

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : *Génie Minier*



Laboratoire Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Minier

**Évaluation des risques de contamination en
éléments traces métalliques des sols, plantes,
sédiments et rejets miniers**
~sites de kef Oum Teboul et de Boucaid

Yousra BOUNOUA

Mohamed Salim SEBKI

Sous la direction de

Dr. Amira MERCHICHI

Pr. Malek OULD HAMOU

Présenté et soutenu publiquement le 10 juillet 2023

Composition du Jury :

Présidente	Mme. N. DJELLOULI	MCB	ENP
Examineur	Mr. M. Issaad	MCB	USTHB
Promotrice	Mme. A. MERCHICHI	MCB	ENP
Co-Promoteur	Mr. M. OULD HAMOU	Prof	ENP

ENP 2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : *Génie Minier*



Laboratoire Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Minier

**Évaluation des risques de contamination en
éléments traces métalliques des sols, plantes,
sédiments et rejets miniers**
~sites de kef Oum Teboul et de Boucaid

Yousra BOUNOUA

Mohamed Salim SEBKI

Sous la direction de

Dr. Amira MERCHICHI

Pr. Malek OULD HAMOU

Présenté et soutenu publiquement le 10 juillet 2023

Composition du Jury :

Présidente	Mme. N. DJELLOULI	MCB	ENP
Examineur	Mr. M. Issaad	MCB	USTHB
Promotrice	Mme. A. MERCHICHI	MCB	ENP
Co-Promoteur	Mr. M. OULD HAMOU	Prof	ENP

ENP 2023

ملخص

يشكل التلوث التعديني مشكلة بيئية رئيسية في العديد من مناطق العالم، بما في ذلك الجزائر. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مخاطر تلوث المعادن الثقيلة في مواقع التعدين في كاف أم طبول و بوقايد. باستخدام نهج متعدد التخصصات يجمع بين تقنيات أخذ العينات للتحليل والدراسة الإحصائية ورسم الخرائط، مما سمح من الحصول على معلومات قيمة حول حالة التلوث التعديني في هذه المناطق. تظهر النتائج خطورة التلوث في منطقة كاف أم طبول ، ولا سيما في المناطق 2 و 3. تم تحديد أنواع النباتات المتراكمة للمعادن ويمكن استخدامها في استراتيجيات تنقية التربة بواسطة النباتات. الموقع بوقايد لا يشكل خطراً فورياً. كان رسم الخرائط والتحليل الإحصائي أدوات قيمة لتصوير المناطق الأكثر تأثراً وتحديد المصادر المحتملة للتلوث الناتج المحصلة أساسية لإدارة وحفظ البيئة، لحماية الصحة العامة.

الكلمات المفتاحية: نفايات التعدين, المعادن الثقيلة, تلوث, رسم الخرائط.

Abstract:

Mining pollution is a major environmental issue in many regions of the world, including Algeria. This study aims to assess the risks of heavy metal contamination in the mining sites of Kef Oum Teboul and Boucaid using a multidisciplinary approach that combines sampling, analysis, statistical study, and mapping techniques. These methods have provided valuable information about the state of mining pollution in these regions. The results highlight the severity of pollution in the Kef Oum Teboul area, particularly in zones 2 and 3. The Boucaid site does not pose immediate dangers. Hyperaccumulating plant species have been identified and could be used in phytoremediation strategies. Mapping and statistical analysis have been valuable tools for visualizing the most affected areas and identifying potential sources of contamination. The findings are essential for environmental management, preservation, and public health protection.

Key words : Mining waste, Heavy metals, Contamination, Mapping.

Résumé :

La pollution minière constitue un problème environnemental majeur dans de nombreuses régions du monde, y compris en Algérie. Cette étude vise à évaluer les risques de contamination par les métaux lourds dans les sites miniers de Kef Oum Teboul et Boucaid en utilisant une approche multidisciplinaire, combinant des techniques d'échantillonnage, d'analyse, d'étude statistique et de cartographie, ce qui nous a permis d'obtenir des informations précieuses sur l'état de la pollution minière dans ces régions. Les résultats obtenus mettent en évidence la gravité de la pollution dans la zone de Kef Oum Teboul, en particulier dans les zones 2 et 3. Le site de Boucaid ne présente pas de dangers immédiats. Concernant les plantes, les espèces hyperaccumulatrices, ont été identifiées et pourraient être utilisées dans des stratégies de phytoremédiation. La cartographie et l'étude statistique ont été des outils précieux pour visualiser les zones les plus touchées et identifier les sources potentielles de contamination. Les résultats obtenus sont essentiels pour la gestion et la préservation de l'environnement, ainsi que pour la protection de la santé publique.

Mots clés : rejets miniers, métaux lourds, contamination, cartographie.

Remerciement

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude à Dieu pour nous avoir accordé le courage, la force, la patience, la santé et la volonté nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance envers notre chère promotrice, Docteur Amira MERCHICHI, pour son soutien moral, sa disponibilité, ses précieux conseils et les efforts considérables qu'elle a déployés pour assurer le succès de ce travail. Ce fut un honneur et un réel plaisir de travailler avec vous.

Nous tenons à remercier sincèrement Professeur Malek OULD HAMOU pour sa contribution majeure à ce projet, ses conseils et sa disponibilité. Nous apprécions également l'environnement de travail optimal et confortable qu'il a créé. Sans lui, le laboratoire de génie minier ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui.

Un grand merci aux enseignants qui ont accepté de faire partie du jury pour l'évaluation de ce projet : Docteur DJELLOULI Naima et Docteur Issaad Mouloud.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail de PFE. Votre appui et vos encouragements ont été essentiels pour atteindre nos objectifs.

Dédicace

À mes parents, je vous suis profondément reconnaissante pour votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos encouragements tout au long de ce parcours académique. Votre soutien indéfectible a été la clé de ma persévérance et de ma réussite. Votre confiance en moi a été ma source d'inspiration et de motivation.

À mes sœurs, merci d'avoir toujours été présentes à mes côtés, de m'avoir soutenue et encouragée dans toutes mes entreprises. Votre soutien inébranlable et votre amour inconditionnel ont été une source de force et de réconfort.

À mes amis, je vous suis reconnaissante pour votre amitié sincère, votre écoute attentive et vos encouragements constants. Votre présence a rendu cette expérience plus agréable et m'a aidée à surmonter les défis rencontrés.

À ma famille élargie, merci d'avoir cru en moi et d'avoir soutenu mes efforts tout au long de ce parcours. Votre soutien moral et vos encouragements ont été d'une importance capitale.

Enfin, à mon binôme SEBKI Mohamed salim , je tiens à exprimer ma gratitude pour notre collaboration étroite et notre travail d'équipe efficace. Ton engagement, ton dévouement et ton partage des responsabilités ont été essentiels à la réussite de ce projet. Merci d'avoir été un partenaire fiable et de confiance.

Ce travail de PFE est dédié à vous tous, car vous avez été mes piliers et ma source de motivation tout au long de ce parcours. Votre soutien inébranlable a été le moteur qui m'a permis d'atteindre mes objectifs. Je suis honorée d'avoir eu la chance de vous avoir à mes côtés.

Avec amour et gratitude,

BOUNOUA Yousra

Dédicace

À mes parents, je vous suis profondément reconnaissant pour votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos encouragements tout au long de ce parcours académique. Votre soutien indéfectible a été la clé de ma persévérance et de ma réussite. Votre confiance en moi a été ma source d'inspiration et de motivation.

À mon frère, merci d'avoir toujours été présent à mes côtés, de m'avoir soutenu et encouragé dans toutes mes entreprises. Votre soutien inébranlable et votre amour inconditionnel ont été une source de force et de réconfort.

À mes amis, je vous suis reconnaissant pour votre amitié sincère, votre écoute attentive et vos encouragements constants. Votre présence a rendu cette expérience plus agréable et m'a aidée à surmonter les défis rencontrés.

À ma famille élargie, merci d'avoir cru en moi et d'avoir soutenu mes efforts tout au long de ce parcours. Votre soutien moral et vos encouragements ont été d'une importance capitale.

Enfin, à mon binôme BOUNOUA Yousra, je tiens à exprimer ma gratitude pour notre collaboration étroite et notre travail d'équipe efficace. Ton engagement, ton dévouement et ton partage des responsabilités ont été essentiels à la réussite de ce projet. Merci d'avoir été un partenaire fiable et de confiance.

Ce travail de PFE est dédié à vous tous, car vous avez été mes piliers et ma source de motivation tout au long de ce parcours. Votre soutien inébranlable a été le moteur qui m'a permis d'atteindre mes objectifs. Je suis honorée d'avoir eu la chance de vous avoir à mes côtés.

Avec amour et gratitude,

SEBKI Mohamed Salim

Table des Matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Introduction générale

18

Problématiques environnementales de l'activité minière en Algérie

20

Introduction

21

1. Les instruments législatifs de protection de l'environnement

22

2. Actions législatives pour la protection de l'environnement

23

3. Rejets miniers

23

4. Méthodes de gestion des rejets miniers

26

4.1. Fixer des objectifs et mesurer le succès

26

4.2. Études exploratoires des zones d'impact de l'exploitation minière et du traitement des minéraux

26

4.3. Gestion de la Source :

28

4.4. Gestion des voies d'exposition :

28

4.5. Gestion de l'exposition des récepteurs :

29

5. Valorisation des rejets miniers

29

5.1. Options de correction et de nettoyage

29

5.2. Technologies conventionnelles :

29

5.3. Technologies innovantes/émergentes.

31

6. Réutilisation, Recyclage et Récupération des rejets miniers

32

6.1. Vente de matériaux utilisables

38

6.2. Le Reminage

38

6.3. Technologies innovantes/émergentes dans la valorisation des rejets miniers

38

7. Défis de réhabilitation des sites minier

40

8. Le drainage minier acide DMA

41

8.1. La formation du DMA

41

8.2. Neutralisation du DMA

42

8.3. Prédiction du DMA

43

9. Le drainage neutre contaminé :

44

9.1. Formation du DNC

44

9.2. Principaux défis associés à la prédiction du DNC

44

10. Les tests statiques

45

10.1. Les essais NAG

45

10.2. Tests statiques chimiques

45

10.3. Tests statique minéralogique

47

10.4. Essais cinétique

47

10.5. Essais d'extraction

49

Conclusion	50
Présentation des sites d'étude	54
Introduction	
1. Le District de KEF OUM TEBOUL	56
1.1. Le relief	58
1.2. Climat	58
1.3. Hydrographie et hydrogéologie	59
2. Contexte géologique	59
2.1. Lithostratigraphie de la zone de gisement	60
3. Composition minéralogique du gisement	63
4. Historique	63
5. Le District de Boucaid	64
5.1. Situation géographique	64
5.2. Aspect Climatologique	65
5.3. Hydrologie et Hydrogéologie	65
5.4. Géologie Régional	65
5.5. Tectonique	65
5.6. Minéralisation	66
5.7. Historique des travaux	66
5.8. Traitement du Minerai au Niveau de l'Usine	67
6. Impacts environnementaux	68
6.1. Site de boucaid	68
6.2. Kef oum teboul	69
Conclusion	70
Méthodes et matériels	71
Introduction	72
1. L'échantillonnage	73
1.1. Objectifs et approche globale	73
1.2. Approche globale et notions de plan d'échantillonnage	73
1.3. Définition des objectifs de l'échantillonnage	74
1.4. investigation préliminaire	74
1.5. stratégie d'échantillonnage	74
2. Localisation et répartition des points d'échantillonnage	76
2.1. Localisation des points d'échantillonnage du site de kef oum teboul	76
2.2. Prélèvement des échantillons	77
2.3. localisation des points d'échantillonnage du site de Boucaid	79
2.4. Prélèvement des échantillons	80
3. Préparation des échantillons	82
3.1. Préparation des plantes	82
3.2. Minéralisation des plantes	82
3.3. Préparation des échantillons sols	84

3.4. Préparations mécaniques des échantillons	84
4. Caractérisation des échantillon	87
4.1. Caractérisation physico-chimique	87
4.2. Caractérisation minéralogique	88
4.3. Caractérisation chimique	90
4.3.2. Spectrométrie d’Absorption Atomique (SAA):	91
5. caractérisation environnementale: Essais statiques	92
6. Essais d’extraction	94
Conclusion	97
Résultats et interprétations	98
Introduction	99
1. Caractérisation des échantillons	100
1.1. Caractérisation physico-chimique	100
1.1.1. Potentiel d’hydrogène (pH)	100
1.1.2. Teneur en eau	102
1.2 Caractérisation minéralogique.	103
Analyses de la composition minéralogique par DRX (site de Kef Oum teboul)	103
Analyse de la composition minéralogique par DRX (la zone de Boucaid):	105
Caractérisation environnementale	106
Essais statiques	106
1.3 Caractérisation environnementale	108
Essais d’extractions	108
Interprétations de la SAA : l'extraction par HNO ₃ 2M pour le site de Kef Oum Teboul	109
interprétations de la SAA : l'extraction par Cacl ₂ 0,01 M pour le site de Kef Oum Teboul :	111
Interprétations de la SAA: l'extraction par HNO ₃ 10% pour le site de Boucaid	114
Interprétations de la SAA: l'extraction par Cacl ₂ à 0,001M pour le site de Boucaid:	116
Comparaison entre les résultats fournis entre l’essais d’extraction du HNO ₃ et Cacl ₂	118
Interprétations de la SAA : l'extraction par HNO ₃ 10% pour le site de Boucaid:	119
Interprétations de la SAA : l'extraction par Cacl ₂ 0.001 M Sur le site de Boucaid:	121
Comparaison entre les résultats fournis entre l’essais d’extraction du HNO ₃ et Cacl ₂	123
Analyses de la composition chimique par FRX (site de Kef Oum teboul)	123
Analyses de la composition chimique par FRX (site de Boucaid):	124
2. Minéralisation des plantes :	124

2.1. Le facteur de translocation :	129
3. les indices caractéristiques de contamination:	133
3.1. L'indice de pollution(Pi):	133
3.2. Indice de pollution intégré (IPI) :	136
3.3. Facteur de contamination (CF) et degré de contamination (CD)	138
3.4. Geoaccumulation index (Igeo)	141
3.5. Pollution load index PLI:	143
3.6. Potential ecological risk index (Eri) :	145
4. Analyse spatiale	148
4.1 Analyse spatiale des concentrations des éléments traces métalliques dans le site de Kef Oum Teboul:	149
4.2 Analyse spatiale de l'indice de risque écologique potentiel Er et du facteur de translocation ft dans le site de Kef Oum Teboul:	151
Conclusion	153
Analyses statistiques des données	154
Introduction	
1. Analyse descriptive	157
1.1 Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site de Kef Oum Teboul	157
1.2 Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site Boucaid	157
1.3 Analyse descriptive des indices de pollution du site de Kef Oum Teboul	158
2. Analyse de corrélation	158
2.1 Analyse de corrélation des métaux lourds du Site de Kef Oum Teboul	159
2.3 Analyse de corrélation des métaux lourds du Site de Boucaid	160
2.4 Analyse de corrélation entre les concentrations des métaux lourds et l'indice de pollution de Nemerow (Pn)	161
3. Le Box plot	162
3.1 Box plot des concentrations des métaux lourds pour le site de kef oum teboul	163
3.2 Box plot des concentrations des métaux lourds pour le site de Boucaid	163
3.4 Box plot des indices de pollution pour le site de kef oum teboul	164
4. Analyse de classification (Clustering)	165
5. Choix de l'algorithme implémenté	165
5.1 Le Regroupement hiérarchique agglomératif (Agglomerative clustering)	167
5.2 Le Elbow plot	167
5.4 Coefficient de détermination R ² et l'erreur quadratique moyenne RSE	168
Conclusion	171
Conclusion générale	
Bibliographie	175
Annexes	181

Liste des Figures

Figure 1.1 : Illustration de l'élimination subaquatique (mineclosure.gtk)	25
Figure 1.2 : Schéma illustratif de la méthode de lixiviation (Les déchets, les résidus et les stériles. 2011)	26
Figure 1.3 : Schéma illustratif d'une drague mécanique et d'une barge de transport.	30
Figure 1.4 : Schéma illustratif d'une drague hydraulique et d'un pipeline.	30
Figure 1.5 : Schéma illustratif du remblayage des mines par feuille de débit conventionnelle et par feuille de débit de pâte	31
Figure 1.6: Grande barrière réactive perméable pour la dépollution des eaux souterraines contaminées par le trichloréthylène (TCE).	32
Figure 1.8: : Vue de 2020 d'Osborn, Idaho, vers l'est, à travers la plaine inondable de la South Fork Coeur d'Alene River.	33
Figure 1.9: Schéma illustratif de la construction d'une Paroi de boue avec grappin et/ou hydromill (geofix.com)	34
Figure 1.10: Schéma illustratif de la mise en place des paraplanes (sheetpiling.arcelormittal.com)	35
Figure 1.11 : schéma illustratif du pompage des eaux souterraines (Groundwater facts, 2017)	36
Figure 1.12 : Schéma illustratif du processus de Plafonnement (Office of Solid Waste and Emergency Response, 2012)	36
Figure 1.13: Illustration schématique de la configuration d'un système de traitement des eaux usées à travers des tranchées intercepteurs (braybrothersdrainage.co.nz)	37
Figure 1.14 : Illustration schématique de la décomposition des matières dangereuse par microbiotes (proprofs.com)	39
Figure 1.16 : Étapes de formations du DMA (Aubertin et al ,2002)	42
Figure 1.17 : Représentation graphique de l'interprétation des tests statiques en fonction du PNN et du NPR définition des zones de génération et de consommation d'acide, ainsi que d'incertitude (Bouzahzah et al., 2021).	47
Figure 2.1 : Localisation géographique de la région de Kef Oum Teboul (Extrait de la carte topographique de Annaba 1/250.000)	55
Figure 2.2: Extrait de la carte topographique d'Annaba, 1/250.000	57
Figure 2.3: Schéma orohydrographique de la région de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1971)	58
Figure 2.4 : Coupe transversale du gisement de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1965-1966).	60
Figure 2.5 : Situation géographique du Massif de l'Ouarsenis dans l'Atlas Tellien.	64
Figure 3.1 : organigramme des essais au laboratoire.	71
Figure 3.2 : Échantillonnage de jugement (EPA, 1991 ; ISO, 1993)	75
Figure 3.3 : Imagerie satellite des zones d'échantillonnages du district	

de KEF OUM TEBOUL (Google earth 2021, Echelle 1/25000)	76
Figure 3.4 : Imagerie satellites des points d'échantillonnages des trois zones	78
Figure 3.5 : Imagerie satellites de la zone d'échantillonnage du district de Boucaid	79
Figure 3.6: Imagerie satellite des Points d'échantillonnages des rejets plomb-zinc (Google earth pro, Echelle 1/250000)	80
Figure 3.7: Imagerie satellite Points d'échantillonnages pour les échantillons de baryte (Google earth pro, Echelle 1/250000)	81
Figure 3.8 : Balance à précision SCT-ATLAS	82
Figure 3.9: Trempage des échantillons de plante dans l'acide nitrique	82
Figure 3.10 : Minéralisation des plantes(plaque chauffante LABINCO L-81-)	83
Figure 3.11: Concasseur à mâchoires de type DRAGON	84
Figure 3.12 : Concasseur giratoire de type DENVER	85
Figure 3.13 :Diviseur d'échantillons à cônes rotatifs RETSCH.Fi	85
Figure 3.14 : Pulverisette de type FRITSH	86
Figure 3.15 : Mesure du pH (pH mètre JENWEY)	87
Figure 3.16: Séchage des échantillon de sol dans le Four Carbolite	87
Figure 3.17: Illustration de la loi de bragg.	88
Figure 3.18: Schéma d'un diffractomètre à compteur avec la focalisation Bragg	89
Figure 3.19: Principe de l'émission de rayons X par fluorescence	90
Figure 3.20 : Dispositif expérimental d'absorption Atomique.	91
Figure 3.21: Test Fizz et agitation	93
Figure 3.22: Critères de classification environnementale des rejets miniers	93
Figure 3.23: Agitation et filtration des échantillons avec la solution de CaCl_2	94
Figure 3.24: Agitation et filtration des échantillons avec la solution du HNO_3	95
Figure 4.1 : Spectre DRX de la zone 1	102
Figure 4.2 : Spectre DRX de la zone 2	103
Figure 4.3: Spectre DRX de la zone 3	103
Figure 4.4 : spectre DRX de la zone de rejet de baryte	104
Figure 4.5: spectre DRX de la zone de rejet de Pb/Zn	104
Figure 4.6 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)	108
Figure 4.7 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)	109
Figure 4.8 : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)	109
Figure 4.9 : Graphique à barre de la concentration du Zinc(mg/l)	110
Figure 4.10 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)	111
Figure 4.11 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)	111
Figure 4.12. : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)	112
Figure 4.13: Graphique à barre de la concentration du zinc (mg/l)	113
Figure 4.14 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)	114
Figure 4.15 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)	114
Figure 4.16 : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)	115
Figure 4.17 : Graphique à barre de la concentration du Zinc (mg/l)	115

Figure 4.18 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)	116
Figure 4.19 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)	116
Figure 4.20 : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)	117
Figure 4.21 : Graphique à barre de la concentration du Zinc (mg/l)	117
Figure 4.22 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)	118
Figure 4.23 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)	119
Figure 4.24 : Graphique à barre de la concentration du cuivre(mg/l)	119
Figure 4.25: Graphique à barre de la concentration du Zinc(mg/l)	120
Figure 4.26: Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)	120
Figure 4.27: Graphique à barre de la concentration du plomb (mg/l)	121
Figure 4.28: Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)	121
Figure 4.29: Graphique à barre de la concentration du Zinc(mg/l)	122
Figure 4.30 : Graphique à barre de la concentration du Cadmium (mg/l)	126
Figure 4.31 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)	126
Figure 4.32 : Graphique à barre de la concentration du Cuivre (mg/l)	127
Figure 4.33 : Graphique à barre de la concentration du Zinc (mg/l)	127
Figure 4.34: Ft des métaux lourds Z1 PD1	128
Figure 4.35: : Ft des métaux lourds Z1 PD2	128
Figure 4.36: Ft des métaux lourds Z1 PD3	
Figure 4.37 : Ft des métaux lourds Z1 PD4	129
Figure 4.39: Ft des métaux lourds Z1 PD5	
Figure 4.40 : Ft des métaux lourds Z2 1	129
Figure 4.45 : Ft des métaux lourds Z1 RS1	
Figure 4.46 : Ft des métaux lourds Z1 RS2	130
Figure 4.47 : Ft des métaux lourds Z1 RS3	130
Figure 4.48. : cartographie des variations des ETM (voir Annexe 6)	148
figure 4.49: cartographie des variations du Er et Ft (voir Annexe 6)	150
Figure 5.1 : Organigramme du chapitre 5	156
Figure 5.2: Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site Kef Oum Teboul.	157
Figure 5.4 : Analyse descriptive des indices de pollution KOT	158
Figure 5.5. : Matrice de corrélation des métaux lourds entre eux pour le site de Kef Oum Teboul	160
Figure 5.6. : Matrice de corrélation des métaux lourds entre eux pour le site de Boucaid.	160
Figure 5.7. : Matrice de corrélation des métaux lourds entre eux pour le site de Kef Oum Teboul.	162
Figure 5.8 : Box plot des métaux lourds pour le site de kef oum teboul.	163
Figure 5.9 : Box plot des métaux lourds pour le site de Boucaid.	164
Figure 5.10 : Box plot des indices de pollution pour le site de kef oum teboul.	164
Figure 5.11 : Tendence entre les points d'échantillonnage et Cd(mg/l)	166
Figure 5.12 : Tendence entre Pn et Zn(mg/l)	166

Figure 5.13. : Agglomerative clustering entre les points d'échantillonnage de kef Oum Teboul selon le Pn. 167

Figure 5.14 : Représentation graphique de l'elbow plot. 168

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Essais cinétique	49
Tableau 2.1: Les coordonnées géographiques du gisement Kef Oum Teboul d'après le quadrillage Kilométrique Lambert (Nord Algérie)	56
Tableau 2.2 : Composition minéralogique du gisement	62
Tableau 3.1 : Évaluation des stratégies d'échantillonnage en fonction de l'objectif (EPA, 1991)	74
Tableau 3.2 : Coordonnées Lambert des points d'échantillonnages	77
Tableau 3.3 : Coordonnées Lambert des points d'échantillonnage des rejets Pb/Zn	79
Tableau 3.4 : Coordonnées Lamberts des pts d'échantillonnage des rejets de Baryte	80
Tableau 3.5 : Addition d'acide en fonction du test de Fizz.	92
Tableau 4.1 : Potentiel d'hydrogène (pH): site de Kef Oum Teboul	99
Tableau 4.2 : Potentiel d'hydrogène (pH) des rejet de plomb zinc Site de Boucaid	100
Tableau 4.3 : Potentiel d'hydrogène (pH) des rejet de Baryte Site de Boucaid	100
Tableau 4.4 : Teneur en eau des rejets du site de Kef Oum Teboul	101
Tableau 4.5 : Teneur en eau des rejet de Pb Zn du Site de Boucaid	101
Tableau 4.6 : Teneur en eau des rejet de Baryte du Site de Boucaid	101
Tableau 4.7 : Résultats des essais statique plomb zinc	106
Tableau 4.8 : Résultats des essais statique baryte	107
Tableau 4.9 : Classification Pn des échantillons KOT Les résultats de classification	134
Tableau 4.10 : Classification Pn des échantillons BOUCAID	135
Tableau 4.11 : Classes de pollution selon l'indice de pollution intégré	136
Tableau 4.12 : Classification IPI des échantillons KOT	136
Tableau 4.13 : Classification CD des échantillons KOT	138
Tableau 4.14 : Classification IPI des échantillons BOUKAID	139
Tableau 4.15 : Classes de contamination selon l'indice de Géoaccumulation.	140
Tableau 4.16 : Classification Igeo des échantillons KOT	141
Tableau 4.17 : Classification PLI des échantillons KOT	143
Tableau 4.18 : Classification PLI des échantillons BOUKAID	144
Tableau 4.19 : Classification Erides échantillons KOT	146
Tableau 4.20 : Classification Erides échantillons BOUKAID	147
Tableau 4.21 : Concentration en métaux lourd dans les différentes parties des plantes	181
Tableau 22: Valeurs du facteur de translocation des métaux lourds dans les plantes	185
tableau 23: Résultats des analyses FRX de la zone de Kef Oum Teboul	186
tableau 4.24: Résultats des analyses FRX de la zone de Kef Oum Teboul	188

Liste des Abréviations

ANAM	Agence nationale des activités minières
AND	L'Agence nationale des déchets
ASTM	American Society for Testing and Materials
CD	Degré de contamination
CF	Facteur de contamination
CNFE	National de formations à l'Environnement
DMA	Drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
DRX	Diffractions aux rayons X
EPA	Environmental Protection Agency
ETM	Éléments traces métalliques
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FRX	Fluorescence aux rayons X
IP	Indice de pollution
IPI	Indice de pollution intégré
ISO	Organisation internationale de normalisation
NAG	Net-acid generation
ONEDD	L'Observatoire national de l'Environnement et du Développement Durable
PA	Potentiel d'acidification
PDAU	Master plan of installation and urbanism
PH	Potentiel hydrogène
PLI	Pollution load index
PN	Potentiel de neutralisation
PNAE	Protection de la couche d'ozone et l'éducation environnementale
PNN	Potentiel net de neutralisation
POS	Soils occupation plan
SAA	Spectroscopie d'absorption atomique
SIG	Système d'information géographique
SNAT	National scheme for land using planning
SONAREM	Société nationale de recherches et d'exploitations minières

SPLP	Synthetic Precipitation Leaching Procedure
SRAT	Regional scheme for land use planning
NPR	Rapport de potentiel neutralisant
NAG	Génération d'acidité nette
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UV	Ultraviolet
RSE	Root Square Error
R²	Coefficient de détermination

Introduction générale

La pollution générée par l'industrie minière se manifeste sous différentes formes. L'une des principales sources de préoccupation est la libération de métaux lourds toxiques tels que le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium dans l'environnement. Ces métaux peuvent contaminer les sols, les sédiments, les eaux de surface et les nappes phréatiques, entraînant une altération des écosystèmes naturels et une menace pour la biodiversité.

Selon les données de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), environ 50% des sites miniers abandonnés dans le monde présentent des problèmes de pollution, laissant des terres contaminées sur de vastes étendues. En outre, l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) estime que plus de 180 000 km de rivières dans le monde sont touchés par la pollution minière.

La pollution minière en Algérie est une préoccupation croissante en raison de l'exploitation de nombreuses ressources minérales à travers le pays. Les activités minières, bien que essentielles pour le développement économique, peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Le drainage minier acide est considéré comme le plus important problème environnemental auquel l'industrie minière fait face, et vue la gravité des dommages qu'il peut avoir. (bouzahzah,2014)

Selon des rapports du Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables de l'Algérie, il est estimé que plus de 1 000 sites miniers abandonnés sont répartis à travers le pays, l'Agence Nationale Algérienne des Activités Minières (ANAM) a marqué en 2016 un nombre total de 38 sites miniers abandonnés et 556 mines en fermeture temporaire. L'Exploitation et le traitement de ces gisements ont engendré des quantités énormes de rejets (FCE 2016). Ces sites représentent une menace potentielle de pollution en raison de la présence de résidus miniers, de produits chimiques utilisés dans le processus d'extraction et de déchets industriels laissés sans traitement adéquat. La dégradation de ces sites peut entraîner la contamination des sols, des eaux de surface et des nappes phréatiques, ainsi que des risques pour la santé des populations locales.

Afin de mieux comprendre l'ampleur de la contamination et d'évaluer les risques associés, des études approfondies sont nécessaires.

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrerons sur deux sites miniers en Algérie, à savoir le site de Kef Oum Teboul et Boucaïd. Ces sites présentent des caractéristiques géologiques et minéralogiques particulières, ce qui les rend propices à la présence de métaux lourds. L'objectif principal de notre travail sera d'évaluer les risques de contamination des sols, des sédiments, des eaux et des plantes par les métaux lourds dans ces deux sites miniers.

