiers Constantinois	36
Figure 20 - Le bassin versant Côtiers Constantinois Centre et les limites de ses sous bassins	38
Figure 21 - Le réseau hydrographique du sous bassin	40
Figure 22 - Les variations des coefficients pluviométriques pour les stations de Berrahal et des Salines (1981/82-2005/06)	43
Figure 23 - Variations des précipitations annuelles (en mm) pour les stations de Berrahal et les Salines, (1981/82-2005/06)	44
Figure 24 - Variations des précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour les stations de Berrahal et des Salines, (1981/82-2005/06)	45
Figure 25 - Précipitations annuelles médianes « normales » (1965-95) (D'après ANRH, 2003)	46
Figure 26 - Variations des températures moyennes mensuelles (en °C) pour la station des Salines (1981/82-2005/06)	47
Figure 27 : Digramme ombrothermique pour la station des Salines	48
Figure 28 : Digramme ombrothermique pour la station de Berrahal	48
Figure 29 - Variations des humidités relatives moyennes annuelles (en %) à la station des Salines (1981/82-2005/06)	50
Figure 30 - Bilan d'eau (Station de Berrahal 1981-2006)	55

Fig. 31 - Bilan d'eau (Station des Salines 1981-2006)	55
Figure 32 - Carte d'inventaire des échantillons	60
Figure 33 - Carte d'occupation du sol de la zone industrielle de Berrahal (implantation des entreprises étudiées)	62
Figure 34 - Cartes de distribution spatiale des paramètres physiques (température, pH et conductivité électrique) et DBO ₅ des eaux souterraines de la zone d'étude	64
Figure 35 - Cartes de distribution spatiale des teneurs des cations majeurs dans les eaux souterraines de la zone d'étude (en mg/l)	65
Figure 36 - Cartes de distribution spatiale des teneurs des anions majeurs et de nitrites dans les eaux souterraines de la zone d'étude (en mg/l)	67
Figure 37 - Cartes de distribution spatiale des teneurs en métaux lourds (Fe, Mn, Pb, Ni et Cu) dans les eaux souterraines de la zone d'étude (en mg/l)	70
Figure 38 - pH des rejets industriels	71
Figure 39 - Teneurs en DBO ₅ des rejets industriels	71
Figure 40 - Teneurs en Pb, Fe, Cu, Ni et Mn des rejets industriels	72
Figure 41 - Diagramme de Piper pour les eaux souterraines de la zone d'étude	73
Figure 42 - Différentes formes et localisations des éléments traces dans les sols (Baize D., 1997)	76
Figure 43 - Carte d'inventaire des échantillons de sol	79
Figure 44 - Teneurs en Cr	81
Figure 45 - Carte de distribution de Cr (en mg/kg)	81
Figure 46 - Teneurs en Mn	82
Figure 47 - Carte de distribution de Mn (en mg/kg)	82
Figure 48 - Teneurs en Fe	83
Figure 49 - Carte de distribution de Fe (en mg/kg)	84
Figure 50 - Teneurs en Co	85
Figure 51 - Carte de distribution de Co (en mg/kg)	85
Figure 52 - Teneurs en Ni	86
Figure 53 - Carte de distribution de Ni (en mg/kg)	86
Figure 54 - Teneurs en zinc	87
Figure 55 - Carte de distribution de Zn (en mg/kg)	88
Figure 56 - Teneurs en Cu	89
Figure 57 - Carte de distribution de Cu (en mg/kg)	89
Figure 58 - Teneurs en Cd	90
Figure 59 - Carte de distribution de Cd (en mg/kg)	91
Figure 60 - Teneurs en Hg	92
Figure 61 - Carte de distribution de Hg	92
Figure 62 - Teneurs en Pb	94
Figure 63 - Carte de distribution de Pb (en mg/kg)	94
Figure 64 - Teneurs en Al	95
Figure 65 - Carte de distribution de Al (en mg/kg)	95
Figure 66 - Teneurs en V	96
Figure 67 - Carte de distribution de V (en mg/kg)	97
Figure 68 - Teneurs en As	98
Figure 69 - Carte de distribution de As (en mg/kg)	98
Figure 70 - Teneurs en Rb	99

Figure 71 - Carte de distribution de Rb (en mg/kg)	100
Figure 72 - Teneurs en Sr	101
Figure 73 - Carte de distribution de Sr (en mg/kg)	101
Figure 74 - Teneurs en Y	102
Figure 75 - Carte de distribution de Y (en mg/kg)	102
Figure 76 - Teneurs en Mo	103
Figure 77 - Carte de distribution de Mo (en mg/kg)	104
Figure 78 - Teneurs en Sn	105
Figure 79 - Carte de distribution de Sn (en mg/kg)	105
Figure 80 - Teneurs en Sb	106
Figure 81 - Carte de distribution de Sb (en mg/kg)	107
Figure 82 - Teneurs en Cs	108
Figure 83 - Carte de distribution de Cs (en mg/kg)	108
Figure 84 - Teneurs en Ba	109
Figure 85 - Carte de distribution de Ba (en mg/kg)	109
Figure 86 - Teneurs en La	110
Figure 87 - Carte de distribution de La	111
Figure 88 - Teneurs en Ce	112
Figure 89 - Carte de distribution de Ce (en mg/kg)	112
Figure 91 - Carte de distribution de Nd (en mg/kg)	113
Figure 92 - Teneurs en Sm	114
Figure 93 - Carte de distribution de Sm (en mg/kg)	114
Figure 94 - Teneurs en Eu	115
Figure 95 - Carte de distribution de Eu (en mg/kg)	116
Figure 96 - Teneurs en Gd	117
Figure 97 - Carte de distribution de Gd (en mg/kg)	117
Figure 98 - Teneurs en Dy	118
Figure 99 - Carte de distribution de Dy (en mg/kg)	118
Figure 100 - Teneurs en W	119
Figure 101 - Carte de distribution de W (en mg/kg)	120
Figure 102 - Teneurs en Th	121
Figure 103 - Carte de distribution de Th (en mg/kg)	121
Figure 104 - Teneurs en U	122
Figure 105 - Carte de distribution de U (en mg/kg)	123
Figure 106 - ACP des analyses chimiques du sol selon les axes F1 et F2	125
Figure 107 - ACP des analyses chimiques du sol selon les axes F1 et F3	126
Figure 108 - Mise en place d'une barrière électrocinétique en sol peu perméable (a) et sol très perméable (b) (Source BRGM, 1993).....	127
Figure 109 - Exemple de discrétisation d'un aquifère selon un maillage rectangulaire (McDonald and Harbaugh, 1988).....	132
Figure 110 - Schéma de la condition-limite « General Head Boundary » de Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988).....	134
Figure 111 - Piézométrie mesurée et calculée par le modèle du mois de mars 2007.....	137
Figure 112 – Carte de distribution des perméabilités de la nappe superficielle simulée en régime transitoire.....	138
Figure 113 - Carte de propagation des polluants à partir de la zone industrielle de	

Berrahal, exemple du Total des Solides Dissous TDS (en mg/l).....	140
Figure 114- Les principales étapes de l'évaluation détaillée des risques.....	142
Figure 115- Schéma conceptuel, <i>scénario 1</i> : Usage récréatif – Présence de Personnes.	149
Figure 116- Schéma conceptuel, <i>scénario 2</i> : Travaux agricole.....	149
Figure 117- Schéma conceptuel, <i>scénario 3</i> : Usage agricole – Consommation de viande.....	149
Figure 118- Schéma conceptuel, <i>scénario 4</i> : Usage agricole – Consommation de légumes.....	149

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : analyse en composantes principales
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques
BV : bassin versant
CT : Concentration Tolérable
DA : déficit agricole
DJA : Dose Journalière Admissible
DJE ad. : Dose Journalière d'Exposition Adulte
DJE enf. : Dose Journalière d'Exposition Enfant
DJE : Dose Journalière d'Exposition
EDR. : Evaluation Détaillée des Risques
ERI ad. : Excès de Risque Individuel Adulte
ERI enf. : Excès de Risque Individuel Enfant
ERI : Excès de Risque Individuel
ERU : Excès de Risque Unitaire
ERUI : Excès de Risque Unitaire pour l'Inhalation
ET : éléments traces
ETM : éléments traces métalliques
ETP : évapotranspiration potentielle
ETR : évapotranspiration réelle
Ets : entreprise
Exc : excédent
FG : fond géochimique
FPGN : fond pédo-géochimique naturel
IR ad. : Indice de Risque Adulte
IR enf. : Indice de Risque Enfant
IR : Indice de Risque
P.N.E : Plan Nationale de l'Eau
RFU : réserve facilement utilisable
TAH : Teneurs agricoles habituelles
TDS : Total des Solides Dissous

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau douce est un élément indispensable à toutes les formes de vie. Elle est utilisée pour la boisson, l'agriculture, l'assainissement, l'industrie, les environnements aquatiques, les loisirs, les transports, etc. ... Dans tous les écosystèmes, l'eau est en interaction avec le sol, l'atmosphère et les organismes vivants. Chez l'homme, c'est un élément intégrateur qui reflète l'intérêt porté à l'environnement. Toute gestion durable des ressources en eau dépend donc étroitement de notre capacité à évaluer correctement ces ressources.

L'augmentation dynamique de la production industrielle et agricole avait évidemment amélioré la vie de l'homme en lui fournissant le confort et le bon rendement, mais aussi, malheureusement, a conduit en même temps à une détérioration rapide de sa première Source de vie "l'eau".

La recherche d'une gestion pertinente des ressources du sol et du sous-sol est l'une des plus anciennes thématiques environnementales. La gestion des sites et sols pollués reste donc une politique définie en l'absence de consensus. L'affectation de moyens financiers raisonnables aux interventions techniques, la discussion d'objectifs crédibles nécessitent une instruction préalable essentielle à la valorisation sereine des actifs immobiliers. Rappelons que les sols ont, dans l'entendement actuel, un sens très large : sols superficiels et horizons profonds, aquifères et eaux de surfaces, qualité de l'air, du sol et impact sur l'air atmosphérique, dégradation des ressources végétales, dégradation de la valeur foncière et destruction éventuelle d'aménités naturelle,... Toutes ces problématiques sont potentiellement parties intégrante des études de caractérisation de l'état des sols et de leurs impacts, ces travaux doivent de plus, être menés en fonction du contexte local et non dans un environnement déterministe. C'est le seul domaine dans lequel les notions d'écologie, de toxicologie et d'écotoxicologie côtoient les expertises ayant trait aux expositions professionnelles ou les stricts bilans comptables des ressources dégradées (Le Corfec Y., 2011).

A cause de sa vocation industrielle et agricole, la commune de Berrahal est devenue une très grande zone utilisatrice d'eau, d'où la qualité de cette eau ne cesse de se détériorer. Dans cette étude, nous avons essayé de faire le point sur l'état de la pollution des eaux souterraines de la nappe superficielle et du sol de la région. L'accroissement des déchets solides et liquides est étroitement lié au développement économique et à la démographie. En effet, ce développement entraîne des impacts négatifs sur l'environnement et l'économie de beaucoup de pays. L'accroissement des populations et l'intensification des activités économiques en Algérie sont accompagnées d'une augmentation des rejets de toute nature [R. Djamaï, et al. (2006), A. Belhamra (2001) et N.E. Znati (1999)] qui vont rejoindre directement le milieu récepteur (nappe libre des sables fins et graviers, le lac Fetzara et le sol). Tous ces rejets sont sans aucun traitement au préalable ou du moins sans réduire les quantités de polluants selon les normes admises, puisque les entreprises de la zone industrielle de Berrahal ne disposent pas d'un réseau d'assainissement approprié et que leurs rejets sont évacués à l'air libre. Cette situation commence à avoir des répercussions très négatives sur la santé publique, sur les écosystèmes et sur l'économie elle-même.

A cet effet, la chimie des eaux souterraines et du sol dans la commune de Berrahal est souvent influencée par l'effet de la dissolution des formations géologiques, les rejets industriels et l'activité agricole.

Et en raison de l'utilisation multiple de ces eaux, cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans le temps et dans l'espace en fonction de la variation des paramètres physicochimiques de l'eau, ainsi que la qualité en éléments traces métallique et non métalliques du sol de la région.

Un plan de travail a été adopté pour atteindre ces buts, de montrer l'impact des activités des entreprises de la zone industrielle de Berrahal et leurs rejets ainsi que la nature géologique de la région sur la qualité des eaux souterraines et du sol. Ce travail a nécessité une approche en six chapitres :

Le premier chapitre : *Présentation du cadre générale de la zone d'étude* ; localisation de la zone d'étude, cadre physique, identification de la zone industrielle et les entreprises actives et statistiques globales.

Le deuxième chapitre : *Caractéristiques géologiques* ; détail du contexte géologique de la région sur l'échelle régionale (géologie du massif de l'Edough) et locale (géologie de la région de Berrahal), définir les différents accidents tectonique qui affectent la région et voir la structure géologique et de minéralisation afin de localiser les différents aquifères et sources de minéralisation excessives dans les eaux et le sol.

Le troisième chapitre : *Etude hydrogéologique* ; on a délimité les aquifères rencontrés dans la région ainsi que leurs caractéristiques hydrodynamiques, établir des cartes piézométriques selon différentes période afin de déterminer les sens d'écoulement et les gradients hydrauliques.

Le quatrième chapitre : *Caractéristiques hydrologiques et climatiques*, étude détaillée, des paramètres hydrologiques et morphométriques des bassins et sous-bassins versants qui englobent la zone d'étude, les sources d'alimentation en eau des aquifères, étude climatologique et établissement du bilan hydrique pour mieux déceler la distribution des eaux pluviales à travers la région.

Le cinquième chapitre : *Caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines et du sol de la région* ; partie essentielle pour caractériser les différentes sources de pollution. Les analyses physicochimiques des eaux souterraines, ainsi que les analyses chimiques en éléments traces métalliques et non métalliques du sol de la zone d'étude ont permis une connaissance approfondie sur l'origine de la pollution des eaux et du sol. Ces analyses ont abouti également à éclaircir le rôle néfaste des rejets industriels liquides sur la région, ainsi que l'effet de la minéralisation des formations géologiques permettant un suivi de l'évolution spatiale de cette pollution dans l'eau et dans le sol. Pour atteindre ces objectifs, les données analytiques acquises dans le réseau de mesure de la zone d'étude ont été traitées par des logiciels informatiques (Surfer, ACP).

Le sixième chapitre : *Modélisation* ; dont la réalisation est tributaire d'un ensemble de données assez conséquent et qui ont été traités dans les différents chapitres précédents. Ce dernier chapitre est divisé en deux parties : la première, concerne la modélisation des écoulements et du transport de masse dans le système aquifère de la région, permettant également la modélisation de la piézométrie sur une période de suivi limitée et l'élaboration d'un modèle conceptuel pour le transport des polluants dans la nappe libre. La deuxième partie, concerne l'évaluation détaillée des risques pour la santé humaine liée à la présence de substances polluantes dans les sols.

Chapitre I

PRÉSENTATION DU CADRE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

I.1. Situation géographique

La commune de Berrahal est située à 30 Km vers l'Ouest du chef lieu de la wilaya d'Annaba, à l'extrême Nord-Est Algérien. Elle s'étend sur une superficie de 180,15 Km², traversée par la route nationale n°44 (*Annaba-Skikda-Constantine*), limitée au Nord par les communes d'Oued El Aneb et Tréat, au Sud par la dépression du lac Fetzara et la commune d'El Eulma, à l'Est par la commune de Cheurfa et d'El Hadjar et à l'Ouest par la commune de Boumaïza (**Fig. 1**).

La zone industrielle de Berrahal est située au Sud-Ouest du chef lieu de la commune de Berrahal à une distance d'environ 2 Km et d'une superficie de 121 ha. Elle se situe entre trois agglomérations secondaires (*Kalitoussa au Sud et à l'Est, Guirche à l'Ouest et Tacha au Nord*) et comporte 82 lots et 28 entreprises en activité.

I.2. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de Berrahal est dominé par une série d'affluents et des oueds à écoulement torrentiel et temporaire se déversant directement dans le lac Fetzara qui occupe environ 61% de la superficie de la commune et qui rejoint la mer par l'intermédiaire d'un canal de dessèchement qui passe par l'oued Meboudja, puis par l'oued Seybouse.

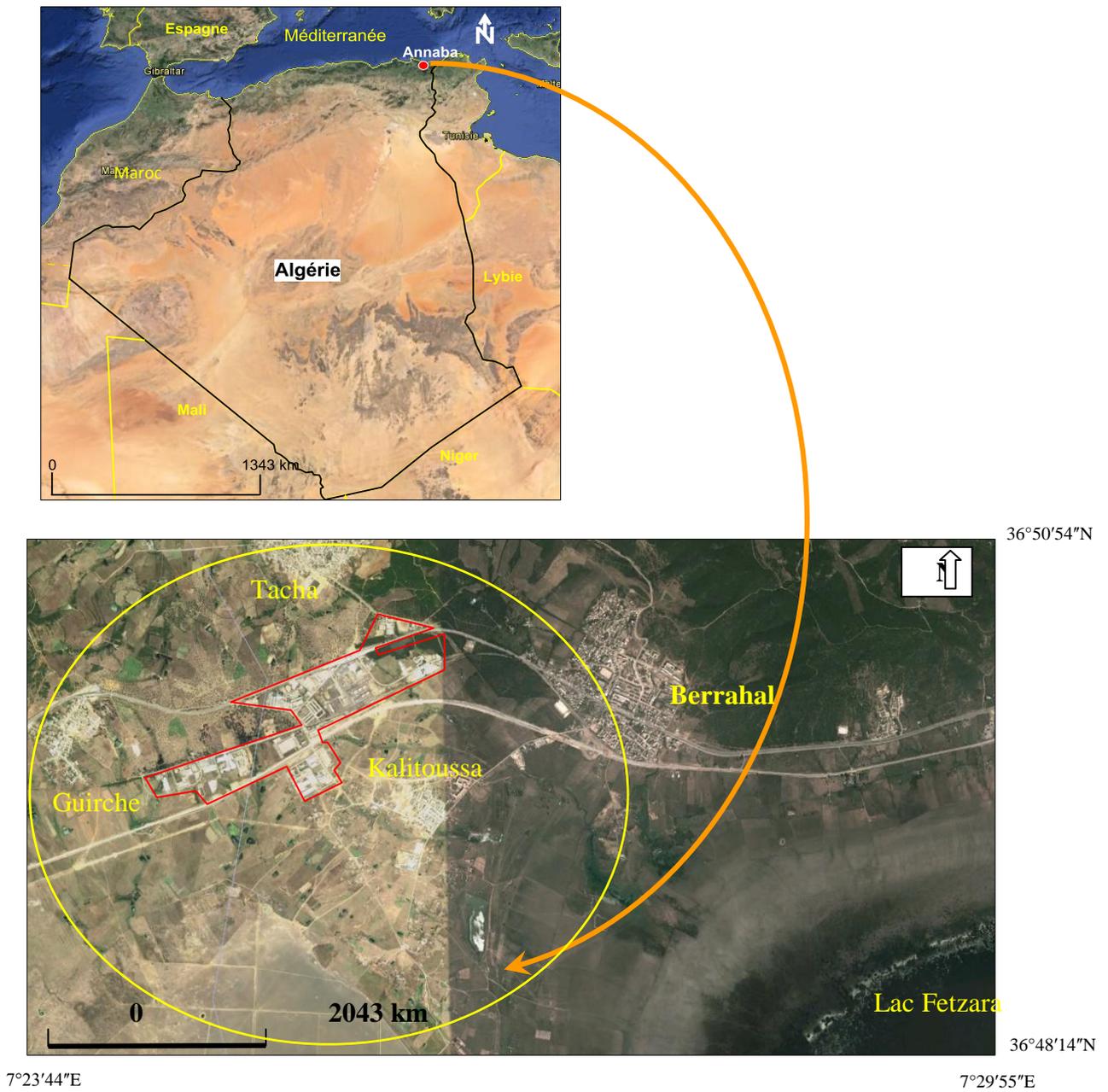
I.3. Le relief

La commune de Berrahal chevauche principalement sur deux unités géomorphologiques bien distinctes par la topographie : au Nord, un ensemble de collines désignées sous le nom du massif de Aïn Oum-Rkha dont le point culminant atteint 266 m, ce massif fait partie de la terminaison Sud-Ouest du massif de l'Edough ; au Nord-Ouest, s'ajoute un ensemble de petites collines connues sous le nom de Tobeiga dont les lignes de crêtes ne dépassent guère les 100 m d'altitude. Au Sud de la RN 44 se développe la grande dépression du lac Fetzara avec une superficie de plus de 14000 ha.

I.4. La végétation

L'espace forestier de la commune de Berrahal couvre une superficie de 1942,5 ha représentant principalement les parties montagneuses. Il est constitué par une végétation spontanée naturelle représentée par des chênes lièges, des oléastres, des maquis et broussailles des régions méditerranéennes.

Dans le cadre de la mise en valeur de cet espace vital, des reboisements de pin maritime et surtout d'eucalyptus ont été introduits après l'indépendance. Les principales terres agricoles communales occupent les terrains alluvionnaires de la plaine de Tacha et le pourtour du lac Fetzara où les cultures extensives céréalières prédominent.



Légende :

-  La zone d'étude.
-  La zone industrielle.

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

I.5. La population

La daïra de Berrahal compte 45670 habitants (*en 2008*) dont 21040 habitants pour le chef lieu et les agglomérations qui entourent la zone industrielle (*Kalitoussa, Guirch*). 54% de cette population sont urbaine et 46% rurale.

I.6. Infrastructure et équipement

I.6.1. Alimentation en eau potable

L'agglomération chef lieu et Kalitoussa sont alimentés par un réseau ramifié et les autres agglomérations secondaires par des réseaux séparatifs reliés au château d'eau.

I.6.2. Assainissement

L'assainissement des eaux pluviales et usées se fait selon la morphologie du terrain, en général, ces eaux se versent dans des fosses septiques ou des bassins de décantations qui les rejettent à leur tour vers les oueds ou le lac Fetzara. Le système d'égout existant est du type réseau séparatif (**Fig. 2**).

La conduite d'eau potable traverse la zone industrielle de Berrahal, mais n'est pas utilisée par les fabricants, cela peut être expliqué par la négligence de la commune qui n'a pas réalisé le raccordement des différentes usines à la conduite. Avec cette contrainte, les investisseurs ont été obligés de s'approvisionner en eau à l'aide des citernes et pour ceux qui ont les moyens, de réaliser des puits ou des forages. Le système d'évacuation des eaux au sein de la zone existe, mais il manque d'entretien car durant les intempéries les rues deviennent inondées.

I.7. Type d'activité économique dans la zone industrielle de Berrahal

60% des entreprises ont une activité de production et 40% sont des entités purement commerciales (**Tableau 1 et Annexe 1**).

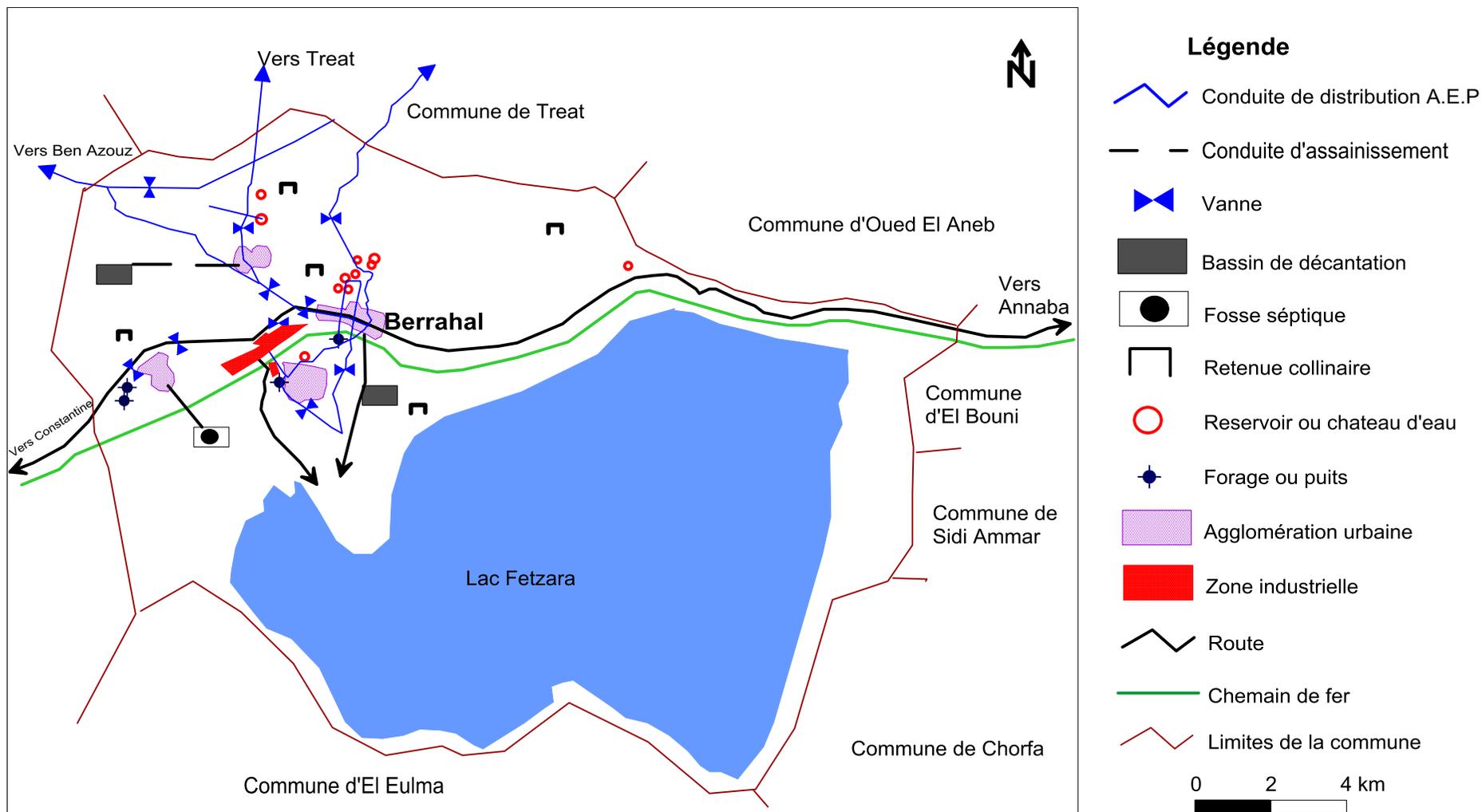


Fig. 2 : Les réseaux de la commune de Berrahal, Source PDAU 1998 (Plan Directeur D'aménagement et d'Urbanisme)

Tableau 1 - Type d'activité économique des entreprises de la zone industrielle de Berrahal

N°	Nom d'entreprise	Type d'activité	
		Industrielle	Commerciale
01	SARL Moulin Beldi	*	
02	SPA-COPRAC	*	
03	ALGOMETAL	*	
04	EPE-Protuil	*	
05	EMTP		*
06	IGROMED		*
07	EPE- GESIBAT.SPA		*
08	Stockage de fer		*
09	EURL-AZATIS	*	
10	EURL-EL Meida	*	
11	Laiterie Fetzara	*	
12	EURL-Savonnerie Nozha	*	
13	E.F.M.I (matériel d'incendie)	*	
14	El Annabia	*	
15	EURL KIV		*
16	BATICIK (montage)	*	
17	BONA	*	
18	SARL- Mahbouba	*	
19	SARL- Bitume Oxyde de l'Est		*
20	EURL- Matières d'isolations	*	
21	SARL-ESPAP et TPS	*	
22	NAFTAL		*
23	Biscuit 7 épis	*	
24	TRASFIR	*	
25	Unité-CCLS de Berrahal		*
26	CAPROMET		*
27	Diprochim		*

I.7.1. Types de produits

Les deux branches d'activité dominantes sont l'agro-alimentaire et les travaux publics (**Fig. 3**).

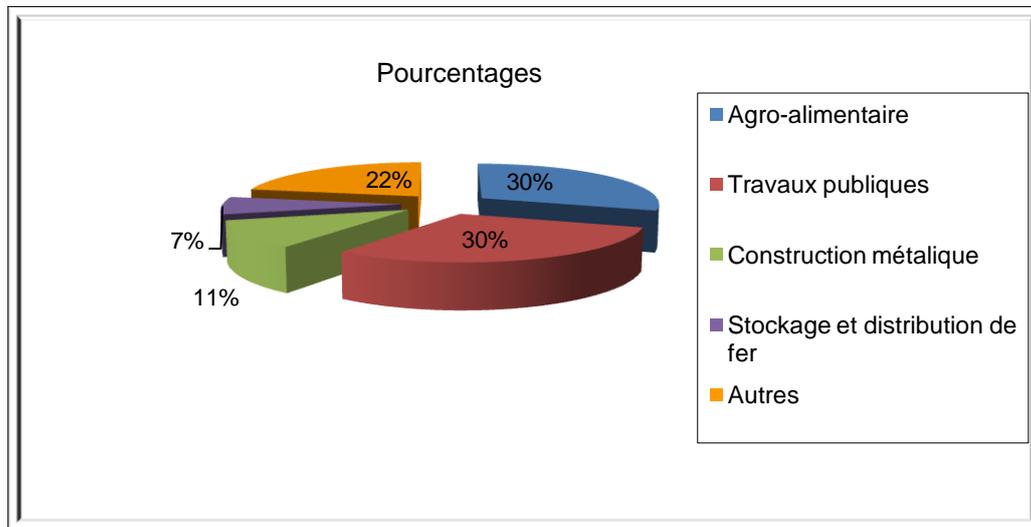


Fig. 3 : Types de produits des entreprises de la zone industrielle de Berrahal

I.7.2. Types de déchets

Les déchets sont diversifiés entre solides 75% et liquides 25%, dont les rejets se font soit dans les décharges publiques, soit au voisinage de la zone industrielle à l'air libre, soit au niveau du lac Fetzara ou encore brûlés ou recyclés.

Chapitre II

CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES

II.1. Géologie régionale

II.1.1. Le complexe cristallophyllien

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

Il se présente en un brachyanticlinal à prédominance de gneiss entourés de micaschistes à intercalations de marbres, d'amphibolites et de schistes satinés (J.M. Vila, 1980), il s'étend de 50 Km de long sur 20 km de large et d'orientation axiale N60 (**Fig. 5**).

II.1.2. Subdivision du complexe

D'après les travaux de G. Gleizes et *al.* (1988), le massif de l'Edough pourrait être subdivisé en trois unités (**Fig. 6**) :

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

II.1.2.1. L'unité de base

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

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

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

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

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

II.1.2.2. L'unité intermédiaire

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

Les micaschistes ne forment que des lames d'épaisseur réduite (quelques mètres à une centaine de mètres) sauf dans le secteur périphérique de Cap de Garde où ils réapparaissent en position verticale avec une épaisseur cumulée de plus de 1000 m. Ces micaschistes riches en feldspaths sont jalonnés par un ou plusieurs horizons de marbres constitués presque uniquement de calcite bien cristallisée et d'autres minéraux accessoires comme la muscovite, phlogopite, pyrite, diopside, trémolite, grenat. Outre les marbres on rencontre aussi des amphibolites et des pyroxénites souvent réduits à des amas plus au moins continus à lenticulaires.

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

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

II.1.2.3. L'unité supérieure

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



Fig. 4 : Position structurale du massif de l'Edough dans l'orogène Alpin de la méditerranée sud occidentale (Durand Delga, 1969, modifiée)

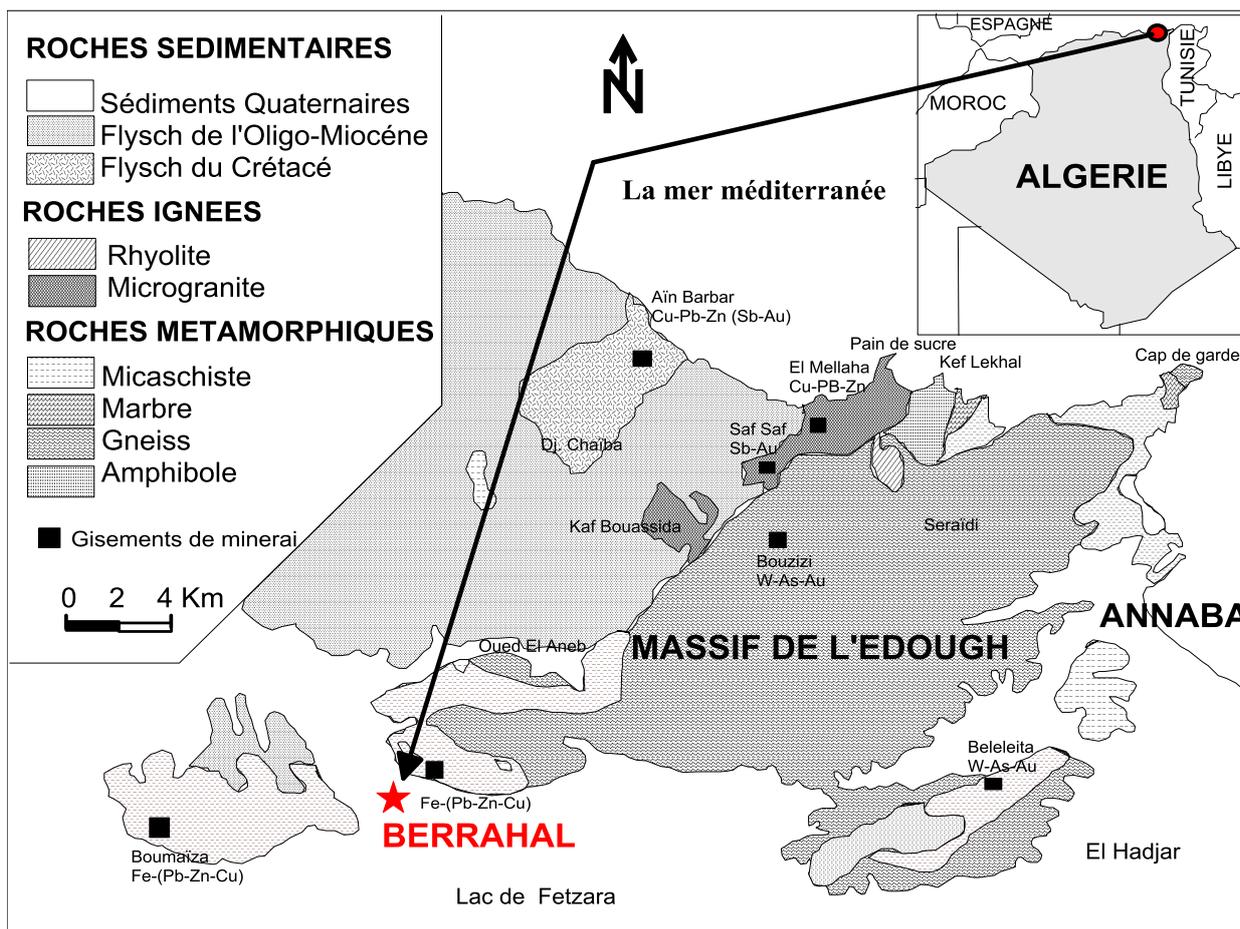


Fig. 5 : Carte géologique du massif de l'Edough (Hilly, 1962), modifiée (in Laouar *et al.*, 2002)

II.1.3. Les roches ignées

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

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

II.1.3.1. Groupe microgranodioritique

C'est le groupe le plus important dans le massif de l'Edough. Il se présente selon le cas, en dykes, en petits pointements, en bosses ou laccolites plus ou moins étendues. La profondeur de mise en place diminue de l'Est à l'Ouest. Il affleure à Oued El Afris (ou pain de sucre) et dans la région de Saf-Saf au Nord de l'Edough. Il recoupe les gneiss et les micaschistes. Le quartz est rarement visible à l'œil nu (Djerrab et Gherbi, 1991).

II.1.3.2. Groupe rhyolitique

On le rencontre au Nord-Ouest de l'Edough, il se présente soit en filon soit en massif.

Les rhyolites massives présentent des phénocristaux millimétriques de quartz, feldspath, biotite et tourmaline.

Il est à noter la présence d'enclaves de gneiss, de micaschistes, de grès Numidien, flysch Sénonien et microgranite au sein des rhyolites.

Par contre les filons rhyolitiques sont des roches blanchâtres constituées d'une matrice microlitique, de biotite et quartz.

Quant aux groupes dioritique et andésitique, ils ne se situent pas exactement dans le massif de l'Edough, mais plutôt du côté du Cap de Fer et de Chetaïbi.

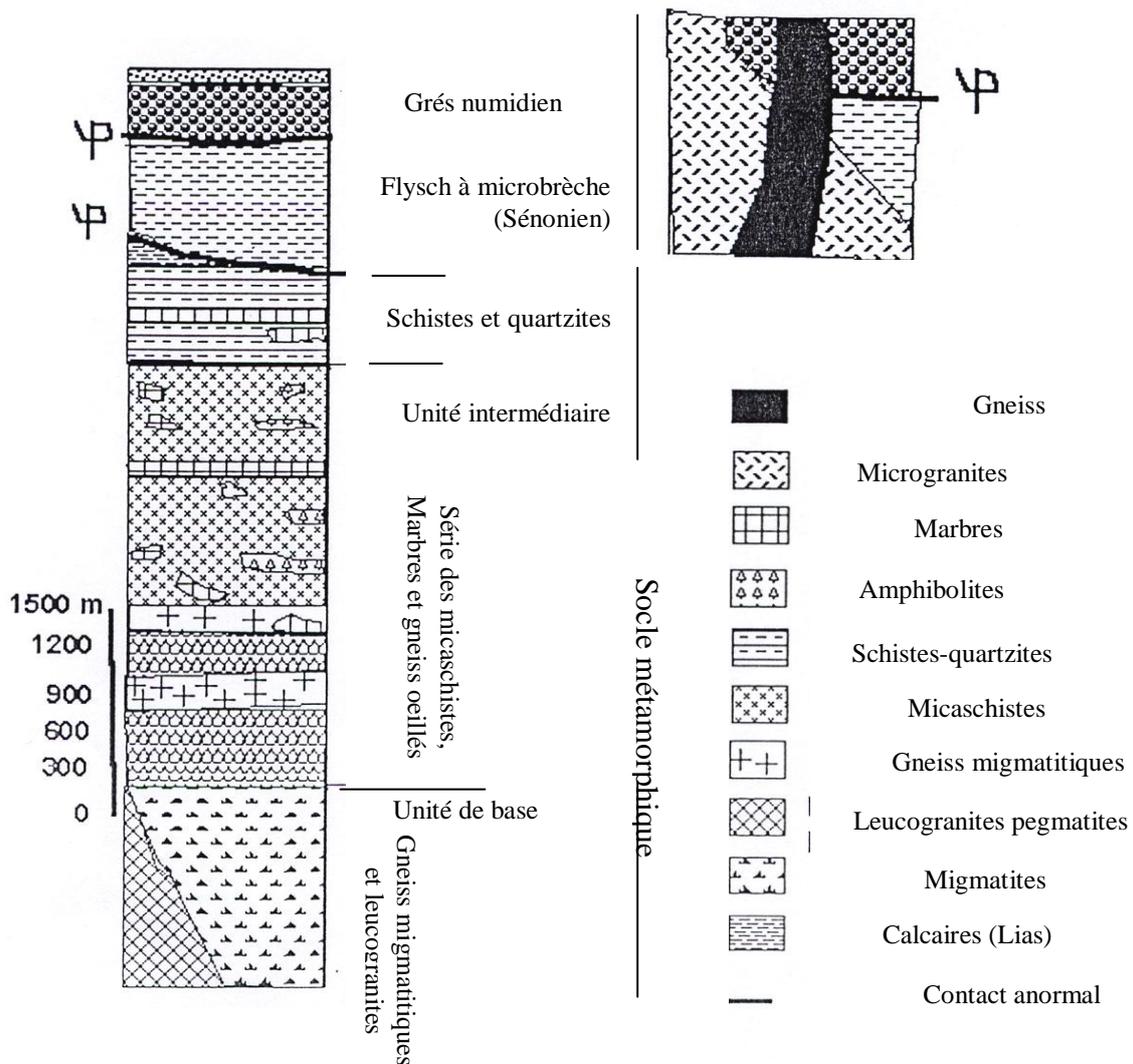


Fig. 6 : Colonne lithologique du massif de l'Edough (Aissa D. E., 1985)

II.1.4. Les roches sédimentaires

On distingue deux types de flyschs recouvrant partiellement le massif :

II.1.4.1. Les flyschs ou grès numidiens (*Oligo-Miocène*)

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

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

II.1.4.2. Les flyschs sénoniens (*Maestrichtien*)

Ils affleurent sous le numidien en fenêtre près d'El Mellaha et Saf-Saf au Nord Ouest du massif.

Ils sont transgressifs sur le socle métamorphique. Ils présentent l'aspect des schistes argileux de teinte noire bleutée devenant verdâtre suite à l'altération et intercalé avec 20 à 50 cm de calcaire sableux et une microbrèche calcaire de couleur gris bleutée (Laouar, 2002).

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

II.1.5. La tectonique

Les données géophysiques et les observations de terrain à travers le massif de l'Edough, réalisées par Aissa D. E. (1985), mettent en évidence les accidents tectoniques suivants :

II.1.5.1. Accidents tectoniques importants

Une première famille dont l'orientation varie de NW-SE à WNW-ESE avec la direction la plus fréquente de N120° à N150° et que l'orientation N140° à N150° d'un bon nombre de dykes permet de conclure que cette famille correspondrait à un système de failles décrochantes dextres (mont Eddikra, Kef Guelâa).

Une deuxième qui semble être conjuguée à la première, dirigée NNE-SSW (direction fréquente N28E en moyenne), cette famille correspondrait à un système de failles décrochantes sénestres. Il y a aussi les mêmes accidents au NW du massif dans les petits massifs microgranitiques.

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

II.1.5.2. Petites fractures

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

II.1.6. La minéralisation

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

II.2. Géologie locale

Dans l'ensemble, les basses collines de la région de Berrahal qui forment la retombée Sud de l'Edough donnant naissance au petit massif de Berrahal qui est la continuité du massif de l'Edough, il s'étale en coteaux à orientation Nord-Sud (**Fig. 7**). Le processus d'individualisation de ce petit massif et sa mise en place dans le contexte régional est dû au violent plissement qui a affecté la région (**Fig. 8**).

II.2.1. Les roches métamorphiques

L'Edough est quasiment formé de roches qui ont subi un métamorphisme de degré variable justifié par l'ordre d'apparition des minéraux indicateurs du métamorphisme tels que la chlorite, l'andalousite, le disthène, sillimanite et les grenats.

Le secteur étudié est situé au sud-ouest du massif de l'Edough sur son prolongement occidental.

On trouve les trois unités représentées par les affleurements suivants :

- l'unité de base est représentée par des gneiss.
- l'unité intermédiaire est constituée par des micaschistes à grenats avec des intercalations de cipolins.
- l'unité supérieure est composée de séricitoschistes et de quelques bancs de cipolins,

II.2.1.1. L'unité de base

Les gneiss sont très altérés et se présentent sous différents aspects ; des gneiss ocellés, des gneiss feuilletés ou rubanés avec des niveaux micaschisteux (Henni B. et *al.*, 2000). Ils affleurent au Nord-Est de Berrahal.

Ces gneiss sont pour la plupart à deux micas avec une prédominance de la muscovite. Ils contiennent également du quartz, des feldspaths potassiques, des plagioclases acides, ainsi que du disthène, sillimanite, grenat et andalousite.

Par rapport aux micaschistes à grenats, la présence supplémentaire de sillimanite indique un degré de métamorphisme supérieur.

II.2.1.2. L'unité intermédiaire

- **Les micaschistes à grenats** : ils apparaissent sur le terrain de couleur gris-bleue, la roche est très altérée. Les micas existant sont la muscovite et la biotite qui sont enchevêtrées, ils occupent la partie Nord de la région.
- **Les cipolins** : ils apparaissent sous différentes couleurs, du blanc rosé au gris bleuté et sont parfois rubanés. Ils sont intercalés dans les micaschistes à grenats. Leur épaisseur est de l'ordre métrique à décamétrique.

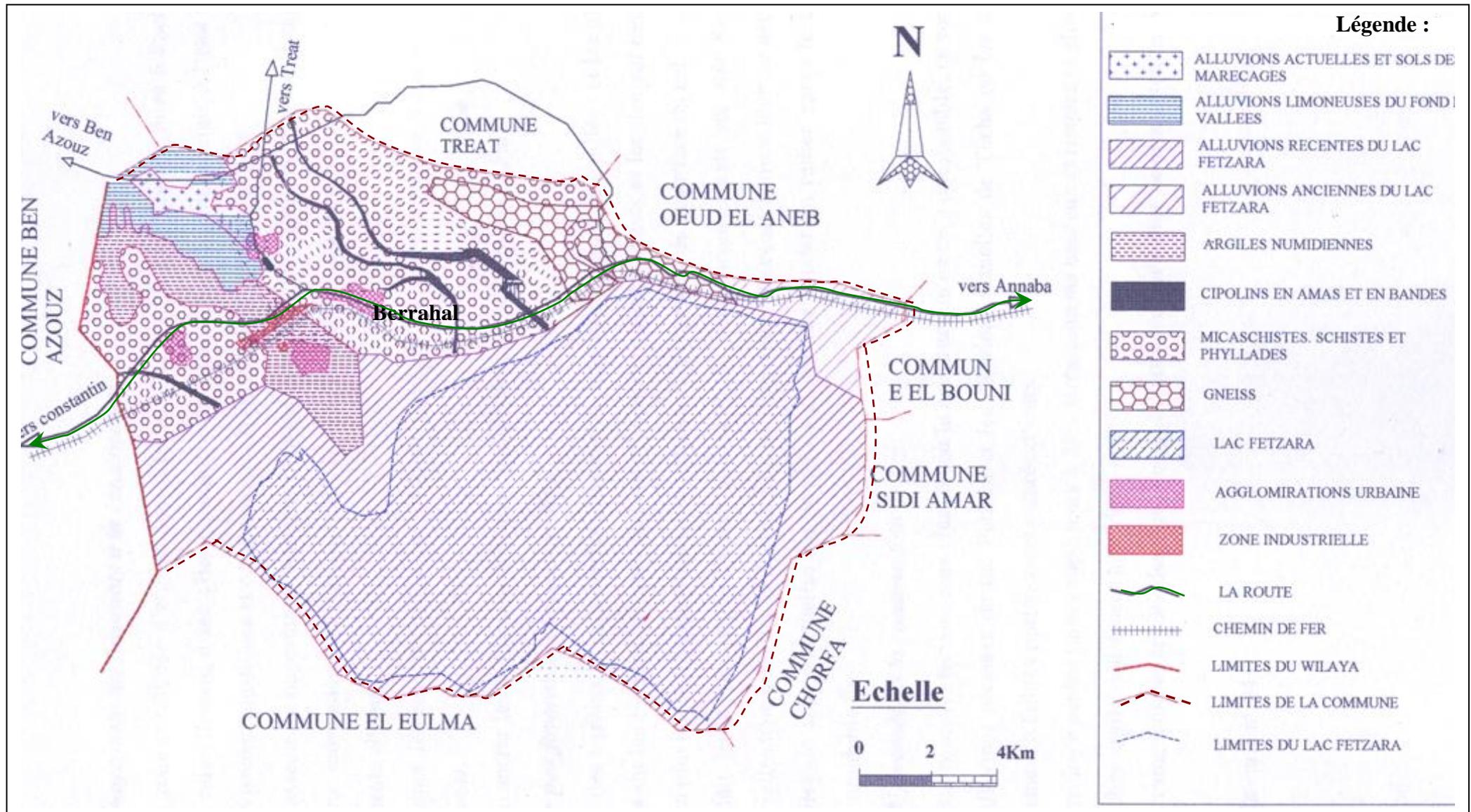


Fig. 7 : Carte géologique schématique de la région de Berrahal (Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de Berrahal, PDAU-1998)

II.2.1.3. L'unité supérieure

- **Les séricitoschistes** : ils se présentent en couches finement feuilletées de couleur bleue, grisâtre à verdâtre. Leur épaisseur est de l'ordre décimétrique avec un pendage de 60° au sud et de 30° au Nord de la zone d'étude.
- **Les cipolins** : ils sont essentiellement constitués de calcite qui est légèrement orientée. Ils montrent quelques grains et filonnets d'oxydes et hydroxydes de fer.

II.2.2. Les roches magmatiques

Elles sont représentées par des pegmatites à tourmaline. Les pegmatites à aspects leucocratiques apparaissent sous forme de lentilles métriques recoupant les gneiss à l'Est de la zone d'étude.

II.2.3. Les roches sédimentaires

Le Quaternaire est caractérisé par des formations alluvionnaires occupant:

- les plaines de Tacha qui sont constituées par des sols limono-argileux et vaseux (au Nord-Ouest),
- la basse vallée d'Oued El Aneb et ses affluents, constituée par des limons, sables, galets et argiles,
- le lac Fetzara constitué de dépôts lacustres de type limoneux et argiles rouges,
- les argiles proviennent de l'altération des gneiss, des schistes, micaschistes et des argiles sous numidiennes.

II.2.4. La tectonique

La région de Berrahal forme une structure antiforme dont l'axe est sensiblement orienté NW-SE (N140°).

Les pendages des plans de schistosité-foliation varient en général de 5° à 40° où les plus forts caractérisent le flanc sud du secteur. Cela révèle la présence d'un épisode tectono-métamorphique (Caby R. et Hammor D., 1992), qui correspond à un cisaillement ductile synmétamorphique délimitant deux unités tectoniquement superposées : l'unité de base gneissique et l'unité supérieure schisteuse.

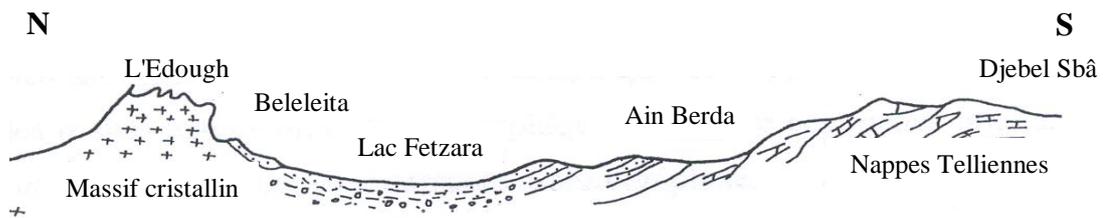
Dans la région de Berrahal se produisent des déformations souples à différentes échelles, donnant ainsi des fractures et des cassures de différents types.

Les plis plurimétriques à kilométriques sont des ondulations dont les directions sont sensiblement parallèles à la direction de la structure antiforme NW-SE.

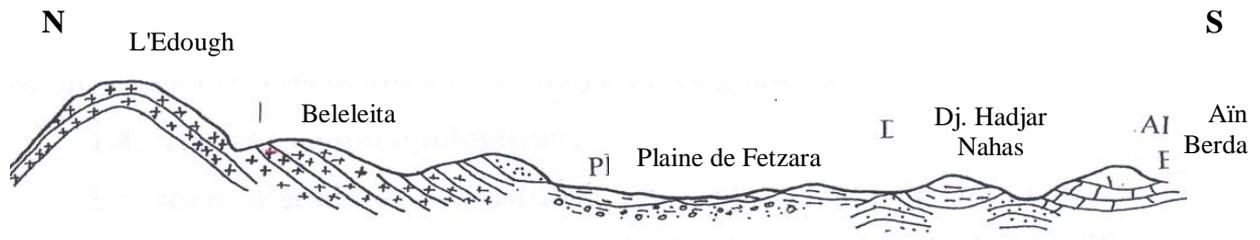
Les déformations cassantes sont de deux types :

- Un réseau de failles conjuguées décrochantes verticales à subverticales et de direction générale NW-SE (N320° à N330°) et NE-SW (N50° à N60°).
- Le deuxième type est représenté par d'importants accidents chevauchants, à pendage très faible. Ces derniers accidents sont vraisemblablement plus anciens que les déformations du premier type (Henni B. et *al.*, 2000).

a/ D'après J.M. Villa (1980) :



b/ D'après L. Joleaud (1936) :



Légende :

- Gneiss et micaschistes
- Grés numidien
- Nappe Telliene (marnes, marnocalcaire)
- Quaternaire
 - Graviers, galets
 - Argiles, sables
 - Graviers, sables



Echelle :

Echelle horizontale : 1/200000

Echelle verticale : 1/65000

Fig. 8 : Coupes géologiques entre le massif de l'Edough et Aïn Berda

Conclusion :

Le massif de l'Edough est un vaste anticlinal métamorphique constitué essentiellement par des gneiss ceinturés par des micaschistes. Les gneiss occupent la partie centrale du massif. Les micaschistes sont plus abondants et occupent les zones périphériques du massif de l'Edough.

Les accidents tectoniques connus dans le massif de l'Edough permettent de déceler deux familles:

- ☞ Une première famille, dont l'orientation est Nord Ouest - Sud Est. La direction la plus fréquente de ces accidents varie de N 120° E à N 150°E.
- ☞ La seconde famille, qui semble être conjuguée à la première, est dirigée NNE-SSW et la direction fréquente N28E en moyenne.

Outre le système de failles conjuguées NW-SE et NE-SW, la phase tectonique est également responsable de la formation des fractures d'extension secondaires.

La région de Berrahal qui forme la retombée Sud de l'Edough comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives et sédimentaires.

Les formations de bordure sont constituées de gneiss, de schistes, de micaschistes, de cipolins, de calcaires métamorphiques et de formations gréso-argileuses. Elles sont relativement de faible potentialité hydraulique mais constituent des zones d'alimentations pour les nappes.

Les formations sédimentaires correspondent à un ensemble de formations potentiellement aquifères. Elles sont caractérisées par des sédiments alluvionnaires du Quaternaire.

Chapitre III

ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE

III.1. Introduction

L'infiltration des eaux de précipitation représente l'alimentation principale des différentes nappes présentes dans la zone d'étude.

Pour identifier et localiser les systèmes aquifères de la région et établir des coupes hydrogéologiques, on s'intéressera aux colonnes stratigraphiques de trois forages existant dans cette région (**Fig. 9**), on définira les relations qui existent entre les différentes nappes.

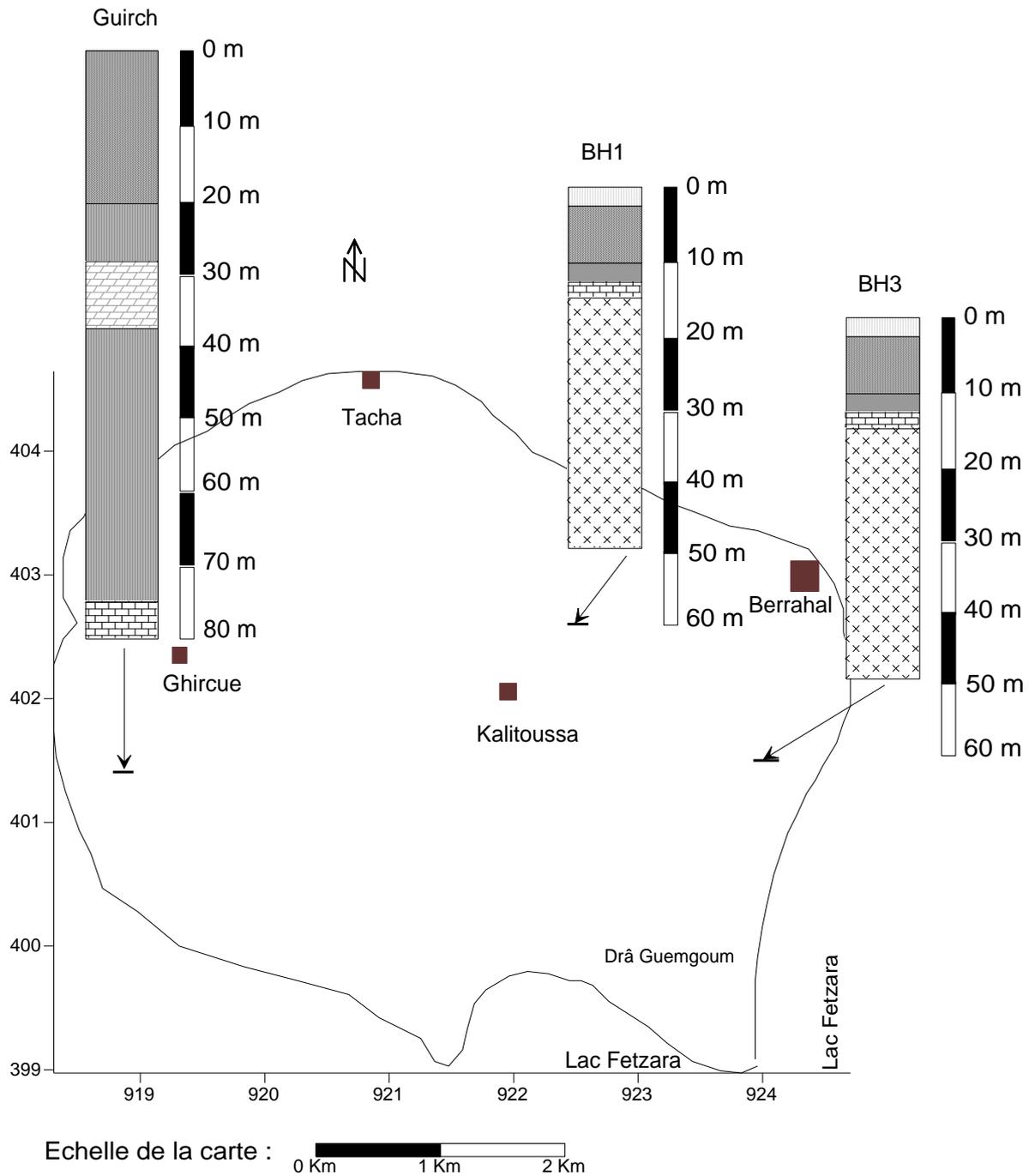
Néanmoins, il est difficile de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères car lors de la réalisation de ces forages aucun pompage d'essai n'a été réalisé. Pour remédier à cette lacune, on s'intéressera à la lithologie des formations recoupées par les trois forages, ainsi que les valeurs des paramètres hydrodynamiques (transmissivité, coefficient d'emmagasinement et perméabilité) calculés précédemment à proximité de la zone d'étude et qui caractérisent les mêmes formations aquifères, pour en dégager les caractéristiques physiques moyennes.

III.2. Délimitation des aquifères

Les conditions géostratigraphiques de la région sont favorables à l'accumulation des eaux souterraines. Les dépôts perméables localisés dans les plaines, ainsi que les affleurements des roches fissurées signalés sur les collines et les massifs montagneux, favorisent l'infiltration des précipitations atmosphériques et l'alimentation des aquifères superficiels et profonds qui provient du tell Nord Guelmien dans la partie Sud du lac Fetzara et du massif de l'Edough pour la partie Nord de la région.

A partir des colonnes stratigraphiques des forages implantés dans la plaine de Berrahal (BH1, BH3 et Ghirch), on peut déterminer deux principales nappes (**Fig. 9 et 10**) :

- ❖ La nappe libre constituée par des sables fins et graviers, d'une épaisseur qui ne dépasse pas 10 m dans la partie Est de la zone d'étude, elle atteint 20 m dans la partie Ouest (Douar de Guirch), Son alimentation s'effectue à partir des précipitations, qui constituent la principale source. Elle couvre toute la plaine de Berrahal. La nappe superficielle est fortement exploitée par des forages (forages des entreprises de la zone industrielle) et surtout par des puits des agglomérations de la région.
- ❖ La nappe semi-captive des cipolins, elle se localise au niveau des calcaires métamorphiques fissurés, elle est séparée par la nappe libre par une mince couche d'argile graveleuse (3 m) qui constitue le toit dans la partie Est de la zone d'étude. Elle a une épaisseur de l'ordre de 2 m, donc elle se trouve à une profondeur faible de l'ordre de 13 m, les formations de gneiss et de micaschistes constituent le substratum de cet aquifère. Dans la partie Ouest de la zone d'étude cette nappe devient franchement captive, la colonne stratigraphique est un peu différente, elle est localisée à une grande profondeur (75 m), d'une épaisseur de l'ordre de 5 m, séparée de la nappe libre par des épaisses couches de schistes et calcaires schisteux qui constituent le toit (58 m d'épaisseur). Le substratum n'est pas atteint lors de réalisation du forage (forage Guirch). La partie Ouest de cette nappe est moins exploitée que celle de la partie Est et de la nappe libre à cause de sa grande profondeur.



Legende :

- | | | | |
|--|-----------------------------|--|------------------------------------|
| | Terres végétales | | Gneiss et micaschistes |
| | Sables fins et graviers | | Schistes avec passage de calcaires |
| | Argile graveleuse | | Calcaire schisteux |
| | Cipolin et calcaire fissuré | | |

Fig. 9 : Inventaire des forages et colonnes stratigraphiques à travers la région de Berrahal

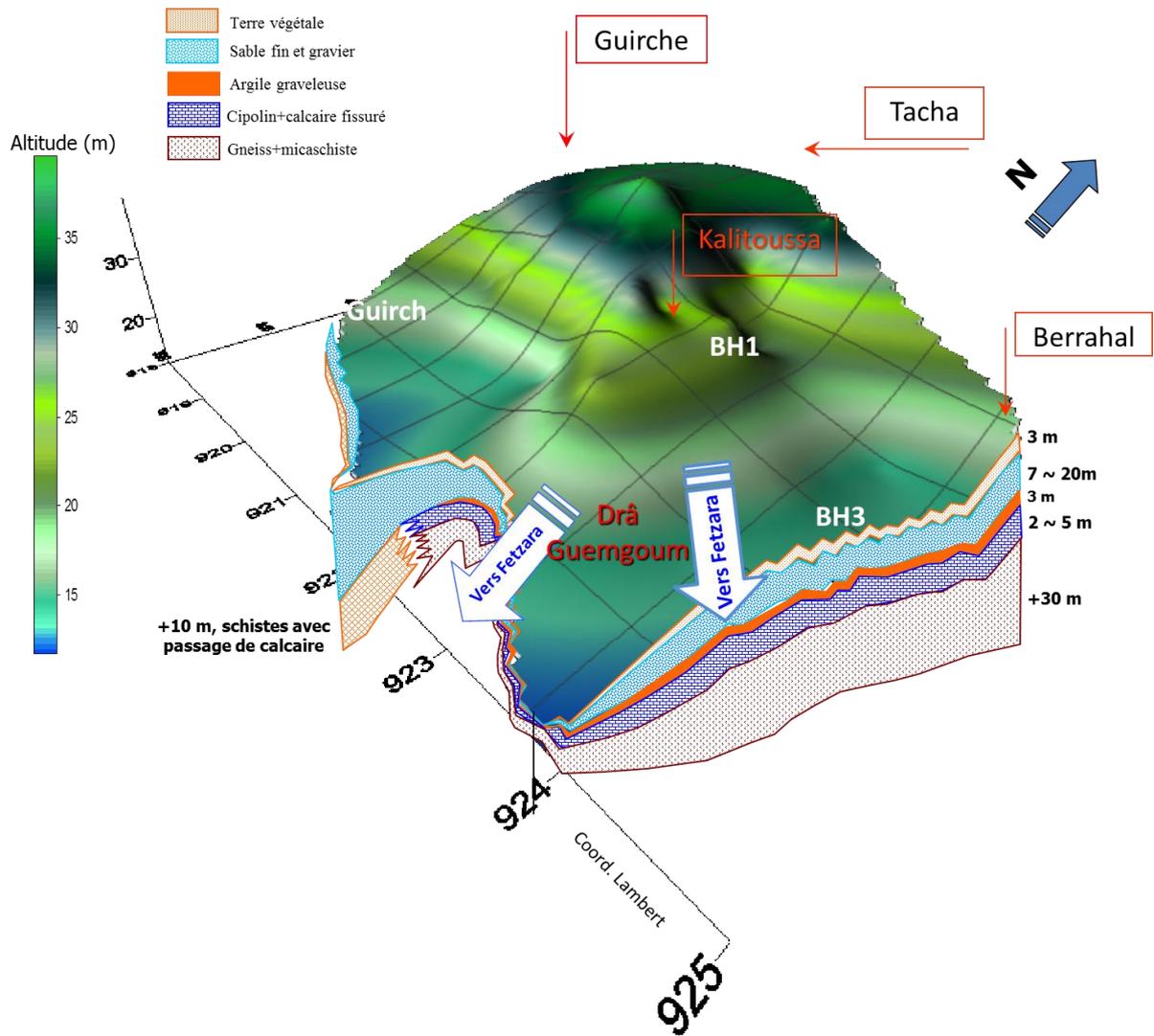


Fig. 10 : Bloc diagramme montrant les horizons aquifères de la partie Est de la zone d'étude

III.3. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères

Les trois forages implantés dans la zone d'étude ont les caractéristiques suivantes (**Tab. 2**) :

Tableau 2 - Caractéristiques des forages implantés dans la région de Berrahal

Forages	Coord. LAMBERT		Z (m)	Diamètre (mm)	Débit exploitable (l/s)
	X (m)	Y (m)			
BH1	922500	402600	20	305	10
BH3	924000	401500	20	305	10
Guirch	918850	401425	24	305	10

A titre comparatif (insuffisance de données dans la zone d'étude), les tableaux 3 et 4 représentent les principales caractéristiques hydrodynamiques des aquifères similaires dans la grande plaine d'Annaba.

Tableau 3 - Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine d'Annaba

Aquifères	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emménagement
Nappe des sables et graviers	10 ⁻³	10 ⁻³ à 10 ⁻⁵	10 ⁻²
Nappe des cipolins	5.10 ⁻³ à 5.10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

Tableau 4 - Paramètres hydrodynamiques de quelques points situés dans la nappe libre des sables et graviers à l'Est du lac Fetzara (d'après Zénati, 1999)

Nappe libre des sables et graviers	Coordonnées (Lambert en m)		Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)
	X	Y		
	935600	395400	14*10 ⁻³	/
	930200	403650	0,17*10 ⁻³	/
	929600	392700	1,3*10 ⁻³	/
	946000	405800	/	8,5*10 ⁻⁴
	949000	401100	/	14*10 ⁻⁴
	950250	402900	/	12,6*10 ⁻⁴

III.4. Mesure de la piézométrie

L'étude de la circulation des eaux souterraines est basée sur l'analyse de la surface piézométrique. La carte piézométrique permet de déterminer la profondeur de la nappe, le sens et la vitesse d'écoulement, le gradient hydraulique ainsi que les zones d'alimentation et d'accumulation des eaux souterraines.

Sept cartes piézométriques en différentes périodes ont été tracées depuis l'année 2006 jusqu'à 2010, afin de caractériser l'écoulement des eaux souterraines dans la nappe superficielle et suivre l'évolution de la piézométrie dans la zone d'étude, les sept campagnes sont réparties sur les mois suivants :

- Mois de novembre 2006. (basses eaux)
- Mois de janvier 2007.
- Mois de mars 2007. } (hautes eaux)
- Mois de mai 2007. }
- Mois de septembre 2009. (basses eaux)
- Mois de janvier 2010. (hautes eaux)
- Mois de mai 2010. (hautes eaux)

L'observation des sept cartes réalisées montre qu'elles présentent les mêmes allures, le sens global de l'écoulement des eaux souterraines aboutit à l'alimentation du lac Fetzara au Sud et au Sud-Est et à un degré moindre, du Nord de la zone d'étude vers la plaine de Tacha.

Au cours des mois de basses eaux en novembre et septembre, la surface piézométrique atteint son niveau le plus bas. Après un été sec et une faible précipitation au début de la saison d'automne, la nappe superficielle est surexploitée par un grand nombre de puits domestiques et quelques forages de la zone industrielle, parfois des puits sont à sec au niveau de Kalitoussa. Ensuite, on remarque une remontée progressive de la piézométrie au cours des mois de hautes eaux en janvier, mars et mai (**Fig. 11-12-13-14-15-16 et 17**).

L'allure générale des courbes isopièzes des sept cartes piézométriques montre que la nappe suit le modèle topographique. La morphologie de la surface piézométrique indique des zones d'alimentation au Nord-Est (massif de l'Edough) et à l'Ouest de la plaine (Ouest de Guirch). Une ligne de partage des eaux s'individualise sur les sept piézométries, elle s'étend de l'Ouest de Guirch jusqu'au Sud-Est de Kalitoussa (**Fig. 11-12-13-14-15-16 et 17**).

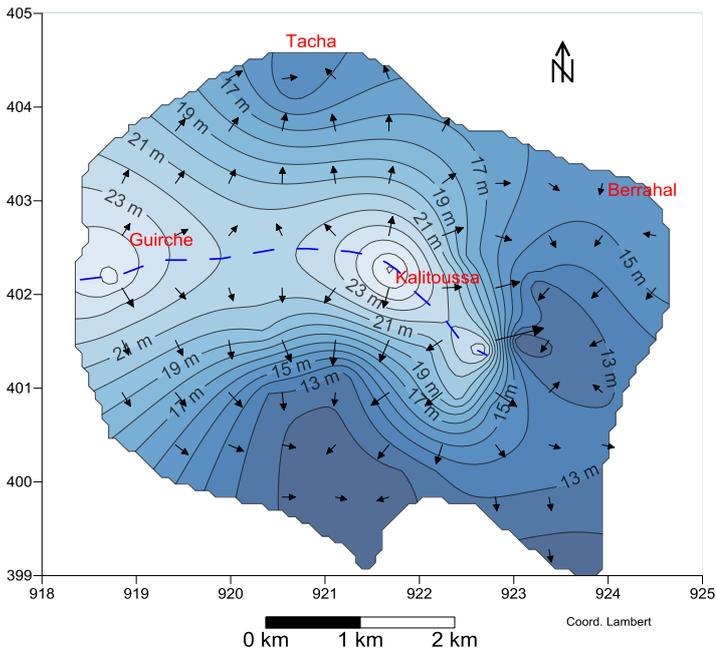


Fig. 11 : Piézométrie du mois de novembre 2006

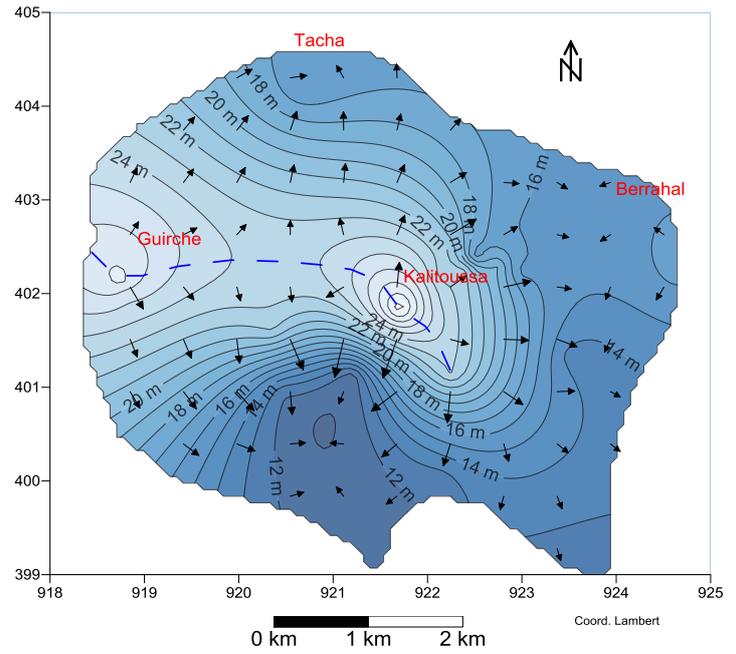


Fig. 12 : Piézométrie du mois de janvier 2007

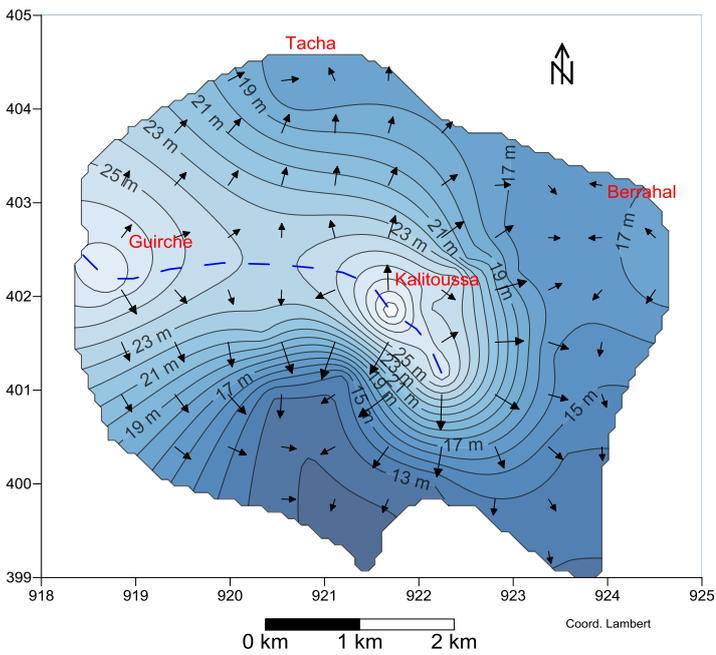


Fig. 13 : Piézométrie du mois de mars 2007

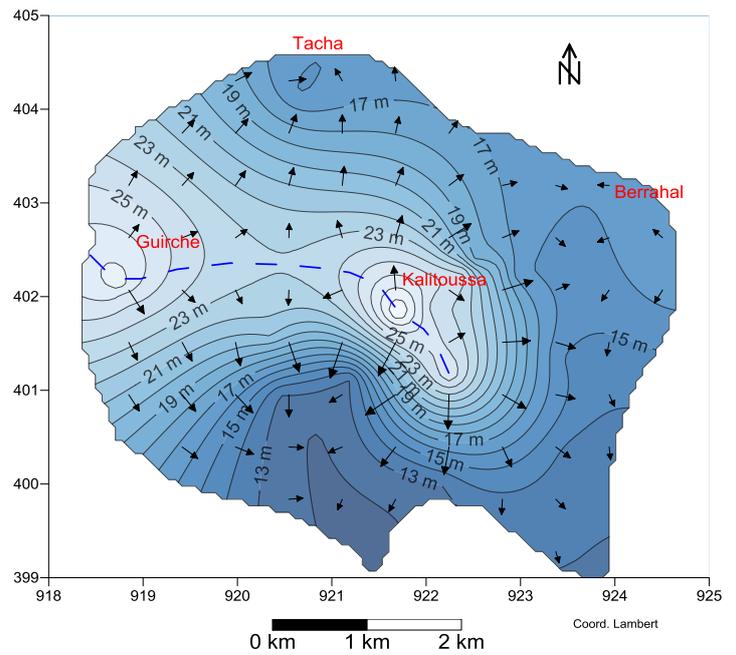


Fig. 14 : Piézométrie du mois de mai 2007

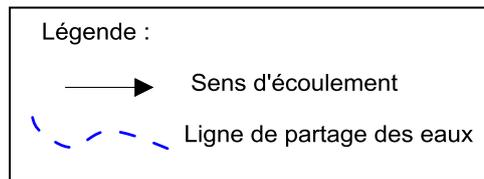
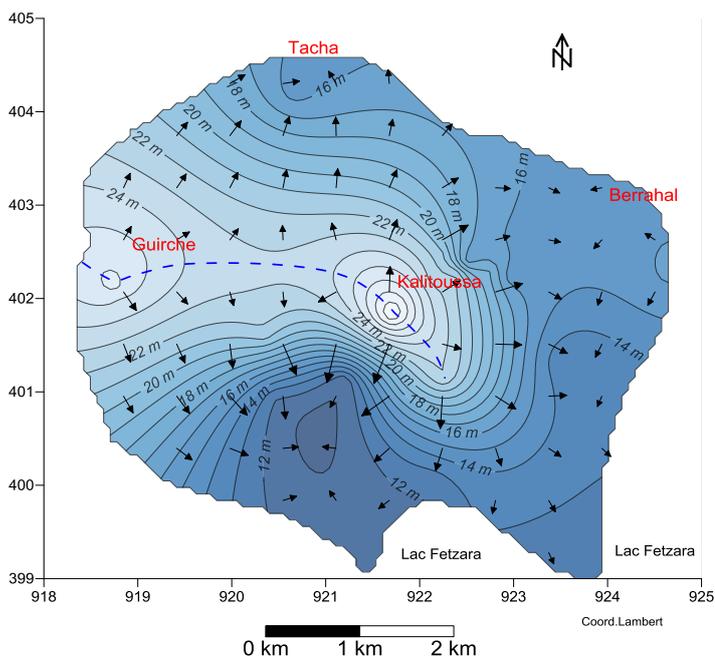


Fig. 15 : Piézométrie du mois de septembre 2009

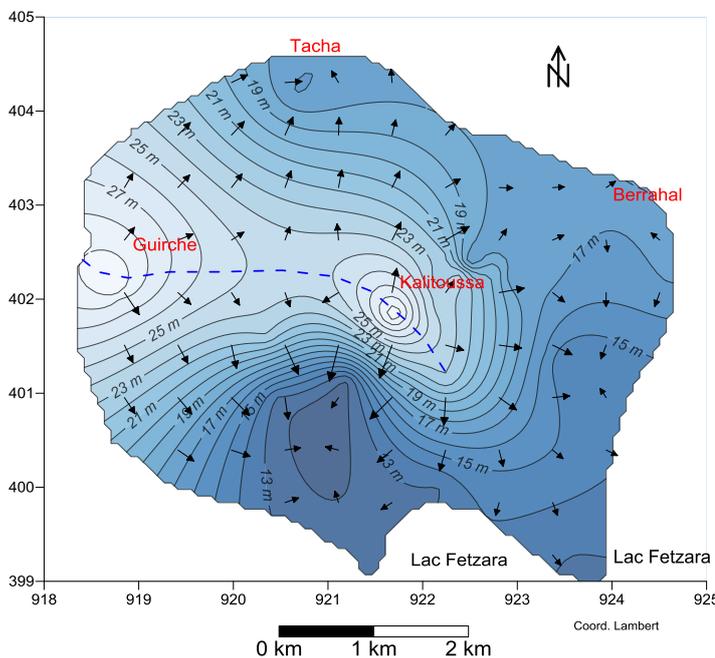


Fig. 16 : Piézométrie du mois de janvier 2010

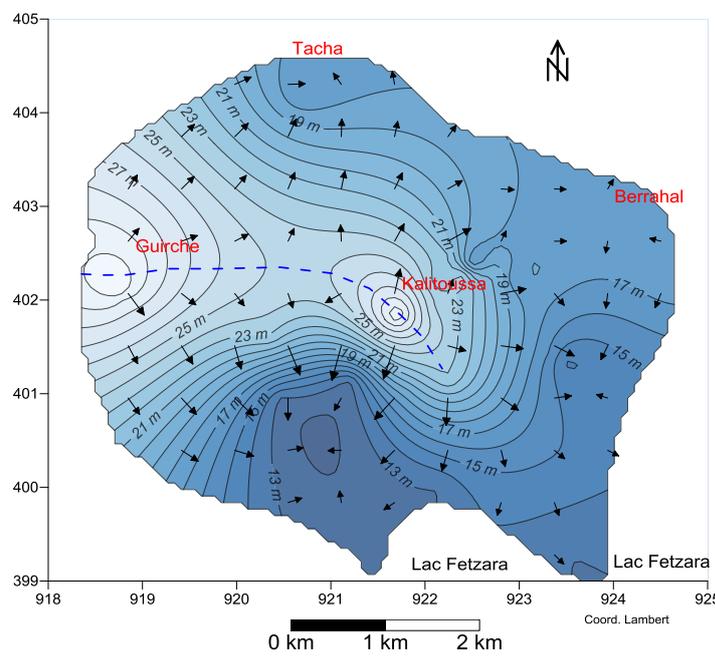


Fig.17 : Piézométrie du mois de mai 2010

Le sens global d'écoulement des eaux souterraines se fait :

- ☞ Du Nord vers le Sud dans la partie Est des cartes (ville de Berrahal), le lac Fetzara constitue donc le point d'accumulation de l'ensemble des eaux souterraines.
- ☞ Du Sud vers le Nord, au Nord de la ligne de partage des eaux et selon la nature topographique de la région, il y a une dépression qui se dessine au niveau de Douar Tacha.
- ☞ Du Nord vers le Sud, au Sud de la ligne de partage des eaux, l'écoulement est dirigé vers le lac Fetzara.
- ☞ Du Nord-Ouest vers le Sud-Est, au niveau de Drâa Guemgoum (Sud-Est de Kalitoussa), les eaux souterraines arrivent à s'accumuler au niveau du lac Fetzara.