Afin d'atteindre cet objectif, un plan de travail a été soigneusement mis en place :

- Mettre en œuvre une approche multidisciplinaire pour atteindre l'objectif.
- Collecter des échantillons de sols, de sédiments, d'eaux et de plantes sur les sites de Kef Oum Teboul et Boucaid.
- Effectuer des analyses de laboratoire pour déterminer les concentrations de différents métaux lourds dans les échantillons.
- Utiliser des outils statistiques pour l'évaluation des risques.
- Cartographier la répartition spatiale des métaux lourds à partir des résultats de la modélisation.
- Identifier les zones présentant les niveaux les plus élevés de contamination des métaux lourds.

Les résultats de notre travail seront cruciaux pour la gestion et la préservation à long terme de l'environnement. Nous élaborerons des cartes de risques de contamination qui joueront un rôle essentiel dans la prise de décisions en matière de gestion environnementale. Ces cartes permettront d'identifier les zones nécessitant une attention particulière et de guider les mesures de remédiation et de protection de l'environnement. Ainsi, nous maintiendrons l'équilibre écologique et assurerons la durabilité des écosystèmes naturels, tout en contribuant à la protection de la santé publique.

Chapitre 1

Problématiques environnementales de l'activité minière en Algérie

Introduction

Dans ce premier chapitre, nous aborderons les enjeux environnementaux majeurs engendrés par l'industrie minière en Algérie. L'exploitation des mines, en effet, engendre une série de problématiques environnementales : dégradation des écosystèmes terrestres et aquatiques, fragmentation des habitats, destruction de la flore locale et perturbations des équilibres écologiques. Ajouté à cela, les rejets de polluants générés par cette activité industrielle contaminent les ressources hydriques, compromettant ainsi la qualité de l'eau potable et mettant en péril la biodiversité aquatique.

Malheureusement, l'industrie minière fait face à un manque de politiques de gestion environnementale adéquates. Les efforts actuels peinent à pallier ces problèmes, essentiellement en raison d'un manque de réglementations strictes de protection de l'environnement, de mécanismes de surveillance efficaces pour contrôler les rejets polluants, et d'une application insuffisante des normes environnementales. Le dialogue entre les différentes parties prenantes demeure également limité, freinant ainsi l'efficacité des mesures prises. En dépit d'une approche globale adoptée par l'Algérie en matière de préservation de l'environnement, des actions supplémentaires sont requises pour répondre à ces défis environnementaux persistants liés à l'industrie minière (GHERBI, 2012).

Au cours de ce chapitre, nous étudierons les travaux existants sur la législation algérienne et son évolution face aux problématiques environnementales générées par l'industrie minière. Nous traiterons des divers types de déchets et de substances dangereuses produits par l'industrie minière pendant et après les phases d'exploitation et de valorisation. Nous mettrons également en lumière une approche stratégique pour identifier les zones touchées par les déchets miniers et discuterons des diverses méthodes et techniques pour gérer et valoriser ces déchets.

1. Les instruments législatifs de protection de l'environnement

L'intérêt de l'Algérie pour les problèmes environnementaux peut être illustré par le texte officiel de base de 1967 qui fixe les critères, degrés et procédure de classement ainsi que les organismes chargés de ces missions. Mais malheureusement, cela n'a produit aucun effet sur le terrain.

En 1983, une loi fondamentale a été promulguée pour fixer les principes généraux du droit algérien. Cependant, les outils appropriés n'ont pas été précisés pour atteindre les objectifs résumés dans les deux points suivants : (environmental protection, law 02/05/1983; 83-03).

- a. Protection, aménagement et valorisation des ressources naturelles au sens large et pas seulement en se limitant à la conservation des sites naturels comme cela était précisé dans le texte légal de 1967, jugé insuffisant par la suite (Excavations and protection of sites and historic buildings and natural. Ordinance; 1967)
- b. Prévention et lutte contre toute forme de pollution et de nuisances

Ces politiques environnementales ont été inefficaces en raison du manque d'accent mis sur la politique d'aménagement du territoire tout en accordant la priorité au développement des industries et du logement. Cette approche rendait difficile pour le gouvernement d'atteindre les objectifs environnementaux sans une bonne connaissance du territoire national, ce qui nécessitait des études spécifiques qui n'avaient pas encore été menées.

La loi d'aménagement du territoire de 1987 a lancé deux dispositifs, le SNAT (national scheme for land using planning) et le SRAT (regional scheme for land use planning), avec des objectifs de politique environnementale, mais ils n'ont jamais été mis en œuvre en raison de l'enchevêtrement et de la dispersion des tâches environnementales. Depuis 2000, plusieurs lois ont été adoptées concernant la gestion des déchets, l'aménagement du territoire, la protection du littoral et les énergies renouvelables (Management, the control and the waste disposal. Law, 2001).

La loi d'aménagement et de développement durable du territoire de 2001 a créé cinq dispositifs, dont le PAW, placé au-dessus du PDAU (master plan of installation and urbanism) et du POS (soils occupation plan). La loi de finances a introduit une taxe sur les eaux usées industrielles en 2003, et une autre loi a institué le plan national d'action environnemental pour l'environnement et le développement durable (Law of finances for, 2002). Cependant, le plan manquait de détails précis sur son intégration avec d'autres programmes, ce qui suscitait des inquiétudes quant à sa mise en œuvre. (Mohamed GHERBI, 2012).

2. Actions législatives pour la protection de l'environnement

Les politiques environnementales changeantes ont engendré des conflits au sein des institutions chargées de l'environnement en Algérie. Aujourd'hui, plusieurs ministères sont impliqués dans les questions environnementales, tels que l'agriculture et le développement rural, les ressources en eau, le logement et les affaires urbaines, le tourisme, la pêche, l'industrie, l'énergie, l'extraction minière et pétrolière. Au niveau national, six départements spécifiques ont été créés, notamment le Centre national de formations à l'Environnement (CNFE), l'Agence nationale des déchets (AND) et l'Observatoire national de l'Environnement et du Développement Durable (ONEDD). (MATE, 2012)

Le rapport 2010 de l'UE mentionne divers plans et programmes nationaux depuis 2001, tels que la gestion des déchets municipaux, la protection de la couche d'ozone et l'éducation environnementale. Le premier PNAE-SD pour 2001-2004 a mis l'accent sur l'eau, les déchets, la biodiversité et l'utilisation des ressources. De 2005 à 2009, le programme de croissance a alloué 36,5 milliards de dinars (365 millions d'euros) à des programmes environnementaux en Algérie, y compris la gestion des déchets municipaux et spéciaux, ainsi que l'éducation environnementale. Des campagnes de sensibilisation ont également été menées. De 2011 à 2013, l'UE a accordé une aide de 172 millions d'euros à l'Algérie, dont 34 millions d'euros ont été destinés à la protection de l'environnement, notamment la gestion des déchets solides et l'élaboration de plans climatiques et côtiers intégrés.

3. Rejets miniers

La première étape de l'extraction et du traitement des minéraux consiste à extraire la valeur minérale du minerai ou de la roche hôte. Différentes techniques peuvent être utilisées pour extraire les minéraux du sol. La plupart des processus d'extraction impliquent l'élimination en vrac du minerai et de la roche associée du gisement en utilisant des explosifs et des moyens mécaniques pour briser le minerai en morceaux gérables ou pour séparer les minéraux du minerai des matériaux indésirables.

L'objectif de l'extraction est de récupérer le minerai de haute qualité tout en laissant autant de minerai à faible teneur et de roche stérile que possible. Cependant, il n'est pas toujours possible de réaliser une séparation complète, ce qui conduit à l'extraction de certains matériaux de moindre qualité. Le terme "minerai" fait référence à un matériau contenant des minéraux ayant une valeur économique suffisante, qui peut varier d'une mine à l'autre et au fil du temps en fonction de la valeur économique des minéraux extraits.

Vue d'ensemble des opérations d'extraction et de traitement des minéraux

L'exploitation minière comprend l'exploitation à ciel ouvert pour extraire les minerais à la surface ou à proximité, l'exploitation souterraine pour extraire des gisements plus profonds, et l'exploitation in situ pour extraire les minéraux sur place. L'exploitation à ciel ouvert implique l'extraction de charbon et le processus de dragage pour récupérer les dépôts de placers, tandis que l'exploitation souterraine implique l'extraction sous la surface et l'élimination du minerai, et que l'exploitation in situ utilise l'injection, les puits et le lessivage pour extraire le minerai. (Nick Ceto, 2000)

Déchets miniers et matières dangereuses

La plus grande quantité de déchets générés par les opérations d'extraction sont les eaux de mine et les stériles. Un troisième déchet, le mort-terrain, est généré dans les mines à ciel ouvert.

- Les morts-terrains sont les matériaux de surface enlevés lors des opérations d'extraction à ciel ouvert pour exposer le minerai en dessous
- L'eau de mine Dans les mines en exploitation, l'eau provenant de la mine est utilisée à des fins de contrôle de la poussière et de traitement, et si elle est conforme aux réglementations sur l'élimination des polluants, elle peut être rejetée dans les eaux de surface.. (Nick Ceto, 2000)
- Roche stérile Les stériles sont des roches non minéralisées retirées lors de l'extraction minière. Leur teneur en minerai utilisable peut varier avec le temps. (Nick, 2000)

Déchets et matières dangereuses générés par la valorisation

Les résidus sont les déchets produits lors des opérations d'enrichissement, séparés des minéraux cibles. Ils représentent la plus grande proportion du minerai extrait dans de nombreux secteurs industriels. La gestion des résidus est une partie importante des opérations d'extraction. La nature des résidus dépend du minerai broyé et des opérations d'enrichissement utilisées. Il existe trois types de résidus : humides, épaisés et secs, qui peuvent contenir des contaminants tels que des sulfures, des métaux et des réactifs. Les résidus à grain fin peuvent produire de la poussière, et les résidus sulfurés oxydés peuvent générer un ruissellement acide. Les résidus humides sont stockés dans des bassins de résidus pour évaporer ou drainer l'excès de liquide, tandis que les résidus secs peuvent être asséchés avant d'être disposés dans des tas de résidus.

Élimination des résidus

- Remblayage de la mine : Le remblayage de la mine utilise des résidus pour soutenir les mines souterraines et réduire les perturbations en surface. Bien que cela puisse stopper les rejets d'eau acide et réduire les résidus, il peut également générer des produits de dégradation de l'acide dans certaines conditions.
- Élimination subaquatique : L'immersion sous l'eau est une pratique historique et encore utilisée dans certains pays pour la gestion des résidus miniers. Cette méthode peut inhiber l'oxydation des minéraux sulfurés et ainsi réduire la production d'acide, mais ses effets à court et à long terme sur le plan d'eau sont incertains. (waters of the U. S, 2000).

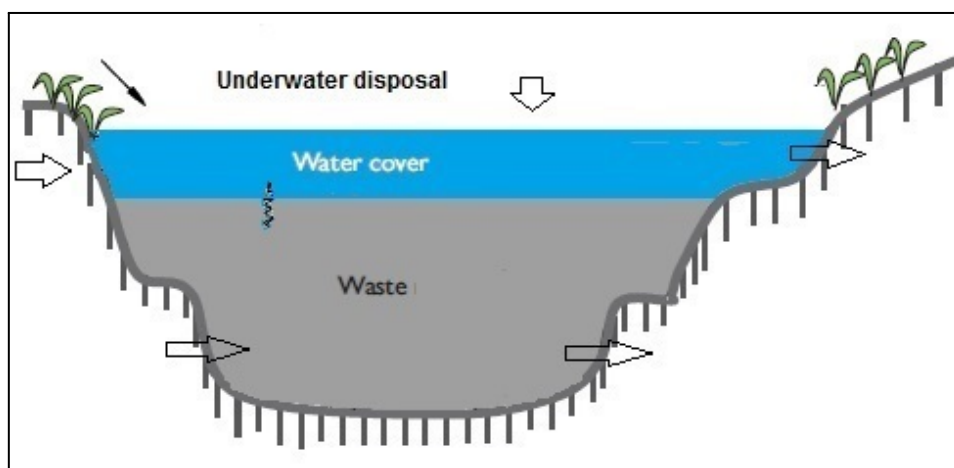


Figure 1.1 : Illustration de l'élimination subaquatique (mineclosure.gtk)

- Lixiviation des déchets et des matières dangereuses

La lixiviation est un processus d'extraction des métaux solubles dans un solvant approprié, comme l'eau ou l'acide sulfurique. Elle consiste à dissoudre sélectivement le composé métallique du minerai, puis à récupérer le métal de la solution de lixiviation par des moyens électrochimiques ou chimiques. La lixiviation peut être réalisée in situ, sans excavation. Le minerai est concassé ou broyé afin d'exposer le minéral souhaité, ou les résidus d'autres processus peuvent être traités par lixiviation. Les minerais à faible teneur peuvent être récupérés par lixiviation en tas ou par décharge(Nick Ceto, 2000)



Figure 1.2 : Schéma illustratif de la méthode de lixiviation (Les déchets, les résidus et les stériles. 2011)

4. Méthodes de gestion des rejets miniers

4.1. Fixer des objectifs et mesurer le succès

Cette partie aborde les éléments essentiels pour établir des objectifs de remise en état des sites miniers. Elle met en évidence la nécessité de coordonner les efforts entre les agences fédérales et étatiques pour définir des objectifs clairs et résoudre les conflits potentiels. De plus, elle explique comment un gestionnaire de site peut évaluer le succès de l'atteinte des objectifs fixés pour le site minier.

La planification et la communication établissent une base pour déterminer les degrés de progrès vers les objectifs énoncés et un moyen d'identifier les techniques qui seront utilisées pour savoir quand les objectifs ont été atteints. Ces résultats et mesures à valeur ajoutée peuvent inclure une variété d'indicateurs discrets. (A Strategic Guide for Local Conservation Efforts in the West, 1997)

4.2. Études exploratoires des zones d'impact de l'exploitation minière et du traitement des minéraux

4.2.1. la Portée du projet :

Les objectifs généraux du projet d'enquête sur un site minier abandonné sont de caractériser le site, identifier les risques, et développer un programme de correction pour protéger la santé humaine et l'environnement. Le cadrage vise à déterminer la nature de la contamination, les actions nécessaires pour la traiter, et les mesures à prendre pour réduire les risques. Cinq éléments sont inclus dans le plan de travail type

- une introduction,
- contexte du site et cadre physique,
- évaluation initiale,
- justification du plan de travail (y compris l'identification des besoins en données et des objectifs de qualité des données),
- tâches d'investigation et de nettoyage du site. Les informations nécessaires pour compléter le plan de travail seront disponibles au fur et à mesure que les tâches associées au cadrage seront terminées

(U.S. Environmental Protection Agency (EPA), October, 1988. Et al Nick Ceto, Shahid Mahmud, et al, août 2000, chapitre 4, p 45)

4.2.2. Difficultés à identifier les sites miniers abandonnés:

La détermination de la portée et la réalisation des activités de caractérisation et de nettoyage des sites miniers abandonnés sont compliquées par différentes caractéristiques. Certains sites sont étendus et éloignés, ce qui rend leur caractérisation et leur nettoyage difficiles. De plus, les volumes importants de contaminants et la diversité des types de déchets présents sur ces sites nécessitent des approches spécifiques d'échantillonnage et de traitement. Les contaminants présents, tels que les métaux, peuvent persister pendant de longues périodes, entraînant des problèmes environnementaux persistants. Les sites miniers abandonnés peuvent également contaminer différents médias tels que l'eau, les sols, les sédiments et l'air, ce qui nécessite la collecte de données provenant de sources variées. De plus, ces sites peuvent être situés dans des zones historiques avec des considérations de préservation. Les activités minières et de traitement en cours à proximité peuvent également avoir un impact sur les mesures correctives et la sécurité des équipes d'assainissement. Enfin, certains sites sont situés dans des zones non industrielles, ce qui soulève des questions sur l'évaluation des risques écologiques et les préférences des autorités locales concernant le nettoyage complet ou la préservation des caractéristiques historiques. (Nick Ceto, Shahid Mahmud, et al, août 2000, chapitre 6, p 58)

Stratégies de gestion de site minier

Lors de la planification d'une stratégie de réduction des risques, les gestionnaires doivent prendre en compte diverses actions pour aborder les risques, y compris des applications technologiques, des contrôles techniques et d'autres activités.

4.2.3. Catégories d'activités de gestion abordant les éléments de risque

4.3. Gestion de la Source :

La contamination peut être traitée en réduisant la source, soit en enlevant partiellement ou complètement le matériau contaminant réel, soit en le soumettant à certains types de traitement. Cependant, étant donné les grandes quantités de matières préoccupantes présentes sur les sites miniers abandonnés, il est souvent impossible de retirer ou traiter complètement la source. Par conséquent, les gestionnaires de sites doivent se concentrer stratégiquement sur la collecte, la déviation et le confinement

4.4. Gestion des voies d'exposition :

La gestion des sites miniers et des installations abandonnées comprend diverses activités telles que la collecte, la déviation et le confinement. Ces mesures techniques incluent des recouvrements pour empêcher les émissions d'air ou les contacts directs, des barrages pour stopper ou dévier les eaux de surface, et des murs de boue pour gérer les eaux souterraines. Un autre aspect crucial de la gestion des mines abandonnées est le contrôle des sites de gestion des déchets afin d'éviter le transport des déchets vers des zones non contrôlées et la contamination du sol, des sédiments, des zones humides, des eaux de surface et des eaux souterraines.

4.5. Gestion de l'exposition des récepteurs :

Le contrôle des dangers pour les récepteurs humains ou environnementaux peut impliquer diverses activités de réduction des risques ou d'assainissement. Les personnes peuvent être évacuées ou délocalisées si les sources d'exposition ne peuvent pas être traitées, bien que cela soit rare. En règle générale, cette mesure est prise uniquement en cas de risque extrêmement élevé, ce qui n'est pas courant dans les sites miniers abandonnés. En réalité, de nombreux résidents vivent sur les sites miniers Superfund de grande envergure et devraient y rester. Cependant, la présence de populations humaines suggère que des interventions et des programmes de sensibilisation à la santé devraient être envisagés pour gérer l'exposition jusqu'à ce que les sources et les voies d'exposition soient maîtrisées (Nick Ceto, Shahid Mahmud, et al, août 2000 chapitre 9, p 87, 88)

5. Valorisation des rejets miniers

5.1. Options de correction et de nettoyage

Lors de l'évaluation des technologies d'assainissement, le gestionnaire de site doit comprendre les différences entre ces technologies. Certaines technologies peuvent être efficaces à petite échelle mais manquent de tests à grande échelle pour évaluer leur efficacité. De plus, il est important de noter que les technologies innovantes testées sur un type spécifique de déchets ou de sites miniers peuvent ne pas être directement applicables à d'autres types de déchets ou de sites. Dans cette discussion, deux catégories principales de technologies d'assainissement sont utilisées pour décrire les solutions disponibles et applicables. Les contrôles institutionnels, qui sont des contrôles non techniques plus traditionnels, seront également mentionnés.

5.2. Technologies conventionnelles :

Il s'agit de technologies ayant fait leurs preuves en matière de nettoyage de sites miniers ou de technologies considérées comme des pratiques courantes pour la gestion de sites miniers. De telles approches ont été largement appliquées à l'assainissement des sites d'extraction et de traitement des minerais, ainsi qu'à d'autres unités de gestion des déchets. Le traitement à la chaux des déchets acides est un exemple de technologie conventionnelle.

5.2.1. Le dragage environnemental : c'est le processus par lequel les sédiments contaminés sous l'eau sont retirés, traités et/ou déplacés vers un nouvel emplacement. Le dragage environnemental est réalisé dans le but de réduire les risques que les sédiments contaminés et les eaux interstitielles associées (Federal Remediation Technologies Roundtable, www.frtr.gov/matrix/Environmental-Dredging).

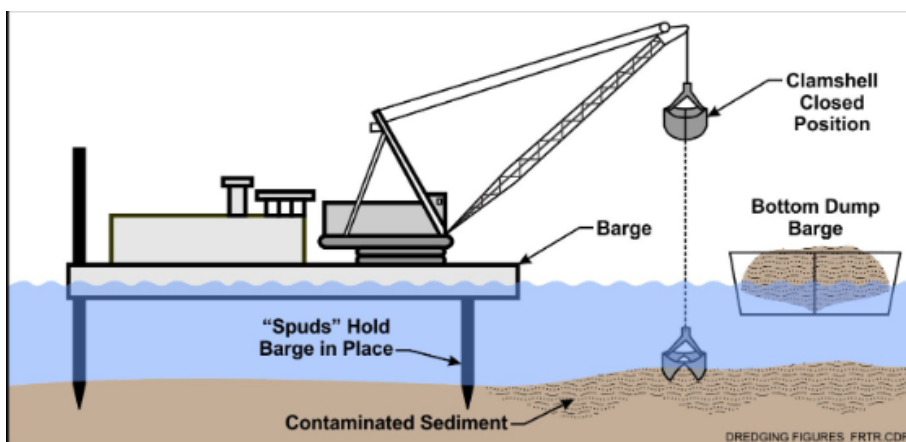


Figure 1.3 : Schéma illustratif d'une drague mécanique et d'une barge de transport.

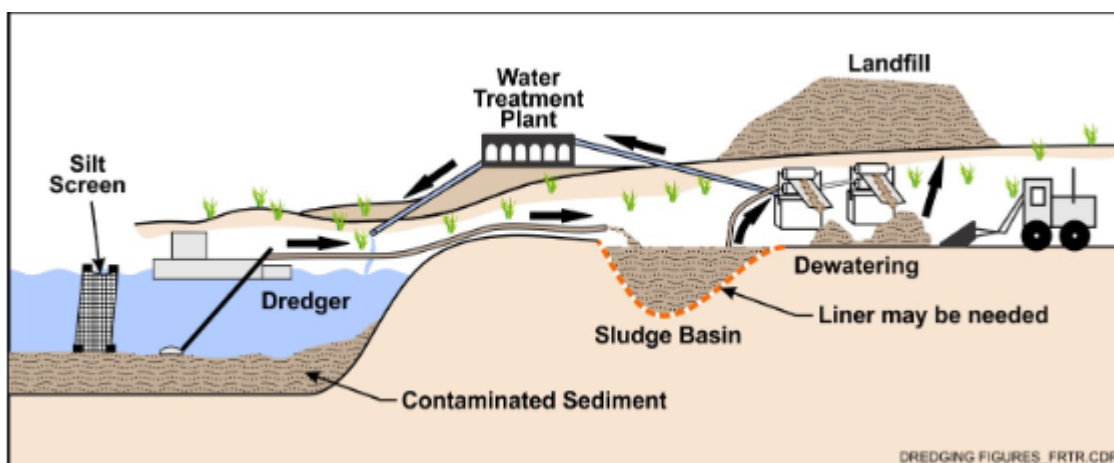


Figure 1.4 : Schéma illustratif d'une drague hydraulique et d'un pipeline.

5.2.2. remblayage des mines par feuille de débit conventionnelle

c'est un système de filtration à disque sous vide, précédé d'un épaisseur à débit élevé pour réduire la charge hydraulique, est généralement utilisé pour produire la partie "boue" du remblayage des mines. Le matériau filtré est ensuite déchargé dans une trémie de pesée, puis transféré dans une trémie de mélange en lot ou un mélangeur continu, où une quantité précise de liant et d'autres matériaux est ajoutée. La pâte cimentée est ensuite pompée sous terre à l'aide de pompes à piston haute pression ou distribuée par gravité, selon les besoins du site spécifique. La plupart des projets de remblayage dans le monde suivent cette méthode conventionnelle avec un filtre à disque sous vide, car le gâteau filtré contient moins d'eau, ce qui réduit la quantité de liant de ciment nécessaire. Cette réduction des coûts de

liant est un aspect majeur dans les opérations de remblayage. (Rick Szilagyi, 2016 et al).

5.2.3. remblayage des mines par feuille de débit de pâte: L'utilisation d'un épaisseur de pâte en lit profond, tel que le WestTech Deep Bed™ Paste Thickener, offre une alternative prometteuse à la méthode traditionnelle de l'épaisseur à débit élevé et du filtre sous vide pour le remblayage par pâte dans les mines souterraines. Cette technologie présente plusieurs avantages, notamment la réduction des coûts de pompage sur de longues distances et l'élimination des particules grossières avant l'épaississement. De plus, l'utilisation de l'épaisseur de pâte peut éliminer le besoin de filtres coûteux et réduire la nécessité d'une surveillance constante. En combinant la pâte épaisse avec le gâteau filtré, il est possible d'obtenir la teneur en humidité souhaitée pour le remblayage. (Rick Szilagyi, 2016 et al).

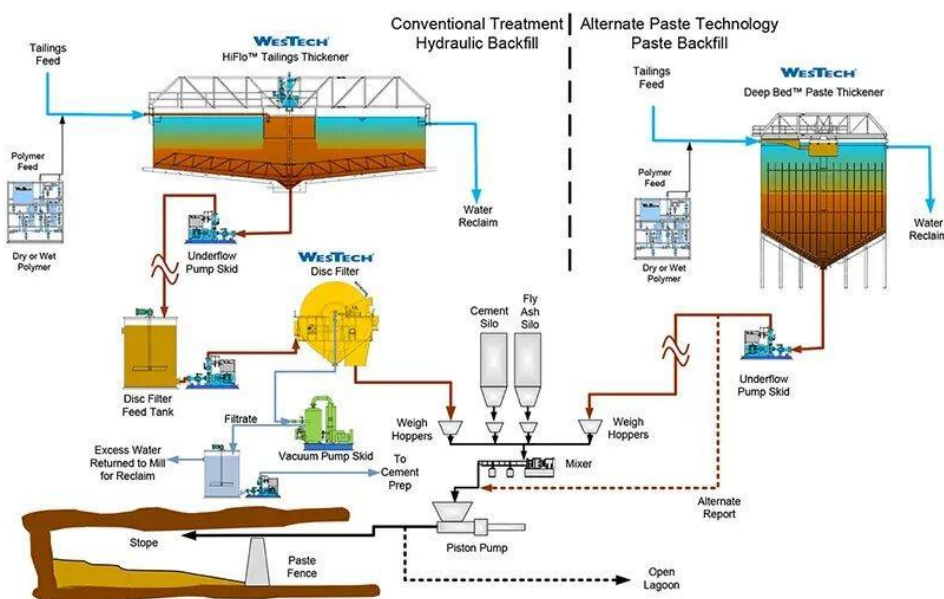


Figure 1.5 : Schéma illustratif du remblayage des mines par feuille de débit conventionnelle et par feuille de débit de pâte

5.3. Technologies innovantes/émergentes.

Les technologies incluses dans cette catégorie comprennent les technologies innovantes et émergentes. Les technologies innovantes sont des processus ou des techniques qui manquent de données complètes sur les coûts ou les performances et nécessitent des tests supplémentaires sur le terrain avant d'être largement utilisées sur les sites miniers. Les technologies émergentes sont encore plus préliminaires dans leur développement et nécessitent des tests supplémentaires en laboratoire ou à

petite échelle pour prouver leur efficacité. Les initiatives en cours encouragent l'adoption de ces technologies pour la remédiation des sites miniers.

5.3.1. Barrière réactive perméable

C'est une technologie souterraine qui intercepte les écoulements contaminés et les traite grâce à des substances spéciales. Elle vise à dégrader ou éliminer les contaminants présents. Cette technologie a évolué au fil du temps, passant de l'utilisation du fer à valence zéro à divers autres matériaux tels que la tourbe saturée et les polymères. Des études récentes ont également mis en évidence l'efficacité d'un matériau breveté appelé RematTM. De plus, l'installation de puits de grand diamètre a permis d'optimiser l'extraction et le réinjection de l'eau souterraine, grâce à un système de pompage solaire. (Naidu, R. 2013. Recent Advances in Contaminated Site Remediation. Water, Air, & Soil Pollution)

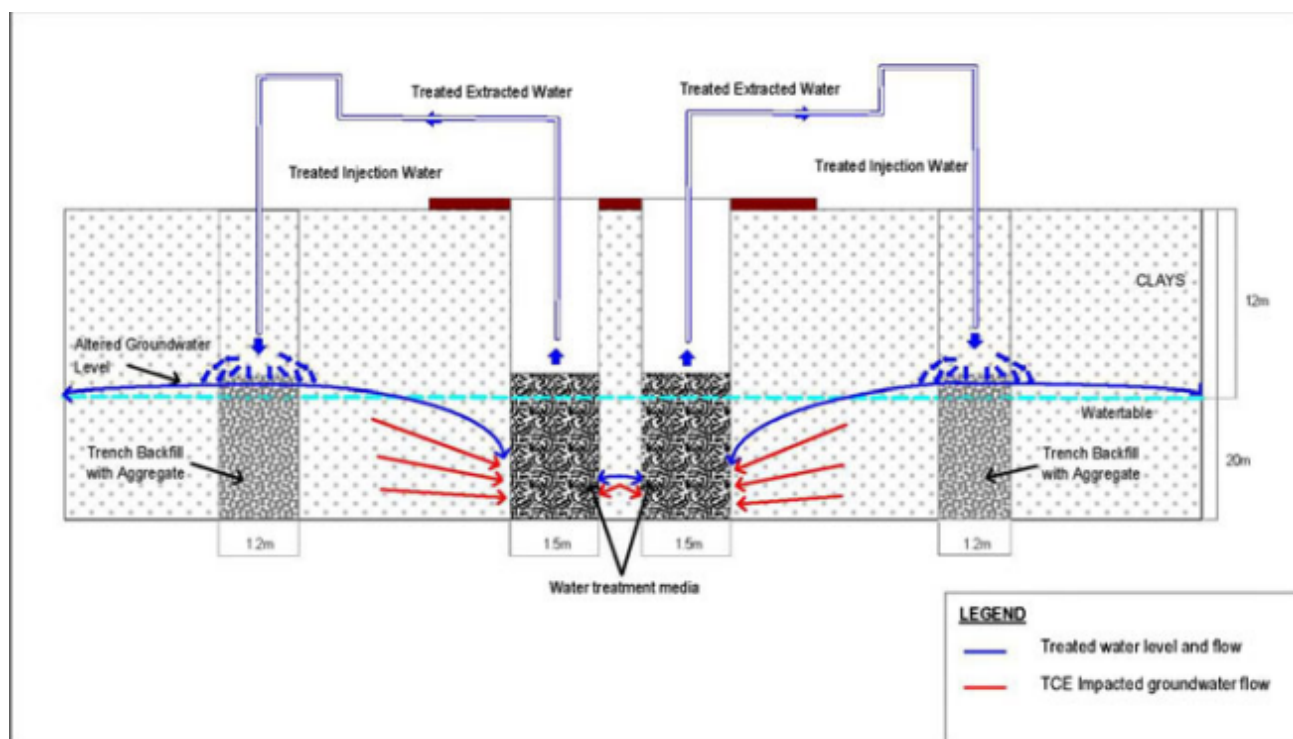


Figure 1.6: Grande barrière réactive perméable pour la dépollution des eaux souterraines contaminées par le trichloréthylène (TCE).