III.4.1. Evolution de la piézométrie

L'alimentation de la nappe se fait principalement par les infiltrations dues aux précipitations ($I=129.75$ mm, estimé par la formule du bilan hydrique, chapitre IV).

Nous remarquons que les faibles pluies (**Tab. 12**) durant la saison d'été (21.8 mm) et d'automne (182.6 mm), ne contribuent guère à l'augmentation du niveau piézométrique, puisque ce dernier continu à baisser durant les mois de novembre 2006 et septembre 2009 (périodes de basses eaux) en raison des forts pompages. L'amplitude est la plus basse par rapport aux autres campagnes (**Fig. 11 et 15**).

Le niveau piézométrique atteint son maximum aux mois de janvier, mars et mai 2007, ainsi qu'aux mois de janvier et mai 2010, qui correspondent aux périodes de hautes eaux à cause des importantes précipitations, la nappe est sursaturée et le niveau piézométrique augmente de plus d'un mètre dans la plupart des puits et coïncide souvent avec la surface topographique de la région (**Fig. 12, 13, 14, 16 et 17**).

III.4.2. Gradient hydraulique

Il est calculé d'après la formule suivante :

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

Tel que : i : gradient hydraulique.

h_1 : la charge en amont (m).

h_2 : la charge en aval (m).

L : distance entre h_1 et h_2 (m).

D'après la morphologie des cartes piézométriques, l'espacement des courbes isopièzes varie d'une région à l'autre. Cette variation est fonction de l'écoulement et donc du gradient hydraulique. Compte tenu de l'allure des courbes piézométriques presque identique dans toutes les cartes établies, on s'intéressera à une seule carte piézométrique, celle du mois de mai pour le calcul du gradient hydraulique (**Fig. 18**).

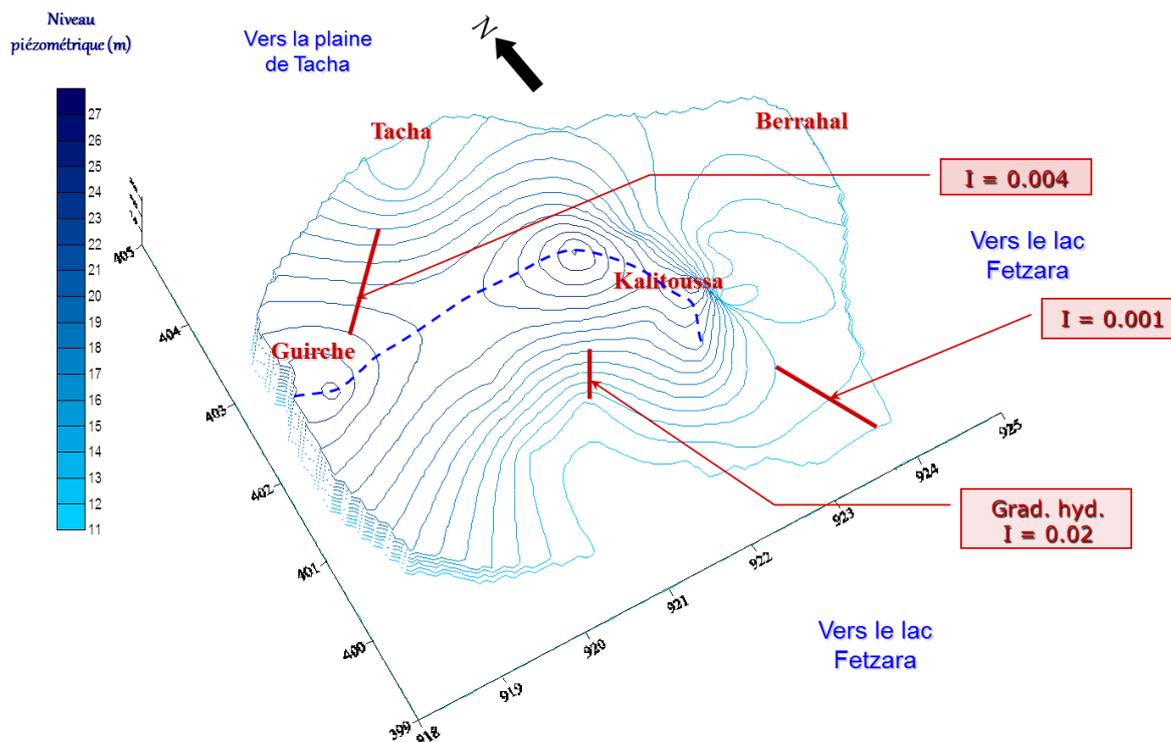


Fig. 18 : Mesures de gradient hydraulique

La comparaison entre les gradients hydrauliques de différentes régions montre que les piémonts des collines sont caractérisés par de fortes valeurs, qui sont de l'ordre de 0.02, les courbes isopièzes sont très serrées, c'est au niveau de l'Est, du Sud et du Sud-Ouest de Kalitoussa, que ces zones occupent le piémont d'une petite colline à pente faible.

La plaine par contre est caractérisée par de faibles valeurs de l'ordre de 0.001 et les courbes isopièzes sont justement plus espacées à l'extrême Sud-Est (lac Fetzara).

Ainsi, on note que la partie Nord (Guirch et le Sud de Tacha) est caractérisée par un gradient hydraulique relativement faible de l'ordre de 0.004 (Tab. 5).

Tableau 5 - Mesure du gradient hydraulique d'après la piézométrie du mois de mai 2007

Points de mesure			Sud-Ouest de Kalitoussa	Guirch et Sud de Tacha	Sud-Est (en contact avec le lac Fetzara)
Coord. Lambert (en m)	Point de départ	X	921602	919683	923257
		Y	401677	403040	400110
	Point d'arrivée	X	921207	920533	923770
		Y	401164	404050	399310
h_1 (m)			27	23	14
h_2 (m)			14	17	13
L (m)			620	1285	938
Gradient hydraulique			0.02	0.004	0.001

Conclusion :

Selon les colonnes stratigraphiques des forages implantés dans la région de Berrahal, on peut distinguer deux nappes aquifères différentes, l'une superficielle (libre) formée de sable fin et gravier d'une épaisseur de l'ordre de 10 m, l'autre profonde constituée de cipolins et calcaires fissurés, semi-captive à l'Est de la zone d'étude à une profondeur de l'ordre de 13 m. Cette dernière devient captive à l'Ouest, localisée à une profondeur allant jusqu'à 75 m et présente une faible épaisseur de 3 à 5 m. L'infiltration représente la principale source d'alimentation de ces aquifères. En l'absence de pompage d'essai, le calcul des paramètres hydrodynamiques semble impossible. Il existe cependant de grande ressemblance avec les aquifères de la plaine d'Annaba où des informations sur les caractéristiques hydrodynamiques sont disponibles.

L'observation des cartes piézométriques réalisées montre une même allure, le sens global de l'écoulement des eaux souterraines aboutit à l'alimentation du lac Fetzara au Sud et au Sud Est et à un degré moindre, le Nord de la zone d'étude (dépression de Tacha).

Les piémonts des collines sont caractérisés par les fortes valeurs du gradient hydraulique, ce dernier est fort au Sud, à l'Est et au Sud-Ouest de Kalitoussa, il est faible au Sud-Est (lac Fetzara) et à Guirch, Tacha et Berrahal.

Chapitre IV

**CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET
CLIMATIQUES**

IV.1. Introduction

L'étude de l'écoulement des eaux de surface permet de connaître leurs régimes de circulation et représente le premier véhicule d'éléments polluants. L'écoulement superficiel demeure un facteur très marquant de l'étude d'une éventuelle pollution, car la disponibilité potentielle de l'eau est étroitement liée à son réseau hydrographique et au comportement hydrologique d'un cours d'eau ou au régime pluvial.

Ce chapitre se penche sur l'étude du fonctionnement du réseau hydrographique et le comportement du système d'écoulement au sein du bassin versant.

Les conditions climatiques (précipitations, température, évapotranspiration) ainsi que d'autres facteurs (lithologie, morphologie, couvert végétal....etc.) jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eaux. Mais, contrairement aux paramètres proprement physiques qui permettent une interprétation seulement qualitative du comportement hydrologique des bassins, les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large. Ces conditions climatiques jouent un rôle capital car elles permettent de :

- Déterminer les influences des facteurs climatiques sur la vie des hommes est leurs activités, précisément l'agriculture,
- Dégager les risques qui engendrent en partie des contraintes tels que l'érosion, les inondations et les glissements de terrain,
- Quantifier les ressources en eau de surface et de déterminer la part de l'eau qui s'infiltré pour constituer les réserves souterraines,
- Déterminer les périodes biologiquement favorables pour le développement de la végétation ainsi que le choix des types de culture, la période de semence et d'irrigation.

Il est nécessaire aussi d'établir le bilan hydrique qui permet d'évaluer la répartition des précipitations entre les différentes composantes du bilan à savoir l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation.

IV.2. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

IV.2.1. Le bassin versant (BV) côtier Constantinois

Le bassin hydrographique «*Côtier Constantinois*» est situé dans le littoral Nord de l'Est Algérien, limité au Nord par la Méditerranée, à l'Est par la frontière Tunisienne, à l'Ouest par le bassin Algérois-Hodna-Soummam et au Sud par les bassins Kébir Rhumel, Seybouse, Medjerda. Il couvre une superficie totale de 11509 Km² (A.N.R.H, 2000).

Le bassin s'étend sur dix wilayas et 131 communes (**Fig. 19**).

Il contient :

- Le bassin Côtiers Constantinois Ouest.
- Le bassin Côtiers Constantinois Centre où se localise le sous bassin versant du lac Fetzara (**Fig. 20**).
- Le bassin Côtier Constantinois Est.

La pluviométrie varie entre 650 mm à l'amont du bassin et 1800 mm sur les monts de Collo-Jijel qui constituent la zone la plus arrosée de l'Algérie.

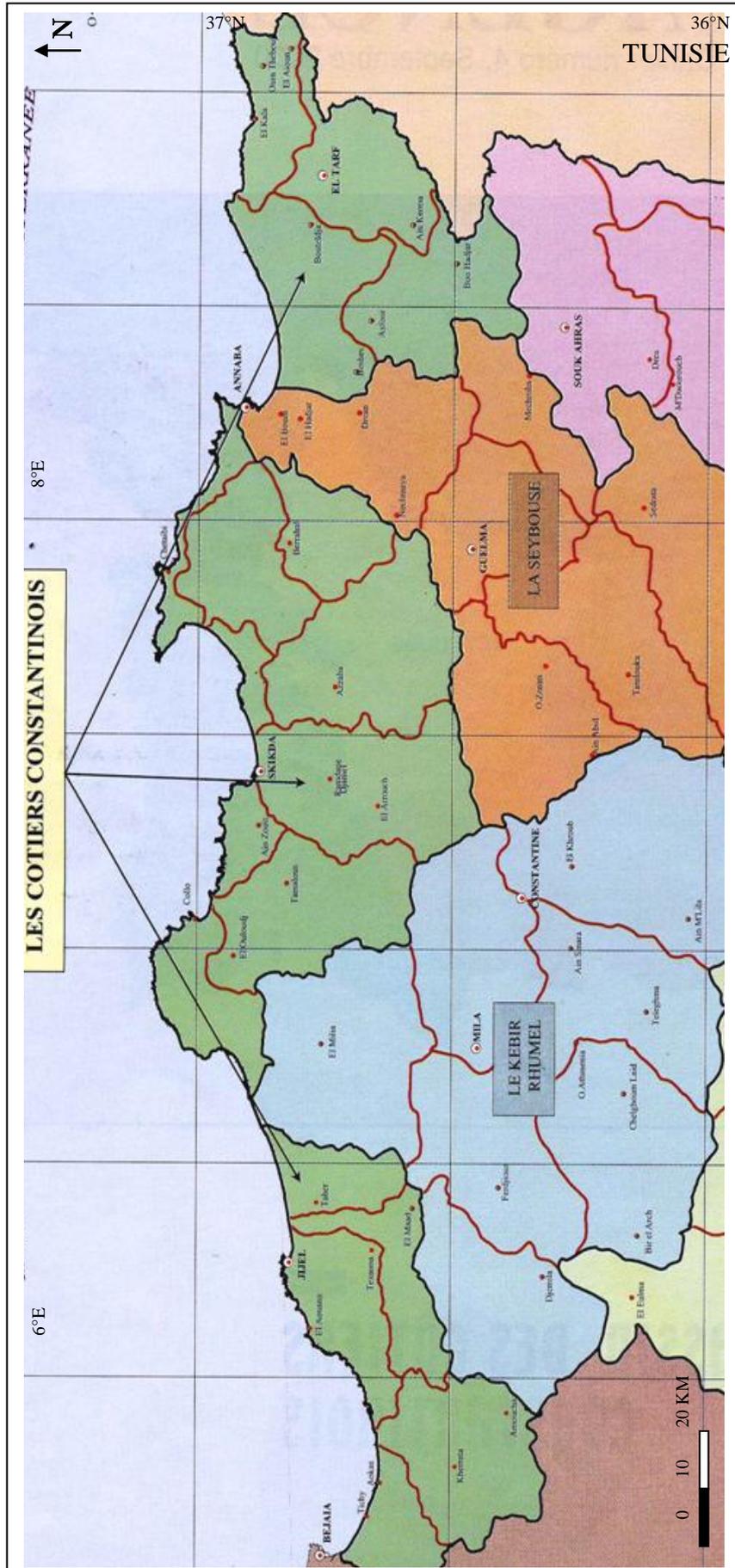


Fig. 19 : Bassin versant des Côtiers Constantinois

IV.2.1.1. Potentialité en eau de surface et souterraine

Les ressources potentielles de chacun des sous bassins sont données dans le tableau suivant :

Tableau 6 – Potentialité en eau de surface du bassin Côtier Constantinois

Bassins versants	Ressources potentielles superficielles (selon P.N.E.)* en hm³/an	Ressources potentielles souterraines (selon P.N.E.)* en hm³/an
Côtier Ouest	574,55	13,4
Côtier Centre	324,16	32,5
Côtier Est	393,25	57,8
Total	1291,96	103,7

(*) P.N.E. : Plan National de l'Eau (2000)

IV.2.1.2. Caractéristiques du bassin Côtier Constantinois Centre

- **Superficie** : 5582 Km², soit 48.5% de la superficie totale du bassin Côtier Constantinois.
- **Agriculture** : irrigation mixte, traditionnelle et moderne, cultures maraîchères, céréales et arboriculture.
- **Industrie** : concentrée autour des principales agglomérations; Skikda (Sonatrach), Azzaba, Berrahal...
- **Pluviométrie** : les précipitations varient en moyenne de 650 mm à 1800 mm, pour l'ensemble du bassin. Il existe 17 stations pluviométriques et 5 stations hydrométriques suivies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).
- **Hydrographie** : il présente un chevelu hydrographique dense totalisant un réseau de plus de 4200 Km et compte plus de 44 oueds principaux (**Fig. 20**).

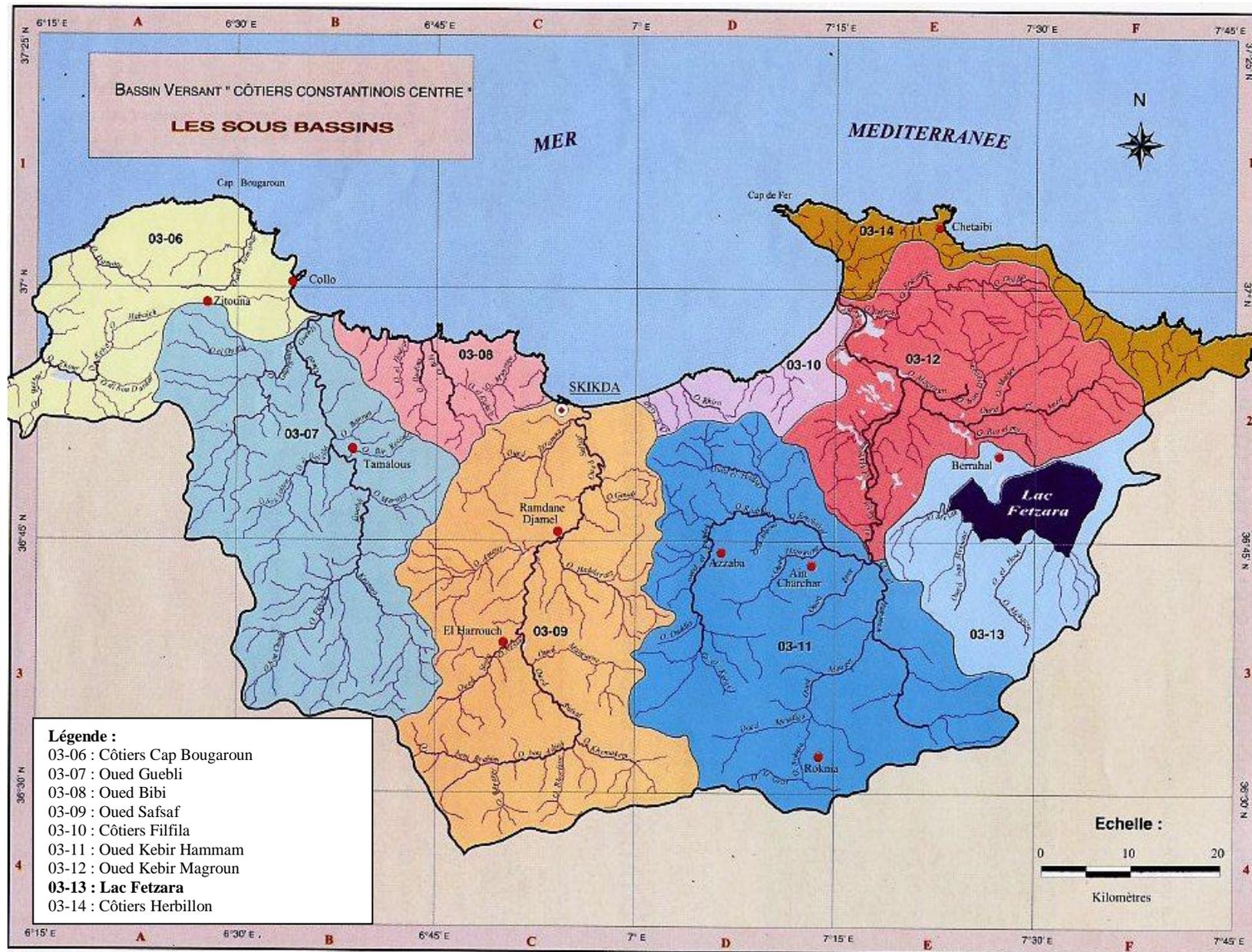


Fig. 20 : Le bassin versant Côtiers Constantinois Centre et les limites de ses sous bassins

Tableau 7 - Tableau récapitulatif du bassin versant Côtiers Constantinois Centre.

<i>B.V Côtiers Constantinois Centre</i>		
Ressources souterraines	<i>Superficie (Km²)</i>	<i>Potentialités des nappes (hm³/an), (selon P.N.E, 2000) ⁽¹⁾</i>
	4962	32.5
Ressources superficielles (hm³/an), (selon P.N.E, 2000)	324.16	
Barrages	<i>Nombre</i>	<i>Capacité (hm³/an)</i>
	04	312
Retenues collinaires	<i>Nombre</i>	
	101	

(1) : P.N.E ; Plan Nationale de l'Eau.

La zone d'étude de Berrahal est localisée dans le sous bassin versant du lac Fetzara qui porte le numéro de cote **03 13** (Fig. 20).

IV.2.1.2.1. Caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara

Tableau 8 - Quelques caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara (d'après A.N.R.H, 2000)

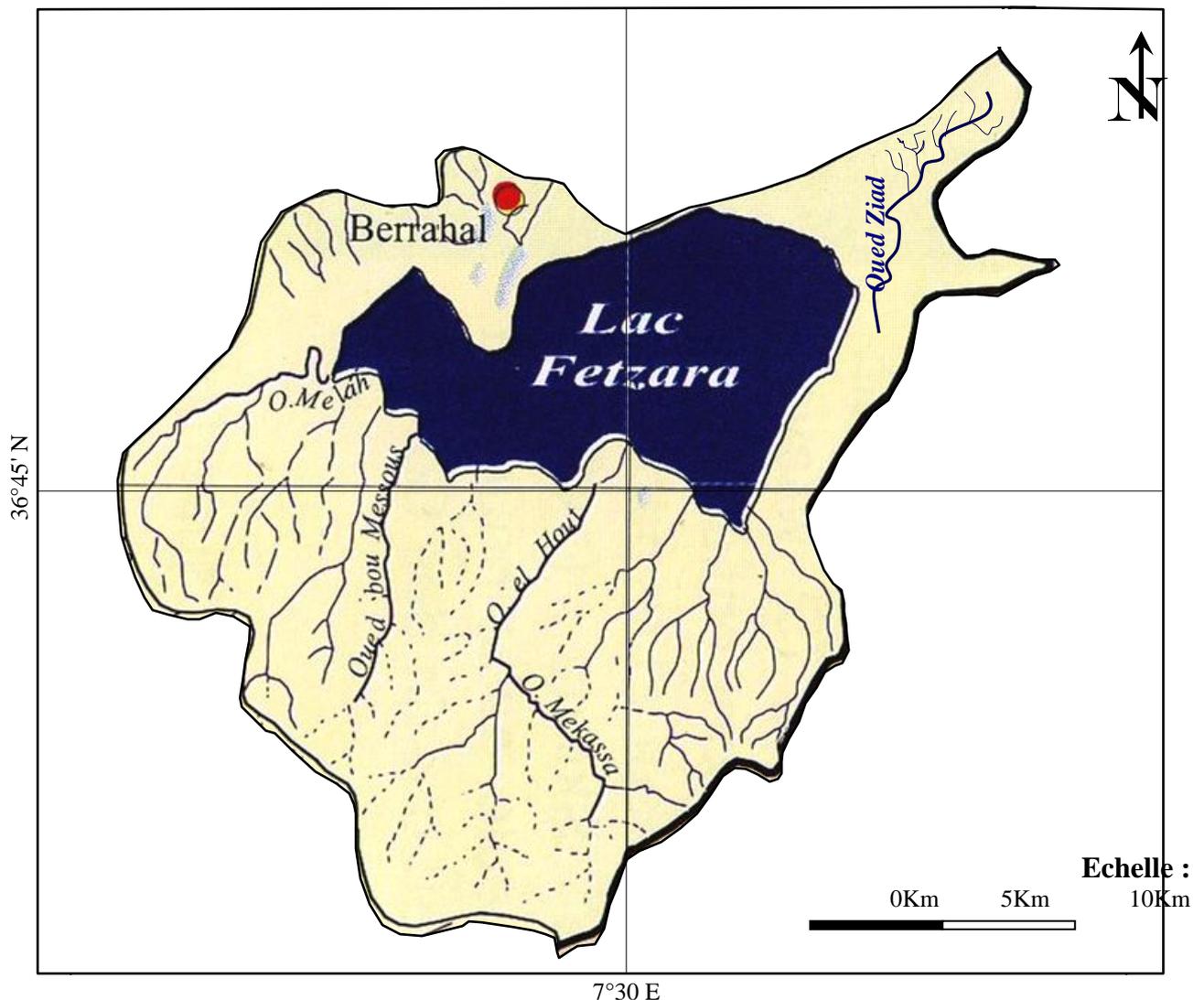
<i>Sous bassin versant du lac Fetzara</i>						
Numéro de côte		03 13				
Potentiel des nappes (en hm³/an), selon P.N.E		13.4				
Superficie (Km²)		515				
Retenues collinaires		<i>Nombre</i>	<i>Capacité (m³)</i>	<i>Destination</i>		
		31	2563000	irrigation		
Eau potable		<i>Nombre de réservoirs</i>		<i>Volume (m³)</i>		
		17		5920		
	Forages en exploitation			<i>Débit (l/s)</i>	<i>Profondeur (m)</i>	
		Drâa Errich		9	75	
		Berrahal 1		13	77	
		Berrahal 2		12	37	
		Guemgoum		6	90	
		Guirch		10	80	
	Alimentation en eaux potables des agglomérations	<i>Commune</i>	<i>N^{bre} de réservoirs</i>	<i>Volume des réservoirs (m³)</i>	<i>Longueur du réseau de distribution (m)</i>	<i>Dotation moyenne (l/j/hab)</i>
		Berrahal	8	4100	30742	115
		Berrahal	2	300	3694	39
		Berrahal	1	100	/	195
		El Eulma	3	560	12000	264
Cheurfa		3	860	11700	64	

Le réseau hydrographique du sous bassin est constitué de quatre oueds qui sont (Fig.21) :

- *Oued Mellah* : il prend sa source aux alentours de l'oued El Kebir Ouest, d'une longueur à peu près de 8 Km ; il draine une surface de 47 Km² et qui se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est en se rejoignant un canal d'assèchement au contact du lac fetzara.
- *Oued El Hout* : il aboutit à l'alimentation du lac Fetzara, avec une longueur de 10 Km, il s'écoule du Sud vers le Nord et draine une surface de 81 Km².
- *Oued Zied* : il prend sa source à Kef Sebâa, la direction de l'écoulement est du Nord vers le Sud-Ouest sur une longueur d'environ 10.5 Km, il draine une surface de 19 Km².
- *Oued Bou Messous* : il a une longueur de 9 Km, il s'écoule de Sud vers le Nord.

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

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



7°30', 36°45' :

Longitude, Latitude

Fig. 21 : Le réseau hydrographique du sous bassin versant du lac Fetzara

IV.3. Caractéristiques climatiques

IV.3.1. Cadre climatique

L'étude climatique est basée essentiellement sur l'analyse des précipitations et des températures.

Les données recueillies à la station des Salines (Annaba) et de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Constantine (A.N.R.H), sont sous forme de moyennes mensuelles et annuelles des hauteurs de pluie pour une période de 25 ans (1981-82/2005-06) et des moyennes mensuelles et annuelles des températures pour la même période. Les autres stations ne disposent pas des instruments de mesure de la température ou parfois, ils sont en arrêt (panne).

Ces données permettent d'estimer la répartition dans le temps et dans l'espace, ainsi que la quantité d'eau infiltrée et évaporée.

Pour cela, on a utilisé les données des deux stations qui sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 9 - Coordonnées géographiques des stations météorologiques.

Stations	Coordonnées Lambert (km)		Altitude (m)	N° de code
	X	Y		
Berrahal	923.35	405.56	33	031302
Les Salines	955.8	403.8	03	60360

IV.3.2. Analyse des précipitations

La précipitation est la quantité d'eau météorique, totale, liquide ou solide qui tombe sur une surface horizontale déterminée, appelée "section pluviométrique". La pluie est un facteur climatique très important conditionnant l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes.

La pluie augmente avec l'altitude, elle est également plus importante sur les versants exposés aux vents. Elle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des versants et de la mer.

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP). Ce paramètre est très important dans la détermination des années excédentaires et les années déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série à une station donnée.

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

Avec :

CP : coefficient pluviométrique.

P : hauteur des pluies annuelles (mm).

\bar{P} : moyenne annuelle pluviométrique (mm).

Le coefficient pluviométrique est en relation proportionnelle avec la pluviométrie (Tab. 10).

Nous avons deux cas : si $\left\{ \begin{array}{l} \text{année} \xrightarrow{\text{supérieure}} \text{normale} \quad \text{CP} > 1 \\ \text{année} \xrightarrow{\text{inférieure}} \text{normale} \quad \text{CP} < 1 \end{array} \right.$

Remarque : la pluviométrie annuelle moyenne (\bar{p}) de chaque station est :

- Station de Berrahal : $\bar{p} = 687.7$ mm
- Station des Salines : $\bar{p} = 686.3$ mm

Tableau 10 - Précipitations annuelles (mm) et coefficients pluviométriques des stations de Berrahal et des Salines (1981/82-2005/06).

Année hydrologique	Hauteur annuelle des précipitations, stat. de Berrahal P (mm)	Hauteur annuelle des précipitations, stat. des Saline P (mm)	Coefficient pluviométrique pour la Stat. de Berrahal	Coefficient pluviométrique pour la Stat. des Salines
1981/1982	833,7	760,4	1,24	1,11
1982/1983	634	678,1	0,65	0,99
1983/1984	756,2	937,8	1,12	1,37
1984/1985	879,1	927,0	1,16	1,35
1985/1986	573,9	543,0	0,85	0,79
1986/1987	847	909,3	1,26	1,32
1987/1988	519,6	491,0	0,77	0,72
1988/1989	454,7	557,0	0,67	0,81
1989/1990	473,7	535,0	0,70	0,78
1990/1991	704,9	689,3	1,05	1,00
1991/1992	687,9	684,6	1,02	1,00
1992/1993	660,6	644,1	0,98	0,94
1993/1994	650,6	519,7	0,95	0,76
1994/1995	547,6	548,3	0,81	0,80
1995/1996	757,6	807,0	1,12	1,18
1996/1997	632,4	422,8	0,94	0,62
1997/1998	749,5	941,0	1,11	1,37
1998/1999	748,1	841,0	1,11	1,23
1999/2000	622,9	559,6	0,92	0,82
2000/2001	605,1	550,7	0,90	0,80
2001/2002	503,5	460,3	0,75	0,67
2002/2003	937,7	842,1	1,39	1,23
2003/2004	754,5	708,0	1,11	1,03
2004/2005	1068,9	987,7	1,58	1,44
2005/2006	590,7	612,5	0,83	0,89

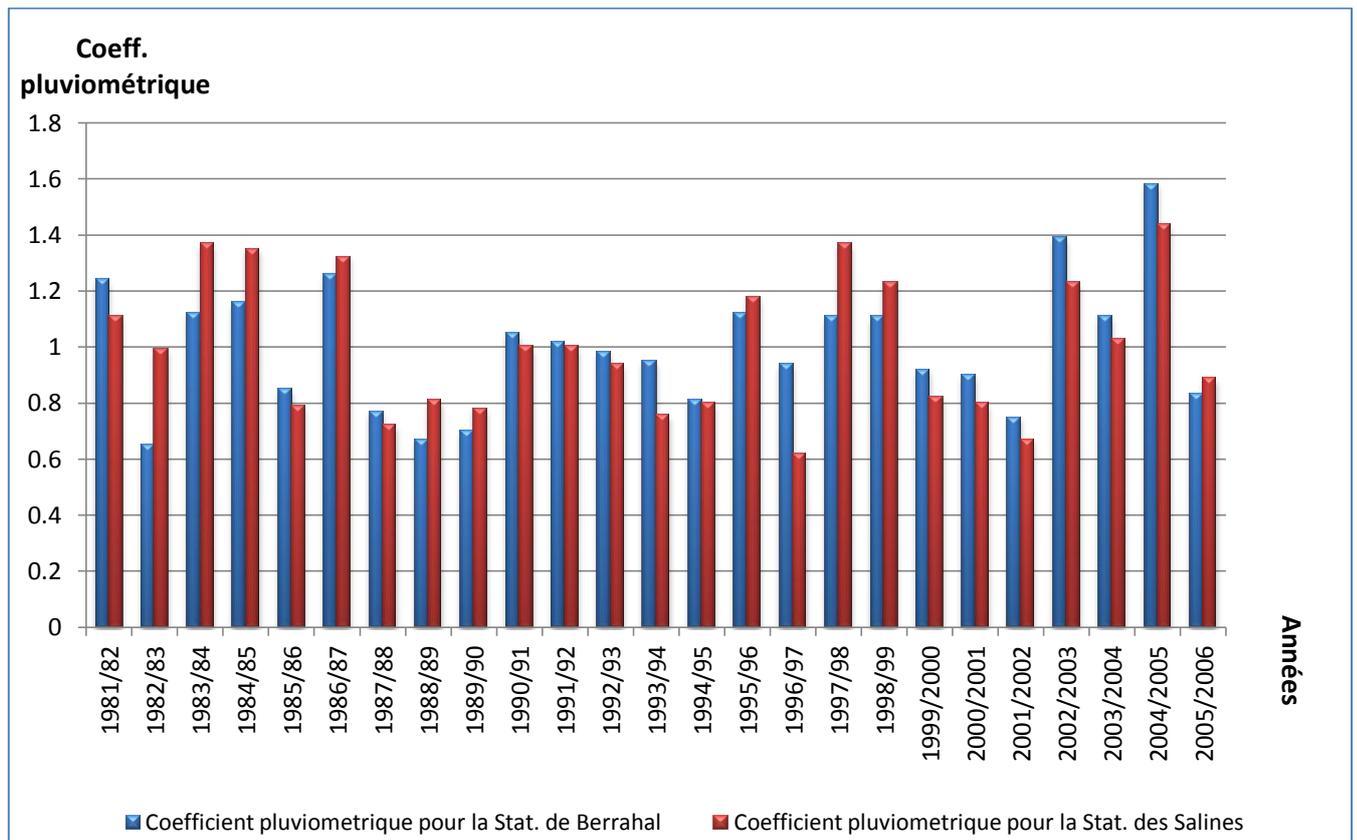


Fig. 22 : Les variations des coefficients pluviométriques pour les stations de Berrahal et des Salines (1981/1982-2005/2006)

D'après ce diagramme, on remarque que les années déficitaires communes pour les deux stations sont plus nombreuses que les années excédentaires (**Fig. 22**).

Les années déficitaires communes sont : 1982/1983, 1985/1986, 1987/1988, 1988/1989, 1989/1990, 1992/1993, 1993/1994, 1994/1995, 1996/1997, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002, 2005/2006.

Les années excédentaires communes entre les trois stations sont : 1981/1982, 1983/1984, 1984/1985, 1986/1987, 1990/1991, 1995/1996, 1997/1998, 1998/1999, 2002/2003, 2003/2004, 2004/2005.

IV.3.2.1. Variations des précipitations dans le temps

III.3.2.1.1. Variations annuelles

La pluviométrie la plus faible a été enregistrée au cours de l'année 1988/1989 pour la station de Berrahal qui est de l'ordre de 454.7 mm, pour la station des Salines c'est l'année 1996/1997 qui est la plus sèche avec un taux de 422.8 mm, (**Fig. 23**).

En outre la pluviométrie maximale a été enregistrée en 2004/2005 avec un taux de 1068.9 mm dans la station de Berrahal, et 987.7 mm à la station des Salines.

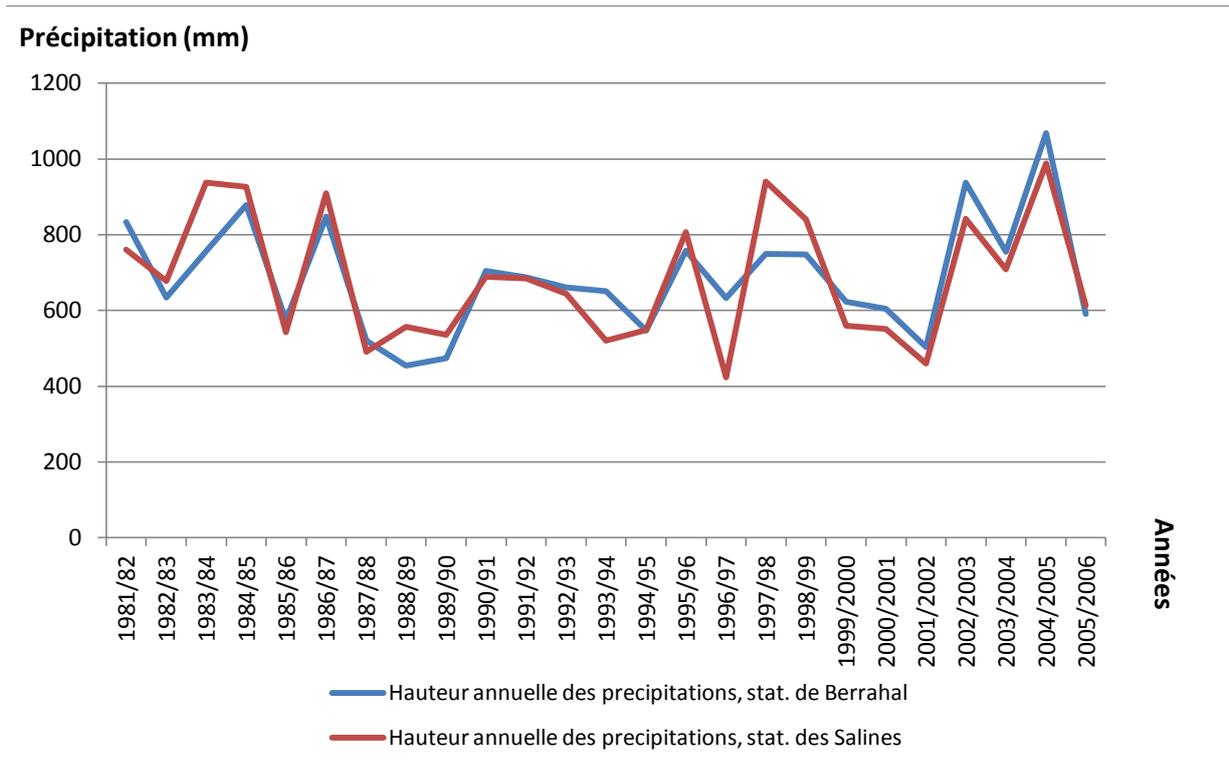


Fig. 23 : Variations des précipitations annuelles (en mm) pour les stations de Berrahal et les Salines (1981/1982-2005/2006)

IV.3.2.1.2. Variations moyennes mensuelles

Les données des précipitations moyennes mensuelles pour les deux stations (1981/1982-2005/2006) sont portées sur le tableau 11 :

Tableau 11 - Précipitations moyennes mensuelles (en mm), 1981/82-2005/06.

<i>Stations</i> <i>Mois</i>	Station de Berrahal	Station Les Salines
Septembre	30,1	36,37
Octobre	58	71,65
Novembre	94,5	88,12
Décembre	133,9	124,68
Janvier	111,4	105,35
Février	80,7	79,24
Mars	58,2	60,92
Avril	60,3	57,47
Mai	38,8	37,06
Juin	12	12,51
Juillet	3,5	2,37
Août	6,3	10,54

La distribution des précipitations moyennes mensuelles illustrée par la figure 24, montre que :

- Le mois le plus pluvieux est celui de décembre pour les deux stations, avec 133.9 mm pour la station de Berrahal, 124.68 mm pour la station des Salines.
- Le mois le plus sec est celui de juillet pour les deux stations, dont on a enregistré 3.5 mm pour la station de Berrahal, 2.37 mm pour la station des Salines.

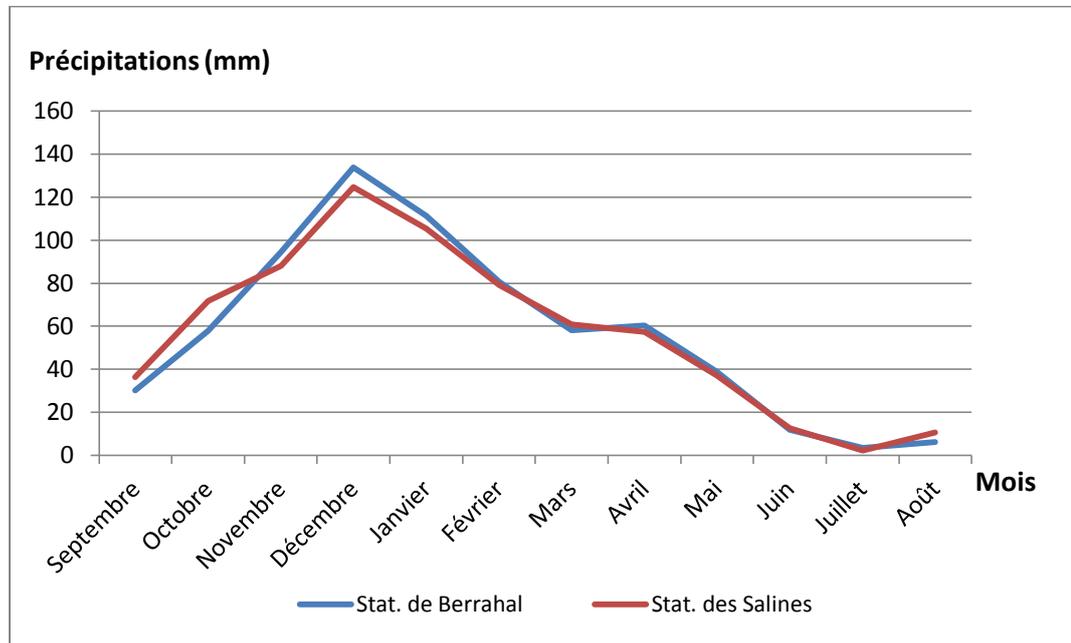


Fig. 24 : Variations des précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour les stations de Berrahal et des Salines (1981/1982-2005/2006)

IV.3.2.1.3. Variations des précipitations saisonnières

Les quatre saisons de l'année sont :

- L'automne (septembre, octobre et novembre).
- L'hiver (décembre, janvier et février).
- Le Printemps (mars, avril et mai).
- L'été (juin, juillet et août).

Les résultats du tableau 12 montrent que l'hiver est la saison la plus pluvieuse pour les deux stations : Berrahal et Les Salines, avec des taux variant entre 47.4 % et 45.06 % respectivement.

L'été correspond à la saison sèche avec des pourcentages variant entre 3.16 % et 3.7 % pour les stations de Berrahal et Les Salines respectivement.

L'automne est une saison légèrement pluvieuse, pour les deux stations.

Tableau 12 - précipitations moyennes saisonnières (en mm) pour les stations de Berrahal et les Salines (1981/1982-2005/2006).

Stations \ Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
	Berrahal	182.6 mm 26.55 %	326 mm 47.4 %	157.3 mm 22.87 %
Les Salines	196.14 mm 28.58 %	309.27 mm 45.06 %	155.45 mm 22.65 %	25.42 mm 3.7 %

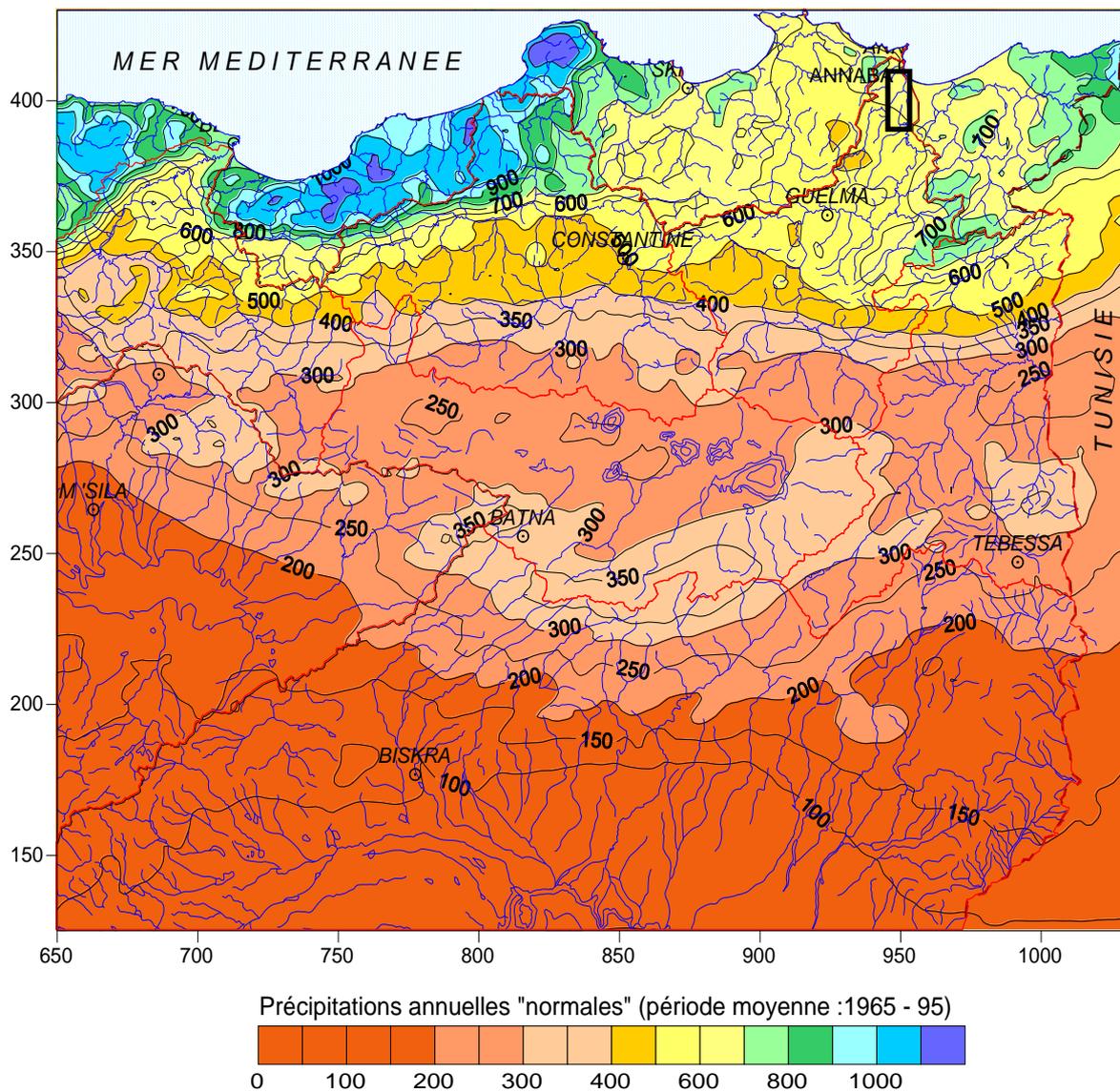


Fig. 25 : Précipitations annuelles médianes « normales » 1965-1995 (D'après ANRH, 2003)

Nous pouvons remarqués dans la figure 25, que la zone d'étude se situe dans une région de précipitation moyenne annuelle d'environ 600 mm (la plage jaune).

IV.3.3. Analyse des températures

Si les précipitations constituent l'apport en eau, les températures jouent un rôle important dans les pertes en eau par le phénomène de l'évapotranspiration. Elles constituent l'autre élément majeur conditionnant le climat d'une région.

Les températures permettent d'étudier l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement, elles interviennent dans le développement du rythme biologique des végétaux et facilitent l'établissement du bilan hydrique. Mais l'absence de données pour la station de Berrahal, impose l'utilisation des données de température de la station des Salines (seule station possédant une série complète) et cela pour une période d'observation de 25 ans de 1981/1982 jusqu'à 2005/2006.

IV.3.3.1. Variations des températures dans le temps

IV.3.3.1.1. Variations moyennes mensuelles

Tableau 13 - Températures moyennes mensuelles à la station des Salines (1981/1982-2005/2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<i>Température en °C</i>	23,1	20,1	15,7	13,3	11,3	11,6	13,2	15,3	18,3	22	25,2	25,9

D'après ces résultats on remarque que :

- Les mois les plus chauds sont ceux de juillet et d'août avec des températures de 25.2 et 25,9 °C respectivement.
- Les mois les plus froids sont ceux de janvier et février avec des températures de 11.3 et 11.6 respectivement, (**Fig. 26**).

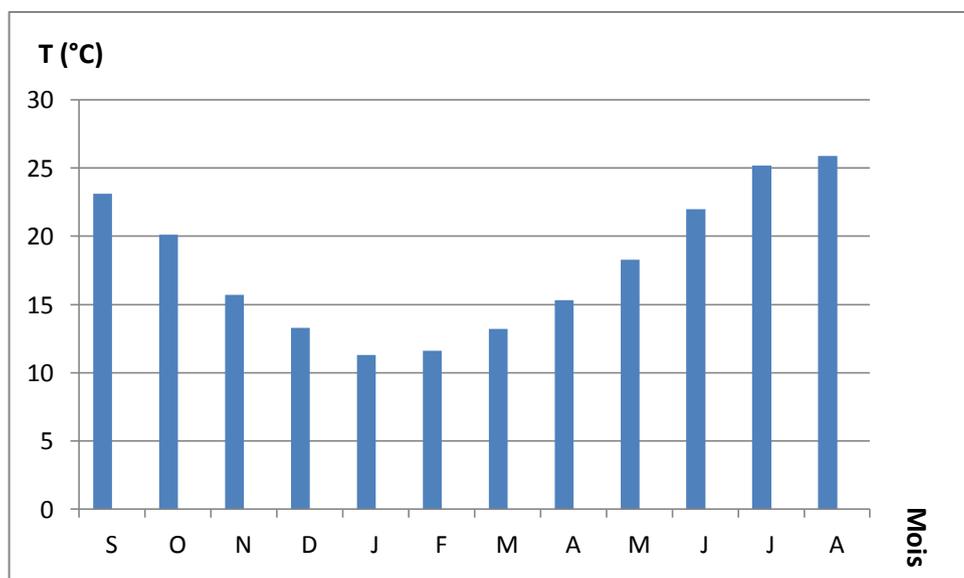


Fig. 26 : Variations des températures moyennes mensuelles (°C) pour la station des Salines (1981/1982-2005/2006)

IV.3.4. Diagrammes ombrothermiques

Comme il a été mentionné précédemment, le manque de données des températures à la station de Berrahal impose à utiliser les températures de la station des Salines pour le traçage des diagrammes ombrothermiques.

Pour la station des Salines (**Fig. 27**), le diagramme montre que la période sèche débute de la fin du mois du mai jusqu'à la fin du mois de septembre. La période humide commence de la fin du mois de septembre jusqu'au mois de mai.

Pour la station de Berrahal (**Fig. 28**), la période sèche débute de la fin du mois de mai et s'étend jusqu'au début du mois d'octobre, alors que la période humide commence du mois d'octobre jusqu'au mois de mai.

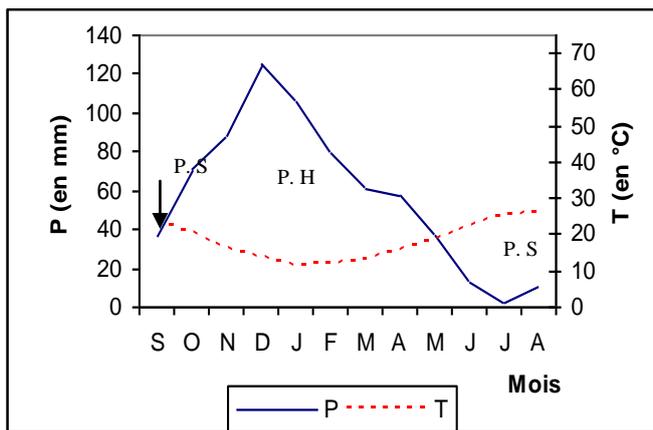


Fig. 27 : Digramme ombrothermique pour la station des Salines

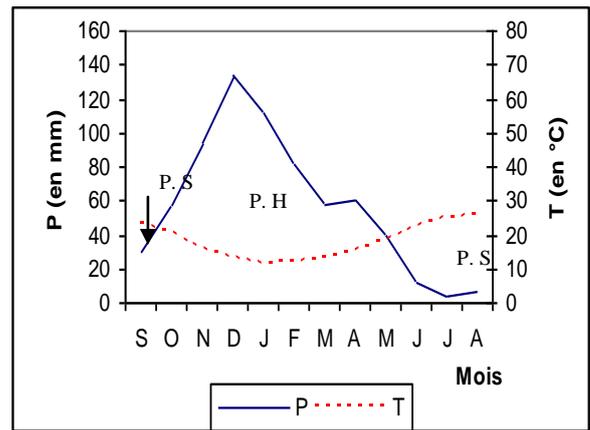


Fig. 28 : Digramme ombrothermique pour la station de Berrahal

P. H : période humide
P. S : période sèche.

IV.3.5. L'humidité

Nous disposons des valeurs moyennes mensuelles et annuelles de l'humidité relative de la station des Salines, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 74.65 %, sur une période d'observation de 25 ans (1981/1982-2005/2006). En général, les moyennes mensuelles ne descendent pas au-dessous de 70%.

On remarque que le mois le plus humide est celui de décembre avec une humidité de 77.32 % par contre, le mois le moins humide est celui de juin avec une valeur de 70.14 % (**Tab. 14**).

Tableau 14 - Variations des humidités relatives moyennes mensuelles (en %) de la station des Salines
(1981/1982-2005/2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<i>Humidités moyennes mensuelles (%)</i>	72,35	74,79	76,13	77,32	78,81	76,87	75,07	74,43	75,00	72,91	70,14	71,94

En ce qui concerne les variations moyennes annuelles (**Fig. 29**), on remarque que le maximum d'humidité est enregistré en 2004/2005 avec 77.75 % et le minimum en 1996/1997 avec un taux de 71 % (**Tab. 15**).

Tableau 15 - Variations des humidités relatives moyennes annuelles (en %) à la station des Salines
(1981/1982-2005/2006)

Année	Humidité relative (%)	Année	Humidité relative (%)
1981/1982	74,78	1994/95	73,25
1982/1983	72,49	1995/96	73,92
1983/1984	75,44	1996/97	71,00
1984/1985	76,92	1997/98	75,25
1985/1986	74,75	1998/99	74,33
1986/1987	73,58	1999/2000	73,92
1987/1988	72,50	2000/2001	73,33
1988/1989	72,50	2001/2002	74,08
1989/1990	75,83	2002/2003	74,67
1990/1991	76,42	2003/2004	76,53
1991/1992	76,00	2004/2005	77,75
1992/1993	77,50	2005/2006	75,67
1993/1994	73,75		

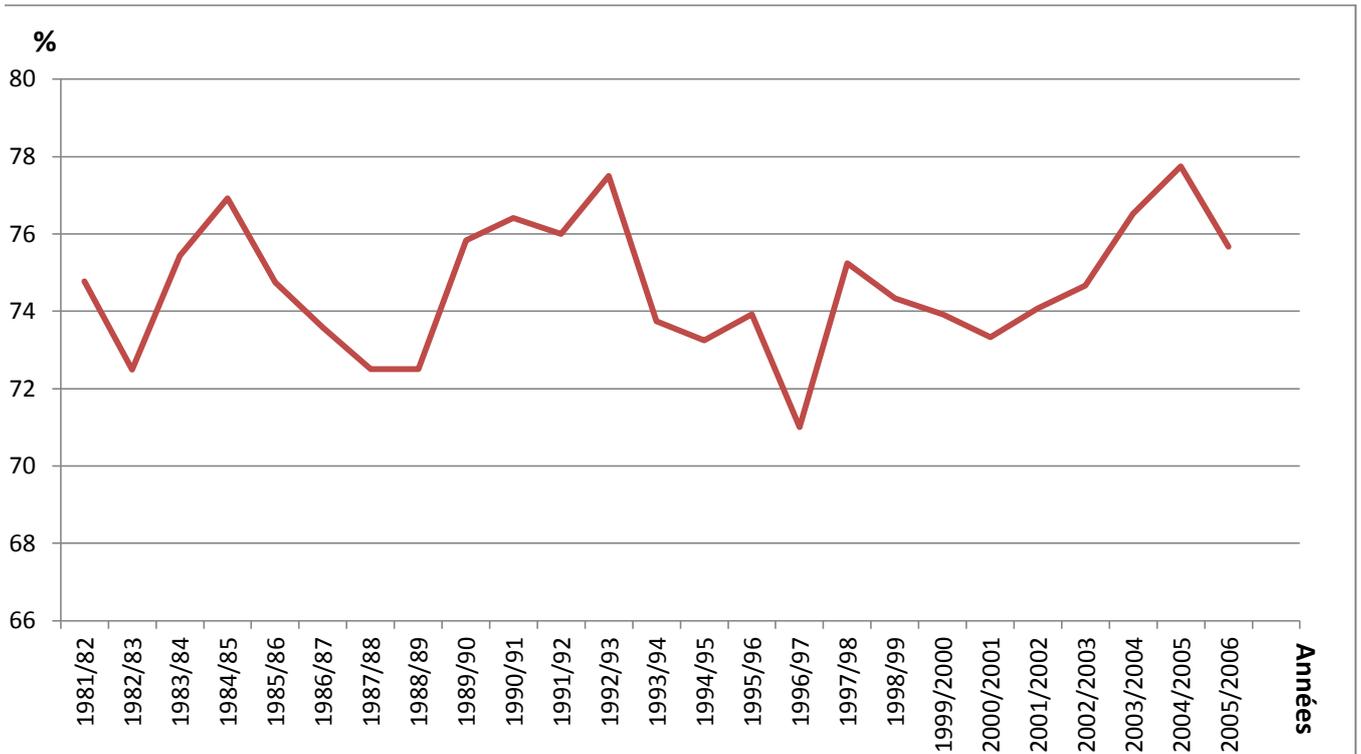


Fig 29 : Variations des humidités relatives moyennes annuelles (en %) à la station des Salines (1981/1982-2005/2006)

IV.3.6. Détermination du type du climat (Indice de Martonne E. De)

Pour la détermination du type de climat Martonne E. De (1925-1927) a proposé une formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles :

$$A = P / (T + 10)$$

Avec :

- A : Indice d'aridité annuelle
- P : Précipitations moyennes annuelles en mm.
- T : Températures moyennes annuelles en mm.

Selon Martonne E. De :

- $A < 5$: le climat est hyper aride.
- $5 < A < 10$: le climat est très sec.
- $10 < A < 20$: le climat est sec.
- $20 < A < 30$: le climat est tempère.
- $A > 30$: le climat est humide (écoulement abondant).

Pour notre cas :

$$P = 687,77 \text{ mm (station de Berrahal)}$$

$$T = 17,9 \text{ °C (station des Salines)}$$

$$A = \frac{687,77}{(17,9 + 10)} = 24,65$$

Les résultats de l'indice d'aridité trouvés pour la zone d'étude montrent que le climat est du type tempéré caractérisé par deux saisons l'une humide et fraîche et l'autre sèche et chaude comme nous l'a montré la courbe ombrothermique.

IV.3.7. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique est l'étude comparée de la lame d'eau précipitée sur une surface donnée et des différentes formes de transfert de cette eau : soit par écoulement, infiltration ou évaporation.

L'équation du bilan s'écrit :
$$P = R + E + I$$

Tels que : P : précipitation moyenne annuelle (mm).

R : ruissellement de surface moyen annuel (mm).

E : évapotranspiration moyenne annuelle (mm).

I : infiltration moyenne annuelle (mm).

IV.3.7.1. Estimation des paramètres du bilan

IV.3.7.1.1. L'évaporation-évapotranspiration

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.

Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. On distingue :

☞ **Evapotranspiration potentielle (ETP)** (ou évapotranspiration de référence) : c'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

L'ETP est calculée par la formule de C.W. Thornthwaite (1948), qui utilise la température de l'air et la latitude de la station, et qui est donnée par l'expression suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a K$$

Avec ; ETP : évapotranspiration potentielle du mois (en mm).

T : température moyenne mensuelle de la période (en °C).

I : indice thermique annuel qui représente la somme des indices mensuels (i) :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{Avec : } i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.5}$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

K : coefficient d'ajustement mensuel lié à la latitude.

☞ **Evapotranspiration réelle (ETR)** : Elle correspond à la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique. L'ETR peut être déterminé par :

- La formule de Turc (1954); qui permet d'évaluer directement l'ETR annuelle à partir de la hauteur annuelle de la pluie et de la température moyenne annuelle :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec ; ETR : évapotranspiration réelle en mm/an.

P : hauteur annuelle de pluie en mm.

L : pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand. $L = 300 + 25t + 0.05t^3$

t : température annuelle en °C.

On a pour la station de Berrahal : P = 687.7 mm, t = 17.9 °C

Remarque : la température (t) utilisée pour les calculs et le bilan hydrique est celle de la station des Salines.

$$\implies L = 300 + 25(17.9) + 0.05(17.9)^3 = 1034.26$$

$$ETR = \frac{687.7}{\sqrt{0.9 + \frac{(687.7)^2}{(1034.26)^2}}} \implies \boxed{ETR = 593.86 \text{ mm}}$$

Pour la station des Salines : P = 686.28 mm, t = 17.9 °C

$$\implies ETR = \frac{686.28}{\sqrt{0.9 + \frac{(686.28)^2}{(1034.26)^2}}} \implies \boxed{ETR = 593.15 \text{ mm}}$$

- La méthode du bilan d'eau selon C.W. Thornthwaite (1955) ; qui est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), cette eau peut être reprise par l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. Pour notre cas la région de Berrahal on prend RFU = 100 mm.

La satisfaction de l'ETP est prioritaire sur l'écoulement, c'est-à-dire avant qu'il y ait écoulement il faut avoir satisfait ce qu'on appelle pouvoir évaporant (ETP = ETR), par ailleurs le remplissage de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement.

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle à partir de la pluie du mois, de l'ETP et de RFU. Les résultats sont montrés dans les tableaux 17 et 18.

IV.3.7.1.2. Le ruissellement

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau, qui au cours d'une précipitation, échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration.

Le ruissellement est calculé par :

- La formule de Tixerion-Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3} \times (ETP)^2 \quad \text{si } P < 600 \text{ mm}$$

Avec : R : ruissellent en m.

P : précipitation moyenne annuelle en m.

ETP : évapotranspiration potentielle en m.

- La formule de Tixerion-Berkaloff modifié par Romantchouk :

$$R = \frac{P^3}{3} \quad \text{si } P > 600 \text{ mm}$$

Avec :

R : ruissellent en m.

P : précipitation moyenne annuelle en m.

Et comme $P > 600$ mm, on va utiliser la deuxième formule :

Le ruissellement pour la station de Berrahal :

$$R = \frac{(0.6877)^3}{3} = 0.10841m \Rightarrow R = 108.41mm$$

Le ruissellement pour la station des Salines :

$$R = \frac{(0.6862)^3}{3} = 0.10774m \Rightarrow R = 107.74mm$$

IV.3.7.1.3. L'infiltration

Par la formule du bilan : $P = R + I + ETR$

Donc :

$$I = P - R - ETR$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau 16 :

Tableau 16 – Détermination des paramètres de la formule du bilan

Stations	P (mm)	R (mm)	ETR (mm)	I (mm)
Berrahal	687.7	108.41	449.54	129.75
Les Salines	686.28	107.74	471.34	107.2

Tableau 17 - Le bilan hydrique à la station de Berrahal d'après C. W. Thornthwaite (1955)

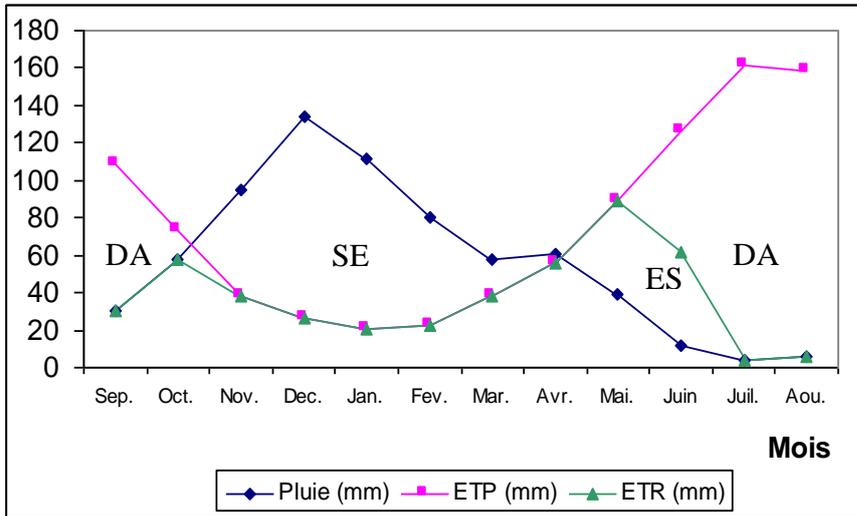
Mois Paramètres	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
Pluie (mm)	30,1	58	94,5	133,9	111,4	80,7	58,2	60,3	38,8	12	3,5	6,3	687,70
T (°C)	23,1	20,1	15,7	13,3	11,3	11,6	13,2	15,3	18,3	22	25,2	25,9	T_{moy}=17,91
I	9,93	8,06	5,56	4,33	3,39	3,53	4,28	5,35	7	9,22	11,31	11,78	83,74
K	1,05	0,91	0,75	0,7	0,73	0,78	1,02	1,15	1,32	1,33	1,33	1,24	
ETP (mm)	108,68	72,92	38,14	26,23	20,27	22,73	37,7	55,77	89	125,84	161,56	158,42	917,26
RFU (mm)	0	0	56,36	100	100	100	100	100	49,8	0	0	0	
ETR (mm)	30,1	58	38,14	26,23	20,27	22,73	37,7	55,77	89	61,8	3,5	6,3	449,54
Exc. (mm)	0	0	0	64,03	91,13	57,97	20,5	4,53	0	0	0	0	238,16
DA (mm)	78,58	14,92	0	0	0	0	0	0	0	64,04	158,06	152,12	467,72

Tableau 18 - Le bilan hydrique pour la station des Salines d'après C. W. Thornthwaite (1955)

Mois Paramètres	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
Pluie (mm)	36,37	71,65	88,12	124,68	105,35	79,24	60,92	57,47	37,06	12,51	2,37	10,54	686,28
T (°C)	23,1	20,1	15,7	13,3	11,3	11,6	13,2	15,3	18,3	22	25,2	25,9	T_{moy}=17,91
I	9,93	8,06	5,56	4,33	3,39	3,53	4,28	5,35	7	9,22	11,31	11,78	83,74
K	1,05	0,91	0,75	0,7	0,73	0,78	1,02	1,15	1,32	1,33	1,33	1,24	
ETP (mm)	108,68	72,92	38,14	26,23	20,27	22,73	37,7	55,77	89	125,84	161,56	158,42	917,26
RFU (mm)	0	0	49,98	100	100	100	100	100	48,06	0	0	0	
ETR (mm)	36,37	71,65	38,14	26,23	20,27	22,73	37,7	55,77	89	60,57	2,37	10,54	471,34
Exc (mm)	0	0	0	48,43	85,08	56,51	23,22	1,7	0	0	0	0	214,94
DA (mm)	72,31	1,27	0	0	0	0	0	0	0	65,27	159,19	147,88	445,92

III.3.7.2. Représentation graphique du bilan d'eau

Les figures 30 et 31 illustrent les résultats des tableaux ci-dessus. A titre d'exemple, l'observation de l'allure des courbes de la station de Berrahal (**Fig. 30**) montre que : l'évapotranspiration atteint son maximum au mois de juillet (161,56 mm), la même chose pour la station des Salines (**Fig. 31**), ce qui provoque un déficit agricole nécessitant une irrigation. A partir du mois d'octobre, on assiste à une reconstitution du stock qui devient important entraînant une RFU maximale (SE), et ceci jusqu'au mois d'avril où l'épuisement du stock commence.



Légende :

DA : déficit agricole

SE : surplus d'eau

ES : épuisement du stock

Fig. 30 : Bilan d'eau (Station de Berrahal 1981-2006)

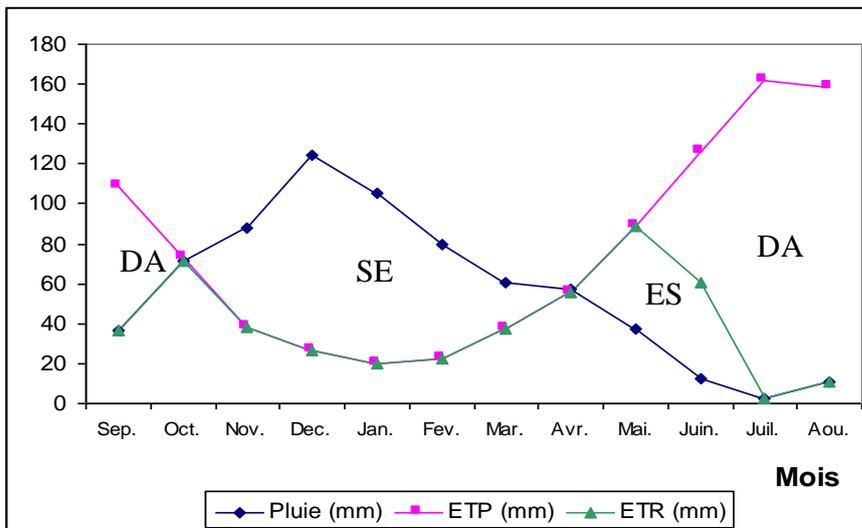


Fig. 31 : Bilan d'eau (Station des Salines 1981-2006)

Conclusion :

Le sous bassin versant du lac Fetzara qui fait partie des bassins Côtiers Constantinois centre, occupe une superficie de 515 Km², son réseau hydrographique est constitué de quatre oueds alimentant le lac Fetzara qui sont :

- * Oued Mellah : d'une longueur de près de 8 Km ; il draine une surface de 47 Km² et qui se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est en se reliant au canal d'assèchement au contact du lac Fetzara.
- * Oued El Hout : d'une longueur de 10 Km, il s'écoule du Sud vers le Nord et draine une surface de 81 Km².
- * Oued Zied : la direction de l'écoulement est du Nord vers le Sud-Ouest sur une longueur d'environ 10.5 Km. Il draine une surface de 19 Km².
- * Oued Bou Messous : il a une longueur de 9 Km et s'écoule du Sud vers le Nord.

Le climat de la région est du type méditerranéen avec une saison pluvieuse allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et une saison pratiquement sèche débutant de la fin du mois de mai et se termine au début du mois d'octobre.

Les valeurs de l'ETR obtenues par la méthode de C. W. Thornthwaite, montrent qu'une grande partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration (ETR = 449,54 mm), le déficit agricole est important (467,72 mm), alors que la recharge interannuelle est relativement faible.

Chapitre V

CARACTÉRISTIQUES PHYSICOCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES ET DU SOL

V.1. Introduction

L'eau douce est une ressource vitale. Elle peut être utilisée par l'agriculture, l'industrie ou les particuliers. La qualité de l'eau dans le milieu naturel se dégrade de manière continue, elle peut en effet être contaminée par des éléments provenant de rejets qui y sont déversés ou de polluants provenant de l'air ou des sols. Cette ressource précieuse qui est mal protégée est responsable à l'aggravation de plusieurs maladies ou d'épidémies. La pollution des eaux continentales (rivières, lacs, nappes phréatique) et des sols peut être due à diverses causes. Les sources de ces pollutions sont très diverses. Il peut s'agir de rejets ponctuels des stations d'épuration ou des industries (acides, phénols, cyanures, détergents, hydrocarbures), de rejets diffus de polluants dus à l'agriculture intensive (engrais, biocides, produits phyto-sanitaires), de décharges sauvages, etc. Les pollutions les plus importantes des sols et des eaux sont souvent des conséquences directes et locales des activités agricoles ou industrielles.

Dans ce chapitre, qui représente la partie essentielle de ce travail de recherche, on va examiner l'évolution de différents paramètres physiques et chimiques des eaux, des rejets, et du sol dans la région de Berrahal, on vient d'expliquer et de déterminer les différentes sources potentielles de la pollution, voir l'impact des rejets des entreprises de la zone industrielle de Berrahal, afin de mettre en cause les solutions adéquates pour l'élimination ou la limitation des sites pollués. A cet effet, on va diviser ce chapitre en deux parties, la première consiste à l'analyses physicochimiques des eaux souterraines et des rejets industriels liquides, par contre dans la deuxième partie, on s'intéressera aux analyses chimiques du sol de la région de Berrahal.