5.3.2. Technologies de collecte, de détournement et de confinement

Les technologies de collecte, de détournement et de confinement sont utilisées sur les sites où les technologies de traitement ne peuvent pas contrôler les contaminants à un niveau acceptable. Ces contrôles techniques comprennent des technologies qui contiennent ou capturent les contaminants pour réduire ou minimiser les rejets. Cette section traite de certaines des technologies de confinement disponibles pour les gestionnaires de sites

5.3.3. Élimination des décharges :

Il existe de nombreux sites miniers situés dans des zones naturelles non industrielles, tels que le site de Bunker Hill dans le nord de l'Idaho, qui ont subi une dégradation de leur végétation. Les autorités locales peuvent avoir différents objectifs, allant d'un nettoyage complet pour favoriser le tourisme à l'absence de nettoyage pour éviter la stigmatisation d'un site Superfund ou pour préserver l'histoire. Étant donné que ces sites peuvent être proches d'environnements naturels et que la population humaine environnante est souvent réduite voire inexistante, il est d'autant plus important d'évaluer les risques écologiques associés à ces sites.



Figure 1.8: : Vue de 2020 d'Osborn, Idaho, vers l'est, à travers la plaine inondable de la South Fork Coeur d'Alene River.

5.3.4. Murs de séparation :

Les murs de coupure sont des structures utilisées pour empêcher l'écoulement des eaux souterraines soit de quitter une zone, dans le cas d'eaux souterraines

contaminées, soit d'entrer dans une zone contaminée, dans le cas d'eaux souterraines propres. Les types de murs de coupure comprennent : les murs en lisier, les murs en ciment et les palplanches.

5.3.4.1. Les parois moulées : Les parois moulées empêchent le passage de l'eau souterraine et des contaminants en utilisant un matériau imperméable tel que la bentonite.

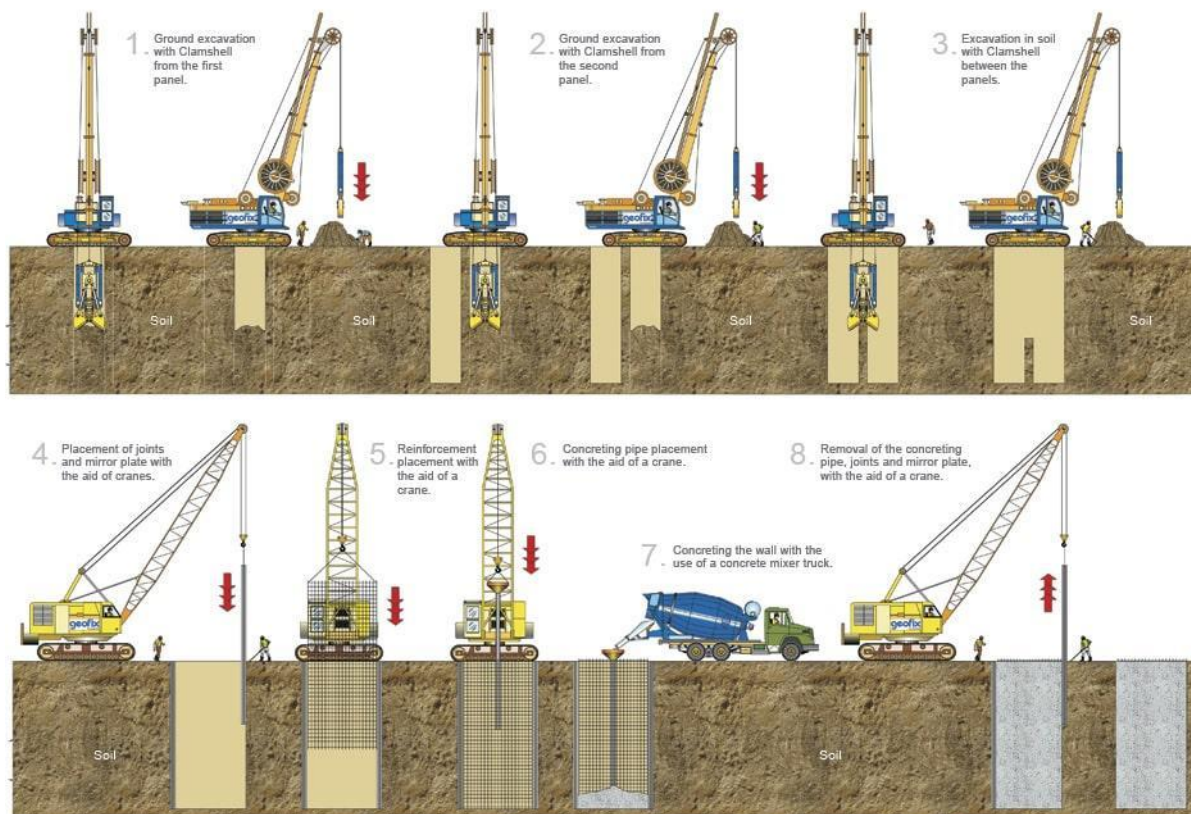


Figure 1.9: Schéma illustratif de la construction d'une Paroi de boue avec grappin et/ou hydromill (geofix.com)

5.3.4.2. Les palplanches :

Les palplanches sont couramment utilisées pour construire un mur parafouille. Elles servent à guider l'eau souterraine vers une cellule de traitement et sont également employées comme mur de séparation temporaire pendant le processus de dépollution.

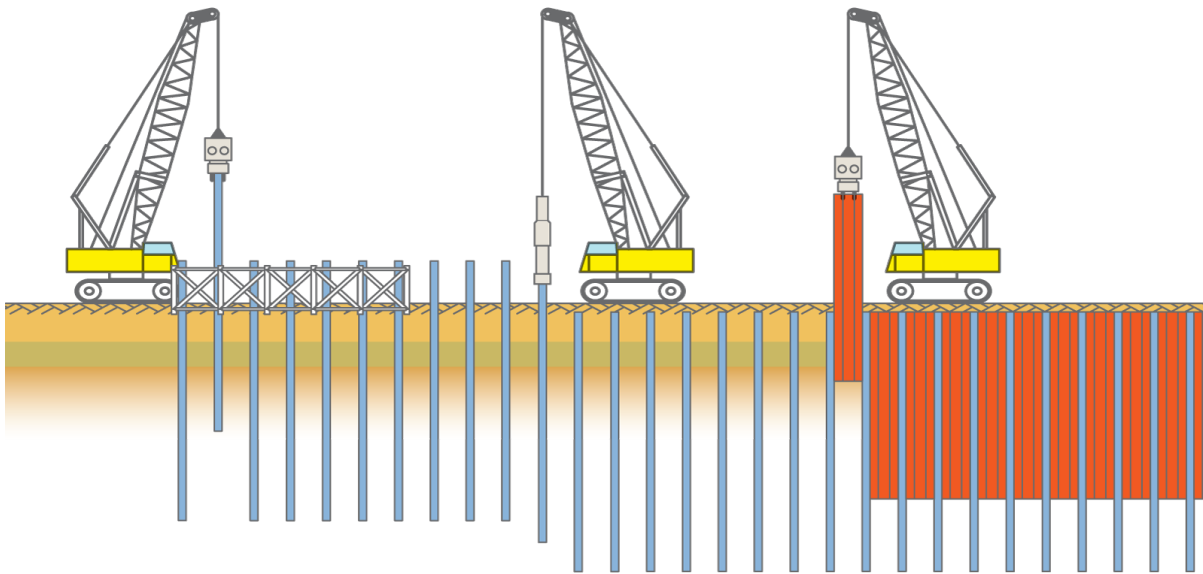


Figure 1.10: Schéma illustratif de la mise en place des paraplances

(sheetpiling.arcelormittal.com)

Pompage des eaux souterraines :

Le pompage et le traitement des eaux souterraines contaminées sont des techniques utilisées pour remédier à la contamination. Le traitement dépend du type de contaminant et peut impliquer différentes technologies. Bien que le pompage et le traitement soient largement utilisés, ils peuvent être coûteux. Cependant, cette méthode présente des limites pour certains contaminants, tels que les métaux dans certains sols, en raison des taux de désorption et des propriétés chimiques des contaminants.

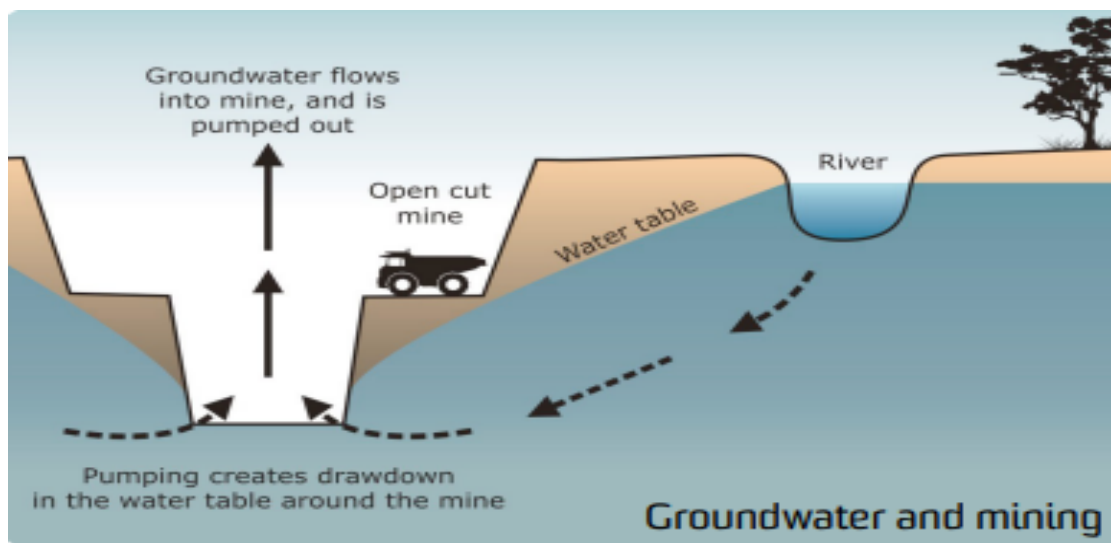


Figure 1.11 : schéma illustratif du pompage des eaux souterraines (Groundwater facts, 2017)

Plafonnement :

Le recouvrement protège les zones contaminées et les déchets en empêchant les précipitations, la dispersion des matériaux contaminés et le contact humain ou animal. Par exemple, la végétation peut être cultivée pour éviter la dispersion de la poussière. Dans les zones résidentielles, une méthode consiste à remplacer une couche spécifique de sol pour protéger les habitants des sols contaminés

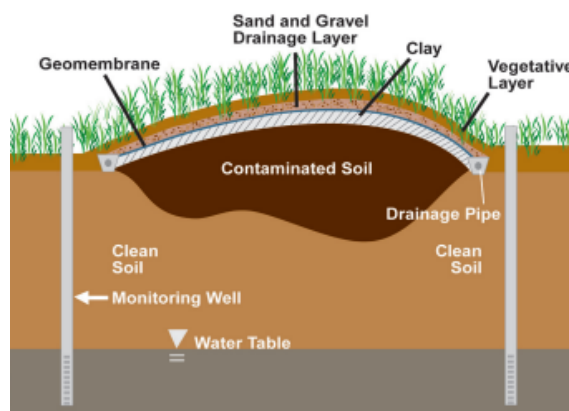


Figure 1.12 : Schéma illustratif du processus de Plafonnement

(Office of Solid Waste and Emergency Response, 2012)

Détention/sédimentation :

Les contrôles de rétention/sédimentation régulent l'érosion et le ruissellement de sédiments. Le traitement vise à ralentir le flux d'eau pour favoriser la décantation des particules solides, éventuellement en utilisant des flocculants pour accélérer le processus. Les sédiments peuvent être éliminés ou traités s'ils sont contaminés. Les coûts sont généralement modérés en fonction de l'élimination des solides décantés. Les bassins de rétention/sédimentation peuvent être efficaces, bien que les solides puissent parfois s'écouler du bassin à un rythme lent.

Tranchées Intercepteurs.

Les tranchées intercepteurs collectent et redirigent l'écoulement des eaux souterraines pour un traitement in situ ou ex situ. Elles sont utilisées pour confiner les eaux dans une zone spécifique et empêcher leur fuite. Le coût initial est modéré, mais l'entretien peut être coûteux si la perméabilité est altérée. Les tranchées sont efficaces si la perméabilité du milieu est supérieure à celle du matériau natif. Nick Ceto, Shahid Mahmud, et al, 2000)

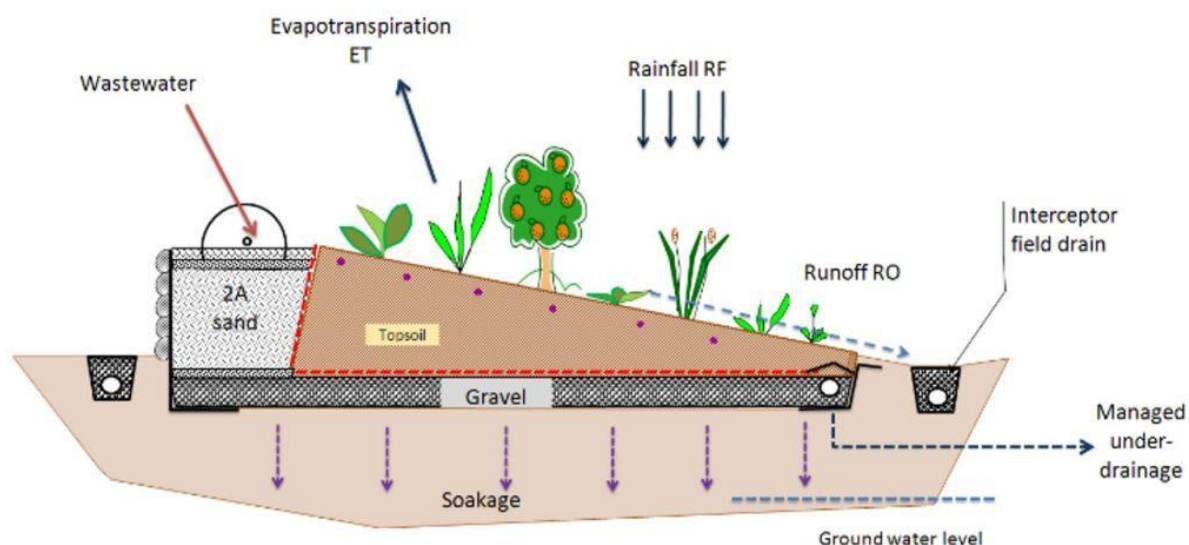


Figure 1.13: Illustration schématique de la configuration d'un système de traitement des eaux usées à travers des tranchées intercepteurs (braybrothersdrainage.co.nz)

6. Réutilisation, Recyclage et Récupération des rejets miniers

6.1. Vente de matériaux utilisables

La vente de matériaux utilisables est une approche de gestion pour les gestionnaires de site. Les matériaux peuvent inclure des produits finis, des matières premières, des débris de démolition et des déchets à retraiter. Cette approche peut avoir un coût faible ou positif, mais doit être évaluée en comparant le coût de vente au coût d'élimination. Le recyclage ou la réutilisation de ces matériaux peut éliminer les contaminants, mais il y a souvent peu de matériaux à vendre.

6.2. Le Reminage

Le reminage récupère les constituants précieux des « déchets » miniers. Les mêmes processus d'extraction et d'enrichissement, comme la séparation par gravité, la flottation ou la lixiviation. Le coût peut varier de rentable à élevé selon la valeur des métaux récupérés. Les nouveaux résidus peuvent être confinés pour minimiser les rejets dans l'environnement. Les résidus propres peuvent avoir d'autres utilisations bénéfiques. L'efficacité varie selon le site, mais en général, le processus est très efficace pour la partie des déchets qui est retraitée. (Nick Ceto, Shahid Mahmud, et al, 2000)

6.3. Technologies innovantes/émergentes dans la valorisation des rejets miniers

Les technologies de traitement suivantes sont considérées comme des technologies innovantes/émergentes.

6.3.1. La bioremédiation

Elle utilise le microbiote pour dégrader les matières organiques et inorganiques dangereuses en matières inoffensives. Certaines bactéries et champignons peuvent utiliser des sources de carbone et d'énergie moins complexes pour décomposer ces composés. L'ajout de nutriments biologiques peut stimuler les micro-organismes naturels pour atténuer et stabiliser les métaux lourds sur les sites miniers contaminés. Le coût de cette technologie est moyen à élevé mais peut diminuer avec l'évolution de la technologie.

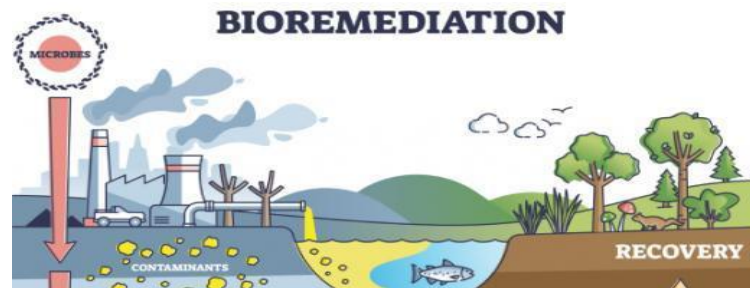


Figure 1.14 : Illustration schématisique de la décomposition des matières dangereuse par microbiotes (proprofs.com)

6.3.2. La phytoremédiation

La phytoremédiation est une approche qui utilise des plantes et des arbres pour extraire, stabiliser ou détoxifier les contaminants présents dans le sol et l'eau. Ce processus illustré en [Figure 1.5](#) implique l'utilisation de différentes méthodes qui exploitent les capacités des plantes à assainir ou à stabiliser les contaminants sur place. Les plantes peuvent décomposer les polluants organiques ou stabiliser les contaminants métalliques en agissant comme des filtres ou des pièges.

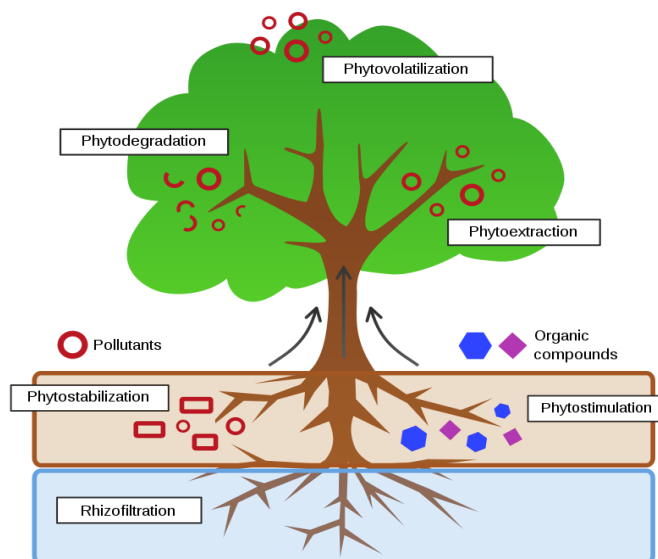


Figure 1.15 : Schéma illustratif du processus de la phytoremédiation (Ecological Driver of Hydrocarbon Rhizoremediation, 2016)

7. Défis de réhabilitation des sites minier

Après la cessation d'une exploitation minière, le site est réhabilité et fermé afin de le ramener à son état initial. Cependant, les mines ayant engendré des impacts environnementaux importants sont souvent responsables de conséquences durables lors de la phase de fermeture. Ces effets néfastes peuvent perdurer pendant des siècles. Ainsi, les plans de réhabilitation et de fermeture des mines doivent décrire en détail les mesures prises par la compagnie minière pour restaurer le site et prévenir la libération de contaminants toxiques provenant des installations.(EIE,2010).

Malheureusement, il y a plusieurs obstacles à la réhabilitation, qui sont énumérés ci-dessous :

01. La réhabilitation est un processus coûteux.
02. Les risques pour la santé et la sécurité des travailleurs impliqués dans la réhabilitation. Selon une étude menée en Tunisie sur un site minier abandonné, l'exposition régulière des habitants locaux à des matériaux contaminés pourrait entraîner des conséquences sur leur santé, à la fois cancérigènes et non cancérigènes (Khelifi et al., 2021).
03. La nécessité de traiter les eaux et de récupérer les sols contaminés afin de minimiser l'impact environnemental à long terme. Il est également essentiel de faire un choix judicieux en ce qui concerne la végétation. Les espèces

sélectionnées doivent être adaptées aux conditions naturelles de leur habitat et à leur position dans la succession écologique, allant d'un milieu ouvert à un milieu plus fermé, tel que le maquis haut ou forestier (Jaffre & Pelletier 1992 ; L'Huillier et al. 2010 ; Ititiaty et al. 2020) (Bailly et al., 2021).

04. Le temps nécessaire pour mener à bien la réhabilitation, qui peut s'étendre sur plusieurs décennies et nécessite une surveillance constante (Réhabilitation des sites miniers, 2016).
05. Les défis réglementaires liés à la conformité aux normes environnementales et aux exigences de réhabilitation fixées par les autorités compétentes. Ces réglementations peuvent inclure des exigences en matière de gestion des déchets, d'émissions de gaz à effet de serre, de qualité de l'air et de l'eau, ainsi que d'autres critères environnementaux.

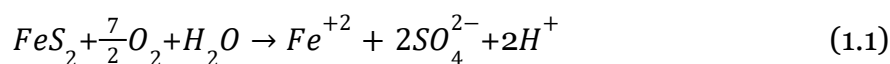
8. Le drainage minier acide DMA

Considéré comme l'un des problèmes environnementaux les plus graves associés à l'industrie minière résultant de l'oxydation de minéraux sulfurés. Les sulfures de fer (FeS) peuvent réagir avec l'oxygène pour former de l'acide sulfurique (H₂SO₄). Ce processus génère des eaux extrêmement acides qui peuvent s'infiltrer dans les sols et les eaux de surface, entraînant une contamination chimique.

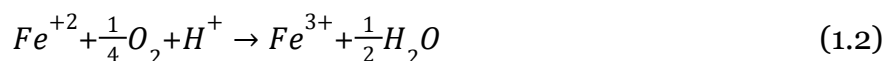
8.1. La formation du DMA

La pyrite et la pyrrhotite sont les deux minéraux sulfurés les plus couramment présents dans les déchets miniers. Leur oxydation se déroule en trois étapes selon diverses études (Lawson 1982 ; Evangelou 1995 ; Gray 1996 ; Blowes et al. 1998 ; Nicholson et al. 1998 ; Mylona et al. 2000 ; Rimstidt et Vaughan 2003) :

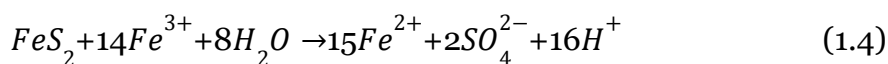
A- Oxydation directe de la pyrite par l'oxygène et l'eau libre du fer ferreux (Fe^{+2}) en solution :



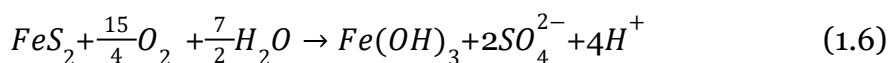
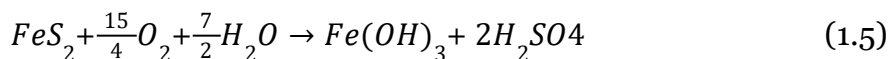
B- Oxydation du fer ferreux (Fe^{2+}): Cette réaction peut être favorisée par l'activité bactérienne, notamment par l'action de la bactérie *Thiobacillus ferrooxidans* :



C- Oxydation indirecte de la pyrite par le Fe₃ + (pH < 3 où le fer est soluble) :



La réaction globale de l'oxydation de la pyrite est parfois présentée par l'équation 1.5 (Aubertin M. et al. 2002) ou l'équation 1.6 (Morin et al. 1995) :



La production de DMA est un processus qui démarre lentement mais qui s'intensifie progressivement à mesure que les conditions se rapprochent de la phase C comme la Figure 1.16 l'illustre. À ce stade, la production d'acide augmente de manière exponentielle, ce qui accentue le phénomène (Bussièrre et al.,2005).

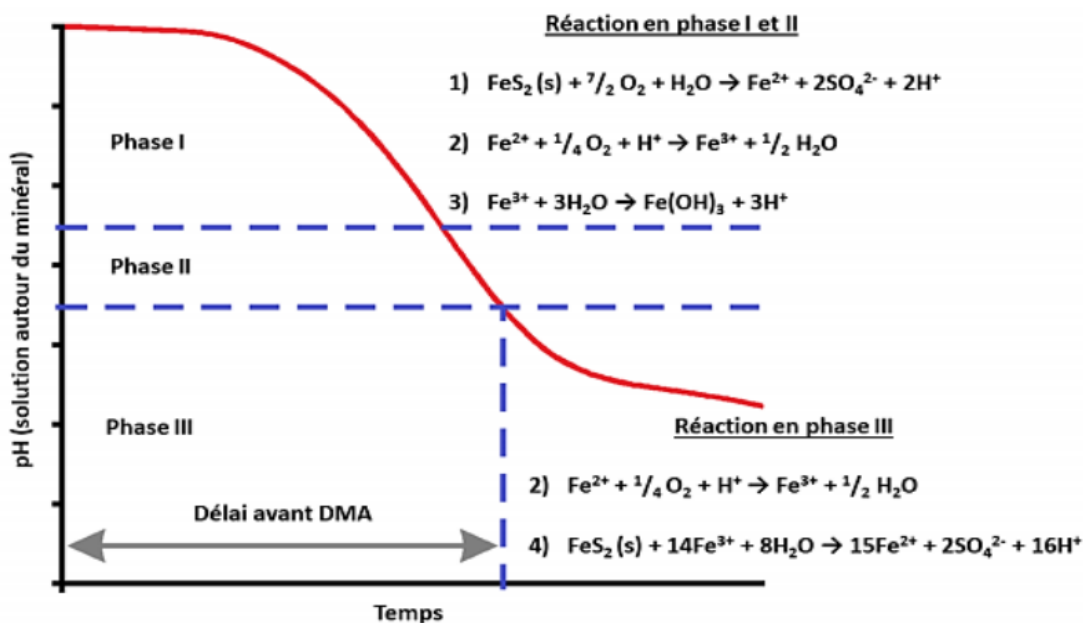


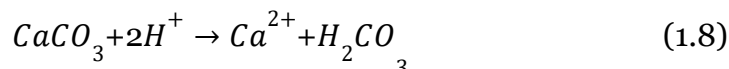
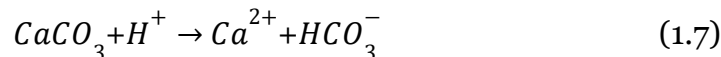
Figure 1.16 : Étapes de formations du DMA (Aubertin et al ,2002)

8.2. Neutralisation du DMA

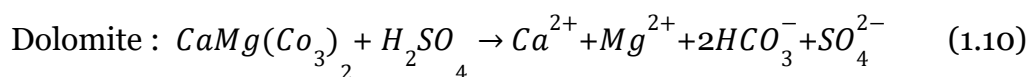
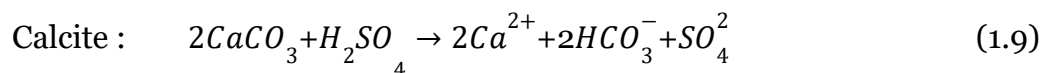
Lorsque les résidus miniers contiennent une grande quantité de minéraux sulfurés, cela peut entraîner la formation de DMA . Cependant, si ces résidus renferment des minéraux capables de neutraliser l'acidité résultant de l'oxydation des sulfures, ils ne provoquent pas de DMA. Dans de tels cas, la présence de carbonates dissoudra complètement l'acidité, maintenant ainsi un pH neutre dans le

milieu. Cela est connu sous le nom de "drainage minier neutre" (Holmström et al., 1999 ; Pépin, 2009 ; Plante, 2010 ; Bouzahzah, 2013).

Les équations de neutralisation du DMA par la calcite à pH neutre sont les suivantes :



Les équations suivantes illustrent les réactions de neutralisation de l'acide sulfurique produit par l'oxydation de la pyrite avec la calcite et la dolomite :



Cependant, il convient de noter que tous les carbonates n'ont pas la même cinétique de réactivité ni la même capacité à neutraliser l'acide résultant de l'oxydation des sulfures (Bouzahzah, 2013). Selon Blowes et Ptacek (1994), les carbonates sont classés par ordre décroissant de réactivité comme suit : calcite > dolomite > Mg-ankérite > ankérite > sidérite (Bouzahzah et al., 2021).

La deuxième catégorie de minéraux ayant un potentiel de neutralisation est celle des silicates, mais leur contribution reste assez modeste par rapport aux carbonates en raison de leur faible vitesse de dissolution (Frostad et al., 2003 ; Bouzahzah et al., 2021).

8.3. Prédiction du DMA

Différents outils de prédiction sont disponibles, mais les tests statiques et les essais cinétiques sont les plus couramment utilisés (Plante, 2004 ; Benzaazoua et al., 2001, 2004 ; Villeneuve, 2004 ; Villeneuve et al., 2009 ; MEND, 1991, 2009 ; Plante et al., 2012).

Les tests statiques permettent de déterminer le potentiel d'un rejet à générer de l'acidité (PA) et son potentiel de neutralisation (PN), permettant ainsi d'établir un bilan entre ces deux aspects (Sobek et al., 1978 ; Lawrence et Wang, 1997 ; MEND, 2009). Ils ont l'avantage d'être rapides à exécuter, fournissant généralement des résultats en l'espace d'une journée. Cependant, ils ne permettent pas de comprendre le comportement environnemental des rejets dans des conditions in situ. Ainsi, pour évaluer ce comportement, des essais cinétiques sont réalisés. Ces essais simulent une altération naturelle plus ou moins accélérée des rejets miniers dans des conditions contrôlées en laboratoire ou sur le terrain (Bouzahzah et al., 2021).

9. Le drainage neutre contaminé :

Le DNC peut être décrit comme un type de drainage minier qui subit une altération de sa qualité chimique lorsqu'il traverse les déchets miniers, avec un potentiel d'hydrogène proche de la neutralité (Nicholson, 2004).