V.2. Analyses physicochimiques des eaux

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.). Dans la région de Berrahal, la chimie des eaux superficielles (lac Fetzara) et souterraines (nappe libre de sable fin et gravier et la nappe semi-captive des cipolins) sont souvent influencées par l'effet de la dissolution des formations géologiques, les rejets industriels et l'activité agricole dans la région (Djemai R., 1993, Zenati N. E., 1999, Belhamra A., 2001, Habès 2006,...). Et, en raison de l'utilisation multiple de ces eaux, cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans le temps, dans l'espace et en fonction de la variation des paramètres physicochimiques de l'eau. Malheureusement, les travaux sur l'impact de la zone industrielle de Berrahal sur la région sont très limités, d'où la nécessité d'une étude approfondie qui nous permet de mettre en évidence l'influence des rejets industriels et urbains ainsi que l'activité agricole sur l'hydrochimie des eaux des aquifères. Les résultats obtenus sont montrés sous formes de cartes de distribution spatiales et diagrammes pour les différents paramètres mesurés.

V.2.1. Echantillonnage, matériels et méthodes d'analyse

Un plan de travail a été adopté pour atteindre ces buts, il consiste au début à réaliser un suivi d'une campagne d'échantillonnage, pendant la période de septembre 2009, avec une analyse complète des paramètres physico-chimiques et quelques métaux lourds, à déterminer les différents apports anthropiques à caractère polluant dans la région, et analyser leur composition physico-chimique, pour expliquer l'origine et l'évolution de chaque élément.

A cet effet, 50 échantillons ont été prélevés dans différents endroits de la zone d'étude (**Tab. 19**), dont 26 échantillons caractérisent des puits domestiques qui captent la nappe libre de sable et gravier, 15 échantillons prélevés de forages et 9 échantillons de rejets liquides superficiels évacués de la zone industrielle de Berrahal (**Fig. 32**). Les échantillons ont été prélevés jusqu'à débordement dans des flacons en polyéthylène, rincés avec de l'eau distillée, puis avec l'eau à échantillonner puis bouchonnés. Pour l'analyse des métaux lourds on a ajouté quelques gouttes d'acide nitrique pour assurer une conservation dans un milieu acide, et immédiatement mis dans une glacière.

Tableau 19 - Points d'échantillonnage des eaux souterraines pour les analyses physicochimiques

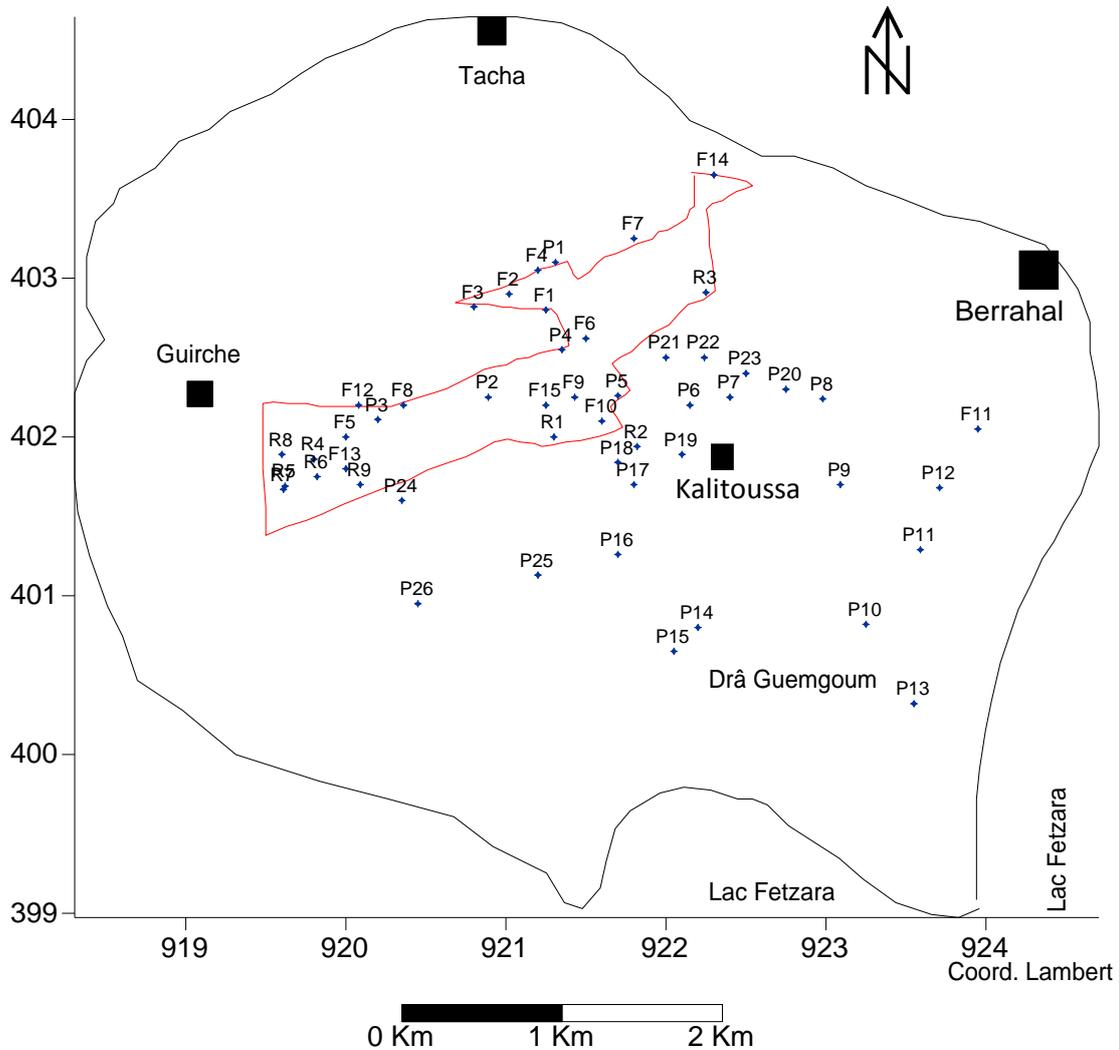
Points d'échantillonnage	Entreprises
P1	Sarl ESPAP TPS
P2	Sarl GESIBAT
P3	Eurl AZATIS
P4	IGROMED
P5	Spa Coprac
De P6 à P26	Puits domestiques
F1	Biscuit 7 épis
F2	Fabrication des produits d'isolation
F3	Fabrication du carrelage
F4	Sarl Mahbouba
F5	Savonnerie Nozha
F6	ENMTP
F7	Naftal
F8	El Annabia (huile d'olive)
F9	Carrelage Meraka
F10	Sarl moulin Beldi
F11	Forage Kalitoussa
F12	Eurl KIV
F13	Laiterie Fetzara
F14	Saba (pattes aliment.)
F15	Spa Protuil
R1	Rejet de Protuil
R2	Rejet de Protuil+moulin semoule Beldi
R3	Rejet Naftal
R4	Rejet savonnerie Nozha
R5	Rejet de Bona+El Annabia
R6	Rejet El Meida
R7	Rejet Nozha+Bona
R8	Rejet Bona
R9	Rejet Fetzara

P : puits, F : forage, R : rejet.

les analyses physicochimiques sont portées sur les 16 paramètres suivants : pH, conductivité électrique, DBO₅, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Pb, Fe total, Cu, Ni et Mn.

Le pH, température et conductivité électrique sont mesurés in situ à l'aide d'un multi-paramètre, les cations et anions majeurs sont dosés par titrage volumétrique, et les métaux

lourds ainsi que les nitrites, par un spectrophotomètre à absorption atomique avec flamme (PYE UNICAM, Philips) de laboratoire d'hydrogéologie de l'université de Constantine.



Légende :

-  La zone industrielle
-  Agglomérations urbaines

Fig. 32 : Carte d'inventaire des échantillons

Les résultats obtenus sont comparés aux normes de potabilité des eaux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2011), ainsi qu'aux normes Algériennes des valeurs limites admissibles des rejets liquides pour chaque type d'industrie décrite dans le journal officiel N° 26, 23 avril 2006 (**Tab. 20 et 21**).

Tableau 20 - Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable (2011)

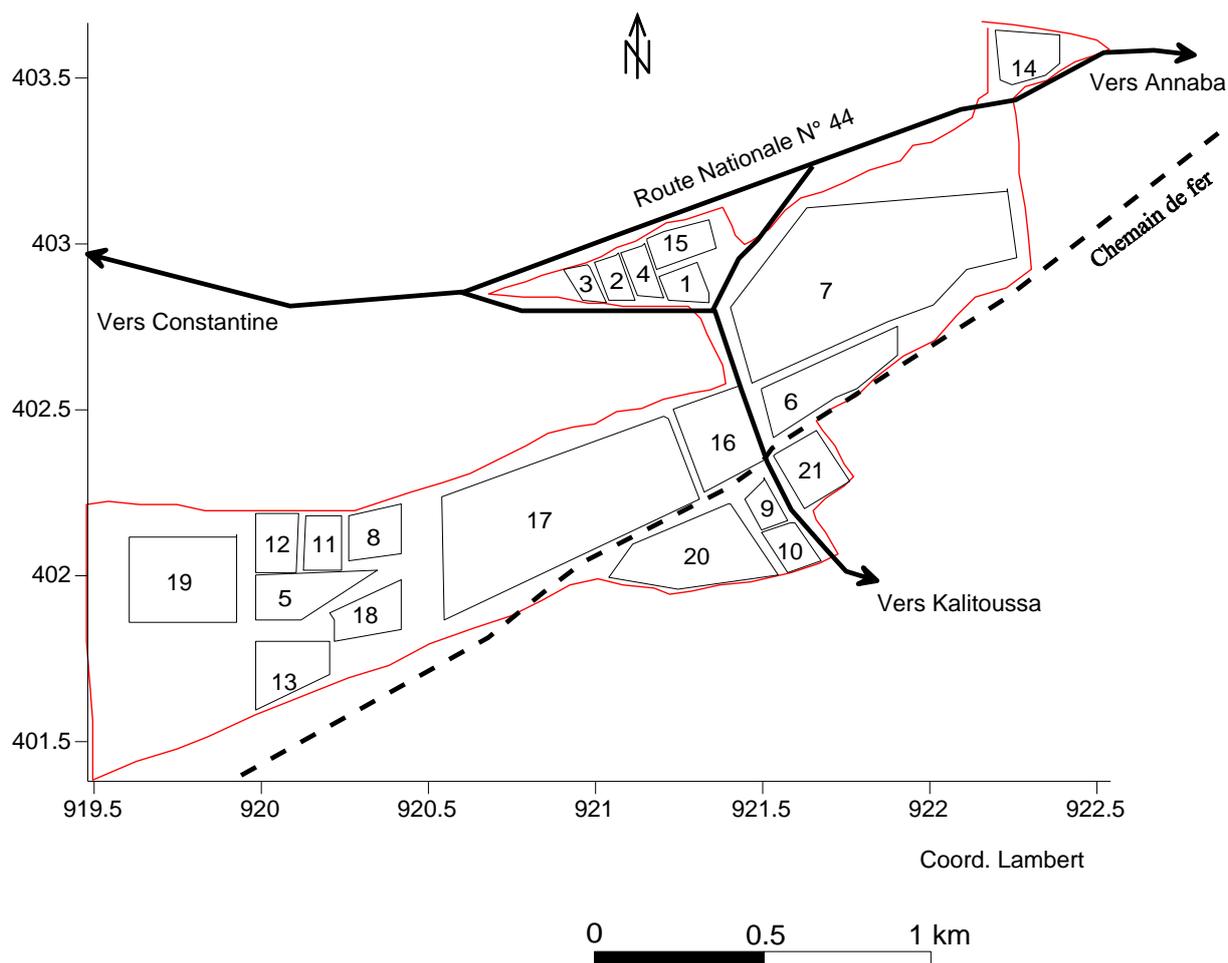
Elément/ substance	Symbole/ formule	Lignes directrices fixées par l'OMS des eaux potables
Chlore	Cl	250 mg/l
Conductivité	CE	400 μ S/cm
Cuivre	Cu	2 mg/l
Fer	Fe	0,2 mg/l (*)
Plomb	Pb	0,01 mg/l
Manganèse	Mn	0,4 mg/l
Nickel	Ni	0,01 mg/l
Nitrite	NO ₂	3 mg/l
Sodium	Na	200 mg/l
Sulfate	SO ₄	500 mg/l
Calcium	Ca	<200 mg/l
pH		6,5-8,5
Magnésium	Mg	50 mg/l
Potassium	K	12 mg/l

(*) Normes européennes

Elément/ substance	Valeurs limites / type d'activité		
	Corps gras	Industrie de l'énergie	Industrie mécanique/transformation des métaux
Température	30°C	30°C	30°C
pH	5.5-8.5	5.5-8.5	5.5-8.5
DBO ₅	200 g/t	25 g/t	
Pb		0.5 mg/l	0.7 mg/l
Cu			0.7 / 1.5 mg/l
Ni			0.7 / 2 mg/l
Fe			5 mg/l

Tableau 21 - Normes Algériennes des rejets

La distribution spatiale des entreprises de la zone industrielle de Berrahal est démontrée sur une carte d'occupation du sol de la zone qui englobe 28 entreprises actives, seulement 21 d'entre elles sont concernées par cette étude (**Fig. 33**).



Légende :

Numéro	Entreprise	Numéro	Entreprise
1	Fabrication de biscuit 7 épis	12	KIA motors, point de vente
2	Fabrication des produits d'isolation	13	Laiterie Fetzara
3	Fabrication de carrelage	14	Pattes alimentaires, Saba
4	Pâtes alimentaires Mahbouba	15	Sarl espap TPS (treillis à soudé)
5	Savonnerie Nozha	16	Distribution des produits pharmaceutiques (IGROMED)
6	ENMTP, travaux publiques	17	Sarl maintenance (G.e.s.i.bat)
7	NAFTAL	18	Laiterie El Meida
8	Production d'huile d'olive	19	Boissons gazeuses Bona
9	Fabrication de carrelage Meraka	20	Protuil, galvanisation à chaud
10	Production du semoule Beldi	21	Stockage de ferrailles, COPRAC
11	Azatis, fabrication des sacs tissés		

Fig. 33 : Carte d'occupation du sol de la zone industrielle de Berrahal (implantation des entreprises étudiées)

V.2.2. Résultats et discussion

Remarque : la forme en ligne rouge dans les cartes représente la limite de la zone industrielle de Berrahal.

V.2.2.1. Cartes de distribution spatiale des paramètres physiques et DBO₅ des eaux souterraines

- **La température :** les températures des eaux souterraines de la région de Berrahal sont strictement normales, elles ne dépassent guère les 19,5 °C dans toute la zone d'étude (**Fig. 34a**).
- **Le pH :** le pH est faible au Sud-Est de la région, il est marqué par une acidité bien individualisée (inférieure à 6,5) au contact avec le lac Fetzara, les valeurs limites en ce qui concerne les eaux potables sont comprises entre 6.5 < pH < 8.5, à ces endroits l'activité agricole et l'utilisation des engrais est bien individualisée par les agriculteurs (**Fig. 34b**).
- **La conductivité électrique :** la conductivité électrique des eaux souterraines de la région de Berrahal est très importante, elle dépasse les normes dans la plus part des points (supérieure à 1500 µS/cm ; minéralisation excessive), les eaux de la région sont très minéralisées, d'où l'existence de certains puits à eaux salines, ceci est due aussi à la structure géologique où en rencontre une couche d'argile graveleuse qui constitue le substratum de tous les puits, en outre il ne faut pas oublier l'effet de la période d'échantillonnage qui correspond à la période des basses eaux, où les concentrations des éléments chimiques est remarquable (**Fig. 34c**).
- **Le DBO₅ :** les valeurs de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) sont considérables, les eaux souterraines de la région de Berrahal sont à grand risque d'être fortement contaminées du point de vue qualité bactériologique (pour les eaux naturelle la [DBO₅] est de 0 à 10 mg/l), ces fortes concentrations sont mesurées surtout au Sud-Ouest de la région ; là où en rencontre tous les rejets industriels liquides des entreprises qui exercent l'activité de l'agro-alimentaire (R5, R6, R7, R8 et R9) (**Tab. 19**) qui impactent négativement la qualité des eaux superficielles et souterraines, (**Fig. 34d**).

V.2.2.2. Cartes de distribution spatiale des cations majeurs des eaux souterraines

- **Le calcium et le sodium :** pour les concentrations du calcium et du sodium des eaux souterraines de la région, elles ne dépassent pas les normes (inférieurs à 200 mg/l), mais toujours les importantes teneurs sont mesurées au Sud-Ouest de la région, impactées par les rejets des industries agro-alimentaire (R5, R6, R7, R8 et R9), ainsi qu'au Sud-Est en contact avec le lac Fetzara (**Fig. 35a et 35b**).
- **Le magnésium :** le magnésium est bien abondant dans la région, il se trouve à des concentrations qui dépassent les normes (supérieures à 50 mg/l) dans la partie centrale à proximité de tous les différents types de rejets de la zone industrielle, que ça soient les rejets issues de l'industrie agro-alimentaire ou autres (**Fig. 35c**).
- **Le potassium :** la distribution des concentrations de potassium dans la zone d'étude révèle que cet élément se trouve à des teneurs assez élevées, il dépasse la norme (12 mg/l) au niveau de la partie Est en contact avec le lac Fetzara, en outre, la partie Sud-Ouest où s'évacuent les rejets liquides des industries agro-alimentaires (R5, R6, R7, R8 et R9) possède elle-même des concentrations considérables (**Fig. 35d**).

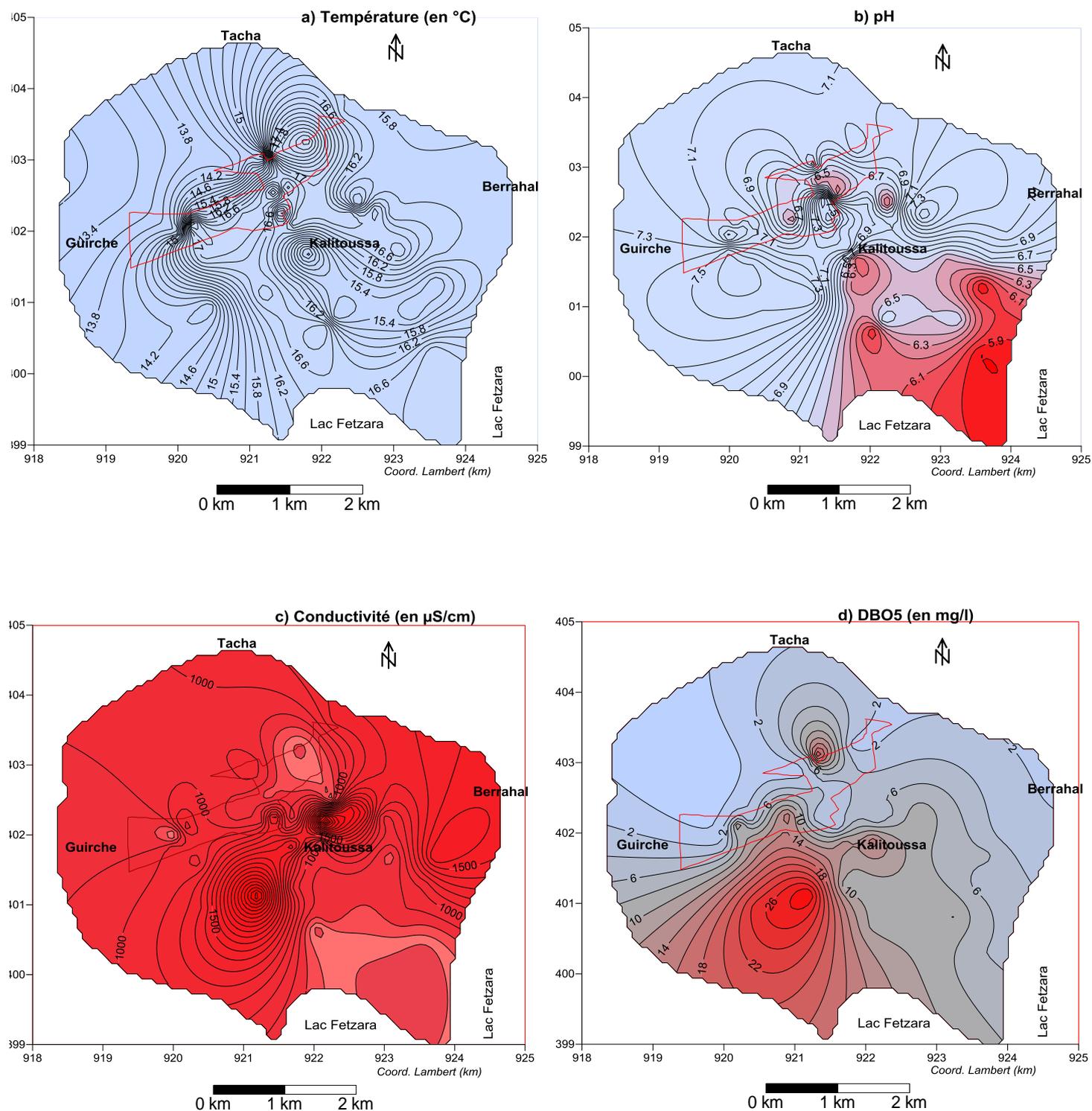


Fig. 34 : Cartes de distribution spatiale des paramètres physiques (température, pH, conductivité électrique et DBO₅) des eaux souterraines de la zone d'étude

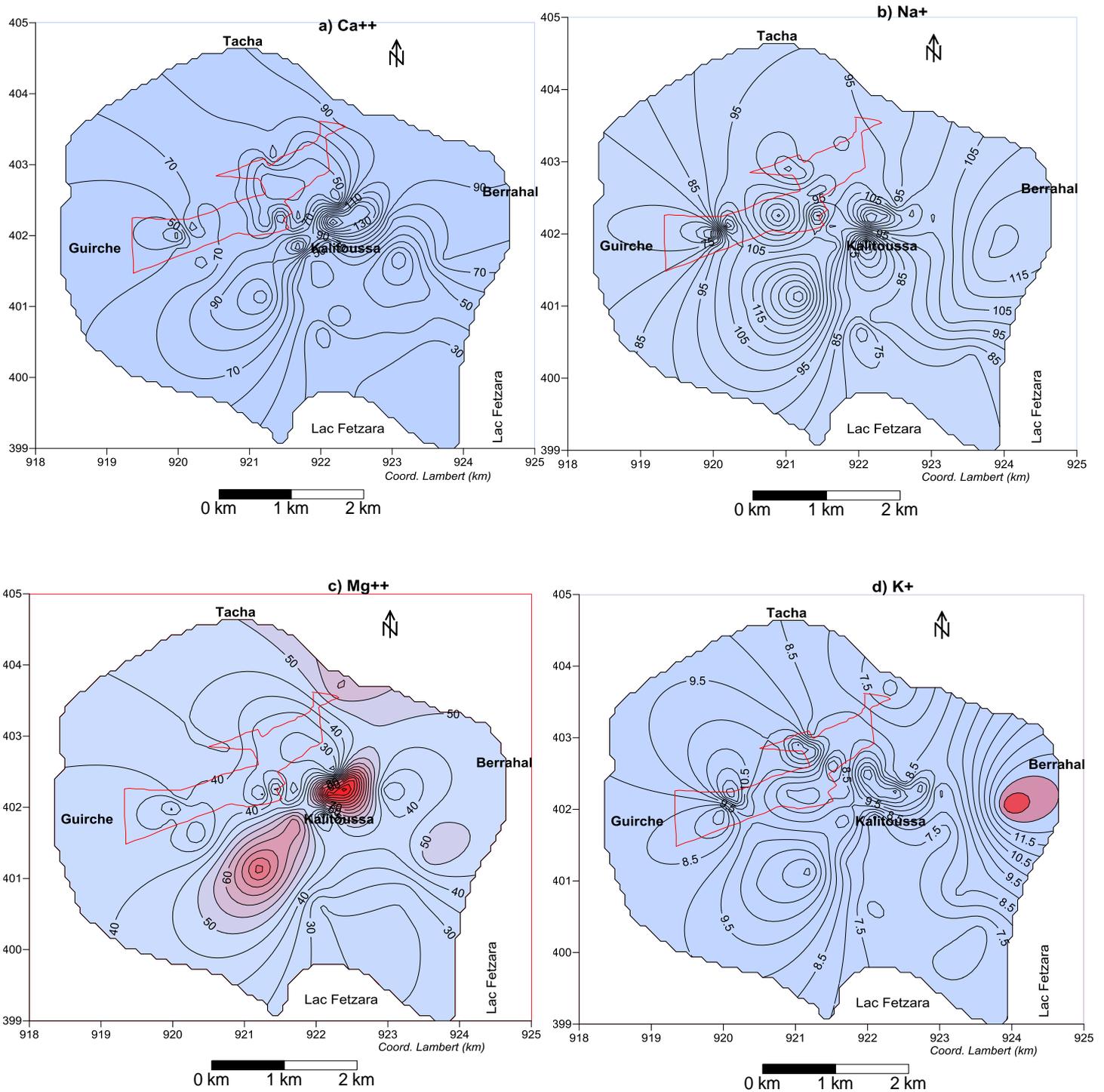


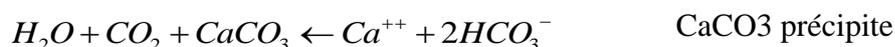
Fig. 35 : Cartes de distribution spatiale des teneurs des cations majeurs dans les eaux souterraines de la zone d'étude (en mg/l)

V.2.2.3. Cartes de distribution spatiale des anions majeurs et de nitrites des eaux souterraines

- **Les chlorures** : les eaux souterraines de la zone d'études sont très chlorurées, les concentrations en chlorures sont considérables et dépassent la norme (250 mg/l) dans toute la partie Nord et Nord-Est de la région. En plus de l'origine anthropique (décharge des eaux usées) et géologique (couches d'argile) de cet élément, il s'ajoute que la plus part des habitants de la région qui ont des puits domestiques additionnent de l'eau de Javel dans leurs puits pour éviter toute contamination bactérienne, sans prendre aucune mesure de sécurité lors de l'ajout de l'eau de Javel, (**Fig. 36a**).
- **Les bicarbonates** : la concentration de bicarbonates dans la zone d'étude est normale (**Fig. 36b**), elle varie d'une valeur minimale de 14.64 mg/l et maximale de 341.6 mg/l. La précipitation (ou la dissolution) des carbonates dépend de la réaction suivante :



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



- **Les sulfates** : la concentration maximale des sulfates fixée par l'OMS est de 500 mg/l alors que l'objectif est inférieur à 150 mg/l. c'est en Sud-Ouest de la zone d'étude qu'en a mesuré les fortes teneurs, à cet endroit s'évacuent les rejets des industries agro-alimentaires, à une distance pas très loin des champs agricoles où les engrais phosphatés sont utilisés couramment. Des fortes concentrations en sulfates provoquent des troubles gastro-intestinaux, elles peuvent donner un goût désagréable à l'eau et créent des dépôts tenaces dans les chaudières (**Fig. 36c**).
- **Les nitrites** : La norme fixée par l'OMS concernant la concentration de nitrite dans les eaux potables qui est de 3 mg/l, n'est jamais atteinte, les eaux de la région de Berrahal ont des teneurs normales, sur la carte de distribution spatiale (**Fig. 36d**), les fortes teneurs sont observées surtout au Sud de la région où s'exerce une activité agricole intense (utilisation d'engrais et fumiers).

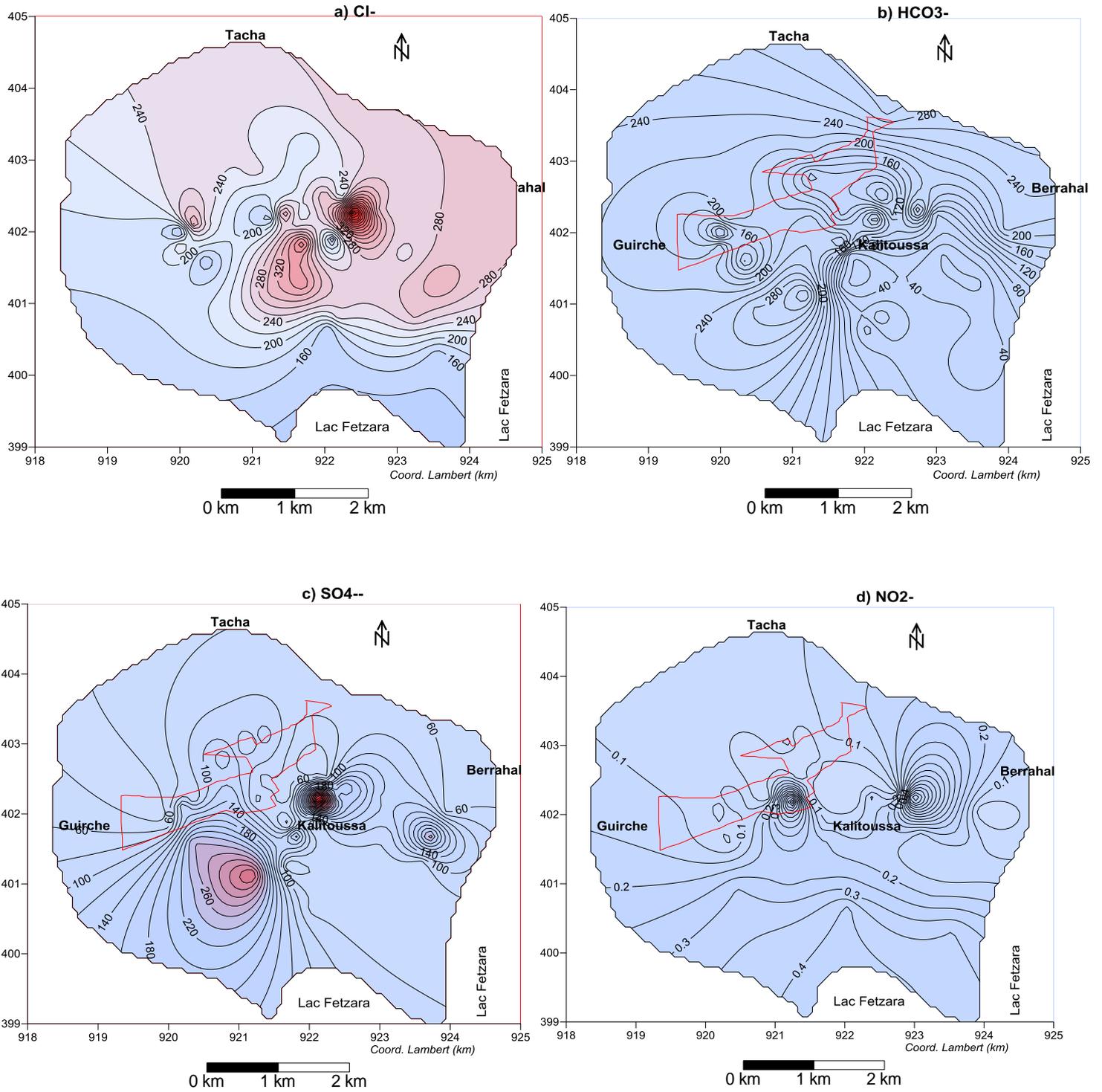


Fig. 36 : Cartes de distribution spatiale des teneurs des anions majeurs et de nitrites dans les eaux souterraines de la zone d'étude (en mg/l)

V.2.2.4. Cartes de distribution spatiale des métaux lourds des eaux souterraines

- **Le fer** : Du fait de l'activité industrielle intense de transformation de métaux et surtout le fer dans la zone industrielle de Berrahal, ainsi que les rejets liquides de ces entreprises, les concentrations en fer dans la zone d'étude semblent assez élevées au niveau de la zone industrielle et surtout du côté Ouest (**Fig. 37a**), où elle dépasse la norme (2 mg/l) ; suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines, à cet endroit ce sont les rejets de l'industrie agro-alimentaire qui prédominent, on peut constater que la richesse de la région en cet élément et d'autres minéraux assimilables sont d'origine naturelle (ancien gisement métallifère à dizaine de kilomètre plus au Nord dans le massif de l'Edough) en plus de l'origine industrielle due aux rejets.; la présence de la pyrite est fréquente dans des niveaux alluvionnaires, tourbeux et argileux, elle intervient comme échangeur d'électrons dans la réaction globale de dénitrification suivante (Mariotti, 1994) :



La partie centrale possède aussi des teneurs importantes (dues à l'existence des rejets R1 et R2) qui caractérisent les industries de transformation de métaux.

- **Le manganèse** : il se trouve à des concentrations importantes dans la zone d'étude, dans la nature les minerais les plus abondants sont la pyrolusite MnO_2 , la psilomelane $[(Ba,H_2O)_2Mn_5O_{10}]$ et la rhodochrosite ($MnCO_3$). Presque toutes les eaux souterraines de la région sont contaminées par cet élément qui à des teneurs qui dépassent largement la norme de l'OMS de la potabilité des eaux (0,4 mg/l), les endroits qui se trouvent au Sud de la zone industrielle sont les plus touchés par cette pollution (**Fig. 37b**), d'ailleurs ces endroits se trouvent également dans le sens d'écoulement des eaux souterraines et les effluents liquides de tous les rejets. le manganèse est un oligo-élément nécessaire à l'homme pour survivre mais devient toxique lorsque sa consommation est trop importante, L'eau potable qui contient un excès du manganèse causerait des troubles du développement intellectuel chez les enfants.
- **Le plomb** : les eaux souterraines de la région de Berrahal sont fortement polluées en plomb, la norme de potabilité fixée par l'OMS (0,01 mg/l) est largement dépassée dans tous les échantillons, la partie centrale de la zone d'étude aux alentours de la zone industrielle est la plus polluée (**Fig. 37c**), du fait de sa distribution dans toute la région, la pollution en cet élément est d'origine naturelle (géologique ; ancien gisement métallifère à dizaine de kilomètre plus au Nord dans le massif de l'Edough) en plus des activités et rejets industriels. Le plomb est concentré dans les gisements de sulfures où il est communément rencontré sous forme de galène (PbS). Il peut être également rencontré sous la forme d'anglésite ($PbSO_4$) et de cérusite ($PbCO_3$). Pour des pH supérieurs à 6, le plomb est soit adsorbé à la surface des argiles soit sous forme de carbonate de plomb, il existe sous deux états de valence : +2 et +4. A cause de son caractère basique, cet élément ne s'hydrolyse qu'à des pH neutres ou alcalins. Le plomb est un métal toxique à risques cumulatifs car le plomb ingéré n'est pas totalement éliminé par l'organisme humain, il est contenu dans l'eau de consommation est pour partie transféré dans le sang et les tissus mous de l'organisme et il constitue la cause du saturnisme.
- **Le nickel** : lui-même possède des concentrations élevées, qui dépassent largement la norme de potabilité des eaux fixée à 0,01 mg/l, les eaux souterraines de la région de Berrahal sont fortement polluées en nickel, la partie centrale au Sud de la zone industrielle est la plus touchée, ainsi que la partie Nord (**Fig. 37d**), comme le Fe, Mn et Pb, la pollution des eaux en nickel est de même origine que ces trois métaux

(industrielle + géologique), il possède un comportement chalcophile et en présence d'ions HS^- , forme des sulfures, soit : en se substituant au Fe^{2+} dans la pyrite (FeS_2), en co-précipitant avec Fe^{2+} dans la pentlandite ($\text{Fe, Ni}_9\text{S}_8$), en co-précipitant avec Fe^{2+} et Cu^{2+} dans la chalcopyrite (CuFeS_2), ou sous forme de vaesite (NiS_2) ou de millerite (NiS). Dans le milieu aqueux, le nickel existe seulement au degré d'oxydation divalent Ni(II).

En solution, à $\text{pH} < 10$, la forme dominante du nickel est l'état ionique (Ni^{2+}), son rayon atomique (0.069 nm) étant proche de celui du fer (0.0645 nm), il est donc susceptible de coprecipiter avec des composés ferrugineux (goethite, hématite, pyrite). Il peut se substituer également au fer dans la goethite jusqu'à 0.055 mol/mol, au dessus de cette concentration, il s'adsorbe à la surface de la goethite ou précipite sous forme de $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

- **Le cuivre** : le seul parmi les cinq métaux lourds qui se trouve à des concentrations qui ne dépassent pas la norme de potabilité des eaux (inférieures à 2 mg/l) dans toutes la zone d'étude, les concentrations les plus élevées sont mesurées au Sud de la zone industrielle, suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines et de tous les rejets, qui s'évacuent dans ces endroits et aboutissent à alimenter le lac Fetzara plus au Sud et à l'Est (**Fig. 37e**)

L'ion Cu^{2+} libre est plus réactif que les formes complexées, sa biodisponibilité est donc plus importante (Sunda et Hanson, 1987). En effet, la matière organique naturelle, telle que les acides fulviques et humiques, sont de forts agents complexant qui affectent la concentration en cuivre biodisponible (Allen et Hansen, 1996 ; Kim *et al.*, 1999). La spéciation a un rôle important dans la biodisponibilité du cuivre. En ce qui concerne la spéciation aqueuse, les degrés d'oxydation +1 et +2 peuvent exister, selon les conditions et la composition de l'eau souterraine. Dans des environnements oxydants, la disponibilité du cuivre est donnée par la solubilité de la phase carbonatée ou des phases hydroxydes, selon le pH de l'eau souterraine.

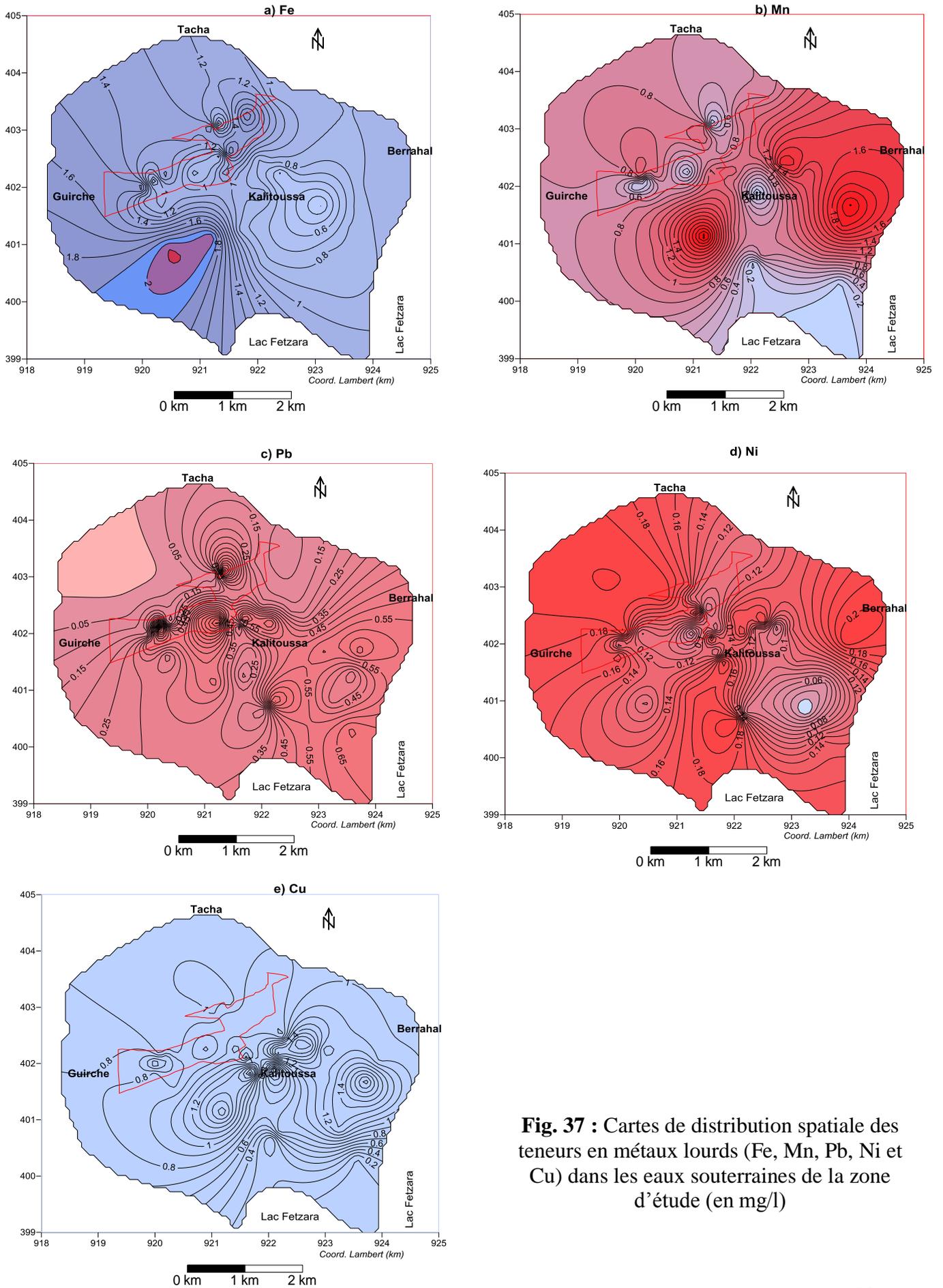


Fig. 37 : Cartes de distribution spatiale des teneurs en métaux lourds (Fe, Mn, Pb, Ni et Cu) dans les eaux souterraines de la zone d'étude (en mg/l)

V.2.2.5. Valeurs du pH et concentrations en DBO_5 , Pb, Fe, Cu, Ni et Mn des rejets liquides de la zone industrielle de Berrahal

- **pH** : les valeurs limites du pH pour les rejets sont comprises entre 5.5 et 8.5 selon les normes Algériennes (limitées par les deux traits rouges) quel que soit le type d'activité industrielle, ces valeurs sont respectées à l'exception des rejets R6 (rejet de l'entreprise El Meida –laiterie, fromagerie-) qui a un pH basique supérieur à 8.5 et le rejet R8 (rejet de l'entreprise Bona – boissons gazeuses-) caractérisé par une acidité bien marquée avec un pH de 5 (**Fig. 38**).

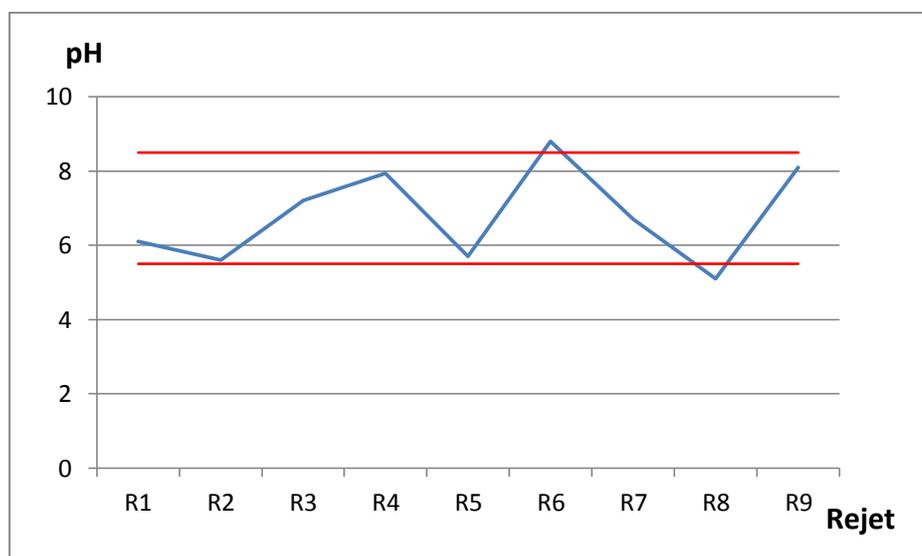


Fig. 38 : pH des rejets industriels

- **DBO_5** : les eaux de rejets de la zone industrielle de Berrahal sont très concentrées, et dépassent largement les normes (**Fig. 39**), surtout pour ceux issues des entreprises qui exercent l'activité agro-alimentaire (laiterie-fromagerie et boissons gazeuses), représentées par les rejets R5, R6, R7 et R9 (rejet des entreprises : Bona El Annabia, El Meida, Nozha+Bona, et Fetzara respectivement).

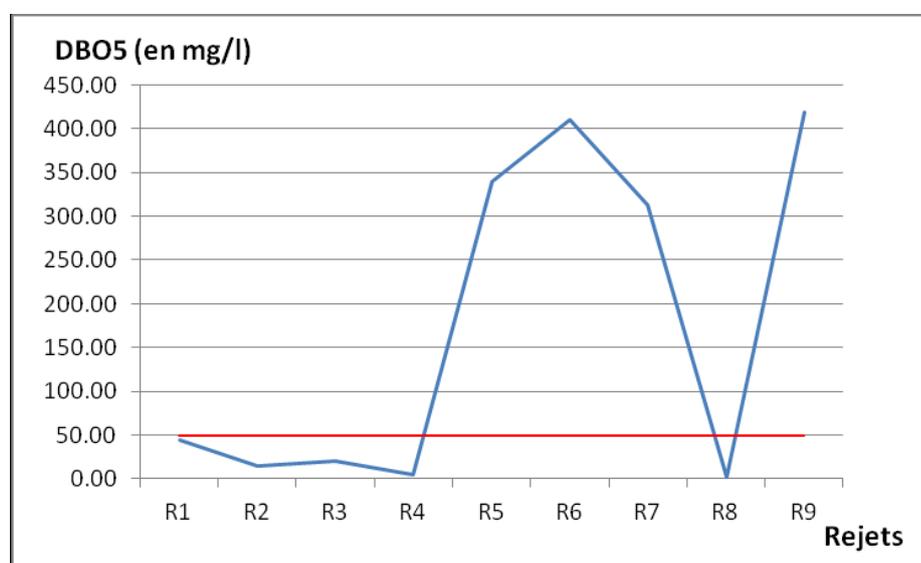


Fig. 39 : Teneurs en DBO_5 des rejets industriels

- **Le plomb** : la norme algérienne pour l'industrie de l'énergie qui est de 0.5 mg/l est dépassée, elle est représentée par le rejet R3 (rejet de l'entreprise Naftal), ainsi que pour l'industrie de mécanique et de transformation de métaux représentée par les rejets R1 et R2 (entreprise Protuil -Tuile et galvanisation à chaud-) qui ne doivent pas dépassés la norme de 0.7 mg/l, alors que les concentrations mesurées sont supérieures à 1.5 mg/l (**Fig. 40**).
- **Le fer** : la norme Algérienne pour l'industrie de mécanique et de transformation de métaux fixée à 5 mg/l n'est jamais atteinte, les rejets ont des teneurs acceptables (**Fig. 40**).
- **Le cuivre** : la norme fixée à 1.5 mg/l pour l'industrie de transformation de métaux est dépassée au niveau du rejet R2 (entreprise Protuil -Tuile et galvanisation à chaud-) (**Fig. 40**).
- **Le nickel** : tous les rejets ont des teneurs inférieures à la norme pour l'industrie de mécanique et de transformation de métaux fixée à 0.7 et 2 mg/l respectivement (**Fig. 40**).

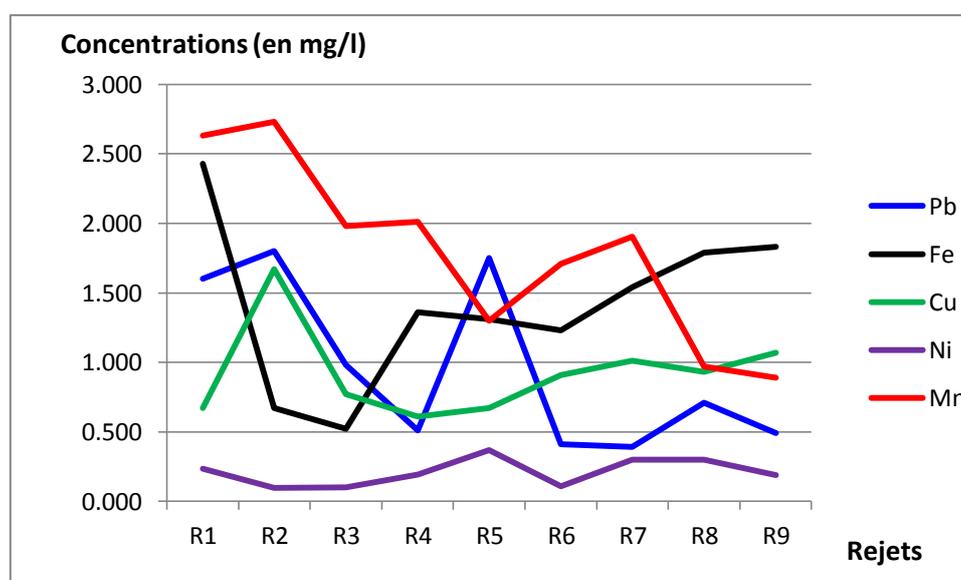


Fig. 40 : Teneurs en Pb, Fe, Cu, Ni et Mn des rejets industriels

V.2.2.6. Méthodes d'élimination des métaux lourds dans l'eau

Les métaux sont présents dans l'eau sous forme cationique (Ni^{2+} , Pb^{2+} , ...). L'osmose inverse peut être performante pour éliminer les métaux lourds en faible concentration, bien que dans des conditions aérobiques, les oxydes métalliques peuvent boucher les membranes. De plus, l'osmose inverse n'est pas vraiment une méthode rentable, à moins que la concentration en sel de l'eau ne nécessite une déminéralisation plus poussée.

Vu le taux de concentration élevé en Pb, Ni, Fe et Mn dans les eaux souterraines de la zone d'étude, un traitement semble indispensable avant toute utilisation pour consommation ou fabrication des produits agro-alimentaires à partir de ces eaux, toute on connaissant la toxicité des métaux lourds sur la santé humaine. A cet effet, on propose les méthodes de traitement suivantes pour chaque élément (**Tab. 22**) :

Tableau 22 - Méthodes de traitement de quelques métaux lourds dans les eaux

	Plomb	Cuivre	Nickel
Préchloration	Améliore l'élimination de tous les métaux lourds		
Coagulation	***	***	**
Filtres à sable	***	***	
Échangeurs d'ions	***	**	
Charbon actif	**	**	**

* : Peu d'effet / ** : Suffisant pour répondre aux normes en vigueur / *** : Excellent

Pour le fer et le manganèse, il consiste en 3 étapes de base pour le traitement :

- une première étape d'oxydation et de précipitation du fer et du manganèse ;
- une pré-séparation éventuelle de ces substances précipitées peut être réalisée par décantation ou flottation ;
- une filtration qui élimine définitivement le fer et le manganèse dans l'eau traitée.

C'est en modulant les différentes combinaisons de ces étapes que l'on doit arriver à mettre au point des solutions techniques adaptées aux différents types d'eau.

V.2.2.7. Les faciès chimiques des eaux souterraines

Tous les faciès sont représentés sur le diagramme de Piper (1944), après le calcul du bilan ionique, on a constaté que la majorité des échantillons ont un faciès chloruré sodique dominant, avec faciès chloruré calcique et chloruré magnésique peut abondant, les autres types de faciès sont très rares (Fig. 41).

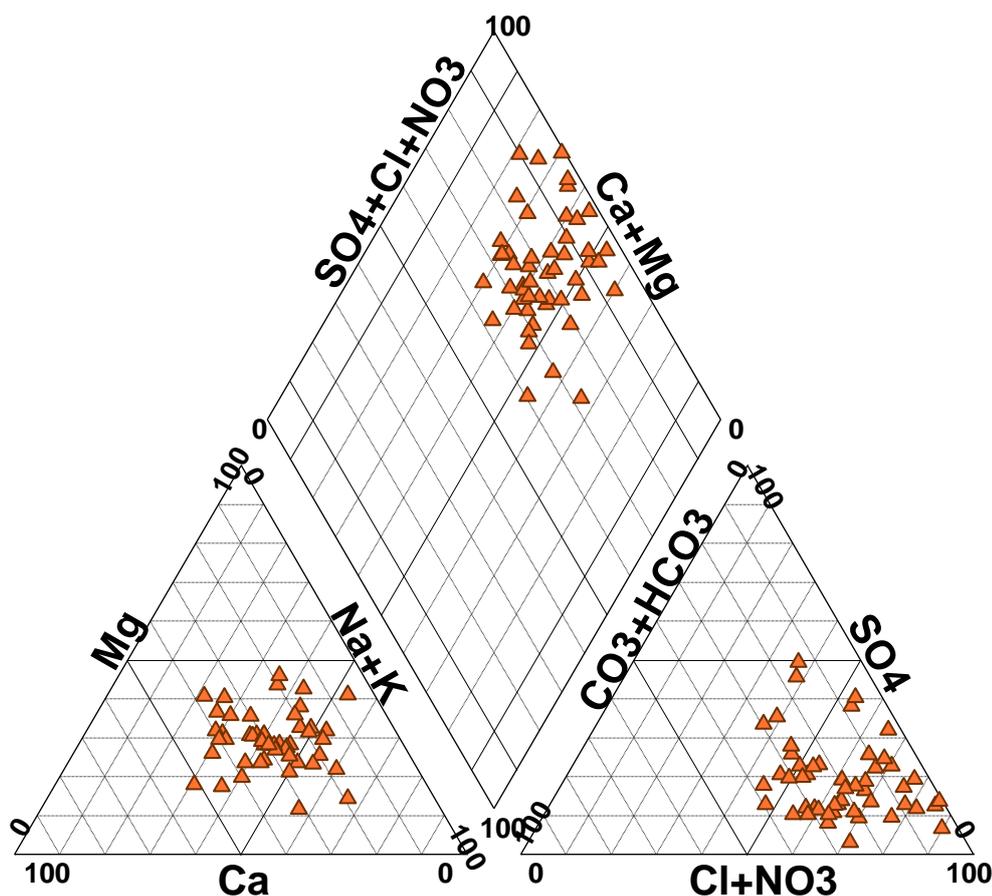


Fig. 41 : Diagramme de Piper pour les eaux souterraines de la zone d'étude

V.3. Analyses chimiques du sol

Le thématique « sol » englobe l'ensemble des sujets environnementaux et sanitaires qui ne font pas l'objet d'un traitement législatif spécifique. Il s'agit de caractériser, de contrôler, de gérer ou d'administrer de façon opportune les sujétions environnementales et sanitaires pérennes résultant de la qualité du patrimoine foncier. La question de pollution de sol par les activités industrielles ne fait l'objet d'une prise de conscience que depuis peu de temps. Du fait de la pollution suggérée dans les eaux souterraines de la zone d'étude notamment en métaux lourds, une étude par analyses chimiques du sol de la région semble nécessaire pour mieux déterminer et localiser les sources potentielles de cette pollution et lutter contre sa diffusion.

V.3.1. Définitions – Abréviations

V.3.1.1. Définition d'un site pollué

Un site pollué est un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. Ces situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou épandages de produits chimiques accidentels ou pas. Il existe également autour de certains sites de contamination dues à des retombées de rejets atmosphériques accumulés au cours des années voire des décennies (Y. Le Corfec, 2011).

V.3.1.2. Terminologie relative aux éléments chimiques

Conventionnellement, les *éléments traces (ET)* sont les 68 éléments minéraux, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs interviennent pour 99,4 %.

Les *éléments majeurs* sont (par ordre d'abondance décroissante) : O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P et Mn.

Les « *terres rares* » sont un groupe de métaux qui comprend le scandium, l'yttrium et les 15 *lanthanides*. Ces éléments n'ont en fait de rare que le nom - qui se réfère à la rareté des minéraux à partir desquels ils étaient extraits à l'origine - puisqu'ils sont présents à des concentrations plus élevées que l'argent ou le mercure dans la croûte terrestre.

Les *actinides* sont des éléments chimiques radioactifs, dans le tableau périodique ces éléments se situent entre l'actinium et le lawrencium, possédant donc un numéro atomique entre 89 et 103.

V.3.1.2.1. Éléments traces

- 10 éléments représentant ensemble 0,318 % et parmi lesquels :
Fluor, 0,07 %, soit 700 mg/kg
Chlore, 0,02 %, soit 200 mg/kg
Chrome, 0,02 %, soit 200 mg/kg
Vanadium, 0,01 %, soit 110 mg/kg
- 14 éléments représentant ensemble 0,048 %, par exemple :
Nickel, 0,0080 %, soit 80 mg/kg

- Zinc, 0,0065 %, soit 65 mg/kg
- Azote, 0,0046 %, soit 46 mg/kg
- Cuivre, 0,0045 %, soit 45 mg/kg
- Cobalt, 0,0023 %, soit 23 mg/kg
- Plomb, 0,0015 %, soit 15 mg/kg
- 22 éléments représentant ensemble 0,0065 % dont :
 - Bore, 0,0003 %, soit 3 mg/kg
 - Molybdène, 0,0001 %, soit 1 mg/kg
- 22 éléments représentant ensemble 0,0004 %, comme :
 - Iode, 0,00003 %, soit 0,3 mg/kg
 - Cadmium, 0,00002 %, soit 0,2 mg/kg
 - Sélénium, 0,000009 %, soit 0,09 mg/kg

Si les éléments traces et majeurs sont définis par rapport à leur abondance naturelle dans la croûte terrestre, les *macro-* et *micro-éléments* (métaux et non-métaux) se distinguent par les teneurs auxquelles on les rencontre habituellement dans le domaine du vivant (Juste et *al.*, 1995). Les spécialistes s'accordent pour fixer à 0,01 % (par rapport à la matière sèche de l'organisme) le seuil de partage entre ces deux groupes d'éléments.

Parmi les micro-éléments indispensables au déroulement des processus biologiques ont site les oligo-éléments (Cu, Co, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn, As, Cr, Se, V), la plupart d'entre eux sont toxiques dès que leur teneur excède un seuil donné.

L'expression métaux lourds est souvent employée dans le langage courant, avec une connotation volontairement péjorative. En fait certains éléments traces toxiques ne sont pas des métaux (As, Ce, ...) et d'autres présentent une masse volumique relativement faible, inférieure à 6 g/cm³ (Baize D., 1997).

V.3.2. L'utilisation de métaux

Les métaux lourds étaient et sont encore utilisés à grande échelle pour toutes sortes d'applications :

- Matériaux de construction (zinc, plomb, cuivre) ;
- Protection de la surface de métaux (galvanisation, chromage, nickelage) ;
- Batteries (accumulateurs au plomb, zinc, cadmium, nickel, mercure) ;
- Pigments (plomb, zinc, cadmium, etc.) ;
- Catalyseurs (entre autres nickel, cobalt, molybdène et vanadium) ;
- Conservation du bois (arsenic, cuivre, chrome, également du mercure dans le passé) ;
- Protection des cultures (arsenic, mercure, cuivre) ;
- Stabilisateurs dans PVC (notamment du plomb).

V.3.3. Les formes des éléments traces métalliques dans les sols

Les éléments traces peuvent se trouver dans les 6 compartiments représentés à la figure 42, associés de façons diverses aux différents constituants des sols. Ils peuvent être :

- inclus dans les réseaux cristallins des minéraux primaires (minéraux non altérés, hérités de la roche-mère) et des constituants secondaires (minéraux résultant de l'altération pédogénétique) ;
- adsorbés sur les phases hydroxylées du fer, de l'aluminium et du manganèse ;
- séquestrés dans les résidus végétaux ou animaux (ils seront libérés ensuite, au fur et à mesure de la minéralisation de ces résidus) ;

- complexés ou inclus dans les macro-molécules organiques ;
- sous une forme échangeable (cations ou anions), associés aux surfaces des minéraux argileux et aux matières organiques ;
- sous une forme solide colloïdale dans la solution du sol (phase liquide) ;

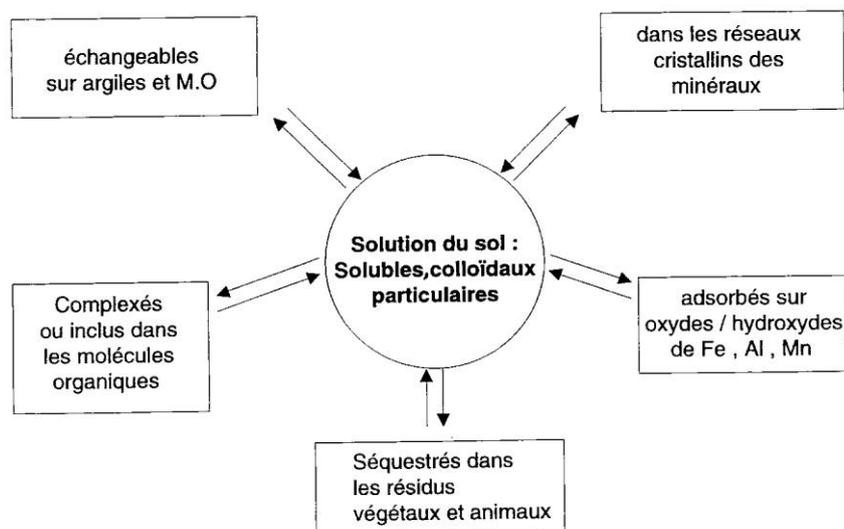


Fig. 42 : Différentes formes et localisations des éléments traces dans les sols (Baize D., 1997)

V.3.3.1. Mobilité

C'est l'aptitude d'un élément de passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie dans un autre, où il est retenu avec une moindre énergie, elle caractérise donc un potentiel de transfert plus qu'un transfert effectif. On peut facilement imaginer qu'un élément peut ainsi, au cours du temps, passer successivement dans des compartiments d'énergie de rétention décroissantes pour aboutir en fin de compte dans la solution du sol, voire dans l'atmosphère de celui-ci (cas du mercure par exemple), (Baize D., 1997).

V.3.3.2. Biodisponibilité

C'est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant (bactérie, végétale, animal, homme).

V.3.3.3. Solubilité

La solubilité dans l'eau indique la tendance à la mobilisation du métal par lessivage ou par ruissellement. La solubilité dépend de l'élément, des conditions chimiques de la phase aqueuse (pH, potentiel d'oxydoréduction, concentration en ligands) et des phases solides environnantes. La solubilité d'un élément peut varier selon sa spéciation, c'est-à-dire sa répartition entre différents états de valence, qui représente un paramètre essentiel notamment pour l'arsenic et le chrome.

V.3.3.4. Stabilité

Contrairement aux contaminants organiques, les éléments métalliques sont indéfiniment stables en tant que tels et ne se dégradent pas dans l'environnement.

V.3.3.5. Volatilité

La volatilité influe sur la libération par évaporation naturelle des polluants infiltrés dans les sols. D'une façon générale, les métaux sont considérés comme non volatiles à l'exception du mercure (CERTU, 2004).

V.3.4. Contexte conceptuel

Les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) mesurées aujourd'hui dans les sols résultent de :

V.3.4.1. Processus naturels

V.3.4.1.1. Fond géochimique (FG)

Au commencement, il y a la composition chimique initiale du matériau géologique. Dans les roches plutoniques, volcaniques ou métamorphiques, divers minéraux ont cristallisé et certains peuvent être particulièrement chargés en éléments traces (par exemple la chromite, l'olivine, la garniélite). Les teneurs en éléments traces des roches sédimentaires et des alluvions dépendent largement des roches érodées en amont et transportées ensuite par les cours d'eau. Ensuite, les compositions initiales des matériaux géologiques peuvent être localement très modifiées par des minéralisations post-formation ou post-sédimentation. Ces minéralisations peuvent donner lieu à des gisements miniers plus ou moins facilement exploitables. La composition chimique finale des roches, résultant de toute leur histoire géologique sur des millions d'années, définit le fond géochimique.

V.3.4.1.2. Fond pédogéochimique naturel

Le fond pédogéochimique naturel (FPGN) est la concentration d'un élément chimique dans un sol (que ce soit un élément majeur ou un élément en traces) résultant des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine (Baize, 1997).

Le FPGN, pour un élément donné, dépend d'abord étroitement de la composition du matériau géologique dont le sol est issu (dit alors matériau parental ou roche-mère). Mais ensuite, au fur et à mesure de l'action des processus pédogénétiques, le FPGN va se distinguer du « fond géochimique » local initial et se diversifier, verticalement et horizontalement, d'un horizon à un autre en fonction du jeu relatif des altérations et lixiviations, des migrations, des redistributions et des éventuelles concentrations de matières. Ainsi, dans les cas des sols les plus « vieux » et les plus différenciés, les fonds pédogéochimiques naturels peuvent devenir très différents des fonds géochimiques de départ, particulièrement dans certains horizons très appauvris ou, au contraire, dans des horizons où divers métaux s'accumulent.

Tableau 23 - Éléments traces dans les roches et les sols

Histoire géologique (composition des roches plutoniques et volcaniques, métamorphisme, sédimentation, alluvionnement, minéralisations postérieures)	Fond géochimique (FG)
Évolution pédogénétique agissant à partir du FG	Fond pédogéochimique naturel (FPGN)
FPGN + apports anthropiques liés à l'agriculture + retombées atmosphériques diffuses	Teneurs agricoles habituelles (TAH)
TAH + apports massifs localisés	Pollutions locales

V.3.4.2. Divers apports

Tels que ceux liés aux :

- Retombées atmosphériques d'origine naturelle (poussières volcaniques) ou anthropique (par exemple : poussières industrielles, ou liées aux chauffages urbains, ou à l'incinération de déchets, ou au trafic automobile).
- Pratiques agricoles liées à la gestion "classique" des parcelles (par exemple : engrais, fumiers, lisiers, amendements calcaires, oligoéléments, produits de traitements tels que les pesticides ou phytosanitaires).
- Pratiques agricoles liées à la valorisation agricole des déchets (par exemple : compost d'ordure ménagères, eaux usées, boues d'épuration urbaines).
- Pollutions flagrantes, localisées à faibles distances de sources ponctuelles industrielles ou minières, impliquant des flux importants.

Les valeurs du fond pédogéochimique naturel en éléments traces métalliques ne peuvent pas être estimées directement à partir des teneurs mesurées dans les horizons de surface des sols. Elles sont seulement accessibles en raisonnant à partir des mesures stratifiées de manière adéquate et grâce à la connaissance du contexte pédogéologique local (Baize D., 1997).

En revanche, il est généralement possible de déduire des mesures disponibles les "teneurs agricoles habituelles" (TAH) en ETM. Celles-ci sont les gammes de concentrations observées le plus fréquemment dans les horizons de surface des sols agricoles soumis à des pratiques agricoles usuelles, en l'absence de pollutions industrielles ou minières ou de contaminations majeures. Les TAH prenant déjà en compte les contaminations diffuses atmosphériques et agricoles, leur détermination peut permettre de mettre en évidence des sites fortement contaminés par rapport à d'autres ayant reçu seulement des contaminations diffuses faibles (INRA, 2007).

V.3.5. Échantillonnage, traitement des échantillons

Afin de mieux interpréter les analyses physicochimiques des eaux souterraines de la région de Berrahal, une analyse chimique complémentaire des éléments traces métalliques (métaux lourds) et non métalliques, ainsi que quelques éléments majeurs dans le sol de la zone d'étude s'est avéré nécessaire pour mieux comprendre la source et les point potentiellement responsable de la pollution.

Pour cela une campagne de prélèvement des échantillons de sol à été effectuée dans la région de Berrahal, elle a totalisé 11 échantillons dispersés à travers la zone d'étude (**Fig. 43**), au mois de décembre 2008, les analyses chimique ont portées sur les éléments chimiques

suivants : Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Al, V, As, Rb, Sr, Y, Mo, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, W, Th et U. Tous ces éléments, ont été dosés au niveau du Laboratoire Chimie Générale et Prévention des Risques et Nuisances Technologiques, de l'Université de la Méditerranée, Faculté de Pharmacie, Aix Marseille II, France.

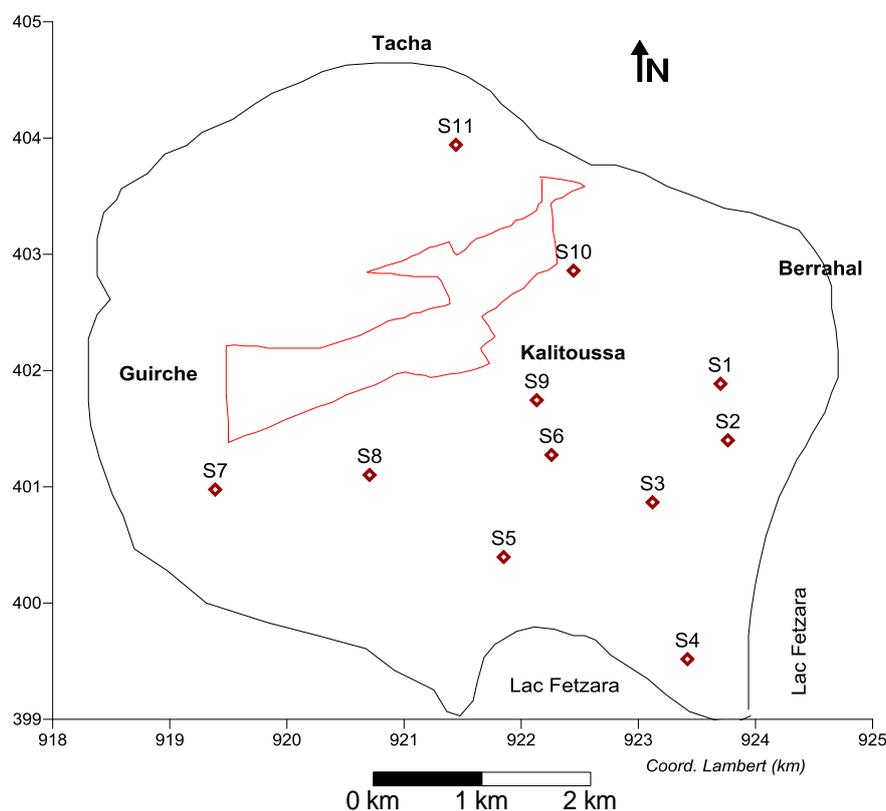


Fig. 43 : Carte d'inventaire des échantillons de sol

Les échantillons ont été prélevés par un tube d'échantillonnage pour sol de faible profondeur de 0 à 30 cm, cette méthode consiste à prélever un échantillon en enfonçant un tube dans le sol en partant de la surface. Une fois enfoncé au maximum, le tube est ressorti et l'échantillon de sol est récupéré.

La préparation des échantillons pour l'analyse chimique consiste à passer par les étapes suivantes :

- Le quartage : homogénéisation des prélèvements et sélection d'un échantillon représentatif.

- Le séchage : il est réalisé à 180°C pendant 1 heure.

- Le tamisage : la fraction conservée pour l'analyse est celle inférieure à 2 mm (NF X31-101, 1992).

- Le broyage : réduction des échantillons en poudre fine inférieure à 63 µm qui présente la meilleure capacité d'adsorption des ETM (Forstner et Salomon, 1980).

Ensuite tous les échantillons ont été conditionnés dans des flacons en verre, conservés à des températures inférieures à 4°C, à l'abri de la lumière, jusqu'à analyse.

V.3.5.1. Préparation des échantillons, méthode de dosage

Les échantillons sont mis en solution acide (0,5 g de sédiment dans un mélange de 7,5 ml d'acide nitrique concentré et 2,5 ml d'acide chlorhydrique concentré) en cellules fermées et chauffées dans un four à micro-ondes à 180 °C pendant une heure. Après refroidissement le résidu est complété à 100 ml à l'aide d'eau distillée.

Cette technique permet la mise en solution de la majorité des éléments présents dans l'échantillon, non liés aux silicates.

Le dosage des éléments est ensuite réalisé par spectrométrie de masse à plasma (ICP/MS pour Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) sur le résidu liquide (Annexe 02).

La quantification se fait par étalonnage externe pour les éléments : Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, et Pb. Les mesures sont faites en trois répliques. L'erreur sur la mesure est inférieure à 5%.

Pour les éléments : Al, V, As, Rb, Sr, Y, Mo, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, W, Th et U, les mesures sont semi-quantitatives et l'erreur sur la mesure est inférieure à 25%.

La limite de quantification est de 2 mg/kg pour le fer et de 0,1 mg/kg pour tous les autres éléments.

Les concentrations sont exprimées en mg/kg.

V.3.6. Résultats et discussion

Les résultats d'analyses chimiques du sol de la région de Berrahal en éléments traces, sont représentés sous forme de graphiques en courbes et des cartes de distribution spatiale en courbes d'iso-concentration tracées par le logiciel Surfer (Golden Software Inc., 1999).

Remarque : la forme en ligne bleue dans les cartes de distribution marque la zone industrielle de Berrahal.

V.3.6.1. Le chrome (Cr)

La concentration moyenne du chrome dans la croûte terrestre serait comprise entre 100 et 200 mg/kg selon les auteurs (Baize D., 1997). Mais cette concentration varie grandement selon le type de roche. Les roches magmatiques ultrabasiques (dunites, serpentinites, péridotites) sont connues pour être extrêmement riches en chrome (de l'ordre de 1500 à 3000 mg/kg), dans le sol, la teneur limite est de 150 mg/kg.

Dans le cas des roches sédimentaires, la teneur en chrome sera beaucoup tributaire de la teneur en fer et, éventuellement, de la présence de minéraux détritiques riches en chrome (augite, serpentine).

Le chrome se trouve dans les sols et les eaux sous deux formes : Cr (III) et Cr (VI). Le chrome trivalent serait sans danger et relativement immobile tandis que Cr (VI) serait mobile et toxique pour les plantes et les animaux. Dans le milieu naturel, seuls les oxydes de manganèse seraient capables d'oxyder le...

D'ailleurs les concentrations du chrome dans la zone d'étude semblent normales et n'atteignent jamais les seuils (**Fig. 44**), la concentration maximale est enregistrée au niveau de l'échantillon S3, avec 53 mg/kg et la concentration minimale est de 20 mg/kg pour l'échantillon S8, selon la carte de distribution (**Fig.45**), les parties Nord et Sud-Est de la région sont caractérisées par les valeurs les plus élevées.