9.1. Formation du DNC

Il existe trois sources principales pour le Drainage Minier Neutre (DNC), parmi lesquelles trois sont les plus courantes (Pépin, 2009) :

La première source se produit lors de l'oxydation des minéraux sulfureux, ce qui entraîne la production d'acide et la libération de certains métaux qui deviennent solubles. Une fois que l'acide est généré, le drainage à faible pH contenant les métaux en solution entre en contact avec des matériaux ayant un fort potentiel de neutralisation, ce qui permet de neutraliser l'acidité du drainage et de ramener le pH à proximité de la neutralité.

Le DNC peut également être généré sans la production d'acide. Dans ce cas, il y a une lixiviation des métaux contenus dans les résidus miniers sans la génération d'acide.

Le troisième mécanisme de génération du DNC est associé aux résidus miniers où une méthode de contrôle du drainage minier acide (DMA) a été appliquée. Ainsi, le drainage de ces résidus est maintenu neutre.

Bien que le problème du DNC puisse sembler moins grave que celui du DMA, le drainage neutre contaminé peut néanmoins contenir des concentrations de 20 éléments supérieures aux limites réglementaires. Certains DNC peuvent également avoir un impact significatif sur l'environnement (Pépin, 2009).

9.2. Principaux défis associés à la prédiction du DNC

Lorsqu'il s'agit de prédire le potentiel de génération de Drainage Minier Neutre (DNC) dans les résidus miniers, il y a deux obstacles majeurs à surmonter.

Tout d'abord, les phénomènes liés à la production de DNC sont souvent moins significatifs que ceux du Drainage Minier Acide (DMA), ce qui rend nécessaire l'utilisation d'outils de prédiction extrêmement sensibles pour une simulation précise des processus. Étant donné que le DNC peut contenir des concentrations élevées d'éléments contaminants, il est crucial de disposer d'outils de prédiction capables de détecter même de faibles niveaux de contamination afin d'évaluer correctement le potentiel de génération de DNC.

Deuxièmement, la prédiction du comportement géochimique des résidus miniers en laboratoire est techniquement complexe. La composition chimique complexe des résidus, ainsi que les interactions entre les minéraux et les éléments dissous, rendent la prédiction du comportement géochimique des stériles miniers difficile. Des études en laboratoire sont nécessaires pour évaluer la solubilité des minéraux, les cinétiques de réaction, la capacité de neutralisation, et d'autres paramètres qui peuvent influencer la génération de DNC.

En somme, la prédiction précise du potentiel de génération de DNC dans les résidus miniers requiert des outils de prédiction sensibles et une compréhension approfondie du comportement géochimique des stériles miniers, ce qui représente un défi technique à relever (Pépin, 2009).

10. Les tests statiques

L'industrie minière utilise généralement trois types de tests statiques, à savoir les essais NAG, les tests statiques chimiques et les tests minéralogiques. Les essais NAG (Net-acid generation tests) sont réalisés en une seule étape, tandis que les tests statiques chimiques et minéralogiques se déroulent en deux étapes distinctes. La première étape consiste à déterminer le PA, qui est lié à la présence de minéraux générateurs d'acidité, tandis que la deuxième étape consiste à déterminer le PN, qui est associé aux minéraux neutralisants. (Plante, 2004)

10.1. Les essais NAG

Les tests NAG fournissent des informations simultanées sur le potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (PN) en une seule étape. L'introduction de peroxyde d'hydrogène permet l'oxydation des sulfures présents dans l'échantillon, tandis que les minéraux neutralisants présents dans l'échantillon neutralisent l'acide produit le cas échéant. Le pH final de l'échantillon est utilisé pour évaluer son potentiel de génération d'acide : si le pH est inférieur à 4,5, l'échantillon est considéré comme potentiellement générateur d'acide. (Bouzahzah et al., 2021)

10.2. Tests statiques chimiques

Le test de Sobek est le premier test chimique statique développé pour l'industrie minière dans le but de prédire le DMA (Sobek et al., 1978; Miller et al., 1991; Lawrence et Wang, 1997; Skousen et al., 1997; Jambor et al., 2003). La méthode développée par Sobek et ses collègues en 1978 pour déterminer le potentiel de neutralisation (PN) commence par un test préliminaire appelé "test de fizz". Cette étape consiste à ajouter quelques gouttes d'acide chlorhydrique à environ 1 à 2 grammes d'échantillon, puis à évaluer visuellement l'effervescence qui en résulte. L'opérateur évalue visuellement l'intensité de cette dernière, classant ainsi l'effervescence en quatre niveaux d'intensité : nulle (N), faible (F), modérée (M) ou

forte (F). En fonction de cette intensité, on peut déterminer la concentration et le volume d'acide chlorhydrique à ajouter à l'échantillon pour sa digestion et la détermination de son potentiel de neutralisation (PN).

La méthode proposée par Lawrence et Wang (1997) implique l'ajout d'une quantité nettement moindre d'acide à l'échantillon, et cela en plusieurs étapes (à 0h, 2h) pour maintenir le pH de la pulpe entre 2,0 et 2,5. La titration de l'acide restant se fait avec du NaOH, en utilisant un pH final de titration de 8,3. Dans cette méthode, le potentiel d'acidité (PA) est calculé de la même manière que dans la méthode de Sobek originale, sauf que seuls les sulfures liés au soufre sont pris en compte dans le calcul, ce qui donne une estimation plus réaliste du PA, surtout si l'échantillon contient des sulfates (comme c'est le cas pour un échantillon déjà oxydé). (Bouzahzah, 2013)

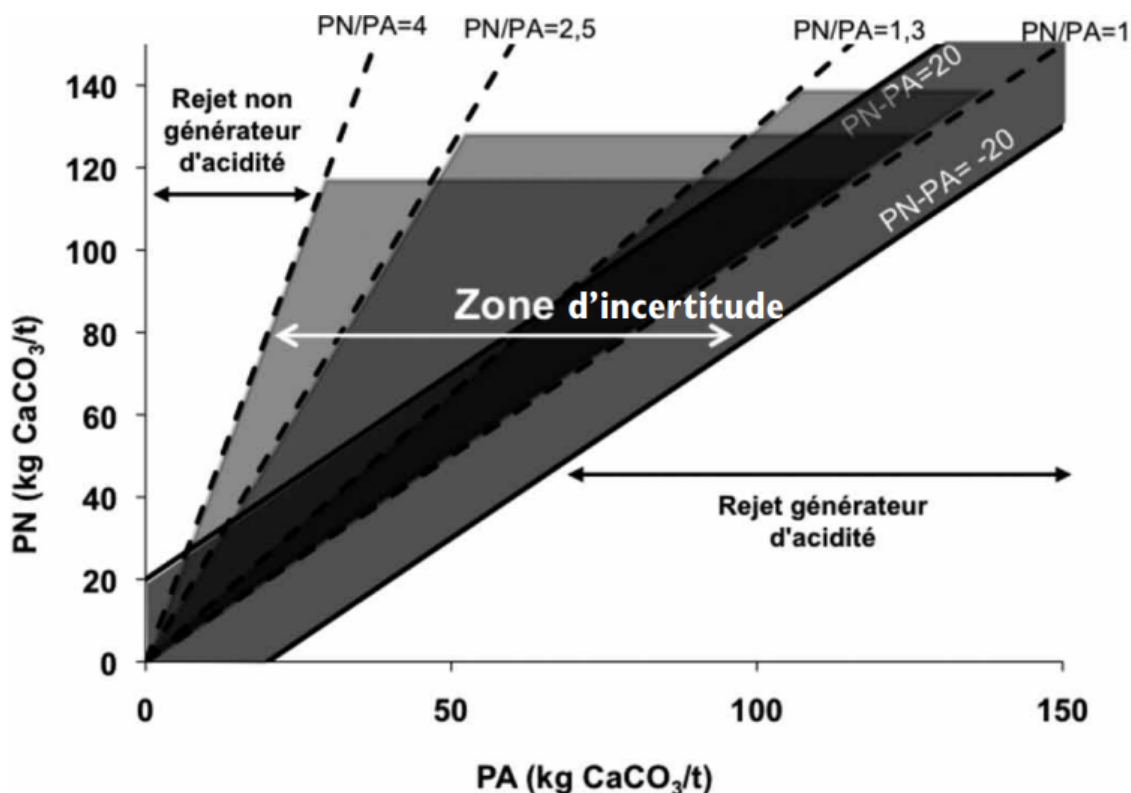


Figure 1.17 : Représentation graphique de l'interprétation des tests statiques en fonction du PNN et du NPR | définition des zones de génération et de consommation d'acide, ainsi que d'incertitude (Bouzahzah et al., 2021).

10.3. Tests statique minéralogique

Kwong (1993), Lapakko (1994), Li (1997), Lawrence et Scheske (1997), Paktunc (1999a,b) et Bouzahzah (2013a) ont suggéré une méthode de calcul basée sur la contribution individuelle de chaque minéral dans la production d'acidité et sa neutralisation, ce qui permettrait d'obtenir une estimation plus précise des niveaux de PA et PN.

Lapakko (1994) a proposé une méthode de calcul simplifiée pour estimer le niveau de neutralité (PN) en se basant uniquement sur la calcite et la magnésite en tant qu'agents responsables de la neutralisation. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les autres minéraux carbonatés (comme l'ankérite et la dolomite) ainsi que les silicates ayant une capacité de neutralisation. En revanche, Kwong (1993) a utilisé la réactivité des minéraux proposée par Sverdrup (1990) pour déterminer le taux de réaction des minéraux à un pH de 5. Il a ensuite utilisé ces valeurs pour calculer le niveau d'acidité (PA) et de neutralité (PN) dans une seule formule.

Li (1997) ainsi que Lawrence & Scheske (1997) se basent sur les réactivités relatives des minéraux proposées par Kwong (1993) pour calculer les niveaux de neutralité (PN). Cependant, leurs méthodes ne prennent pas en compte la présence d'éléments chimiques oxydables et hydrolysables dans les minéraux ayant une capacité de neutralisation.

Paktunc (1999a,b) a proposé une autre méthode de calcul pour estimer le niveau de neutralité (PN) qui pallie cette limite en prenant en compte la somme des coefficients stœchiométriques des cations oxydables présents dans les carbonates (coefficient C_i). Plante et al. (2012) ont utilisé ce même coefficient (C_i) pour modifier la méthode de calcul du PN de Lawrence et Scheske (1997). En prenant en compte le coefficient C_i , cela implique que si une sidérite, par exemple, contient du Ca et du Mg en substitution du Fe, le PN de la sidérite ne sera pas nul, mais sera proportionnel à la quantité de substitution du Fe par le Ca et le Mg. (Plante, 2004)

10.4. Essais cinétique

Les tests cinétiques permettent de déterminer avec plus de certitude la nature génératrice d'acidité (ou non) d'un rejet, en prenant en compte la participation des silicates et autres minéraux neutralisants, ainsi que l'évolution de la qualité des eaux de drainage dans le temps. Cette approche est soutenue par plusieurs études telles

que Villeneuve (2004), Benzaazoua et al. (2001, 2004), MEND (2009) et Villeneuve et al. (2009) (Bouzahzah, 2013).

Tableau 1.1 : Essais cinétique

Essais	Principe	Méthodologie
Essai cinétique en cellule humide	Fournir des conditions de réaction bien contrôlées et des résultats reproductibles.	Utilisation de la norme ASTM (American Society for Testing and Materials, ASTM D 5744-96, 1998 ; 2007). Cette norme décrit en détail toutes les étapes de l'essai pour simuler l'altération naturelle et accélérée des rejets miniers dans des conditions contrôlées en laboratoire (Bouzahzah, 2013).
Essai cinétique en mini-cellule d'altération	Version réduite de l'essai cinétique en cellule humide, Test agressif, peu coûteux en équipement et en suivi, permettant d'obtenir des résultats rapidement.	L'échantillon (67 g) est rincé deux fois par semaine. Le premier rinçage est suivi de deux jours où l'échantillon est laissé à l'air libre, puis rincé le quatrième jour et laissé à l'air libre pendant trois jours, avant que le cycle ne recommence (Bouzahzah, 2013).
Essai cinétique en colonne	Permet de simuler des scénarios de restauration et d'évaluer l'impact des conditions environnementales.	Les essais en colonne exposent les matériaux à des cycles successifs de lixiviation avec de l'eau déionisée, utilisant des volumes variables selon les objectifs de l'étude. Différents degrés de complexité technique peuvent être appliqués, adaptés aux objectifs spécifiques (Bouzahzah, 2013).

10.5. Essais d'extraction

Les essais d'extraction sont des tests permettant d'extraire les constituants lixiviables dans les conditions auxquelles on soumet les échantillons.

10.5.1. TCLP et SPLP

La prédiction géochimique TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) est une méthode utilisée pour évaluer le risque que les contaminants présents dans les effluents miniers soient libérés et leur impact potentiel sur l'environnement. La procédure consiste à extraire un échantillon de sol avec des acides dilués et à mesurer le taux de lixiviation des contaminants. Les résultats sont ensuite comparés à des seuils d'effluents afin de déterminer le niveau de risque. La prédiction

géochimique TCLP est un outil précieux pour évaluer le risque environnemental des rejets miniers et assurer la protection de l'environnement. (Edabhi, 2018).

La prédiction géochimique SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) est une technique d'extraction couramment utilisée pour évaluer le risque environnemental associé à un site minier. Elle permet de prédire comment les éléments chimiques se déplacent dans le sol et comment ils sont libérés dans l'environnement. Le SPLP est une méthode de lixiviation artificielle qui utilise des solutions à concentration élevée d'un acide minéral (acide sulfurique) pour simuler l'environnement naturel. Les résultats des tests peuvent être utilisés pour prédire le comportement des éléments chimiques dans le sol et leur libération dans l'environnement. (Edabhi, 2018).

Les tests d'extraction TCLP et SPLP impliquent l'utilisation d'un liquide d'extraction spécifique. Le TCLP utilise un tampon d'acide acétique, tandis que le SPLP utilise une solution diluée d'acides nitrique et sulfurique qui imite les pluies acides. L'échantillon, d'une quantité de 20 à 40 g, est agité pendant 18 heures avec un rapport liquide/solide de 20:1. Bien que ces méthodes n'aient pas été spécifiquement développées pour l'industrie minière, elles sont largement utilisées. (Plante et al., 2015).

10.5.2. CTEU-9

Le test CTEU-9 est couramment utilisé pour mesurer la concentration des espèces inorganiques susceptibles d'être lixiviées par un échantillon d'au moins 40 g en contact avec de l'eau à pH 7 pendant 7 jours par agitation. Ces tests sont utilisés pour évaluer la possibilité de valoriser des résidus industriels non dangereux et pour gérer les matières résiduelles traitées par stabilisation/solidification. Dans le domaine minier, les tests CTEU-9 sont souvent utilisés pour comparer la mobilité de certaines espèces chimiques dans l'eau par rapport aux tests TCLP et SPLP. (Plante et al., 2015).

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence l'impact environnemental significatif de l'industrie minière en Algérie, exacerbé par l'absence de mesures de gestion environnementale efficaces et par des défis persistants dans le respect des normes environnementales. Nous avons souligné la complexité des problèmes posés par les rejets miniers et l'importance de développer et d'implémenter des méthodes de gestion adaptées.

Nous avons également discuté de diverses approches pour la valorisation des rejets miniers, allant des technologies conventionnelles aux solutions innovantes. La réutilisation, le recyclage et la récupération des rejets miniers peuvent offrir des opportunités significatives pour atténuer l'impact environnemental de l'industrie minière.

Toutefois, le chapitre a aussi souligné les défis importants associés à la réhabilitation des sites miniers, en particulier en ce qui concerne les problèmes de drainage minier acide et neutre contaminés.

En somme, ce chapitre a souligné l'urgence d'une approche intégrée et durable pour adresser les problèmes environnementaux de l'industrie minière en Algérie. Ces perspectives nous guideront alors que nous poursuivons notre exploration des sites spécifiques d'étude dans le chapitre suivant.

Chapitre 02

Présentation des sites d'étude

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude approfondie de nos deux sites d'intérêt: Kef Oum Teboul et Boucaïd, tous deux situés en Algérie. Nous commencerons par une présentation de la localisation géographique de chaque site, ce qui nous permettra de comprendre l'importance de leur position respective dans la région et leurs relations environnementales à l'échelle régionale.

Nous explorerons ensuite leur contexte géologique, en mettant l'accent sur les caractéristiques lithostratigraphiques et tectoniques de chaque site. En explorant les types de roches présents, leur disposition et leur interrelation, nous pourrions comprendre la nature des ressources minérales disponibles et comment elles ont été formées.

De plus, l'hydrogéologie de ces zones sera examinée. La manière dont l'eau se déplace à travers et autour de ces sites a des implications importantes pour les risques potentiels de contamination des eaux souterraines, ainsi que pour la dégradation de la qualité de l'eau dans et autour des zones d'exploitation.

Nous aborderons également la composition minéralogique des gisements sur les deux sites, en nous concentrant sur les éléments clés et leur concentration. Cela nous donnera une idée des substances qui sont extraites, ainsi que de celles qui pourraient potentiellement contaminer l'environnement local.

L'état actuel de ces sites sera également examiné, en prenant en compte l'impact historique des activités minières sur ces zones. Cette évaluation nous aidera à comprendre comment l'exploitation minière a affecté la qualité du sol, de l'eau, de l'air, ainsi que la biodiversité, et à quel point les communautés locales sont affectées par ces activités.

En somme, cette présentation approfondie de nos sites d'étude est un élément essentiel pour comprendre l'ampleur des problématiques environnementales auxquelles nous sommes confrontés, et pour établir une base solide à partir de laquelle nous pourrions développer des solutions durables et respectueuses de l'environnement dans les chapitres suivants de notre projet de fin d'études.

1. Le District de KEF OUM TBOUL

Le district de Kef Oum Teboul se situe dans le nord de l'Algérie Figure 2.1, à seulement 4 km à l'ouest de la frontière tunisienne. Il se trouve dans la wilaya d'El Tarf, à environ 15 km à l'est d'El Kala et à 70 km à l'est d'Annaba - voir coordonnées Tableau 2.1-. La région est proche de la mer au nord, à environ 4 km en ligne droite. Le district est facilement accessible par la route Annaba-Tunisie et est traversé par la route reliant Oum Teboul et El Aïoun. La région est délimitée par la frontière tunisienne au sud et à l'est, par la mer au nord, et par la réserve d'El Kala (comprenant le lac Tonga) à l'ouest.

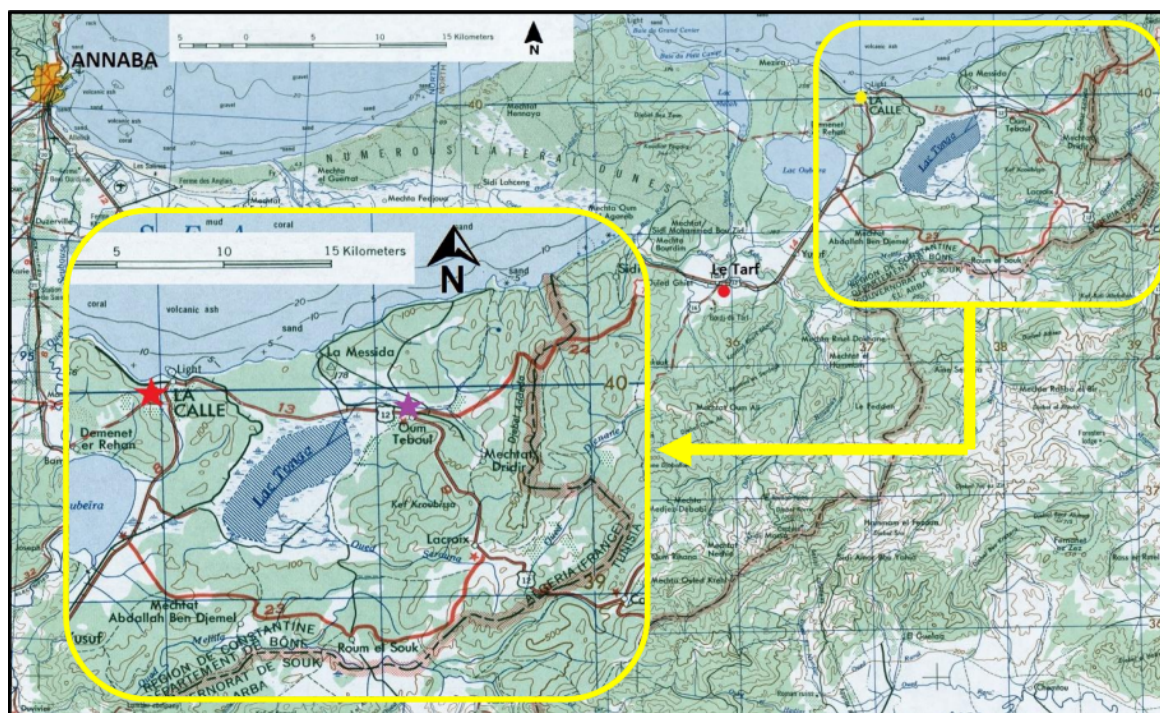


Figure 2.1 : Localisation géographique de la région de Kef Oum Teboul (Extrait de la carte topographique de Annaba 1/250.000)

Tableau 2.1: Les coordonnées géographiques du gisement Kef Oum Teboul d'après le quadrillage Kilométrique Lambert (Nord Algérie)

latitude	longitude
$40^G 98^C 00^{CC}$	$6^G 92^C 55.0^{CC}$
$40^G 98^C 29.5^{CC}$	$6^G 93^C 66.6^{CC}$
$40^G 98^C 04.5^{CC}$	$6^G 95^C 57.5^{CC}$
$40^G 96^C 95.5^{CC}$	$6^G 94^C 37.5^{CC}$

1.1. Le relief

Le relief du district est caractérisé par des collines et des montagnes de faible altitude. Les altitudes dans la région varient de 3 à 594 mètres, avec une différence de 591 mètres entre le point le plus bas, le lac Tonga, et le point le plus élevé, le mont Kef Edmen. La crête principale suit une direction nord-sud et marque également la frontière de l'État. Au sud de cette crête, une crête secondaire se dirige vers l'ouest, tandis qu'au nord, une autre crête de troisième ordre se poursuit, où se trouve Kef Oum Teboul, un sommet local culminant à 315 mètres d'altitude.

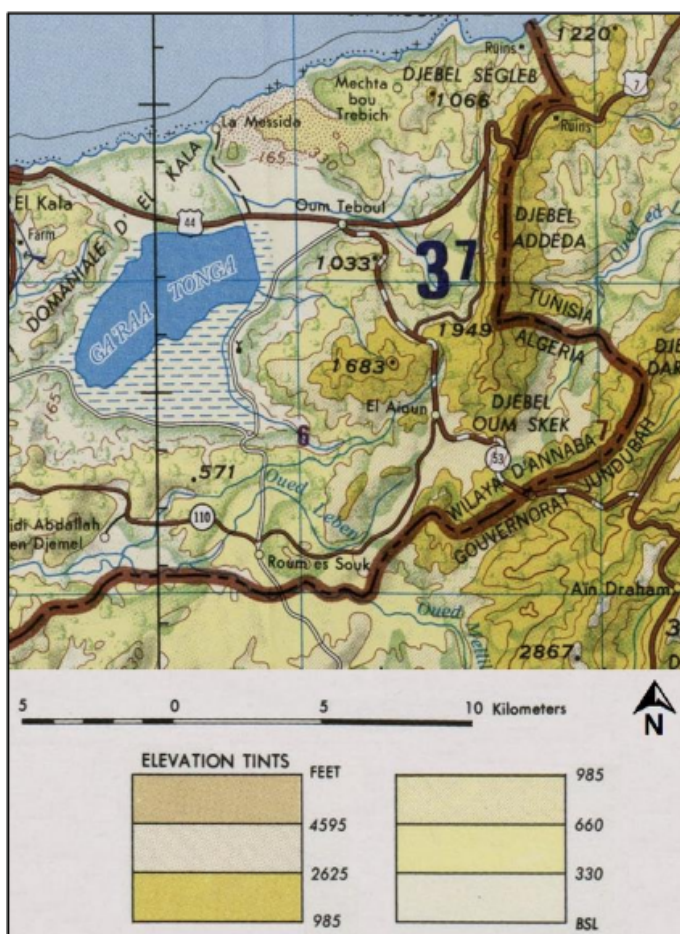


Figure 2.2: Extrait de la carte topographique d'Annaba, 1/250.000

1.2. Climat

La région étudiée présente un climat subtropical méditerranéen typique, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et pluvieux. Les températures moyennes varient peu tout au long de l'année, oscillant entre 31°C en août et 17°C en janvier. L'humidité de l'air reste élevée avec une moyenne de 70% tout au long de l'année. Les précipitations suivent un rythme saisonnier, avec des

valeurs maximales atteintes en hiver, particulièrement en décembre et janvier, où elles peuvent dépasser les 90 mm.

1.3. Hydrographie et hydrogéologie

Kef Oum Teboul est situé dans le bassin d'Oued El Eurg, qui se jette dans la mer Méditerranée près de Messida en utilisant un canal qui sert également de déversoir au lac Tonga. En raison de sa proximité avec la mer et de sa couverture végétale assez dense, la région bénéficie d'une bonne pluviométrie qui alimente les eaux souterraines. Cependant, en raison de la topographie accidentée du relief et de la présence d'oueds, les eaux de pluie s'écoulent rapidement en ruisseaux, empêchant ainsi l'accumulation d'importantes quantités d'eau dans les roches. De plus, la forte couche alluviale de matériaux argilo-sableux, d'une épaisseur de 3 à 4 mètres, limite l'accès des eaux atmosphériques aux roches sous-jacentes.

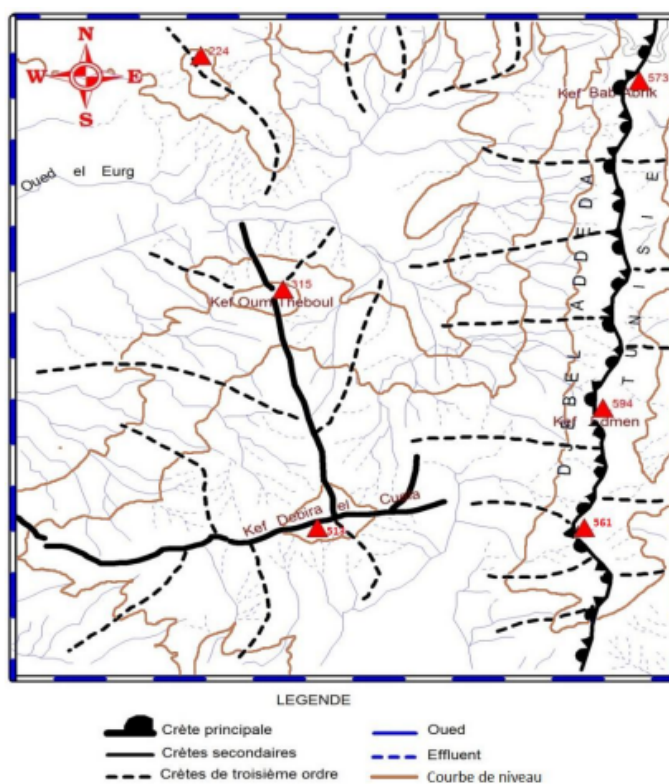


Figure 2.3: Schéma orohydrographique de la région de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1971)

2. Contexte géologique

La région fait partie de l'Atlas Tellien, qui représente l'une des unités les plus complexes de la zone plissée de l'Afrique du Nord. La géologie du territoire est caractérisée par la présence de plusieurs unités structurales indépendantes qui se superposent dans la région. Cependant, il est difficile de comprendre la structure géologique car l'autochtone ne s'expose pas dans la région. Le gisement de la région

se compose exclusivement de roches sédimentaires, avec une présence limitée de roches métamorphiques et volcaniques.

2.1. Lithostratigraphie de la zone de gisement

Les roches les plus anciennes dans la région sont des gneiss qui constituent le substratum (socle cristallophyllien). Ces mêmes gneiss se retrouvent dans la partie orientale du massif de l'Edough, mais ils n'affleurent qu'à une distance considérable au nord-ouest.

Dans la composition du gisement, on trouve des roches de l'Éocène et de l'Oligocène qui appartiennent à la série Numidienne. Voici plus en détail :

2.1.1. Éocène supérieur - Priabonien (Argiles de Numidien) :

Il s'agit de schistes peu cristallins qui présentent un pendage de 10 à 30 degrés vers le nord, le nord-ouest ou le sud-est. Ils font partie du noyau d'un anticlinal local où se situent les principales failles minéralisées. Les schistes sont de couleur noire ou grise-noire, compacts, très durs, et ils présentent une schistosité très nette.

Les argilites sont compactes et dures, de couleur gris clair, verdâtre, brunâtre voire noire, avec une schistosité nette et une cassure irrégulière. Leur structure est alevrolitique ou alevrolit-pélitique, avec un ciment argileux de type basal. La composition minérale des argilites comprend du quartz, des minéraux argileux, de la chlorite et de la muscovite. Leur épaisseur varie de 100 à 315 mètres.

2.1.2. Oligocène inférieur (grès du Numidien) :

L'Oligocène inférieur est représenté par les alevrolites, qui peuvent être argileux ou gréseux, parfois transitionnels vers des argiles alevroliques noires. Les alevrolites sont de couleur grise, gris foncé à noire, compactes, avec une schistosité assez nette. Des couches minces de grès s'intercalent fréquemment entre les alevrolites. Ils affleurent dans la partie sud du gisement et sont également rencontrés lors des sondages. Ces roches présentent un ciment argileux de type basal et une structure alevrolitique ou alevrolitique-pélitique. La composition minérale comprend du quartz, des minéraux argileux, des micas et de la chlorite. Leur épaisseur varie de 20 à 140 mètres. Ils sont recouverts par des grès.

Les grès : Les grès affleurent dans les secteurs nord-est, nord et sud-ouest du gisement. Ils sont riches en quartz, bien consolidés, durs, avec une cassure irrégulière. Leur couleur varie du jaune au gris, et on y observe souvent des traînées et des taches ferrugineuses qui leur donnent une teinte rougeâtre. Les grès sont composés de quartz, de feldspath, de muscovite, de minéraux argileux

et de zircon. Le ciment est argileux et quartzeux de type poreux. Leur épaisseur varie de 10 à 90 mètres.

conglomérats : Les conglomérats sont présents principalement dans la partie occidentale du gisement, mais également sporadiquement à l'est et au nord-est de la région, sous forme de taches dans les grès. Ils sont de couleur grise, rougeâtre ou jaunâtre, bien consolidés, parfois bien lités avec un pendage visible. Les conglomérats sont constitués de fragments de quartz, de quartzites, de muscovite et de zircon. Le ciment peut être argileux ou gréseux. Leur épaisseur varie de 2 à 40 mètres.