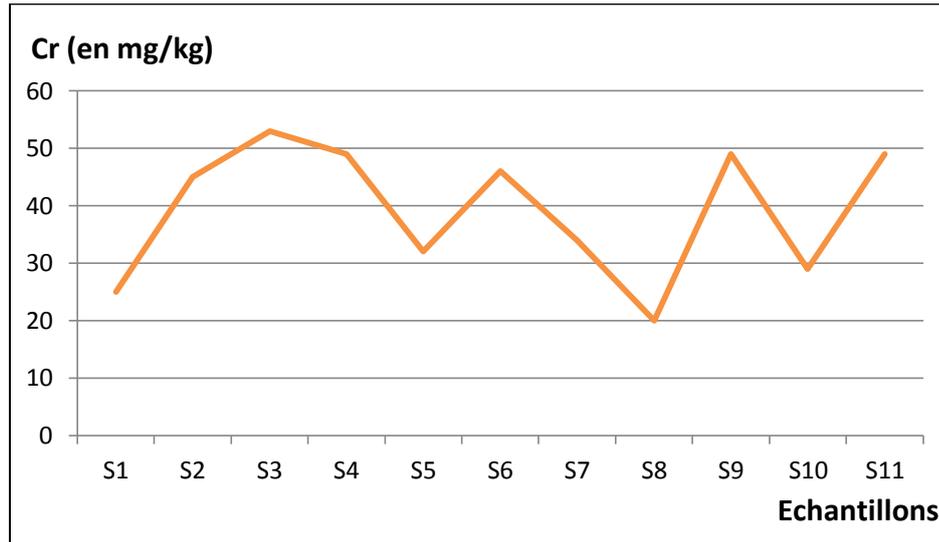


Fig. 44 : Teneurs en Cr

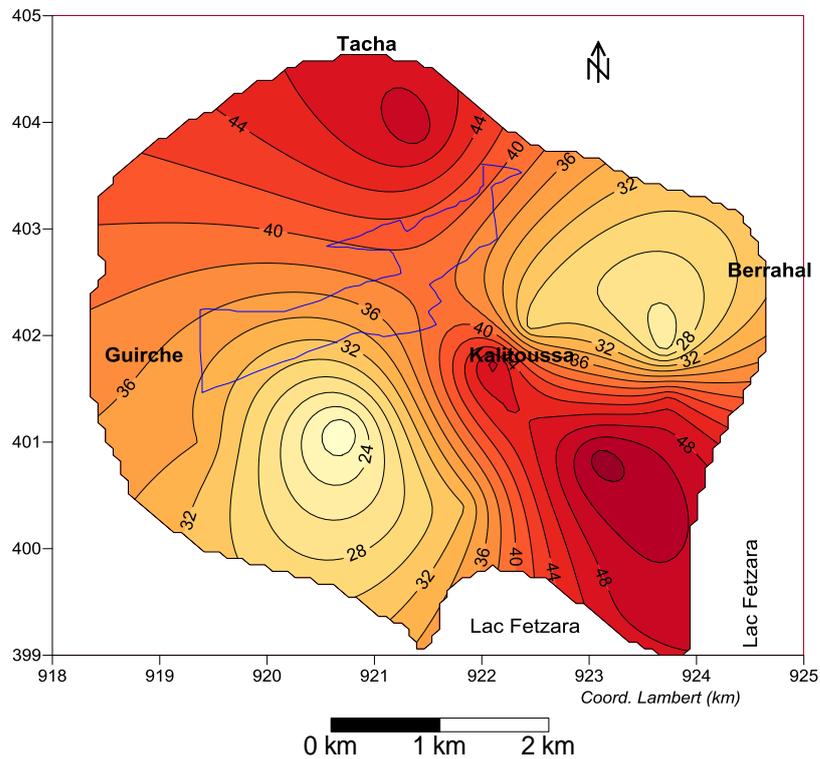


Fig. 45 - Carte de distribution de Cr (en mg/kg)

V.3.6.2. Le manganèse (Mn)

Le manganèse n'est pas vraiment un élément trace mais le moins abondant des douze éléments majeurs de la croûte terrestre (0,10 % ou 1 000 mg/kg). Les minerais les plus connus sont la pyrolusite, la rhodocrosite, la braunite. Dans les minéraux primaires, Mn est souvent en substitution du fer ou du magnésium dans les silicates ferro-magnésiens (biotites, chlorites, pyroxènes) ou dans les oxydes. Mn peut s'être accumulé dans diverses roches sédimentaires, notamment les calcaires oolithiques, et dans les nodules polymétalliques du fond des océans. Il est également abondant dans les filons hydrothermaux.

Au cours des processus d'altération pédologique des roches, le Mn^{2+} libéré (soluble et échangeable) s'oxyde et reprécipite rapidement sous forme de divers oxydes et hydroxydes ou de carbonates (minéraux secondaires). Les différentes formes d'oxydation du manganèse (Mn^{3+} et Mn^{4+}) sont à l'origine de l'existence d'un grand nombre d'oxydes et hydroxydes formant une série continue de composés stables. Les oxydes de Mn sont susceptibles de concentrer aussi des quantités importantes de cobalt, de nickel et de baryum. Grâce à leurs petites dimensions et leur surface spécifique très grande, les oxy-hydroxydes de manganèse ont une grande réactivité chimique dans les sols (Baize D., 1997).

Dans notre zone d'étude, les teneurs en Mn dans le sol sont aux normes, la concentration maximale est enregistrée dans l'échantillon S3, avec 830 mg/kg (Fig. 46) au sud-est (Fig. 47) et la concentration minimale avec 29 mg/kg pour l'échantillon S7. La partie Sud-Est en contact avec le lac Fetzara, présente les plus importantes concentrations.

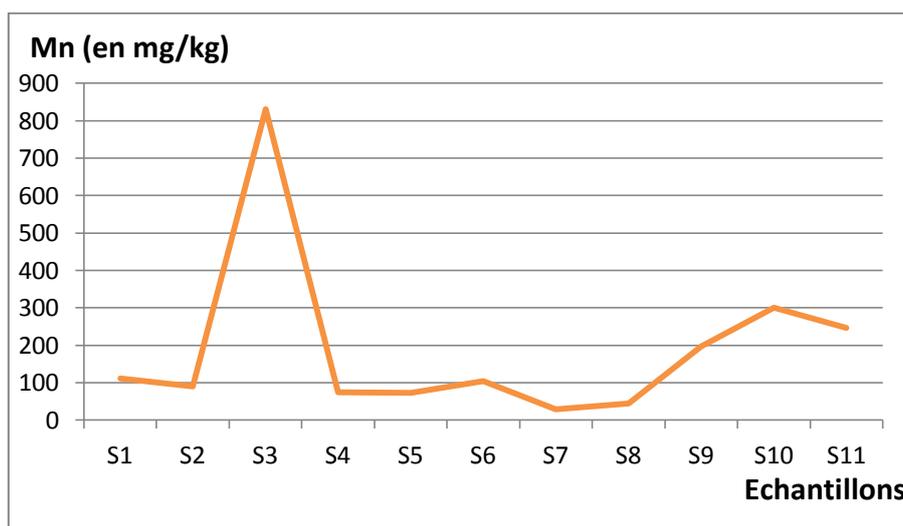


Fig. 46 : Teneurs en Mn

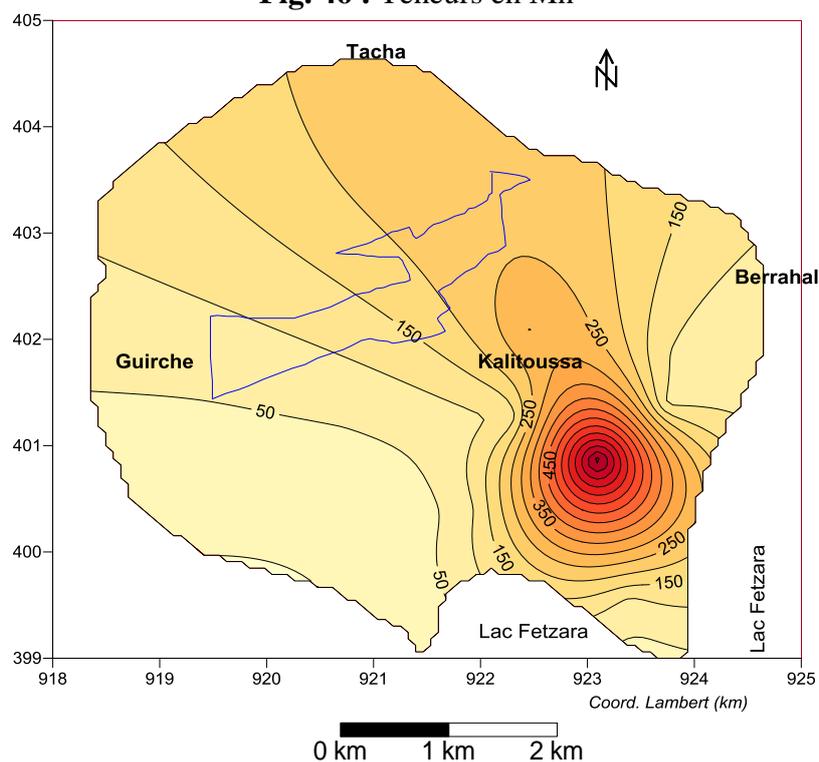


Fig. 47 : Carte de distribution de Mn (en mg/kg)

V.3.6.3. Le fer (Fe)

C'est l'un des métaux les plus abondants (41 000 ppm dans la croûte terrestre) et certainement l'un des plus importants car il est très largement utilisé par rapport à n'importe quel autre métal. Quand il est pur, ce métal présente un aspect blanc brillant, doux et est facile à travailler. Cependant, il réagit et constitue facilement un revêtement d'oxydes hydratés en surface au contact de l'humidité de l'air. Cette partie est incohérente et se détache facilement en plaques révélant des surfaces neuves pouvant être attaquées.

Le fer est soluble dans les acides dilués, où Fe(II) est produit en solution. Des acides plus oxydants produisent des solutions de Fe(III) et les agents acides fortement oxydants (par exemple le dichromate ou bien l'acide nitrique concentré) produisent une forme passive du métal, probablement comme résultat de la formation d'un film de surface d'oxyde cohérent.

Le fer est la base de nombreux types d'acier, leurs propriétés étant obtenues par alliage du fer au carbone, nickel, chrome et autres éléments en proportions variables. On obtient ainsi des matériaux aux propriétés physiques et mécaniques extrêmement variées.

Le fer est également un élément essentiel pour tout être humain, le corps humain contenant en moyenne 4 g de cet élément. La majorité du fer dans le corps se trouve dans l'hémoglobine, le pigment respiratoire à la base du mécanisme de transportation de l'oxygène par les globules rouges.

Ses concentrations dans la zone d'étude semblent acceptables, les teneurs maximales sont de 29520 mg/kg mesurée pour l'échantillon S2 et 29480 mg/kg pour l'échantillon S9 (**Fig. 48**). Ces deux valeurs importantes, caractérisent les endroits où s'évacue un ruisseau de rejets liquides (R1 et R2) issus des décharges des entreprises de transformation de métaux et galvanisation et qui participe à l'alimentation du lac Fetzara à l'Est, d'où des concentrations en fer plus élevées sur la carte de distribution spatiale (**Fig. 49**).

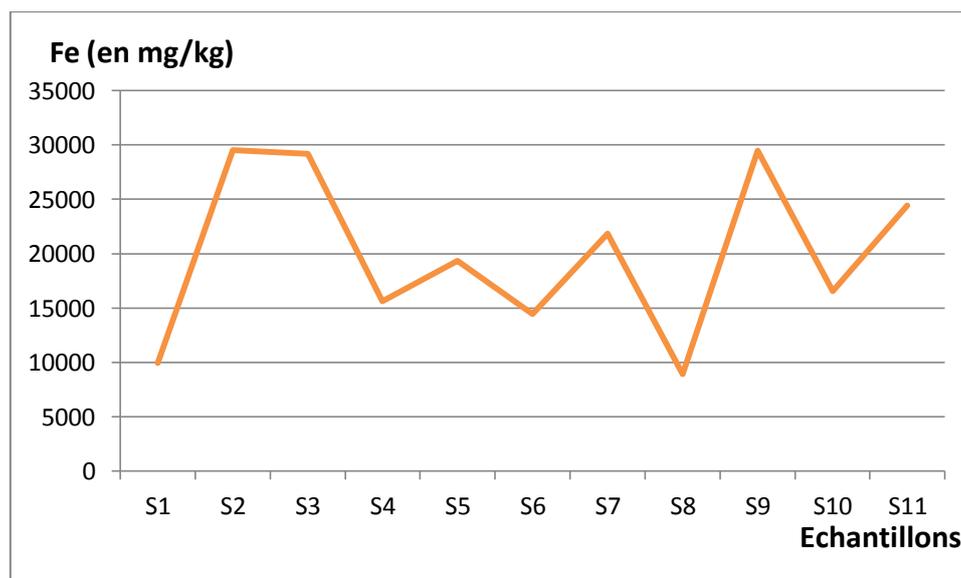


Fig. 48 : Teneurs en Fe

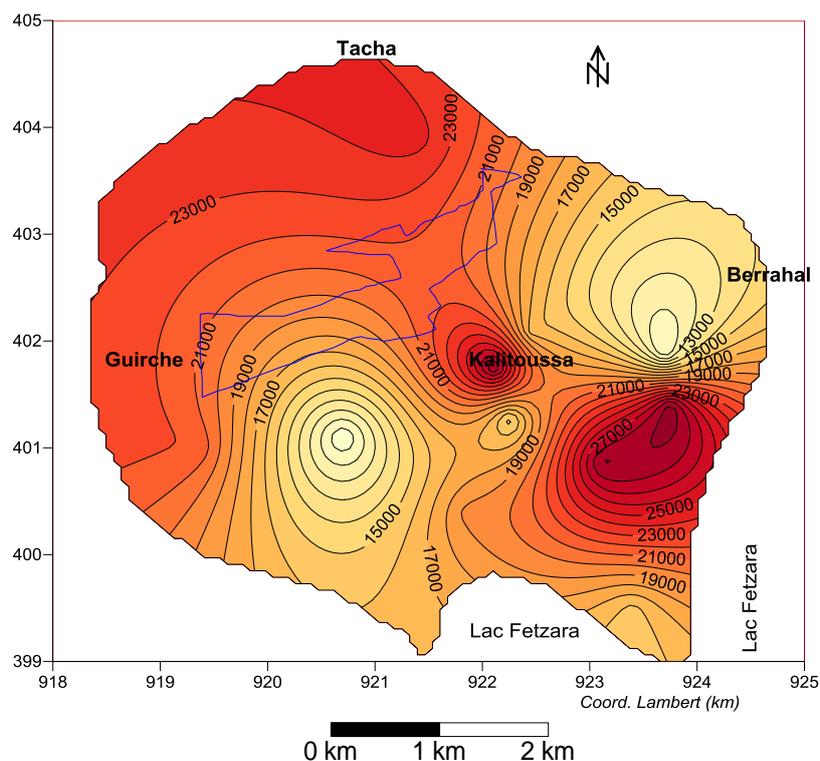


Fig. 49 : Carte de distribution de Fe (en mg/kg)

V.3.6.4. Le cobalt (Co)

Le cobalt est présent à forte concentration de 100 à 200 mg/kg, dans certaines roches magmatiques basiques ou ultrabasiques (gabbros, péridotites) mais sa teneur serait de seulement 1 à 15 mg/kg dans les roches acides et de 0,1 à 20 dans les roches sédimentaires (Juste *et al.*, 1995).

L'altération des minéraux, libère du Co^{2+} et du Co^{3+} qui sont assez mobiles en milieu oxydant et acide. Cependant le cobalt est fortement adsorbé sur les oxydes de fer et de manganèse ainsi que sur les argiles et les matières organiques. Suite à ces phénomènes d'adsorption, cet élément ne migrerait pas sous forme soluble. En revanche, les chélates organiques de cobalt seraient très mobiles dans les sols et le Co ainsi lié facilement disponible pour les plantes (Juste *et al.*, 1995).

Les apports anthropogènes résultent d'activités diverses (colorations du verre et de la porcelaine,...) (Baize D., 1997).

Les concentrations de Co dans la région sont normales, la teneur maximale est de 9,8 mg/kg pour l'échantillon S8 (**Fig. 50**) et 0,4 mg/kg comme teneur minimale pour l'échantillon S11. Les concentrations les plus élevées se caractérisent dans la partie Sud-Ouest de la région (**Fig. 51**).

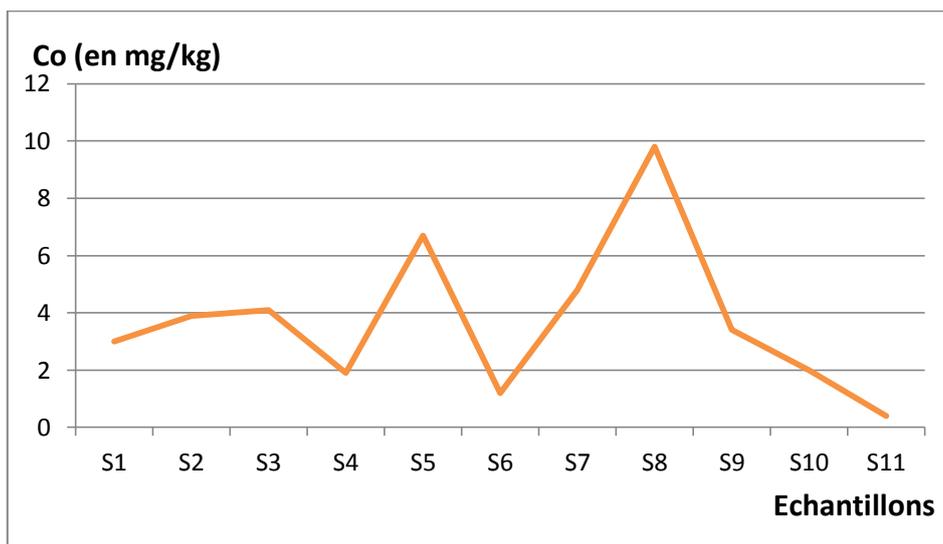


Fig. 50 : Teneurs en Co

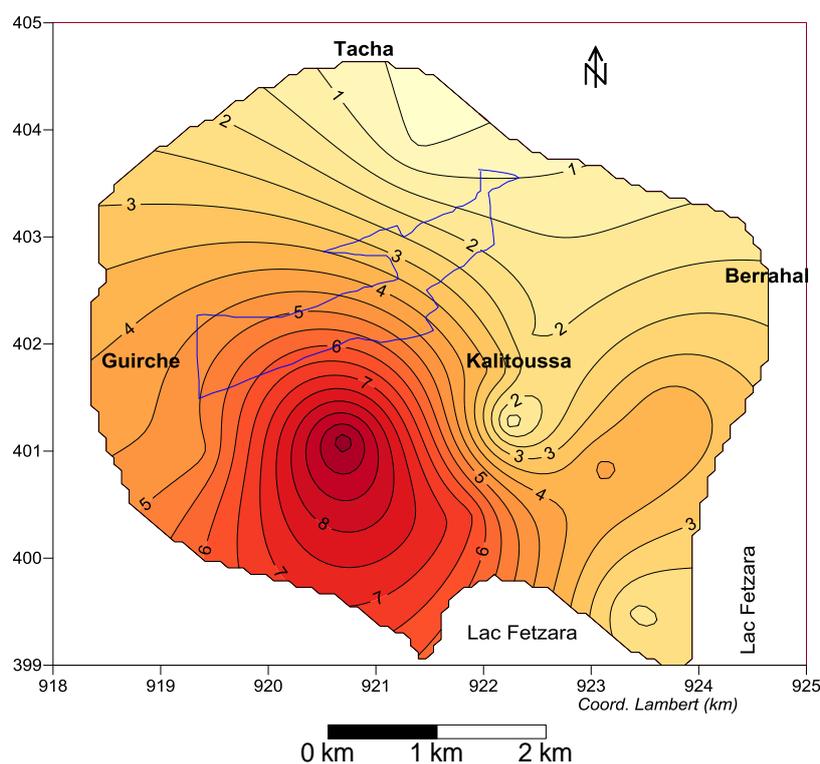


Fig. 51 : Carte de distribution de Co (en mg/kg)

V.3.6.5. Le nickel (Ni)

D'après Juste *et al.*, (1995), la concentration en nickel des roches sédimentaires serait comprise entre 20 et 40 mg/kg ; elle dépasserait 100 mg/kg dans les roches éruptives mais serait très faible (< 10 mg/kg) dans les roches granitiques. Ni est présent à fortes concentrations dans les roches-mères ferro-magnésiennes où il se substitue partiellement au fer ou au magnésium. Il est particulièrement abondant dans les minéraux primaires silicatés des roches magmatiques basiques et ultrabasiques (péridots, pyroxènes) et dans les minéraux secondaires de type serpentine. La teneur limite à respecter est de 50 mg/kg (Baize D., 1997).

Les concentrations en Ni sont relativement moyennes, avec des teneurs un peu élevées enregistrées pour les échantillons S4 (20 mg/kg) et S11 (19 mg/kg) et caractérisent deux zones extrêmes : le Nord et le Sud de la carte (**Fig. 52 et 53**). La teneur minimale (4,4 mg/kg pour S8) se situe dans la partie Est et Ouest de la région.

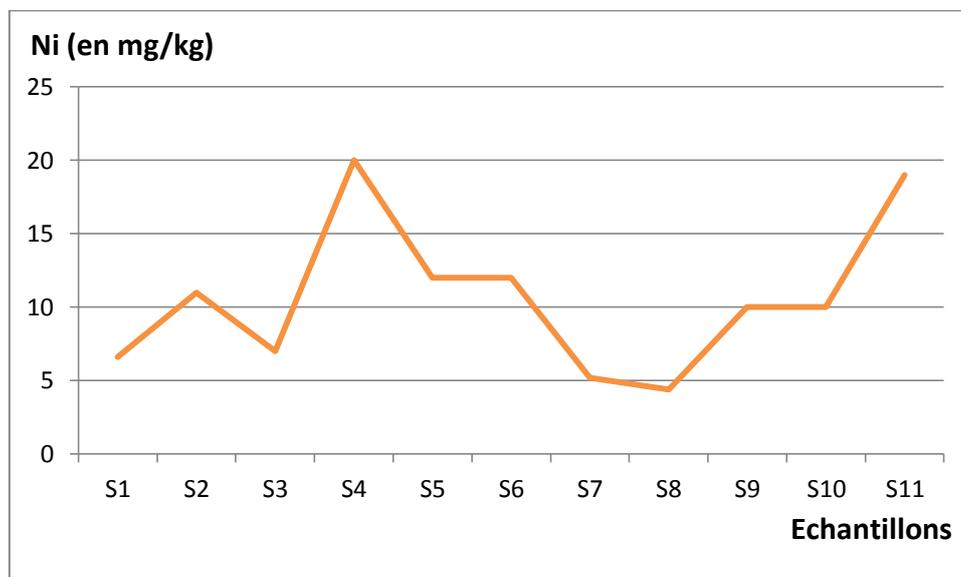


Fig. 52 : Teneurs en Ni

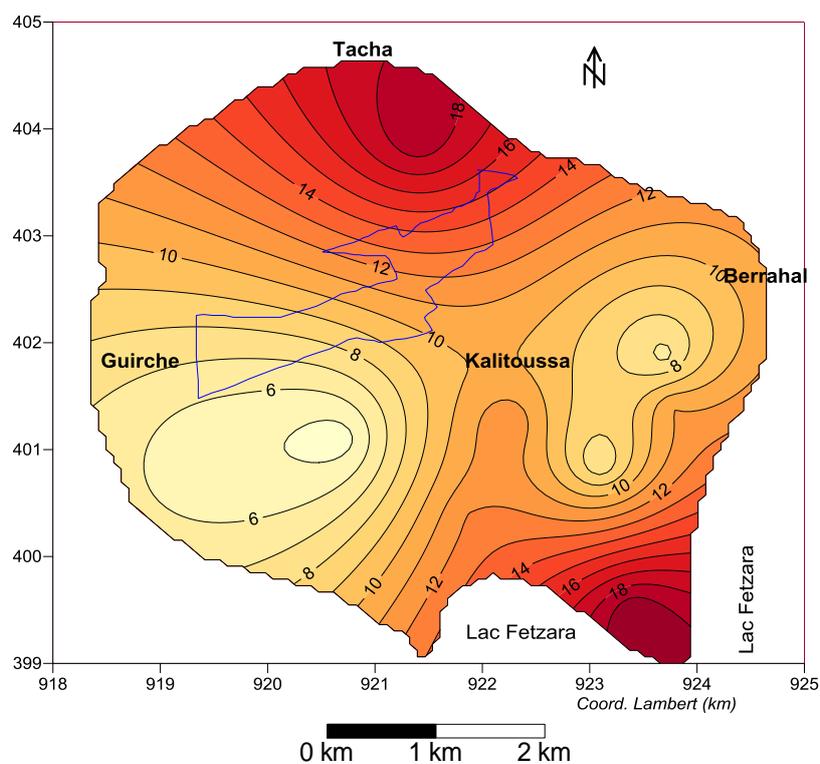


Fig. 53 : Carte de distribution de Ni (en mg/kg)

V.3.6.6. Le zinc (Zn)

La teneur moyenne en zinc de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg selon les auteurs. Ses concentrations dans les roches magmatiques seraient de l'ordre de 40 à 120 mg/kg et plus élevées dans les sédiments argileux et schistes (80 à 120 mg/kg).

Le zinc est présent le plus souvent sous forme de sulfure (blende) dans des filons hydrothermaux et des gîtes stratiformes imprégnant des roches sédimentaires où il se trouve associé au plomb, au fer et au cuivre (association blende, pyrite, galène, chalcoppyrite).

Les apports anthropogènes résultent de trois groupes d'activités :

- les sources minières et industrielles : traitement du minerai, raffinage, galvanisation du fer, gouttières et toitures, fabrication de piles électriques, pigments, matières plastiques et caoutchouc, etc. ;

- les épandages agricoles : le zinc est ajouté volontairement à l'alimentation des animaux. L'utilisation des eaux de gouttières en serait grandement responsable.

- enfin de nombreuses activités urbaines et le trafic routier libèrent du zinc dans l'environnement : toitures et gouttières, usure des pneumatiques, poussières des incinérations d'ordures, etc. Dans le sol la teneur limite à respecter de zinc est 300 mg/kg (Baize D., 1997).

Dans tous les échantillons, les concentrations sont normales, à l'exception des échantillons S2 (5112 mg/kg) et S9 (8720 mg/kg) qui correspondent aux parties centrale et Est de la région, tout en suivant un cours d'eau qui évacue les rejets liquides des entreprises de galvanisation et de transformation des métaux R1 et R2 (Ets. Protuil), puis rejoint directement le lac Fetzara à l'Est (**Fig. 54 et 55**).

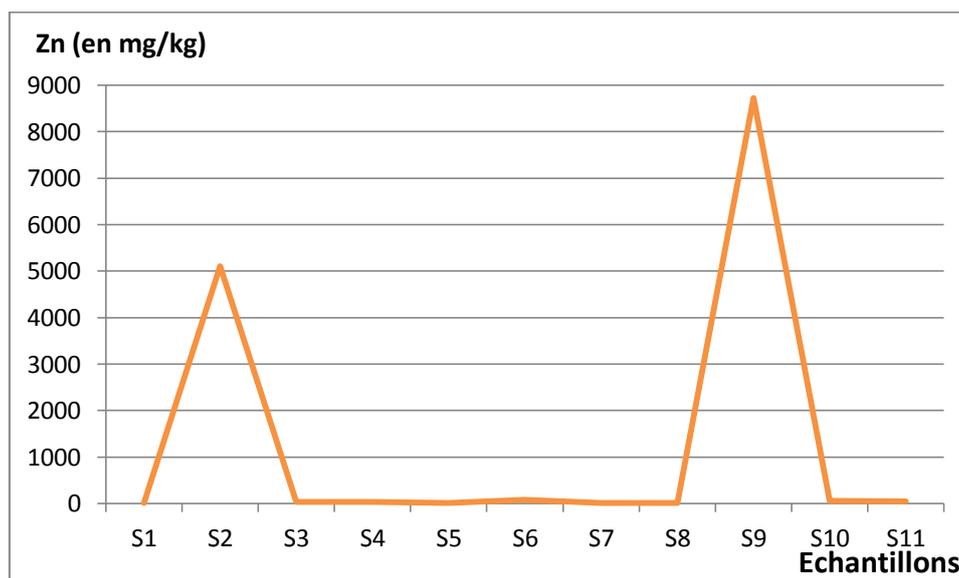


Fig. 54 : Teneurs en zinc

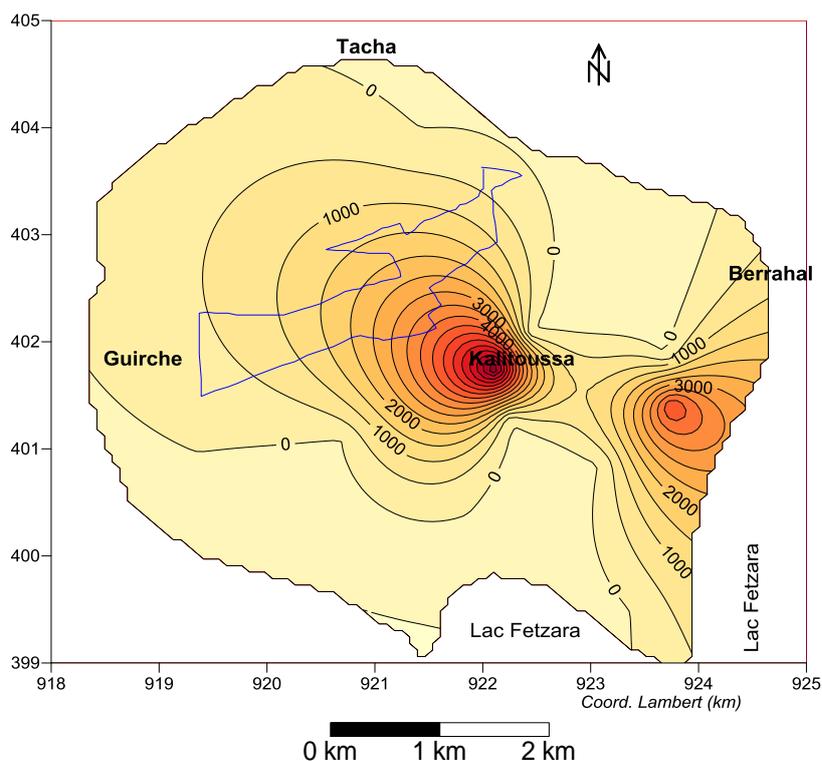


Fig. 55 : Carte de distribution de Zn (en mg/kg)

V.3.6.7. Le cuivre (Cu)

La composition moyenne de la croûte terrestre en cuivre serait comprise entre 45 et 70 mg/kg selon les auteurs (Baize D., 1997).

La teneur limite en cuivre dans les sols est de 100 mg/kg. Dans le sol le cuivre est principalement lié à la matière organique ainsi qu'aux oxydes de Mn et de Fe. Mais le cuivre peut être aussi emprisonné dans les feuillettes des argiles. On peut trouver aussi du cuivre sous forme lié d'hydroxyde, de carbonate ou de phosphate.

La concentration de cuivre dans la solution du sol est indépendante du pH et du complexant disponible. En général, la part du cuivre échangeable augmente avec la diminution du pH du sol.

La carence en cuivre est observée sur les sols marécageux fraîchement cultivés, suite à sa fixation,

Les teneurs les plus élevées (> 80 mg/kg) seraient observées dans les roches magmatiques basiques riches en minéraux ferro-magnésiens (péridots, micas noirs, pyroxènes). Les roches granitiques contiennent en général beaucoup moins de cuivre. Mais certaines d'entre elles ont pu subir des minéralisations additionnelles localisées d'où des teneurs parfois très élevées. Parmi les roches sédimentaires, argiles et schistes présentent des concentrations plus fortes que les roches détritiques comme les grès ou les sables (Coïc et Coppenet, 1989).

Les apports anthropogènes résultent de plusieurs groupes d'activités :

- sources agricoles : traitements fongicides sous forme de sulfate ;
- sources industrielles : dégagé de l'industrie de transformation de métaux,...

Les concentrations de Cu dans le sol de la région sont complètement normales, elles ne dépassent guère les 16 mg/kg pour la teneur la plus élevée au point S4 (Fig. 56). Il semble que la partie centrale de la région montre une abondance de cet élément (Fig. 57). Cette zone est marquée effectivement par quelques rejets provenant des entreprises de transformation et de

galvanisation des métaux, d'agro-alimentaires, de stockage et de distribution des produits pétroliers (R1, R2 et R3).

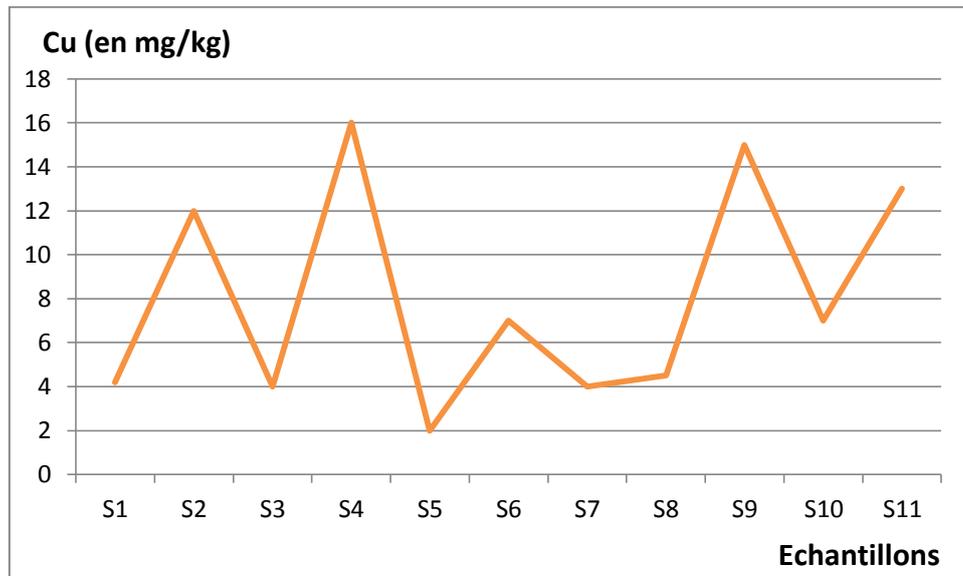


Fig. 56 : Teneurs en Cu

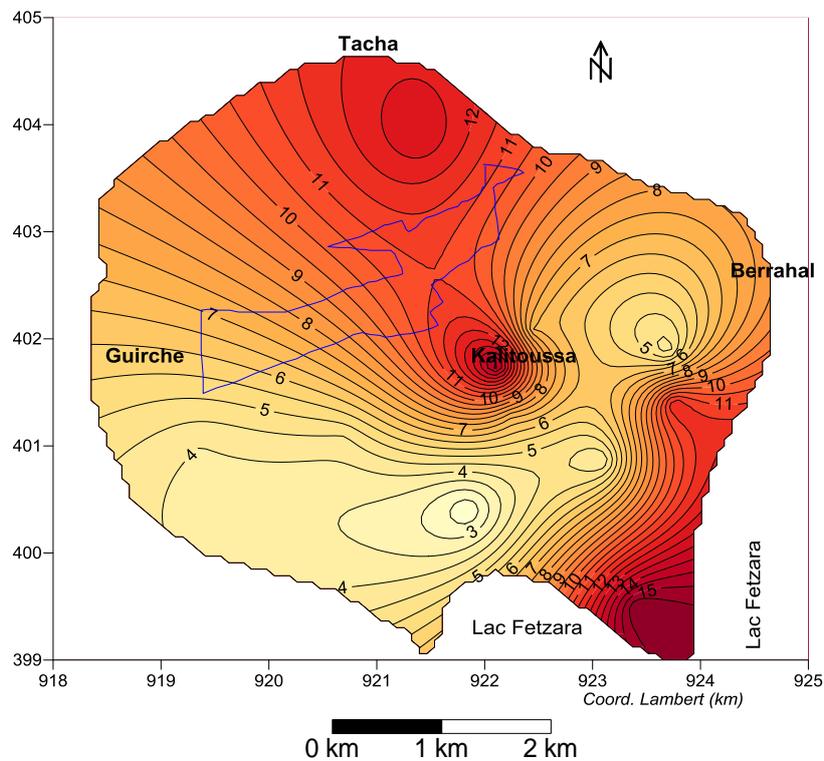


Fig. 57 : Carte de distribution de Cu (en mg/kg)

V.3.6.8. Le cadmium (Cd)

Le cadmium est distribué largement, quoique à faible concentration, moins de 1 mg/kg, dans l'ensemble de l'écorce terrestre, où il est souvent associé à des gisements de Zn, Pb et Cu.

Cet ETM est le plus redouté car très toxique. Considéré comme assez mobile et assez facilement biodisponible, il risquerait soit de passer dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des végétaux soit de migrer en profondeur pour aller contaminer les nappes phréatiques.

Les apports anthropiques sont souvent égaux voire très supérieurs au fond pédogéochimique initial.

Le cadmium serait présent dans toutes les roches mais plus abondant dans les roches sédimentaires que dans les roches magmatiques, et plus abondant dans les sédiments riches en carbone, sulfures et phosphates.

Les apports anthropogènes résultent de trois groupes d'activités :

a) les épandages et amendements agricoles : le cadmium peut être assez abondant dans les engrais phosphatés (teneur variable selon l'origine géographique des phosphates). Il en est apporté aussi par épandage de déchets d'élevage, lors du chaulage, etc. ;

b) les sources industrielles : le cadmium est un sous-produit du raffinage du zinc, il peut être libéré dans l'atmosphère lors de la métallurgie du fer et de l'acier, lors de l'affinage du plomb, etc. ;

c) enfin de nombreuses activités urbaines et le trafic routier libèrent du cadmium dans l'environnement : incinération des déchets, ...

En ce qui concerne les sols, la teneur limite à respecter est de 2 mg/kg.

Dans la zone d'étude, les concentrations de Cd ne dépassent pas les normes et présentent des teneurs inférieures à 1 mg/kg pour tous les échantillons. Par ailleurs, les valeurs les plus significatives sont observées au centre de la région où se trouvent les rejets de l'industrie de transformation de métaux et de galvanisation R1 et R2 (**Fig. 58 et 59**).

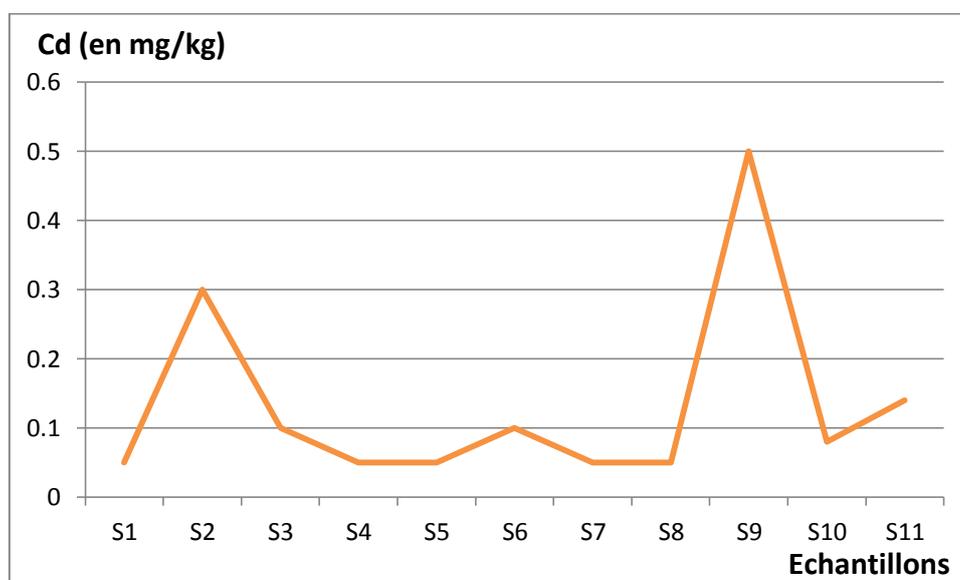


Fig. 58 : Teneurs en Cd

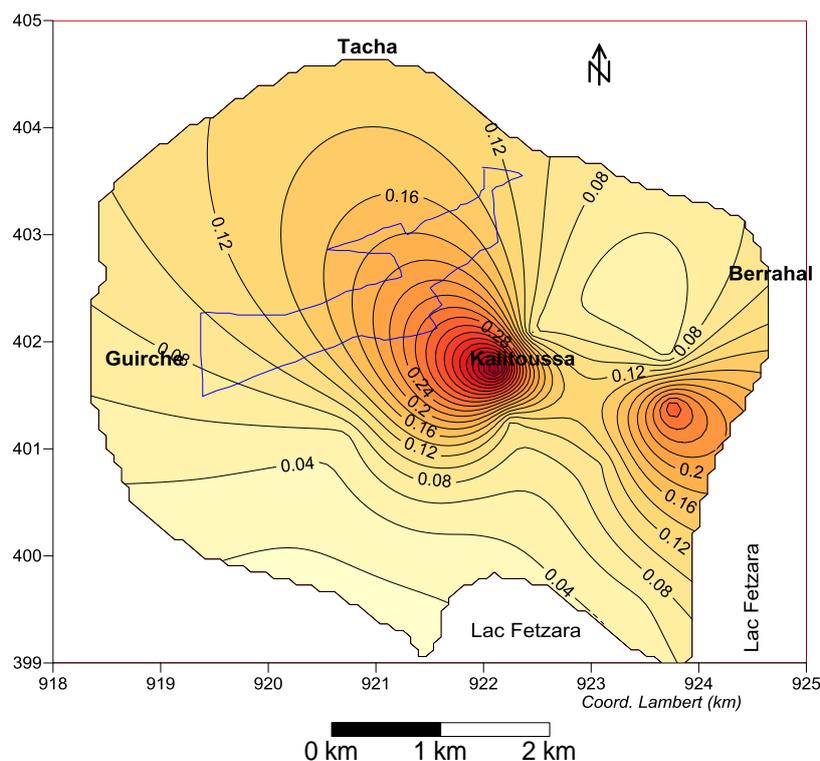


Fig. 59 : Carte de distribution de Cd (en mg/kg)

V.3.6.9. Le mercure (Hg)

C'est un métal liquide à la température ambiante, volatil, qui se combine très facilement avec d'autres métaux, on le trouve à l'état naturel dans le cinabre (HgS). Les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires renferment du mercure, mais ce sont les roches ultrabasiques et alcalines, qui présentent les teneurs les plus importantes. Parmi les roches sédimentaires, les schistes bitumineux sont les plus riches en mercure.

Le cinabre contient 86,2 % de mercure, les minerais de plomb et de zinc contiennent eux-mêmes des traces. Il peut être émis dans l'environnement par les processus naturels, dégazage de la croûte terrestre, il s'échappe aussi des failles et des fissures géologiques et des volcans. Les plantes peuvent ingérer du mercure du sol pendant leur croissance et le libérer lorsqu'elles pourrissent. Les activités humaines dégagent aussi du mercure dans l'environnement. Il est utilisé dans diverses activités industrielles.

Dans le sol, Hg^0 et Hg^{+2} sont les états d'oxydation les plus fréquents. Le mercure déversé au sol est rapidement immobilisé; fixé par les oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse et par la matière organique (Thomson J. F., et al. 2003).

La teneur moyenne en Hg dans le sol est de 0,03 à 0,15 mg/kg, alors qu'elle est à 0,051 mg/kg dans un horizon à faible profondeur (0 à 40 cm) (Valentin-Rouy et Huet S., 1997).

D'après les résultats obtenus, on remarque que toute la région est impactée fortement par une pollution intense en cet élément toxique (**Fig. 60 et 61**), il a un certain nombre d'effets sur l'homme comme la perturbation du système nerveux, l'ADN et les chromosomes, les réactions allergiques, une influence négative sur la reproduction, une modification de la vision, la surdité, les pertes de mémoires, etc...

Il se trouve à des concentrations allant jusqu'à 33 mg/kg (S8), les parties Sud-Ouest et Est sont les plus touchées par cette pollution, elles se trouvent d'ailleurs suivant le même sens d'écoulement des eaux souterraines, qui aboutissent à l'accumulation au niveau du lac Fetzara. Les deux échantillons S4 et S6 possèdent les faibles teneurs en raison de leur

positions dans la région situés généralement sur la ligne de partage des eaux bien distincte sur les cartes piézométriques.

On peut constater que ces fortes teneurs en Hg sont d'origine naturelle (géologique) et industrielle émise dans les rejets de transformations de métaux. Aussi, la région de Berrahal se trouve sur la limite Est en contact avec la région d'Azzaba, qui dispose des plus grands gisements de Hg d'Algérie.

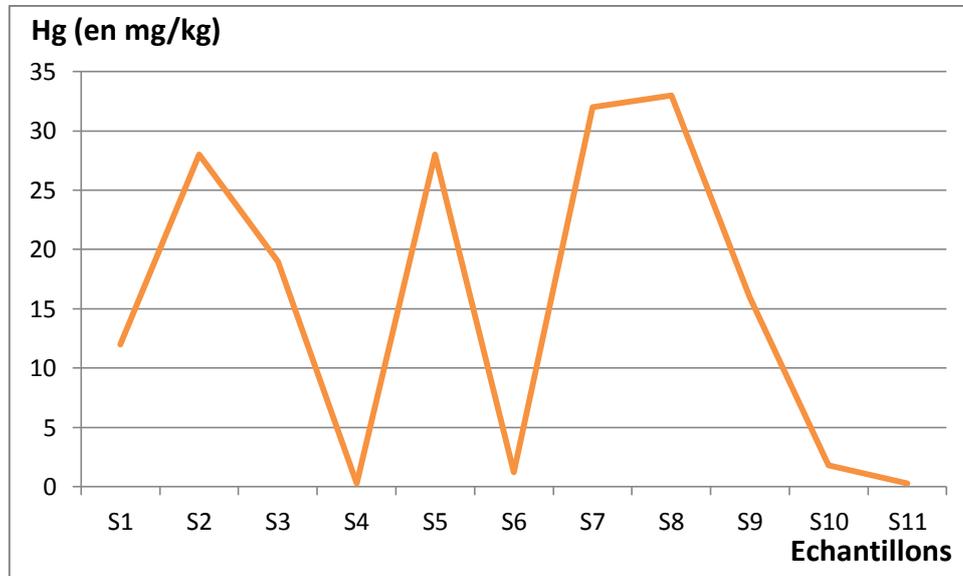


Fig. 60 : Teneurs en Hg

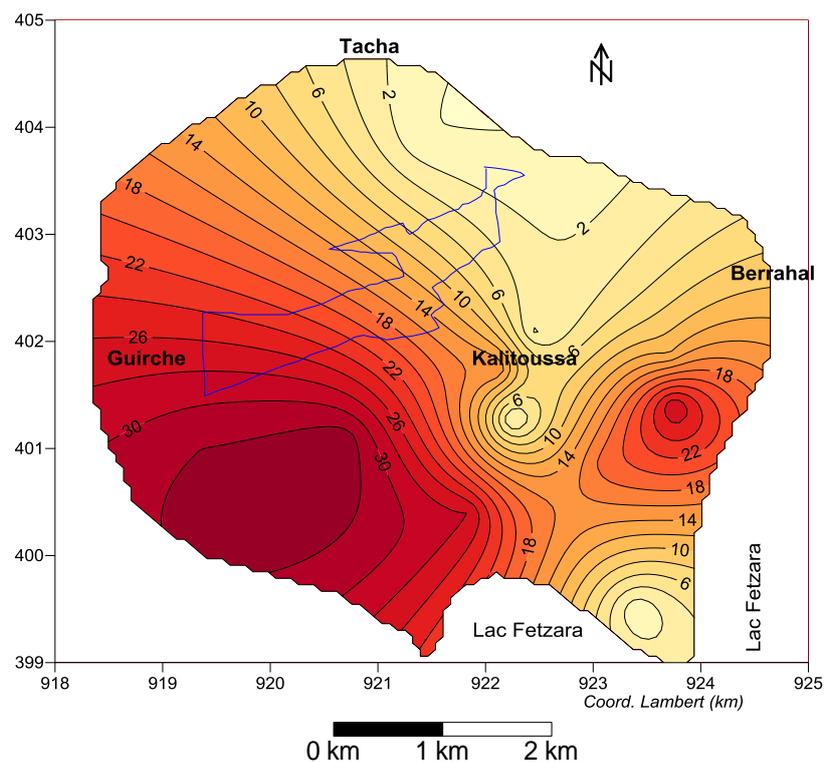


Fig. 61 : Carte de distribution de Hg

V.3.6.10. Le plomb (Pb)

D'après Juste *et al.*, (1995), le plomb serait le micro-polluant métallique le moins mobile dans le sol. Ainsi, dans la gamme de pH allant de 5 à 9, et à concentration totale molaire identique, Pb serait 100 fois moins mobile que Cd. La grande affinité de la matière organique vis-à-vis du plomb expliquerait l'accumulation préférentielle de ce métal dans l'horizon de surface des sols. Le plomb serait également l'un des métaux les moins facilement transférés dans les parties aériennes des plantes.

La concentration moyenne en plomb de la croûte terrestre serait de l'ordre de 13 à 16 mg/kg. Pour les différents types de roches : gabbro 1,9 mg/kg, andésite 8,3 mg/kg, granites 22,7 mg/kg, schistes 23 mg/kg, grès 10 mg/kg.

Les schistes noirs, riches en pyrites et en matières organiques, seraient riches en plomb (30 mg/kg).

D'après Juste *et al.*, (1995), de nombreux auteurs s'accorderaient pour affirmer que les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg/kg (moyenne 15), tandis que les sols situés loin des centres urbains et industriels mais affectés par des contaminations diffuses présenteraient des concentrations comprises entre 30 et 100 mg/kg. Des concentrations supérieures à 110 mg/kg de plomb traduiraient l'existence d'une source polluante à proximité.

Les apports anthropogènes résultent de cinq groupes d'activités.

- les sources principales sont liées à l'utilisation de composés organométalliques comme anti-détonants dans les moteurs à explosion. Le métal est rejeté par les gaz d'échappement sous la forme d'aérosols ou de poussières associant Pb, Br et Cl. Une partie de ces composés se dépose sur les chaussées ou à proximité (moins de 50 m) et le reste est entraîné dans les couches supérieures de l'atmosphère. On estime que plus de 95 % du plomb susceptible de contaminer l'environnement par retombées atmosphériques aurait pour origine le trafic automobile.
- les sources industrielles : le plomb peut être libéré dans leur environnement immédiat par des usines traitant le minerai ou réalisant la récupération des batteries ou encore pratiquant l'affinage du plomb ;
 - les déblais de mines et les poussières de crassiers ;
 - les sources urbaines : boues de stations d'épuration ;
 - certains traitements pesticides à base...

Les concentrations en Pb dans la zone d'étude marquent aussi une affinité de pollution, on rencontre des teneurs supérieures à 20 mg/kg au niveau des échantillons S2, S3, S6, S11 et S9, ce dernier qui se trouve au centre de la zone d'étude, avec la teneur maximale enregistrée de 102 mg/kg ne laisse aucun doute sur l'implication des rejets R1 et R2 de l'industrie de transformation de métaux et de galvanisation dont l'impact est assez significatif sur la dégradation de l'environnement et la qualité des eaux souterraines de la région, puisque l'échantillon S9 se trouve à proximité de ces rejets (**Fig. 62 et 63**).

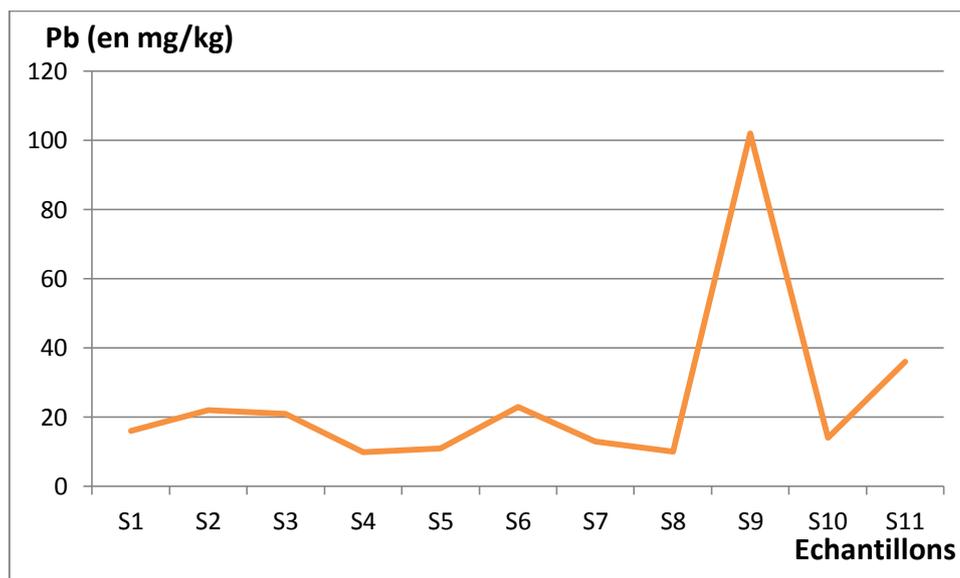


Fig. 62 : Teneurs en Pb

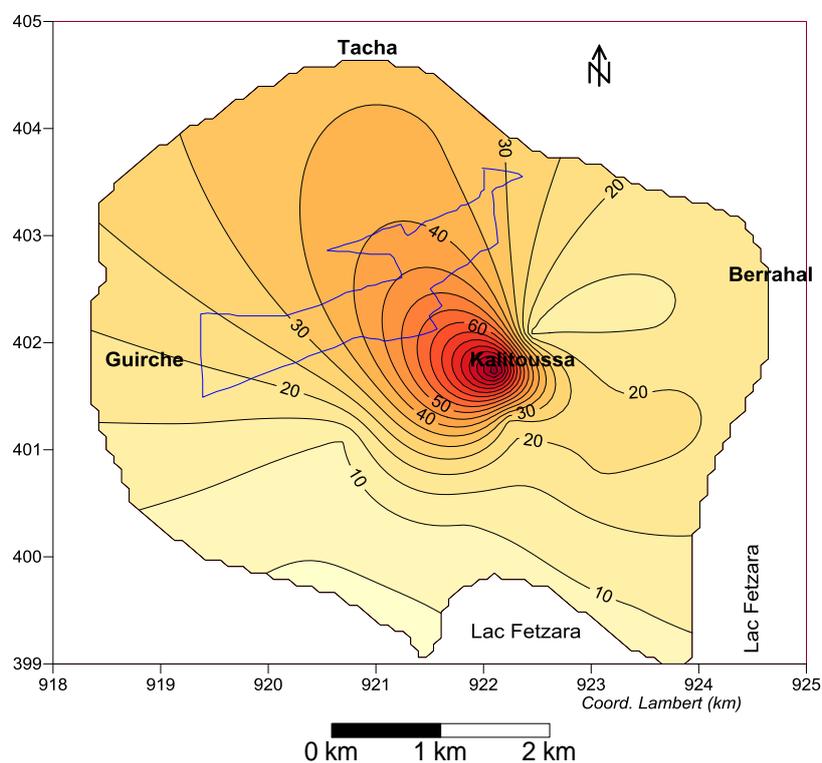


Fig. 63 : Carte de distribution de Pb (en mg/kg)

V.3.6.11. L'aluminium (Al)

L'aluminium est un métal réactif blanc argenté. Si cela le rend inerte aux acides, il reste malgré tout attaqué par les alcalis. C'est l'élément métallique le plus abondant de la croûte terrestre (82000 mg/kg) et est extrait de l'oxyde hydraté, Bauxite, par électrolyse de l'oxyde dissout dans de l'hexafluoroaluminat de sodium fondu (cryolithe).

Le métal a de bonnes propriétés thermiques et est malléable et ductile. L'aluminium et ses alliages sont largement utilisés pour diverses applications industrielles.

Son abondance dans la zone d'étude est strictement acceptable, la teneur maximale est mesurée au niveau de l'échantillon S4 avec 21120 mg/kg (Fig. 64), les parties Nord et Sud-Est de la région sont les plus riches en cet élément, ces dernières qui forment les dépressions de la plaine de Tacha et du lac Fetzara où s'accumulent les eaux superficielles (Fig. 65).

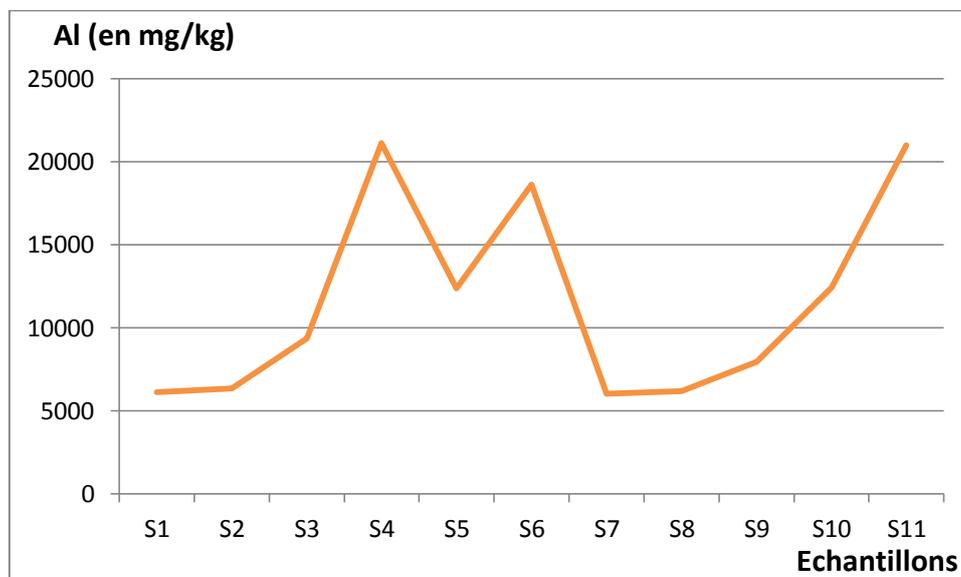


Fig. 64 : Teneurs en Al

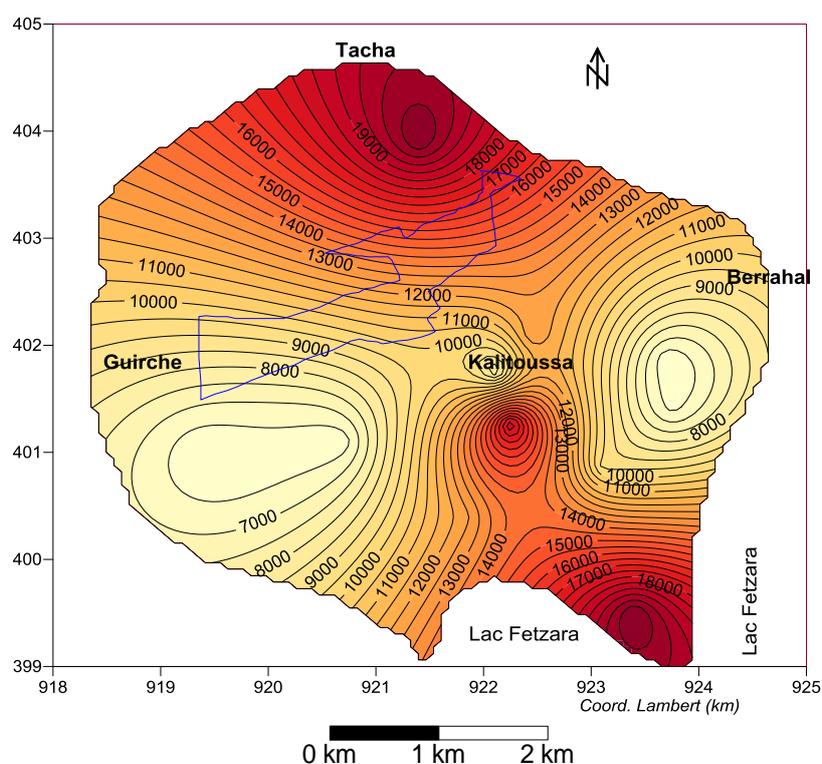


Fig. 65 : Carte de distribution de Al (en mg/kg)

V.3.6.12. Le vanadium (V)

Le vanadium est un métal de transition, il peut se comporter comme un métal ou comme un non-métal et peut aussi bien former des sels cationiques qu'anioniques, de nombreux états de valence, qui s'étendent de +2 à +5; l'état +5 étant la forme principale d'oxydation (Lagerkvist *et al.*, 1986).

Le vanadium (+5) est réduit en vanadium (+4) par des agents réducteurs relativement doux. Presque tous les complexes de vanadium (+4) sont anioniques et quelques uns sont non-électrolytes. Le vanadium (+4) forme un grand nombre de complexes à cinq ou six coordonnées, tel que l'acétylacétonate vanadyle et les porphyrines vanadyles que l'on retrouve dans le pétrole brut.

Le vanadium a des usages industriels importants, notamment en métallurgie ferreuse où on utilise de 75 à 85 % de tout le vanadium produit comme élément d'alliage pour la fabrication d'aciers spéciaux. La teneur Recommandée pour la qualité des sols agricoles et industriels concernant le vanadium d'après le conseil canadien des ministres de l'environnement (1999) est de 130 mg/kg.

Les concentrations en cet élément sont tous inférieures à la norme, la teneur maximale enregistrée au niveau de S4 avec 52 mg/kg plus au Sud en contact avec le lac Fetzara, et la teneur minimale de 11 mg/kg au niveau de S1 plus à l'Est, toujours en contact avec le lac (Fig. 66 et 67).

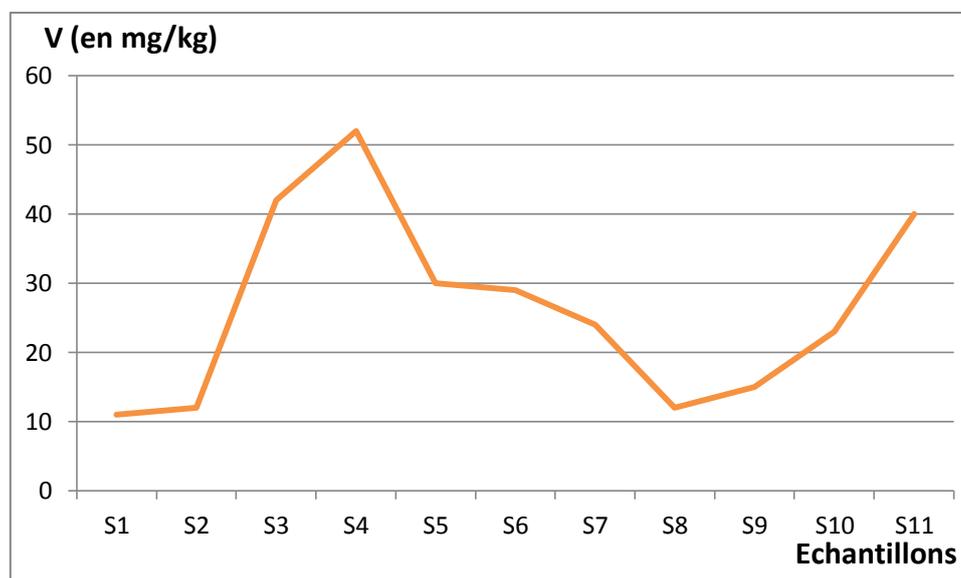


Fig. 66 : Teneurs en V

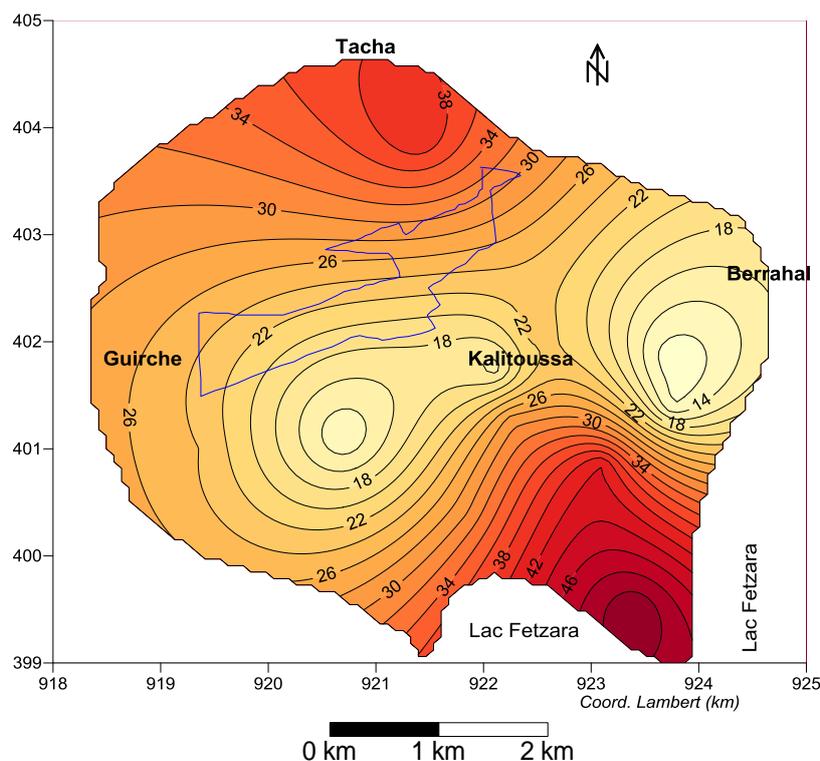


Fig. 67 : Carte de distribution de V (en mg/kg)

V.3.6.13. L'arsenic (As)

L'arsenic est un élément ubiquiste que l'on trouve dans l'atmosphère, dans les milieux aquatiques, les sols, les sédiments et les organismes vivants. Les teneurs vont de moins de 2 mg/kg (fond géochimique) à plus de 1000 mg/kg (anomalies géochimiques). L'arsenic est présent dans quatre environnements géologiques distincts : les franges externes de certains granites intrusifs, certaines grandes structures tectoniques de plusieurs dizaines de kilomètres d'extension, les niveaux sédimentaires du début du Paléozoïque et les marges sédimentaires de certains massifs cristallins.

L'arsenic est un élément chalcophile, il se combine facilement au soufre pour former des sulfo-arséniures de Fe, Ni, Co ou Cu ; les espèces les plus fréquentes des minéralisations primaires sont l'arsénopyrite (FeAsS), le réalgar (AsS) et l'orpiment (As_2S_3).

L'arsenic ayant la particularité d'être associé à beaucoup de métaux, il a été utilisé comme indicateur pour la prospection minière, en particulier l'or. Le principal apport naturel d'arsenic dans l'environnement est le volcanisme et a été estimé entre 2 800 et 8 000 t.an⁻¹.

L'altération des roches constitue un autre apport. Les hydrocarbures, plus particulièrement le charbon, contiennent de l'arsenic, celui-ci est principalement associé à la pyrite.

Les activités humaines (fonderies, combustion du charbon et différentes activités industrielles et minières) constituent la majorité des apports d'arsenic à l'environnement. Il se retrouve dans les sols sous différentes formes et peut par divers mécanismes de transfert se déplacer d'un compartiment à un autre (exemple : sol vers nappe). Il peut aussi se retrouver piégé. L'adsorption représente un mécanisme majeur dans le piégeage de l'arsenic. Les oxyhydroxydes métalliques s'avèrent pour la plupart de bons pièges. La mobilité de l'arsenic va aussi être étroitement liée aux conditions rédox du milieu. Pour des valeurs de pH proches de celles que l'on rencontre généralement dans le milieu naturel, l'arsenic (V) va avoir tendance à être piégé en plus grande quantité sur les phases de type oxyhydroxyde de fer que

l'arsenic (III). Ainsi, en milieu réducteur, les teneurs en arsenic dissous seront souvent plus élevées qu'en milieu oxydant du fait de la plus grande mobilité de l'arsenic (III).

Les valeurs guides en matière de pollution des sols pour des concentrations exprimées en mg/kg de matière sèche sont de 37 à 120 mg/kg, (Laperche V., et al., 2003).

Les concentrations de l'arsenic dans la zone d'étude sont acceptables et ne dépassent pas les normes. La teneur maximale de 6,4 mg/kg dosée au niveau de S3 au Sud-Est de la région où on rencontre les concentrations les plus remarquables. Par contre, la plus faible teneur est de 0,5 mg/kg enregistrée sur l'échantillon S7 plus à l'Ouest de la région où les concentrations sont mineures (**Fig. 68 et 69**).

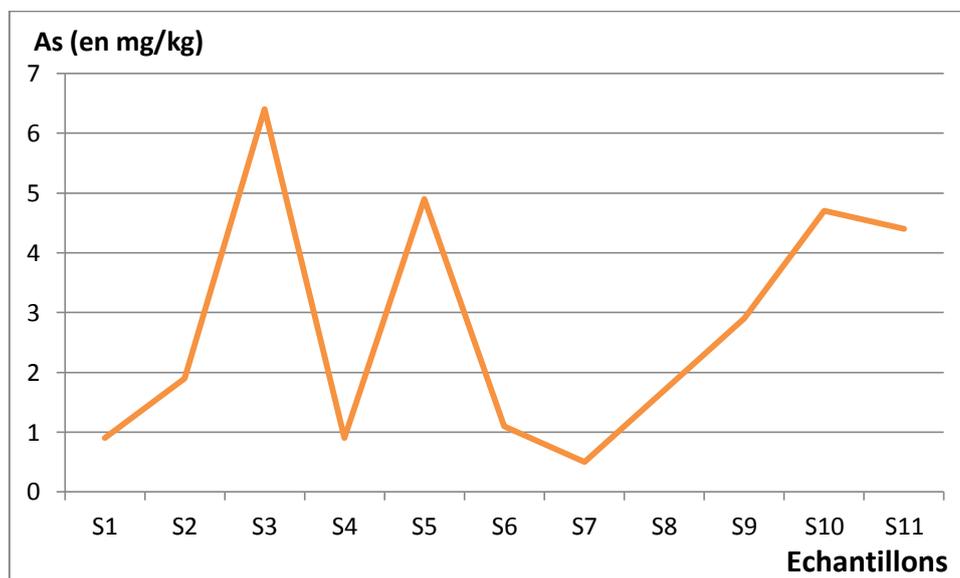


Fig. 68 : Teneurs en As

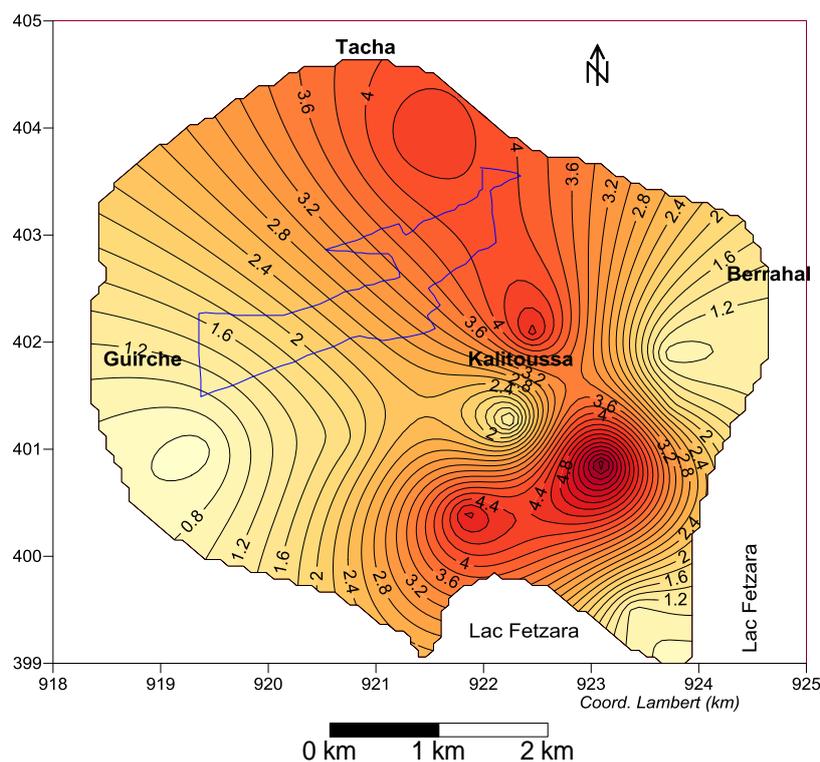


Fig. 69 : Carte de distribution de As (en mg/kg)

V.3.6.14. Le rubidium (Rb)

Le rubidium, élément métal pur, liquide vers 40 °C. C'est un métal alcalin, il s'enflamme spontanément dans l'air et réagit violemment avec l'eau. Il peut être obtenu liquide à température ambiante grâce au phénomène de surfusion, comme le césium et le gallium.

On le trouve sous forme de traces dans des minéraux de la carnallite ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et la triphylite (LiFePO_4).

Utilisations : cellules photovoltaïques, médecine, datation des roches,...

Il est abondamment réparti dans la nature, mais on ne le trouve que par petites quantités, dans la croûte terrestre, il a une concentration de l'ordre de 310 mg/kg.

Le Rubidium se trouve à des concentrations qui ne dépassent pas les normes pour tous les échantillons, les teneurs maximales sont enregistrées aux extrêmes Sud de la région pour S4 en contact avec le lac Fetzara avec 83 mg/kg et au Nord pour S11 avec 58 mg/kg. Les autres endroits de la zone d'étude ne possèdent que des teneurs très faible allant jusqu'à 11 mg/kg pour S7 et S8 (**Fig. 70 et 71**).

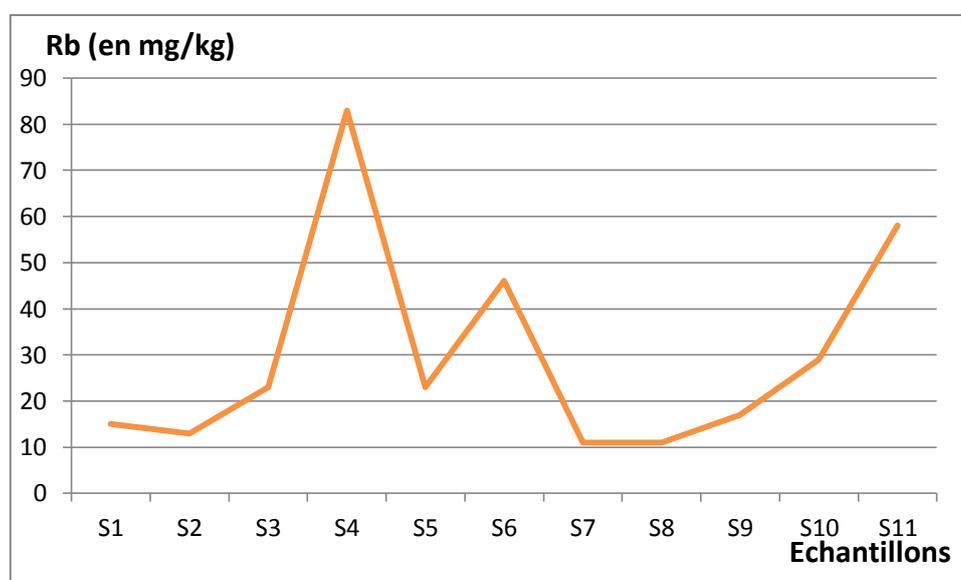


Fig. 70 : Teneurs en Rb

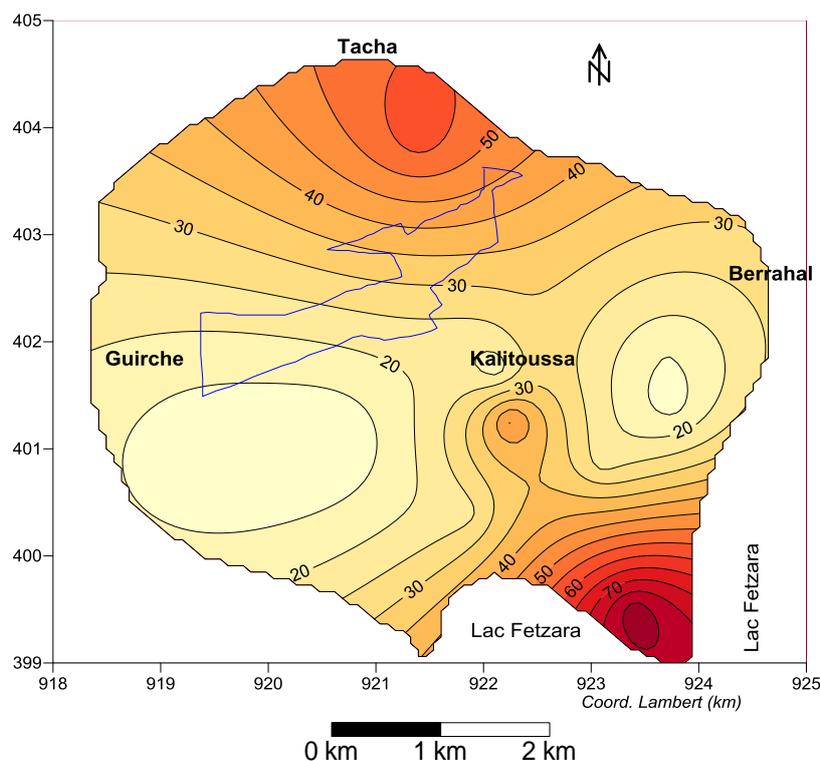


Fig. 71 : Carte de distribution de Rb (en mg/kg)

V.3.6.15. Le strontium (Sr)

Le strontium sous sa forme élémentaire, est présent naturellement dans l'environnement (les roches, le sol, l'eau, l'air). Les composés du strontium peuvent se déplacer dans l'environnement assez facilement car beaucoup d'entre eux sont solubles.

Il peut aussi infiltrer l'eau après avoir été dans les sols. Seule une petite partie dans l'eau provient des particules de poussières de l'air. L'augmentation des concentrations dans le sol peut aussi être favorisée par les activités humaines telles que le rejet de cendre de charbon. Le strontium dans le sol se dissout dans l'eau, par conséquent, il est susceptible de se déplacer plus profondément et de rejoindre les eaux souterraines. A cause de sa nature, une partie peut être absorbée par les poissons, les légumes, le bétail et d'autres animaux.

Les concentrations en strontium radioactif dans l'environnement sont relativement faibles (0,015 % de la croûte terrestre) et les particules se retrouvent toujours finalement dans le sol ou dans le fond des océans, où elles se mélangent aux autres particules de strontium.

Toutes les concentrations sont normales, les plus élevées caractérisent la partie Nord et sont enregistrées au niveau de S10 (49 mg/kg) et les plus faibles pour S8 et S7. Ce dernier affiche 9 mg/kg et se situe plus à l'Ouest (**Fig. 72 et 73**).

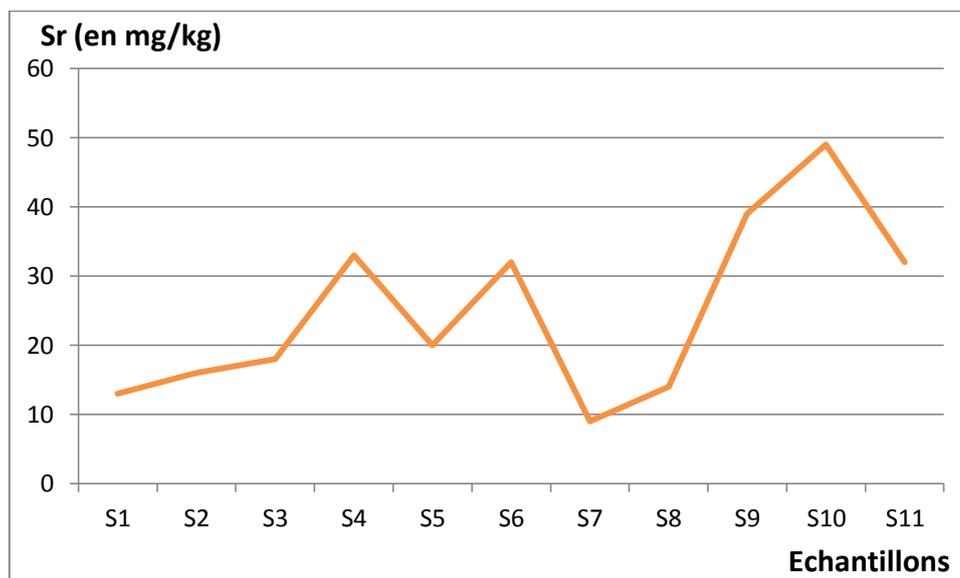


Fig. 72 : Teneurs en Sr

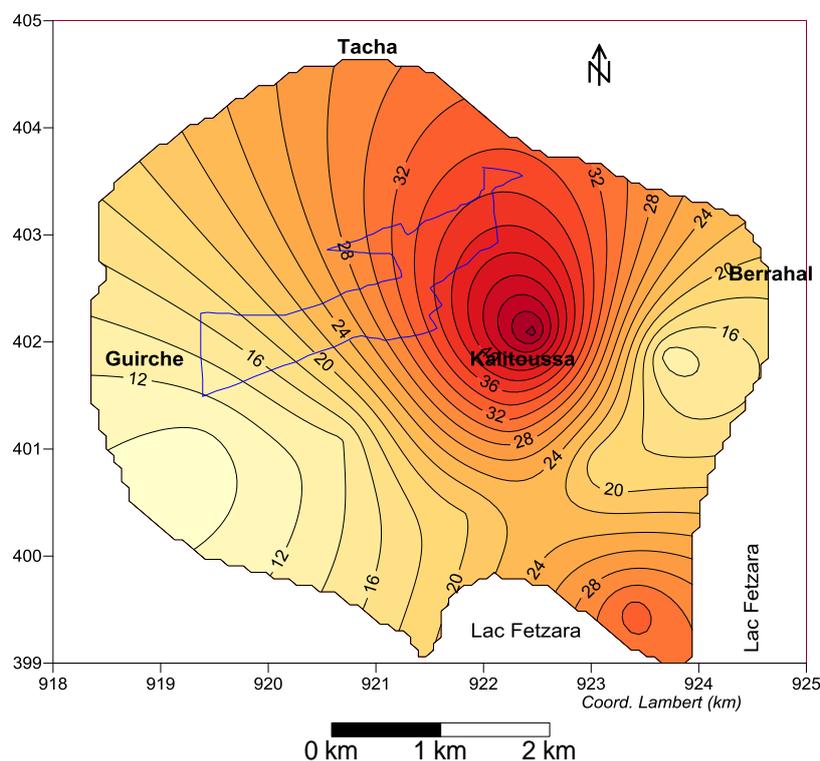


Fig. 73 : Carte de distribution de Sr (en mg/kg)

V.3.6.16. L'yttrium (Y)

L'yttrium appartient à la famille des terres rares (lanthanides + scandium + yttrium). Les terres rares ont tous des propriétés comparables, ils sont essentiellement présents dans deux types de minerais: la monazite $(Ce, La, \dots)PO_4$ et la bastnaésite $(Ce, La, \dots)(CO_3)F$ et sont utilisés en catalyse, métallurgie, dans les verres et les céramiques et aussi dans certaines lampes (fluorescente,...).

Il est principalement dangereux sur le lieu de travail, car on peut alors en respirer les vapeurs et les gaz avec l'air. Ce qui peut provoquer des embolies pulmonaires, surtout lors de

longues expositions. En général, l'yttrium et les terres rares ont tendance à s'accumuler dans le foie lorsqu'ils sont absorbés. Il est rejeté dans l'environnement notamment par les industries productrices d'essence (catalyseur pour craquage, additifs). La quantité moyenne d'yttrium est de 30 mg/kg dans la croûte terrestre.

Leurs teneurs dans la zone d'études sont tout à fait normales, la concentration la plus élevée est enregistrée au niveau de S4 (8 mg/kg) et la plus faible avec 2 mg/kg pour S7 et S8. Les parties qui présentent les teneurs les plus élevées sont localisées au Nord et au Sud de la zone d'étude (**Fig. 74 et 75**).

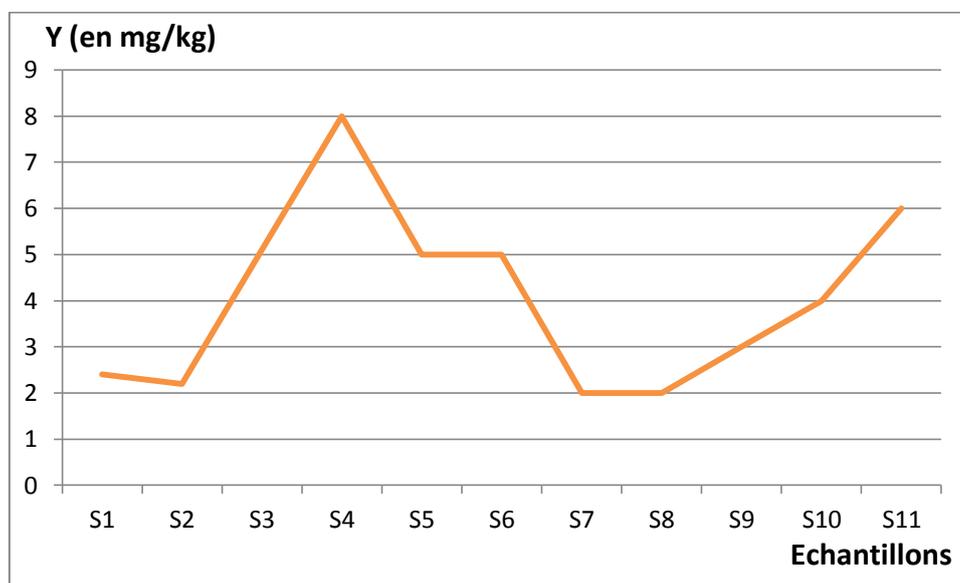


Fig. 74 : Teneurs en Y

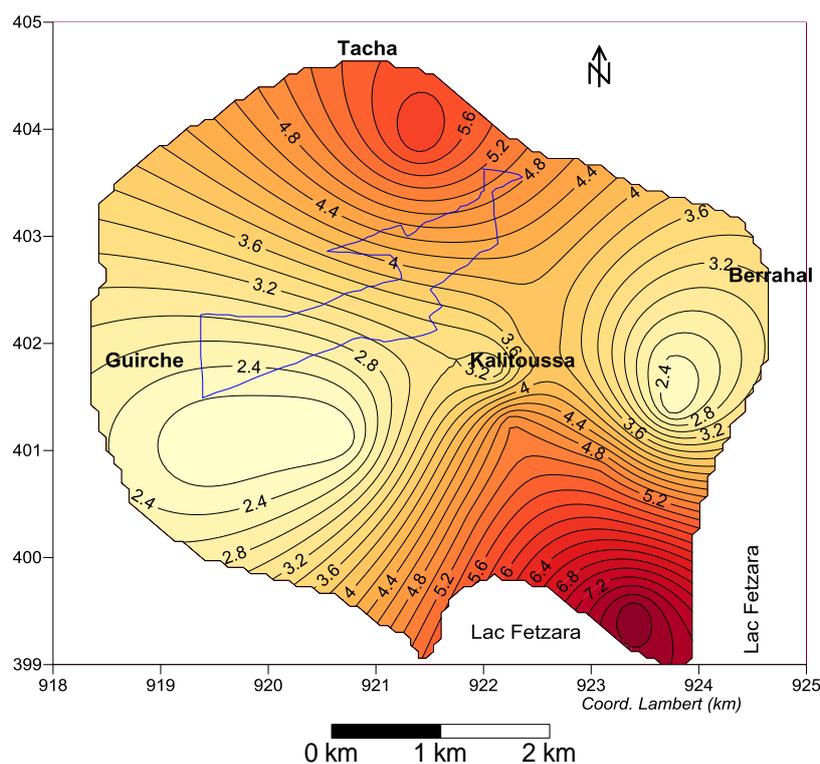


Fig. 75 : Carte de distribution de Y (en mg/kg)

V.3.6.17. Le molybdène (Mo)

Le molybdène est un métal de transition. Le métal pur est d'aspect blanc métallique et il est très dur. Il a été souvent confondu avec du minerai de graphite et de galène. Il a un haut module d'élasticité et seuls le tungstène et le tantale, des métaux plus aisément disponibles, ont des points de fusion plus élevés. C'est un agent d'alliage valable, car il contribue à la trempabilité et à la dureté des aciers éteints. Il améliore également la force de l'acier aux températures élevées. Du molybdène est employé en alliages, électrodes et catalyseurs. Il intervient dans la fixation de l'azote chez les légumineuses par les bactéries des nodosités.

La disponibilité du molybdène s'élève de pair avec le pH du sol. Dans les sols acides, elle peut donc s'améliorer avec des chaulages. Des carences peuvent aussi se produire dans les sols qui manquent d'eau.

Le molybdène est un métal rare (0,001 % de l'écorce terrestre). Ses principaux minerais sont la molybdénite (MoS_2), la wulfénite (PbMoO_4), la molybdite ($\text{MoO}_3, \text{H}_2\text{O}$), la powellite $\text{Ca}(\text{MoW})\text{O}_4$ et quelques autres sans intérêt économique. Actuellement, seule la molybdénite est exploitée (P. Calmon, J. M. Metivier, 2003).

En dehors des gisements, les concentrations en molybdène dans l'environnement sont généralement faibles. Les teneurs dans les sols sont d'environ 2 mg/kg sec, dans l'eau entre 0,01 et 0,001 mg/l selon qu'il s'agit d'eau de mer ou de rivière. De manière générale, le molybdène dans les sols est souvent associé, soit avec les argiles, soit avec les minéraux ferreux (Coughtrey et Thorne, 1983).

Dans notre zone d'étude, les concentrations en Mo sont normales à l'exception de la partie Est où en rencontre l'échantillon S2 fortement concentré en cet élément avec 4 mg/kg, il est à signaler que cet échantillon se trouve à proximité d'un ruisseau évacuant les rejets industriels liquides (R1 et R2) directement au lac Fetzara. Ces rejets riches en métaux, proviennent des entreprises qui activent dans la transformation de métaux, la galvanisation ainsi que l'agro-alimentaire (Fig. 76 et 77).

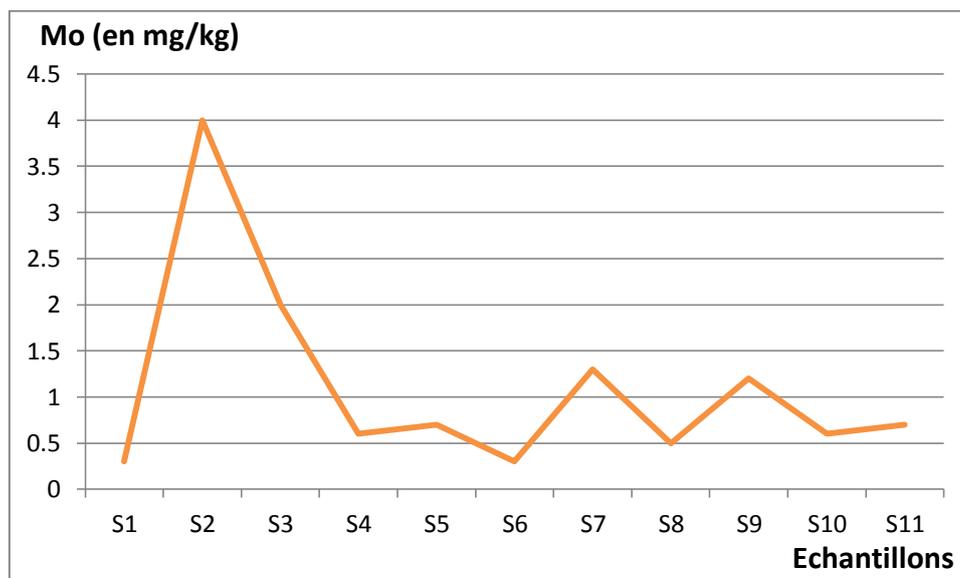


Fig. 76 : Teneurs en Mo

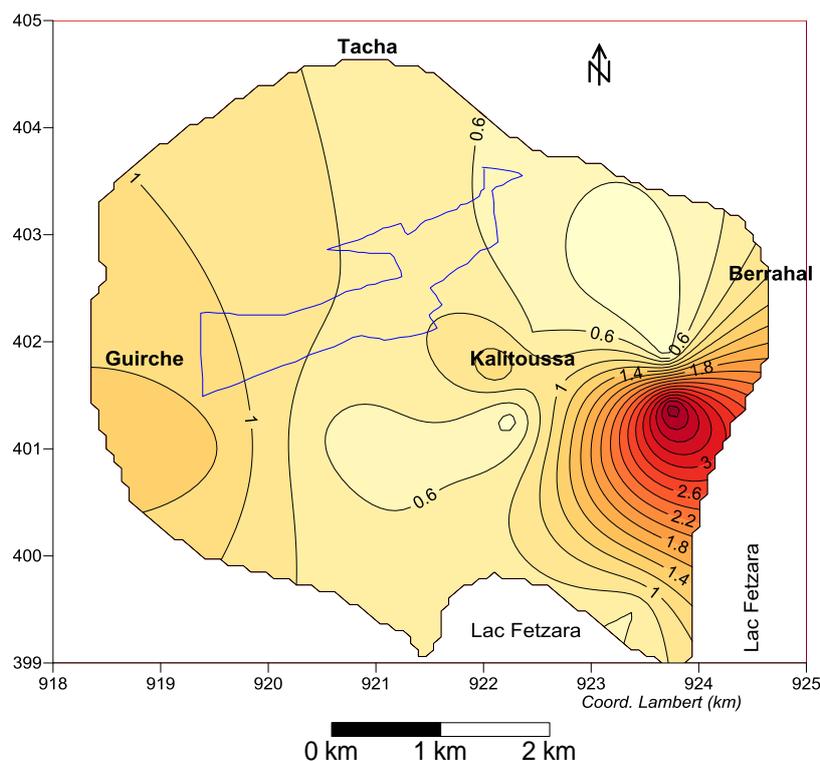


Fig. 77 : Carte de distribution de Mo (en mg/kg)

V.3.6.18. L'étain (Sn)

C'est un métal gris-argent, malléable, moyennement ductile à température ambiante. L'étain possède un caractère ionique prédominant dans ses oxydes (SnO_2 , les spinelles Mg_2SnO_4 et Co_2SnO_4 , les pérovskites CaSnO_3 et PbSnO_3 ...) et ses fluorures (SnF_4 , LiSnF_6 , Na_2SnF_6 ...). L'ion Sn^{4+} y possède toujours la coordinence 6. L'étain en tant qu'atome seul ou molécule n'est pas très toxique, la forme toxique est la forme organique de l'étain. Les composés organiques de l'étain peuvent rester dans l'environnement pendant de longues périodes, sa quantité étant de 2,2 mg/kg dans la croûte terrestre.

Les teneurs en Sn dans la zone d'étude, semblent normales à l'exception de la partie centrale et l'extrême Est où on rencontre les échantillons S2 (3,1 mg/kg) et S9 (3,3 mg/kg). Ces échantillons se trouvent également à proximité de l'effluent qui évacue les rejets (R1 et R2) des entreprises de transformation de métaux, de galvanisation et d'agro-alimentaire (**Fig 78 et 79**).

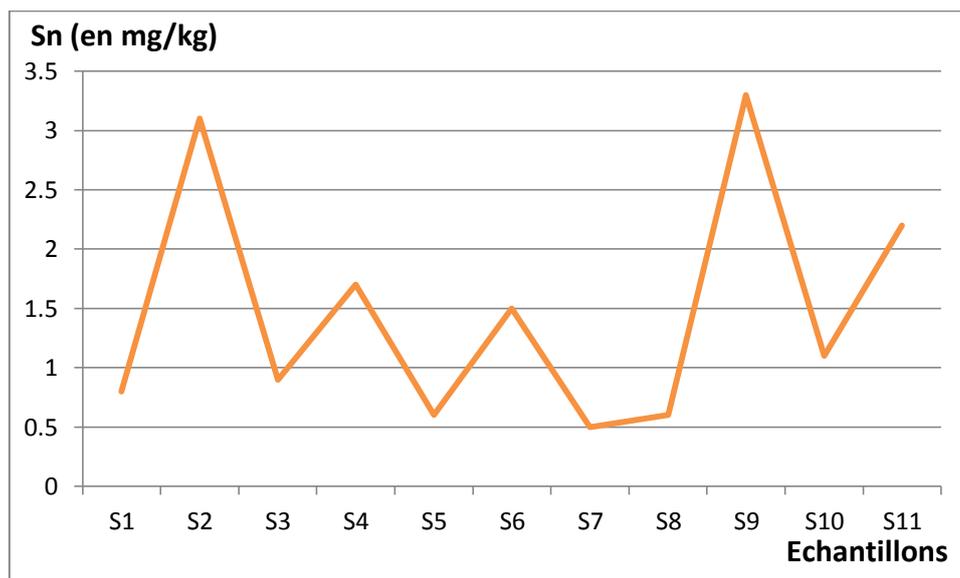


Fig. 78 : Teneurs en Sn

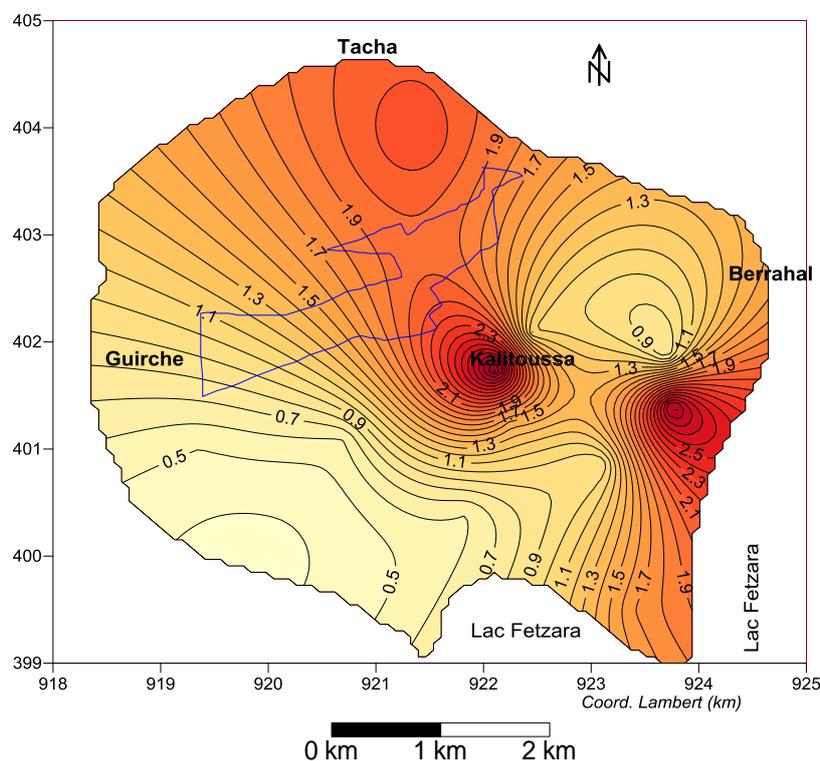


Fig. 79 : Carte de distribution de Sn (en mg/kg)

V.3.6.19. L'antimoine (Sb)

L'antimoine est présent dans la lithosphère sous forme de sulfures d'antimoine, d'antimonides métalliques ou d'oxydes d'antimoine (Edwards et al., 1995).

Ainsi, Adriano (1986) a montré que lorsque l'antimoine est présent dans les sols sous forme soluble, il est le plus souvent sous forme d'antimonate. Kabata-Pendias et Pendias (1992) montrent que l'antimoine est souvent présent sous forme soluble complexée avec les acides humiques du sol. En revanche, ils considèrent que cette forme est très mobile dans l'environnement.

L'antimoine forme des espèces anioniques et son adsorption est plus importante dans des conditions faiblement acides. Cette adsorption est corrélée avec les teneurs en fer, manganèse et aluminium des sols dans la mesure où l'antimoine copécipite avec les oxyhydroxydes de ces éléments (ATSDR, 1992). L'exposition professionnelle par inhalation à du trioxyde d'antimoine et/ou des poussières de pentoxyde d'antimoine (8,87 mg d'antimoine/m³ ou plus) a entraîné des effets respiratoires incluant une stibiose (pneumoconiose stibiée), de la bronchite chronique, de l'emphysème chronique, des adhésions pleurales et des effets pulmonaires obstructifs (Cooper et *al.*, 1968 ; Potkonjak et Pavlovich, 1983) .

Un sol est considéré contaminé par l'antimoine, si la concentration en Sb est de l'ordre de 500 mg/ Kg ou plus (Hammel W., et *al.*, 2000)

Les concentrations en Sb dans la zone d'étude sont normales, tous les échantillons possèdent des teneurs faibles en cet élément, la plus élevée est de 1,9 mg/kg au niveau de S9 au centre de la région à proximité des rejets R1 et R2 (**Fig. 80 et 81**).

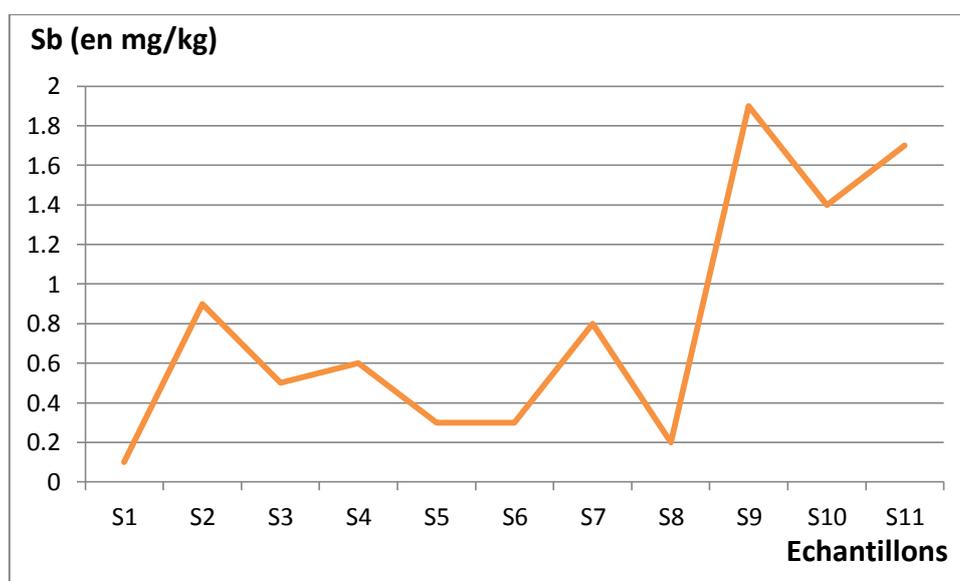


Fig. 80 : Teneurs en Sb

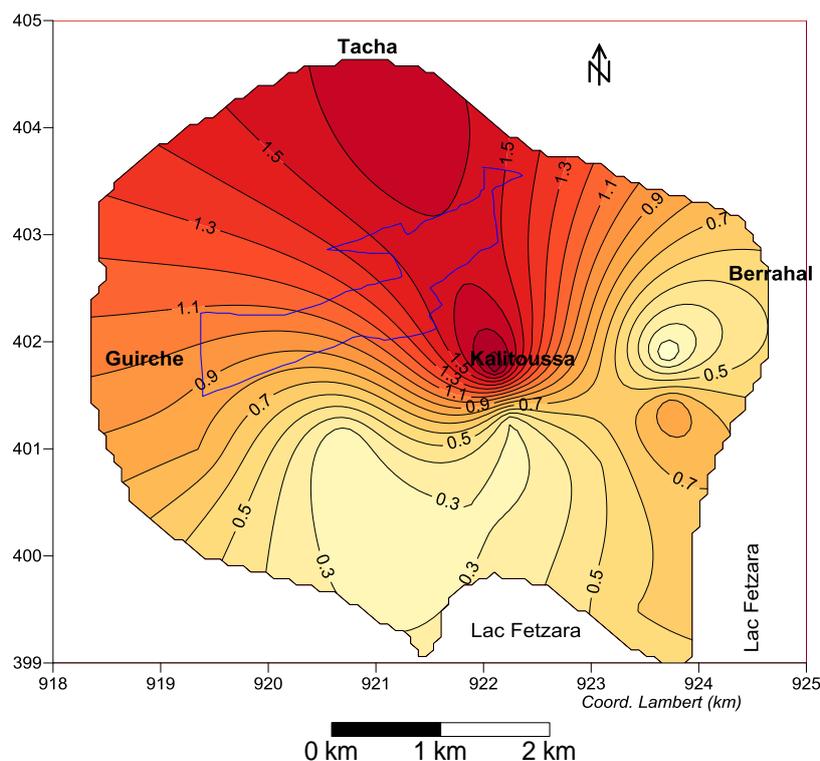


Fig. 81 : Carte de distribution de Sb (en mg/kg)

V.3.6.20. Le césium (Cs)

Le césium appartient à la classe des métaux alcalins. Chimiquement, il présente un seul degré d'oxydation correspondant au cation Cs^+ . Le césium possède 31 isotopes dont la masse varie de 114 à 145. Parmi eux, seul l'isotope 133 est stable. La période de décroissance radioactive est supérieure à l'année uniquement pour les isotopes 134 (2,2 ans), 135 ($2,9 \times 106$ ans) et 137 (30 ans) (C. Colle et *al.*, 2001).

Le césium est en général considéré comme très peu mobile dans la majorité des sols, (Colle et RousselDebet, 2000). Dans les sols « moyens » présentant une teneur en matière organique de l'ordre de quelques pourcents, la partition sol-solution de l'ion Cs^+ est majoritairement contrôlée par un mécanisme d'échange ionique avec les argiles (Poinssot et *al.*, 1999). Ce mécanisme concerne en particulier les montmorillonites ; en bordure des feuillettes apparaissent des sites FES (frayed edge sites) qui jouent un rôle déterminant dans la fixation sélective du Cs^+ (Cornell, 1993). En raison de sa forme ionique dominante, le mécanisme essentiel de sorption du césium est l'échange d'ions, et concerne principalement les minéraux argileux, en particulier l'illite, sans exclure les carbonates et les oxyhydroxydes. L'isotope stable, ^{133}Cs , existe naturellement, avec des concentrations allant de 0,3 à 25 mg/kg sec dans les sols (Coughtrey et Thorne, 1983).

Les concentrations de césium dans la zone d'étude sont inférieures à la norme de la valeur limite, la plus élevée est celle enregistrée à S4 avec 7,1 mg/kg, les endroits où on rencontre les plus grandes teneurs sont les parties de l'extrême Nord et le Sud de la région (**Fig. 82 et 83**)

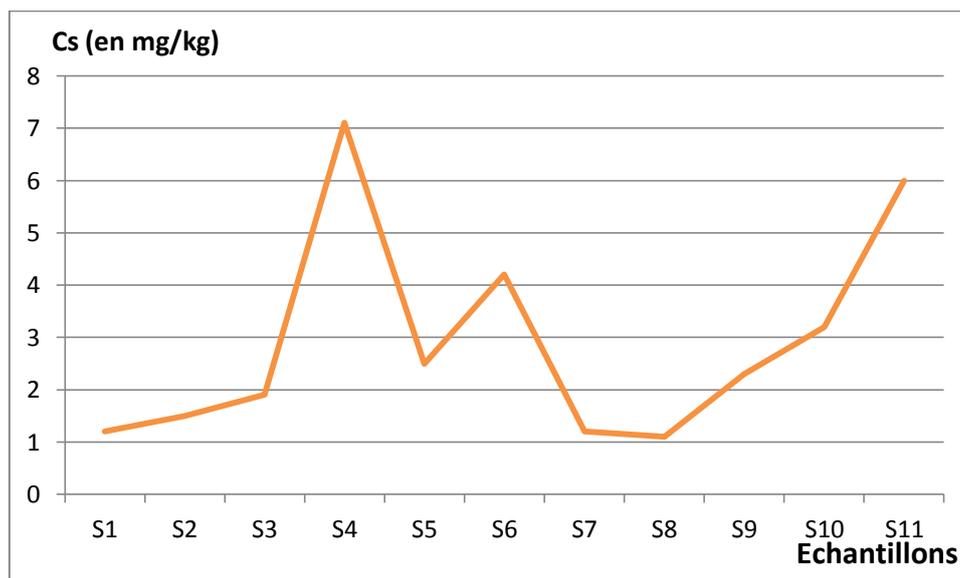


Fig. 82 : Teneurs en Cs

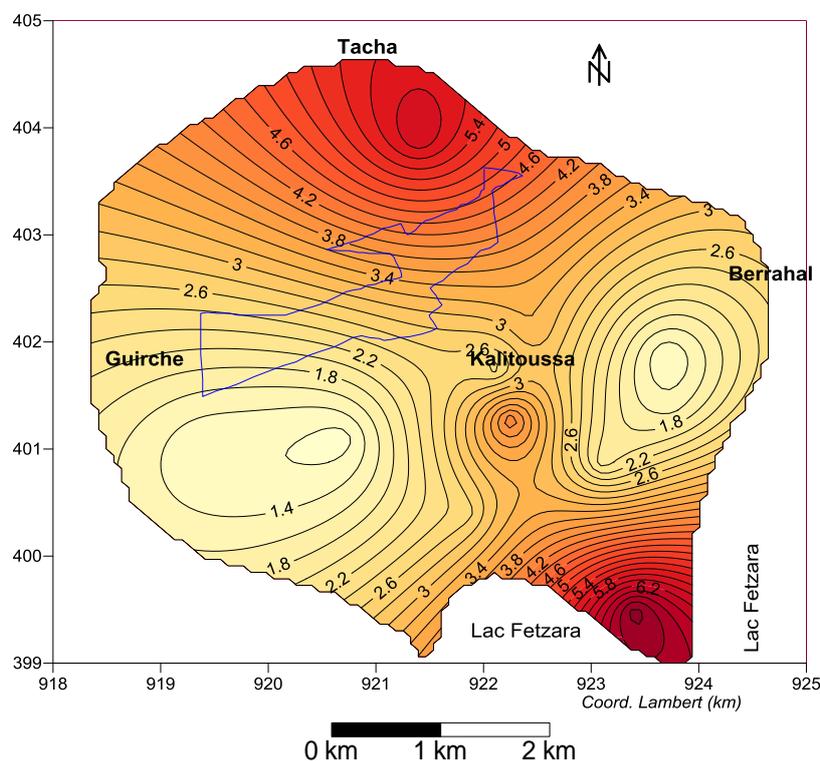


Fig. 83 : Carte de distribution de Cs (en mg/kg)

V.3.6.21. Le baryum (Ba)

Le baryum est un métal blanc argenté, malléable et, avec une densité de $3,59 \text{ g.cm}^{-3}$, est le plus dense des métaux alcalino-terreux. Il a 2 électrons de valence, qu'il perd facilement pour devenir un cation divalent. C'est un réducteur fort qui réagit violemment avec l'air, l'eau, les oxydants et les acides et de plus, il possède une grande affinité avec les halogènes, l'azote, l'hydrogène, le soufre et le phosphore ; il peut aussi avoir des liaisons ioniques avec le sélénium, le polonium et le tellure (Mahan, 1967).

On le rencontre dans de nombreux minéraux tels que : la baryte (BaSO_4), la norséthite ($\text{BaMg}(\text{CO}_3)_2$), la sambortite (BaSi_2O_5), la withérite (BaCO_3). La concentration du baryum dans des couches de sols arables ou issus de roches mères est sensiblement dans la même gamme. Le baryum issu de l'érosion des sols n'est pas très mobile car il est aisément précipité en tant que sulfate et carbonate, fortement absorbé par les argiles et spécifiquement absorbé sous forme d'oxyde et d'hydroxyde. Sa réactivité est telle qu'il peut prendre la place d'autres métaux alcalino-terreux sous forme d'oxyde (C. Madoz-Escande *et al.*, 2002).

Dans les sols, la concentration de référence est de 562 mg/kg (Vertacnik *et al.*, 1995).

Au niveau de notre zone d'étude, les concentrations sont normales, à l'exception de l'échantillon S9 où la teneur est plus élevée et dépasse largement la norme avec 1030 mg/kg. Sur la carte elle correspond à la partie centrale de la région tout près des rejets R1 et R2 (**Fig. 84 et 85**)

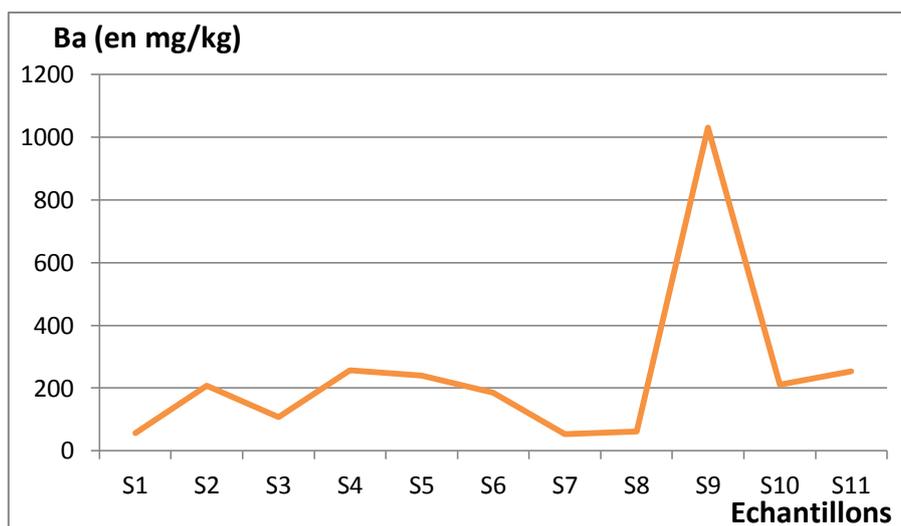


Fig. 84 : Teneurs en Ba

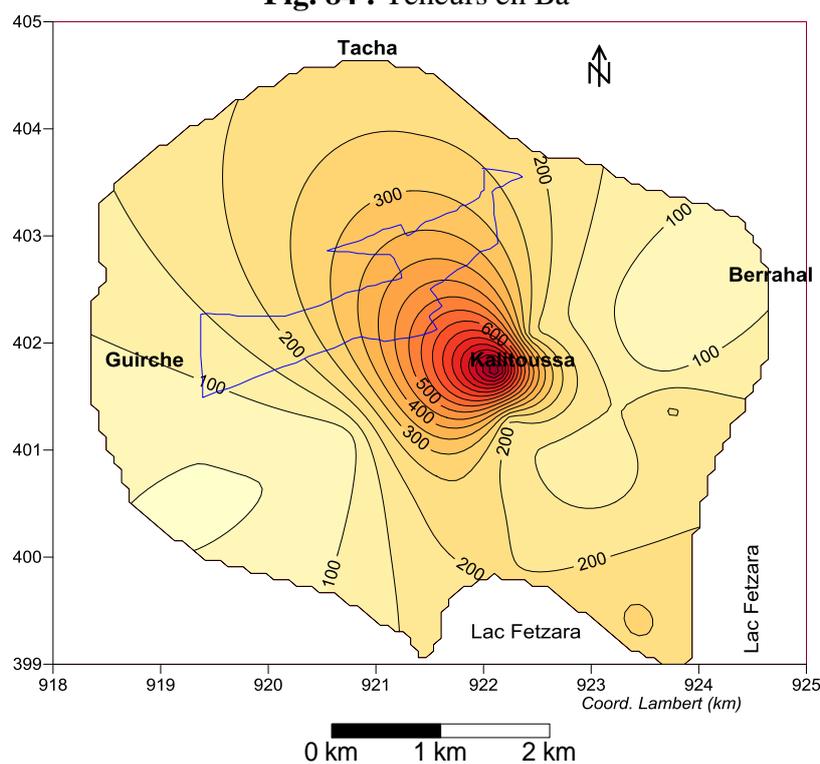


Fig. 85 : Carte de distribution de Ba (en mg/kg)

V.3.6.22. Le lanthane (La)

Le Lanthane appartient à la famille des terres rares. Les terres rares sont essentiellement présentes dans deux types de minerais: la monazite et la bastnaésite. Le lanthane est un métal doux, ductile et blanc qui s'oxyde rapidement à l'air. C'est l'un des éléments les plus réactifs du groupe des lanthanides, réagissant à l'eau pour produire du gaz hydrogène. On l'utilise dans la fabrication de certaines qualités de verres optiques qui ont des propriétés réfractrices spécifiques. On peut également l'utiliser dans les pierres de briquet et le La^{3+} est utilisé comme traceur biologique du Ca^{2+} . Les isotopes radioactifs du lanthane ont été testés pour le traitement du cancer.

Le lanthane et les terres rares en général ont tendance à s'accumuler dans le foie lorsqu'ils sont absorbés, en général ils sont rejetés dans l'environnement notamment par les industries productrices d'essence (catalyseur pour craquage, additifs). Son abondance dans la croûte terrestre est de 32 mg/kg (<http://www.goodfellow.com>).

Toutes les concentrations du lanthane dans la région sont normales, elles ne dépassent pas pour la plus élevée 25 mg/kg au niveau de l'échantillon S11, situé plus au Nord de la zone d'étude (**Fig. 86 et 87**).

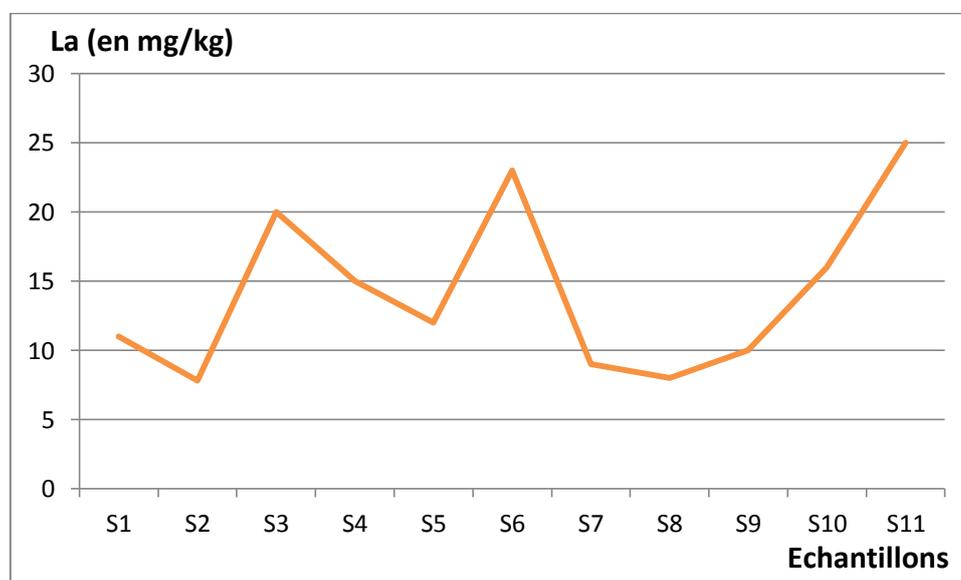


Fig. 86 : Teneurs en La

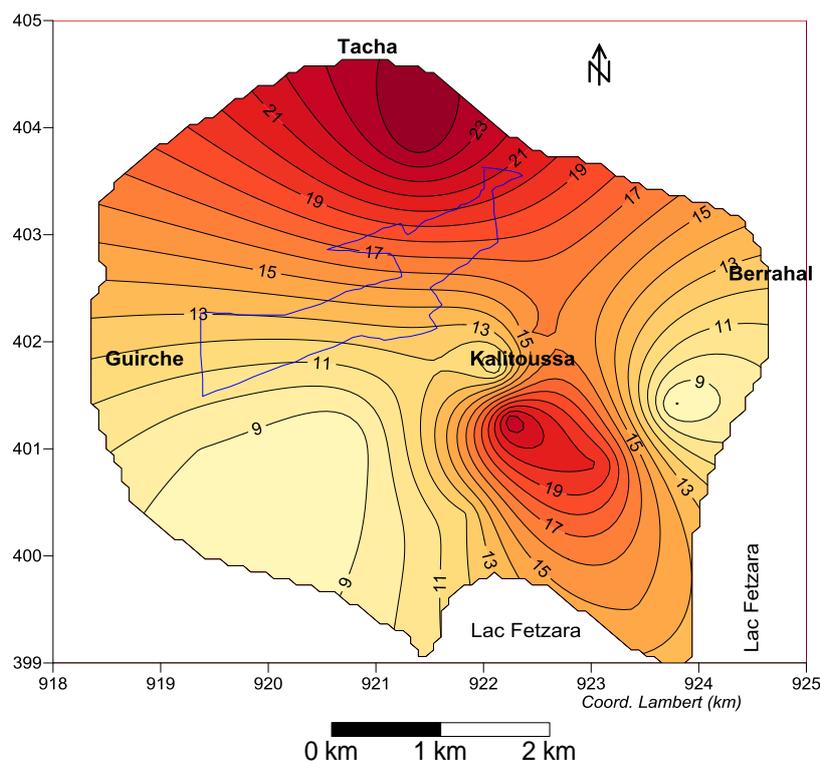


Fig. 87 : Carte de distribution de La

V.3.6.23. Le cérium (Ce)

Le cérium appartient à la série des lanthanides, il est constitué par le mélange de quatre isotopes : trois isotopes stables de masse 136, 138 et 140 et un isotope radioactif, de masse 142. Le cérium possède deux états d'oxydation : III et IV

Dans les sols, le cérium est fortement retenu par le complexe argilo-humique et seule une très faible fraction demeure extractible (environ 5 % dans les sols courants). Toutefois, cette disponibilité augmente sensiblement avec une diminution de pH et dans le cas de sols à faible capacité d'échange. Ainsi, à la suite d'un dépôt de radio-cérium à la surface d'un sol, il est prévisible que celui-ci ne connaîtra pratiquement pas de migration et que la contamination restera localisée dans l'horizon supérieur (Coughtrey et Thorne, 1983).

Le cérium semble relativement insoluble. Les formes solubles dominantes pour des pH allant de 4 à 8 sont $CeSO_4^+$ et Ce_3^+ . En général, le cérium tend à s'associer aux particules et matières en suspension, et la sorption croît avec le pH (Poston, 1986).

Dans les sols, les concentrations moyennes sont inférieures à celles des roches mères et la teneur de la croûte terrestre est estimée aux environs de 46 mg/kg (Colle C., Murlon C., et Henner P., 2003).

Les concentrations de cérium semblent un peu considérables, surtout au Nord de la zone d'étude. A cet endroit, il n'existe aucun rejet provenant de la zone industrielle et seul l'aspect de l'abondance naturelle en cet élément qui est favorisée. On dénote une teneur de 60 mg/kg dosée sur l'échantillon S11. D'autres teneurs assez considérables de l'ordre de 51 mg/kg sont enregistrées pour les échantillons S3 et S6 au Sud-Est (**Fig. 88 et 89**).

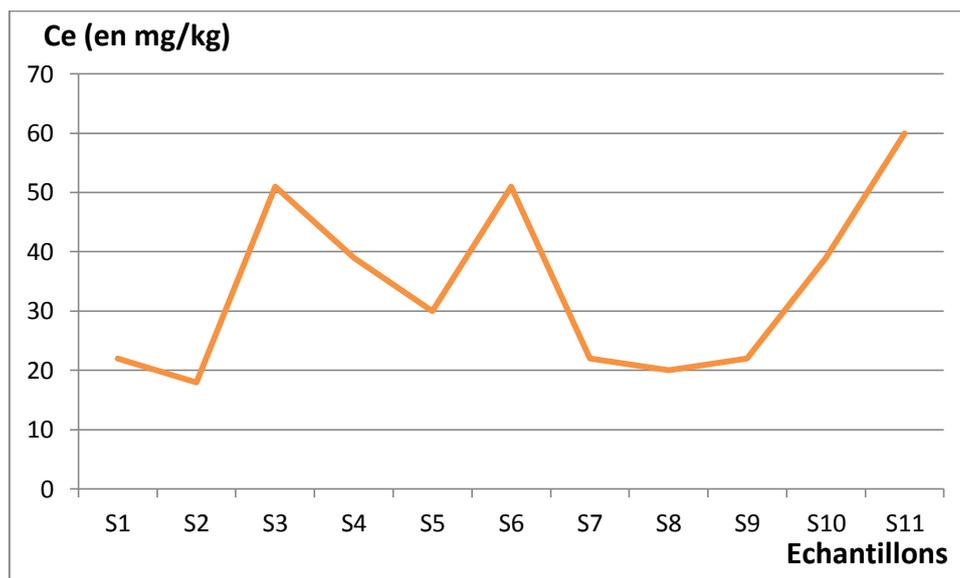


Fig. 88 : Teneurs en Ce

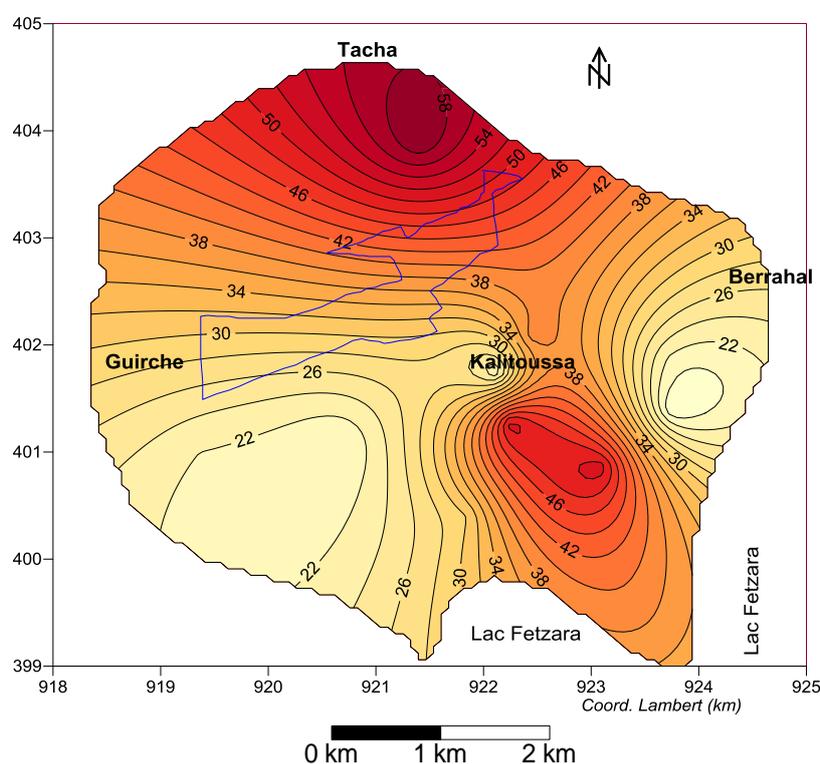


Fig. 89 : Carte de distribution de Ce (en mg/kg)

V.3.6.24. Le néodyme (Nd)

Le néodyme un élément du groupe des lanthanides. Il s'oxyde rapidement à l'air pour former un oxyde qui s'effrite rapidement pour faire apparaître le métal neuf. Le métal réagit lentement avec l'eau froide et rapidement avec l'eau chaude. On trouve le métal dans la monazite (CePO_4 , une source importante de terres rares et de thorium) et l'orthite. Les applications du néodyme pur sont limitées mais il est utilisé dans les alliages utilisés pour la fabrication d'aimants permanents et de "pierres à feu". On l'utilise également comme additif

dans les lasers à semi-conducteurs et les amplificateurs de lumière. Il a une abondance de 38 mg/kg dans la croûte terrestre (<http://www.goodfellow.com>).

Ses concentrations dans la zone d'étude sont inférieures aux normes limites de la pollution du sol, leur abondance est normale, la teneur la plus élevée est enregistrée pour l'échantillon S11 (24 mg/kg), la plus basse est de 8,5 mg/kg au niveau de S2, leur répartition dans la région est semblable que celle du cérium, il occupe les parties Nord et Sud-Est de la zone (**Fig. 90 et 91**).

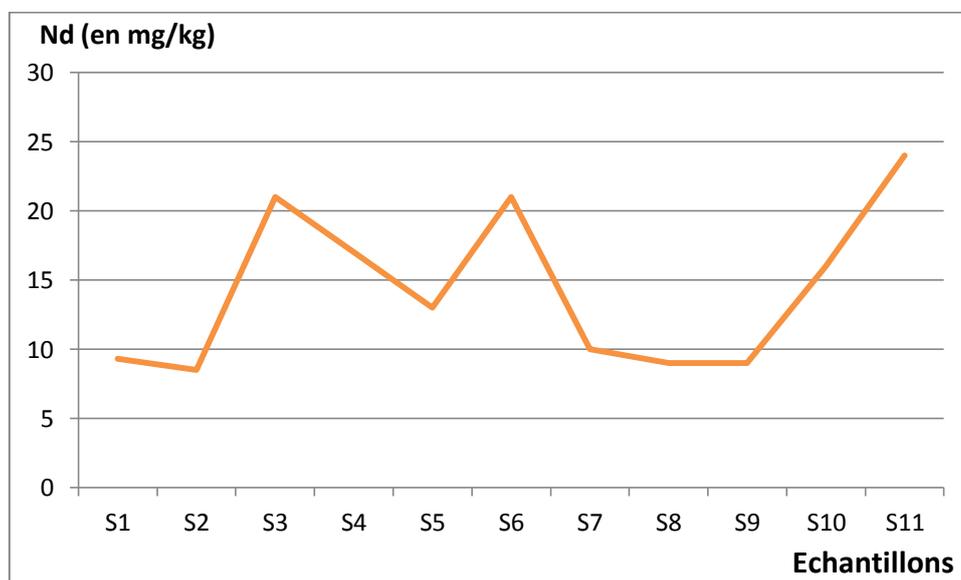


Fig. 90 : Teneurs en Nd

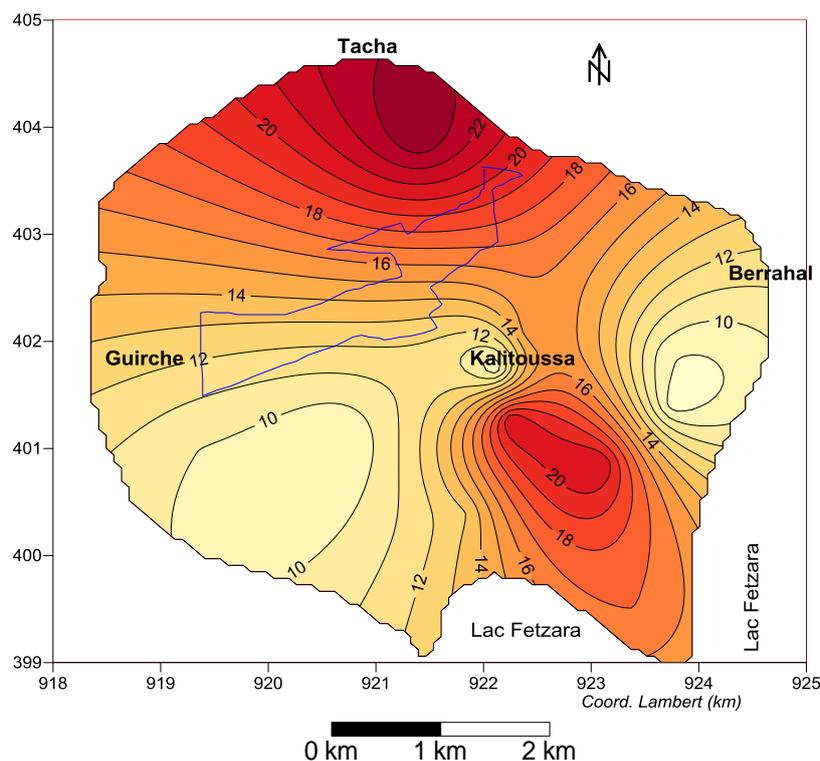


Fig. 91 : Carte de distribution de Nd (en mg/kg)

V.3.6.25. Le samarium (Sm)

Le samarium est un élément argenté, appartient à la famille des terres rares (lanthanides + scandium + Yttrium). Le samarium n'est pas un élément libre dans la nature, il se trouve fréquemment contenu dans la cérite, gadolinite, samarskite, bastnaésite et monazite, ces deux derniers minerais sont les plus rencontrés pour l'exploitation de Sm. Il est paramagnétique à température ambiante, il est utilisé dans la création des aimants et comme catalyseur dans les réactions chimiques ; sa concentration dans le sol peu varier de 2 à 23 mg/kg. Le samarium se trouve peu abondant dans la zone d'étude, avec une teneur maximale de 4,2 mg/kg au niveau de l'échantillon S11, leur distribution est identique que les trois éléments précédents, il occupe les parties Nord et Sud-Est de la région (**fig. 92 et 93**).

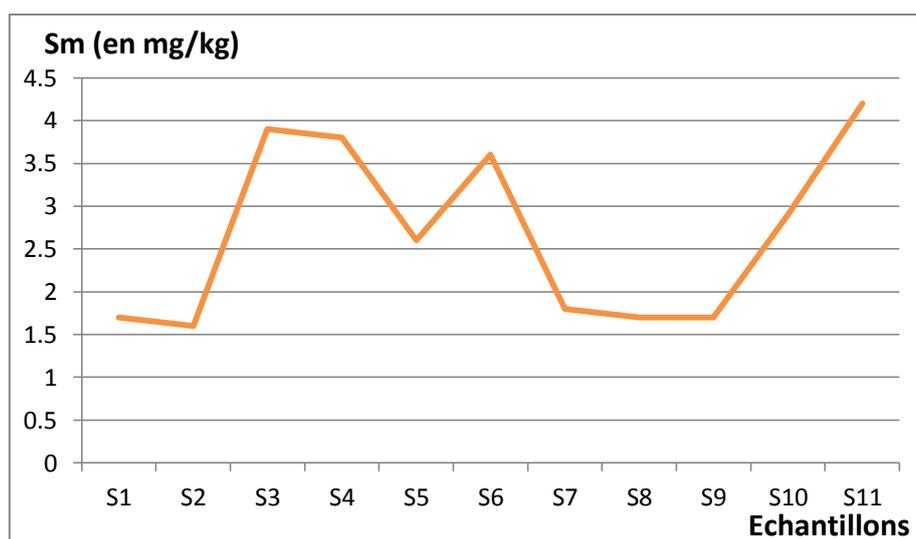


Fig. 92 : Teneurs en Sm

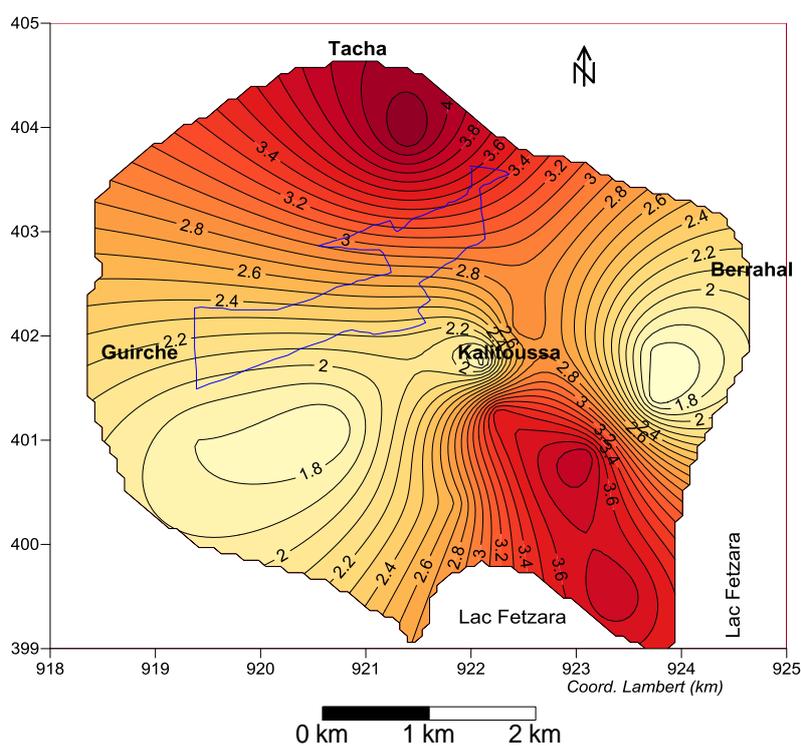


Fig. 93 : Carte de distribution de Sm (en mg/kg)

V.3.6.26. L'euporium (Eu)

L'euporium est un élément du groupe des lanthanides et l'un des moins abondants, il se trouve à une concentration moyenne de 2,1 mg/kg dans la croûte terrestre, il se concentre préférentiellement dans les plagioclases calciques (anorthites), l'euporium est un métal ductile de couleur argentée qui réagit rapidement à l'air comme à l'eau. De par sa nature réactive, ce métal offre des applications limitées. Cependant, il est utilisé dans la fabrication des films fins d'alliage supraconducteurs. L'euporium est également utilisé comme matériau pour les barres de contrôle dans les réacteurs nucléaires car il peut absorber les neutrons. (<http://www.goodfellow.com>).

L'euporium se trouve à des concentrations normales dans la zone d'étude, la teneur maximale est observée au niveau de S4 et S11 (0,9 mg/kg), par contre les teneurs minimales caractérisent les échantillons S1, S2 et S8 (0,3 mg/kg), leur distribution dans la région est semblable aux autres lanthanides ; les parties Nord et Sud-Est sont les plus marquées (**Fig. 94 et 95**).

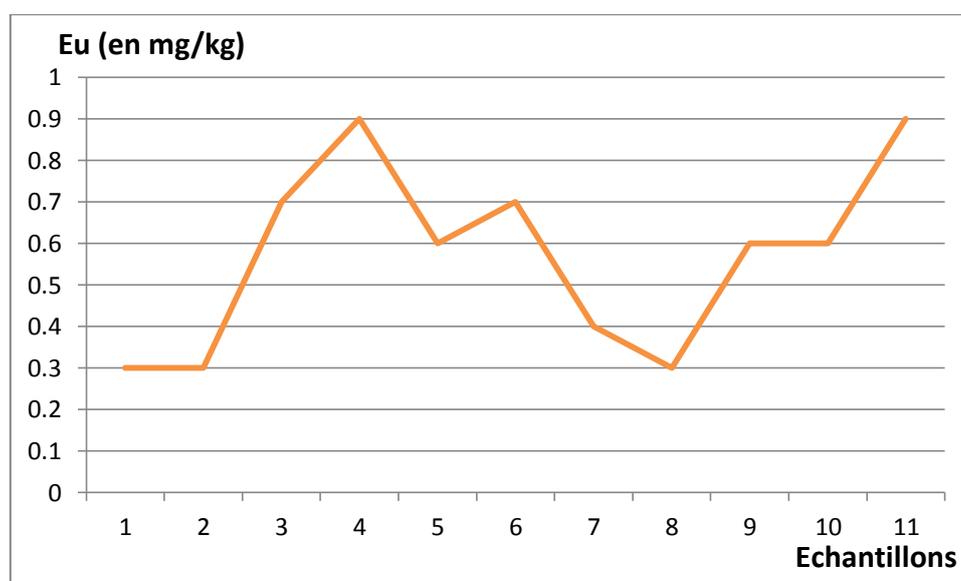


Fig. 94 : Teneurs en Eu

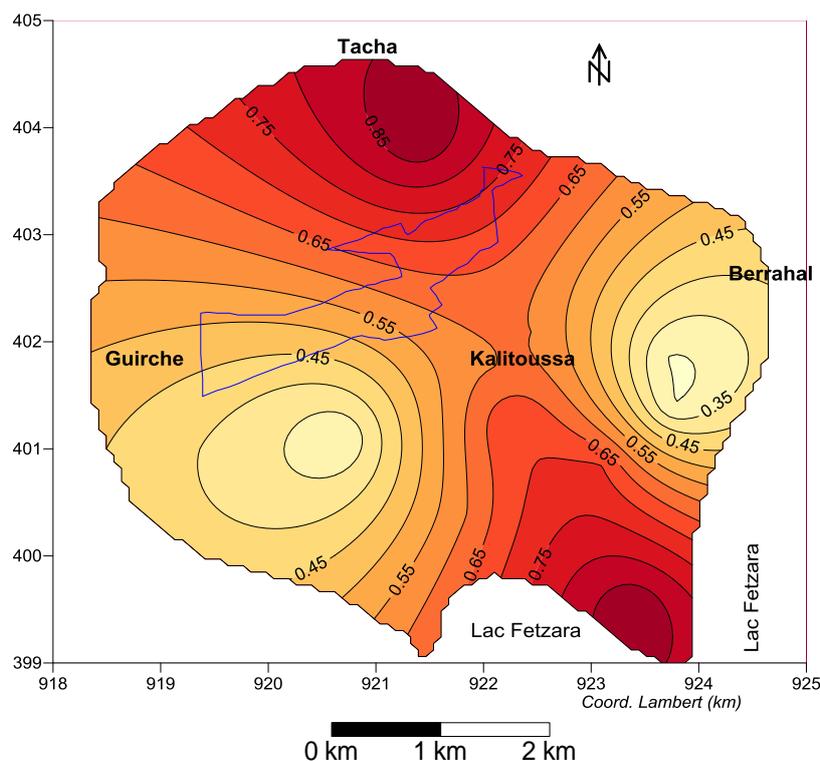


Fig. 95 : Carte de distribution de Eu (en mg/kg)

V.3.6.27. Le gadolinium (Gd)

Le gadolinium fait partie du groupe des lanthanides et est obtenu à partir des mêmes sources que l'europium, sa quantité dans la croûte terrestre est de 7,7 mg/kg. C'est un métal blanc argenté ductile et malléable. Il est stable dans une atmosphère sèche mais il se forme un revêtement d'oxyde lorsqu'il est exposé à l'air humide. Il réagit lentement à l'eau et est soluble dans les acides. Les utilisations du gadolinium en tant que métal pur sont limitées mais, lorsqu'il est allié au chrome, au fer ou à d'autres métaux semblables, les alliages qui en résultent sont plus faciles à travailler et sont plus résistants à la corrosion. Du fait de ses propriétés magnétiques, le gadolinium est utilisé dans la fabrication des aimants, des têtes de lecture et de composants électriques (<http://www.goodfellow.com>).

Les concentrations de Gd dans la zone d'étude sont aussi normales, distribuées spatialement comme les autres lanthanides avec une teneur maximale de 5,5 mg/kg pour l'échantillon S11 plus au Nord, et minimale de 2,1 mg/kg pour S1 et S2 à l'Est (**Fig. 96 et 97**).

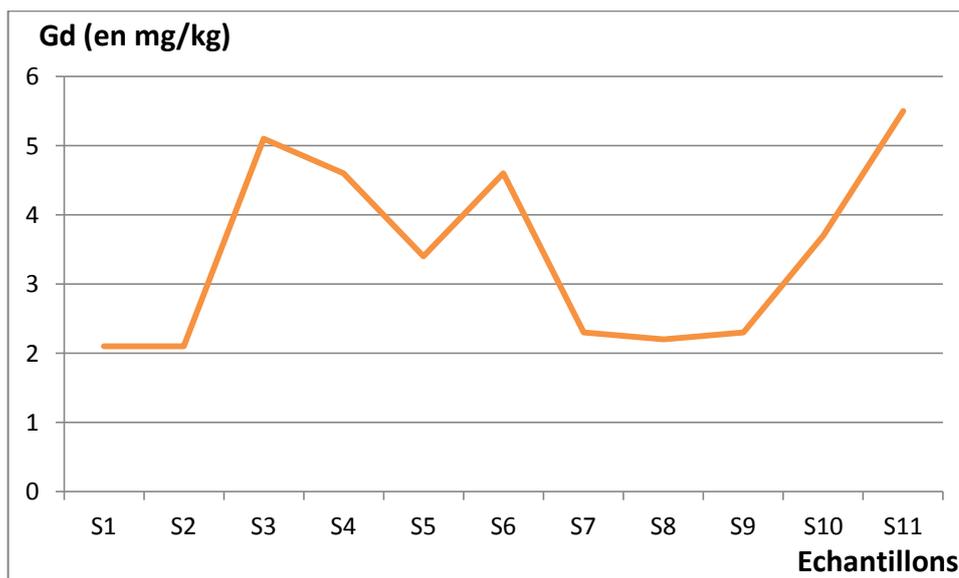


Fig. 96 : Teneurs en Gd

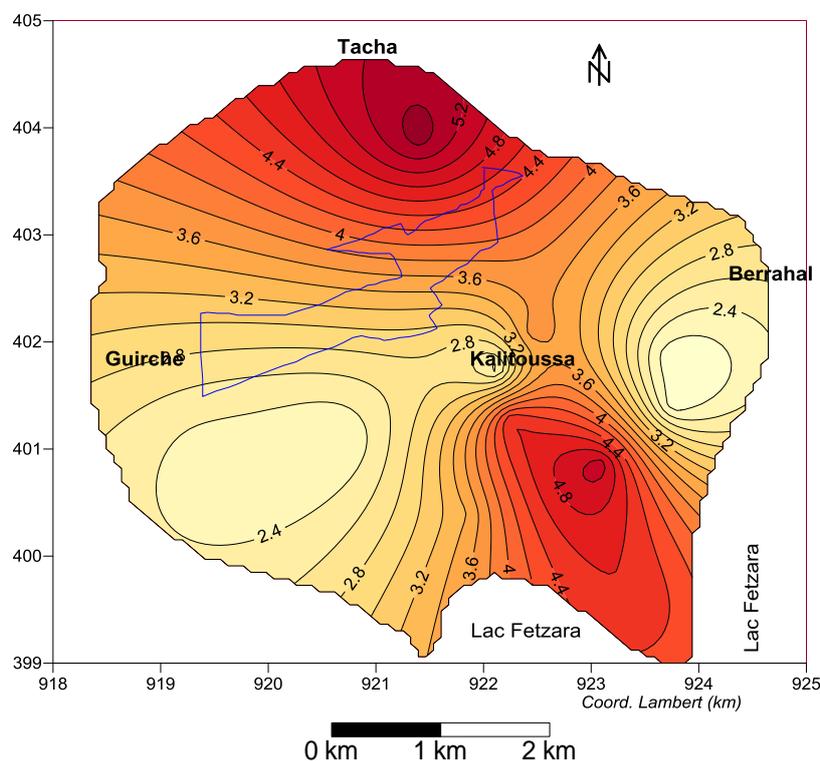


Fig. 97 : Carte de distribution de Gd (en mg/kg)

V.3.6.28. Le dysprosium (Dy)

Le dysprosium est un métal argenté faisant partie du groupe des lanthanides. Il est relativement stable dans l'air, réagit violemment à l'eau et se dissout dans les acides. Les applications de ce produit sont limitées, cependant on l'utilise comme élément d'alliage pour produire un alliage destiné à la fabrication des aimants, comme poison dans les réacteurs nucléaires ou il empêche l'emballement de la réaction. Sa quantité dans la croûte terrestre est de l'ordre de 6 mg/kg (<http://www.goodfellow.com>).

L'élément Dy présente des concentrations normales dans la région, avec une teneur maximale de 2,4 mg/kg pour l'échantillon S4 à l'extrême Sud-Est, et minimale de 0,8 mg/kg à l'Est sur les échantillons S1 et S2 (**Fig. 98 et 99**).



Fig. 98 : Teneurs en Dy

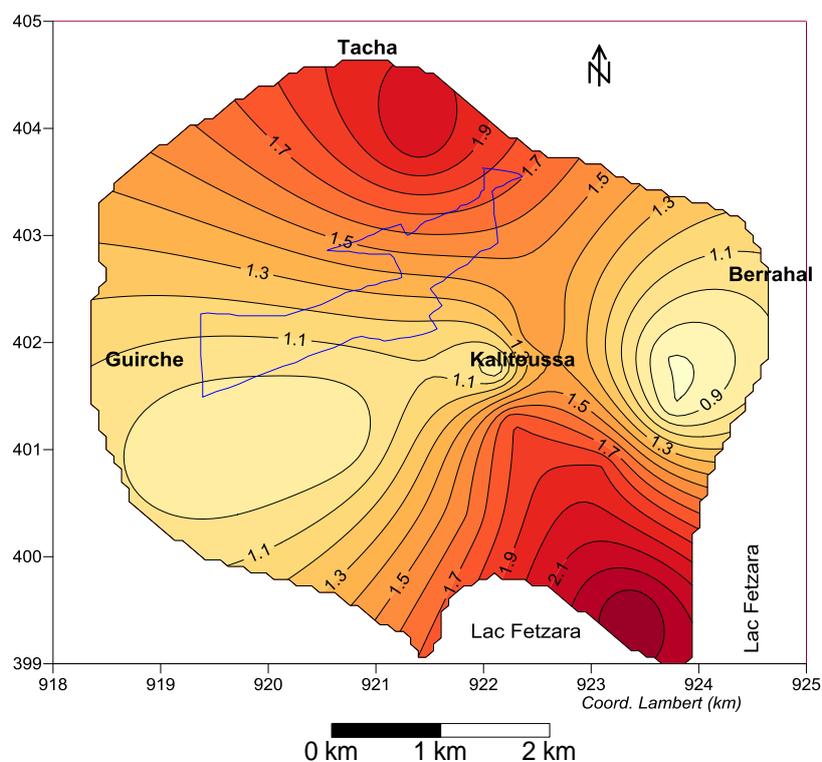


Fig. 99 : Carte de distribution de Dy (en mg/kg)

V.3.6.29. Le tungstène (W)

Le tungstène est un métal blanc argenté, satiné et ne se trouve pas à l'état naturel. On le trouve dans le minerai de wolframite, le tungstate de fer et de manganèse, $(\text{FeMn})\text{WO}_4$, qui est transformé en trioxyde puis réduit dans sa forme métallique par laminage dans de l'hydrogène. Dans l'environnement, le tungstène est surtout présent dans leur forme anionique (WO_4^{2-}), il peut être lié aux oxydes de Fe et Al dans les sols et les sédiments. Le métal tungstène est relativement stable : il résiste aux attaques de l'oxygène, aux acides et aux alkalis bien qu'il réagisse avec des milieux alcalins oxydants, en fusion.

Du fait de son point élevé de fusion, le tungstène est utilisé comme filament électrique (dans les ampoules électriques, par exemple). Il est également à la base d'une gamme d'alliage contenant du tungstène, du cuivre et du nickel qui sont utilisés pour des blindages anti-radiations. Il se trouve à une concentration de 1 mg/kg dans la croûte terrestre (<http://www.goodfellow.com>).

Ce métal, se trouve à des concentrations considérables qui dépassent largement les normes limites de la pollution des sols dans tous les échantillons, ce qui revient à dire que le sol de la zone d'étude est largement pollué (**Fig. 100**). Les concentrations les plus élevées caractérisent la partie Sud-Ouest de la région, avec une teneur maximale de 427 mg/kg au niveau de l'échantillon S8, ainsi que la partie Est, où en rencontre une teneur maximale de 385 mg/kg mesurée à S2 (**Fig. 101**). Cependant, il faut noter que la partie Sud-Ouest ne renferme que les rejets des industries agro-alimentaires (R4, R5, R6, R8 et R9) et des détergents (R7), par contre dans la partie centrale et Est, on rencontre les rejets de l'industrie de transformation de métaux, de galvanisation (R1 et R2) et des produits pétroliers (R3), ce qui confirme l'existence d'une pollution naturelle due à la richesse de la région en ce métal (les gîtes polymétalliques d'Aïn Barbar et des gisements ferrières et arseno-wolframifères du versant Sud – cf. chap. II -) conjuguée à la pollution anthropique due aux rejets industriels.

La toxicologie de tungstène dépend de la solubilité des constituants et la durée d'exposition. L'exposition professionnelle par la voie d'inhalation a révélé des niveaux élevés de fibrose pulmonaire (fibrose du tissu pulmonaire) et d'autres effets tels que l'asthme et l'inflammation des tissus du nez. La recherche suggère également que la combinaison de substances de tungstène et d'autres peut être liée au développement de cancer du poulmon.