Minéralisation : En ce qui concerne les minéralisations du district de Kef Oum Teboul, selon les travaux miniers et les prospections réalisées (rapport de la SONAREM en 1966), on observe la présence de trois systèmes de fractures dans le champ filonien de Kef Oum Teboul. Le premier système présente une direction est-nord-est (80° - 85°) et est-sud-est (100° - 110°). Le deuxième système a une direction nord-ouest (120°), tandis que le troisième système a une direction nord-est (10° - 15°).

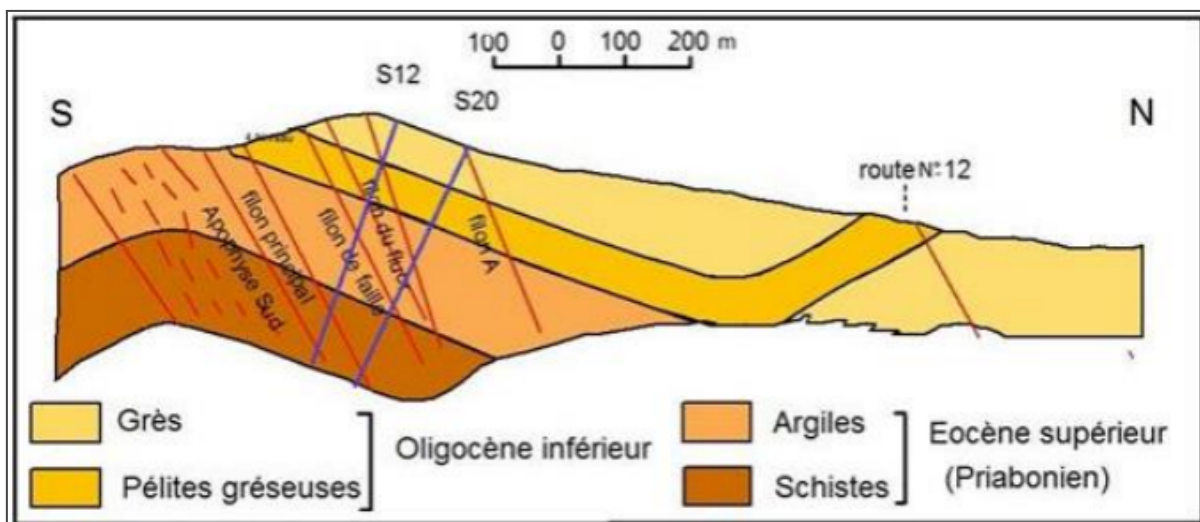


Figure 2.4 : Coupe transversale du gisement de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1965-1966).

Les filons Ils sont organisés selon la disposition suivante :

Dans la région de Kef Oum Teboul, le rapport de SONAREM décrit plusieurs filons minéralisés. Voici une synthèse des principales caractéristiques :

1. Filon principal : Il mesure 1800 mètres de long, 591 mètres de profondeur et a une épaisseur moyenne de 2 mètres. Il est situé dans le versant Est, Sud et Sud-Ouest du mont Kef Oum Teboul. Les minéraux identifiés

incluent la pyrite, l'arsénopyrite, la chalcopryrite, la sphalérite, la pyrrhotite, la bornite, le cuivre gris, la marcasite, la galène et la graytonnite. Les concentrations les plus élevées en minéraux ont été observées aux intersections avec d'autres filons.

- 2.** Filon de la faille : Situé sur le flanc méridional du mont Kef Oum Teboul, à une distance de 90 à 120 mètres du filon principal, il mesure 1700 mètres de long et 450 mètres de profondeur. Bien que sa minéralisation soit similaire à celle du filon principal, sa faible teneur en minéraux et sa nature irrégulière rendent ce filon peu intéressant sur le plan pratique.
- 3.** Filon fluor : Il s'étend sur 1300 mètres avec une orientation est-ouest, à une distance de 190 à 210 mètres au nord du filon principal. Ce filon présente une inclinaison de 60° à 80° vers le nord et une épaisseur moyenne de 0,33 mètre. Les veines de quartz et les géodes de quartz contiennent des cristaux de fluorine. Les teneurs en minéraux incluent du cuivre, du zinc, du plomb et de l'argent.
- 4.** Filon cuivre : Il mesure 800 mètres de long et s'oriente nord-ouest/sud-est, avec un angle d'inclinaison de 55° à 65° vers le nord-est. Ce filon présente deux types de minéralisations, notamment un filon observé en surface avec une dissémination de pyrite et une concentration de minerais de plomb et de zinc, ainsi qu'un filon situé plus profondément, constitué de veinules de quartz et de quartz-carbonates. Les teneurs en cuivre, zinc et plomb varient.

3. Composition minéralogique du gisement

Les minerais dans la région de Kef Oum Teboul peuvent être regroupés en trois catégories en fonction de leur composition minéralogique :

Tableau 2.2 : Composition minéralogique du gisement

Minéraux métalliques primaires	Minéraux métalliques secondaires	Minéraux non métalliques
Magnétite	Chalcosite	Hédénbergite
Oligiste spéculaire	Covelline	Chlorite
Scheelite	Azurite	Épidote
Wolframite	Malachite	Quartz
Pyrite	Anglésite	Séricite
Marcassite	Cérusite	Kaolins
Chalcopyrite	Smithsonite	Sidérose
Sphalérite	Goethite	Calcite
Galène	Hydrogoethite	Ankérite
Arsenopyrite		Barytine
Pyrrhotite		Fluorine
Bournonite		Zéolite
Tétraédrite		
Tenantite		
Sulfosel du bismuth		
Greytonite		

4. Historique

La mine de Kef Oum Teboul a connu plusieurs périodes d'exploitation depuis ses débuts en 1849. Les premiers travaux d'extraction ont débuté en 1857 au niveau du travers-banc "Saint-Barbe", mais ont été interrompus en 1873 en raison de problèmes techniques. L'exploitation a repris plus tard aux niveaux 6 et 10 du travers-banc "Saint-Barbe", principalement concentrée sur le filon principal et les Colonnes Centrale, Ouest et Est.

- Entre 1849 et 1893, environ 285 000 tonnes de minerai ont été produites. En 1899, la société minière de Kef Oum Teboul a repris l'exploitation et a réussi à produire des quantités significatives de minéraux tels que la cérusite, la chalcopryrite, la galène et un mélange de galène et de blende.
- De 1907 à 1914, la mine a été exploitée par le syndicat Rochette, qui a installé une usine de flottation en 1913 pour enrichir la teneur en cuivre du minerai extrait. Cette usine a permis d'obtenir des concentrés riches en argent et en or.
- Les travaux d'exploitation ont été interrompus pendant les deux guerres mondiales, et malgré une tentative de relance en 1941, la mine a été abandonnée depuis 1945.

En ce qui concerne le processus de valorisation du minerai, il visait à éliminer les matériaux indésirables tels que les argilites, le quartz et la haloysite afin d'enrichir le minerai de cuivre. Les teneurs en silice étaient réduites par lavage.

L'usine de Messida, qui était en fonctionnement, impliquait le tri manuel des gros morceaux et le lavage des petits fragments pour séparer le minerai. Les mattes contenant du cuivre, de l'argent et de l'or étaient produites par fusion pyriteuse, mais ce processus a été abandonné en faveur du grillage du minerai. Le nouveau lit de fusion produisait des mattes contenant une teneur plus élevée en cuivre, argent et or.

5. Le District de Boucaïd

5.1. Situation géographique

La mine de Boucaïd est située à une distance de 250 km au sud-ouest d'Alger, le long de la route reliant les wilayas de Chlef et de Tissemsilt. Elle se trouve précisément à 58 km au sud de Chlef et à 62 km au nord de Tissemsilt. L'accès à la mine se fait par la route nationale 19.

Selon le découpage administratif datant de 1984, la mine s'étend sur une superficie d'environ 67 km².

La mine de Boucaïd est située dans la commune éponyme de Lazharia, dans la Daïra de Lazharia. Elle se trouve sur le versant nord du massif de la chaîne de l'Ouarsenis, à une altitude d'environ 1200 mètres. Les installations de l'unité minière sont situées à proximité de la RN19, qui offre un accès à la mine, comme mentionné précédemment..celle-ci est bordé par :

- La commune de Karimia au nord, celle-ci constitue sa limite avec la wilaya de Chlef.
- Les communes de Bordj Bounaama et celle de Sidi-Slimane au sud.
- La commune de Beni-Chaïd à l'est.
- La commune de Lazharia par l'ouest.

5.2. Aspect Climatologique

La mine de Boucaïd fait partie intégrante de la région de l'Ouarsenis. Cette région est caractérisée par un climat méditerranéen typique, avec des étés torrides, relativement chauds et secs, ainsi qu'un hiver pluvieux, humide et froid.

5.3. Hydrologie et Hydrogéologie

La majeure partie de la formation géologique de la région de l'Ouarsenis est principalement composée de calcaire, une roche perméable qui facilite l'infiltration des eaux de surface. Cette caractéristique fait de cette zone un réservoir d'eau naturel.

5.4. Géologie Régional

Les gisements que nous étudions font partie de la géologie du massif de l'Ouarsenis, qui s'étend sur une distance de 200 km. Ce massif est composé de roches sédimentaires qui affleurent sous la forme de massifs isolés du Jurassique au sein des terrains du Crétacé. Les massifs connus situés dans cette région et liés à cette genèse sont :

- Massif du Grand Pic : Compris entre Chélif au nord et la wilaya de Tiaret au sud.
- Massif d'Abdelkader : C'est le massif sur lequel se reposent les gisements qui sont l'objet de notre étude.
- Massif Belkheiret, Massifs Batha, et certains autres blocs de glissements par gravité.



Figure 2.5 : Situation géographique du Massif de l'Ouarsenis dans l'Atlas Tellien.

5.5. Tectonique

La configuration tectonique des gisements de la mine de Boucaïd est liée à l'évolution du massif de l'Ouarsenis. Ce massif est constitué de roches jurassiques qui

ont été remontées vers la surface à partir d'une faille profonde, formant ainsi plusieurs blocs morcelés. Ce processus a entraîné le déplacement des nappes géologiques, ce qui a conduit à la formation d'une structure montagneuse complexe.

La structure du massif est caractérisée par un anticlinorium incliné vers le nord-est, résultant du déplacement des nappes, ainsi qu'un flanc inverse en forme d'anticlinal couché au sud, qui remplit la zone synclinale. Cette configuration tectonique a engendré de nombreux accidents et plis qui ont affecté les masses calcaires, donnant ainsi un aspect complexe et en écaillés aux différentes formations calcaires présentes dans la région.

5.6. Minéralisation

La morphologie des gisements de la région de l'Ouarsenis, y compris celui de Boucaïd, est marquée par la présence de filons, de lentilles et d'amas, qui sont le résultat des mouvements tectoniques ayant affecté cette zone.

On distingue deux types de gisements selon leur formation : les amas et les filons.

5.6.1. Les amas : Les amas sont des concentrations de gisements qui se présentent sous différentes formes, généralement sous forme de lentilles de dimensions similaires. Dans le gisement de Sidi-Lakhdar, la baryte est présente sous forme d'amas aux niveaux de 1330 m, 1452 m et 1550 m.

5.6.2. Les filons : Les filons sont des gisements formés par le remplissage de fractures préexistantes dans la croûte terrestre, qu'ils soient continus ou discontinus, et contiennent une variété de minéraux. La baryte est également présente sous forme de filons dans le gisement de Sidi-Lakhdar, aux niveaux de 1497 m et 1620 m, ainsi que dans le gisement Nord, aux niveaux de 1200 m, 1150 m et 1050 m.

Les travaux de recherche et de prospection ont conduit à la découverte de plusieurs nouveaux sites, notamment le site de Sidi Ouadhah situé sur les flancs oriental et occidental du massif de Belkheiret.

5.7. Historique des travaux

Les premiers gisements découverts dans la mine de Boucaïd étaient des filons de plomb-zinc en 1856, situés dans une zone connue sous le nom de Grand Pic. Par la suite, les gisements de Belkheiret et d'Abdelkader ont été découverts respectivement en 1860 et 1863. Suite à ces découvertes, une demande de permis d'exploration a été soumise en 1872 par M. Terraillon et M. Calen. Cependant, pour diverses raisons, les travaux n'ont jamais été entrepris et la région a été progressivement abandonnée.

Vers la fin du 19^e siècle, des travaux d'exploitation ont été entrepris pour extraire les poly-métaux mentionnés ci-dessus, atteignant leur apogée en 1940 grâce aux études réalisées par le géologue français M. Formmel. La deuxième période d'exploitation de ces gisements a débuté après l'indépendance, plus précisément après la nationalisation des mines en 1966, ce qui a assuré la continuité des travaux d'exploitation des poly-métaux.

En 1967, la SONAREM a également commencé des travaux de prospection pour étudier et reconnaître les gisements de zinc dans la région de Boucaïd, en vue de leur exploitation. Cette exploitation a continué jusqu'à l'épuisement des réserves en 1976.

En 1975, lors des levés géologiques du gisement de Sidi-Belabess, une importante structure de barytine s'est révélée sur une longueur de 850 mètres, représentant une quantité significative de réserves. Entre 1977 et 1981, la SONAREM a effectué des travaux d'évaluation et de prospection sur cette barytine. L'exploitation et le traitement de la barytine ont été réalisés simultanément avec les travaux de prospection et d'évaluation, qui ont débuté en 1976. Cette évolution a permis à la mine de se transformer en une unité de production.

Les recherches et les prospections ont également conduit à la découverte de plusieurs nouveaux sites, notamment le site de Sidi Ouadhah, situé sur les flancs oriental et occidental du massif de Belkheiret.

5.8. Traitement du Minerai au Niveau de l'Usine

L'usine de Boucaïd est chargée des opérations de traitement, d'enrichissement et de transformation du minerai de baryte brut en un produit final conforme aux normes API, prêt à être commercialisé.

Le processus de traitement comprend trois stations principales :

5.8.1. Station de Concassage : Le minerai brut est acheminé vers des concasseurs pour subir trois opérations mécaniques de réduction de taille :

- Réduction du tout-venant à une taille de 70 mm à l'aide d'un concasseur à mâchoire à simple volet de type VB67 BERGEAUD.
- Criblage et réduction de la taille des particules à 14 mm à l'aide d'un groupe de broyeurs-cribles mobiles SYMENS, utilisant un crible à 3 étages.
- Réduction à 6 mm dans un concasseur à cylindre lisse de type BCR 60*80.

Le tout-venant réduit (0 à 10 mm) est ensuite stocké dans trois trémies tampons d'une capacité de 120 tonnes chacune.

5.8.2. Station d'Enrichissement : Après le concassage initial, le matériau subit une séparation gravimétrique humide à l'aide d'un appareil appelé Remer-Jig, fabriqué par WEMCO. Le concentré de baryte est collecté dans la partie inférieure de l'appareil, puis il est acheminé vers un classificateur en spirale pour être évacué vers des chambres de drainage et stocké sur une surface pouvant contenir jusqu'à 9 000 tonnes. Les déchets sont transportés en surface avec l'eau vers une digue où ils se déposent, tandis que l'eau clarifiée est recyclée.

5.8.3. Station de pulvérisation et de conditionnement : L'objectif de cette station est de transformer le concentré en un produit fini conforme aux normes API. Le concentré, dont l'humidité maximale est de 12% à l'entrée du sécheur rotatif de 14 mètres de long et 2 mètres de diamètre, voit son taux d'humidité réduit à moins de 1%. Ensuite, le produit séché est soumis à des opérations de broyage fin dans un broyeur pendulaire BP16, suivi d'une séparation granulométrique dans un séparateur statique. Les particules de dimensions inférieures à 75 µm sont stockées puis évacuées vers des trémies destinées au stockage des produits finis. Les produits de dimensions inférieures à 75 µm sont conditionnés dans des big-bags d'une capacité de 1,5 tonne chacun. Ces big-bags représentent le produit final de l'usine et sont destinés à être utilisés comme boue de forage pétrolier.

6. Impacts environnementaux

L'extraction minière en Algérie remonte à une période très ancienne, bien avant l'indépendance du pays en 1962. Elle se concentrait principalement sur l'exploitation des gisements de plomb-zinc et de fer. Toutefois, l'activité minière est souvent considérée comme l'une des sources de pollution des sols et de l'eau dans de nombreuses régions proches des sites miniers à travers le monde.

La problématique de la contamination des sols par les métaux lourds est un sujet de préoccupation important, car elle peut engendrer des risques potentiels pour la santé publique ainsi qu'une crise alimentaire mondiale. Les métaux lourds sont caractérisés comme des métaux et des éléments métalloïdes possédant une densité relativement élevée (supérieure à 4 g/cm³) et qui sont toxiques même à faible concentration (Maigari et al., 2016 ; Sardar et al., 2013 ; Zerrouki et al., 2021).

6.1. Site de boucaïd

Une étude publiée dans le journal international "Contamination des sols et des sédiments" a examiné les concentrations de sept métaux lourds près de la mine de Boucaïd. Les résultats ont montré des concentrations élevées de manganèse (Mn) et de plomb (Pb) à la fois dans la zone d'étude et à l'intérieur de la mine. Les valeurs de l'indice de géoaccumulation mesurées sur trois sites varient de -1,46 à 0,34, ce qui suggère une contamination allant de nulle à modérée. Lorsque l'on compare les concentrations en métaux lourds de la mine de Boucaïd à celles d'autres mines dans

le monde, on constate des niveaux acceptables, à l'exception du cadmium (Cd). L'indice de risque écologique potentiel près de la mine de Boucaid indique un faible risque écologique potentiel. La moyenne des indices de risque écologique à Boucaid, Sidi Slimane et Bordj Bounaama varie de 1,01 à 42,71. L'évaluation des métaux lourds dans la mine et ses environs peut aider à identifier leurs sources. Il est recommandé d'étudier les concentrations de métaux lourds dans les sources et les zones touchées, plutôt que de se baser uniquement sur l'analyse multivariée (Zerrouki et al., 2021).

6.2. Kef oum teboul

Après plus de cinquante ans de fermeture dans le district polymétallique de KOT une évaluation environnementale approfondie a été réalisée. Cette étude, publiée dans la revue *Environmental Earth Sciences*, avait pour objectif d'évaluer la présence de quatre métaux lourds, à savoir le plomb (Pb), le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le cadmium (Cd). Les résultats obtenus par Hadj Arab et al. (2021) ont révélé les éléments suivants :

- Présence d'un problème majeur de drainage minier acide dans la zone d'étude, avec des cours d'eau présentant un pH acide (≤ 3) et une forte concentration en métaux.
- Les sédiments des cours d'eau et les sols de la zone d'étude contiennent des niveaux élevés de métaux lourds.
- Indices de pollution : contamination extrême par le Cd et le Pb, contamination modérée à forte par le Zn, et aucune contamination par le Cu.
- L'activité minière est la principale cause de ces niveaux élevés de métaux, mais d'autres facteurs anthropogéniques tels que le trafic routier et la fertilisation des sols peuvent également contribuer aux anomalies métalliques à plus grande distance.
- Le Cd présente le risque écologique le plus élevé dans les sédiments des cours d'eau et les sols, avec un risque potentiellement élevé.
- Le Cu et le Zn présentent un faible risque écologique, tandis que le risque écologique du Pb est modéré ($40 \leq E_i < 80$) (Hadj Arab et al., 2021).

Conclusion

En somme, le chapitre 2 nous a permis de présenter en détail les deux sites d'étude, Kef Oum Teboul et Boucaid, en se focalisant sur les aspects géographiques, climatiques, hydrologiques, géologiques, minéralogiques et historiques de ces régions. Il est clairement ressorti que l'activité minière dans ces zones a des implications significatives sur l'environnement, qui se manifestent sous forme d'impacts environnementaux.

Ces éléments soulignent plus que jamais l'importance d'une approche d'exploitation minière responsable et durable. Cela nécessite une gestion environnementale rigoureuse afin de préserver la biodiversité, de protéger les ressources en eau et d'assurer la santé et la pérennité des écosystèmes et des communautés locales sur le long terme. Les informations recueillies ici serviront de base pour les analyses et évaluations qui suivront dans les prochains chapitres de ce projet de fin d'études.

Chapitre 03

Méthodes et matériels

Introduction

La partie pratique de ce Projet de Fin d'Études repose sur l'utilisation de diverses méthodes et matériels afin de mener à bien les expérimentations nécessaires pour atteindre les objectifs fixés. Les méthodes de recherche sont cruciales pour garantir la rigueur scientifique de l'étude. Une approche méthodique permet de collecter, d'analyser et d'interpréter les données de manière systématique et fiable.

Ce chapitre se propose donc de présenter en détail les différentes méthodes de recherche et les matériels utilisés dans le cadre de cette étude.

La Figure 3.1 ci-après résume toutes les expérimentations effectuées au sein du laboratoire de génie minier de l'Ecole Nationale Polytechnique.

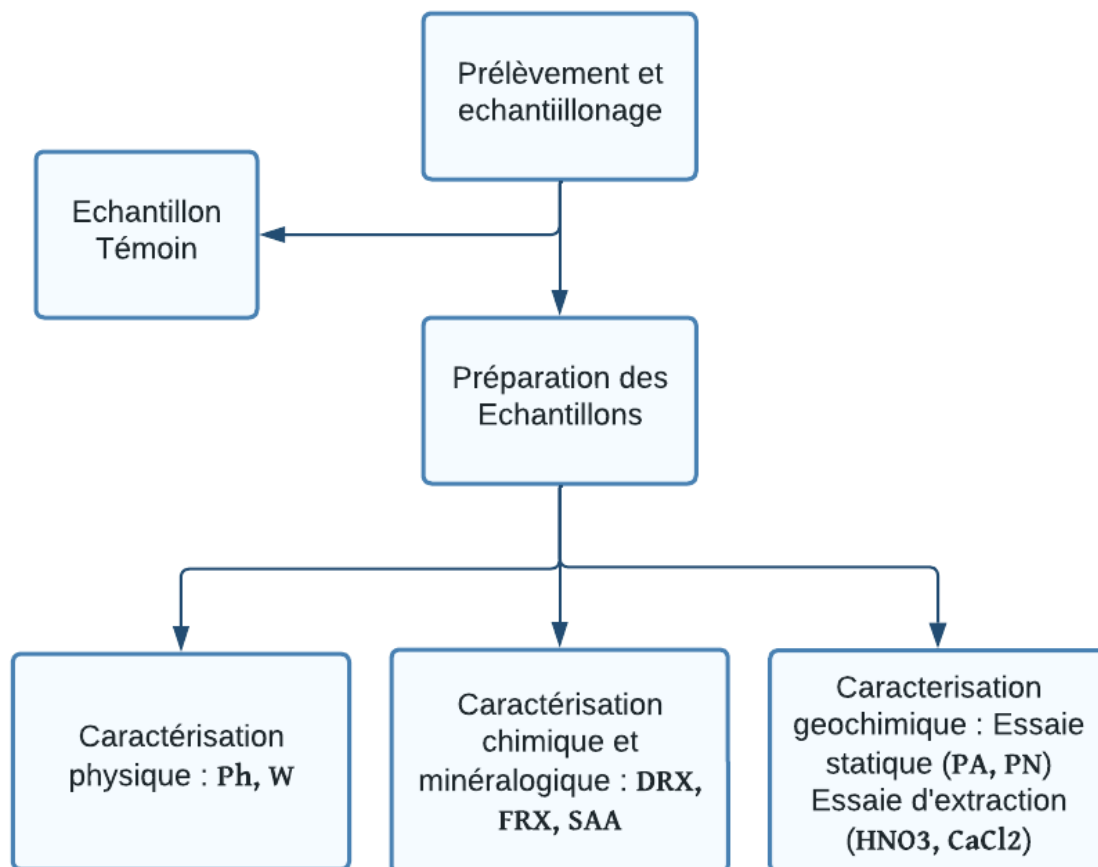


Figure 3.1 : organigramme des essais au laboratoire.

1. L'échantillonnage

L'échantillonnage des sols pour la caractérisation d'une pollution en métaux lourds est une étape essentielle pour comprendre l'étendue de la contamination dans un site donné et déterminer les mesures appropriées à prendre pour protéger la santé humaine et l'environnement.

1.1. Objectifs et approche globale

L'objectif d'un échantillonnage est d'être le plus représentatif possible. La qualité de cette étape est primordiale, car elle influence un grand nombre de décisions importantes et coûteuses. Les résultats d'un échantillonnage représentatif doivent refléter le niveau de concentration du contaminant concerné à un moment et à un lieu donnés, ainsi que la variation de présence et de concentration du polluant sur le lieu. (M.Pellet et al.,1993)

Le problème de la représentativité s'exprime à deux niveaux :

1. Représentativité de la prise par rapport au volume et à la géométrie de l'entité qu'elle représente.
2. Représentativité de l'échantillon analysé par rapport à l'échantillon prélevé.

Les variables qui affectent la représentativité des échantillons sont de quatre ordres :

1. Variabilité liée au milieu.
2. Variabilité liée au contaminant.
3. Variabilité liée à l'échantillonnage.
4. Variabilité analytique.

1.2. Approche globale et notions de plan d'échantillonnage

La définition du plan d'échantillonnage et du programme d'analyse est l'étape la plus décisive. Cette phase doit être en accord avec l'objectif global de l'étude, tout en garantissant l'exploitabilité des données.

L'objectif de l'échantillonnage et le degré de précision requis doivent être clairement définis dès le départ, en prenant en compte les critères qualitatifs et quantitatifs de chaque partie prenante. Tous les intervenants doivent donc être sensibilisés à ces objectifs et impliqués dans la conception du plan d'échantillonnage. (M.Pellet et al.,1993)

La liste des étapes à préparer pour l'échantillonnage des sols sur site contaminé est présentée comme suit :

1.3. Définition des objectifs de l'échantillonnage

La définition des objectifs du projet et du degré de précision est la suivante :

L'objectif de notre étude est l'évaluation des risques de contamination en éléments traces métalliques des sols, plantes, sédiments et rejets miniers pour la mine de Boucaïd et la mine de Kef Oum Teboul. Pour chaque site, il sera nécessaire de :

- Identifier les polluants présents ainsi que leur répartition spatiale.
- Identifier les niveaux de concentration.
- Déterminer la potentialité de migration.

1.4. investigation préliminaire

La synthèse des connaissances préliminaires et de l'historique du site est une étape importante. Dans le chapitre 2, nous avons déjà étudié l'évolution du site en remontant le plus loin possible dans le passé. Cela nous a permis d'identifier les potentialités de contamination et les risques associés au site. (M.Pellet et al.,1993)

1.5. stratégie d'échantillonnage

Une stratégie d'échantillonnage est un plan systématique qui guide la collecte d'échantillons d'un matériau, d'un fluide ou d'une substance en vue d'une analyse ultérieure. Elle implique la sélection méthodique des échantillons à prélever et des points d'échantillonnage, ainsi que le choix des méthodes d'analyse appropriées afin d'obtenir des résultats fiables et représentatifs.(M.Pellet et al.,1993)

1.5.1. approche européenne

L'approche européenne se concentre sur des objectifs spécifiques et est moins exhaustive. Elle utilise la norme ISO (Organisation internationale de normalisation) pour sa méthodologie d'échantillonnage. Cette approche est hypothétique, ce qui signifie que le plan d'échantillonnage est établi en fonction d'une hypothèse préalable déduite de l'analyse historique du site. Les résultats obtenus sont ensuite interprétés pour confirmer, infirmer ou réviser cette hypothèse initiale.

L'investigation ne fournit pas une description directe de la distribution de la contamination, mais plutôt teste une hypothèse préétablie concernant cette distribution. Si cette hypothèse est invalidée, une nouvelle hypothèse est formulée et testée avant de tirer une conclusion définitive sur la distribution de la contamination. Si des données collectées lors de l'investigation remettent en question les hypothèses initiales, la stratégie d'échantillonnage est ajustée avant de parvenir à toute conclusion. (M.Pellet et al.,1993)

1.5.2. le choix de stratégie d'échantillonnage

La sélection de la stratégie d'échantillonnage dépend de l'objectif de l'étude, ainsi que des contraintes telles que la qualité des données, les ressources disponibles

et les restrictions imposées. La dimension de la stratégie d'échantillonnage est également adaptée en fonction de ces facteurs afin de garantir la pertinence et la qualité des données collectées.

Le Tableau 3.1 présente une évaluation des différents types d'approches en fonction des objectifs de l'échantillonnage :

Tableau 3.1 : Évaluation des stratégies d'échantillonnage en fonction de l'objectif (EPA, 1991)

Stratégie	Aléatoire	Systémati.	Systémati. aléatoire	Recherche	Aléatoire stratifié	Profil	Jugement
<i>Evaluation du risque</i>	4	2 ^a	3	3	3	2	1
<i>Identification des sources</i>	4	2 ^a	3	2	2	3	1
<i>Délimitation de l'extension</i>	3	1 ^b	1	1	3	1	4
<i>Perspectives de décontamination</i>	3	2	2	4	1	2	3
<i>Contrôle de la décontamination</i>	1 ^c	1 ^b	1	1	3	1 ^d	4
Stratégie : 1 : la plus adaptée 2 : possible 3 : peu adaptée 4 : la moins adaptée	Commentaires : a : à appliquer avec une technique de criblage analytique de terrain b : adaptée seulement si des tendances sont connues c : validation statistique si l'ensemble du site est couvert d : possible si le site est supposé propre (plusieurs techniques)						

Il est important de choisir la stratégie d'échantillonnage la plus appropriée en fonction des objectifs spécifiques de l'étude et des exigences techniques et réglementaires. (M. Pellet et al., 1993)

1.5.3. Stratégie adoptée

Dans le cadre de notre recherche, nous allons travailler avec l'échantillonnage de *jugement*, qui utilise une *approche hypothétique*.

L'échantillonnage de jugement est une méthode de sélection des points d'échantillonnage basée sur une étude historique et une inspection visuelle du site. Cette approche est principalement utilisée pour identifier les contaminants présents dans les zones les plus suspectes et mesurer leur concentration. Cependant, il convient de noter que cette méthode ne peut pas être interprétée statistiquement dans son ensemble. Elle repose sur une sélection subjective des points

d'échantillonnage et ne permet pas d'obtenir des résultats représentatifs de la population étudiée (M. Pellet et al., 1993).