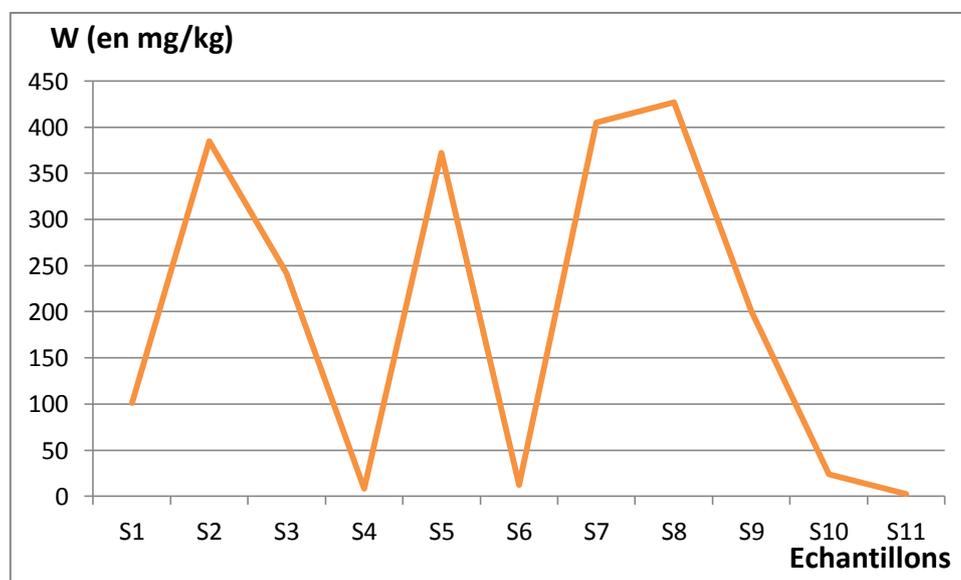


Fig. 100 : Teneurs en W

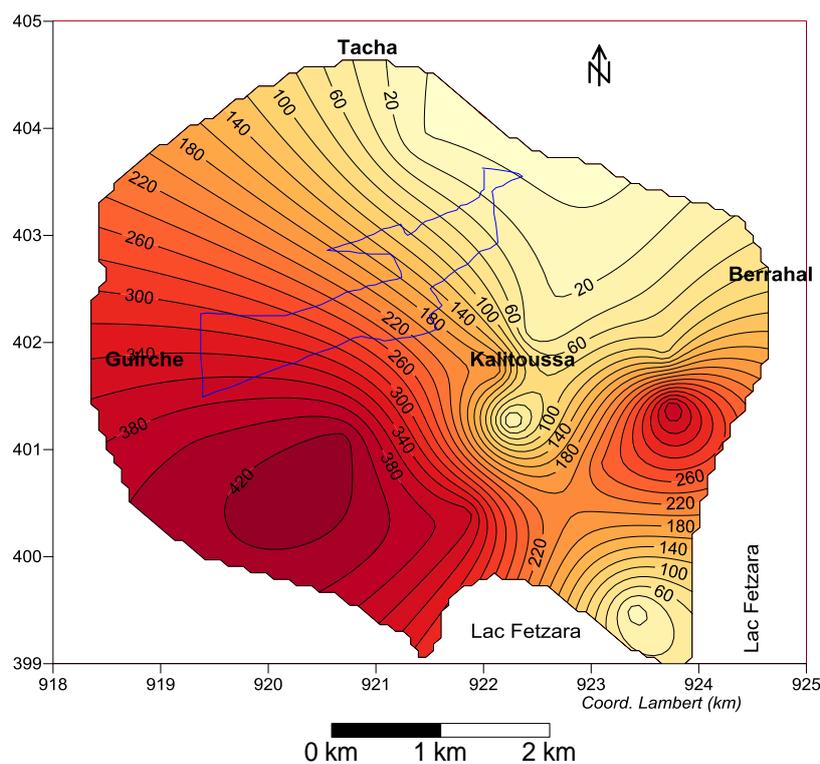


Fig. 101 : Carte de distribution de W (en mg/kg)

V.3.6.30. Le thorium (Th)

Le thorium est un métal, dont certaines propriétés physiques et chimiques le rapprochent du titane, du cérium ou du plutonium. Il est réputé avoir la même toxicité chimique que l'uranium, mais une radiotoxicité supérieure à cause de ses descendants, émetteurs alpha et bêta (Lung, 1997). En solution, le thorium n'existe qu'au degré d'oxydation IV et présente une chimie qualitativement proche de celle des actinides tétravalents comme Pu^{4+} (Choppin et Wong, 1998). Les espèces formées sont fonction du pH, de la nature des anions présents dans la solution.

L'origine de ce radioélément est exclusivement naturelle avec une redistribution liée aux activités anthropogéniques. Le principal minerais est la monazite, $(\text{La}, \text{Ce}, \text{Th}) \text{PO}_4$, il se trouve souvent associé à l'uranium. Dans les sols, outre le degré d'oxydation IV, le thorium peut prendre le degré d'oxydation III, à l'état solide uniquement (Sood et *al.*, 1996). Le thorium est présent sous la forme d'un cation de caractère acide fort. Il est concentré dans les fractions les plus fines du sol, inférieures à $150 \mu\text{m}$ (Frindik et Vollmer, 1999). Il se lie préférentiellement aux atomes donneurs d'oxygène et aux bases fortes. La sorption du thorium sur les oxydes de fer est rapide à bas pH, ce qui suggère la formation de complexes forts avec les sites de surface (Murphy et *al.*, 1999). Le thorium se lie aussi avec les oxyhydroxydes comme la goethite.

Il est 3 à 4 fois plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre. Sa teneur moyenne est de 9 à 12 g/t (9 à 12 mg/kg) du sol, soit une activité de 25 à 28 Bq/kg de sol en moyenne (Henner P. et *al.*, 2002).

Les concentrations de Th dans la région sont normales, la plus élevée des teneurs est mesurée au niveau de S11 au Nord avec 5,9 mg/kg et la plus faible, elle est de 2 mg/kg à l'Est pour l'échantillon S2 (**Fig. 102**). Sur la carte de distribution spatiale, Th se concentre dans les parties Nord et Sud-Est de la zone d'étude (**Fig. 103**).

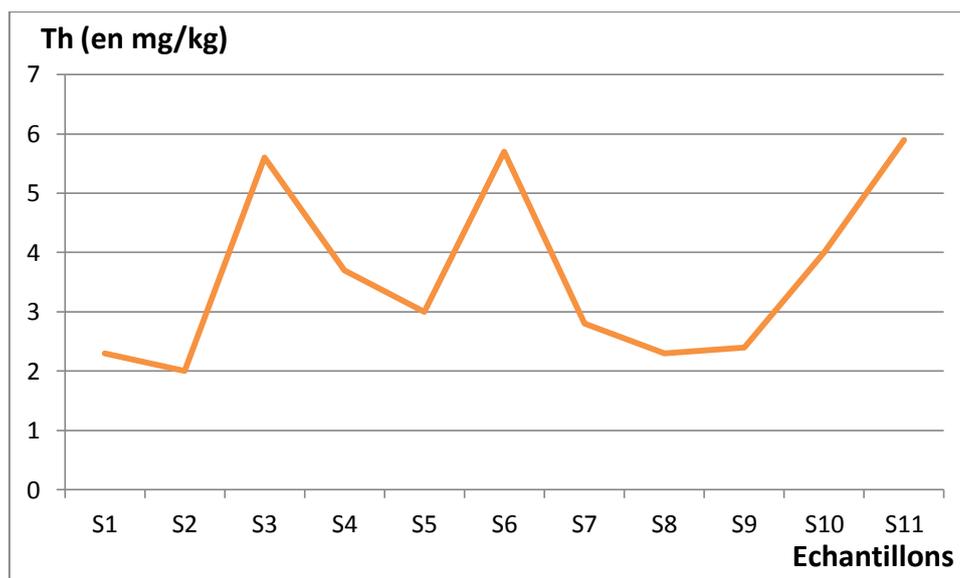


Fig. 102 : Teneurs en Th

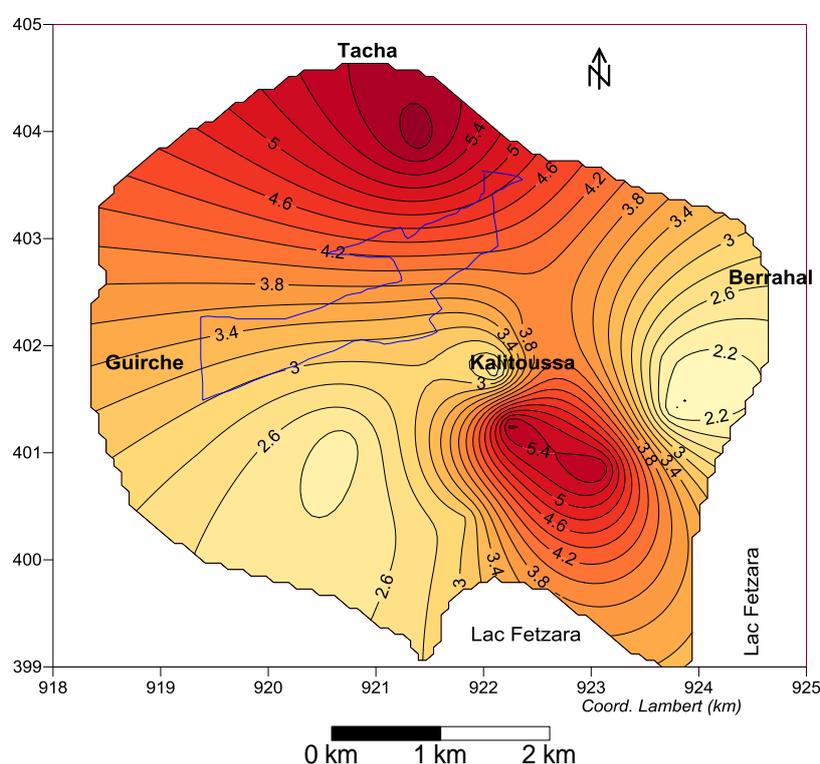


Fig. 103 : Carte de distribution de Th (en mg/kg)

V.3.6.31. L'uranium (U)

L'uranium, métal gris très dense, a quatre valences possibles (+III à +VI), les valences 4 et 6 étant les plus répandues dans les minerais. Les conditions de passage de la valence 4 à la valence 6 dépendent du potentiel d'oxydoréduction du milieu; elles sont voisines des conditions de passage du fer ferreux au fer ferrique. L'uranium hexavalent est beaucoup plus soluble que l'uranium tétravalent ; il forme des complexes, les plus fréquents étant les uranylcarbonates et les uranylesulfates.

Dans la lithosphère, la teneur moyenne en uranium est de 3 à 4 mg/kg mais l'éventail est très large selon les matériaux. Les teneurs en uranium sont de l'ordre de 1 à 13 mg/kg pour les schistes, de 1 à 80 mg/kg dans les schistes carburés, de 3 à 27 mg/kg dans les bauxites, de 0,1 à 9 mg/kg dans les roches carbonatées, de 1 à 350 mg/kg dans les phosphates. Les bruits de fond en uranium total sont fonction de la géochimie du milieu et s'étendent de 5 à 1 000 Bq/kg

Le comportement de l'uranium dans les écosystèmes terrestres est étroitement lié aux conditions d'oxydo-réduction du milieu (Cuney *et al.*, 1992 ; Gueniot *et al.*, 1988)

En milieu oxydant, l'uranium se trouve sous la valence +VI (ion uranyle UO_2^{2+}) qui est la forme la plus stable et la plus mobile. L'uranium a une mobilité moyenne dans les sols. En condition aérobie, il se complexe facilement avec la matière organique, les carbonates, les phosphates et les sulfates. En milieu réducteur (par exemple dans les sols inondés ou au contact d'une nappe phréatique), l'uranium se trouve à la valence +IV et a alors tendance à précipiter (Garnier J. *et al.*, 2001).

D'après les résultats obtenus, les concentrations de l'uranium dans la zone d'étude sont strictement acceptables, elles ne dépassent jamais les normes limites de l'abondance naturelle dans le sol. La teneur maximale est de 1,1 mg/kg mesurées au niveau de S3 et S11 (**Fig.104**), sur la carte de distribution spatiale, sa répartition distingue les parties Nord et Sud-Est de la région (**Fig.105**).

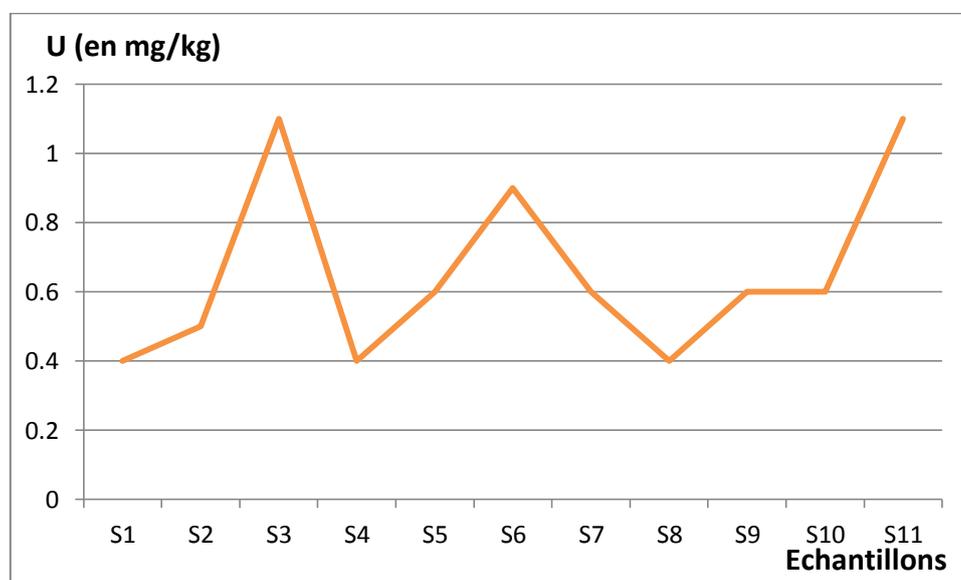


Fig. 104 : Teneurs en U

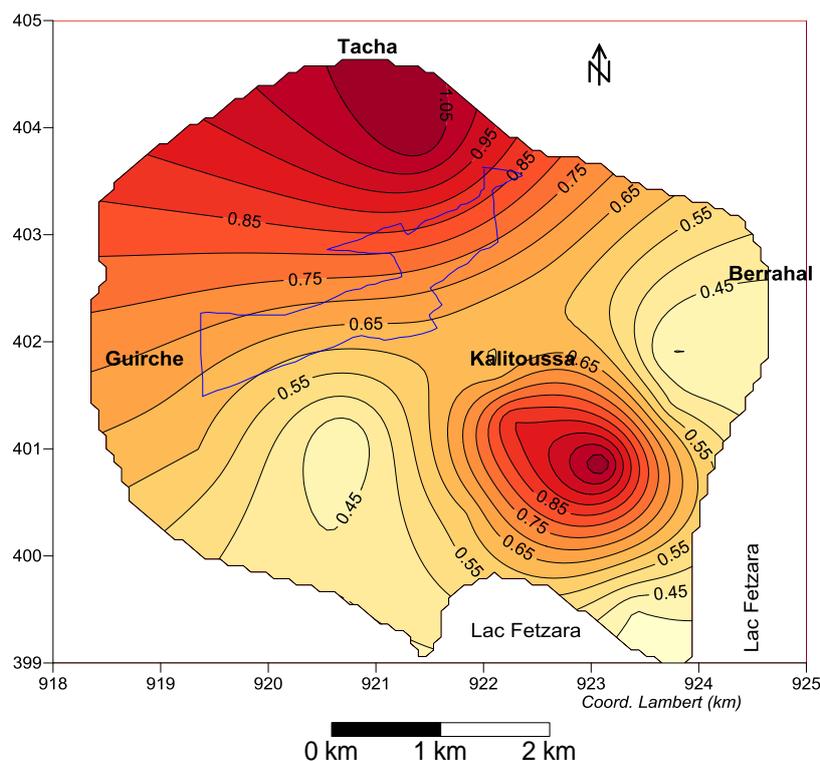


Fig. 105 : Carte de distribution de U (en mg/kg)

V.3.7. Interprétation statistique des résultats

V.3.7.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Les résultats d'analyses chimiques du sol de la région de Berrahal ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales (ACP), à l'aide du logiciel Statistica (1997) constituée de 11 individus et 31 variables, suivant trois axes : F1, F2 et F3 afin de déterminer l'origine des éléments traces responsables à la pollution du sol et l'effet des rejets industriels sur la qualité du sol de la région.

L'analyse a donné un pourcentage cumulé de 83.43

Tableau 24 - Valeurs propres et pourcentages cumulés.

Facteurs	Valeurs propres	Pourcentage total des variances	Valeurs propres cumulées	Pourcentage cumulé
F1	15.16741	48.92712	15.16741	48.92712
F2	6.95019	22.41997	22.11760	71.34710
F3	3.74675	12.08629	25.86435	83.43339

V.3.7.1.1. Cercle F1-F2, plan F1-F2

Le traitement a donné une inertie de 71.34 % pour les deux axes F1 et F2 (**Tab. 24**).

Sur le cercle F1-F2, on peut distinguer que le pôle positif de l'axe F1 caractérise l'enrichissement en lanthanides (Eu, Cs, Y, La, Ce, Th, Sm, Nd, Gd, ...) ainsi que quelques métaux lourds comme le Ni et le V ainsi qu'un élément radioactif l'uranium (**Fig. 106a**), ce qui correspond dans le plan des individus aux sites S4 et S11 (**Fig. 106b**), qui occupent

l'extrême Sud et le Nord de la zone d'étude. Le pôle négatif du cercle caractérise la pollution du sol en métaux lourds suivants : Hg, W et Co (**Fig. 106a**). Les deux premiers possèdent des teneurs considérables qui dépassent largement les normes, ce qui correspond dans le plan des individus aux sites S1 et S7 (**Fig. 106b**) qui occupent respectivement les parties Est et Ouest. On peut constater que ces métaux sont d'origine naturelle issus à la minéralisation excessive qui caractérise le massif de l'Edough (anciens gisements métallifères au Nord et de mercure à l'Ouest de la zone d'étude) puisque les sites S1 et S7 sont plus loin que tous les autres sites des rejets de la zones industrielle.

L'axe F1, peut donc être considéré comme l'axe caractérisant la pollution.

Le pôle positif de l'axe F2 caractérise l'enrichissement du sol en métaux lourds provenant des rejets industriels liquides tel que Zn, Pb, Fe, Cd, Sn, Cu... (**Fig. 106a**) puisque le site correspondant dans le plan des individus est celui de S9 (**Fig. 106b**). Le site le plus proche des rejets industriels R1 et R2 de l'entreprise Protuil de transformation de métaux et de galvanisation, ce qui confirme l'impact de ces rejets sur l'environnement. Le pôle négatif marque les endroits où l'effet polluant de ces métaux issus des rejets est minime ou absent, ceci est suggéré par le site de l'échantillon S5 plus loin au Sud-Ouest de la zone d'étude.

On peut considérer donc l'axe F2 comme un axe de pollution dû aux rejets industriels.

V.3.7.1.2. Cercle F1-F3, plan F1-F3

Le traitement a donné une inertie de 61 % pour les deux axes F1 et F2 (**Tab. 24**).

Le pôle positif de l'axe F1 sur le cercle, montre toujours l'abondance des lanthanides et quelques métaux lourds comme le Ni et le V (**Fig. 107a**) matérialisés par le site S11 sur le plan des individus (**Fig. 107b**) situé à l'extrême Nord de la zone d'étude. Le pôle négatif marque bien les métaux lourds Hg et W majoritairement abondant avec des teneurs supérieures aux normes ainsi que le cobalt (**Fig. 107a**). La pollution en ces éléments est toujours d'origine naturelle, elle correspond aux sites S2, S7 et S8 qui occupent respectivement l'extrême Est et Ouest de la zone d'étude et qui se trouvent loin des rejets industriels et de l'absence d'activité qui utilise ces métaux confirmant ainsi leur origine naturelle.

F1 est considéré comme axe d'origine de la pollution.

Le pôle négatif de l'axe F3 caractérise un enrichissement en Fe, Mn et As dans le sol (**Fig. 107a**) ce qui correspond dans le plan des individus au site S3 (**Fig. 107b**). Ce dernier se trouve à proximité du trajet d'un effluent liquide provenant de la zone industrielle évacuant les rejets R1 et R2 de l'entreprise Protuil de transformation de métaux et de galvanisation. Ces rejets sont riches en fer et en manganèse ce qui suggère une autre fois l'impact de ces rejets sur l'environnement. Par contre, le pôle positif correspond aux sites les moins pollués en ces métaux et qui se trouvent relativement loin, représentés par le site de l'échantillon S4 plus au Sud.

L'axe F3 est considéré comme axe de la pollution industrielle en métaux.

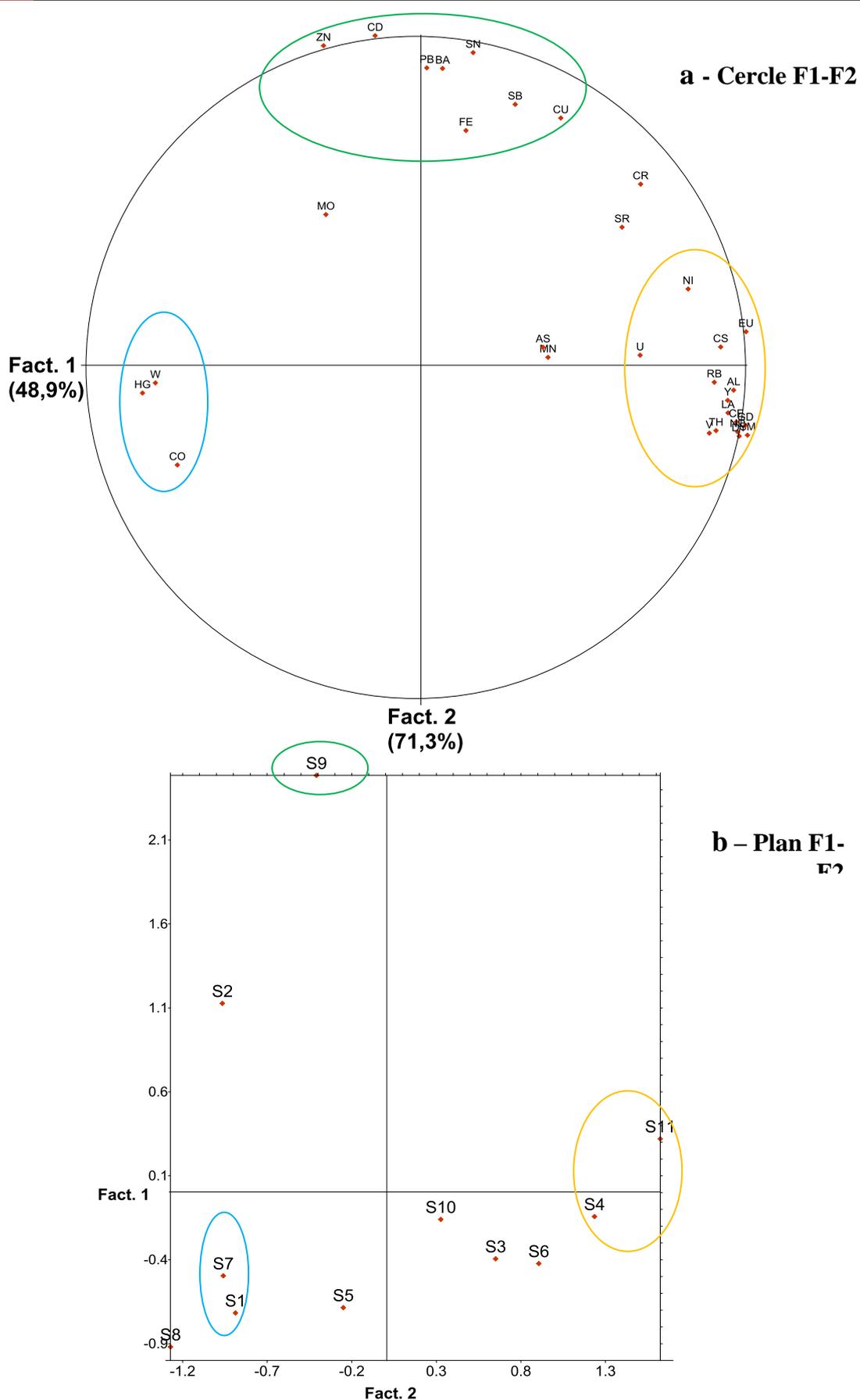


Fig. 106 : ACP des analyses chimiques du sol selon les axes F1 et F2

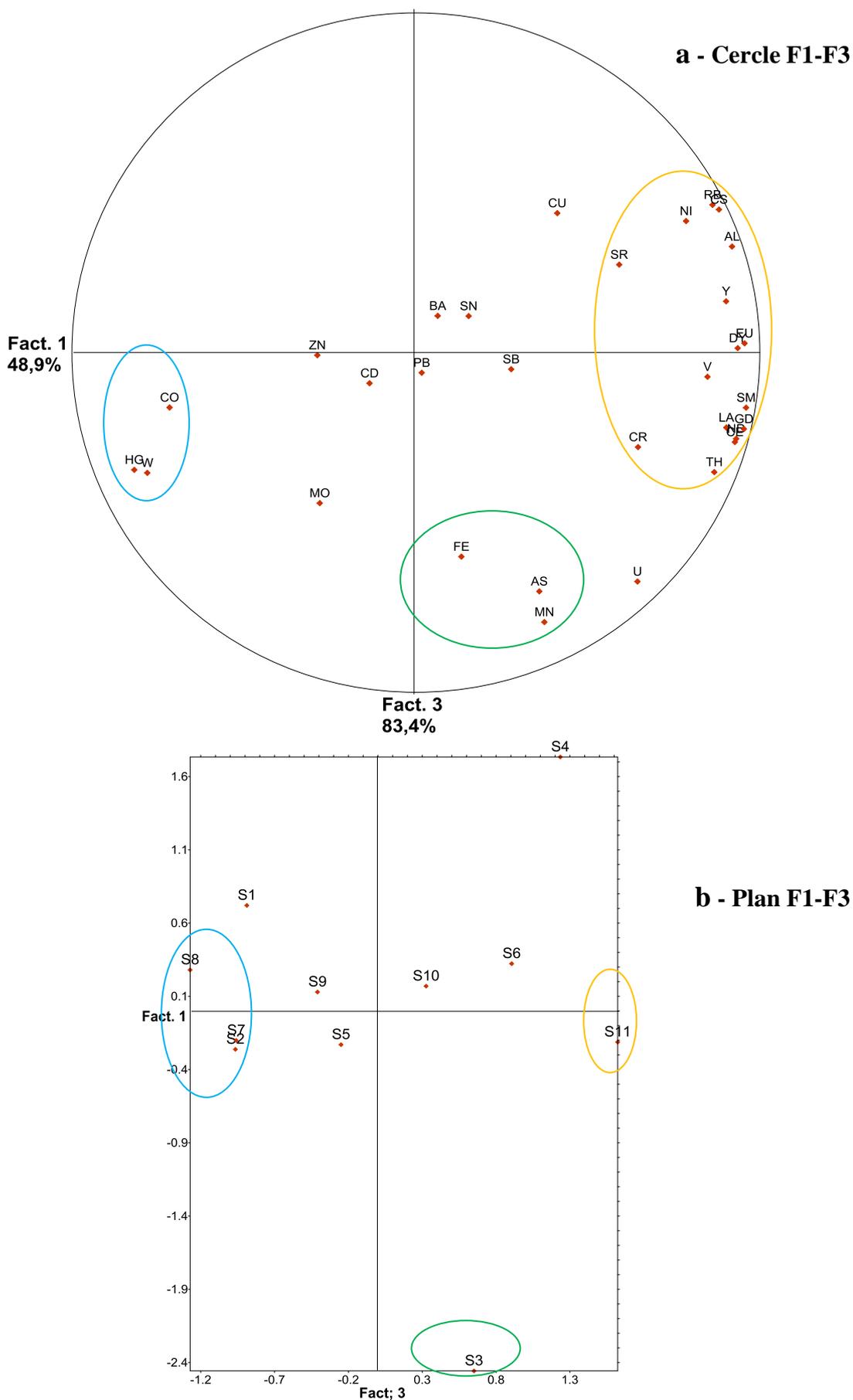


Fig. 107 : ACP des analyses chimiques du sol selon les axes F1 et F3

V.3.8. Quelques techniques de dépollution du sol

Vu le risque qui menace la qualité du sol de la région de Berrahal et l'état de pollution avéré en métaux lourds tel que Hg, Pb, W, Mo, Sn, et Ce, qui impactent négativement sur l'écosystème et influe directement sur la santé des habitants ainsi que leur activité agricole (élevage de bétails). On propose quelques procédures de dépollution du sol, sachant qu'il existe différentes techniques, voici celles qui paraissent les plus adéquates à la dépollution des métaux lourds :

V.3.8.1. Méthodes d'élimination de la pollution du sol applicables in situ

Il s'agit également de :

V.3.8.1.1. L'électrocinétique

Ce phénomène se produit lorsque le sol est équipé par des rangées d'électrodes, il est dû à :

- L'électro-osmose, qui est le mouvement des ions et particules, dans l'eau du sol, de l'anode vers la cathode ;
- L'électrophorèse, qui est le mouvement des particules chargées, sous l'influence d'un champ électrique ;
- L'électrolyse, qui prend en considération les mouvements des ions et des ions complexés ;

Si l'on applique un champ électrique, les cations vont migrer vers la cathode chargée négativement. Les ions métaux sont des polluants qui peuvent être éliminés par cette technique. Les niveaux de traitement potentiels vont de faible à moyen selon le sol et le type de polluant présent, l'efficacité de la technique est moindre pour les sols à grande capacité d'échange cationique, elle peut être accrue en irrigant le sol avec une eau légèrement acide. Par ailleurs la teneur en eau du sol ne doit pas inférieure à 10 %. Les réceptacles de la cathode et de l'anode peuvent être interconnectés, mais forment deux systèmes de circulation différents. Dans ces solutions les polluants sont capturés et transportés vers un système de traitement connecté, le résidu consiste à un filtrat d'hydroxyde de métaux ou une solution très concentrée en métaux (**Fig. 108**).

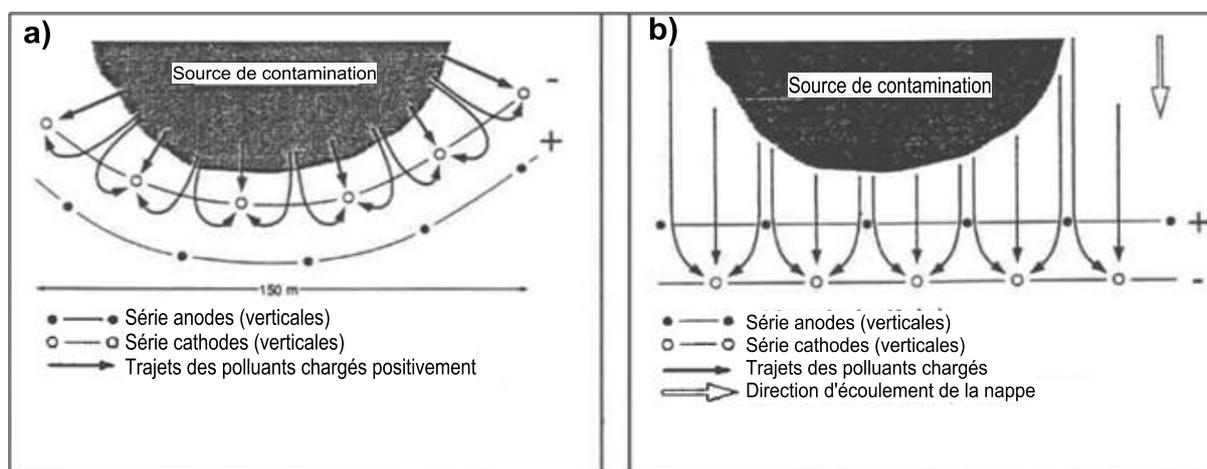


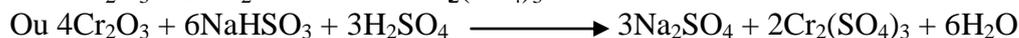
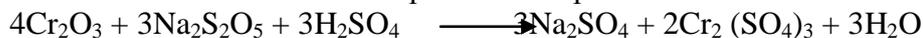
Fig. 108 : Mise en place d'une barrière électrocinétique en sol peu perméable (a) et sol très perméable (b) (Source BRGM, 1993)

V.3.8.2. Méthodes d'immobilisation de la pollution dans le sol applicables in situ

V.3.8.2.1. Stabilisation par traitement chimique

Cette technique s'applique au cas particuliers du chrome. Le Cr hexavalent étant très toxique, il s'agit en Cr trivalent, moins toxique, et qui peut être précipité par les hydroxydes sur une de pH étendue (Montclair Environmental Management Team, 1990).

La réduction au stade trivalent peut se faire par l'une des réactions suivantes :



Après réduction, le sulfate chromique est précipité avec une chaux calcique hydratée à pH 4,5 à 5,5.

Le sulfate de fer peut être appliqué directement sur le sol par un système d'irrigation. Acidification et chaulage sont des pratiques agricoles courantes. Il faut maintenir le pH > 5, dont pratiquer un rechaulage périodique pour immobiliser Cr dans le sol.

On peut aussi excaver la boue produite, la déshydrater et la mettre en décharge.

V.3.8.2.2. Immobilisation par procédés physiques

Il s'agit d'établir des barrières perméables (par opposition aux barrières étanches utilisées dans le confinement), pouvant retenir le polluant à la limite des sites contaminés en l'absorbant lorsque l'eau polluée du sol arrive au contact de cette barrière. Les mécanismes impliqués peuvent être la précipitation, l'adsorption, l'échange d'ion, la filtration.

Des matériaux adéquats, peu coûteux, peuvent être utilisés dans cette barrière, charbon actif, minéraux argileux et zéolites pour retenir les métaux ; des combinaisons de matériaux sont nécessaires pour retenir tous les types de polluants.

A noter toutefois que le niveau potentiel de traitement reste faible et qu'une migration possible des éléments polluants en dehors du site subsiste, si la capacité de rétention n'est pas suffisante.

V.3.8.2.3. Consolidation par les végétaux

Si l'utilisation de végétaux pour éliminer totalement les métaux d'un sol pollué reste un objectif non réalisé, les végétaux peuvent cependant contribuer à immobiliser les polluants. Après évaluation de la concentration dans le sol, une sélection de plantes résistant aux métaux peut être faite, il faut toutefois faire remarquer que ces végétaux ne doivent pas être utilisés pour les animaux ou pour des aires de jeux pour enfants.

Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région de Berrahal, montre que la plupart de ses eaux ont une mauvaise qualité sur le plan chimique où les concentrations en sels minéraux sont excessives, la salinité est bien marquée et il existe parfois des puits à eau salée. Sur le plan physique, il est marqué par des conductivités électriques très élevées et des pH parfois acides surtout en contact avec le lac Fetzara au Sud et Sud-Est.

Cette analyse nous montre effectivement que les eaux souterraines de la région de Berrahal risquent d'être une source de toxicité qui menace la santé publique et l'environnement, au vu des teneurs élevées en quelques métaux lourds tel que Pb, Ni, Mn et Fe dont il faut prévoir une méthode de traitement convenable pour chaque type de polluant.

La source de pollution des eaux souterraines de la région en ces métaux lourds est multiple ; elle est d'origine industrielle influencée par les rejets liquides de la zone d'activité de Berrahal. Les rejets des entreprises qui exercent l'activité de transformation de métaux, de travaux publics et de lavage des engins (Ets Protuil, Naftal,...) fortement chargés en substances chimiques et de métaux lourds impactent négativement sur la qualité des eaux souterraines, ceci est confirmé par la plupart des échantillons d'eau à proximités de ces rejets qui sont fortement chargés et pollués. L'autre origine de la pollution en ces éléments est d'origine naturelle (géologique) dûe à l'enrichissement de la région en ces métaux.

L'effet de l'activité agricole est marqué par les teneurs assez élevées en sulfates et nitrites surtout au Sud de la zone d'étude où s'exerce une activité intense.

Du point de vue bactériologique, les eaux souterraines de la zone d'étude notamment à proximité des rejets des entreprises qui exercent l'activité agro-alimentaire (laiterie, fromagerie, pâtes alimentaires, boissons gazeuses, huilerie, Ets El Meida, Fetzara, Bona) sont de mauvaise qualité bactériologique, caractérisées par des teneurs élevées en DBO₅.

Les eaux souterraines de la région de Berrahal montrent un faciès chloruré sodique dominant.

Les analyses chimiques en éléments traces métalliques et non métalliques des échantillons de sol de la zone d'étude, montrent que le sol de la région a des teneurs normales en ce qui concerne les lanthanides, et excessives, dépassant largement les normes pour les métaux lourds Hg, Pb, W, Zn, Mo, Ce et Sn. L'analyse statistique en composantes principales (ACP) suggère que l'origine de ces métaux lourds dans les sols est de type industriel influencée par les rejets évacués depuis quelques entreprises de la zone. Les sites avoisinants les rejets des entreprises de transformation de métaux, de galvanisation, de raffinerie, ...sont effectivement plus chargés en ces métaux que les autres sites. En plus, l'origine naturelle (géologique) prise en considération, favorise une minéralisation excessive en quelques éléments provenant du lessivage des gisements métallifères dans le massif de l'Edough (surtout en Pb, Fe, Hg, W, ...).

Chapitre VI

MODÉLISATION

VI.1. Introduction

Les modèles numériques 3D sont largement utilisés en hydrogéologie. Ils permettent de comprendre et de caractériser les écoulements souterrains, les transports de solutés, ou encore les bilans hydrologiques des systèmes souterrains. Souvent utilisés comme outil de prédiction de l'évolution d'un système, ils sont également utiles pour identifier les paramètres prédominants d'un hydrosystème et améliorer la caractérisation du fonctionnement du système, de sa sensibilité ou de sa vulnérabilité.

VI.2. Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive à l'aide d'un modèle mathématique MODFLOW: Impact des activités de la zone industrielle sur les eaux

Modflow a été développé par l'U.S. Geological Survey. Ce code a été rendu public en 1984. Il est devenu un standard dans la modélisation des écoulements souterrains (Anderson and Woessner, 1991; Fetter, 1994). Il a été appliqué à de nombreux systèmes hydrogéologiques : des aquifères poreux, des aquifères karstiques, des nappes alluviales, ou des aquifères complexes multicouches ; dans le cadre de problématiques variées : les échanges nappe – rivière, l'influence du climat sur les hydrosystèmes, les problèmes de transferts de polluants et de contamination des aquifères ou encore l'impact de pompage sur les écoulements souterrains. Sa robustesse a ainsi été éprouvée avec succès pour une grande variété d'études.

Ce code est constitué d'un programme principal avec des sub-routines ou modules indépendants (McDonald and Harbaugh, 1988). Les modules (*Well package*, *River package*, etc.) simulent des aspects hydrologiques spécifiques. Cette structure modulaire permet l'utilisation des fonctions hydrologiques indépendamment les unes des autres. Elle a facilité le développement de nouveaux modules sans modifier le code lui-même puisque les modules utilisent généralement les données de sorties du code. De nombreux utilisateurs ont contribué à l'ajout de modules spécifiques, augmentant ainsi les possibilités et les capacités de *Modflow*. Restrepo et al. (1998) ont ainsi développé un module spécifique aux zones humides ayant la capacité de gérer les écoulements du surface à travers une végétation et à travers un réseau de drainage.

VI.2.1. Considérations théoriques

Le code Modflow est un modèle numérique à trois dimensions. Il décrit les écoulements souterrains en milieu poreux anisotrope et hétérogène, en conditions de flux stationnaires ou transitoires, pour des aquifères libres, captifs ou mixtes selon l'équation de diffusivité [1] (McDonald and Harbaugh, 1988) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = s_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

Tel que :

x , y et z sont les coordonnées cartésiennes alignées le long des axes principaux de la conductivité hydraulique K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} variables dans l'espace $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, $K_{yy} = K_{yy}(x,y,z)$, $K_{zz} = K_{zz}(x,y,z)$;

h est la charge hydraulique et dépend des variables spatiales et temporelles
 $h = h(x,y,z, t)$;

W est le flux (débit) par unité de volume prélevé (ou apporté) dans le milieu poreux,
 W dépend des variables spatiales et temporelles $W = W(x,y,z, t)$;

S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique (Specific Storage), il dépend généralement des variables spatiales $S_s = S_s(x,y,z)$;

t est le temps.

Les conditions-limites du modèle (flux imposé, charge imposée) et les conditions initiales constituent une représentation mathématique du système de flux souterrains (McDonald and Harbaugh, 1988). Une solution analytique $h(x,y,z,t)$ satisfaisant l'équation de diffusivité, les conditions-limites et les conditions initiales est rarement possible compte tenu de la complexité des hydrosystèmes (De Marsily, 1986). Les méthodes numériques sont alors utilisées pour obtenir une solution numérique approximée. Le code *Modflow* résout l'équation de diffusivité en utilisant l'approximation des différences finies.

Pour ce faire, le modèle est discrétisé dans un système cartésien selon un maillage rectangulaire aux nœuds duquel l'équation est résolue. Basée sur le principe de continuité des flux où les flux entrants et sortants de la cellule doivent être égaux à la variation de stockage de la cellule, la solution de l'équation de diffusivité doit satisfaire les conditions aux limites du modèle et les conditions initiales (Auterives C., 2006).

VI.2.2. Discrétisation du modèle

Le modèle est replacé dans un environnement fini à trois dimensions et discrétisé dans le temps et dans l'espace. Le maillage est rectangulaire dans le plan horizontal (**Fig. 109**). Dans le plan vertical, le modèle est discrétisé en niveaux correspondant généralement aux différentes couches aquifères. Les nœuds de la grille sont centrés sur les cellules dans lesquelles les propriétés du milieu sont considérées homogènes. L'équation de diffusivité est résolue aux nœuds de la grille par itérations successives jusqu'à ce que les changements de charge hydraulique convergent (Auterives C., 2006).

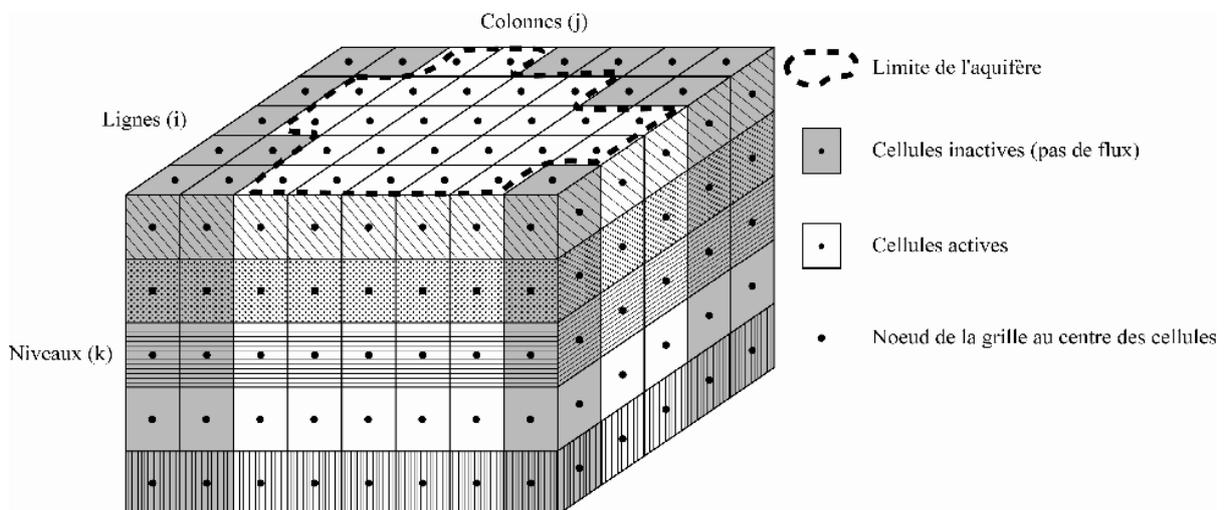


Fig. 109 : Exemple de discrétisation d'un aquifère selon un maillage rectangulaire (McDonald and Harbaugh, 1988)

VI.2.3. Les conditions aux limites

Les limites du modèle peuvent être physiques ou hydrauliques (Barone, 2000). Les limites physiques sont facilement identifiables. Elles correspondent à de grands ensembles d'eau de surface comme une mer ou un lac ; il peut s'agir également de structures imperméables comme une faille, un substratum imperméable affleurant ou un corps argileux. Les limites hydrauliques peuvent être invisibles. Elles correspondent souvent à des lignes de partage des eaux ou des lignes de flux.

Modflow dispose de plusieurs modules permettant de définir différentes conditions- limites (McDonald and Harbaugh, 1988) :

- **Constant Head Boundary.** La limite à charge imposée permet de fixer la valeur de la charge dans les cellules sélectionnées. Elle agit comme une source infinie d'eau entrant ou sortant du système. Cette condition-limite de charge imposée peut avoir une influence significative sur le résultat des simulations et peut conduire à des prédictions non réalistes, particulièrement quand elles sont utilisées à proximité des zones d'intérêts.
- **River Boundary.** La fonction « *River* » simule l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface (rivières, lacs, marais, etc.) par l'intermédiaire d'un niveau d'infiltration séparant la rivière du système souterrain. Le code *Modflow* calcule la conductance $C_{riv}(m^2.s^{-1})$ de la rivière c'est-à-dire la capacité du niveau d'infiltration à transmettre les écoulements entre la rivière et la nappe.
- **Stream Boundary.** La fonction « *Stream* » décrit les interactions entre eaux souterraines et eaux de surface par l'intermédiaire d'un niveau d'infiltration. Par contre, à la différence de la fonction « *River* » qui est un corps d'eau statique, la fonction « *Stream* » ajoute la fonction d'écoulement et de continuité des flux dans le cours d'eau (Prudic, 1989).
- **General Head Boundary.** Cette fonction permet de simuler l'influence de flux entrant ou sortant d'une source externe à la zone modélisée (*Fig.110*). Les flux échangés sont proportionnels à la différence entre la charge dans la cellule et la charge de la source externe au modèle. La conductance (C_{GHB}) dépend de la perméabilité (K_{ext}) supposée homogène des sédiments séparant le modèle de la source externe, de la surface ($L.W$) de la face de la cellule à travers laquelle les flux sont échangés et de la distance (D) séparant la source du modèle [2]. L'application courante de cette condition-limite concerne des modèles influencés lorsque la charge d'un corps d'eau (lac, étang, marais) influence la zone modélisée mais en est très éloignée. Cela permet de réduire la taille du modèle et de le focaliser sur la zone d'intérêt sans négliger l'influence de ce corps d'eau.

$$C_{GHB} = K_{ext} \frac{L.W}{D} \quad [2]$$

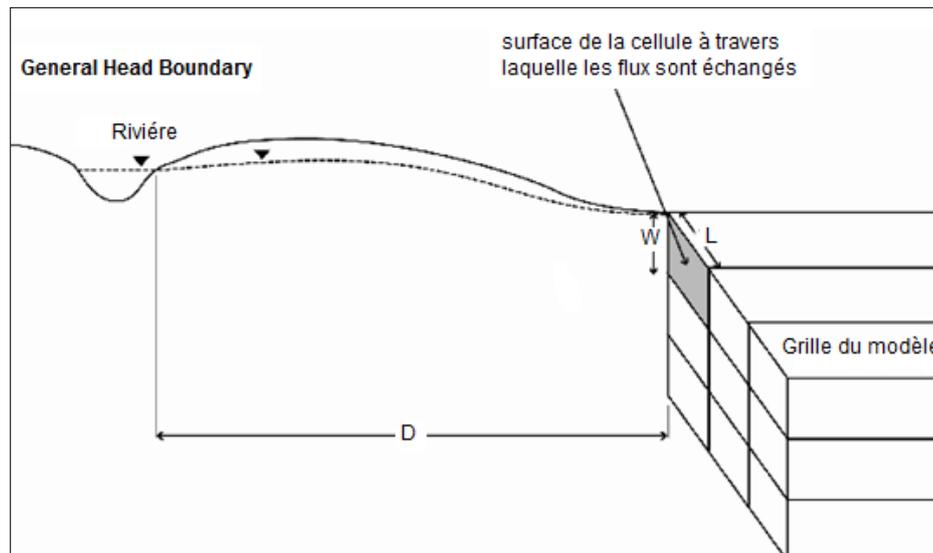


Fig. 110: Schéma de la condition-limite « General Head Boundary » de Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988)

- **Drain Boundary.** Cette fonction permet de modéliser des drains agricoles qui canalisent l'eau et drainent l'aquifère de surface en fonction de la différence de charge entre les deux systèmes. Ce module suppose que le drain n'a pas d'influence sur l'aquifère quand la charge de celui-ci descend au-dessous de celle fixée dans le drain.
- **Wall Boundary.** Ce module a été développé pour simuler une couche fine, verticale et peu perméable qui limiterait les flux horizontaux d'écoulements souterrains. Il évite de réduire en un nombre excessif de cellules la zone comportant cette limite et ainsi d'améliorer l'efficacité du modèle.
- **Recharge Boundary.** La recharge est le résultat des précipitations percolant à travers la zone non saturée. Ce paramètre est l'un des plus difficiles à estimer. Il dépend des précipitations, de l'évapotranspiration, de l'humidité du sol, de la capacité de stockage du sol, de l'épaisseur de la zone non saturée, du type de sol, de la pente, de la durée et de l'intensité des pluies. Il a cependant un rôle majeur sur les résultats du modèle. Le module *Recharge Boundary* permet de simuler la recharge distribuée superficiellement sur le modèle et peut également être utilisé pour une autre source comme une recharge artificielle (irrigation) ou naturelle mais ne provenant pas des précipitations (infiltration d'une mare).

VI.2.4. Cadre hydrogéologique du domaine étudié

Comme on a montré au chapitre III (hydrogéologie), la zone d'étude qui fait partie de la dépression du lac Fetzara, est assimilée à deux couches communicantes entre elles par drainage verticale à travers un horizon d'argile graveleuse semi-perméable (**Fig. 10**).

- ❖ La première couche aquifère est celle du sable fin et gravier (nappe libre, superficielle).
- ❖ La deuxième c'est la nappe semi-captive du cipolin et du calcaire fissuré, qui devient captive à l'Ouest de la zone d'étude.

Les deux nappes sont limitées par :

- Le massif de l'Edough au Nord (micaschistes et gneiss) qui constitue un réservoir d'alimentation pour ces aquifères (*limite d'alimentation*).
- La dépression du lac Fetzara au Sud et à l'Est, qui constitue l'exutoire et donc une *limite à potentiel imposé*.
- La dépression de la plaine de Tacha au Nord-Ouest considérée comme une *limite à potentiel imposé*.
- La plaine de Guirche au Sud-Ouest considérée comme une *limite à potentiel imposé*.
- Les petites collines à l'Ouest de Guirche qui constituent une *limite d'alimentation*.

Le domaine étudié s'étend sur une superficie de l'ordre de 26.4 Km², repéré par les coordonnées Lambert :

Tableau 25 – Limites de la zone d'étude par les coordonnées Lambert.

	X (km)	Y (km)
Minimale	918.3	399
Maximale	924.71	404.65

La zone d'étude est discrétisée horizontalement en 652 mailles carrées de 200 m de coté et verticalement en trois couches ; la nappe superficielle des sables fin et graviers, la couche semi-perméable d'argile graveleuse et la nappe profonde des cipolins et calcaires fissurés.

Le modèle permet de simuler des écoulements en régime permanent et transitoire dans un système aquifère.

VI.2.5. Modélisation en régime transitoire

La phase de simulation est considérée de novembre 2006 à mai 2007, nous avons subdivisé cette phase en quatre périodes avec un pas de temps de 60 jours (novembre 2006, janvier 2007, mars 2007 et mai 2007).

VI.2.5.1. Le modèle conceptuel

Après l'identification des différentes couches et la délimitation du terrain, l'implantation des trois forages BH1, BH2 et Guirch avec leurs profondeurs et leur débit (de l'ordre de 150 m³/j) pour les quatre périodes du suivi piézométrique, nous avons introduit les valeurs de la perméabilité, du coefficient d'emmagasinement et de la porosité de chaque couche (en l'absence de mesure de ces paramètres dans la zone d'étude, on s'est référé aux mesures effectuées dans la plaine d'Annaba qui présente des caractéristiques analogues notamment dans la plaine d'El-Hadjar et à des données prises dans la littérature pour des formations identiques. Les données de ces paramètres sont récapitulées dans le tableau 26.

Tableau 26 – Données d'entrée des caractéristiques hydrodynamiques pour la réalisation du modèle.

	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emménagement	Porosité
Nappe superficielle (sable fin et gravier)	10^{-2} à 10^{-5}	10^{-1} à 10^{-2}	0.3 (<i>Todd, D.K., 1980</i>)
Couche semi perméable d'argile graveleuse	10^{-6} (<i>Daly, C., 1982</i>)	10^{-2} (<i>Morris, D.A., et A.I. Johnson, 1967</i>)	0.45 (<i>Todd, D.K., 1980</i>)
Nappe profonde du cipolin et calcaire fissuré	10^{-4}	10^{-4}	0.01 (<i>Rabinowitz, D.D., et G.W. Gross, 1972</i>)

VI.2.5.2. Calage du modèle hydrodynamique

Les cartes piézométriques calculées par le modèle sont confrontées aux résultats de terrain, et puisque ces cartes ont en générale la même allure, on montre ici la superposition des deux cartes piézométriques du modèle et mesurée sur terrain du mois de mars 2007 (**Fig. 111**), le niveau des courbes isopièzes dépend :

- Des débits de pompage au niveau de certaines mailles (existence de quelques forages d'alimentation en eau potable).
- Des potentiels imposés au niveau des limites bordant la plaine et des valeurs de la recharge efficace par les précipitations.
- Des valeurs de la perméabilité caractérisant chacune des mailles du système.

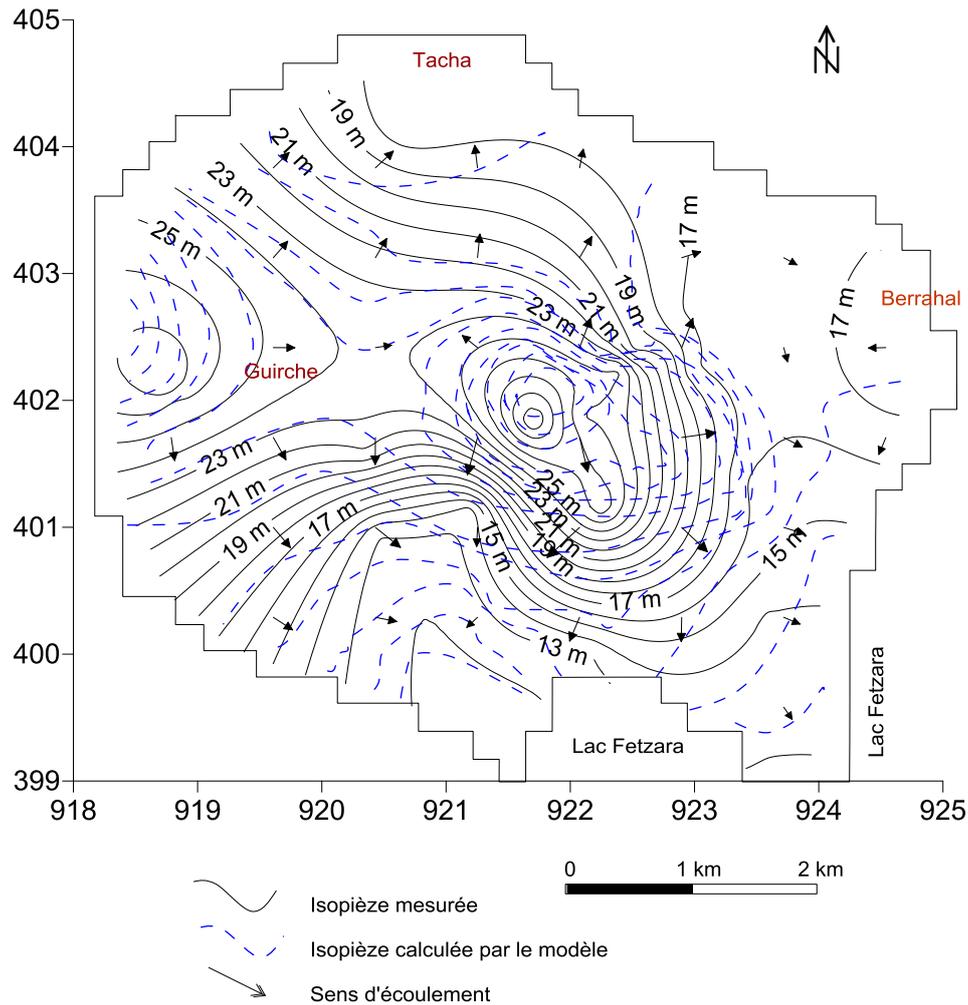


Fig. 111 : Piézométrie mesurée et calculée par le modèle du mois de mars 2007

VI.2.5.3. Ajustement des valeurs de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement

Les valeurs issues des résultats de terrain ont conduit dans une première phase à fixer des plages de perméabilité homogènes. Les états piézométriques choisis sont ceux de novembre 2006, janvier 2007, mars 2007 et mai 2007.

Les essais consécutifs du calage ont permis de modifier les valeurs de perméabilité afin d'aboutir à un écart maximum de 1 m entre les cotes piézométriques mesurées et simulées. On obtient ainsi une carte de répartition des valeurs de la perméabilité qui peuvent se traduire par une zonalité allant de 10^{-2} à 10^{-5} m/s pour la nappe superficielle des sables fins et graviers, et de 10^{-4} m/s pour la nappe semi-captive des cipolins et calcaires fissurés. Pour la couche semi-perméable des argiles graveleuses, la perméabilité est de l'ordre de 10^{-6} m/s, (**Fig. 112**). Les zones les plus perméables se localisent sur les bordures, notamment à la partie Est et Sud en contact avec le lac Fetzara, ce qui peut favoriser les interactions lac-nappe.

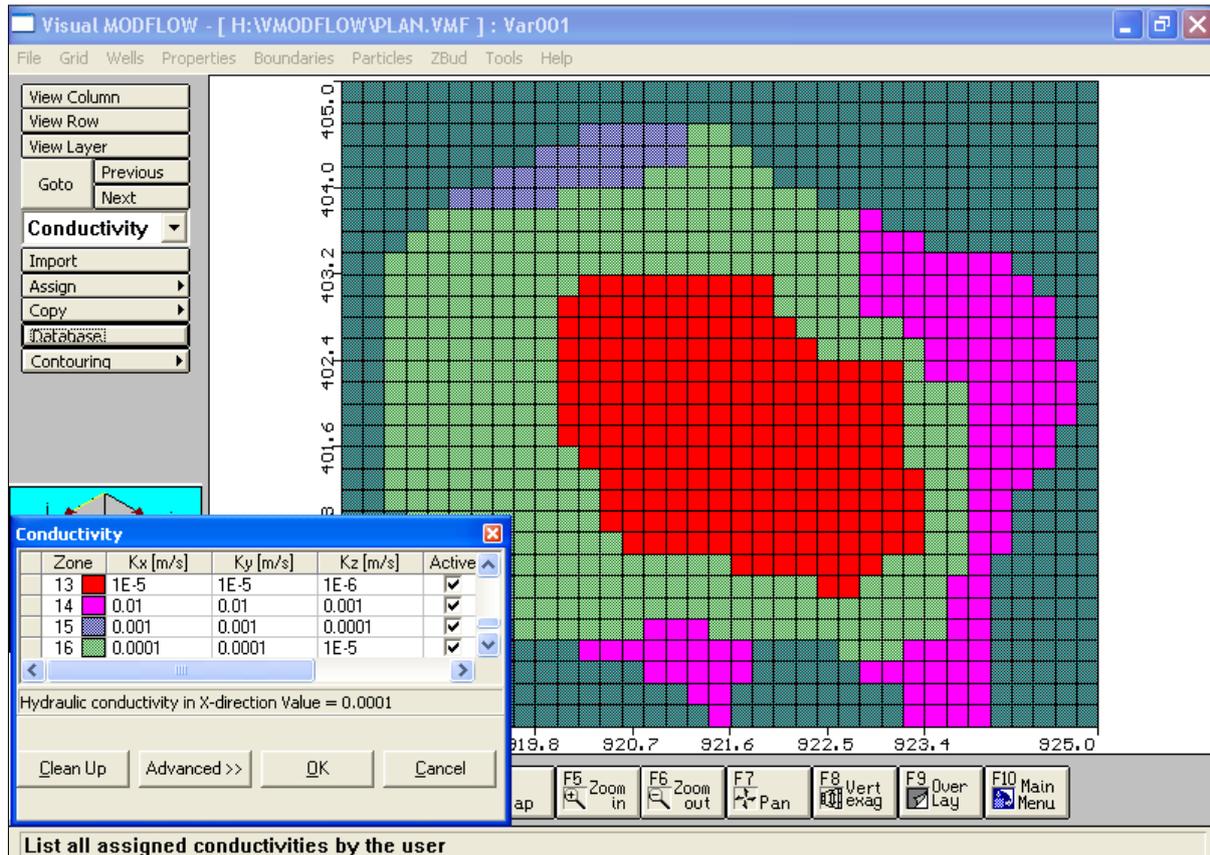


Fig. 112 : Carte de distribution des perméabilités de la nappe superficielle simulée en régime transitoire

Le coefficient d'emmagasinement varie de 0.1 (au niveau de forage Guirch à l'Ouest) à 0.01 pour la nappe superficielle, il est de l'ordre de 10^{-4} au niveau de la nappe semi-captive, et de 0.01 au niveau de la couche semi-perméable (tableau 27).

Tableau 27 – Bilan hydrique calculé en régime transitoire.

Paramètres	Entrées				Sorties				Différence entrées-sorties	Erreur en %
	Périodes				Périodes					
	Nov. 2006	Jan. 2007	Mar. 2007	Mai 2007	Nov. 2006	Jan. 2007	Mar. 2007	Mai 2007		
Emmagasinement (m ³ /j)	0	0.000007	0.00754	0.000003	0.14318	0.012289	0.000001	0	PERIODE : <u>Novembre 2006</u> 0.006162 m ³ /j	0
Potentiel constant (m ³ /j)	22428	24989	20820	20820	22279	24840	20670	20670		
Forages (m ³ /j)	0	0	0	0	149.26	149.26	149.26	149.26	Mars 2007 -0.00677 m ³ /j	
Recharge (m ³ /j)	0.00063	0.00126	0.003781	0.002206	0	0	0	0		
Total entrées (m ³ /j)	22428	24989	20820	20820					<u>Mai 2007</u> -0.006975 m ³ /j	
Total sorties (m ³ /j)					22428	24989	20820	20820		

Les eaux souterraines, véhiculant une quantité importante de polluants provenant de la zone industrielle, peuvent déboucher dans le lac et souiller les eaux. L'examen des données physico-chimiques montre que le processus le plus important qui régit le transport de masse dans les eaux souterraines est l'advection. La dispersion longitudinale est relativement significative par contre la dispersion transversale pourrait être négligée. Les valeurs du Total des Solides Dissous (TDS) ont été choisies pour une étude détaillée du risque sur les ressources en eau à l'aide du modèle de transport parce que :

- Elle a montré une diminution régulière à partir de la zone industrielle vers l'aval de la nappe pendant les trois périodes du suivi ;
- Les valeurs de TDS dans les eaux souterraines sont uniformes. Les données introduites dans le modèle peuvent être résumées comme suit :
 - Les rejets de la zone industrielle sont pris en considération en tenant compte des concentrations mesurées en différents points de mesure dans la zone industrielle;
 - Les limites du modèle correspondent approximativement aux limites du sous bassin versant ;
 - La recharge pluviale se produit verticalement à partir de la surface du sol ;
 - Les pompages en continu effectués dans les 3 ouvrages captant la nappe superficielle ont provoqué un appel d'eau de la zone industrielle ;
 - Les rejets ont été considérés comme une source de pollution diffuse sur toute la bordure de la zone industrielle en contact avec la nappe.

VI.2.5.4. Modèle de transport de masse

Le modèle MT3D (Zheng, 1990) a été utilisé pour la simulation de transport de masse dans la nappe (convection, dispersion et réactions chimiques). Ce modèle est en prise directe avec le logiciel MODFLOW de l'United States Geological Survey (USGS) qui prend en charge la modélisation des écoulements souterrains en différences finies. Les valeurs de dispersivité dans les directions x, y et z sont prises égales respectivement à 10, 1 et 0,1 m (Kimbrough et al., 1999; Domenico et Schwartz, 1990; Tevissen, 1993). La tendance pour que α_L soit environ 10 fois plus grande que α_T et 100 fois α_Z est en conformité avec les concentrations observées dans le secteur. La valeur initiale en Total des Solides Dissous (TDS) assignée dans le reste du secteur est d'environ 500 mg/l. La diminution progressive des valeurs en TDS en s'éloignant de la zone industrielle traduit une recharge relativement constante du polluant à partir des principaux axes d'écoulement. Ainsi, une valeur constante en TDS a été assignée aux différents nœuds de la zone industrielle, avec une valeur de 700 mg/l à la source (au niveau de la zone industrielle) et 500 mg/l au niveau du reste du secteur étudié. Une étude sur une plus grande période et sur quelques profils allant de la zone industrielle vers le lac permettrait d'identifier le risque lié aux rejets industriels sur l'écosystème du lac Fetzara (**Fig. 113**).

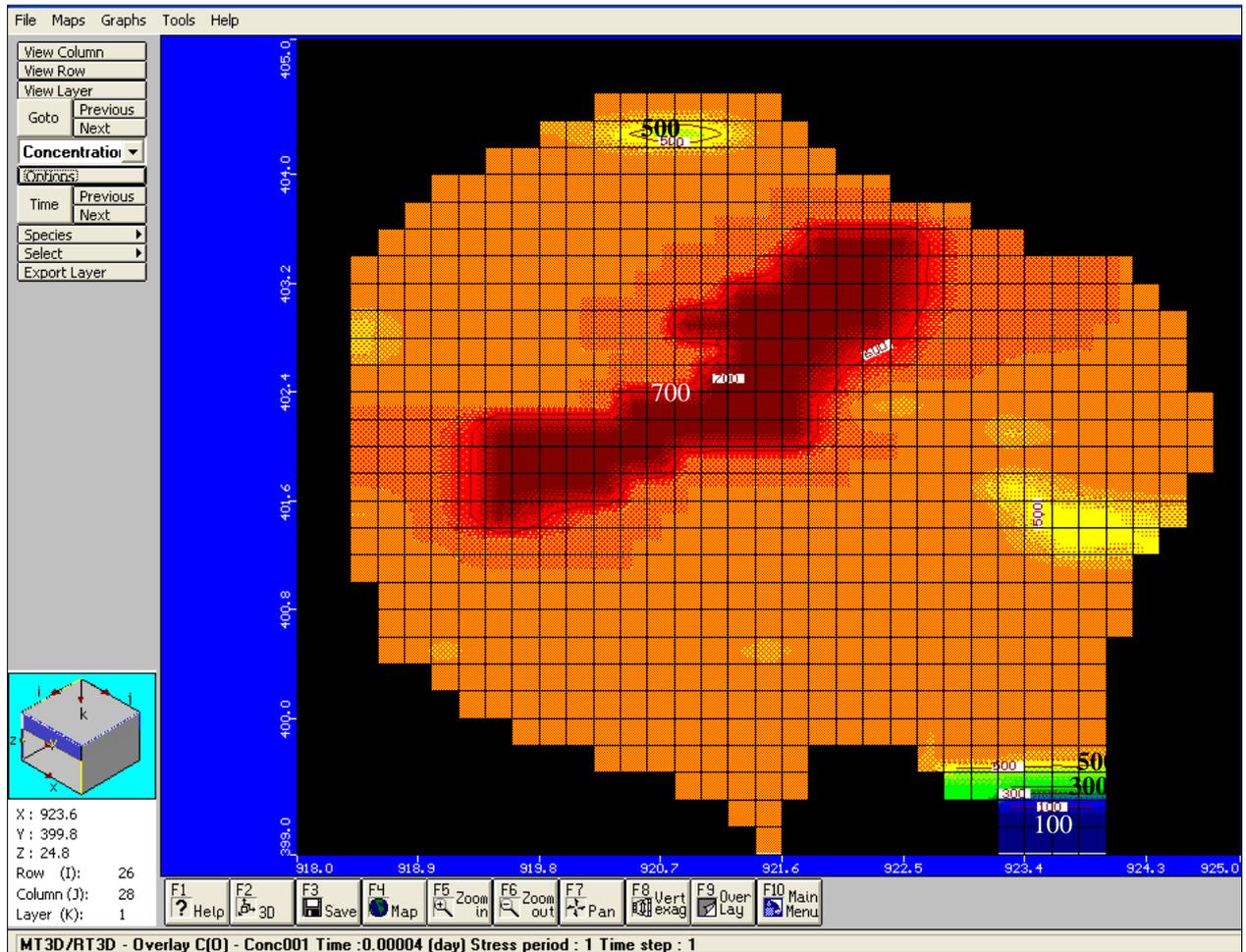


Fig. 113 : Carte de propagation des polluants à partir de la zone industrielle de Berrahal, exemple du Total des Solides Dissous TDS (en mg/l)

VI.3. Evaluation de risque sur la santé liée aux activités dans la zone industrielle de Berrahal

VI.3.1. Contexte et objectifs

Dans le cadre de ce travail, nous avons effectué une Evaluation Détaillée des Risques (E.D.R.) pour la santé humaine liée à la présence de substances polluantes dans les sols.

L'étude est réalisée suivant la méthodologie proposée par le Ministère de l'Environnement définie dans le guide « Gestion des sites pollués » (Version 0 – Juin 2000).

Les polluants du sol concernés dans les calculs de l'E.D.R. sont les cinq métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic, chrome III et mercure). Les raisons qui permettent de justifier cette sélection sont exposées dans le corps du texte

L'objet de la présente évaluation est bien de participer à l'obtention des arguments techniques nécessaires suivants :

- ⇒ Evaluer les risques que présentent les sources de pollution en place sur la santé humaine et en fonction de l'occupation des sols;
- ⇒ Identifier les risques inacceptables pour l'homme.

VI.3.2. Méthodologie

L'étude est réalisée suivant les éléments méthodologiques et les sources d'informations disponibles notamment auprès (liste non exhaustive) :

- ⇒ de l'I.N.E.R.I.S. (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, France) ;
- ⇒ de l'U.S. E.P.A. (Agence américaine de l'environnement) ;
- ⇒ du M.E.D.D. (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, France).

Le cadre méthodologique est donné dans le guide « Gestion des sites pollués – diagnostic approfondi et évaluations détaillées des risques » (version 0 – année 2000) édité par le B.R.G.M. pour le M.E.D.D.

L'évaluation Détaillée des Risques comprend les étapes principales suivantes :

- ⇒ La caractérisation du comportement et de la toxicité des substances ;
- ⇒ La caractérisation des modes de transfert et d'exposition ;
- ⇒ L'établissement du *schéma conceptuel* ;
- ⇒ Le calcul de l'exposition ;
- ⇒ La caractérisation du *risque* ;

L'E.D.R. est réalisée dans le cadre des usages répertoriés dans l'environnement du site et envisagés par la Daira de Berrahal. Toute modification de ces usages implique une révision des paramètres de l'E.D.R.

L'E.D.R. est une méthode d'analyse structurée, où les éléments d'information sont collectés, ordonnés et évalués afin de quantifier le risque d'une manière transparente, afin de permettre au gestionnaire d'agir avec la meilleure visibilité possible sur les situations de pollution, en connaissant l'influence sanitaire possible de telle ou telle décision.

Dans ce cadre, l'E.D.R. doit respecter les principes suivants :

- ⇒ Le principe de précaution ;
- ⇒ Le principe de proportionnalité (cohérence entre le degré d'approfondissement de l'étude, l'importance de la pollution et son incidence prévisible) ;
- ⇒ Le principe de transparence ;
- ⇒ Le principe de spécificité vis-à-vis des caractéristiques du site et de son environnement.

Le schéma de la figure 114 présente la démarche des étapes successives de l'évaluation des risques.

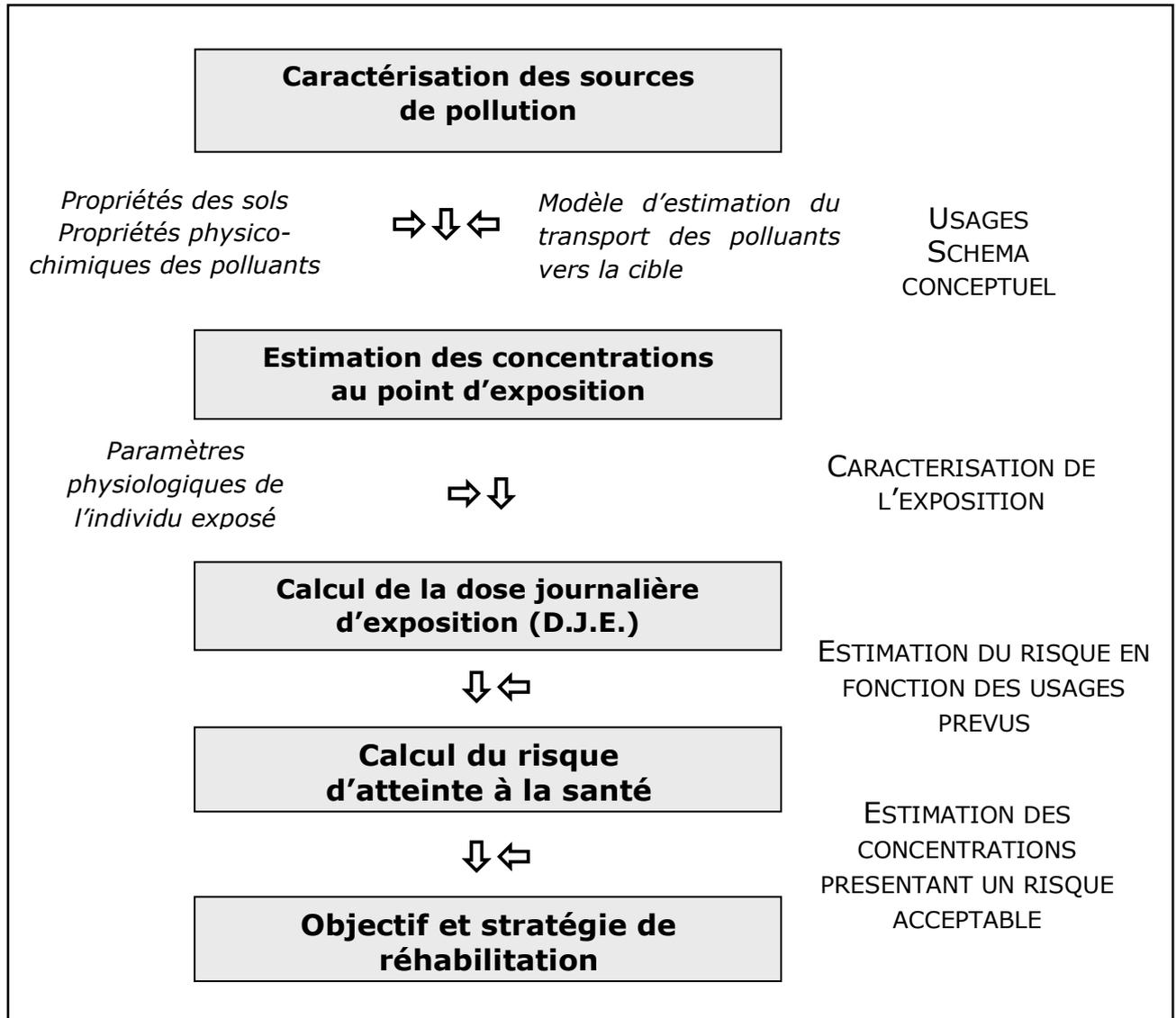


Fig. 214 : Les principales étapes de l'évaluation détaillée des risques

N.B. : La cible prise en compte dans cette E.D.R. est l'homme, enfant et adulte. Les risques sur les écosystèmes ne sont pas évalués ici.

VI.3.3. Sélection des substances à prendre en compte

VI.3.3.1. Les substances analysées

Les études réalisées ont recensé de nombreuses activités de production industrielles pratiquées sur le site. Une campagne de prélèvement complémentaire pour analyse des éléments traces métalliques (métaux lourds) dans le sol de la zone d'étude a été effectuée par nos soins.

Au total, 11 échantillons répartis au travers de la zone d'étude (**Fig. 43**) ont été prélevés. Les analyses chimiques ont porté sur les éléments chimiques suivants : Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Al, V, As, Rb, Sr, Y, Mo, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, W, Th et U. Tous ces éléments ont été dosés au niveau de Laboratoire Chimie Générale et Prévention des Risques et Nuisances Technologiques, de l'Université de la Méditerranée, Faculté de Pharmacie, Aix Marseille II, France.