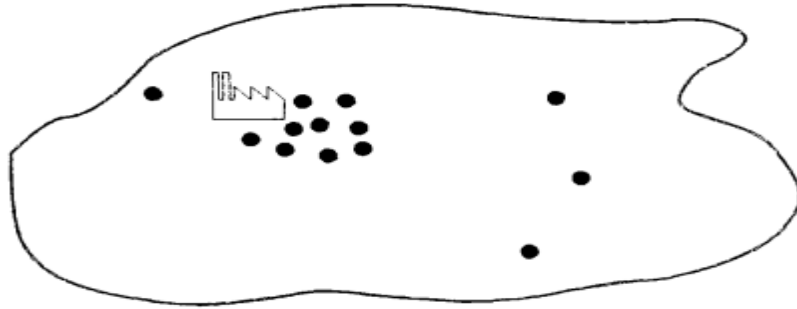


Figure 3.2 : Échantillonnage de jugement (EPA, 1991 ; ISO, 1993)

2. Localisation et répartition des points d'échantillonnage

2.1. Localisation des points d'échantillonnage du site de kef oum teboul

Le stérile résultant de l'extraction du gisement contient des teneurs plus ou moins importantes en Pb, Zn, Cu et As ; des milliers de tonnes sont stockés dans deux zones sous forme de digues occupant des espaces assez importants sans précaution particulière.

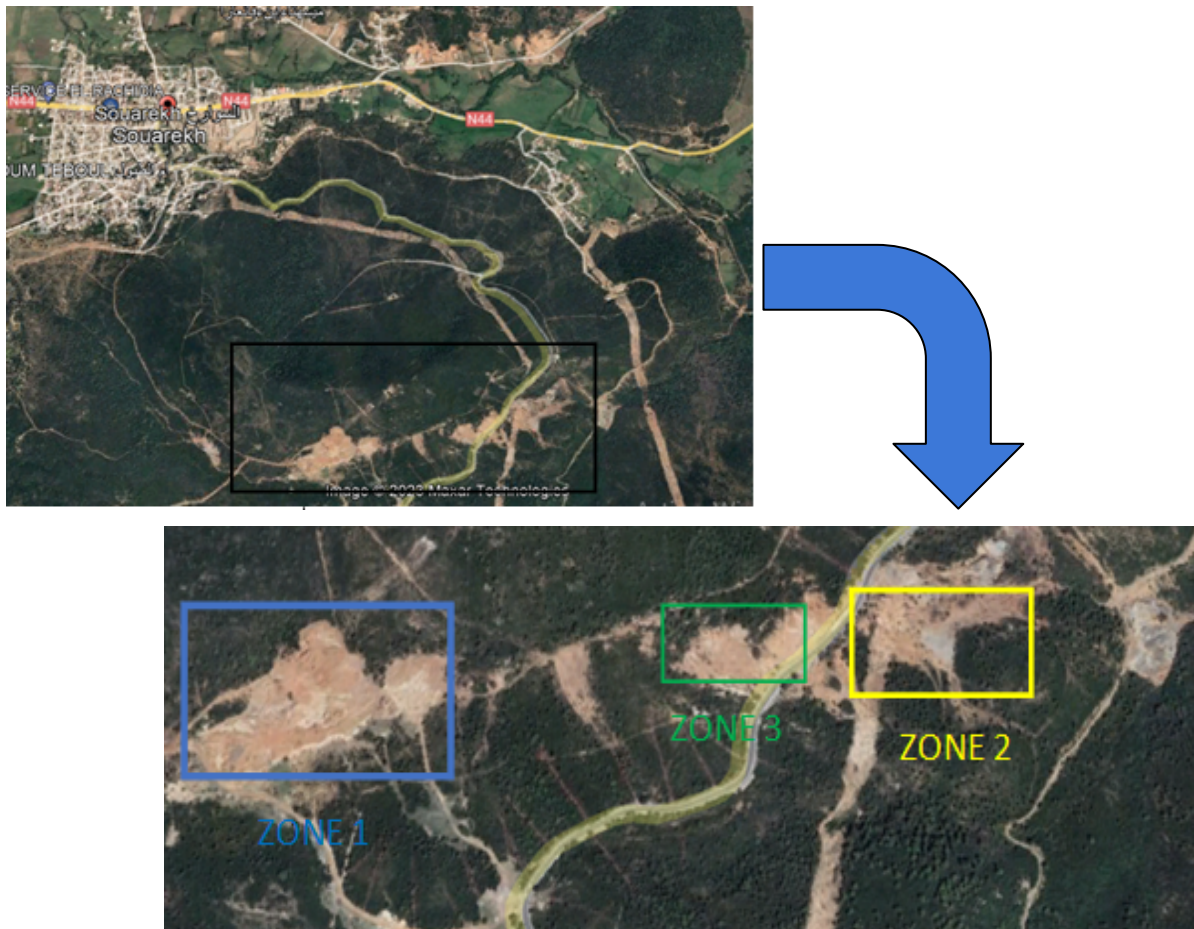


Figure 3.3 : Imagerie satellite des zones d'échantillonnages du district de KEF OUM
TEBOUL (Google earth 2021, Echelle 1/25000)

2.2. Prélèvement des échantillons

Sur le site minier abandonné de Kef Oum Teboul, le 23 mars 2023, une campagne d'échantillonnage a été menée. Au cours de cette campagne, quatorze échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur d'environ 10 à 15 cm en utilisant une pelle et un marteau. Treize échantillons de plantes ont également été collectés dans trois zones distinctes, leur positions exactes sont listés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Coordonnées Lambert des points d'échantillonnages

site (KOT)	Ltitude	longitude
1	36°52'10.41"N	8°34'37.30"E
2	36°52'11.18"N	8°34'34.51"E
3	36°52'9.67"N	8°34'35.73"E
4	36°52'9.42"N	8°34'35.21"E
5	36°52'9.30"N	8°34'33.60"E
6	36°52'8.88"N	8°34'32.15"E
7	36°52'8.57"N	8°34'31.81"E
8	36°52'8.07"N	8°34'30.73"E
9	36°52'7.69"N	8°34'29.55"E
10	36°52'6.95"N	8°34'29.58"E
11	36°52'13.32"N	8°34'58.03"E
12	36°52'12.97"N	8°35'1.67"E
13	36°52'13.10"N	8°35'3.26"E
14	36°52'11.76"N	8°34'51.17"E



Figure 3.4 : Imagerie satellites des points d'échantillonnages des trois zones

(Google earth 2021, Echelle 1/25000)

2.3. localisation des points d'échantillonnage du site de Boucaid

Les rejets résultant de l'extraction et la valorisation du gisement contiennent plus ou moins des concentrations de plomb (Pb), Zinc (Zn), Baryte. Des tonnes sont stockées sous forme de digue sans surveillance.



Figure 3.5 : Imagerie satellites de la zone d'échantillonnage du district de Boucaïd

(google earth 2021, Echelle 1/250000)

2.4. Prélèvement des échantillons

Le 07 mai 2023, une campagne d'échantillonnage a été menée sur le site minier de Boucaïd à Tissemsilt. Au cours de cette campagne, dix échantillons ont été prélevés à une profondeur d'environ 10 à 15 cm en utilisant une pelle et un marteau Figures 3.5 et 3.6.

Cinq échantillons ont été collectés sur le site des rejets de la Baryte Tableau 3.4, et cinq échantillons ont été collectés sur le site des rejets du Plomb/Zinc Tableau 3.3 :

Tableau 3.3 : Coordonnées Lambert des points d'échantillonnage des rejets Pb/Zn

pb/zn	Altitude	longitude
1	35°53'29.50"N	1°36'51.90"E
2	35°53'27.52"N	1°36'48.36"E
3	35°53'27.52"N	1°36'48.36"E
4	35°53'28.46"N	1°36'47.35"E
5	35°53'30.46"N	1°36'48.96"E

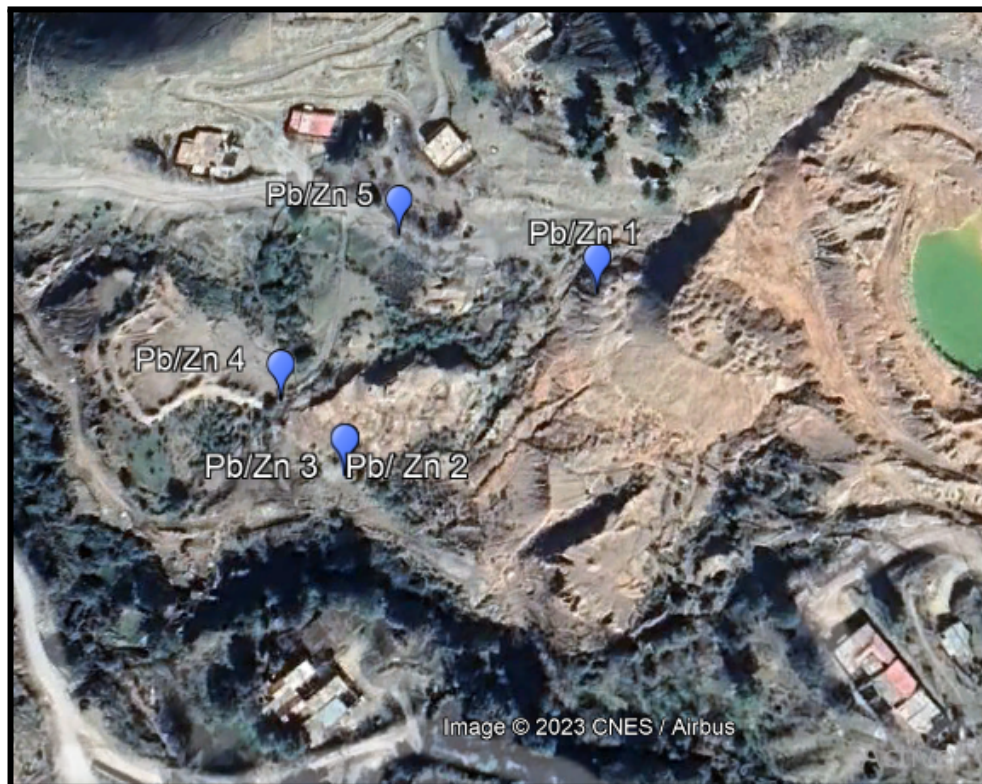


Figure 3.6: Imagerie satellite des Points d'échantillonnages des rejets plomb-zinc (Google earth pro, Echelle 1/250000)

Tableau 3.4 : Coordonnées Lamberts des pts d'échantillonnage des rejets de Baryte

Barytine	Altitude	longitude
1	35°53'30.59"N	1°36'54.46"E
2	35°53'29.73"N	1°36'55.44"E
3	35°53'27.48"N	1°36'56.49"E
4	35°53'28.08"N	1°36'57.86"E
5	35°53'26.44"N	1°37'1.96"E



Figure 3.7: Imagerie satellite Points d'échantillonnages pour les échantillons de baryte

(Google earth pro, Echelle 1/250000)

3. Préparation des échantillons

3.1. Préparation des plantes

Après la collecte des échantillons de plantes sur le site minier abandonné de Kef Oum Teboul, une préparation minutieuse a été effectuée afin de séparer les différentes parties de la plante pour une analyse plus précise. Chaque plante a été divisée en quatre parties distinctes, à savoir les fleurs, les feuilles, les tiges et les racines, en fonction de sa structure. Cette division a été réalisée avec soin pour éviter toute contamination croisée entre les différentes parties de la plante. Les différentes parties de la plante ont ensuite été placées dans des récipients étiquetés pour une identification ultérieure lors des analyses en laboratoire.

3.2. Minéralisation des plantes

La minéralisation des différentes espèces de plantes dans le Tableau 4.9 (voir **Annexe 2**) a été réalisée en utilisant un protocole spécifique qui implique la mise de 5 mg de chaque partie différente des plantes dans des tubes à essai, ainsi que l'ajout de 1 ml d'acide nitrique concentré. Une fois les échantillons et l'acide nitrique ajoutés, ces échantillons doivent tremper dans cette solution pendant au moins 24 heures à température ambiante, ce qui permet une réaction chimique adéquate pour la libération des éléments métalliques.

Après la période de trempage, les tubes à essai sont ensuite placés sur une plaque chauffante et la température est réglée à 70°C. Les tubes sont minéralisés à cette température pendant 4 heures. La chaleur facilite la décomposition des

composés organiques présents dans les échantillons de plantes et permet la libération des éléments minéraux sous forme d'ions dans la solution.

Une fois les 4 heures de minéralisation à 70°C écoulées, la température est augmentée à 120°C jusqu'à ce que la solution devienne transparente. Cette étape supplémentaire de chauffage à une température plus élevée aide à assurer une minéralisation complète et à éliminer tout résidu organique restant(El Azharia et al.,2017).

Il convient de noter que ce protocole spécifique de minéralisation des plantes nécessite une surveillance attentive et le respect des mesures de sécurité appropriées lors de l'utilisation de la plaque chauffante et de l'acide nitrique. Les conditions de température et de temps peuvent varier en fonction des besoins de l'étude et de la nature des échantillons de plantes.



Figure 3.8 : Balance à précision SCT-ATLAS



Figure 3.9: Trempage des échantillons de plante dans l'acide nitrique



Figure 3.10 : Minéralisation des plantes(plaque chauffante LABINCO L-81-)

3.3. Préparation des échantillons sols

Les échantillons ont été prélevés, puis conservés dans des sacs en plastique hermétiquement fermés pour éviter toute contamination ou perte de matériau. Les sacs ont été transportés jusqu'au laboratoire du génie minier de l'École nationale polytechnique pour y être analysés ultérieurement. Avant l'analyse, les échantillons ont été séchés à l'air libre pour éliminer toute humidité résiduelle qui pourrait influencer les résultats. Cette étape de préparation est cruciale pour garantir l'exactitude des analyses ultérieures et permettre une comparaison précise des données collectées avec les normes environnementales et les valeurs de référence.

3.4. Préparations mécaniques des échantillons

3.4.1. Concassage primaire : Afin de réduire la taille des grains de nos échantillons à la dimension souhaitée, une étape de concassage primaire a été réalisée sur l'ensemble des échantillons en utilisant un concasseur à mâchoires de type DRAGON illustré en [Figure 3.10](#). Cette étape de préparation est essentielle pour obtenir des échantillons homogènes avec une granulométrie adaptée à l'analyse envisagée. Le concassage primaire permet de réduire la taille des fragments d'échantillon à une taille appropriée pour les étapes de concassage et de broyage ultérieures. Cette méthode de préparation est couramment utilisée dans les études

géologiques et environnementales pour permettre une analyse précise des échantillons collectés.



Figure 3.11: Concasseur à mâchoires de type DRAGON

3.4.2. Concassage secondaire : Après l'étape de concassage primaire, une deuxième étape de réduction de taille a été effectuée pour affiner davantage la granulométrie des échantillons. Cette étape utilise le produit obtenu après le concassage primaire et vise à réduire la taille des grains à moins de 10 mm en utilisant un concasseur giratoire DENVER illustré en [Figure 3.11](#). Cette méthode de concassage avancée permet de broyer finement les fragments d'échantillons pour obtenir une taille de grain uniforme et adaptée à l'analyse prévue.



Figure 3.12 : Concasseur giratoire de type DENVER

3.4.3. Échantillonnage automatique:

Une étape d'échantillonnage intermédiaire a été réalisée en utilisant un diviseur d'échantillons à cônes rotatifs de marque RETSCH illustré en Figure 3.12. Ce diviseur permet de diviser efficacement l'échantillon initial en huit parties représentatives. Chaque partie ainsi obtenue a été recueillie individuellement dans un flacon séparé. Cette méthode de division d'échantillon permet d'obtenir des fractions d'échantillon homogènes et représentatives.



Figure 3.13 :Diviseur d'échantillons à cônes rotatifs RETSCH.Fi

3.4.4. Broyage :

Une fois les étapes de concassage et d'échantillonnage réalisées, une fraction de chaque échantillon a été broyée en utilisant une pulvérisette de marque FRITSCH illustrée en Figure 3.13. Cette méthode de broyage permet d'obtenir des granulométries allant jusqu'à moins de 80 μm . Cette étape de broyage est importante pour homogénéiser davantage les échantillons et obtenir une granulométrie adaptée à l'analyse envisagée.



Figure 3.14 : Pulverisette de type FRITSH

4. Caractérisation des échantillon

Une analyse physico-chimique et minéralogique a été réalisée afin d'approfondir nos connaissances sur les échantillons dont nous disposons.

4.1. Caractérisation physico-chimique

4.1.1. Le Potentiel Hydrogène (pH) [norme : ISO 10390 :2005] :

Déterminer l'acidité ou la basicité d'un matériau est un critère important et significatif. Pour préparer le mélange, le rapport solide-liquide doit être respecté à 1/5. Ensuite, le mélange est agité pendant 30 secondes, puis laissé en repos pendant 20 minutes. Ce processus est répété trois fois. L'agitation est effectuée à l'aide d'un agitateur magnétique. Après le dernier repos de 20 minutes, le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre de type JENWAY 3510, préalablement étalonné en utilisant des solutions tampons de pH=7, pH=4, pH=10.

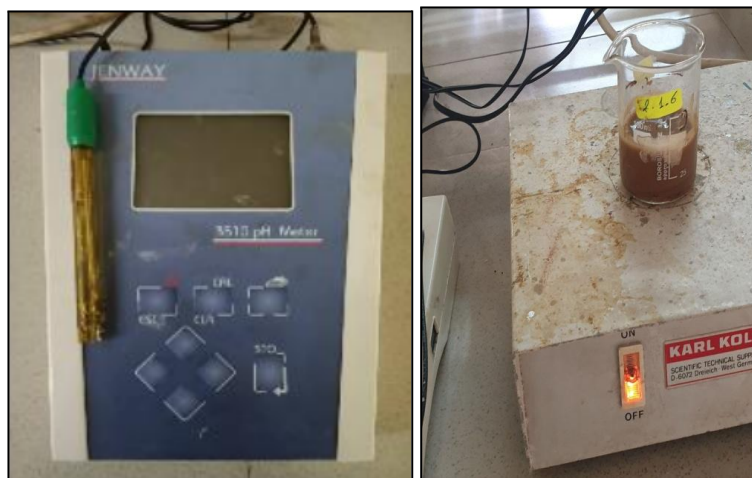


Figure 3.15 : Mesure du pH (pH mètre JENWEY)

4.1.2. Teneur en eau [norme : [NFEN 1097-5]]

La teneur en eau d'un échantillon de sol est définie comme le rapport entre le poids d'eau contenu dans l'échantillon et le poids de l'échantillon sec. La mesure est effectuée en prélevant une quantité de l'échantillon humide (W_h), puis en la pesant à nouveau après l'avoir séchée dans une étuve à 105°C pendant 24 heures (W_s).

$$W = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 \quad (3.1)$$



Figure 3.16: Séchage des échantillon de sol dans le Four Carbolite

4.2. Caractérisation minéralogique

4.2.1. Diffraction des Rayons X (DRX)

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique d'analyse pour l'étude des différentes phases de matières et matériaux poly-cristallins. Les rayons X

interagissent avec les charges des électrons et du noyau d'un atome, ce qui permet une analyse qualitative et quantitative d'échantillons polycristallins. Les avantages des rayons X sont que leurs longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur que les distances interatomiques, ce qui permet des mesures précises. Lorsque les rayons X atteignent les plans réticulaires des réseaux cristallins, ils peuvent être réfléchis ou continuer à travers le matériau, créant des interférences constructives ou destructives. Les pics de diffraction correspondant aux directions où les interférences sont constructives peuvent être déterminés en utilisant la loi de Bragg ici expliqué par l'Équation 3.1 et illustré en Figure 3.16 (Serna et al., 2014).

la loi de prague :

$$2d \cdot \sin\theta = \lambda \cdot n \quad (3.2)$$

d = distance interréticulaire.

θ = l'angle de Bragg (c'est le demi-angle de déviation)

n = ordre de diffraction (nombre entier)

λ = longueur d'onde

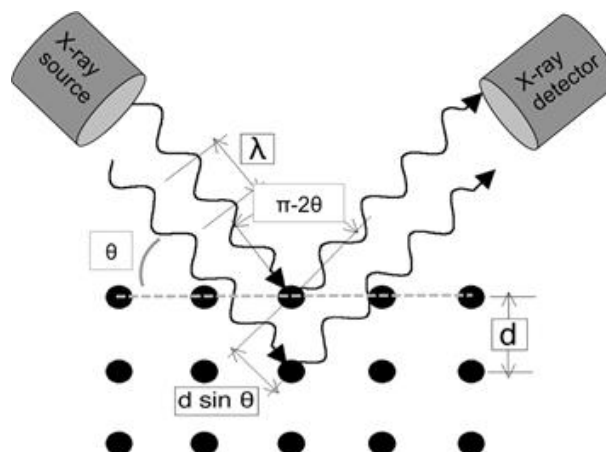


Figure 3.17: Illustration de la loi de bragg.

Pour effectuer une analyse par diffraction des rayons X, un échantillon solide est généralement préparé sous forme de poudre fine. L'échantillon est exposé à un faisceau de rayons X monochromatique, généralement produit par un tube à rayons X. Les rayons X diffractés sont ensuite enregistrés sur un détecteur, tel qu'un film photographique ou un détecteur électronique - se référer à la Figure 3.17, et un diagramme de diffraction est obtenu.

Ce diagramme de diffraction, connu sous le nom de diffractogramme, est ensuite analysé en utilisant des méthodes mathématiques et des programmes informatiques pour extraire les informations structurales du matériau.

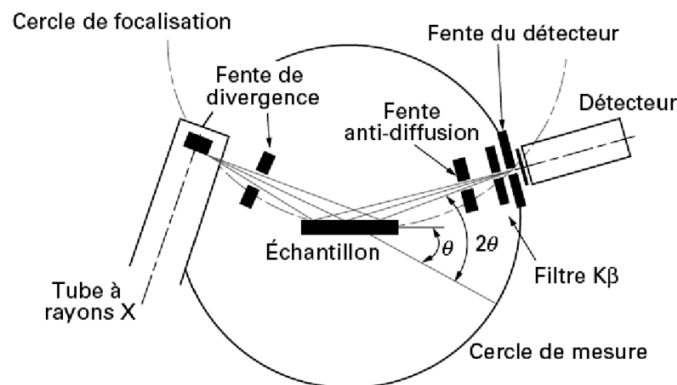


Figure 3.18: Schéma d'un diffractomètre à compteur avec la focalisation Bragg

Les analyses de la composition minéralogique par DRX ont été réalisées à l'aide de l'appareil **Bruker D8 ADVANCE**

4.3. Caractérisation chimique

Deux caractérisations chimiques sont effectuées :

4.3.1. Spectrométrie par Fluorescence X (FRX) :

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse élémentaire qui permet d'identifier et de quantifier la plupart des éléments chimiques présents dans un échantillon, qu'il soit solide ou liquide, et qu'il s'agisse de minéraux, de céramiques, de ciments, de métaux, d'huiles, d'eau ou de verre. Elle est capable d'analyser tous les éléments de béryllium à uranium, avec une gamme de concentration allant de quelques ppm à 100%. Cette technique fournit des résultats précis et reproductibles.

Le principe de la spectrométrie de fluorescence X illustré par la [Figure 3.18](#) est facile à comprendre : l'échantillon est placé sous un faisceau de rayons X, ce qui provoque une excitation des atomes de l'échantillon. Cette excitation est instable, et les atomes retournent rapidement à leur état fondamental en libérant de l'énergie sous forme de photons X. Chaque atome a une configuration électronique unique, de sorte que les photons X émis sont caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon. Cette émission secondaire de rayons X est appelée fluorescence X, et l'analyse de ce rayonnement permet d'identifier les éléments chimiques présents dans l'échantillon ainsi que leur concentration massique (Thirion-Merle et al., 2016).

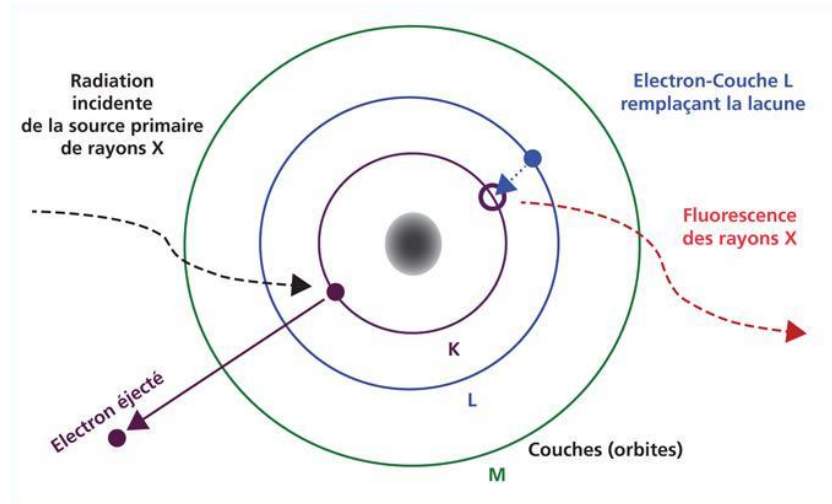


Figure 3.19: Principe de l'émission de rayons X par fluorescence

Les analyses de la composition chimique par FRX ont été réalisées par l'appareil Niton XL3t GOLDD

4.3.2. Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA):

La technique analytique SAA a été initialement décrite par Walsh en 1955 et représente aujourd'hui un outil puissant pour l'analyse quantitative.

Le principe de la technique d'analyse appelée spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) repose sur l'absorption de radiations de longueurs d'ondes spécifiques (UV-Vis) par des atomes libres à l'état fondamental. Ce processus provoque le passage d'un électron externe d'une orbite électronique à une autre, entraînant ainsi une modification de l'énergie. Chaque élément a une absorption qui lui est propre, et une source de rayonnement émet des radiations correspondant à la différence d'énergie entre l'état fondamental et un état excité de l'échantillon à analyser.

L'échantillon doit être transformé en atomes libres à l'état fondamental capables d'absorber une partie de ce rayonnement. Le rayonnement non absorbé est dirigé vers un monochromateur qui dirige la radiation vers un détecteur pour la mesure de l'absorption. L'absorption est directement proportionnelle au nombre d'atomes à l'état fondamental et donc à la concentration de l'analyte ($A = kc$, où k est un coefficient propre à chaque élément). Cependant, cette relation est difficile à vérifier en pratique.

La gamme de dosage dépend de la longueur d'onde utilisée. La courbe d'étalonnage peut être obtenue par la méthode directe pour une matrice simple ou par la méthode des ajouts dosés si la matrice est complexe ou inconnue. (I. Adouani, 2020)

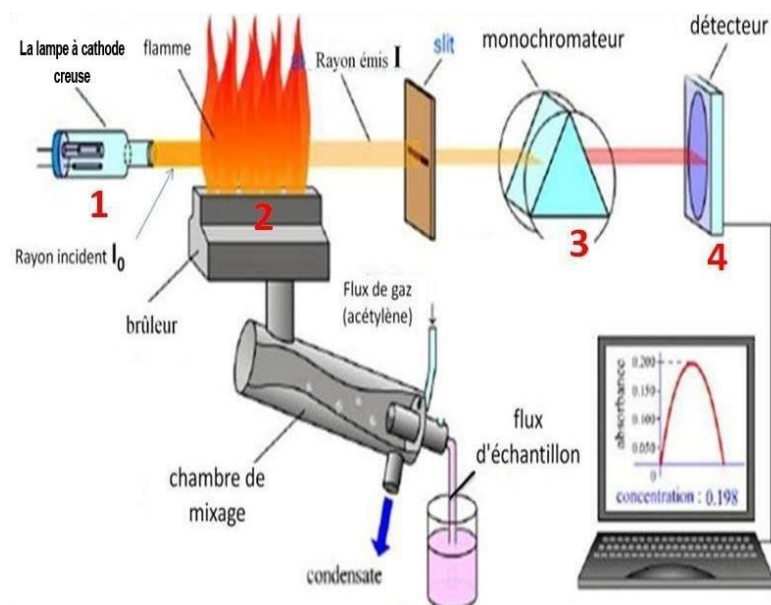


Figure 3.20 : Dispositif expérimental d'absorption Atomique.

Les analyses de la caractérisation Par FRX ont été réalisées à l'aide de l'appareil **Aanalytic Jeana Contraa 800**

5. caractérisation environnementale: Essais statiques

Pour déterminer le pouvoir neutralisant (PN) d'un échantillon, une première étape consiste à effectuer un test d'effervescence appelé test de Fizz. Pour cela, on ajoute 3 à 4 gouttes d'acide Chlorhydrique à 25 % à un échantillon de 2 g. En fonction de l'intensité de l'effervescence observée et donc de la réactivité des minéraux neutralisants (estimée visuellement), on détermine la concentration et le volume d'acide chlorhydrique à ajouter à l'échantillon pour sa minéralisation selon les règles présenté en Tableau 3.5. (Sobek et al., 1978)

Tableau 3.5 : Addition d'acide en fonction du test de Fizz.

Effervescence	Volume t=0 (mL)	Volume t=2h (mL)
Aucune	1	1
Légère	2	1
Modérée	2	2
Forte	3	2

Suite au test de Fizz, l'échantillon de 2 g est placé dans un erlenmeyer contenant 90 ml d'eau déionisée [Figure 3.20](#), ainsi que le volume d'acide chlorhydrique déterminé précédemment par le test de Fizz. L'erlenmeyer est ensuite placé sur un agitateur magnétique. Après 22 heures, le pH de la solution est contrôlé et des actions sont entreprises en fonction des scénarios suivants :

- Si le pH > 2.5 : le pH est ajusté dans un intervalle de 2 à 2.5 avec de l'HCl 1N.
- Si le 2 < pH < 2.5 : l'agitation est poursuivie jusqu'à 24h.
- Si le pH < 2, l'essai doit être refait.

Après un délai de 24 heures, de l'eau distillée est ajoutée jusqu'à atteindre un volume de 125 ml. Ensuite, la solution sera titrée avec du NaOH (0,1 N) jusqu'à atteindre un pH final de 8,3 pour évaluer l'acidité restante. La valeur du PN, exprimée en unités d'équivalents de kg CaCO₃/t, est déterminée comme suit :

$$PN = \frac{N(hcl)*V(hcl) - N(NaOh)*V(NaOh)*50}{m} \quad (3.3)$$

Tel que :

$N(HCl)$: est la normalité de l'acide chlorhydrique = 1N.