Tableau 28 - Statistique élémentaires des substances analysées

	Cr	As	Cd	Hg	Pb
Minimum	20	0.5	0.05	0.3	9.8
Maximum	53	6.4	0.50	33	102
Moyenne	39	2.9	0.15	15.8	30

Compte tenu des valeurs de concentrations relevées, ces 5 métaux (tableau 28) sont retenus pour l'E.D.R.

VI.3.3.2. Comportement des substances dans l'environnement

VI.3.3.2.1. Les métaux lourds

❖ Arsenic

L'arsenic existe sous différents degrés d'oxydoréduction : -III, 0, +III, +V. Mis à part les sulfures, les composés minéraux les plus courants sont les combinaisons avec l'oxygène : arsénites (As +III) et arséniates (As +V). L'Arsenic forme également des composés organiques très stables, tant trivalents que pentavalents.

La solubilité des composés de l'arsenic est assez variable, certains étant très solubles, d'autres quasiment insolubles. Globalement, la solubilité des dérivés pentavalents de l'arsenic serait supérieure à celle des dérivés trivalents.

La mobilité de l'arsenic dans les sols est assez limitée (adsorption sur l'argile, les hydroxydes et la matière organique). Néanmoins, As +III est reconnu comme étant plus mobile que As +V. Dans les sols, l'arsenic existe principalement sous forme oxydée : arséniate AsO_4^{3-} ou arsénite AsO_3^{3-} . La forme arséniate (degré d'oxydoréduction +V) est majoritaire dans des conditions d'aération normale.

❖ Chrome

Le chrome se trouve sous trois formes :

- Le chrome (0) (ou chrome élémentaire) qui n'est pas une forme naturelle ;
- Le Chrome III qui est stable et se trouve naturellement dans l'environnement ;
- Le Chrome VI qui est plus rare que le Chrome III.

La distribution des composés du chrome III et du chrome VI (chrome sous deux degrés d'oxydation différents) dépend du potentiel redox, du pH, de la présence de substances oxydantes ou réductrices, de la cinétique des réactions d'oxydoréduction, de la formation de complexes de chrome III ou de sels de chrome III insolubles, ainsi que de la concentration totale de chrome.

Dans l'environnement, le Chrome VI se présente généralement sous forme d'ions CrO_4^{2-} ou HCrO_4^- , et le chrome III sous forme de $\text{Cr}(\text{OH})_n^{(3-n)+}$.

Dans le sol, c'est le Chrome III qui prédomine (chrome issu de la roche mère). Le Chrome VI est facilement et largement réduit en Chrome III, par exemple par les matières organiques. La majeure partie du chrome présent dans les sols ne se dissout pas facilement dans l'eau. C'est la faible fraction soluble qui se propage en profondeur vers les eaux souterraines.

❖ Mercur

Métal de numéro atomique $Z = 80$. Connue depuis 1.500 av JC. Le mercure est rare dans le milieu naturel. On le trouve en traces, dans les roches. Il est notamment extrait du cinabre (sulfure de mercure). Il est stable vis à vis de l'air, de l'eau, des acides (excepté HNO_3 concentré) et des alcalins. Il est utilisé dans la production de chlore et de NaOH , dans l'éclairage des rues, les fongicides, les appareils électriques, ... Le mercure est un métal qui présente des caractéristiques rares :

- C'est le seul métal liquide à température ambiante (entre -10° et $+40^\circ\text{C}$).
- se caractérise par une extrême volatilité.
- se combine très facilement avec d'autres molécules, que ce soient des métaux (amalgames), des molécules inorganiques (soufre) ou organiques (carbone).
- C'est un métal dit " lourd " dans la classification du chimiste Mendeleïev, dans la mesure où il possède une " masse atomique " de 200 (hydrogène = 1).
- C'est un métal toxique. Cette toxicité vient de son extrême volatilité (puisqu'il peut être facilement respiré), de sa relative solubilité dans l'eau et les graisses (il peut être facilement transporté dans le corps), et de sa capacité à se lier avec d'autres molécules, qu'il va modifier ou dont il va transformer les fonctions.

Ses capacités à s'associer à d'autres métaux ont été notamment utilisées pour l'extraction de l'or. Le mercure a aussi été utilisé pour ses propriétés biologiques, en tannerie et en médecine (traitement de la syphilis, par exemple).

Le recyclage croissant du mercure sur un marché déclinant rend de moins en moins utile son extraction primaire. L'inhalation de mercure est la cause de toux et éventuellement de nausées. L'empoisonnement à ce métal cause des maux de tête, des tremblements, une perte d'appétit, la chute des dents. Exemple : l'ingestion de poissons contaminés par des sels mercuriels est à l'origine de la maladie de Minamata, au Japon.

❖ Cadmium

Élément naturel de numéro atomique $Z = 48$, présent dans certains minerais sous forme d'impuretés. Il fut utilisé pour ses caractéristiques physico-chimiques notamment dans les batteries pour la protection de l'acier contre la corrosion (cadmiage) et comme stabilisant pour les plastiques et les pigments. C'est un métal argenté qui se ternit à l'air. Il est soluble dans les acides mais pas en milieu alcalin. C'est le 65ème élément naturel le plus abondant de la croûte terrestre. On le trouve dans les piles, soudures, accumulateurs, pigments de peinture, produits pour la photogravure, les engrais et les pesticides. L'intoxication au cadmium se manifeste par des vertiges, de l'anémie, des douleurs osseuses, et des lésions aux reins.

❖ Plomb

Le plomb existe sous les états d'oxydation 0, +II et +IV, mais dans l'environnement, il est principalement sous l'état +II. Le degré +IV n'existe que dans les conditions extrêmement oxydantes, rarement rencontrées dans l'environnement. Le degré +II est stable dans

pratiquement toutes les conditions environnementales. Le plomb est rarement sous sa forme élémentaire.

La mobilité du plomb dans le sol est très faible, il a ainsi tendance à s'accumuler dans les horizons de surface (et plus précisément dans les horizons riches en matière organique, spécialement pour des sols ayant au moins 5% de matière organique et un pH supérieur à 5).

Dans le milieu aquatique, le plomb a tendance à être éliminé de la colonne d'eau en migrant vers les sédiments par adsorption sur la matière organique et les minéraux d'argile, mais la quantité de plomb restant en solution sera fonction du pH.

VI.3.3.3. La relation dose-effet

Les critères de sélection utilisés pour mener l'E.D.R. dépendent de la présence avérée d'une substance sur le site, du comportement de la substance dans le milieu et de la relation dose/effet qui lui est attribuable.

VI.3.3.3.1. Les métaux lourds

➤ Arsenic

La grande majorité des effets liés aux dérivés de l'arsenic sont induits par les dérivés inorganiques.

La principale voie d'absorption est la voie orale. L'arsenic est bien absorbé par voie orale et par inhalation. Chez l'homme, l'absorption est estimée à 95% par voie orale et à 30 à 34 % par inhalation. La voie cutanée est une voie mineure d'absorption. Après absorption orale, il se distribue dans tous les organes. Il n'y a pas d'organe cible mais les taux les plus importants sont retrouvés dans le foie et les reins.

Toxicité aiguë :

Les effets aigus de l'ingestion d'arsenic sont typiquement gastro-intestinaux avec nausées, vomissements, douleurs abdominales et diarrhées. Les intoxications aiguës sévères s'accompagnent également d'une encéphalopathie aiguë avec confusion, convulsions. Les lésions cutanées observées incluent un rash maculeux diffus et purigineux, une alopecie en plaques, une desquamation brunâtre, une dermite exfoliative. Après inhalation, on peut constater une irritation de la voie respiratoire.

Après exposition cutanée, des irritations ou des signes neurologiques peuvent apparaître.

Toxicité chronique :

De nombreux organes sont touchés par les effets de l'arsenic. La peau peut présenter des lésions d'hyperkératose des paumes de mains et de la plante des pieds. Les effets de l'arsenic concernent également le système cardiovasculaire ainsi que le système vasculaire périphérique.

On observe également des effets hématologiques (anémie) ainsi que la survenue d'une atteinte du système nerveux, et des effets hépatiques. Enfin une corrélation entre l'exposition à l'arsenic et le diabète sucré est fondé au plan physiopathologique.

Les effets cutanés issus d'une inhalation sont de même type que ceux décrits dans le cas d'une contamination par ingestion. Une augmentation du risque de mort par accident cardiovasculaire a déjà été mise en évidence. Chez les salariés exposés par inhalation à des

niveaux élevés de poussières ou de vapeurs d'arsenic inorganique, des nausées, vomissements et diarrhées sont rapportées ; ces effets sont réversibles.

Cancérogenèse :

L'exposition à l'arsenic peut engendrer le cancer des voies respiratoires (poumon), de la peau et une augmentation du risque de cancer de la vessie, des reins et du foie.

➤ **Chrome**

Le Chrome III est semble-t-il moins toxique que le Chrome VI à qui on attribue les manifestations toxiques.

Les composés hexavalents (VI) sont plus facilement absorbés que les composés trivalents (III) car ils traversent plus facilement les membranes. L'absorption intestinale est faible (0,5 à 2%) et l'estomac réduit le chrome VI en chrome III ce qui explique la faible biodisponibilité du chrome VI. La pénétration cutanée est limitée.

Toxicité aiguë :

L'ingestion de chrome peut entraîner :

- une inflammation du tube digestif suivie d'une nécrose (douleurs abdominales, vomissements, diarrhées, hématoméses) avec décès par collapsus respiratoire ;
- des vertiges, une sensation de soif, des douleurs abdominales et des diarrhées en cas d'ingestion de fortes doses de chrome VI.

La cible majeure du Chrome VI est l'appareil respiratoire. Cela se traduit par des toux et des difficultés à respirer. Il peut également apparaître des effets neurologiques et gastro-intestinaux dans le cas d'une importante inhalation de Chrome VI.

L'exposition de la peau au chrome VI engendre des brûlures.

Toxicité chronique :

Les dérivés hexavalents du chrome pénètrent facilement dans l'organisme par toutes les voies d'administration. L'absorption gastro-intestinale est estimée entre 2 et 9 % pour le chrome VI. L'absorption du chrome (III) est nettement plus faible que celle du chrome (VI).

Dans le cas d'une exposition par inhalation, la cible privilégiée du Chrome VI est l'appareil respiratoire avec des perforations et des ulcères du septum, des bronchites, un affaiblissement des fonctions pulmonaires, des pneumonies, de l'asthme, des démangeaisons nasales.

Une exposition chronique au chrome VI par inhalation ou ingestion a des effets sur le foie, les reins, le système gastro-intestinal et immunitaire et des possibilités de saignement.

La sensibilité aux dérivés du chrome VI est nettement supérieure à celle des dérivés du chrome III. Cette différence est en partie due à la meilleure absorption de ceux-ci. Malgré tout, le nombre d'individus sensibilisés au chrome reste faible surtout par comparaison aux concentrations parfois élevées.

Un contact cutané chronique avec le chrome VI peut causer des dermatoses et une ulcération de la peau. Les dermites se manifestent par des éruptions érythémateuses ou vésiculo-papulaires suintantes, prurigineuses surtout localisées aux avant-bras. Le chrome hexavalent peut pénétrer dans la peau où il est réduit en chrome trivalent qui joue le rôle d'haptène. Le chrome trivalent ne pénètre que très difficilement à travers la peau et le risque de sensibilisation est donc faible.

Cancérogenèse :

L'exposition au chrome VI augmente le risque de cancer du poumon, tandis que le chrome III n'est pas une substance reconnue comme étant cancérigène.

➤ **Plomb***Toxicité aiguë :*

L'intoxication aiguë ne se rencontre plus que très rarement aussi bien dans l'industrie qu'en milieu non professionnel, mais elle peut néanmoins se produire par inhalation ou par absorption dans des situations accidentelles.

Les troubles digestifs provoqués par ingestion sont parmi les symptômes les plus précoces. Ils se traduisent par l'apparition de fortes coliques associées à des douleurs et crampes abdominales, ainsi qu'à des vomissements. En cas d'atteinte sévère, les lésions au niveau du système nerveux central se manifestent cliniquement par une encéphalopathie convulsive et un coma pouvant conduire à la mort. Plutôt rares chez l'adulte, ces manifestations sont plus fréquemment rencontrées chez l'enfant.

Toxicité chronique :

Si l'ingestion prédomine dans la population générale, et l'inhalation en milieu professionnel, ces deux voies sont le plus souvent indiscernables l'une de l'autre. Chez l'adulte, les intoxications chroniques sévères se traduisent par une encéphalopathie saturnique grave. Les intoxications moins importantes provoquent divers symptômes : irritabilité, troubles du sommeil, anxiété, perte de mémoire, confusion, sensation de fatigue et de fortes perturbations neurocomportementales et psychomotrices.

Le plomb a également un effet sur le système nerveux central (paralysie partielle des membres supérieurs), des effets hématologiques (anémie) et rénaux (troubles rénaux caractérisés par une atrophie glomérulaire et tubulaire conduisant à une atrophie irréversible de la fonction rénale).

Cancérogenèse :

Selon les instituts de recherche, l'exposition au plomb est considérée comme cancérigène, potentiellement cancérigène ou encore non cancérigène.

VI.3.3.3.2. Calculs des concentrations utilisées dans le modèle

Le modèle de calcul fonctionne avec divers paramètres dont la concentration initiale du polluant dans le sol qui est une donnée déterminante. Considérant que les données disponibles étaient suffisantes (métaux constatés de manière diffuse), la valeur maximale (hypothèse conservatrice) a été retenue sur le site étudié pour chaque paramètre retenu.

Les concentrations retenues pour établir ces valeurs de départ ont été choisies dans l'horizon superficiel du sol, celui avec qui les usagers du site seront préférentiellement en contact.

VI.3.4. Définition du schéma conceptuel**VI.3.4.1. Occupation des sols sur le site**

Dans le cadre de la présente évaluation détaillée des risques, les usages retenus sont :

- la présence des personnes (adultes et enfants) sur le secteur d'étude,

- usage « agricole »,
- usage « élevage ».

VI.3.4.2. Cibles au contact de la pollution

L'homme, caractérisé au travers de divers paramètres, est la principale cible retenue pour l'E.D.R.. Deux stades aux sensibilités variables, sont retenus : les adultes et les enfants. Il n'y a pas de distinction entre les hommes et les femmes.

Dans le cadre des usages envisagés, différents types de population sont susceptibles d'être rencontrés sur le site.

VI.3.4.3. Voies de transfert des polluants depuis le sol

Considérant les caractéristiques des sources de pollutions et de l'environnement, ainsi que les usages prévus, les quatre voies de transfert des polluants du sol vers les cibles sont :

- Inhalation d'air du sol ;
- Inhalation de poussières ;
- Ingestion directe de sol ;
- Contact cutané de poussières issues de sol pollué.

VI.3.4.4. Représentation du schéma conceptuel

Le schéma conceptuel a pour objectif de représenter qualitativement les trois facteurs caractérisant le risque :

- L'existence d'une source de pollution
- La présence d'une cible
- L'existence d'une voie de transfert des polluants vers une ou plusieurs cibles (milieu)

A partir du sol, il s'agit donc de définir le passage des polluants du sol vers les populations cibles.

Les schémas conceptuels suivants (fig. 115, 116, 117 et 118) sont réalisés en fonction des activités effectuées dans la zone d'étude, on peut en effet envisager les 4 scénarii suivants :

Scénario 1 : usage récréatif avec Présence de Personnes,

Scénario 2 : Travaux agricole,

Scénario 3 : usage agricole avec consommation de viande,

Scénario 4 : usage agricole avec consommation de légumes.



Fig. 115 : Schéma conceptuel, *scénario 1* :
Usage récréatif – Présence de Personnes



Fig. 116 : Schéma conceptuel, *scénario 2* :
Travaux agricole



Fig. 117 : Schéma conceptuel, *scénario 3* :
Usage agricole – Consommation de viande



Fig. 118 : Schéma conceptuel, *scénario 4* :
Usage agricole – Consommation de légumes

VI.3.5. Modalités de calcul du risque

VI.3.5.1. Cadre et objectifs

L'objectif de L'E.D.R. santé est de préciser le risque susceptible d'être engendré pour l'homme par les polluants issus des sources de pollution étudiées pour les différents milieux d'exposition, voies d'exposition et paramètres présentés ultérieurement.

VI.3.5.2. Méthodologie

VI.3.5.2.1. La dose journalière d'exposition

La Dose Journalière d'Exposition (D.J.E.) est la dose de substance reçue par l'organisme rapportée au poids de l'individu et au nombre de jours d'exposition. Elle a pour objectif de définir une quantité de polluant administrée, exprimée en mg/kg/j. Une D.J.E. peut également être calculée sous la forme d'une concentration tolérable exprimée en mg/m³. Ce sont les valeurs toxicologiques disponibles dans la littérature et l'unité sous laquelle elles sont exprimées qui déterminent l'unité de la D.J.E.. En effet, la valeur toxicologique employée et

la D.J.E. calculée doivent avoir la même unité afin de pouvoir établir l'indice de risque (IR pour les substances à seuil, c'est-à-dire non cancérigènes) ou l'excès de risque individuel (ERI pour les substances sans seuil, c'est-à-dire cancérigènes). Pour ces calculs, il est nécessaire de quantifier un certain nombre d'hypothèses tout en se référant aux différents scénarios d'exposition présentés dans le schéma conceptuel.

Les différents paramètres à quantifier peuvent être :

- ♦ Physiologiques (poids, surface du corps, ...)
- ♦ Spécifiques de l'usage ou du mode d'exposition (fréquence d'exposition, durée de l'exposition, ...)

Pour chaque scénario (cf. schémas conceptuels et scénarios retenus), les D.J.E. sont calculées pour chaque substance retenue et chaque voie d'exposition identifiée.

La quantification des D.J.E. se déroule toujours en application des mêmes équations, adaptées pour chacune des voies d'exposition. Ces équations se présentent de la manière suivante :

- **Ingestion de sol**

$$D.J.E. = \frac{C \times Q \times De \times Fe}{P \times T}$$

Avec :

- D.J.E. : Dose Journalière d'Exposition (en mg/kg/j) ;
- C : Concentration dans le milieu d'exposition : sol (mg/kg) ;
- Q : Quantité ingérée (kg) ;
- De : Durée d'exposition (années) ;
- Fe : Fréquence d'exposition (j/an) ;
- P : Poids de l'individu (kg) ;
- T : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (jours).
 - Durée de l'exposition (durée d'exposition x 365 jours) en cas d'exposition non cancérigène. Dans ce cas, la durée d'exposition n'influence pas le résultat.
 - Vie entière en cas d'exposition cancérigène (70 ans x 365 jours)

- **Inhalation de poussières**

$$D.J.E. = \frac{C \times De \times Fe_j \times Fe_a}{T}$$

Avec :

- D.J.E. : Dose Journalière d'Exposition (mg/m³)⁻¹ ;
- C : Concentration dans le milieu d'exposition : air (mg/m³) ;
- De : Durée d'exposition (années) ;
- Fe_j : Fraction de temps d'exposition en une journée (nombre d'heures de fréquentation en une journée / 24 heures) ;
- Fe_a : Fraction de temps d'exposition en une année (nombre de jours de fréquentation en une année / 365 jours) ;
- T : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (jours).

- Durée de l'exposition (durée d'exposition x 365 jours) en cas d'exposition non cancérigène. Dans ce cas, la durée d'exposition n'influence pas le résultat.
- Vie entière en cas d'exposition cancérigène (70 ans x 365 jours)

- **Contact cutané**

$$D.J.E. = \frac{C \times Q \times De \times Spe \times Tac \times fm \times Fe}{P \times T}$$

Avec :

- D.J.E. : Dose Journalière d'Exposition (mg/kg/j)⁻¹ ;
- C : Concentration dans le milieu d'exposition : sol (mg/kg) ;
- De : Durée d'exposition (années) ;
- Spe : Surface de peau exposée (m²) ;
- Tac : Facteur d'absorption ;
- fm : Facteur matriciel ;
- Fe : Fraction de temps d'exposition en une année (nombre de jours de fréquentation en une année / 365 jours) ;
- P : Poids de l'individu (kg) ;
- T : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (jours).
 - Durée de l'exposition (durée d'exposition x 365 jours) en cas d'exposition non cancérigène. Dans ce cas, la durée d'exposition n'influence pas le résultat.
 - Vie entière en cas d'exposition cancérigène (70 ans x 365 jours)

L'évaluation détaillée des risques prend en compte des expositions chroniques qui se déroulent donc sur une longue durée : la vie entière ou une longue durée d'exposition.

VI.3.5.2.2. Les fiches de calcul

Les fiches de calcul utilisées dans le cadre de cette étude sont des grilles de calcul au format Excel.

Elles permettent le calcul des D.J.E. et des indices de risque, conformément à la méthodologie mise en place par le Ministère français de l'Environnement : « Gestion des sites pollués – Diagnostic approfondi et évaluation détaillée des risques », version 0 de juin 2000.

Une fiche de calcul rassemble l'ensemble des hypothèses nécessaires (ou facteurs d'exposition) pour alimenter les équations présentées dans le paragraphe précédent :

- la voie d'exposition pour chaque polluant ;
- les caractéristiques physico-chimiques des polluants ;
- les paramètres physiologiques et comportementaux des cibles.

Le premier critère de classement des fiches est le scénario. Les D.J.E. sont calculées en fonction de la voie d'exposition et de l'usage considéré pour chaque polluant. Quand tous les polluants retenus ont été évalués pour un scénario, la même démarche s'applique au scénario suivant.

Les fiches de calcul permettent de calculer l'indice de risque qui concerne les expositions par ingestion, par inhalation de poussières et par contact cutané. L'inhalation de substances volatiles dans l'air ambiant ne relève pas de l'utilisation des équations présentées ci-dessus. Par conséquent, il a été fait usage d'un modèle pour calculer le risque lié à ce mode d'exposition.

VI.3.5.2.3. Le modèle RISC 4

RISC 4 permet de modéliser la concentration en composés volatils dans l'air ambiant (intérieur et extérieur) à partir d'une concentration donnée en polluant dans le sol.

VI.3.5.2.4. Caractéristiques des cibles

Une distinction systématique est faite entre une personne adulte, un enfant et une personne âgée. Afin de caractériser les uns et les autres, c'est la masse corporelle moyenne de la classe d'âge considérée qui varie : poids corporel d'un adulte = 70 kg, poids corporel d'un enfant = 15 kg, poids corporel d'une personne âgée = 60 kg.

La surface du corps en contact avec le polluant est estimée ainsi que le taux respiratoire pour la voie d'exposition inhalation.

Le comportement de l'individu sur le site est quantifié (source citée ou à défaut hypothèse retenue) :

- Nombre de jours par an de fréquentation du site ;
- Nombre d'années de fréquentation ;
- Quantité ingérée...

VI.3.5.3. Résultats

Les équations intégrées dans le modèle pour effectuer la quantification des risques liés aux diverses substances sélectionnées sont définies ci-après :

- **Le risque non cancérigène** (ou **Indice de Risque IR**) est calculé en fonction du rapport entre la Dose Journalière d'Exposition (D.J.E.) et la Dose Journalière Admissible (DJA) ou entre la Dose Journalière d'Exposition (D.J.E.) et la Concentration Tolérable (CT), ceci pour chaque substance considérée.

L'Indice de Risque (IR) est comparé au seuil limite de 1 pour lequel la dose d'exposition est égale à la dose tolérable (circulaire du 10 Décembre 1999)

$$\Rightarrow \text{IR} = \text{D.J.E. (mg/kg/j)} / \text{DJA (mg/kg/j)} \quad [\text{pour l'ingestion et le contact cutané}],$$

$$\Rightarrow \text{IR} = \text{D.J.E. (mg/m}^3\text{)} / \text{CT (mg/m}^3\text{)} \quad [\text{pour l'inhalation}].$$

DJA : valeur toxicologique utilisée

CT : valeur toxicologique utilisée

Les valeurs toxicologiques pour l'ingestion et le contact cutané sont exprimées en mg/kg/j.

Les valeurs toxicologiques pour l'inhalation peuvent être exprimées en mg/kg/j ou / et en mg/m³.

- Si $\text{IR} < \text{ou} = 1$: le risque est considéré acceptable ;
- Si $\text{IR} > 1$: le risque est considéré inacceptable.

- **Le risque cancérigène** (ou **Excès de Risque Individuel ERI**) est calculé en multipliant la Dose Journalière d'Exposition (D.J.E.) à l'Excès de Risque Unitaire (ERU ou ERUI pour l'inhalation), ceci pour chaque substance et chaque voie d'exposition considérée cancérigène (dans le cadre de l'étude, on considère que l'inhalation de chrome et de nickel est cancérigène).

L'excès de Risque Individuel (ERI) est comparé au seuil limite de 10^{-5} définissant un risque cancérigène inacceptable (*circulaire du 10 décembre 1999*).

- ⇒ $ERI = D.J.E. (mg/m^3) * ERU (mg/m^3)$ [pour l'ingestion et le contact cutané],
⇒ $ERI = D.J.E. (mg/m^3) * ERUI (mg/m^3)$ [pour l'inhalation].

CT : valeur toxicologique utilisée

Les valeurs toxicologiques de référence sont exprimées en mg/m^3 . On a donc exploité en Dose Journalière d'Exposition (D.J.E.) la concentration calculée dans le milieu d'exposition.

- Si $ERI < \text{ou} = 10^{-5}$: le risque est considéré acceptable ;
- Si $ERI > 10^{-5}$: le risque est considéré inacceptable.

VI.3.5.3.1. Résultats du calcul des Doses Journalières d'Exposition et des indices de risque

Les résultats des calculs sont donnés dans les tableaux 29, 30, 31 et 32 ci-dessous :

❖ SCENARIO 1 : Récréatif – Présence personnes

Tableau 29 : Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 1

	Inhalation	Contact Cutané	Ingestion de sol
MERCURE	DJE adulte =3.842 mg/m ³	DJE adulte = 2.091 E ⁻⁵ mg/j/kg	DJE adulte = 1. 1 E ⁻⁵ mg/j/kg
	DJE enfant = 3.842 mg/m ³	DJE enfant = 3.65E ⁻⁵ mg/j/kg	DJE enfant = 1.0E-4 mg/j/kg
	IR adulte = 0.000192	IR ad. =0.048	IR ad. =0.018
	IR enfant = 0.000192	IR enf. = 0.061	IR enf. = 0.17
	ERI adulte=8.23E ⁻⁹ mg/m ³	Cancérogène: DJE ad.=1.1E ⁻⁵ mg/j/kg IR ad. = 0.0183	Cancérogène: DJE ad.=6.27E ⁻⁶ mg/j/kg IR ad. = 0.000196
	ERI enfant = 2 .2E ⁻⁸ mg/m ³	DJE enf.= 1.0E ⁻⁴ mg/j/kg IR enf.= 0.171	DJE enf.=2.2E ⁻⁵ mg/j/kg IR enf.=0.000913
PLOMB	DJE ad.=1.188E ⁻⁷ mg/m ³	DJE ad.=8.98E ⁻⁶ mg/j/kg	DJE ad.=3.4E ⁻⁵ mg/j/kg
	DJE enf.=1.188E ⁻⁷ mg/m ³	DJE enf.=1.13E ⁻⁵ mg/j/kg	DJE enf.=3.17E ⁻⁴ mg/j/kg
	IR ad.=5.94E ⁻⁵	IR ad.=2.5E ⁻³	IR ad.=0.0094
	IR enf.=5.94E ⁻⁵	IR enf.=3.13E ⁻³	IR enf.=0.088
	ERI ad.=6.8E-8 (mg/m ³)-1 ERI ad.=8.1E ⁻¹³	DJE ad.=5.13E ⁻⁶ mg/j/kg ERI ad.=4.36E ⁻⁸	DJE ad.=1.94E ⁻⁵ mg/j/kg ERI ad.=1.65E ⁻⁷
	ERI enf.=2.55E ⁻⁸ (mg/m ³)-1 ERI enf.=8.1E ⁻¹³	DJE enf.=2.42E ⁻⁶ mg/j/kg ERI enf.=2.06E ⁻⁸	DJE enf.=6.79E ⁻⁵ mg/j/kg ERI enf.=5.77E ⁻⁷
CHROME	DJE ad.=6.17E-8 mg/m ³	DJE ad.=4.67E-6 mg/j/kg	DJE ad.=1.76E-5 mg/j/kg
	DJE enf.= 6.17E-8 mg/m ³	DJE enf.=5.86E-6 mg/j/kg	DJE enf.=1.6E-4 mg/j/kg
	IR ad.=1.03E-6	IR ad.=9.33E-4	IR ad.=0.0035
	IR enf.= 1.03E-6	IR enf.=1.17E-3	IR enf.=0.033
	ERI ad.=3.53E-8 (mg/m ³)-1 ERI enf.=1.32E-8 (mg/m ³)-1	DJE ad.=2.67E-6 mg/j/kg DJE enf.=1.26E-6 mg/j/kg	DJE ad.=1.01E-5 mg/j/kg DJE enf.=3.53E-5 mg/j/kg
	CADIUM	DJE ad.=5.82E-10 mg/m ³	DJE ad.=4.40E-9 mg/j/kg
DJE enf.= 5.82E-10 mg/m ³		DJE enf.=5.53E-9 mg/j/kg	DJE enf.=1.55E-6 mg/j/kg
IR ad.=2.91E-5		IR ad.=8.8E-6	IR ad.=0.00033
IR enf.= 2.91E-5		IR enf.=1.11E-5	IR enf.=0.0031
ERI ad.=3.33E-10 (mg/m ³)-1 ERI ad.=1.4E-12		DJE ad.=2.52E-9 mg/j/kg DJE enf.=1.19E-9 mg/j/kg	DJE ad.=9.51E-8 mg/j/kg DJE enf.=3.33E-7 mg/j/kg
ERI enf.=1.25E-10 (mg/m ³)-1 ERI enf.=5.24E-13			
ARSENIC	DJE ad.=7.45E-9 mg/m ³	DJE ad.=1.69E-6 mg/j/kg	DJE ad.=2.13E-6 mg/j/kg
	DJE enf.= 7.45E-9 mg/m ³	DJE enf.=2.12E-6 mg/j/kg	DJE enf.=1.99E-5 mg/j/kg
	IR ad.=7.45E-6	IR ad.=5.63E-3	IR ad.=0.007
	IR enf.= 7.45E-6	IR enf.=7.08E-3	IR enf.=0.066
	ERI ad.=4.26E-9 (mg/m ³)-1 ERI ad.=1E-11	DJE ad.=9.66E-7 mg/j/kg ERI ad.=1.45E-6	DJE ad.=1.22E-6 mg/j/kg ERI ad.=1.82E-6
	ERI enf.=1.6E-9 (mg/m ³)-1 ERI enf.=5E-12	DJE enf.=4.55E-7 mg/j/kg ERI enf.=6.83E-7	DJE enf.=4.26E-6 mg/j/kg ERI enf.=6.39E-6

La présence de personnes (enfants et adultes) ne posent apparemment aucun problème selon les hypothèses admises lors de la réalisation de l'ensemble de cette étude (depuis les prélèvements jusqu'à la réalisation de ce travail).

❖ SCENARIO 2 : Travaux agricoles

Tableau 30 : Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 2

	Inhalation	Contact Cutané	Ingestion de sol
MERCURE	DJE ad.=2.71E-7 mg/m ³	DJE ad.=5.13E-5 mg/j/kg	DJE ad.=2.0E-5 mg/j/kg
	IR ad.=1.36E-3	IR ad.=8.54E-2	IR ad.=0.032
	ERI ad.=1.5E-7 (mg/m ³)-1	DJE ad.=2.93E-5 mg/j/kg	DJE ad.=1.11E-5 mg/j/kg
PLOMB	DJE ad.= 8.38E-7mg/m ³	DJE ad.= 1.58E-5 mg/j/kg	DJE ad.= 6E-5 mg/j/kg
	IR ad.=0.00042	IR ad.=0.0044	IR ad.=0.0166
	ERI ad.= 4.79E-7(mg/m ³)-1	DJE ad.= 9.05E-6	DJE ad.= 3.42E-5 mg/j/kg
	ERI ad.=5.7E-12	ERI ad.=7.7E-8	ERI ad.=2.91E-7
CHROME	DJE ad.= 4.36E-7mg/m ³	DJE ad.= 8.23E-6 mg/j/kg	DJE ad.= 3.5E-5mg/j/kg
	IR ad.=7.26E-6	IR ad.= 0.0016	IR ad.=0.0062
	ERI ad.= 2.5E-7 (mg/m ³)-1	DJE ad.= 4.7E-6 mg/j/kg	DJE ad.= 1.78E-5mg/j/kg
CADMIUM	DJE ad.= 4.11E-9 mg/m ³	DJE ad.= 7.77E-9 mg/j/kg	DJE ad.= 3E-7mg/j/kg
	IR ad.=0.00021	IR ad.=1.55E-5	IR ad.=0.00059
	ERI ad.=2.34E-9 (mg/m ³)-1	DJE ad.= 4.438E-9 mg/j/kg	DJE ad.= 1.68E-7mg/j/kg
	ERI ad.=9.86E-12		
ARSENIC	DJE ad.= 5.26E-8mg/m ³	DJE ad.= 2.98E-6 mg/j/kg	DJE ad.= 3.75E-6 mg/j/kg
	IR ad.=5.26E-5	IR ad.=0.0099	IR ad.=0.0125
	ERI ad.= 3.01E-8 (mg/m ³)-1	DJE ad.= 1.7E-6 mg/j/kg	DJE ad.= 2.15E-6 mg/j/kg
	ERI ad.=1E-10	ERI ad.=2.55E-6	ERI ad.= 3.22E-6

Les activités des paysans ne posent apparemment aucun problème selon les hypothèses admises lors de la réalisation de l'ensemble de cette étude (depuis les prélèvements jusqu'à la réalisation de ce travail).

❖ SCENARIO 3 : Agricole – Elevage – Consommation viande

Tableau 31 : Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 3

MERCURE	DJE ad. = 0.0016 mg/j/kg	DJE ad.=0.00092 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. =0.0016 mg/j/kg	DJE enf. = 0.000345 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=2.685 IR enf.= 2.685	
PLOMB	DJE ad. = 8.66E-5 mg/j/kg	DJE ad.= 4.95E-5 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. =8.66E-5 mg/j/kg	DJE enf. = 1.856 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.024	ERI ad.=4.21E-7 (mg/j/kg)-1
	IR enf.= 0.024	ERI enf. = 1.58E-7 (mg/j/kg)-1
CHROME	DJE ad. = 0.00093 mg/j/kg	DJE ad.=0.00053 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 0.00093 mg/j/kg	DJE enf. = 0.0002 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.1869 IR enf.= 0.1869	
CADMIUM	DJE ad. = 7.55E-7mg/j/kg	DJE ad.= 4.315E-7 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 7.55E-7mg/j/kg	DJE enf. = 1.618E-7 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.00151 IR enf.= 0.00151	
ARSENIC	DJE ad. = 2.4E-5mg/j/kg	DJE ad.= 1.38E-5 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 2.4E-5mg/j/kg	DJE enf. = 5.17E-6 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.0805 IR enf.=0.0805	ERI ad.=2.07E-5 ERI enf. = 7.77E-6

La consommation de viandes de vaches élevées sur le site peut impactée négativement la santé des personnes. En effet les résultats de calcul montrent que ce sont les éléments Arsenic et Mercure qui affichent des valeurs d'Excès de Risque (ERI) supérieur à 10^{-5} pour l'Arsecnic et IR supérieur à 1 pour le Mercure.

❖ **SCENARIO 4 : Agricole – Consommation légume****Tableau 32 : Calcul des D.J.E., I.R. et E.R.I. du scenario 4**

MERCURE	DJE ad. = 0.0126mg/j/kg	DJE ad.= 0.0072 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 0.0285 mg/j/kg	DJE enf. = 0.0061 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=21.06 IR enf.= 47.5	
PLOMB	DJE ad. = 0.0041 mg/j/kg	DJE ad.= 0.0023 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 0.0092 mg/j/kg	DJE enf. = 0.002 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=1.127 IR enf.=2.54	ERI ad.= 1.97 E-5 ERI enf. = 1.67 E-5
CHROME	DJE ad. = 0.00098 mg/j/kg	DJE ad.= 0.00056 E-5 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 0.0022 mg/j/kg	DJE enf. = 0.00048 E-5 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.197 IR enf.=0.44	
CADMIUM	DJE ad. =0.00012 mg/j/kg	DJE ad.= 6.94E-5 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 0.00027mg/j/kg	DJE enf. = 5.88E-5 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.24 IR enf.=0.55	
ARSENIC	DJE ad. = 0.00011 mg/j/kg	DJE ad.= 6.46 E-5 (mg/j/kg)-1
	DJE enf. = 0.00026 mg/j/kg	DJE enf. = 5.47 E-5 (mg/j/kg)-1
	IR ad.=0.377 IR enf.=0.851	ERI ad.=9.69E-5 ERI enf. = 8.21E-5

Les résultats des calculs montrent que ce sont les substances Arsenic, Plomb et Mercure qui posent un réel problème de santé lors de la consommation de légumes cultivés sur le site d'étude.

Conclusion

Les objectifs de ce travail de modélisation étaient pour :

- **La première partie** ; d'améliorer la compréhension des interactions hydrogéologiques des rejets liquides de la zone industrielle de Berrahal avec les eaux souterraines de la nappe libre du sable fin et gravier, dans le but d'en faire un outil d'aide à la gestion pour la préservation et la protection de cet écosystème.

A partir du modèle conceptuel, un modèle numérique hydrogéologique avec le code *Modflow* a été construit. La calibration en régime transitoire a permis de fixer la perméabilité de la nappe libre à travers la zone d'étude, où elle est de l'ordre de 10^{-2} m/s au Sud et à l'Est et plus faible au centre (10^{-5} m/s). Ainsi les cartes piézométriques calculées par le modèle coïncident presque avec celle mesurée sur le terrain. La modélisation des écoulements souterrains et de transport de masse a permis de mieux comprendre les interactions effluents-nappe et d'appréhender la migration de contaminant. En effet la modélisation a montré que le polluant suit les lignes de courant (transport convectif) alors que la diffusion transversale est négligeable.

- Pour **la deuxième partie** ; l'évaluation de risque sur la santé humaine liée à la présence de la zone industrielle sur l'ensemble de la plaine a été effectuée à partir des analyses des sols. Cinq substances ont été retenues pour cette recherche et quatre scénarii d'utilisation du site ont été envisagés selon l'usage réel observé sur le terrain.

1) **scénario 1** : usage récréatif avec Présence de Personnes,

2) **scénario 2** : Travaux agricole,

3) **scénario 3** : usage agricole avec consommation de viande,

4) **scénario 4** : usage agricole avec consommation de légumes.

Les calculs effectués selon un modèle élaboré sur Excel mettent en valeur les résultats suivants :

- La consommation de viandes de vaches élevées sur le site peut impactée négativement la santé des personnes. En effet les résultats de calcul montrent que ce sont les éléments Arsenic et Mercure qui affichent des valeurs d'Excès de Risque (ERI) supérieur à 10^{-5} pour l'Arsenic et IR supérieur à 1 pour le Mercure.
- Les résultats des calculs montrent que ce sont les substances Arsenic, Plomb et Mercure qui posent un réel problème de santé lors de la consommation de légumes cultivés sur le site d'étude.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude réalisée s'intéresse à la relation qui peut exister entre les différents polluants et les eaux des aquifères de la région de Berrahal notamment pour sa partie Ouest où s'exerce une activité industrielle intense. Nous avons tenté d'exposer brièvement les principaux résultats obtenus et de proposer des mesures urgentes pour stopper la dégradation de la qualité des eaux dans la région.

La région d'étude qui fait partie de l'ensemble géologique du Tell Algérien Nord Oriental (massif de L'Edough), présente des affleurements de terrains métamorphiques en bordures (gneiss, schistes, micaschistes, cipolins, calcaires métamorphiques), qui constituent des zones d'alimentations pour les nappes et des roches éruptives et des sédiments alluvionnaires potentiellement aquifères du Quaternaire (qui forment la dépression du lac Fetzara).

Avec une superficie de 515 Km², les eaux du sous bassin versant du lac Fetzara alimentent le lac Fetzara au moyen de quatre oueds (oued El Hout, oued Mellah, oued Bou Messous et oued Zied). La nappe superficielle présente des potentialités hydrauliques importantes, compte tenu de son extension spatiale sur toute la plaine et sa faible profondeur. Le volume d'eau stocké dans la nappe est de l'ordre de 13.4 hm³/an. Le climat de la région est du type méditerranéen avec une saison pluvieuse allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et une saison pratiquement sèche débutant de la fin du mois de mai et se termine au début du mois d'octobre, avec une précipitation et une température moyennes annuelles de l'ordre de 687.7 mm de 17.9 °C respectivement. Le calcul des paramètres du bilan hydrique par la formule générale nous a permis de quantifier la hauteur du ruissellement annuelle (108.41 mm) et de l'infiltration (129.75 mm) en se basant sur l'évapotranspiration réelle du bilan de Thornthwaite ETR = 449.54 mm. La RFU, commence à se reconstituer à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum de 100 mm à partir de décembre jusqu'en avril, à cette période apparaît un excédent de l'ordre de 238.16 mm. A partir du mois de mai, la RFU commence à s'épuiser jusqu'au mois de juin où elle devient nulle, ce qui traduit un déficit agricole de 467.72 mm nécessitant une irrigation.

L'étude des colonnes stratigraphiques des forages implantés dans la région de Berrahal confirme l'extension et la superposition de deux nappes :

- l'une superficielle largement exploitée (sables fins et graviers) d'une épaisseur qui ne dépasse pas 10 m dans la partie Est de la zone d'étude où elle est séparées de l'autre aquifère par un niveau semi-perméable d'argile graveleuse, elle atteint les 20 m dans la partie Ouest, là elle est séparée par un épais horizon de formations métamorphiques (schistes et calcaires schisteux),
- L'autre profonde (cipolins et calcaires fissurés) de 3 à 5 m d'épaisseur, à l'Est, elle est semi-captive puis devient captive vers l'Ouest.

Néanmoins, la détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères semble difficile car lors de la réalisation de ces forages aucun pompage d'essai n'a été réalisé. Les sept piézométries réalisées montrent presque la même allure, le sens globale de l'écoulement des eaux souterraines suit le modèle topographique, il aboutit à l'alimentation du lac Fetzara au Sud (gradient hydraulique fort = 0.02) et au Sud-Est (gradient hydraulique faible = 0.001)

et à un degré moindre le Nord de la zone d'étude (plaine de Tacha), avec une ligne de partage des eaux de l'Ouest vers le Sud-Est.

Ces deux nappes sont très vulnérables à la pollution, étant donné leurs faibles profondeurs, l'existence de plusieurs sites industriels et agricoles ainsi que l'existence des formations argilo-graveleuses qui laissent les polluants chimiques s'infiltrer vers la nappe semi-captive, sauf dans la partie Sud-Ouest où la nappe devient plus profonde. La nappe des sables fins et graviers joue un rôle principal dans la plaine, en raison de son utilisation intensive pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation, Ces apports proviennent des bordures (socle métamorphique) et de l'infiltration des pluies efficaces dans la partie Sud.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région de Berrahal, montre que la plupart de ces eaux ont une mauvaise qualité que ce soit sur le côté chimique, où les concentrations en sels minéraux est excessive, la salinité est bien marquée, il existe parfois des puits à eau salée, ou du côté physique marqué par des conductivités électriques très élevées et des pH parfois acides surtout en contact avec le lac Fetzara au Sud et Sud-Est.

La source de la pollution des eaux souterraines de la région en ces métaux lourds, est multiple ; elle est d'origine industrielle influencée par les rejets liquides de la zone industrielle de Berrahal, les rejets des entreprises qui exercent l'activité de transformation de métaux, travaux publics et lavage des engins (Ets Protuil, Naftal,...) fortement chargés en substances chimiques tel les métaux lourds impactent négativement les eaux souterraines, cela est confirmé que la plu part des échantillons d'eau à proximités de ces rejets sont fortement chargés et pollués, l'autre origine de la pollution en ces éléments est d'origine naturelle (géologique) due à l'enrichissement de la région en ces métaux.

L'effet de l'activité agricole est marqué par les teneurs assez élevées en sulfates et nitrites surtout au Sud de la zone d'étude où s'exerce une activité intense.

Les analyses chimique en éléments traces métalliques et non métalliques des échantillons de sol de la zone d'étude, montrent que le sol de la région a des teneurs normales en ce qui concerne les lanthanides, et excessives, dépassant largement les normes pour les métaux lourds Hg, Pb, W, Zn, Mo, Ce et Sn. L'analyse statistique en composante principales (ACP) suggère que l'origine de ces métaux lourds dans le sols de la région est d'origine industrielle influencée par les rejets ; les sites avoisinants les rejets des entreprises de transformation de métaux, galvanisation, raffinerie, ..., sont effectivement plus chargés en ces métaux que les autres sites, en plus de l'origine naturelle (géologique) dont il faut prendre en considération, due à la minéralisation qui caractérise quelques endroits dans le massif de l'Edough (surtout en Pb, Fe, Hg, ...).

Afin de comprendre la mobilisation des métaux lourds dans les eaux souterraines et le sol de la région, des modèles numérique ont été établies, ils consistent en premier lieu de modéliser les écoulements souterrains par la réalisation des cartes piézométriques à l'aide du logiciel Modflow, ces derniers coïncident presque totalement avec celles mesurées sur terrain, en deuxième lieu ; de modéliser une carte de perméabilité de la nappe libre, on arrive à déterminer les zones les plus perméables à l'Est et au Sud de la zone d'étude avec valeur de 10^{-2} m/s, et plus faible au centre (10^{-5} m/s), la modélisation des écoulements souterrains et de transport de masse par le modèle MT3D prise directe avec le logiciel MODFLOW de l'United States Geological Survey (USGS) a permis de mieux comprendre les interactions effluents-nappe et d'appréhender la migration de contaminant, en effet la modélisation a montré que le polluant suit les lignes de courant suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines (transport convectif) et que la zone industrielle réagit comme une source diffuse des polluants notamment les métaux lourds. En troisième lieu, on se sert à l'évaluation de risque sur la santé humaine liée à la présence de la zone industrielle sur l'ensemble de la plaine à partir des

analyses des sols. Cinq substances ont été retenues pour cette recherche et quatre scénarii d'utilisation du site ont été envisagés selon l'usage réel observé sur le terrain.

- **scénario 1** : usage récréatif avec Présence de Personnes,
- **scénario 2** : Travaux agricole,
- **scénario 3** : usage agricole avec consommation de viande,
- **scénario 4** : usage agricole avec consommation de légumes.

A partir des résultats obtenus, on arrive à constater que la consommation de viandes de vaches élevées sur le site peut impactée négativement la santé des personnes. En effet les résultats de calcul montrent que ce sont les éléments Arsenic et Mercure qui affichent des valeurs d'Excès de Risque (ERI) supérieur à 10^{-5} pour l'Arsenic et IR supérieur à 1 pour le Mercure. Pour la consommation de légumes cultivés sur le site d'étude les résultats des calculs montrent que ce sont les substances Arsenic, Plomb et Mercure qui posent un réel problème de santé.

Pour remédier à cette situation des mesures d'urgence doivent être prises :

- * Les effluents non traités rejetés par les unités industrielles doivent être contrôlés pour maintenir les concentrations en dessous des standards de qualité des eaux notamment pour les métaux lourds. La procédure la mieux adaptée est montrée au tableau 19.
- * Il faut traiter l'eau introduite dans la fabrication des produits alimentaires (lait, fromage, boissons, pattes,...) surtout en éléments traces métalliques pour les entreprises qui ont des activités agro-alimentaires (constituent 30% des entreprises implantés).
- * Installation d'un réseau d'assainissement efficace à Kalitoussa pour éviter la contamination des eaux souterraines par les eaux usées.
- * Il faut bien aménager les terrains et les lieux de stockage des métaux pour qu'ils ne contribuent pas à la libération des ions métalliques (Fe^{++} , Cu^{++} , Ni^{++} , ...) lors de leur oxydation (7% des entreprises exercent cette activité).
- * Utilisation rationnelle des engrais dans l'agriculture et choisir le type des plantes qui adsorbent mieux les composés azotés et sulfatés.
- * Appliquer des techniques de traitement et dépollution du sol in situ convenable pour chaque type de pollution à travers la zone d'étude.
- * Des campagnes de contrôle de la qualité des eaux et du sol doivent être effectuées d'une manière systématique pour prévoir toute augmentation excessive des teneurs en éléments toxiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adriano D.C., (1986) : Trace elements in the terrestrial environment New York (USA), Springer-Verlag.
- Aissa, D-E, (1985). Etude des indices et gisements métallifères du massif de l'Edough (Annaba). Thèse de doctorat 3eme cycle. USTHB Alger, 134p.
- Allen, H.E. ; Hansen, D.J. (1996). The importance of trace metal speciation to water quality criteria. *Water Environment Research*, 68, 42-54.
- ATSDR (1992) : Toxicological Profiles for antimony and compounds. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA: U.S department of Health and Human Services, Public Health Services. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html>.
- Baize D. et Paquereau H., (1997) : Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine et Marne. *Étude et Gestion des Sols*, 2, pp. 7793.
- Baize D., (1997): Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.)
- Baize D., 1997 : Interpréter les teneurs totales en micropolluants minéraux : fonds géochimiques locaux et contaminations modérées. 3ème rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. COMIFERGEMAS. Blois. pp. 181192.
- Baize D., Deslais W. et Saby N., (2007) : Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France. Résultats d'une collecte de données à l'échelon national. Rapport final simplifié. ADEME. Angers, Convention 0375 C0035. 86p.
- Belhamra A. (2001). Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire de Magistère, option : biologie des organismes marines. Univ. d'Annaba. 110p.
- BRGM (1993) : Méthodes de dépollution des sols et des eaux pollués par les métaux. R 36 682, 58p.
- C. Colle, C. Adam, J. Garnier-Laplace, S. Roussel-Debet, K. Beaugelin-Seiller (2001) : Césium 137 et environnement. fiche radionucléide, IRSN, 28/03/2001, 29p.
- C. Madoz-Escande, P. Boyer, C. Murlon (2002) : Baryum 133 et environnement. fiche radionucléide, IRSN, 17/07/2002, 13p.
- Caby R., Hammor. D, (1992). Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un « metamorphic core complex » d'âge miocène dans les maghrébides. C ; R. Acad. Sci. Paris, t, 314, série II, p 829-835.
- Cahier de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques, n°04, septembre 2000, 75p.
- CERTU (centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les conditions publiques : Comparaison de méthodes d'analyses des éléments traces métalliques (ETM) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sur les sols et les végétaux. Aout 2004, 121p.
- Choppin GR., et Wong PJ., (1998) : The chemistry of actinide behaviour in marine systems. *Aquat Geochem*, 4: 77-101.
- Coïc Y. et Coppenet M., (1989) : Les oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA, Paris, 114 p.
- Colle C et Roussel-Debet S., (2000) : Le césium dans l'environnement. Sols et végétaux. In: *Le Césium de l'environnement à l'homme*, EDP Sciences, 63-92.
- Colle C., Murlon C., et Henner P., (2003) : Cérium 144 et environnement. Fiche radionucléide, IRSN, 08/01/2003, 10p.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement (1999) : Recommandations canadiennes pour la qualité des sols : Environnement et santé humaine-vanadium (1997), dans

- Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, 1999, Winnipeg, le Conseil.
- Cooper D.A., Pendergrass E.P., Vorwald A.J., Mayock R.L. and Brieger H., (1968) : Pneumoconiosis among workers in an antimony industry. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med*, 103, 3, 496-508.
- Cornell R., (1993) : Adsorption of cesium on minerals: a review. *J Radioanal Nuc Chem Art*, 171(2): 483-500.
- Coughtrey P et Thorne MC., (1983) : Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. A critical review of data, Vol. 1. Balkema, Rotterdam, 321-424.
- Coughtrey PJ et Thorne MC (1983) : Radionuclides distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. Vol 2 AA Balkema (Eds), Rotterdam/Boston, 1983.
- Coughtrey PJ. et Thorne MC., (1983) : Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. Vol. 1. AA Balkema, Rotterdam, 425-454.
- Cuney M., Leroy J., et Pagel M., (1992) : L'uranium, collection « Que sais-je ? » Presses Universitaires de France.
- Djemai R., (1993). Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Mémoire Magistère. INA. Alger.
- Djerrab A., Gherbi C., (1991). Etude pétrologique et géochimique du magmatisme de l'Edough : conséquences métallogéniques (Pb-Zn-Cu). Mémoire d'ingénieur, univ. d'Annaba, 119p.
- Domenico, P. A. and Schwartz F.W., (1990) : Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, U.S.A., pp. 824.
- Durand Delga (1969) : Mise au point sur la structure du nord-est de la Bérabérie. *Publ. Serv. Géol. Algérie. Nll. Sér.*, 39, 89-131.
- Edwards R., Lepp N.W. and Jones K.C., (1995) : Other less abundant elements of potential environmental significance. vol, In: Heavy metals in soils, B. J. Alloway Eds, pp. 307-310.
- Förstner, U. et W. Solomons, (1980) : Trace metals analysis on polluted sediments. Part I : assessment of sources and intensities, *Environ. Tech. Letters*, 1, pp. 494-505.
- Frindik O., et Vollmer S., (1999) : Particle-size dependent distribution of thorium and uranium isotopes in soil. *J Radional Nuc Chem*, 241 (2): 291-296.
- Garnier-Laplace J., Colle C., Morello M., Bonin B., (2001) : Uranium naturel et environnement. Fiche radionucléide, IRSN, 14/05/2001, 16p.
- Gleizes. G., Boulton J., Bossière G., et Collome, P., (1988). Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérien). *C ; R. Acad. Sci. Paris*, t 306, série II, p 1001-1008.
- Golden Software Inc. Surfer – 7 User's Guide (1999).
- Gueniot B., Munier-Lamy C., HWDO., (1988) : Geochemical behavior of uranium in soils, part I. Influence of pedogenetic processes on the distribution of uranium in aerated soils. *J Geochem Explor*, 31: 21-37.
- Habés S. (2006). Pollution saline d'un lac. Cas du lac Fetzara. Est Algérien. Mémoire de magistère, option : hydrogéologie. Université d'Annaba. 101p.
- Hammel W.; Debus R.; Steubing L., (2000) : Mobility of antimony in soil and its availability to plants. *Chemosphere*, 41, Number 11, 1791-1798).
- Hammor D. (1992). Du panafricain au miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord-orientale) retraces par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (V/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et Ar39/Ar40). Thèse de doctorat, université de Montpellier II, 205p.

- Henner P., Garcia-Sanchez L., Colle C., (2002) : Thorium 232 et environnement. Fiche radionucléide, IRSN. 11/04/2002, 13p.
- Henni, B., Guy B., Aissa D.E., Garcia D., (2000). Les gisements et indices de magnétite de la région de Berrahal (massif de l'Edough, Nord-est Algérien). Environnement géologique et données pétrographiques. Bulletin de service Géol. De l'Algérie Vol. 13, n°1 pp. 33-48.
- Hilly. J. (1962). Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer, (Est Constantinois), carte géologique Algérie. Bull, n°19, 399p. Thèse de doctorat.
- Ilavsky J., Snopkova P., (1987). Découverte d'Acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). Comptes rendus de l'académie des sciences, Paris 305 (série II), 881-884.
- J. M. Villa, (1980). La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens. Thèse doctorat d'état, université Paris VI, 3 volumes, 650p (In. Tlili).
- Joleaud. L. (1936). Etude géologique de la région de Bône et de la Calle-pub. Service carte géologique. Algérie n°12. 200p.
- Juste C., Chassin P., Gomez A., Lineres M., Mocquot B., Feix I. et Wiart J., (1995) : Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduares des stations d'épuration urbaines. Convention ADEME-INRA. 209 p.
- Kabata-Pendias A. and Pendias H., (1992) : Trace elements in soils and plants. London (UK), CRC Press. 2nd Ed.
- Kim, S.D. ; Ma, H. ; Allen, H.E. ; Cha, D.K. (1999) : Influence of dissolved organic matter on the toxicity of copper to *Ceriodaphnia dubia* : Effect of complexation kinetics. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 11, 2433-2437.
- Kimbrough, D.E., Cohen, Y., Winer, A.M., Creelman, L., Mabuni, C., (1999) : A critical assessment of chromium in the environment. *Critical Review in Environmental Science and Technology*, 29, 1, pp. 1-46.
- Lagerkvist, B., G.F. Nordberg et V. Vouk. (1986) : Vanadium, dans *Handbook on the toxicology of metals*. 2e éd. L. Friberg, G.F. Nordberg et V. Vouk, éd. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Laouar R., Boyce A.J., Ahmed Said Y., Ouabadi A., Fallick A.E., Toubal A., (2002). Stable isotope study of igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, Northeast Algeria, *Journal of African earth sciences* 35 pp. 271-283.
- Laperche V., Bodéan F., Dictor M.C. et Baranger Ph. (2003) : Guide méthodologique de l'arsenic, appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52066-FR, 90 p., 5 fig., 10 tabl., 3 ann)
- Lung M., (1997) : A present review of the thorium nuclear fuel cycles. Final report of the European Commission on Nuclear Science and Technology, 302p.
- Mahan BH (1967) : Chimie. Edition bilingue Addison-Wesley.
- Mariotti, A., (1994). Dénitrification in situ dans les eaux souterraines, processus naturelles ou provoqués : une revue. *Hydrogéologie*, n° 3, pp. 43-68.
- Martonne E. de (1925-1927) : *Traité de géographie physique*. A. Colin, Paris, 4e édition, 1519 p. (tome 3 avec A. Chevalier et L. Cuénot).
- Thornthwaite, C.W., (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Montclair Environmental Management Team, (1990) : Management plan for chromium contaminated soil. *Int. J. Environ. Studies*, vol. 35.
- Murphy RJ., Lenhart JJ., et Honeyman BD., (1999) : The sorption of thorium (IV) and uranium (VI) to hematite in the presence of natural organic matter. *Coll Surf A*, 157(1-3): 47-62.

- NF X31-101, Qualité des sols, préparation d'un échantillon de sol pour l'analyse physicochimique, séchage, émottage et tamisage à 2 mm. Novembre 1992.
- P. Calmon, J. M. Metivier (2003) : Molybdène 99 et environnement, fiche radionucléide, IRSN, 03/06/2003, 12 p.
- PDAU 1998 (Plan Directeur D'aménagement et d'Urbanisme).
- Piper A., (1944) : A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions, American Geophysical Union. 25:914-23.
- Poinsot C, Baeyens B et Bradbury MH., (1999) : Experimental and modelling studies of cesium sorption on illite. *Geochim Cosmochim Acta*, 63(19-20): 3217-3227.
- Poston TM. et Klopfer DC., (1986) : A literature review of the concentration ratios of selected radionuclides in freshwater and marine fish. PNL-5484, Pacific Northwest Laboratory.
- Potkonjak V. and Pavlovich M., (1983) : Antimoniosis : a particular form of pneumoconiosis. I. Etiology, clinical and X-ray findings. *Int Arch Occup Environ Health*, 51, 3, 199-207.
- Sood DD, Jain HC., Reddy AVR., et Ramakumar KL., (1996) : The actinide elements. International conference- hundred years of x-rays and radioactivity. Mumbai (India). 21-24 Feb 1996, Kulkarni S.G. (eds.), Proceedings, 575 p: 83-114.
- Statistica pour Windows (1997), version 5.1 F, StatSoft France 1984-1997.
- Sunda, W.G ; Hanson, A.K. (1987). Measurement of free cupric ion concentration in seawater by a ligand competition technique involving copper sorption onto 18C SEP-PAK cartridges. *Limnology and Oceanography*, 32, 537-551.
- Tevissen, E., (1993) : Méthodologie d'étude et modélisation du transport de solutés en milieux poreux naturels. Application à la migration du chrome dans la nappe alluviale du Drac (Isère). Thèse de Doctorat INPL, Nancy, 150p.
- Thomson J. F., Touzé S., avec la collaboration de Baranger Ph. (2003) : le mercure et ses composés. Comportement dans les sols, les eaux et les boues de sédiments. BRGM/RP-51890-FR, 119p., 20 fig., 4ann.
- Thorntwaite, C.W. and Mather, J.R., (1955). The water balance. *Pub. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8, 1-104.
- Turc, L., (1954). Le bilan d'eau des sols : relations entre précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491-596.
- Valentin-Rouy et Huet S., (1997) : comportement de certains micropolluants métalliques dans le sol et les produits agricoles après épandage de boues urbaines. Suivi parallèle de l'azote et du phosphore 1995-2004 in « aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage agricole des boues d'épuration urbaine, ADEME. Journée technique des 5 et 6 juin 1997 », ADEME éd., 320 p.
- Vertacnik A., Prohic E., Kozar S. et Juracic M., (1995) : Behaviour of some trace elements in alluvial sediments, Zagreb water-well field area, Croatia. *DW 5HV*, 29(1): 237-246.
- World Health Organization (2011) : Guidelines for Drinking-water Quality, fourth edition, ISBN 978 92 4 154815 1, 564p.
- XLSTAT version 2013.5.07, copyright Addinsoft 1995-2013.
- Yves Le Cofrec (2011) : Sites et sols pollués. Edition Dunod, Paris, 407p.
- Zenati N.E., (1999). Relation nappe-lac, confirmation par l'hydrochimie, cas de la nappe superficielle de la plaine ouest d'El Hadjar lac Fetzara ; nord-est Algérien. Mémoire de magistère. Univ. d'Annaba. 148p.
- Zheng, C., (1990) : MT3D, a Modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater system prepared for the U.S. Environmental Protection Agency.

Sites internet :

<http://www.molybdenum.com.cn/french/molybdenum-tungsten.html>

ANNEXES

Annexe 1 : Les entreprises actives de la zone industrielle de Berrahal (2006).

Entreprise	Date de fondation	produit	Production annuelle
SARL moulin Beldi	1998	Farine et semoule	Semoule 1200 tons Farine 100 tons
SPA- COPRAC	2000	Stockage de fer	4000 tons
ALGOMETAL	2003	Construction métallique	1000 tons
SPA- Protuil	1998	Tuile et galvanisation à chaud	Tuile 80100 tons Galvanisation 7000tons
ENMTP	1983	Commerce de MTP	/
IGROMED	1998	Distribution des produits pharmaceutiques	/
GESIBAT	1998	Commerce et maintenance des MTP	/
	1998	Stockage de fer	/
EURL. ASATIS	2000	Production des sacs tissés	14000000 sacs
EURL- EL Meida	2002	Laiterie	120000 l/jour
Fetzara		Laiterie + fromagerie	Lait 7500 l/j Fromage 2 tons/j
Savonnerie Nozha	2000	Fabrication du savon	5000 tons
EFMI	1987	Fabrication du matériel d'incendie	500 bouteilles
El Annabia	1987	huile	/
EURL - KIV	2004	Importateur camions	1500 unités
BATICIK	/	Charpente métallique	/
BONA	1999	Boissons gazeuses	33000000 l
SARL- Mahbouba	1999	Pâtes alimentaires	8500 tons
SARL- Bitume oxyde de l'Est	2000	Fabrication de bitume et d'étanchéité	/
EURL- Fabrication d'isolation	2001	Matières d'isolation	12000 rouleaux
SARL ESPAP TPS	2002	Fabrication de treillis soudés et armatures métalliques	6000 tons
Naftal	1992	Stockage et distribution des produits pétroliers	7000 l/j
Biscuits 7 épis	/	Fabrication du biscuit	/
TRASFIR	2005	Fabrication des clous	/
Unité CCLS de Berrahal	1985	Stockage de céréales	7000 tons
CAPROMET	2005	RAB, bois, céréale	1000 tons
Diprochim	2000	Point de vente des peintures et des produits chimiques	/

ANNEXES

Annexe 2 : principe de fonctionnement de la spectrométrie de masse à plasma (ICP/MS pour Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) (doc CERTU pdf)

Cette technique est couramment utilisée au laboratoire pour quantifier les teneurs en métal d'échantillons liquides ou solides. Un générateur haute fréquence est utilisé pour chauffer un courant d'argon et créer un plasma (gaz ionisé) par l'intermédiaire d'une bobine d'induction, la température atteinte est de l'ordre de 7000 à 8000 °K.

Au contact du plasma, l'échantillon, préalablement minéralisé, est réduit à l'état d'atomes indépendants et d'ions. Ces atomes excités par le plasma, réémettent l'énergie qu'ils ont acquise sous forme d'un rayonnement électromagnétique (photons). La lumière émise entre dans un spectromètre qui la disperse et sépare les différentes raies d'émission présentes dans le rayonnement. Chaque élément chimique possède un spectre optique caractéristique et l'intensité des raies émises par l'échantillon est proportionnelle à la concentration des éléments qu'ils contiennent. Cette méthode est beaucoup moins sensible que la SAA, mais elle est appréciée pour sa rapidité (quelques dizaines d'éléments par minute en ICP contre un élément toutes les 7 minutes en SAA). La spectrométrie de masse utilisant un plasma inductif comme source d'excitation (ICP/MS) est actuellement la technique multi-élémentaire la plus performante permettant d'obtenir une information quantitative quasi exhaustive sur la composition d'un échantillon ; la grande sensibilité des instruments, associée à un très faible bruit de fond du système de détection, permet d'obtenir, pour la plupart des éléments recherchés, des limites de quantification plus faibles que celles obtenues par d'autres techniques.



ANNEXES

Annexe 3 : Principes de l'analyse en composantes principales

L'A.C.P. est une méthode factorielle utilisant des combinaisons linéaires entre les variables pour analyser les données. Cette méthode, qui consiste à la réduction des données, nous permet de présenter géométriquement les variables et les observations.

La réduction du nombre de caractères ne se fait pas par une simple sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des facteurs. Cette réduction ne sera possible que si les variables initiales présentent des coefficients de corrélation non nuls.

Interprétation des résultats des variables se font sur le cercle de corrélation, Les variables qui se situent près du cercle, et qui sont proches l'une de l'autre présentent une forte relation linéaire entre elles. Par contre les points qui sont à l'opposé, présentent une relation inverse. La projection des variables nous permet d'interpréter les composantes principales et de repérer rapidement les groupes de caractères liés entre eux ou opposés, à condition que les points soient proches de la circonférence. Par contre la projection des individus sur les plans, nous permet d'indiquer quels sont les individus qui caractérisent le plus fortement un axe.

ANNEXES

Annexe 4 : Coordonnées Lambert (en km) des puits (P), forages (F) et rejets (R) des analyses physicochimiques des eaux.