$V(HCl)$: est le volume d'acide chlorhydrique ajouté en ml.

$N(NaOH)$: est la normalité de l'hydroxyde de Sodium = 0.1N.

$V(NaOh)$ est le volume de l'hydroxyde de Sodium ajouté en ml.

m : masse de l'échantillon introduite en Kg.



Figure 3.21: Test Fizz et agitation

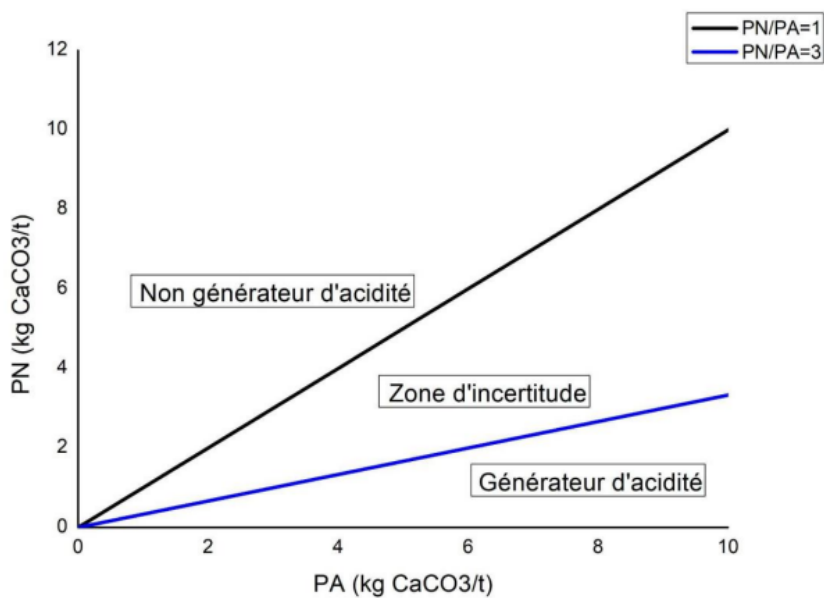


Figure 3.22: Critères de classification environnementale des rejets miniers

6. Essais d'extraction

L'extraction des minéraux à partir d'un échantillon de sol peut être réalisée selon deux méthodes principales : l'extraction par CaCl_2 0,01 M et l'extraction par HNO_3 2 M.

Pour l'extraction par CaCl_2 , on commence par prendre un erlenmeyer et y placer 5 g de l'échantillon de sol. Ensuite, on ajoute 50 mL de solution de CaCl_2 à l'erlenmeyer contenant l'échantillon. On procède à une agitation vigoureuse pendant

5 heures pour permettre la dissolution des minéraux du sol dans la solution de CaCl_2 . Une fois l'agitation terminée, on réalise une filtration pour séparer la solution d'extraction des résidus solides.(Kandziora-Ciupa et al.,2016)



Figure 3.23: Agitation et filtration des échantillons avec la solution de CaCl_2

Quant à l'extraction par HNO_3 , on prend un autre erlenmeyer et on y met 10 g de l'échantillon de sol. Ensuite, on ajoute 100 mL de solution d' HNO_3 à l'erlenmeyer contenant l'échantillon. On procède à une agitation pendant 1 heure pour faciliter la dissolution des minéraux du sol dans la solution d' HNO_3 . Après cette étape d'agitation, on réalise également une filtration pour séparer la solution d'extraction des résidus solides.(F. Khelif et al.,2021)

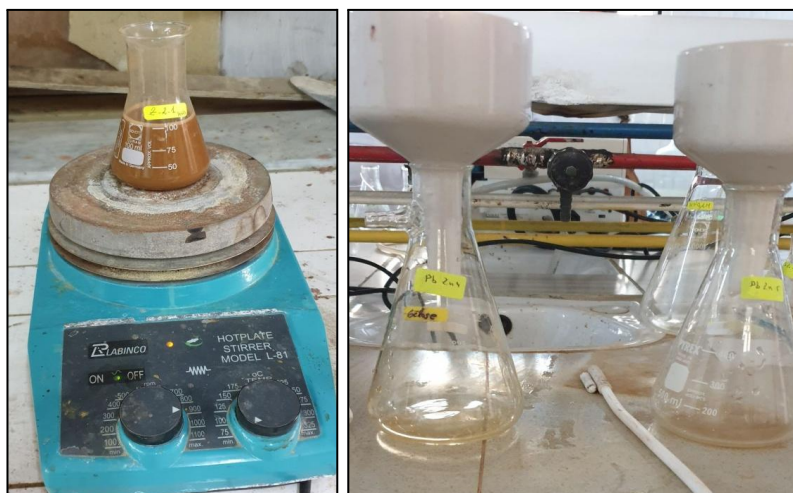


Figure 3.24: Agitation et filtration des échantillons avec la solution du HNO₃

L'utilisation de l'HNO₃ comme agent d'extraction permet généralement de dissoudre les métaux lourds et de libérer les cations métalliques présents dans l'échantillon. Cela permet d'évaluer la teneur en éléments tels que le plomb, le cuivre ou le zinc. En revanche, l'utilisation du CaCl₂ est plus appropriée pour extraire les nutriments du sol, tels que le calcium, le potassium ou le magnésium. Ce test est souvent utilisé pour évaluer la disponibilité de ces éléments pour les plantes et pour étudier la fertilité des sols. En résumé, l'HNO₃ est utilisé pour les métaux lourds, tandis que le CaCl₂ est préféré pour les nutriments et la fertilité des sols. Ces deux méthodes d'extraction permettent de solubiliser les minéraux présents dans l'échantillon de sol et de les séparer des autres composants du sol. Les solutions d'extraction obtenues peuvent ensuite être analysées pour déterminer la concentration et la composition des minéraux présents.

Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à l'explication en détail de nos méthodes de travail ainsi que des matériels utilisés tout au long de notre étude. Nous avons, dans un premier temps, mis en exergue l'importance de l'échantillonnage, son plan et son objectif, qui sont essentiels pour obtenir des résultats fiables et représentatifs. Les deux sites d'étude, Kef Oum Teboul et Boucaid, ont été spécifiquement choisis et la répartition des points d'échantillonnage a été décrite en détail pour chaque site.

Les processus de préparation des échantillons, que ce soient les plantes ou les sols, ont été également détaillés, illustrant l'attention et le soin que nous avons portés à cette étape essentielle pour assurer l'intégrité et la pertinence de nos échantillons.

La caractérisation de nos échantillons a ensuite été présentée, où nous avons examiné en détail les aspects physico-chimiques, minéralogiques et chimiques. Ces caractérisations approfondies nous ont permis de comprendre plus en détail la nature et la composition de nos échantillons.

Enfin, nous avons effectué un essai statique chimique (Essai sobek modifié) et divers essais d'extraction qui nous ont permis de tirer des conclusions précieuses sur nos échantillons et d'orienter nos travaux futurs.

Au terme de ce chapitre, nous avons maintenant une approche méthodologique claire, une connaissance approfondie de nos échantillons et une série de résultats initiaux prometteurs pour guider nos recherches futures. Nous sommes donc prêts à passer à l'analyse détaillée de ces résultats, qui sera présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Résultats et interprétations

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous penchons sur l'ensemble des résultats obtenus et de leur interprétation dans le cadre de notre projet de fin d'études axé sur l'évaluation de la contamination des sols et des plantes par les métaux lourds. Pour réaliser ce travail d'investigation, nous avons effectué des prélèvements d'échantillons de sols et de plantes dans diverses zones d'étude et avons mesuré la concentration de métaux lourds présents grâce à différentes techniques d'analyse.

Suite à l'analyse de ces échantillons, nous avons calculé divers indices de pollution pour évaluer de manière plus précise le niveau de contamination des plantes et des sols dans les zones d'intérêt. Ces indices, basés sur les concentrations de métaux lourds obtenues, offrent un aperçu détaillé de l'état actuel de la pollution dans ces zones.

En complément à ces analyses et calculs, nous avons également employé les résultats obtenus pour réaliser une cartographie détaillée de la contamination par les métaux lourds au sein des zones étudiées. Cette cartographie offre une représentation visuelle de l'étendue et de l'intensité de la contamination, permettant de visualiser plus facilement les zones les plus affectées.

L'ensemble de ces étapes nous a permis d'approfondir notre compréhension de l'ampleur de la contamination par les métaux lourds dans les zones d'étude, ainsi que ses implications potentielles sur l'environnement. Dans ce chapitre, nous partagerons donc nos résultats, les interprétations que nous en avons tirées et comment elles pourront contribuer à formuler des stratégies de gestion environnementale pour ces zones à l'avenir.

1. Caractérisation des échantillons

1.1. Caractérisation physico-chimique

1.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs du pH du sol sont représentées dans les Tableau 4.1 ci-dessous :

Tableau 4.1 : Potentiel d'hydrogène (pH): site de Kef Oum Teboul

E	Z.1.1	Z.1.2	Z.1.3	Z.1.4	Z.1.5	Z.1.6	Z.1.7	Z.1.8	Z.1.9	Z.1.10	Z.2.1	Z.2.2	Z.2.3	Z3
pH	6.73	5.56	5.72	4.73	6.84	5.74	4.73	6.3	5.29	7.30	4.16	2.48	2.5	3.96

L'interprétation des résultats du pH du sol obtenus sur le site minier abandonné de kef Oum Teboul révèle des informations cruciales sur les conditions de ce site et ses caractéristiques environnementales. Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité du sol et joue un rôle important dans la disponibilité des nutriments pour les plantes, ainsi que dans les processus de dégradation des polluants.

Dans la zone 1, nous avons observé une valeur maximale de pH de 7.3 et une valeur minimale de 4.73. Ces valeurs indiquent une plage relativement large de pH, suggérant une variation modérée de l'acidité ou de l'alcalinité du sol dans cette zone. Une valeur maximale de 7.3 est proche de la neutralité, tandis que la valeur minimale de 4.73 indique une légère acidité. Cette plage de pH peut offrir des conditions favorables à la croissance végétale, bien que des ajustements puissent être nécessaires pour optimiser la fertilité du sol.

Dans la zone 2, les résultats du pH montrent une plage plus étroite avec une valeur maximale de 4.16 et une valeur minimale de 2.5. Ces valeurs indiquent une acidité élevée dans cette zone, avec un pH nettement inférieur à la neutralité. Une telle acidité peut être attribuée à la présence de contaminants issus des activités minières passées, tels que des métaux lourds ou des résidus acides. Cette acidité accrue peut entraîner des effets néfastes sur la biodiversité et la capacité du sol à soutenir la croissance des plantes.

En ce qui concerne la zone 3, le pH du sol a été mesuré à 3.96. Cette valeur révèle une acidité notable dans cette zone, mais légèrement moins élevée que dans la zone 2. L'acidité du sol peut être attribuée à des facteurs similaires à ceux mentionnés précédemment.

Il est crucial de prendre en compte ces variations de pH du sol dans la planification des mesures de remédiation et de restauration environnementale du site minier abandonné. Des actions ciblées peuvent être nécessaires pour atténuer l'acidité excessive dans les zones 2 et 3.

Tableau 4.2 : Potentiel d'hydrogène (pH) des rejet de plomb zinc Site de Boucaid

Echantillon	PbZn1	PbZn2	PbZn3	PbZn4	PbZn5
pH	6.62	7.23	7.82	7.32	7.27

Les résultats du pH du sol sur le rejet minier de plomb et de zinc mettent en évidence une plage de pH relativement étroite, avec une valeur maximale de 7.82 et une valeur minimale de 6.62. Ces valeurs indiquent une légère alcalinité du sol, avec une proximité du pH neutre.

Les résultats du pH du sol sur le rejet minier de plomb et de zinc révèlent une légère alcalinité du sol, avec des valeurs se situant dans une plage relativement étroite. Cependant, il est crucial de compléter ces résultats en évaluant les concentrations de plomb, de zinc et d'autres contaminants associés pour obtenir une image plus complète de la qualité environnementale du sol et déterminer les mesures de remédiation nécessaires.

Tableau 4.3 : Potentiel d'hydrogène (pH) des rejet de Baryte Site de Boucaid

Echantillon	B1	B2	B3	B4	B5
pH	7.80	7.31	7.6	7.36	8.32

L'interprétation des résultats du pH des échantillons de sols de rejets miniers de baryte révèle une plage relativement étroite, avec une valeur maximale de 8.32 et une valeur minimale de 7.6. Ces valeurs indiquent une légère alcalinité du sol, avec un pH proche de la neutralité.

Il convient également de prendre en compte le contexte environnemental spécifique et les effets potentiels des rejets miniers de baryte sur les écosystèmes environnants, tels que les écosystèmes aquatiques ou les écosystèmes terrestres adjacents. Même si le pH du sol est légèrement alcalin, il est important de s'assurer que d'autres contaminants potentiels associés à la baryte ne sont pas présents et ne représentent pas de risques pour l'environnement.

1.1.2. Teneur en eau

Les résultats sont présentés dans le tableau ci dessous :

Tableau 4.4 : Teneur en eau des rejets du site de Kef Oum Teboul

E	Z1.1	Z.1.3	Z.1.4	Z.1.5	Z.1.6	Z.1.7	Z.1.8	Z.1.9	Z.1.10	Z.M	Z.2.1	Z.2.2	Z.2.3	Z.3
W %	1,28	3,57	3,97	2,35	3,98	5,98	3,70	3,85	0,94	3,32	9,89	4,46	2,89	2,89

L'interprétation des résultats de la teneur en eau des échantillons de sol révèle une variation importante entre les différents échantillons, avec une valeur maximale de 9.89 et une valeur minimale de 0.94.

Les résultats de la teneur en eau des échantillons de sol indiquent une variation significative entre les échantillons, avec des valeurs maximale et minimale distinctes. Il est nécessaire d'évaluer les conditions environnementales spécifiques et d'analyser d'autres facteurs pour comprendre les implications de ces variations de teneur en eau sur la santé et la productivité du sol.

Tableau 4.5 : Teneur en eau des rejet de Pb Zn du Site de Boucaid

Echantillons	PbZn1	PbZn2	PbZn3	PbZn4	PbZn5
W%	5,92	2,58	5,53	2,18	2,49

Une teneur en eau relativement élevée, représentée par la valeur maximale de 5.92, peut indiquer une saturation ou une humidité du sol. Cela peut être dû à des conditions environnementales telles que des précipitations abondantes ou un mauvais drainage du sol. D'autre part, une teneur en eau minimale de 2.49 indique un sol relativement sec. Cela peut être dû à des conditions climatiques arides, à une évaporation rapide de l'eau ou à une capacité de rétention d'eau faible du sol.

Tableau 4.6 : Teneur en eau des rejet de Baryte du Site de Boucaid

Echantillon	B1	B2	B3	B4	B5
W%	1,65	0,94	0,82	1,43	0,80

Les résultats de la teneur en eau des échantillons de sol de rejets de baryte montrent une variation entre les échantillons, avec des valeurs maximale et minimale distinctes.

Il convient de noter que la teneur en eau seule ne fournit pas une image complète de la qualité du sol et de l'environnement. Il est essentiel de considérer d'autres paramètres, tels que la composition chimique des rejets de baryte, notamment la présence de métaux lourds ou d'autres contaminants, qui peuvent avoir des effets néfastes sur le sol et les écosystèmes environnants.

1.2 Caractérisation minéralogique.

Analyses de la composition minéralogique par DRX (site de Kef Oum teboul)

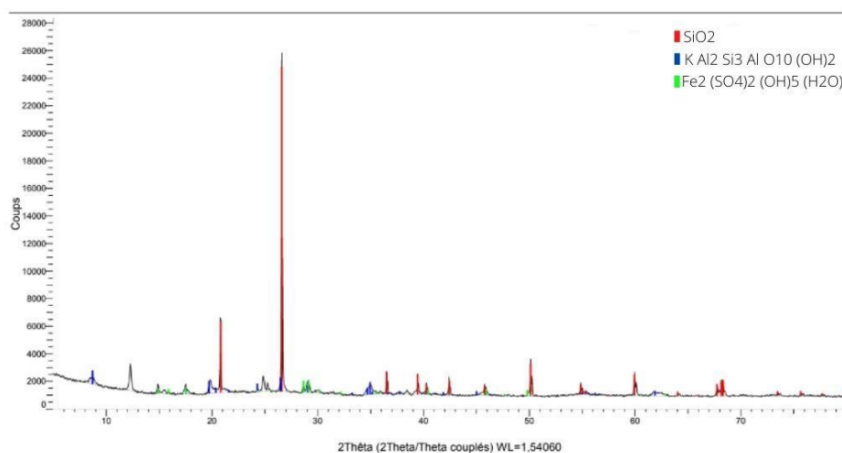


Figure 4.1 : Spectre DRX de la zone 1

Interprétation

L'échantillon de la zone 1 se compose principalement de silicates tels que le Quartz (81,3%) et la Muscovite (10,1%). On trouve également des minéraux secondaires qui indiquent des réactions d'oxydation, tels que l'hydroxy-sulfate de fer, également connu sous le nom de Carpho Siderite (8,6%).

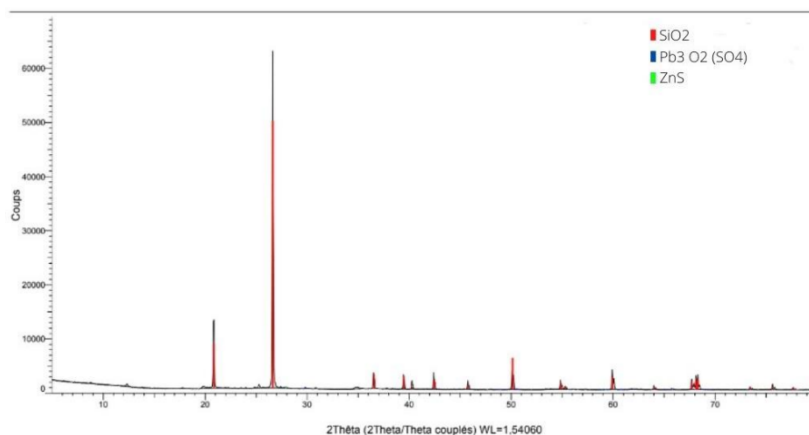


Figure 4.2 : Spectre DRX de la zone 2

Interprétation

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon de la zone 2 révèle une composition minéralogique riche en silice et dépourvue de minéraux carbonatés. L'échantillon étudié est principalement constitué de quartz (plus de 98%) et de wurtsite (0,3%). Un minéral secondaire, l'anglésite, a également été identifié dans l'échantillon, représentant environ 1,6% de sa composition.

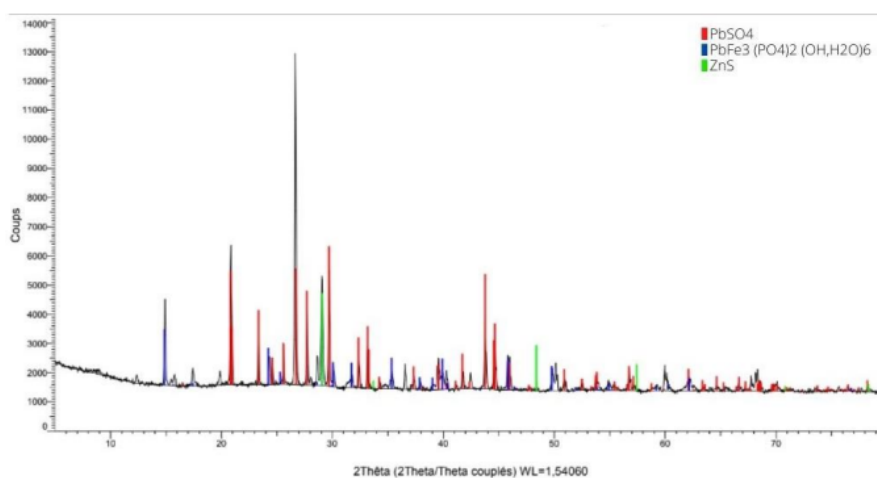


Figure 4.3: Spectre DRX de la zone 3

Interprétation

L'analyse quantitative par DRX de ce rejet a révélé une forte présence de sulfates, principalement sous forme d'anglésite (30,9%) et de kintoreite (58,7%). De plus, une proportion significative de sulfure de zinc (10,4%) a été observée. Ces concentrations élevées en plomb et en zinc font de ce rejet un candidat potentiel pour un traitement visant à les extraire.

Analyse de la composition minéralogique par DRX (la zone de Boucaid):

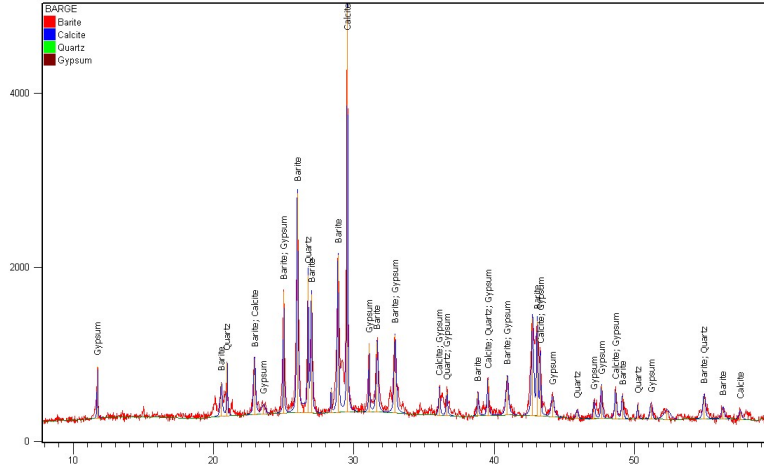


Figure 4.4 : spectre DRX de la zone de rejet de baryte

Interprétation

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon du rejet de la baryte met en évidence une composition minéralogique comprenant une abondance de quartz, de gypse et de barytine, avec une prédominance de calcite.

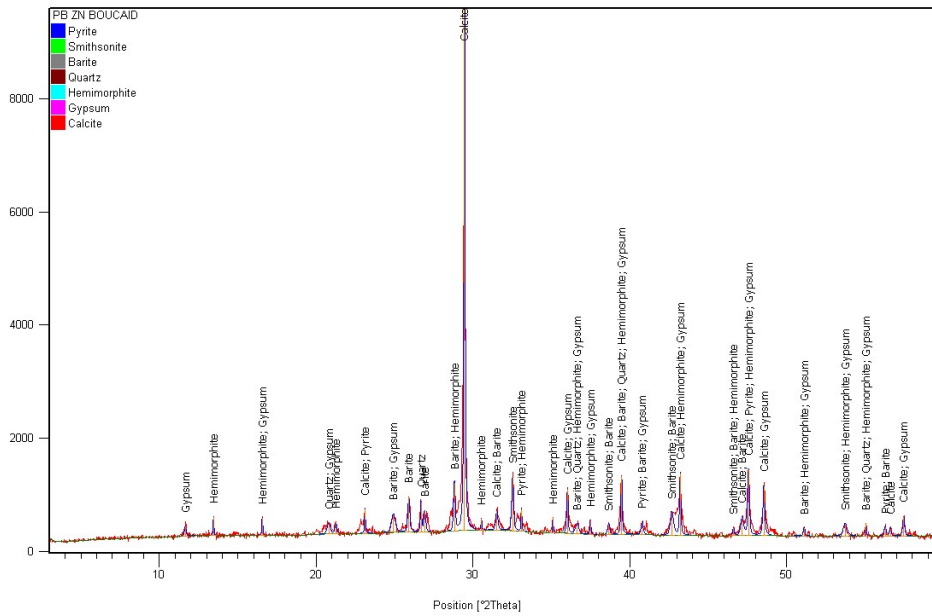


Figure 4.5: spectre DRX de la zone de rejet de Pb/Zn

Interprétation

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon du rejet de plomb-zinc a révélé la présence abondante de baryte, de quartz, de hémimorphite et de gypse, avec une domination de la calcite.

Caractérisation environnementale**Essais statiques**

On utilise les formules suivantes pour calculer les critères PN et PA :

$$PA = 31,25 \cdot \text{Sulfures\%}$$

$$PN = \frac{\text{normalité Hcl} \times \text{volume} - (\text{Normalité NaOH} \times \text{volume}) \text{ masse de l'échantillon}}{\text{masse de l'échantillon}} \times 50 \quad (4.1)$$

Ci-dessous, vous trouverez les résultats détaillés des essais statiques, effectués selon le protocole modifié de (Lawrence et Wang, 1996), présentés dans le tableau suivant.

Site de kef oum teboul

L'expérience menée sur les échantillons de Kef Oum Teboul avec le test de Sobek a révélé un résultat négatif. Cette issue peut être expliquée par l'absence de matériaux neutralisants dans les échantillons, tels que les carbonates.. Les matériaux neutralisants sont des substances qui ont la capacité de réduire l'effet ou la présence de certaines substances indésirables. Dans ce cas, les échantillons prélevés à Kef Oum Teboul ne contiennent apparemment pas de tels matériaux, ce qui pourrait expliquer pourquoi le test de Sobek n'a pas détecté de résultats positifs. Sans la présence de ces matériaux neutralisants, les contaminants ou les éléments indésirables présents dans les échantillons peuvent demeurer actifs et influencer les résultats des tests de manière négative.

Site de boucaïd :

Tableau 4.7 : Résultats des essais statique plomb zinc

Echantillon	Pb Zn1	Pb Zn 2	Pb Zn 3	Pb Zn 4	Pb Zn 5
effervescence	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
t=0 volume de HCL ajouté mL	2	2	2	2	2
t=2h volume de HCL ajouté mL	2	2	2	2	2
t=24h volume de NaOH ajouté mL	27	28	38	17	25
PN (kg CaCO ₃ /t)	-17500	-20000	-45000	7500	-12500
PA (kg CaCO ₃ /t)	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15
PN/PA	-17500	-1970.44	-4433.49	689.655	-1231.52
PN-PA (kg CaCO ₃ /t)	-17510.15	-20010.15	-45010.15	7489.85	-12510.15

Selon le pouvoir neutralisant (PN), tous les points indiquent une quantité significative de minéraux acidogènes, à l'exception du point 4 qui présente une quantité considérable de carbonate. En ce qui concerne le potentiel de génération d'acidité (PA), nous constatons des valeurs faibles de PA, ce qui est attribuable à la présence de faible teneur en soufre dans ces échantillons.

Les résultats du rapport PN/PA et du PN-PA indiquent des variations significatives dans les caractéristiques des rejets miniers étudiés. Les valeurs négatives du PN/PA et du PN-PA suggèrent un potentiel élevé de génération d'acidité, tandis que la valeur positive du PN-PA indique un potentiel de neutralisation.

Tableau 4.8 : Résultats des essais statique baryte

Echantillon	B1	B2	B3	B4	B5
effervescence	forte	forte	forte	forte	forte
t=0 volume de HCL ajouté mL	3	3	3	3	3
t=2h volume de HCL ajouté mL	2	2	2	2	2
t=24h volume de NaOH ajouté mL	9	8	26	3	2,5
PN (kg CaCO ₃ /t)	27500	30000	-12500	42500	43750
PA (kg CaCO ₃ /t)	552.5	552.5	552.5	552.5	552.5
PN/PA	49.77	54.29	-22.62	76.92	79.18
PN-PA (kg CaCO ₃ /t)	26947.5	29447.5	-13052.5	41947.5	43197.5

Selon le potentiel neutralisant (PN) de tous les points, ils indiquent une quantité de carbonate, à l'exception du point 3 qui présente une quantité significative de minéraux acidogènes. En ce qui concerne le potentiel de génération d'acidité (PA), nous constatons des valeurs élevées de PA, ce qui est attribuable à la présence d'un pourcentage élevé de soufre dans ces échantillons.

Les résultats fournis indiquent des variations dans les valeurs du rapport PN/PA et du PN-PA pour les rejets miniers étudiés. Certains montrent un potentiel élevé de neutralisation, tandis que d'autres indiquent un potentiel de génération d'acidité.

1.3 Caractérisation environnementale

Essais d'extractions

L'analyse des échantillons prélevés dans les sites miniers de Kef Oum Teboul et Boucaid a été réalisée en utilisant deux méthodes d'extraction différentes, à savoir l'utilisation de HNO₃ et de CaCl₂. La différence entre ces deux essais réside dans les mécanismes d'extraction et les informations qu'ils fournissent. L'essai avec HNO₃ évalue la mobilité des métaux dans le sol, tandis que l'essai avec CaCl₂ évalue la quantité de métaux liés aux phases solides du sol. Par conséquent, ces deux méthodes complémentaires permettent d'obtenir une vision plus complète de la présence et de la disponibilité des métaux dans les sites miniers de Kef Oum Teboul

et Boucaid, ce qui est essentiel pour évaluer les risques environnementaux associés à ces activités minières.

Interprétations de la SAA : l'extraction par HNO₃ 2M pour le site de Kef Oum Teboul

Remarque : Limites réglementaires pour les concentrations de métaux lourds dans le sol sont : Cd (1 – 3 mg/L), Pb (50 - 130 mg/L), Cu (50 - 140 mg/L) et Zn (150 – 300 mg/L). (EU-Richtlinie 91/692/EWG, ABI EG, 31. Dec. 1991 Nr. L377, p. 48) et KSVO, 1992).

Cadmium (Cd): Les concentrations de cadmium varient entre 2,166 mg/L et 25,115mg/L. On observe une augmentation progressive des concentrations du point Z1.1 jusqu'au point Z2.3, puis une diminution au point Z3. Les valeurs les plus élevées se trouvent aux points Z2.1, Z2.2 et Z2.3, suggérant une possible source de contamination dans cette zone.