Point d'échantillonnage	X (km)	Y (km)
P1	921.31	403.1
P2	920.89	402.25
P3	920.2	402.11
P4	921.35	402.55
P5	921.7	402.26
P6	922.15	402.2
P7	922.4	402.25
P8	922.98	402.24
P9	923.09	401.7
P10	923.25	400.82
P11	923.59	401.29
P12	923.71	401.68
P13	923.55	400.32
P14	922.2	400.8
P15	922.05	400.65
P16	921.7	401.26
P17	921.8	401.7
P18	921.7	401.84
P19	922.1	401.89
P20	922.75	402.3
P21	922	402.5
P22	922.24	402.5
P23	922.5	402.4
P24	920.35	401.6
P25	921.2	401.13
P26	920.45	400.95
F1	921.25	402.8
F2	921.02	402.9
F3	920.8	402.82
F4	921.2	403.05
F5	920	402
F6	921.5	402.62
F7	921.8	403.25
F8	920.36	402.2
F9	921.43	402.25
F10	921.6	402.1
F11	923.95	402.05
F12	920.08	402.2
F13	920	401.8
F14	922.3	403.65
F15	921.25	402.2
R1	921.3	402
R2	921.82	401.94
R3	922.25	402.91
R4	919.8	401.86
R5	919.62	401.69
R6	919.82	401.75
R7	919.61	401.67
R8	919.6	401.89
R9	920.09	401.7

ANNEXES

Annexe 5 : Coordonnées Lambert (en km) des sites pour les analyses chimiques du sol

Echantillon de sol	X (km)	Y (km)
S1	923.701	401.888
S2	923.764	401.401
S3	923.121	400.868
S4	923.419	399.519
S5	921.850	400.397
S6	922.258	401.276
S7	919.387	400.978
S8	920.705	401.103
S9	922.132	401.746
S10	922.446	402.860
S11	921.442	403.943

ANNEXES

Annexe 6 - Matrice de corrélation des paramètres chimiques mesurés pour les analyses du sol

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb	Al	V	As	Rb	Sr	Y	Mo	Sn	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	W	Th	U	
Cr	1.000																															
Mn	0.443	1.000																														
Fe	0.719	0.463	1.000																													
Co	-0.589	-0.176	-0.221	1.000																												
Ni	0.566	-0.106	0.140	-0.624	1.000																											
Cu	0.615	-0.125	0.363	-0.528	0.698	1.000																										
Zn	0.350	-0.068	0.600	-0.034	-0.024	0.555	1.000																									
Cd	0.460	0.041	0.667	-0.153	0.056	0.599	0.978	1.000																								
Hg	-0.388	-0.157	0.143	0.858	-0.673	-0.479	0.167	0.050	1.000																							
Pb	0.433	0.100	0.533	-0.212	0.070	0.532	0.844	0.900	-0.106	1.000																						
Al	0.480	0.000	-0.092	-0.625	0.884	0.446	-0.328	-0.214	-0.786	-0.083	1.000																					
V	0.594	0.374	0.145	-0.417	0.674	0.247	-0.427	-0.340	-0.496	-0.210	0.776	1.000																				
As	0.244	0.756	0.453	-0.022	0.082	-0.168	-0.051	0.055	-0.074	-0.106	0.112	0.317	1.000																			
Rb	0.497	-0.021	-0.120	-0.607	0.892	0.569	-0.292	-0.215	-0.770	-0.113	0.941	0.812	-0.038	1.000																		
Sr	0.302	0.129	0.077	-0.578	0.522	0.529	0.211	0.299	-0.749	0.399	0.565	0.263	0.293	0.496	1.000																	
Y	0.560	0.238	0.023	-0.504	0.832	0.384	-0.328	-0.243	-0.674	-0.121	0.900	0.925	0.288	0.916	0.468	1.000																
Mo	0.369	0.202	0.716	0.065	-0.104	0.198	0.492	0.465	0.430	0.087	-0.396	-0.190	0.102	-0.337	-0.294	-0.296	1.000															
Sn	0.616	-0.047	0.611	-0.421	0.437	0.843	0.833	0.880	-0.229	0.715	0.135	-0.102	-0.036	0.161	0.400	0.046	0.496	1.000														
Sb	0.416	0.134	0.598	-0.450	0.344	0.638	0.567	0.664	-0.305	0.697	0.169	0.032	0.293	0.122	0.630	0.059	0.162	0.668	1.000													
Cs	0.514	-0.039	-0.044	-0.641	0.934	0.624	-0.211	-0.118	-0.788	-0.010	0.961	0.776	0.030	0.983	0.589	0.897	-0.330	0.248	0.272	1.000												
Ba	0.413	-0.009	0.475	-0.185	0.218	0.605	0.843	0.866	-0.146	0.940	0.028	-0.111	0.115	0.021	0.536	0.034	0.043	0.715	0.682	0.123	1.000											
La	0.522	0.469	0.076	-0.662	0.530	0.129	-0.389	-0.206	-0.740	-0.027	0.779	0.664	0.412	0.629	0.448	0.686	-0.308	0.012	0.166	0.651	-0.096	1.000										
Ce	0.543	0.523	0.115	-0.607	0.554	0.133	-0.426	-0.247	-0.699	-0.077	0.791	0.753	0.481	0.661	0.440	0.746	-0.274	-0.024	0.171	0.679	-0.121	0.986	1.000									
Nd	0.550	0.510	0.107	-0.593	0.568	0.129	-0.453	-0.280	-0.684	-0.124	0.804	0.784	0.461	0.684	0.415	0.768	-0.256	-0.043	0.134	0.694	-0.157	0.977	0.997	1.000								
Sm	0.578	0.486	0.087	-0.564	0.658	0.202	-0.462	-0.313	-0.690	-0.168	0.854	0.892	0.439	0.789	0.424	0.886	-0.260	-0.049	0.090	0.781	-0.141	0.916	0.960	0.973	1.000							
Eu	0.673	0.326	0.206	-0.606	0.801	0.464	-0.173	-0.041	-0.719	0.146	0.893	0.884	0.379	0.854	0.609	0.928	-0.308	0.181	0.350	0.885	0.239	0.787	0.833	0.838	0.901	1.000						
Gd	0.593	0.520	0.136	-0.551	0.637	0.187	-0.433	-0.276	-0.665	-0.130	0.833	0.872	0.491	0.749	0.421	0.860	-0.235	-0.030	0.123	0.750	-0.117	0.929	0.973	0.982	0.996	0.896	1.000					
Dy	0.540	0.339	0.020	-0.489	0.755	0.271	-0.447	-0.338	-0.660	-0.206	0.899	0.947	0.363	0.878	0.441	0.973	-0.299	-0.054	0.042	0.860	-0.093	0.789	0.853	0.875	0.960	0.928	0.942	1.000				
W	-0.341	-0.154	0.188	0.852	-0.620	-0.436	0.185	0.072	0.994	-0.106	-0.742	-0.458	-0.043	-0.733	-0.708	-0.632	0.473	-0.187	-0.271	-0.744	-0.128	-0.721	-0.671	-0.653	-0.653	-0.676	-0.627	-0.616	1.000			
Th	0.540	0.558	0.133	-0.566	0.428	0.044	-0.426	-0.247	-0.627	-0.079	0.710	0.702	0.453	0.566	0.372	0.656	-0.242	-0.069	0.124	0.576	-0.156	0.977	0.984	0.981	0.922	0.764	0.939	0.787	-0.603	1.000		
U	0.599	0.667	0.470	-0.423	0.217	-0.029	-0.161	0.026	-0.321	0.156	0.409	0.489	0.601	0.219	0.180	0.374	0.033	0.069	0.273	0.266	-0.007	0.831	0.832	0.817	0.706	0.573	0.757	0.515	-0.300	0.878	1.000	

ANNEXES

Annexe 7 – Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques pour les analyses de l'eau

	PH	CE	DBO	MG	CA	NA	K	HCO3	SO4	CL	NO2	PB	FE	CU	NI	MN
PH	1.00															
CE	0.39	1.00														
DBO	0.24	0.65	1.00													
MG	0.15	0.51	-0.11	1.00												
CA	0.28	0.70	0.18	0.72	1.00											
NA	0.50	0.60	0.25	0.47	0.49	1.00										
K	0.45	0.69	0.53	0.20	0.42	0.74	1.00									
HCO3	0.55	0.31	0.18	0.21	0.47	0.35	0.28	1.00								
SO4	0.12	0.47	0.04	0.61	0.48	0.42	0.19	0.23	1.00							
CL	-0.05	0.31	-0.22	0.78	0.59	0.38	0.13	-0.03	0.26	1.00						
NO2	0.42	0.40	0.52	-0.17	0.00	0.25	0.38	0.05	-0.03	-0.21	1.00					
PB	-0.28	0.20	0.20	-0.10	0.09	0.09	0.07	-0.07	0.17	-0.02	-0.01	1.00				
FE	0.08	0.20	0.27	-0.15	-0.13	-0.03	0.08	0.29	0.17	-0.23	0.15	-0.05	1.00			
CU	0.17	0.47	-0.04	0.69	0.69	0.55	0.28	0.23	0.42	0.67	-0.13	0.02	-0.16	1.00		
NI	-0.23	0.12	0.37	-0.11	-0.02	-0.12	0.11	0.07	0.14	-0.08	-0.03	0.18	0.28	-0.21	1.00	
MN	0.10	0.45	0.18	0.21	0.25	0.45	0.35	0.04	0.25	0.29	0.11	0.32	0.16	0.53	0.09	1.00

ANNEXES

Annexe 8 - Photos de quelques rejets des entreprises de la zone industrielle



Photo – Rejet de l’Ets Protuil (R1 et R2)



Photo – Rejet de l’Ets Protuil (R1 et R2)



Photo – Rejet de l’Ets Protuil (R1 et R2)



Photo – Rejet de l’Ets Bona (R8)



Photo – Rejet de l’Ets Bona (R8)



Photo – Rejet de l’Ets Bona (R8)

ANNEXES

Annexe 9 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 1

Annexe 9a – Fiche de calcul de l'arsenic

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :																																																																																													
Usage	Récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	récréatif	Cible terminale	Homme																																																																																										
Catégorie	Présence de personnes	Cible intermédiaire	aucune	Catégorie	Présence de personnes	Cible intermédiaire	aucune	Catégorie	Présence de personnes	Cible intermédiaire	Aucune																																																																																										
Voie d'exposition	Inhalation			Voie d'exposition	Contact cutané			Voie d'expos	Ingestion de sol																																																																																												
SOURCE				SOURCE				SOURCE																																																																																													
Polluant Arsenic Concentration maximale dans le sol (C) 6 Concentration dans le sol retenue (C) 6.4 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3 Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 3.84E-07 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans				Polluant Arsenic Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 6.4 mg/kg Concentration retenue 6.4 mg/kg				Polluant Arsenic Concentration max dans le sol 6.4 mg/kg Concentration retenue 6.4 mg/kg																																																																																													
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE																																																																																													
Comportement de l'individu sur le site Durée de l'exposition (T) 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 15 Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 2 2 Nombre d'heures en une journée 24 24 Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.083 0.083 Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 85 85 Nombre de jours dans une année 365 365 Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.233 0.233				Caractéristiques physiologiques de l'individu non cancérogène cancérogène adulte enfant adulte enfant Poids d'une personne (kg) 70 15 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 0.95 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 85 85 Durée de l'exposition (T) en années 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 15 Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27 0.1425 Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098 0.005				Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte enfant Poids d'une personne (kg) 70 15 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 85 85 Durée de l'exposition (T) en années 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 15 Quantité de sol ingérée (kg/j) 0.0001 0.0002																																																																																													
Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th colspan="2">Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>6.4</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>Quantité administrée</td> <td>Q</td> <td>kg/j</td> <td>0.0001</td> <td>0.0002</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>De</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Te</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue					Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1	Durée de l'exposition	De	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475	SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th colspan="2">Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>6.4</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>Quantité administrée</td> <td>Q</td> <td>kg/j</td> <td>0.0001</td> <td>0.0002</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>De</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Te</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue					Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1	Durée de l'exposition	De	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																																																		
			Adulte	Enfant																																																																																																	
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4																																																																																																	
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002																																																																																																	
Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1																																																																																																	
Durée de l'exposition	De	années	40	15																																																																																																	
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																																	
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																	
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																																																																																																	
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																																																		
			Adulte	Enfant																																																																																																	
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4																																																																																																	
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002																																																																																																	
Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1																																																																																																	
Durée de l'exposition	De	années	40	15																																																																																																	
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																																	
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																	
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																																																																																																	
SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérogène (à seuil) $DJE = C \times Tai \times Fej \times Fea \times (T/Tm)$ DJE adulte = 7.45205E-09 mg/m3 DJE enfant = 7.45205E-09 mg/m3 Cancérogène (sans seuil) $ERI = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/Tm$ ERI ad = 4.26E-09 (mg/m3)-1 ERI enf = 1.6E-09 (mg/m3)-1				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th colspan="2">Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>6.4</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption cutanée</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>0.03</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>Quantité de sol sur la peau</td> <td>Q</td> <td>mg</td> <td>0.00265</td> <td>0.000713</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>T</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Tm</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue					Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4	Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.03	0.03	Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713	Durée de l'exposition	T	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475	SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th colspan="2">Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>6.4</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>Quantité administrée</td> <td>Q</td> <td>kg/j</td> <td>0.0001</td> <td>0.0002</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>De</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Te</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue					Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1	Durée de l'exposition	De	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																																																		
			Adulte	Enfant																																																																																																	
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4																																																																																																	
Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.03	0.03																																																																																																	
Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713																																																																																																	
Durée de l'exposition	T	années	40	15																																																																																																	
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																																	
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																	
Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475																																																																																																	
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																																																		
			Adulte	Enfant																																																																																																	
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	6.4																																																																																																	
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002																																																																																																	
Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1																																																																																																	
Durée de l'exposition	De	années	40	15																																																																																																	
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																																	
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																	
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																																																																																																	
CALCUL DE RISQUE Non cancérogène (à seuil) DJA = 1.00E-03 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 7.45205E-06 IR enf. = 7.45205E-06 Cancérogène (sans seuil) ERU = 3.30E-03 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 1.4E-11 ERI enf. = 5.3E-12				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 DJA = 3.00E-04 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.005633753 IR enfant = 0.007079452				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j ERU = 1.5 (mg/kg/j)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 1.825E-06 ERI enfant = 6.387E-06																																																																																													

ANNEXES

Annexe 9 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 1

Annexe 9b – Fiche de calcul du cadmium

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :																																																																																							
Usage Catégorie Voie d'exposition	Récréatif Espace boisé (avec public) Inhalation	Cible terminale Cible intermédiaire	Homme aucune	Usage Catégorie Voie d'exposition	récréatif Espace boisé (avec public) Contact cutané	Cible terminale Cible intermédiaire	Homme aucune	Usage Catégorie Voie d'expos	récréatif Espace boisé (avec public) Ingestion de sol	Cible terminale Cible intermédiaire	Homme Aucune																																																																																				
SOURCE				SOURCE				SOURCE																																																																																							
Polluant Cadmium Concentration maximale dans le sol (C) 1 Concentration dans le sol retenue (C) 0.5 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3 Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 3E-08 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans				Polluant Cadmium Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 0.5 mg/kg Concentration retenue 0.5 mg/kg				Polluant Cadmium Concentration max dans le sol 0.5 mg/kg Concentration retenue 0.5 mg/kg																																																																																							
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE																																																																																							
Comportement de l'individu sur le site <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Non cancérigène</th> <th colspan="2">Cancérigène</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Durée de l'exposition (T)</td> <td>40</td> <td>15</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Période de tps moyennant l'exposition (Tm)</td> <td>40</td> <td>15</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>Nombre d'heures de fréquentation sur site (F)</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Nombre d'heures en une journée</td> <td>24</td> <td>24</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Fraction temps exposition en une journée (Fej)</td> <td>0.083</td> <td>0.083</td> <td>0.083</td> </tr> <tr> <td>Nombre de jours de fréquentation sur site (F)</td> <td>85</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Nombre de jours dans une année</td> <td>365</td> <td>365</td> <td>365</td> </tr> <tr> <td>Fraction temps exposition en une année (Fea)</td> <td>0.233</td> <td>0.233</td> <td>0.233</td> </tr> </tbody> </table>				Non cancérigène		Cancérigène		Durée de l'exposition (T)	40	15	40	Période de tps moyennant l'exposition (Tm)	40	15	70	Nombre d'heures de fréquentation sur site (F)	2	2	2	Nombre d'heures en une journée	24	24	24	Fraction temps exposition en une journée (Fej)	0.083	0.083	0.083	Nombre de jours de fréquentation sur site (F)	85	85	85	Nombre de jours dans une année	365	365	365	Fraction temps exposition en une année (Fea)	0.233	0.233	0.233	Caractéristiques physiologiques de l'individu <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">non cancérigène</th> <th colspan="2">cancérigène</th> </tr> <tr> <th></th> <th>adulte</th> <th>enfant</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Poids d'une personne (kg)</td> <td>70</td> <td>15</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Surface de peau du corps humain (m2)</td> <td>1.8</td> <td>0.95</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				non cancérigène		cancérigène			adulte	enfant		Poids d'une personne (kg)	70	15		Surface de peau du corps humain (m2)	1.8	0.95		Caractéristiques physiologiques de l'individu <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">adulte</th> <th colspan="2">enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Poids d'une personne (kg)</td> <td>70</td> <td>15</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Surface de peau du corps humain (m2)</td> <td>1.8</td> <td>0.95</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				adulte		enfant		Poids d'une personne (kg)	70	15		Surface de peau du corps humain (m2)	1.8	0.95																					
Non cancérigène		Cancérigène																																																																																													
Durée de l'exposition (T)	40	15	40																																																																																												
Période de tps moyennant l'exposition (Tm)	40	15	70																																																																																												
Nombre d'heures de fréquentation sur site (F)	2	2	2																																																																																												
Nombre d'heures en une journée	24	24	24																																																																																												
Fraction temps exposition en une journée (Fej)	0.083	0.083	0.083																																																																																												
Nombre de jours de fréquentation sur site (F)	85	85	85																																																																																												
Nombre de jours dans une année	365	365	365																																																																																												
Fraction temps exposition en une année (Fea)	0.233	0.233	0.233																																																																																												
non cancérigène		cancérigène																																																																																													
	adulte	enfant																																																																																													
Poids d'une personne (kg)	70	15																																																																																													
Surface de peau du corps humain (m2)	1.8	0.95																																																																																													
adulte		enfant																																																																																													
Poids d'une personne (kg)	70	15																																																																																													
Surface de peau du corps humain (m2)	1.8	0.95																																																																																													
Remarque Pour les effets à seuils , les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70) Pour les effets sans seuils , Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Hypothèses</th> <th rowspan="2">Notation</th> <th rowspan="2">Unité</th> <th colspan="2">Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption cutanée</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>0.001</td> <td>0.001</td> </tr> <tr> <td>Quantité de sol sur la peau</td> <td>Q</td> <td>mg</td> <td>0.00265</td> <td>0.000713</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>T</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Tm</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue		Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	0.5	0.5	Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.001	0.001	Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713	Durée de l'exposition	T	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475	SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Hypothèses</th> <th rowspan="2">Notation</th> <th rowspan="2">Unité</th> <th colspan="2">Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>Quantité administrée</td> <td>Q</td> <td>kg/j</td> <td>0.0001</td> <td>0.0002</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>De</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Te</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue		Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	0.5	0.5	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1	Durée de l'exposition	De	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																																												
			Adulte	Enfant																																																																																											
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	0.5	0.5																																																																																											
Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.001	0.001																																																																																											
Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713																																																																																											
Durée de l'exposition	T	années	40	15																																																																																											
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																											
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																											
Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475																																																																																											
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																																												
			Adulte	Enfant																																																																																											
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	0.5	0.5																																																																																											
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002																																																																																											
Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1																																																																																											
Durée de l'exposition	De	années	40	15																																																																																											
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																											
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																											
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																																																																																											
SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérigène (à seuil) $DJE = C \times Tai \times Fej \times Fea \times (T/Tm)$ DJE adulte = 5.82192E-10 mg/m3 DJE enfant = 5.82192E-10 mg/m3 Cancérigène (sans seuil) $ERI = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/Tm$ ERI ad = 3.3268E-10 (mg/m3)-1 ERI enf = 1.2476E-10 (mg/m3)-1				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérigène (à seuil) $DJE = C \times Q \times Fa \times T \times Fea / (Pa \times Tm)$ DJE adulte = 1.66341E-07 mg/j/kg DJE enfant = 1.55251E-06 mg/j/kg Cancérigène (sans seuil) $ERI = ((C \times Q \times Fa \times T \times Fea \times Fej) / (Pe \times Te))$ ERI adulte = 9.505E-08 mg/j/kg ERI enfant = 3.327E-07 mg/j/kg																																																																																											
CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) DJA = 2.00E-05 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 2.91096E-05 IR enf. = 2.91096E-05 Cancérigène (sans seuil) ERU = 4.20E-03 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 1.4E-12 ERI enf. = 5.24E-13				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 DJA = 5.00E-04 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 8.80274E-06 IR enfant = 1.10616E-05 ERU = 0 (mg/kg/j)-1 ERI = DJExERU ERI adulte = 0 ERI enfant = 0																																																																																											
CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 DJA = 5.00E-04 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00033268 IR enfant = 0.00310502 ERU = 0 (mg/kg/j)-1 ERI = DJExERU ERI adulte = 0 ERI enfant = 0				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j DJA = 5.00E-04 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00033268 IR enfant = 0.00310502 ERU = 0 (mg/kg/j)-1 ERI = DJExERU ERI adulte = 0 ERI enfant = 0																																																																																											

ANNEXES

Annexe 9 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 1

Annexe 9c – Fiche de calcul du chrome III

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :																																																																																													
Usage	Récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	récréatif	Cible terminale	Homme																																																																																										
Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	aucune	Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	aucune	Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	Aucune																																																																																										
Voie d'exposition	Inhalation			Voie d'exposition	Contact cutané			Voie d'expos	Ingestion de sol																																																																																												
SOURCE				SOURCE				SOURCE																																																																																													
Polluant Chrome Concentration maximale dans le sol (C) 53 Concentration dans le sol retenue (C) 53 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3 Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 3.18E-06 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans				Polluant Chrome Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 53 mg/kg Concentration retenue 53 mg/kg				Polluant Chrome Concentration max dans le sol 53 mg/kg Concentration retenue 53 mg/kg																																																																																													
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE																																																																																													
Comportement de l'individu sur le site Non cancérigène Durée de l'exposition (T) 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 15 Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 2 2 Nombre d'heures en une journée 24 24 Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.083 0.083 Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 85 85 Nombre de jours dans une année 365 365 Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.233 0.233 Cancérigène Durée de l'exposition (T) 40 15 ans Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 70 70 ans Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 2 2 h Nombre d'heures en une journée 24 24 h Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.083 0.083 sans Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 85 85 j Nombre de jours dans une année 365 365 j Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.233 0.233 sans				Caractéristiques physiologiques de l'individu non cancérigène adulte enfant Poids d'une personne (kg) 70 15 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 0.95 cancérigène adulte enfant Poids d'une personne (kg) 70 15 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 0.95				Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte enfant Poids d'une personne (kg) 70 15 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 85 85 Durée de l'exposition (T) en années 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 70 70 Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27 0.1425 Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098 0.005																																																																																													
Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th>Valeur retenue</th> <th>Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>53</td> <td>53</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption cutanée</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>Quantité de sol sur la peau</td> <td>Q</td> <td>mg</td> <td>0.00265</td> <td>0.000713</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>T</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Tm</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue	Valeur retenue				Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	53	53	Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.01	0.01	Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713	Durée de l'exposition	T	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475	SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th>Valeur retenue</th> <th>Valeur retenue</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>53</td> <td>53</td> </tr> <tr> <td>Quantité administrée</td> <td>Q</td> <td>kg/j</td> <td>0.0001</td> <td>0.0002</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>De</td> <td>années</td> <td>40</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>/an</td> <td>85</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Te</td> <td>j</td> <td>14600</td> <td>5475</td> </tr> </tbody> </table>				Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue	Valeur retenue				Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	53	53	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1	Durée de l'exposition	De	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue	Valeur retenue																																																																																																	
			Adulte	Enfant																																																																																																	
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	53	53																																																																																																	
Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.01	0.01																																																																																																	
Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713																																																																																																	
Durée de l'exposition	T	années	40	15																																																																																																	
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	/an	85	85																																																																																																	
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																	
Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475																																																																																																	
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue	Valeur retenue																																																																																																	
			Adulte	Enfant																																																																																																	
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	53	53																																																																																																	
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002																																																																																																	
Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1																																																																																																	
Durée de l'exposition	De	années	40	15																																																																																																	
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	/an	85	85																																																																																																	
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																	
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																																																																																																	
SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérigène (à seuil) DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm) DJE adulte = 6.17123E-08 mg/m3 DJE enfant = 6.17123E-08 mg/m3 Cancérigène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm ERI ad = 3.5264E-08 (mg/m3)-1 ERI enf = 1.3224E-08 (mg/m3)-1				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérigène (à seuil) DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm) DJE adulte = 6.17123E-08 mg/m3 DJE enfant = 6.17123E-08 mg/m3 Cancérigène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm ERI ad = 3.5264E-08 (mg/m3)-1 ERI enf = 1.3224E-08 (mg/m3)-1				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérigène (à seuil) DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm) DJE adulte = 6.17123E-08 mg/m3 DJE enfant = 6.17123E-08 mg/m3 Cancérigène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm ERI ad = 3.5264E-08 (mg/m3)-1 ERI enf = 1.3224E-08 (mg/m3)-1																																																																																													
CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) DJA = 6.00E-02 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 1.02854E-06 IR enf. = 1.02854E-06 Cancérigène (sans seuil) ERU = (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 0 ERI enf. = 0				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 DJA = 5.00E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00093309 IR enfant = 0.001172534				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j DJA = 5.00E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00352642 IR enfant = 0.03291324																																																																																													
CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 DJA = 5.00E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00093309 IR enfant = 0.001172534				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j DJA = 5.00E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00352642 IR enfant = 0.03291324				CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j DJA = 5.00E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00352642 IR enfant = 0.03291324																																																																																													

ANNEXES

Annexe 9 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 1

Annexe 9d – Fiche de calcul du plomb

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :																																																																																																			
Usage Catégorie Voie d'exposition	Récréatif Espace boisé (avec public) Inhalation	Cible terminale Cible intermédiaire	Homme aucune	Usage Catégorie Voie d'exposition	Récréatif Espace boisé (avec public) Contact cutané	Cible terminale Cible intermédiaire	Homme aucune	Usage Catégorie Voie d'expos	Récréatif Espace boisé (avec public) Ingestion de sol	Cible terminale Cible intermédiaire	Homme Aucune																																																																																																
SOURCE				SOURCE				SOURCE																																																																																																			
Polluant Plomb Concentration maximale dans le sol (C) Concentration dans le sol retenue (C) Poussière en suspension dans l'air Fraction de sol dans l'air Concentration de polluant dans l'air (C) Taux ou facteur d'absorption (Tai)				Polluant Plomb Fraction de sol dans la poussière Polluant Concentration maximale dans le sol Concentration retenue				Polluant Plomb Concentration max dans le sol Concentration retenue																																																																																																			
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE																																																																																																			
Comportement de l'individu sur le site				Caractéristiques physiologiques de l'individu				Caractéristiques physiologiques de l'individu																																																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Non cancérigène</th> <th colspan="2">Cancérigène</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Durée de l'exposition (T)</td><td>40</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><td>Période de tps moyennant l'exposition (Tm)</td><td>40</td><td>15</td><td>70</td></tr> <tr><td>Nombre d'heures de fréquentation sur site (F)</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>Nombre d'heures en une journée</td><td>24</td><td>24</td><td>24</td></tr> <tr><td>Fraction temps exposition en une journée (Fej)</td><td>0.083</td><td>0.083</td><td>0.083</td></tr> <tr><td>Nombre de jours de fréquentation sur site (F)</td><td>85</td><td>85</td><td>85</td></tr> <tr><td>Nombre de jours dans une année</td><td>365</td><td>365</td><td>365</td></tr> <tr><td>Fraction temps exposition en une année (Fea)</td><td>0.233</td><td>0.233</td><td>0.233</td></tr> </tbody> </table>				Non cancérigène		Cancérigène		Durée de l'exposition (T)	40	15	15	Période de tps moyennant l'exposition (Tm)	40	15	70	Nombre d'heures de fréquentation sur site (F)	2	2	2	Nombre d'heures en une journée	24	24	24	Fraction temps exposition en une journée (Fej)	0.083	0.083	0.083	Nombre de jours de fréquentation sur site (F)	85	85	85	Nombre de jours dans une année	365	365	365	Fraction temps exposition en une année (Fea)	0.233	0.233	0.233	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">non cancérigène</th> <th colspan="2">cancérigène</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Poids d'une personne (kg)</td><td>70</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><td>Surface de peau du corps humain (m2)</td><td>1.8</td><td>0.95</td><td>1.8</td></tr> <tr><td>Nombre de jours par an où la personne fréquente le site</td><td>85</td><td>85</td><td>85</td></tr> <tr><td>Durée de l'exposition (T) en années</td><td>40</td><td>15</td><td>40</td></tr> <tr><td>Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années</td><td>40</td><td>15</td><td>70</td></tr> <tr><td>Surface de peau exposée (15% - m2)</td><td>0.27</td><td>0.1425</td><td>0.27</td></tr> <tr><td>Quantité de sol adhérant sur la peau (kg/m2)</td><td>0.0098</td><td>0.005</td><td>0.0098</td></tr> </tbody> </table>				non cancérigène		cancérigène		Poids d'une personne (kg)	70	15	15	Surface de peau du corps humain (m2)	1.8	0.95	1.8	Nombre de jours par an où la personne fréquente le site	85	85	85	Durée de l'exposition (T) en années	40	15	40	Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années	40	15	70	Surface de peau exposée (15% - m2)	0.27	0.1425	0.27	Quantité de sol adhérant sur la peau (kg/m2)	0.0098	0.005	0.0098	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">adulte</th> <th colspan="2">enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Poids d'une personne (kg)</td><td>70</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><td>non cancérigène</td><td>85</td><td>85</td><td>85</td></tr> <tr><td>cancérigène</td><td>40</td><td>15</td><td>40</td></tr> <tr><td>non cancérigène</td><td>40</td><td>15</td><td>40</td></tr> <tr><td>cancérigène</td><td>70</td><td>15</td><td>70</td></tr> <tr><td>Quantité de sol ingérée (kg/j)</td><td>0.0001</td><td>0.0002</td><td>0.0001</td></tr> </tbody> </table>				adulte		enfant		Poids d'une personne (kg)	70	15	15	non cancérigène	85	85	85	cancérigène	40	15	40	non cancérigène	40	15	40	cancérigène	70	15	70	Quantité de sol ingérée (kg/j)	0.0001	0.0002	0.0001
Non cancérigène		Cancérigène																																																																																																									
Durée de l'exposition (T)	40	15	15																																																																																																								
Période de tps moyennant l'exposition (Tm)	40	15	70																																																																																																								
Nombre d'heures de fréquentation sur site (F)	2	2	2																																																																																																								
Nombre d'heures en une journée	24	24	24																																																																																																								
Fraction temps exposition en une journée (Fej)	0.083	0.083	0.083																																																																																																								
Nombre de jours de fréquentation sur site (F)	85	85	85																																																																																																								
Nombre de jours dans une année	365	365	365																																																																																																								
Fraction temps exposition en une année (Fea)	0.233	0.233	0.233																																																																																																								
non cancérigène		cancérigène																																																																																																									
Poids d'une personne (kg)	70	15	15																																																																																																								
Surface de peau du corps humain (m2)	1.8	0.95	1.8																																																																																																								
Nombre de jours par an où la personne fréquente le site	85	85	85																																																																																																								
Durée de l'exposition (T) en années	40	15	40																																																																																																								
Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années	40	15	70																																																																																																								
Surface de peau exposée (15% - m2)	0.27	0.1425	0.27																																																																																																								
Quantité de sol adhérant sur la peau (kg/m2)	0.0098	0.005	0.0098																																																																																																								
adulte		enfant																																																																																																									
Poids d'une personne (kg)	70	15	15																																																																																																								
non cancérigène	85	85	85																																																																																																								
cancérigène	40	15	40																																																																																																								
non cancérigène	40	15	40																																																																																																								
cancérigène	70	15	70																																																																																																								
Quantité de sol ingérée (kg/j)	0.0001	0.0002	0.0001																																																																																																								
Remarque				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.																																																																																																			
<p>Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T)</p> <p>Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)</p>				<p>Hypothèses</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th>Valeur retenue</th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Concentration dans le milieu d'exposition</td><td>C</td><td>mg/kg</td><td>102</td><td>102</td></tr> <tr><td>Facteur d'absorption cutanée</td><td>Fa</td><td>sans</td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>Quantité de sol sur la peau</td><td>Q</td><td>mg</td><td>0.00265</td><td>0.000713</td></tr> <tr><td>Durée de l'exposition</td><td>T</td><td>années</td><td>40</td><td>15</td></tr> <tr><td>Fréquence d'exposition annuelle</td><td>Fea</td><td>j/an</td><td>85</td><td>85</td></tr> <tr><td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td><td>Pa / Pe</td><td>kg</td><td>70</td><td>15</td></tr> <tr><td>Exposition moyennée pour période temps</td><td>Tm</td><td>j</td><td>14600</td><td>5475</td></tr> </tbody> </table>				Notation	Unité	Valeur retenue	Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	102	102	Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.01	0.01	Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713	Durée de l'exposition	T	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475	<p>Hypothèses</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th>Valeur retenue</th> <th>Adulte</th> <th>Enfant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Concentration dans le milieu d'exposition</td><td>C</td><td>mg/kg</td><td>102</td><td>102</td></tr> <tr><td>Quantité administrée</td><td>Q</td><td>kg/j</td><td>0.0001</td><td>0.0002</td></tr> <tr><td>Facteur d'absorption</td><td>Fa</td><td>sans</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>Durée de l'exposition</td><td>De</td><td>années</td><td>40</td><td>15</td></tr> <tr><td>Fréquence d'exposition annuelle</td><td>Fea</td><td>j/an</td><td>85</td><td>85</td></tr> <tr><td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td><td>Pa / Pe</td><td>kg</td><td>70</td><td>15</td></tr> <tr><td>Exposition moyennée pour période temps</td><td>Te</td><td>j</td><td>14600</td><td>5475</td></tr> </tbody> </table>				Notation	Unité	Valeur retenue	Adulte	Enfant	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	102	102	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1	Durée de l'exposition	De	années	40	15	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																
Notation	Unité	Valeur retenue	Adulte	Enfant																																																																																																							
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	102	102																																																																																																							
Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.01	0.01																																																																																																							
Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	0.000713																																																																																																							
Durée de l'exposition	T	années	40	15																																																																																																							
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																																							
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																							
Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	5475																																																																																																							
Notation	Unité	Valeur retenue	Adulte	Enfant																																																																																																							
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	102	102																																																																																																							
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	0.0002																																																																																																							
Facteur d'absorption	Fa	sans	1	1																																																																																																							
Durée de l'exposition	De	années	40	15																																																																																																							
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	85	85																																																																																																							
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	15																																																																																																							
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600	5475																																																																																																							
SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.																																																																																																			
<p>Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour</p> <p>Non cancérigène (à seuil) DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm)</p> <p>DJE adulte = 1.18767E-07 mg/m3 DJE enfant = 1.18767E-07 mg/m3</p>				<p>Cancérigène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm</p> <p>ERI ad = 6.787E-08 (mg/m3)-1 ERI enf = 2.545E-08 (mg/m3)-1</p> <p>DJE adulte = (C x Fa x Spe x Q x Da x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 8.97879E-06 mg/j/kg</p> <p>DJE enfant = (C x Fa x Spe x Q x De x Fea) / (Pe x Te) DJE enfant = 1.12829E-05 mg/j/kg</p>				<p>Non cancérigène (à seuil) DJA = 2.00E-03 mg/m3</p> <p>IR = DJE / DJA IR ad. = 5.93836E-05 IR enf. = 5.93836E-05</p>				<p>Cancérigène (sans seuil) ERU = 1.20E-05 (mg/m3)-1</p> <p>ERI = DJE x ERU ERI ad. = 8.1E-13 ERI enf. = 3.1E-13</p>																																																																																															
CALCUL DE RISQUE				CALCUL DE RISQUE				CALCUL DE RISQUE																																																																																																			
<p>Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365</p> <p>DJA = 3.60E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00249411</p> <p>ERU = 8.50E-03 (mg/kg/j)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 4.3611E-08</p> <p>IR enfant = 0.003134132 ERI enfant = 2.0551E-08</p>				<p>Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j</p> <p>DJA = 3.60E-03 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00942596</p> <p>ERU = 0.0085 (mg/kg/j)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 1.648E-07</p> <p>IR enfant = 0.08797565 ERI enfant = 5.769E-07</p>																																																																																																							

ANNEXES

Annexe 9 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 1

Annexe 9e – Fiche de calcul du mercure

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :							
Usage	Récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	Récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	Récréatif	Cible terminale	Homme	Usage	Récréatif	Cible terminale	Homme				
Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	aucune	Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	aucune	Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	Aucune	Catégorie	Espace boisé (avec public)	Cible intermédiaire	aucune				
Voie d'exposition	Inhalation			Voie d'exposition	Contact cutané			Voie d'expos	Ingestion de sol			Voie d'expos	Inhalation volatils						
SOURCE				SOURCE				SOURCE				SOURCE							
Polluant Mercure Concentration maximale dans le sol (C) 33 Concentration dans le sol retenue (C) 33 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3 Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 1.98E-06 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans				Polluant Mercure Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 33 mg/kg Concentration retenue 33 mg/kg				Polluant Mercure Concentration max dans le 33 mg/kg Concentration retenue 33 mg/kg				Polluant Mercure Concentration maximale dar 33.00 mg/kg Concentration dans le sol re 33 mg/kg Concentration de polluant dt 1.56E-06 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption 1 sans							
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE							
Comportement de l'individu sur le site Durée de l'exposition (T) 40 15 40 15 ans Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 15 70 70 ans Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 2 2 2 2 h Nombre d'heures en une journée 24 24 24 24 h Fraction temps exposition en une journée (Fe) 0.063 0.063 0.083 0.083 sans Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 85 85 85 85 j Nombre de jours dans une année 365 365 365 365 j Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.233 0.233 0.233 0.233 sans				Caractéristiques physiologiques de l'individu non cancérogène cancérogène Poids d'une personne (kg) adulte enfant 70 15 70 15 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 0.95 1.8 0.95 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 85 85 85 85 Durée de l'exposition (T) en années 40 15 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 15 70 70 Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27 0.1425 0.27 0.1425 Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098 0.005 0.0098 0.005				Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte enfant Poids d'une personne (kg) 70 15 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 85 85 Durée de l'exposition (T) en années 40 15 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 15 70 70 Quantité de sol ingérée (kg/j) 0.0001 0.0002 0.0001 0.0002				Non cancérogène Comportement de l'individu adultes enfants 40 15 Durée de l'exposition (T) 40 15 70 70 ans Période de tps moyennant l'i 40 15 70 70 ans Nombre d'heures de fréquen 2 2 2 2 h Taux respiratoire (Tr) 0.83 0.83 0.83 0.83 m3/h Facteur de rétention dans le 1 1 1 1 Nombre de jours de fréquen 110 110 110 110 j Nombre de jours dans une a 365 365 365 365 j Poids de l'individu (P) 70 15 70 15 kg				Cancérogène adultes enfants 40 15 ans 70 70 ans 2 2 h 0.83 0.83 1 1 110 110 j 365 365 70 15 kg			
Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)							
SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.							
Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 33 Facteur d'absorption cutanée Fa sans 0.1 0.1 Quantité de sol sur la peau Q mg 0.00265 0.000713 Durée de l'exposition T années 40 15 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 85 85 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 15 Exposition moyennée pour période temps Tm j 14600 5475				Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 33 Facteur d'absorption Fa sans 0.1 0.1 Quantité de sol sur la peau Q mg 0.00265 0.000713 Durée de l'exposition T années 40 15 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 85 85 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 15 Exposition moyennée pour période temps Tm j 14600 5475				Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 33 Facteur d'absorption Fa sans 1 1 Durée de l'exposition De années 40 15 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 85 85 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 15 Exposition moyennée pour période temps Te j 14600 5475				Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 33 Facteur d'absorption Fa sans 1 1 Durée de l'exposition De années 40 15 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 85 85 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 15 Exposition moyennée pour période temps Te j 14600 5475							
Non cancérogène (à seuil) DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm) DJE adulte = 3.84247E-08 mg/m3 DJE enfant = 3.84247E-08 mg/m3				Cancérogène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm ERI ad = 2.2E-08 (mg/m3)-1 ERI enf = 8.23E-09 (mg/m3)-1				Non cancérogène (à seuil) DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 2.9049E-05 mg/kg DJE enfant = (C x Fa x Spe x Q x De x Fea) / (Pe x Te) DJE enfant = 3.65034E-05 mg/kg				Cancérogène (sans seuil) ERI = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm) ERI adulte = 1.65995E-05 mg/kg ERI enfant = (C x Fa x Spe x Q x De x Fea) / (Pe x Te) ERI enfant = 7.82216E-06 mg/kg							
Non cancérogène (à seuil) DJA = 2.00E-04 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 0.000192123 IR enf. = 0.000192123				Cancérogène (sans seuil) ERU = 0.00E+00 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 0 ERI enf. = 0				Non cancérogène (à seuil) DJA = 6.00E-04 mg/kg/j IR = DJE / DJA IR adulte = 0.01829746 IR enfant = 0.17077626				Cancérogène (sans seuil) ERU = 0 (mg/kgj)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 0 ERI enfant = 0							
Non cancérogène (à seuil) DJA = 2.00E-04 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 0.000192123 IR enf. = 0.000192123				Cancérogène (sans seuil) ERU = 0.00E+00 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 0 ERI enf. = 0				Non cancérogène (à seuil) DJA = 5.70E-05 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 0.0001956 IR enf. = 0.0009128				Cancérogène (sans seuil) ERU = 0.00E+00 (mg/kgj)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 0 ERI enf. = 0							

ANNEXES

Annexe 10 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 2

Annexe 10a – Fiche de calcul de l'arsenic

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :																																																															
Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage Agricole	Cible terminale Homme																																																														
Catégorie	Cible intermédiaire aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire Aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune																																																														
Voie d'exposition Inhalation		Voie d'exposition Contact cutané		Voie d'expos Ingestion de sol		Voie d'expos Consommation de légume																																																															
SOURCE		SOURCE		SOURCE		SOURCE																																																															
Polluant Arsenic Concentration maximale dans le sol (C) 6 Concentration dans le sol retenue (C) 6.4 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3 Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 3.84E-07 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans		Arsenic Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 6 mg/kg Concentration retenue 6.4 mg/kg		Arsenic Polluant Concentration max dans le sol 6.4 mg/kg Concentration retenue 6.4 mg/kg		Polluant Arsenic Adulte Concentration max dans le sol (C) 6 mg/kg Concentration retenue (C) 6.40E+00 mg/kg Taux d'ingestion des feuilles (Ti) 0.127 kg/j Taux d'ingestion des racines (Tr) 0.088 kg/j Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr) 6.00E-03 sans Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff) 6.00E-03 sans Fraction de légumes consommés issue du sol pollué 1																																																															
CIBLE TERMINALE adulte Non cancérigène Durée de l'exposition (T) 40 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 8 Nombre d'heures en une journée 24 Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.333 Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 150 Nombre de jours dans une année 365 Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411		CIBLE TERMINALE non cancérigène Caractéristiques physiologiques de l'individu Poids d'une personne (kg) 70 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150 Durée de l'exposition (T) en années 40 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27 Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098		CIBLE TERMINALE caractéristique physiologique de l'individu Poids d'une personne (kg) adulte 70 enfant 15 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150 Durée de l'exposition (T) en années 40 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 Quantité de sol ingérée (kg/j) 0.0001		CIBLE TERMINALE Caractéristiques physiologiques de l'individu Poids corporel de la cible (P) Adulte 70 Comportement de l'individu sur le site Durée de l'exposition (T) 40 Période de tps moyennant l' 40 Fréquence d'exposition annuelle 350 Nombre de jours en une ann 365 Poids de la cible (P) 70																																																															
Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)		SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th>Valeur retenue</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption cutanée</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>Quantité de sol sur la peau</td> <td>Q</td> <td>mg</td> <td>0.00265</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>T</td> <td>années</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Tm</td> <td>j</td> <td>14600</td> </tr> </tbody> </table> DJE adulte = (C x Fa x Spe x Q x T x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 2.98258E-06 mg/j/kg		Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.03	Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265	Durée de l'exposition	T	années	40	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	150	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600	SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hypothèses</th> <th>Notation</th> <th>Unité</th> <th>Valeur retenue</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentration dans le milieu d'exposition</td> <td>C</td> <td>mg/kg</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>Quantité administrée</td> <td>Q</td> <td>kg/j</td> <td>0.0001</td> </tr> <tr> <td>Facteur d'absorption</td> <td>Fa</td> <td>sans</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Durée de l'exposition</td> <td>De</td> <td>années</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Fréquence d'exposition annuelle</td> <td>Fea</td> <td>j/an</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Poids corporel (a : adulte / e : enfant)</td> <td>Pa / Pe</td> <td>kg</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>Exposition moyennée pour période temps</td> <td>Te</td> <td>j</td> <td>14600</td> </tr> </tbody> </table> DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Te) DJE adulte = 2.147E-06 mg/j/kg		Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue	Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4	Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001	Facteur d'absorption	Fa	sans	1	Durée de l'exposition	De	années	40	Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	150	Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70	Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																		
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4																																																																		
Facteur d'absorption cutanée	Fa	sans	0.03																																																																		
Quantité de sol sur la peau	Q	mg	0.00265																																																																		
Durée de l'exposition	T	années	40																																																																		
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	150																																																																		
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70																																																																		
Exposition moyennée pour période temps	Tm	j	14600																																																																		
Hypothèses	Notation	Unité	Valeur retenue																																																																		
Concentration dans le milieu d'exposition	C	mg/kg	6.4																																																																		
Quantité administrée	Q	kg/j	0.0001																																																																		
Facteur d'absorption	Fa	sans	1																																																																		
Durée de l'exposition	De	années	40																																																																		
Fréquence d'exposition annuelle	Fea	j/an	150																																																																		
Poids corporel (a : adulte / e : enfant)	Pa / Pe	kg	70																																																																		
Exposition moyennée pour période temps	Te	j	14600																																																																		
SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Non cancérigène (à seuil) DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm) DJE adulte = 5.26027E-08 mg/m3		SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour Cancérigène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm ERI ad = 3.01E-08 (mg/m3)-1		SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année) Non cancérigène (à seuil) DJE = ((C x Q x Tai) / P) x Fe x T/Tm DJE adulte = 0.0001131 mg/kg/j Cancérigène (sans seuil) DJE ad = 6.4626E-05 (mg/kg/j)-1																																																																	
CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) DJA = 1.00E-03 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 5.26027E-05		CALCUL DE RISQUE Cancérigène (sans seuil) ERU = 3.30E-03 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 9.9E-11		CALCUL DE RISQUE DJA = 3.00E-04 mg/kgj IR = DJE / DJA IR adulte = 0.01252446		CALCUL DE RISQUE ERU = 1.5 (mg/kgj)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 3.221E-06																																																															
CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365		CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j		CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365		CALCUL DE RISQUE Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j																																																															

ANNEXES

Annexe 10 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 2

Annexe 10b – Fiche de calcul du cadmium

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE 1		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE 2		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE 3		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. 1	
Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage Agricole	Cible terminale Homme
Catégorie	Cible intermédiaire aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire Aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune
Voie d'exposition Inhalation		Voie d'exposition Contact cutané		Voie d'expos Ingestion de sol		Voie d'expos Consommation de légume	Cible intermédiaire
SOURCE		SOURCE		SOURCE		SOURCE	
Polluant Cadmium		Polluant Cadmium		Polluant Cadmium		Polluant Cadmium	
Concentration maximale dans le sol (C) 1		Concentration maximale dans le sol (C) 1		Concentration max dans 0.5 mg/kg		Concentration max dans le sol (C) 1 mg/kg	
Concentration dans le sol retenue (C) 0.5 mg/kg		Fraction de sol dans la poussière 1		Concentration retenue 0.5 mg/kg		Concentration retenue (C) 5.00E-01 mg/kg	
Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3		Polluant				Taux d'ingestion des feuilles (Ti) 0.127 kg/j	
Fraction de sol dans l'air 1		Concentration maximale dans le sol 1 mg/kg				Taux d'ingestion des racines (Tr) 0.088 kg/j	
Concentration de polluant dans l'air (C) 3E-08 mg/m3		Concentration retenue 0.5 mg/kg				Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr) 8.25E-02 sans	
Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans						Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff) 8.25E-02 sans	
						Fraction de légumes consommés issue du sol pollué 1	
CIBLE TERMINALE		CIBLE TERMINALE		CIBLE TERMINALE		CIBLE TERMINALE	
adulte		adulte		adulte		adulte	
Non cancérigène		Cancérigène		non cancérigène		non cancérigène	
Durée de l'exposition (T) 40		Durée de l'exposition (T) 40		Durée de l'exposition (T) 70		Durée de l'exposition (T) 40	
Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40		Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 70		Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 8		Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40	
Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 8		Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 8		Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 24		Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 40	
Nombre d'heures en une journée 24		Nombre d'heures en une journée 24		Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.333		Fraction temps exposition en une journée (Fea) 0.411	
Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.333		Fraction temps exposition en une journée (Fea) 0.411		Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 150		Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 365	
Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 150		Nombre de jours dans une année 365		Nombre de jours dans une année 365		Nombre de jours dans une année 365	
Nombre de jours dans une année 365		Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411		Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411		Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411	
Remarque		Remarque		Remarque		Remarque	
Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T)		Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)		Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année)		Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année)	
SYNTHÈSE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.		SYNTHÈSE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.		SYNTHÈSE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.		SYNTHÈSE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.	
Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est remplacée par la concentration moyenne inhalée par jour		Hypothèses		Hypothèses		Hypothèses	
Non cancérigène (à seuil)		Notation		Notation		Notation	
DJE = C x Tai x Fej x Fea x (T/Tm)		Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg		Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg		Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg	
DJE adulte = 4.10959E-09 mg/m3		Facteur d'absorption cutanée Fa sans		Facteur d'absorption cutanée Fa sans		Facteur d'absorption cutanée Fa sans	
		Quantité de sol sur la peau Q mg		Quantité de sol sur la peau Q mg		Quantité de sol sur la peau Q mg	
		Durée de l'exposition T années		Durée de l'exposition T années		Durée de l'exposition T années	
		Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an		Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an		Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an	
		Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg		Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg		Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg	
		Exposition moyennée pour période temps Tm j		Exposition moyennée pour période temps Tm j		Exposition moyennée pour période temps Tm j	
		DJE adulte = (C x Fa x Spe x Q x T x Fea) / (Pa x Tm)		DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm)		DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm)	
		DJE adulte = 7.76712E-09 mg/kg		DJE adulte = 3E-07 mg/kg		DJE adulte = 1.677E-07 mg/kg	
		Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365		Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365		Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j	
CALCUL DE RISQUE		CALCUL DE RISQUE		CALCUL DE RISQUE		CALCUL DE RISQUE	
Non cancérigène (à seuil)		Non cancérigène (à seuil)		Non cancérigène (à seuil)		Non cancérigène (à seuil)	
DJA = 2.00E-05 mg/m3		DJA = 5.00E-04 mg/kg		DJA = 5.00E-04 mg/kg		DJA = 5.00E-04 mg/kg	
IR = DJE / DJA		IR = DJE / DJA		IR = DJE / DJA		IR = DJE / DJA	
IR ad. = 0.000205479		IR ad. = 1.55342E-05		IR ad. = 0.00058708		IR ad. = 0.2429795	
		Cancérigène (sans seuil)		Cancérigène (sans seuil)		Cancérigène (sans seuil)	
		ERU = 4.20E-03 (mg/m3)-1		ERU = 0 (mg/kg)-1		ERU = 0 (mg/kg)-1	
		ERI = DJE x ERU		ERI = DJE x ERU		ERI = DJE x ERU	
		ERI ad. = 9.86E-12		ERI ad. = 0		ERI ad. = 0	

ANNEXES

Annexe 10 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 2

Annexe 10c – Fiche de calcul du chrome III

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE 1				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE 2				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE 3				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. 1			
Usage agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune		Usage agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune		Usage agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune		Usage Agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune	
Catégorie 0				Catégorie 0				Catégorie 0				Catégorie 0			
Voie d'exposition Inhalation				Voie d'exposition Contact cutané				Voie d'expos Ingestion de sol				Voie d'expos Consommation de légume			
SOURCE				SOURCE				SOURCE				SOURCE			
Polluant Chrome				Polluant Chrome				Polluant Chrome				Polluant Chrome			
Concentration maximale dans le sol (C) 53 mg/kg				Concentration maximale dans le sol (C) 53 mg/kg				Concentration max dans 53 mg/kg				Concentration max dans le sol (C) 53 mg/kg			
Concentration dans le sol retenue (C) 0.06 mg/m3				Fraction de sol dans la poussière 1				Concentration retenue 53 mg/kg				Concentration retenue (C) 5.30E+01 mg/kg			
Poussière en suspension dans l'air 1				Polluant 53 mg/kg				Concentration retenue 53 mg/kg				Taux d'ingestion des feuilles (Ti) 0.127 kg/j			
Fraction de sol dans l'air 3.18E-06 mg/m3				Concentration maximale dans le sol 53 mg/kg								Taux d'ingestion des racines (Tr) 0.088 kg/j			
Concentration de polluant dans l'air (C) 1 sans				Concentration retenue 53 mg/kg								Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr) 6.30E-03 sans			
Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans												Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff) 6.30E-03 sans			
												Fraction de légumes consommés issue du sol pollué 1			
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE			
Caractéristiques physiologiques de l'individu				Caractéristiques physiologiques de l'individu				Caractéristiques physiologiques de l'individu				Caractéristiques physiologiques de l'individu			
non cancérogène				non cancérogène				non cancérogène				non cancérogène			
cancérogène				cancérogène				cancérogène				cancérogène			
Comportement de l'individu sur le site				Comportement de l'individu sur le site				Comportement de l'individu sur le site				Comportement de l'individu sur le site			
Durée de l'exposition (T) 40 ans				Poids d'une personne (kg) adulte 70				Poids d'une personne (kg) adulte 70				Poids corporel de la cible (P) 70			
Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 ans				Surface de peau du corps humain (m2) 1.8				Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150				Durée de l'exposition (T) 40 ans			
Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 8 h				Comportement de l'individu sur le site				Durée de l'exposition (T) en années 40				Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 ans			
Nombre d'heures en une journée 24 h				Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150				Période de l'exposition (T) en années 40				Fréquence d'exposition annuelle (Fea) 350 j/an			
Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.333 sans				Durée de l'exposition (T) en années 40				Quantité de sol ingérée (kg/j) 0.0001				Nombre de jours en une ann 365 j			
Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 150 j				Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40								Poids de la cible (P) 70			
Nombre de jours dans une année 365 j				Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27											
Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411 sans				Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098											
Remarque				Remarque				Remarque				Remarque			
Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T)				SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.				SYNTHÈSE DES HYPOTHÈSES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.			
Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				Hypothèses				Hypothèses				Hypothèses			
				Notation				Notation				Notation			
				Unité				Unité				Unité			
				Valeur retenue				Valeur retenue				Valeur retenue			
				Adulte				Adulte				Adulte			
				53				53				53			
				0.01				0.0001				0.0001			
				0.00265				1				1			
				0.00265				40				40			
				40				150				150			
				150				70				70			
				14600				25550				25550			
				DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm)				DJE adulte = (C x Q x Fa x De x Fea) / (Pa x Te)				DJE adulte = (C x Q x Fa x De x Fea) / (Pa x Te)			
				DJE adulte = 8.23315E-06 mg/j/kg				DJE adulte = 3E-05 mg/j/kg				DJE adulte = 1.778E-05 mg/j/kg			
				DJE adulte = (C x Fa x Spe x Q x T x Fea) / (Pa x Tm)				DJE adulte = (C x Q x Fa x De x Fea) / (Pa x Te)				DJE adulte = (C x Q x Fa x De x Fea) / (Pa x Te)			
				DJE adulte = 4.70466E-06 mg/j/kg				DJE adulte = 3E-05 mg/j/kg				DJE adulte = 1.778E-05 mg/j/kg			
				Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365				Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j				Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j			
CALCUL DE RISQUE				CALCUL DE RISQUE				CALCUL DE RISQUE				CALCUL DE RISQUE			
Non cancérogène (à seuil)				Cancérogène (sans seuil)				Non cancérogène (à seuil)				Cancérogène (sans seuil)			
DJA = 6.00E-02 mg/m3				ERU = 0 (mg/kg)-1				DJA = 5.00E-03 mg/kg				ERU = 0 (mg/kg)-1			
IR = DJE / DJA				ERI = DJE x ERU				IR = DJE / DJA				ERI = DJE x ERU			
IR ad. = 7.26027E-06				ERI ad. = 0				IR = DJE / DJA				ERI ad. = 0			
								DJA = 5.00E-03 mg/kg				ERU = 0 (mg/kg)-1			
								IR = DJE / DJA				ERI = DJE x ERU			
								IR adulte = 0.00164663				ERI adulte = 0			

ANNEXES

Annexe 10 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 2

Annexe 10d – Fiche de calcul du plomb

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :		FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :	
Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage agricole	Cible terminale Homme	Usage Agricole	Cible terminale Homme
Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire Aucune	Catégorie 0	Cible intermédiaire aucune
Voie d'exposition Inhalation		Voie d'exposition Contact cutané		Voie d'exposition Ingestion de sol		Voie d'exposition Consommation de légumes	
SOURCE		SOURCE		SOURCE		SOURCE	
Polluant Plomb Concentration maximale dans le sol (C) 102 mg/kg Concentration dans le sol retenue (C) 102 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m3 Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 6.12E-06 mg/m3 Taux ou facteur d'absorption (Tai) 1 sans		Polluant Plomb Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 102 mg/kg Concentration retenue 102 mg/kg		Polluant Plomb Concentration max dans 102 mg/kg Concentration retenue 102 mg/kg		Polluant Plomb Adulte Concentration max dans le sol (C) 102 mg/kg Concentration retenue (C) 1.02E+02 mg/kg Taux d'ingestion des feuilles (Ti) 0.127 kg/j Taux d'ingestion des racines (Tr) 0.088 kg/j Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr) 1.35E-02 sans Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff) 1.35E-02 sans Fraction de légumes consommés issue du sol pollué 1	
CIBLE TERMINALE		CIBLE TERMINALE		CIBLE TERMINALE		CIBLE TERMINALE	
Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte non cancérigène / adulte cancérigène Poids d'une personne (kg) 70 / 70 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 / 1.8 Comportement de l'individu sur le site Durée de l'exposition (T) 40 / 40 ans Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 / 70 ans Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 8 / 8 h Nombre d'heures en une journée 24 / 24 h Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.333 / 0.333 sans Nombre de jours de fréquentation sur site (Fj) 150 / 150 j Nombre de jours dans une année 365 / 365 j Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411 / 0.411 sans		Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte non cancérigène / adulte cancérigène Poids d'une personne (kg) 70 / 70 Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 / 1.8 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150 / 150 Durée de l'exposition (T) en années 40 / 40 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 / 70 Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27 / 0.27 Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098 / 0.0098		Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte / enfant Poids d'une personne (kg) 70 / 15 Comportement de l'individu sur le site Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150 / 150 Durée de l'exposition (T) en années 40 / 40 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 40 / 70 Quantité de sol ingérée (kg/j) 0.0001 / 0.0001		Caractéristiques physiologiques de l'individu Adulte / Adulte Poids corporel de la cible (P) 70 / 70 kg Comportement de l'individu sur le site Durée de l'exposition (T) 40 / 40 ans Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 40 / 70 ans Fréquence d'exposition annuelle (Fea) 350 / 350 j/an Nombre de jours en une année 365 / 365 j Poids de la cible (P) 70 / 70	
Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)		Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année)		Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année)		Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année)	
SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.		SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.		SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.		SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.	
Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 102 Facteur d'absorption cutanée Fa sans 0.01 Quantité de sol sur la peau Q mg 0.00265 Durée de l'exposition T années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 70 Exposition moyennée pour période temps Tm j 14600 DJE adulte = (C x Fa x Spe x Q x T x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 1.3849E-05 mg/kg		Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 102 Facteur d'absorption cutanée Fa sans 0.01 Quantité de sol sur la peau Q mg 0.00265 Durée de l'exposition T années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 70 Exposition moyennée pour période temps Tm j 14600 DJE adulte = (C x Fa x Spe x Q x T x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 9.05429E-06 mg/kg		Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 102 Quantité administrée Q kg/j 0.0001 Facteur d'absorption Fa sans 1 Durée de l'exposition De années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 70 Exposition moyennée pour période temps Te j 14600 DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 6E-05 mg/kg		Hypothèses Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 102 Quantité administrée Q kg/j 0.0001 Facteur d'absorption Fa sans 1 Durée de l'exposition De années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 70 Exposition moyennée pour période temps Te j 14600 DJE adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm) DJE adulte = 3.422E-05 mg/kg	
Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j		Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j		Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j		Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365 Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j	
CALCUL DE RISQUE		CALCUL DE RISQUE		CALCUL DE RISQUE		CALCUL DE RISQUE	
Non cancérigène (à seuil) DJA = 2.00E-03 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 0.000419178		Cancérigène (sans seuil) ERU = 1.20E-05 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 5.7E-12		Non cancérigène (à seuil) DJA = 3.60E-03 mg/kgj IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00440137		Cancérigène (sans seuil) ERU = 8.50E-03 (mg/kgj)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 7.69611E-08	
Non cancérigène (à seuil) DJA = 2.00E-03 mg/m3 IR = DJE / DJA IR ad. = 0.000419178		Cancérigène (sans seuil) ERU = 1.20E-05 (mg/m3)-1 ERI = DJE x ERU ERI ad. = 5.7E-12		Non cancérigène (à seuil) DJA = 3.60E-03 mg/kgj IR = DJE / DJA IR adulte = 0.00440137		Cancérigène (sans seuil) ERU = 8.50E-03 (mg/kgj)-1 ERI = DJE x ERU ERI adulte = 7.69611E-08	

ANNEXES

Annexe 10 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 2

Annexe 10e – Fiche de calcul du mercure

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :				FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. POUR LE PARAMETRE :			
Usage Agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune	Voie d'exposition Inhalation	Usage Agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune	Voie d'exposition Contact cutané	Usage Agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune	Voie d'exposition Ingestion de sol	Usage Agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune	Voie d'expos. Consommation de légume	Usage Agricole	Cible terminale Homme	Cible intermédiaire aucune	Voie d'expos. Inhalation volatils
SOURCE				SOURCE				SOURCE				SOURCE				SOURCE			
Polluant Mercure Concentration maximale dans le sol (C) 33 mg/kg Concentration dans le sol retenue (C) 33 mg/kg Poussière en suspension dans l'air 0.06 mg/m ³ Fraction de sol dans l'air 1 Concentration de polluant dans l'air (C) 1.98E-06 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption (Ta) 1 sans				Polluant Mercure Fraction de sol dans la poussière 1 Polluant Concentration maximale dans le sol 33 mg/kg Concentration retenue 33 mg/kg				Polluant Mercure Concentration max dans 33 mg/kg Concentration retenue 33 mg/kg				Polluant Mercure Concentration max dans le sol (C) 33 mg/kg Concentration retenue (C) 3.30E+01 mg/kg Taux d'ingestion des feuilles (Ti) 0.127 kgj Taux d'ingestion des racines (Tr) 0.088 kgj Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr) 1.30E-01 sans Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff) 1.30E-01 sans Fraction de légumes consommés issue du sol pollué 1				Polluant Mercure Concentration maximale dans le sol 33.00 mg/kg Concentration dans le sol re 3.30E+01 mg/kg Concentration de polluant dans l'air 1.56E-06 mg/m ³ Taux ou facteur d'absorption 1 sans			
CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE				CIBLE TERMINALE			
Comportement de l'individu sur le site Non cancérigène Durée de l'exposition (T) 40 ans Période de tps moyennant l'exposition (Tm) 70 ans Nombre d'heures de fréquentation sur site (F) 8 h Nombre d'heures en une journée 24 h Fraction temps exposition en une journée (Fej) 0.333 Nombre de jours de fréquentation sur site (F) 150 j Nombre de jours dans une année 365 j Fraction temps exposition en une année (Fea) 0.411				Caractéristiques physiologiques de l'individu non cancérigène adulte 70 kg Surface de peau du corps humain (m2) 1.8 Comportement de l'individu sur le site non cancérigène Nombre de jours par an où la personne fréquente le site 150 Durée de l'exposition (T) en années 40 Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 70 Surface de peau exposée (15% - m2) 0.27 Quantité de sol adhérent sur la peau (kg/m2) 0.0098				Caractéristiques physiologiques de l'individu adulte 70 kg enfant 15 kg Comportement de l'individu sur le site non cancérigène Adulte 150 40 70 0.0001 cancérigène Adulte 150 40 70 0.0001				Caractéristiques physiologiques de l'individu Adulte 70 kg Comportement de l'individu sur le site Non cancérigène Durée de l'exposition (T) 40 ans Période de tps moyennant l'exposition (Tm) en années 70 Fréquence d'exposition ann. 365 j/an Nombre de jours en une ann 365 j Poids de la cible (P) 70				Comportement de l'individu Non cancérigène adultes 40 ans adultes 70 ans 8 h 0.83 m3/h 1 sans 150 j 365 j 70 kg Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T)			
Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition Tm = T x 365 (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=T) Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. Tm = 70 x 365 = 25550 jours (ou 365 = 1 si exprimé en année alors Tm=70)				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Hypothèses Notation Unité Valeur retenue Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 Quantité de sol sur la peau Q mg 0.00265 Facteur d'absorption cutanée Fa sans 0.1 Durée de l'exposition T années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 15 Exposition moyennée pour période temps Tm j 14600				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Hypothèses Notation Unité Valeur retenue Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 Quantité administrée Q kgj 0.0001 Facteur d'absorption Fa sans 1 Durée de l'exposition De années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 15 Exposition moyennée pour période temps Te j 25550				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Hypothèses Notation Unité Valeur retenue Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 Quantité administrée Q kgj 0.0001 Facteur d'absorption Fa sans 1 Durée de l'exposition De années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 15 Exposition moyennée pour période temps Te j 25550				SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E. Hypothèses Notation Unité Valeur retenue Concentration dans le milieu d'exposition C mg/kg 33 Quantité administrée Q kgj 0.0001 Facteur d'absorption Fa sans 1 Durée de l'exposition De années 40 Fréquence d'exposition annuelle Fea j/an 150 Poids corporel (a : adulte / e : enfant) Pa / Pe kg 70 / 15 Exposition moyennée pour période temps Te j 25550			
Non cancérigène (à seuil) D.J.E. = C x Ta x Fej x Fea x (T/Tm) D.J.E. adulte = 2.71233E-07 mg/m ³				Cancérigène (sans seuil) ERI = ((C x Q x Ta) / P) x Fe x T/Tm ERI ad = 1.55E-07 (mg/m ³)-1 D.J.E. adulte = (C x Fa x Spe x Q x T x Fea) / (Pa x Tm) D.J.E. adulte = 2.1203E-05 mg/j/kg				Non cancérigène (à seuil) D.J.E. adulte = (C x Q x Fa x T x Fea) / (Pa x Tm) D.J.E. adulte = 2.3293E-05 mg/j/kg Effets à seuil des polluants: Tm=Tx365				Non cancérigène (à seuil) D.J.E. = (C x Tr x H x Tai x LRF x F) / (P x N) D.J.E. adulte = 6.08E-08 mg/m ³ D.J.E. enfant = #DIV/0! Non cancérigène (à seuil) D.J.E. = (C x Q x Ta) / P x Fe x T/Tm D.J.E. adulte = 0.01263493 mg/kg Effets à seuil des polluants: Tm=70x365=25550 j				Non cancérigène (à seuil) D.J.E. = (C x Tr x H x Tai x LRF x F) / (P x N) D.J.E. adulte = 6.08E-08 mg/m ³ D.J.E. enfant = #DIV/0! Cancérigène (sans seuil) ERI = D.J.E. / D.J.A. ERI ad. = 0.0010669 ERI enf. = #DIV/0!			
CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) D.J.A. = 2.00E-04 mg/m ³ IR = D.J.E. / D.J.A. IR ad. = 0.001356164				CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) ERU = 0.00E+00 (mg/m ³)-1 ERI = D.J.E x ERU ERI ad. = 0 D.J.A. = 6.00E-04 mg/kgj IR = D.J.E. / D.J.A. IR aduite = 0.085438356				CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) ERU = 0 (mg/kgj)-1 ERI = D.J.E x ERU ERI adulte = 0 D.J.A. = 6.00E-04 mg/kgj IR = D.J.E. / D.J.A. IR aduite = 0.03226963				CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) ERU = 0 (mg/kgj)-1 ERI = D.J.E x ERU ERI adulte = 0 D.J.A. = 6.00E-04 mg/kgj IR = D.J.E. / D.J.A. IR ad. = 21.058219				CALCUL DE RISQUE Non cancérigène (à seuil) ERU = 0.00E+00 (mg/kgj)-1 ERI = D.J.E x ERU ERI ad. = 0 D.J.A. = 5.70E-05 mg/m ³ IR = D.J.E. / D.J.A. IR ad. = 0.0010669 ERI enf. = #DIV/0!			

Annexe 11 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 3

Annexe 11a – Fiche de calcul de l'arsenic

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. : 1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	Elevage	Cible intermédiaire	vache
Voie d'expos	Consommation de viande		

SOURCE

Polluant	Arsenic	Adulte	Enfant
Concentration dans le sol (C)		6	6 mg/kg
Concentration dans la viande (C)		1.20E-02	0.012 mg/kg
Quantité de viande ingérée (Q)		0.147	0.0315 kg/j
Taux ou facteur d'absorption (Tai)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Caractéristiques physiologiques de l'individu

	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant
Poids corporel de la cible (P)	70	15	70	15 kg

	Non cancérogène		Cancérogène	
Comportement de l'individu sur le site				
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'expo	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annuelle	350	350	350	350 j
Nombre de jours en une année	365	365	365	365 j
Fraction de l'année avec exposi	0.959	0.959	0.959	0.959 sans

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)

$$DJE = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/T_m$$

$$DJE \text{ adulte} = 2.41644E-05 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 2.41644E-05 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérogène (sans seuil)

$$DJE \text{ ad} = 1.3808E-05 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enf} = 5.1781E-06 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)

$$DJA. = 3.00E-04 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 0.080547945$$

$$IR \text{ enf.} = 0.080547945$$

Cancérogène (sans seuil)

$$ERU = 1.5 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 2.071E-05$$

$$ERI \text{ enf.} = 7.767E-06$$

Annexe 11 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 3

Annexe 11b – Fiche de calcul du cadmium

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :

1

Usage Agricole
 Catégorie Elevage (scénario 4a) Cible terminale Homme
 Voie d'expos Consommation de viande Cible intermédiaire vache

SOURCE

Polluant	Cadmium	Adulte	Enfant
Concentration dans le sol (C)		1	1 mg/kg
Concentration dans la viande (C)		3.75E-04	0.000375 mg/kg
Quantité de viande ingérée (Q)		0.147	0.0315 kg/j
Taux ou facteur d'absorption (Tai)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Caractéristiques physiologiques de l'individu

	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant
Poids corporel de la cible (P)	70	15	70	15 kg

	Non cancérogène		Cancérogène	
Comportement de l'individu sur le site				
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Fraction de l'année avec exp	0.959	0.959	0.959	0.959 sans

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)

$$DJE = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/T_m$$

$$DJE \text{ adulte} = 7.5514E-07 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 7.5514E-07 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérogène (sans seuil)

$$DJE \text{ ad} = 4.3151E-07 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enf} = 1.6182E-07 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)

$$DJA. = 5.00E-04 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 0.0015103$$

$$IR \text{ enf.} = 0.0015103$$

Cancérogène (sans seuil)

$$ERU = 0 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 0$$

$$ERI \text{ enf.} = 0$$

Annexe 11 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 3

Annexe 11c – Fiche de calcul du chrome III

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :

1

Usage Agricole
 Catégorie Elevage (scénario 4a) Cible terminale Homme
 Voie d'expos Consommation de viande Cible intermédiaire vache

SOURCE

Polluant	Chrome III	Adulte	Enfant
Concentration dans le sol (C)		53	53 mg/kg
Concentration dans la viande (C)		4.64E-01	0.464 mg/kg
Quantité de viande ingérée (Q)		0.147	0.0315 kg/j
Taux ou facteur d'absorption (Tai)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Caractéristiques physiologiques de l'individu

	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant
Poids corporel de la cible (P)	70	15	70	15 kg

	Non cancérogène		Cancérogène	
Comportement de l'individu sur le site				
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Fraction de l'année avec exp	0.959	0.959	0.959	0.959 sans

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)

$$DJE = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/T_m$$

$$DJE \text{ adulte} = 0.00093436 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.00093436 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérogène (sans seuil)

$$DJE \text{ ad} = 0.00053392 \text{ (mg/kg/j)-1}$$

$$DJE \text{ enf} = 0.00020022 \text{ (mg/kg/j)-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)

$$DJA. = 5.00E-03 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 0.1868712$$

$$IR \text{ enf.} = 0.1868712$$

Cancérogène (sans seuil)

$$ERU = 0 \text{ (mg/kg/j)-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 0$$

$$ERI \text{ enf.} = 0$$

Annexe 11 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 3

Annexe 11d – Fiche de calcul du plomb

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. : 1

Usage Agricole
 Catégorie Elevage (scénario 4a) Cible terminale Homme
 Voie d'expos Consommation de viande Cible intermédiaire vache

SOURCE

Polluant	Plomb	Adulte	Enfant
Concentration dans le sol (C)		102	102 mg/kg
Concentration dans la viande (C)		4.30E-02	0.043 mg/kg
Quantité de viande ingérée (Q)		0.147	0.0315 kg/j
Taux ou facteur d'absorption (Tai)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Caractéristiques physiologiques de l'individu

	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant
Poids corporel de la cible (P)	70	15	70	15 kg

Comportement de l'individu sur le site	Non cancérogène		Cancérogène	
	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'e	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Fraction de l'année avec exp	0.959	0.959	0.959	0.959 sans

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)

$$DJE = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/T_m$$

$$DJE \text{ adulte} = 8.6589E-05 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 8.6589E-05 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérogène (sans seuil)

$$DJE \text{ ad} = 4.9479E-05 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enf} = 1.8555E-05 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)

$$DJA. = 3.60E-03 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 0.0240525$$

$$IR \text{ enf.} = 0.0240525$$

Cancérogène (sans seuil)

$$ERU = 8.50E-03 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 4.206E-07$$

$$ERI \text{ enf.} = 1.577E-07$$

Annexe 11 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 3

Annexe 11e – Fiche de calcul du mercure

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :

1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	Elevage (scénario 4a)	Cible intermédiaire	vache
Voie d'expos	Consommation de viande		

SOURCE

Polluant	Mercure	Adulte	Enfant
Concentration dans le sol (C)		33	33 mg/kg
Concentration dans la viande (C)		8.00E-01	0.8 mg/kg
Quantité de viande ingérée (Q)		0.147	0.0315 kg/j
Taux ou facteur d'absorption (Tai)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Caractéristiques physiologiques de l'individu

	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant
Poids corporel de la cible (P)	70	15	70	15 kg

	Non cancérogène		Cancérogène	
Comportement de l'individu sur le site				
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'c	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Fraction de l'année avec exp	0.959	0.959	0.959	0.959 sans

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)

$$DJE = ((C \times Q \times Tai) / P) \times Fe \times T/T_m$$

$$DJE \text{ adulte} = 0.00161096 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.00161096 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérogène (sans seuil)

$$DJE \text{ ad} = 0.00092055 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enf} = 0.00034521 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)

$$DJA. = 6.00E-04 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 2.6849315$$

$$IR \text{ enf.} = 2.6849315$$

Cancérogène (sans seuil)

$$ERU = 0 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 0$$

$$ERI \text{ enf.} = 0$$

Annexe 12 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 4

Annexe 12a – Fiche de calcul de l'arsenic

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :

1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	0	Cible intermédiaire	aucune
Voie d'expos	Consommation de légumes		

SOURCE

Polluant	Arsenic	Adulte	enfant
Concentration max dans le sol (C)		6	6 mg/kg
Concentration retenue (C)		6.40E+00	6.40E+00 mg/kg
Taux d'ingestion des feuilles (Tf)		0.127	0.056 kg/j
Taux d'ingestion des racines (Tr)		0.088	0.048 kg/j
Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr)		6.00E-03	6.00E-03 sans
Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff)		6.00E-03	6.00E-03 sans
Fraction de légumes consommés issue du sol pollué (f)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Comportement de l'individu sur le site	Non cancérogène		Cancérogène	
	adulte	enfant	adulte	enfant
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'exposition (Tm)	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annuelle (F)	350	350	350	350 j/an
Nombre de jours en une année	365	365	365	365 j
Poids de la cible (P)	70	15	70	15 kg

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'exposition $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, Tm sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)

$$DJE = ((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C / (Px365)$$

$$DJE \text{ adulte} = 0.000113096 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.000255299 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérogène (sans seuil)

$$DJE = ((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C \times T / (Px365 \times T_m)$$

$$DJE \text{ ad} = 6.4626E-05 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enfant} = 5.4707E-05 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)

$$DJA = 3.00E-04 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 0.376986301$$

$$IR \text{ enf.} = 8.51E-01$$

Cancérogène (sans seuil)

$$ERU = 1.5 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 9.694E-05$$

$$ERI \text{ enf.} = 8.206E-05$$

Annexe 12 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 4

Annexe 12b – Fiche de calcul du cadmium

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. : 1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	0	Cible intermédiaire	aucune
Voie d'expos	Consommation de légume		

SOURCE

Polluant	Cadmium	Adulte	enfant
Concentration max dans le sol (C)		1	1 mg/kg
Concentration retenue (C)		5.00E-01	5.00E-01 mg/kg
Taux d'ingestion des feuilles (Tf)		0.127	0.056 kg/j
Taux d'ingestion des racines (Tr)		0.088	0.048 kg/j
Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr)		8.25E-02	8.25E-02 sans
Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff)		8.25E-02	8.25E-02 sans
Fraction de légumes consommés issue du sol pollué (f)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Comportement de l'individu	Non cancérogène		Cancérogène	
	adulte	enfant	adulte	enfant
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'a	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j/an
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Poids de la cible (P)	70	15	70	15 kg

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérogène (à seuil)	Cancérogène (sans seuil)
DJE = $((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C / (Px365)$	DJE = $((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C \times T / (Px365 \times T_m)$
DJE adulte = 0.00012149 mg/kg/j	DJE ad = 6.9423E-05 (mg/kg/j)-1
DJE enfant = 0.00027425 mg/kg/j	DJE enfant = 5.8767E-05 (mg/kg/j)-1

CALCUL DE RISQUE

Non cancérogène (à seuil)	Cancérogène (sans seuil)
DJA. = 5.00E-04 mg/kg/j	ERU = 0 (mg/kg/j)-1
IR = DJE / DJA	ERI = DJE x ERU
IR ad. = 0.2429795	ERI ad. = 0
IR enf. = 5.48E-01	ERI enf. = 0

Annexe 12 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 4

Annexe 12c – Fiche de calcul du chrome III

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. :

1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	0	Cible intermédiaire	aucune
Voie d'expos	Consommation de légume		

SOURCE

Polluant	Chrome	Adulte	enfant
Concentration max dans le sol (C)		53	53 mg/kg
Concentration retenue (C)		5.30E+01	5.30E+01 mg/kg
Taux d'ingestion des feuilles (Tf)		0.127	0.056 kg/j
Taux d'ingestion des racines (Tr)		0.088	0.048 kg/j
Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr)		6.30E-03	6.30E-03 sans
Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff)		6.30E-03	6.30E-03 sans
Fraction de légumes consommés issue du sol pollué (f)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Comportement de l'individu	Non cancérigène		Cancérigène	
	adulte	enfant	adulte	enfant
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j/an
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Poids de la cible (P)	70	15	70	15 kg

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérigène (à seuil)

$$DJE = ((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C / (Px365)$$

$$DJE \text{ adulte} = 0.0009834 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.0022199 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérigène (sans seuil)

$$DJE = ((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C \times T / (Px365 \times T_m)$$

$$DJE \text{ ad} = 0.00056195 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.00047569 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérigène (à seuil)

$$DJA = 5.00E-03 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 0.1966808$$

$$IR \text{ enf.} = 4.44E-01$$

Cancérigène (sans seuil)

$$ERU = 0 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 0$$

$$ERI \text{ enf.} = 0$$

Annexe 12 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 4

Annexe 12d – Fiche de calcul du plomb

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. : 1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	0	Cible intermédiaire	aucune
Voie d'expos	Consommation de légume		

SOURCE

Polluant	Plomb	Adulte	enfant
Concentration max dans le sol (C)		102	102 mg/kg
Concentration retenue (C)		1.02E+02	1.02E+02 mg/kg
Taux d'ingestion des feuilles (Tf)		0.127	0.056 kg/j
Taux d'ingestion des racines (Tr)		0.088	0.048 kg/j
Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr)		1.35E-02	1.35E-02 sans
Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff)		1.35E-02	1.35E-02 sans
Fraction de légumes consommés issue du sol pollué (f)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Comportement de l'individu	Non cancérigène		Cancérigène	
	adulte	enfant	adulte	enfant
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j/an
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Poids de la cible (P)	70	15	70	15 kg

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérigène (à seuil)

$$DJE = ((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C / (Px365)$$

$$DJE \text{ adulte} = 0.00405555 \text{ mg/kg/j}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.00915485 \text{ mg/kg/j}$$

Cancérigène (sans seuil)

$$DJE = ((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C \times T / (Px365 \times T_m)$$

$$DJE \text{ ad} = 0.00231746 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$DJE \text{ enfant} = 0.00196175 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

CALCUL DE RISQUE

Non cancérigène (à seuil)

$$DJA = 3.60E-03 \text{ mg/kg/j}$$

$$IR = DJE / DJA$$

$$IR \text{ ad.} = 1.1265411$$

$$IR \text{ enf.} = 2.54E+00$$

Cancérigène (sans seuil)

$$ERU = 8.50E-03 \text{ (mg/kg/j)}^{-1}$$

$$ERI = DJE \times ERU$$

$$ERI \text{ ad.} = 1.97E-05$$

$$ERI \text{ enf.} = 1.667E-05$$

Annexe 12 - Résultats de calcul du risque pour le scénario 4

Annexe 12e – Fiche de calcul du mercure

FICHE DE CALCUL DE LA D.J.E. : 1

Usage	Agricole	Cible terminale	Homme
Catégorie	0	Cible intermédiaire	aucune
Voie d'expos	Consommation de légume		

SOURCE

Polluant	mercure	Adulte	enfant
Concentration max dans le sol (C)		33	33 mg/kg
Concentration retenue (C)		3.30E+01	3.30E+01 mg/kg
Taux d'ingestion des feuilles (Tf)		0.127	0.056 kg/j
Taux d'ingestion des racines (Tr)		0.088	0.048 kg/j
Facteur de bioconcentration sol-racine (Fr)		1.30E-01	1.30E-01 sans
Facteur de bioconcentration sol-feuille (Ff)		1.30E-01	1.30E-01 sans
Fraction de légumes consommés issue du sol pollué (f)		1	1 sans

CIBLE TERMINALE

Comportement de l'individu	Non cancérigène		Cancérigène	
	adulte	enfant	adulte	enfant
Durée de l'exposition (T)	40	15	40	15 ans
Période de tps moyennant l'	40	15	70	70 ans
Fréquence d'exposition annu	350	350	350	350 j/an
Nombre de jours en une ann	365	365	365	365 j
Poids de la cible (P)	70	15	70	15 kg

Remarque Pour les effets à seuils, les quantités administrées sont moyennées sur la durée d'expos $T_m = T \times 365$ (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

Pour les effets sans seuils, T_m sera assimilé à la durée de vie entière prise conventionnellement égale à 70 ans. $T_m = 70 \times 365 = 25550$ jours (ou $365 = 1$ si exprimé en année)

SYNTHESE DES HYPOTHESES RETENUES ET CALCUL DE LA D.J.E.

Non cancérigène (à seuil)	Cancérigène (sans seuil)
DJE = $((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C / (Px365)$	DJE = $((Fr \times Tr) + (Ff \times Tf)) \times f \times F \times C \times T / (Px365 \times T_m)$
DJE adulte = 0.01263493 mg/kg/j	DJE ad = 0.00721996 (mg/kg/j)-1
DJE enfant = 0.02852164 mg/kg/j	DJE enfant = 0.00611178 (mg/kg/j)-1

CALCUL DE RISQUE

Non cancérigène (à seuil)	Cancérigène (sans seuil)
DJA. = 6.00E-04 mg/kg/j	ERU = 0 (mg/kg/j)-1
IR = DJE / DJA	ERI = DJE x ERU
IR ad. = 21.058219	ERI ad. = 0
IR enf.= 4.75E+01	ERI enf. = 0