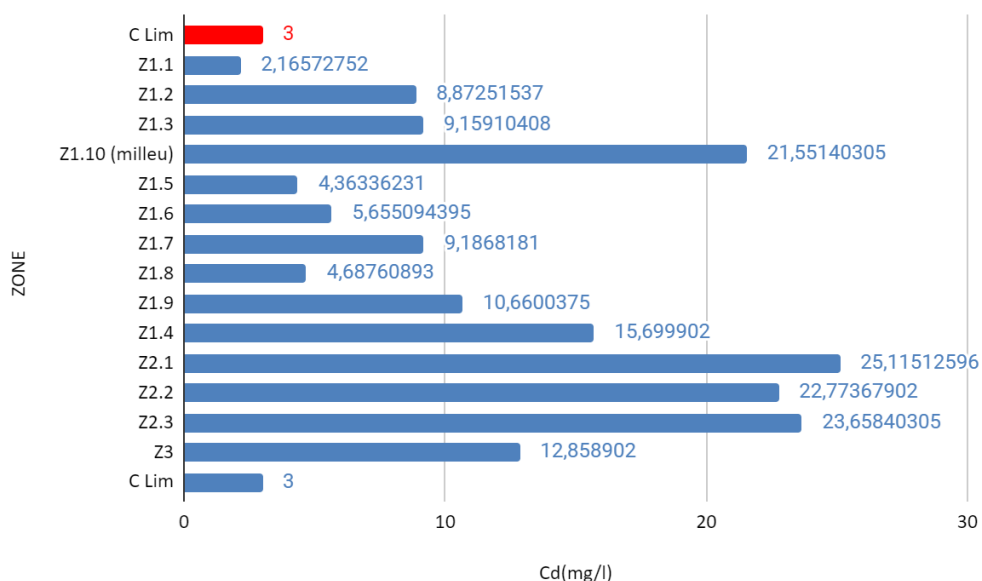


Figure 4.6 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)

Plomb (Pb): Les concentrations de plomb varient considérablement, allant de 164,660ml/L à 1865,558 mg/L . Les points Z1.10, Z2.1, Z2.2 et Z2.3 montrent les concentrations les plus élevées, indiquant une forte présence de plomb dans ces zones spécifiques.

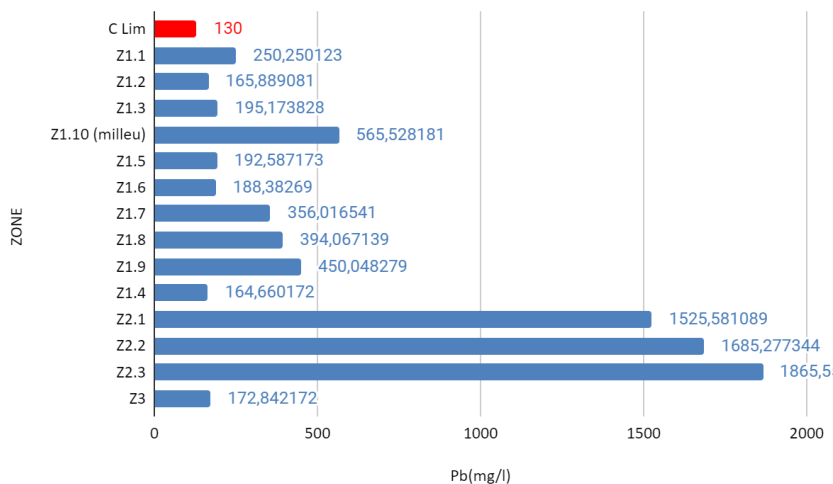


Figure 4.7 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)

Cuivre (Cu) : Les concentrations de cuivre varient de 2,154 mg/L à 8,685mg/L. Les points Z1.7, Z1.8 et Z1.9 présentent les concentrations les plus élevées de cuivre. Cependant, les valeurs dans l'ensemble restent relativement faibles par rapport aux seuils de danger pour le cuivre.

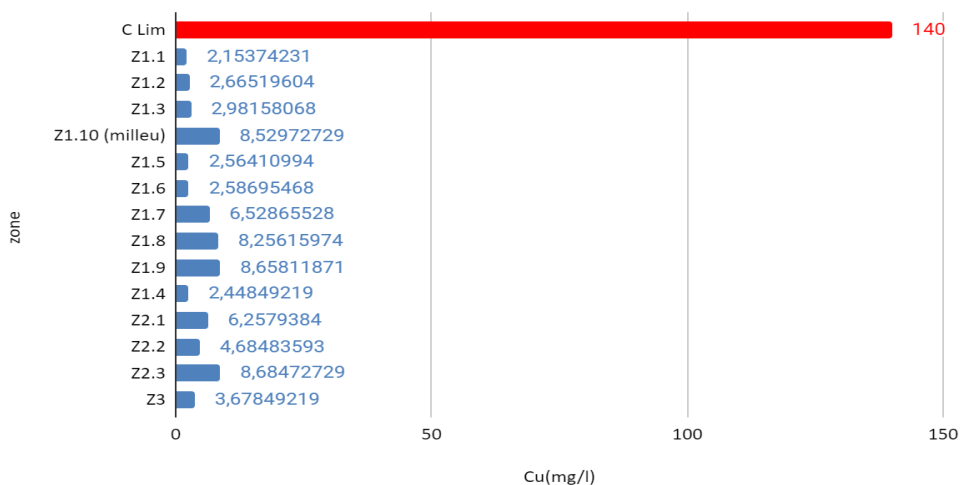


Figure 4.8 : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)

Zinc (Zn) : Les concentrations de zinc varient de 110,129mg/L à 856,561mg/L. Les points Z2.1, Z2.2 et Z2.3 montrent des concentrations particulièrement élevées de

zinc, indiquant une contamination significative. Les autres points de prélèvement montrent également des concentrations de zinc supérieures à la normale.

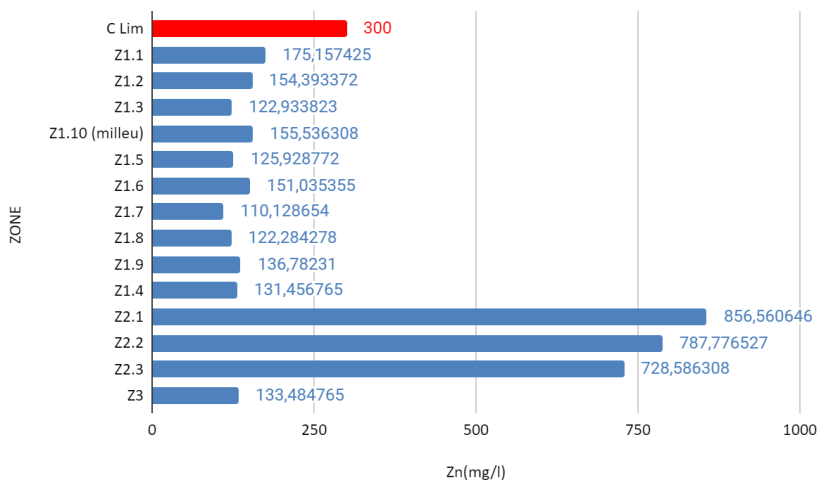


Figure 4.9 : Graphique à barre de la concentration du Zinc(mg/l)

interprétations de la SAA : l'extraction par Cacl2 0,01 M pour le site de Kef Oum Teboul :

Cadmium (Cd) : Les concentrations de cadmium varient de 0,828mg/L à 1,949mg/L, montrant des niveaux relativement faibles dans l'ensemble des points de prélèvement. Les valeurs sont similaires entre les différents points, indiquant une distribution relativement homogène du cadmium dans la zone étudiée.

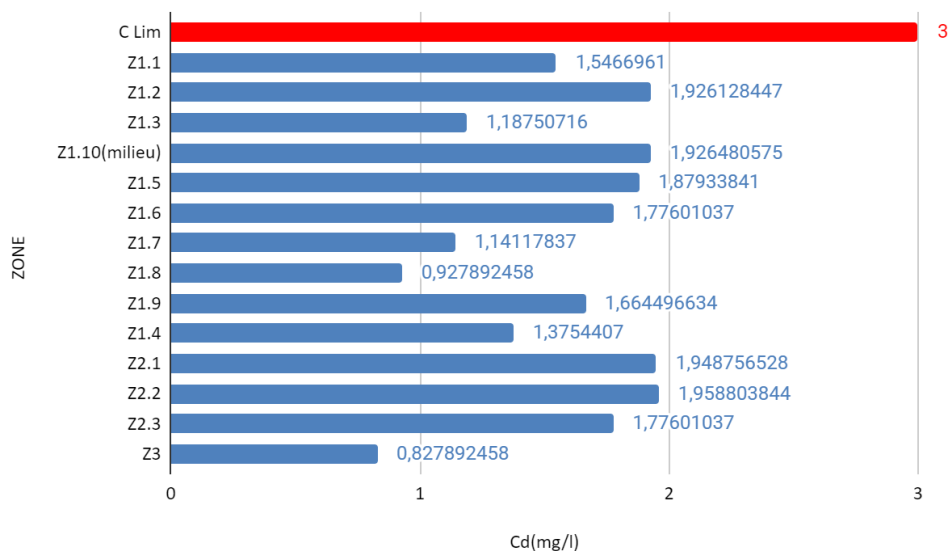


Figure 4.10 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)

Plomb (Pb) : Les concentrations de plomb varient de 13,097mg/L à 21,922mg/L. Les points Z2.2 et Z2.3 présentent les concentrations les plus élevées, tandis que les autres points montrent des niveaux plus bas. Cependant, dans l'ensemble, les concentrations de plomb restent relativement modérées et ne dépassent pas les valeurs précédentes les plus élevées.

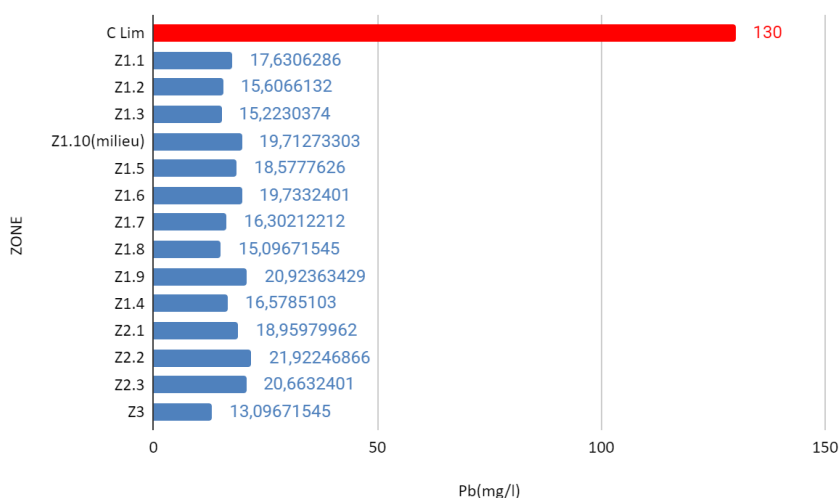


Figure 4.11 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)

Cuivre (Cu) : Les concentrations de cuivre varient de 0,617mg/L à 1,394mg/L. Les points Z2.2 et Z2.3 affichent les concentrations les plus élevées de cuivre, tandis que les autres points présentent des niveaux plus faibles. Les concentrations de cuivre restent généralement basses par rapport aux seuils de danger.

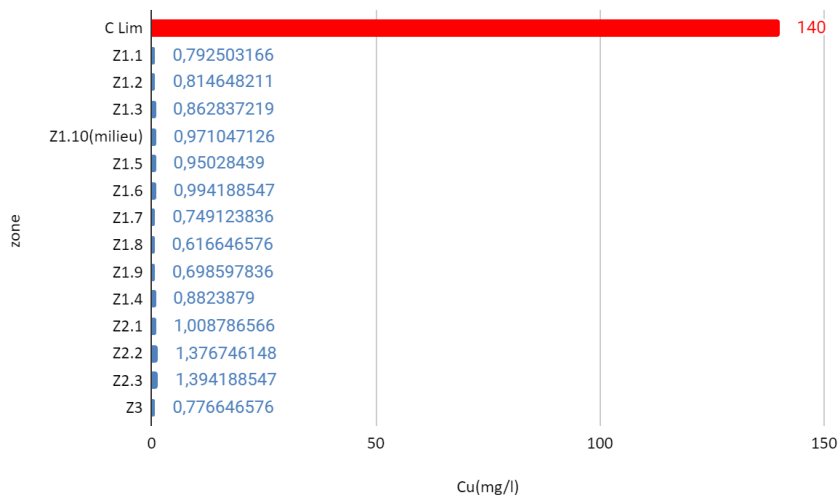


Figure 4.12. : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)

Zinc (Zn) : Les concentrations de zinc varient de 168,656mg/L à 182,167mg/L. Les points Z2.2 et Z2.3 montrent les concentrations les plus élevées, tandis que les autres points présentent des niveaux légèrement inférieurs. Les concentrations de zinc restent dans une fourchette relativement élevée, mais elles ne semblent pas avoir considérablement augmenté par rapport aux valeurs précédentes.

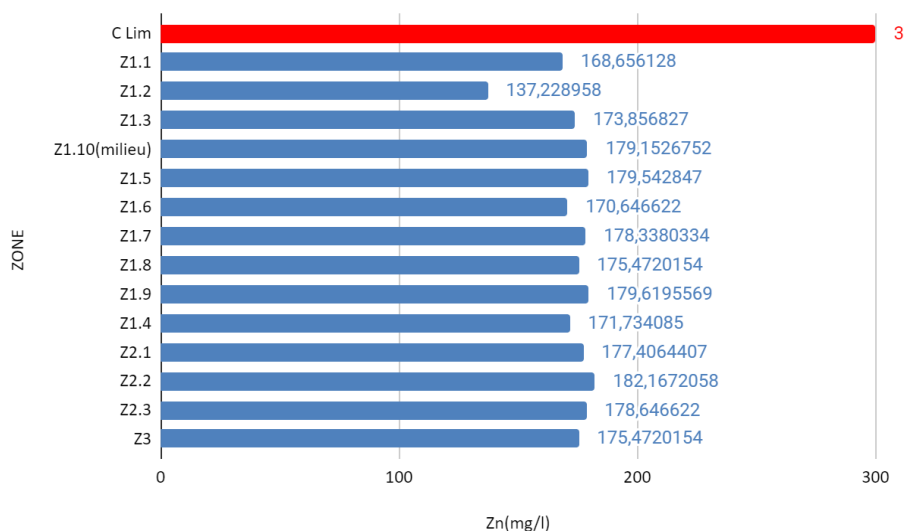


Figure 4.13: Graphique à barre de la concentration du zinc (mg/l)

Comparaison entre les résultats fournis entre l’essais d’extraction du HNO₃ et CaCl₂ :

En comparant les deux méthodes d'extraction, on observe que l'extraction avec l'HNO₃ conduit à des concentrations plus élevées de cadmium, plomb et zinc par rapport à l'extraction avec le CaCl₂. Les points Z2.1, Z2.2 et Z2.3 sont particulièrement affectés par ces métaux lors de l'extraction avec l'HNO₃. Cependant, pour le cuivre, les concentrations restent relativement faibles et conformes aux limites réglementaires dans les deux méthodes d'extraction.

Interprétations de la SAA: l'extraction par HNO₃ 10% pour le site de Boucaid

la zone de plomb zinc:

concentration du Cadmium(Cd) :

- Les points 1, 2, 3, 4 et 5 ont des concentrations de Cd situées dans une plage relativement étroite, allant de 5.696mg/L à 6.486mg/L.
- Ces valeurs suggèrent une présence modérée de cadmium dans le sol aux différents points.

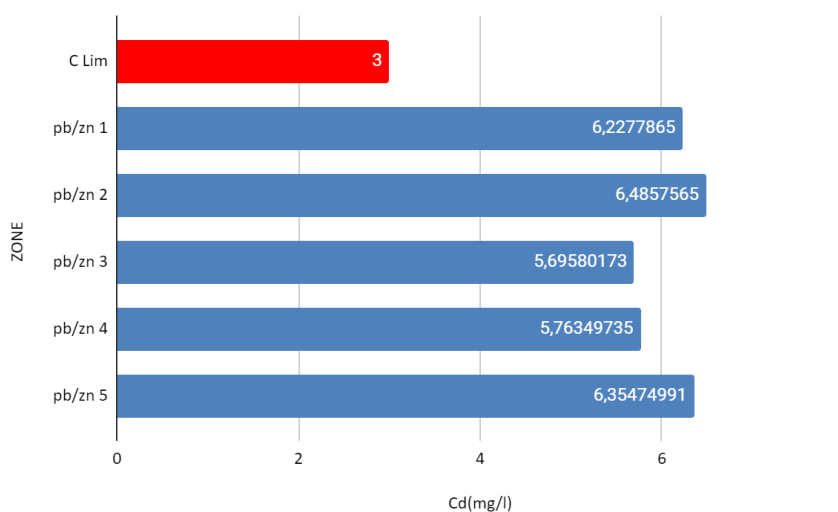


Figure 4.14 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)

Concentration du Plomb(Pb)

- Les concentrations de Pb varient davantage, allant de 73.590mg/L à 98.006mg/L.
- Le point 1 présente la concentration la plus élevée de plomb, indiquant une possible contamination plus importante à cet endroit.
- Les autres points ont des concentrations de plomb plus faibles, mais restent tout de même significatives.

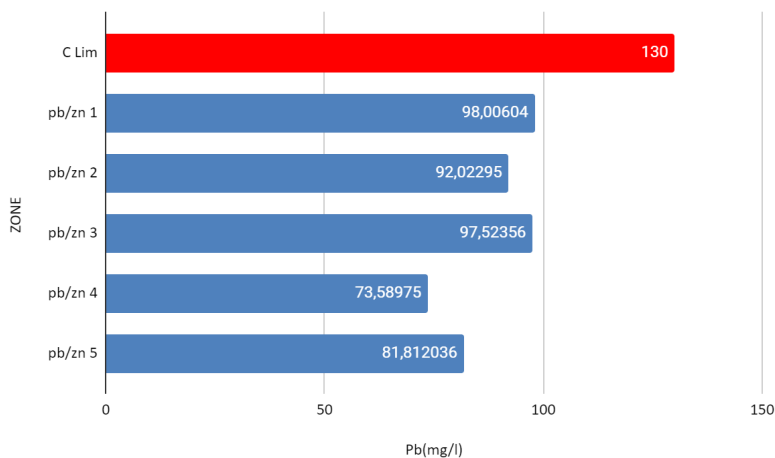


Figure 4.15 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)

Concentration du Cuivre (Cu):

- Les concentrations de Cu sont relativement faibles et similaires entre les points, allant de 2.024mg/L à 2.996mg/L.

- Aucun point ne présente une concentration de cuivre significativement plus élevée par rapport aux autres.

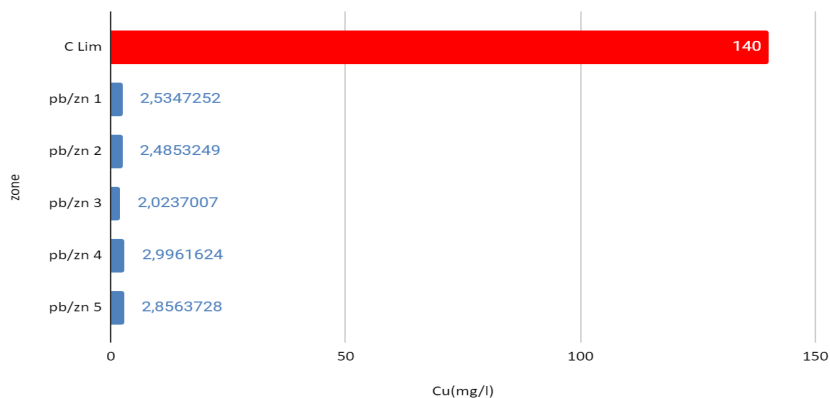


Figure 4.16 : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)

Concentration du Zinc (Zn)

- Les concentrations de Zn varient entre 970.452mg/L et 1363.223mg/L.
- Le point 1 présente la concentration de zinc la plus élevée, indiquant une possible source de contamination ou d'utilisation importante de zinc dans cette zone.
- Les autres points ont des concentrations de zinc plus faibles, mais elles restent relativement élevées.

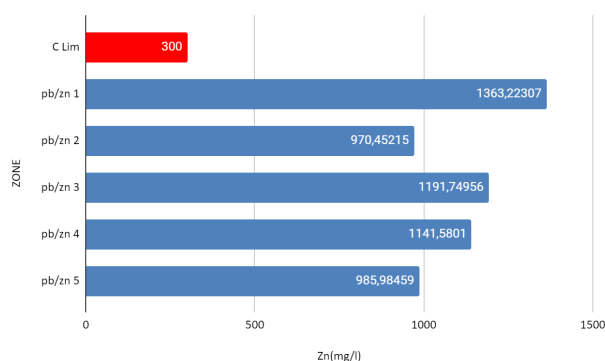


Figure 4.17 : Graphique à barre de la concentration du Zinc (mg/l)

Interprétations de la SAA: l'extraction par Cacl2 à 0,001M pour le site de Boucaid:

la zone de plomb zinc

Concentration du Cd (Cadmium) :

- Tous les points présentent des concentrations de cadmium relativement faibles, inférieures à 0.7mg/L.
- Les points 1, 3 et 5 ont des concentrations légèrement plus élevées que les points 2 et 4.

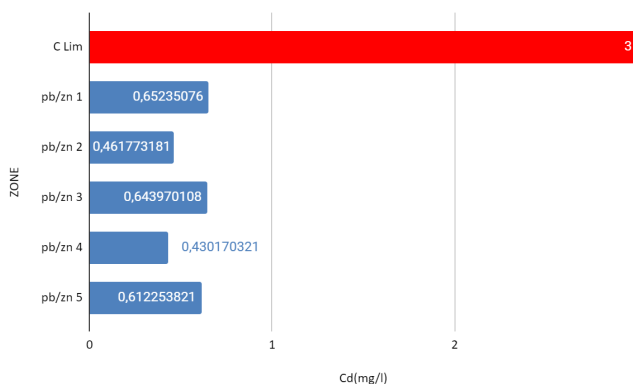


Figure 4.18 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)

Concentration de Pb (Plomb) :

- Les concentrations de plomb varient entre 0.292mg/L et 0.888mg/L.
- Le point 2 présente la concentration la plus élevée de plomb, tandis que le point 1 a la concentration la plus faible.

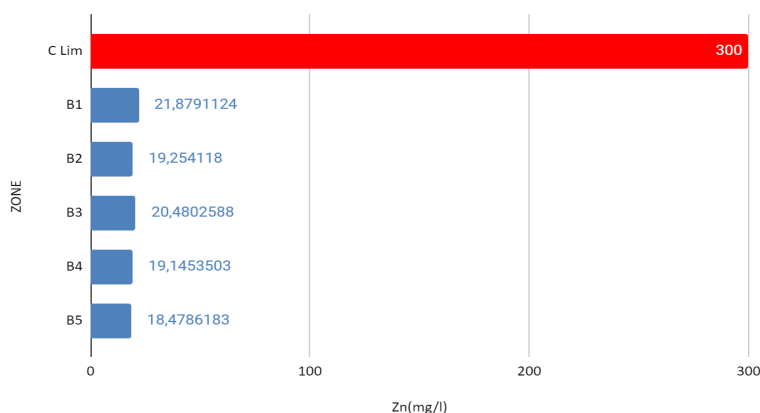


Figure 4.19 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)

Concentration de Cu (Cuivre) :

- Les concentrations de cuivre sont également relativement faibles, allant de 0.009mg/L à 0.192mg/L.

- Le point 5 présente la concentration la plus élevée de cuivre, tandis que le point 4 a la concentration la plus basse.

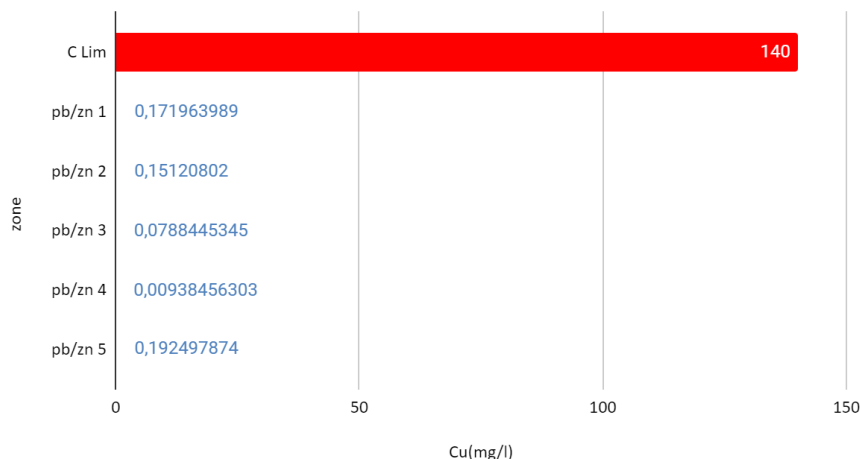


Figure 4.20 : Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)

Concentration de Zn (Zinc)

- Les concentrations de zinc varient entre 39.719mg/L et 47.640mg/L.
- Le point 3 présente la concentration la plus élevée de zinc, tandis que le point 1 a la concentration la plus basse.

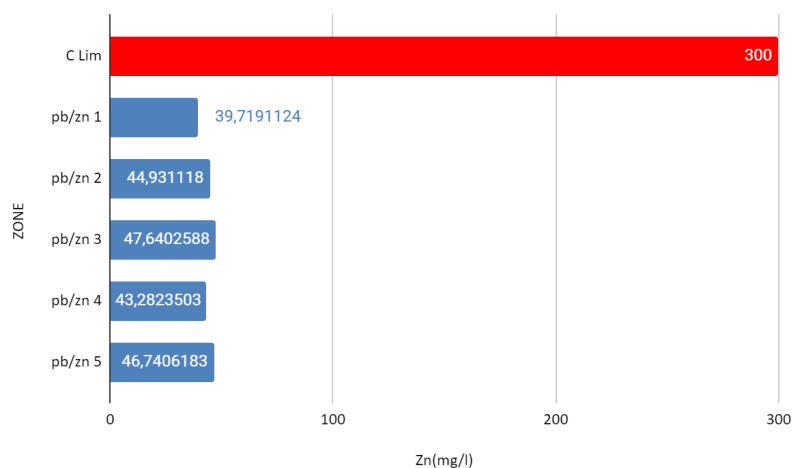


Figure 4.21 : Graphique à barre de la concentration du Zinc (mg/l)

Comparaison entre les résultats fournis entre l'essais d'extraction du HNO3 et CaCl2

D'après les résultats on observe généralement des concentrations plus élevées de cadmium, plomb, cuivre et zinc lors de l'utilisation de l'HNO3 par rapport au CaCl2. Cependant, dans les deux cas, les concentrations de ces métaux restent en grande

partie conformes aux limites réglementaires établies, à l'exception de certains points spécifiques où des concentrations plus élevées ont été détectées.

Interprétations de la SAA : l'extraction par HNO₃ 10% pour le site de Boucaïd:

la zone de baryte :

Concentration de Cd (Cadmium) :

- Les concentrations de cadmium varient de 0.556mg/L à 3.241mg/L.
- Le point 4 présente une concentration de cadmium nettement plus élevée que les autres points, tandis que les points 1, 2, 3 et 5 ont des concentrations plus faibles.

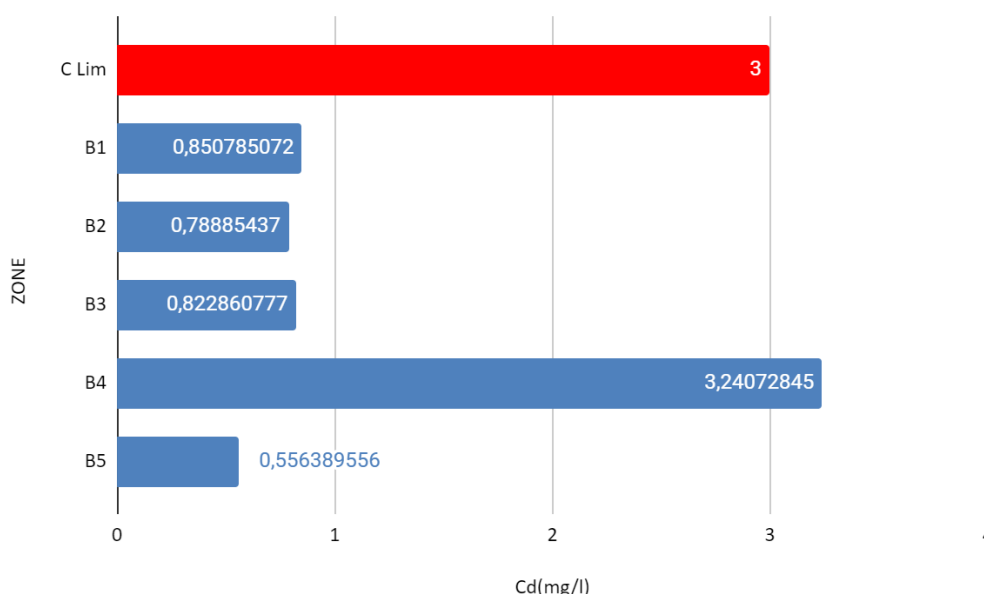


Figure 4.22 : Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)

Concentration de Pb (Plomb) :

- Les concentrations de plomb varient de 69.936mg/L à 86.352mg/L.
- Le point 5 présente la concentration de plomb la plus élevée, tandis que le point 3 a la concentration la plus basse.

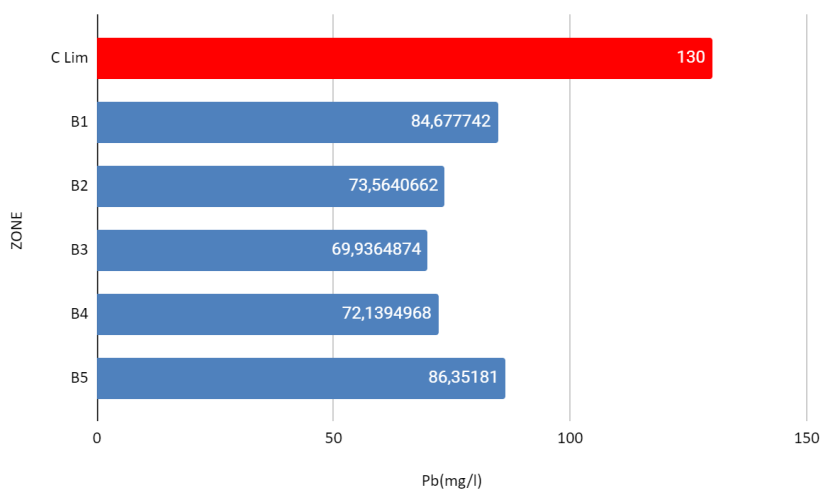


Figure 4.23 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)

Concentration de Cu (Cuivre) :

- Les concentrations de cuivre varient de 8.514mg/L à 10.576mg/L.
- Le point 5 présente la concentration de cuivre la plus élevée, tandis que le point 1 a la concentration la plus basse.

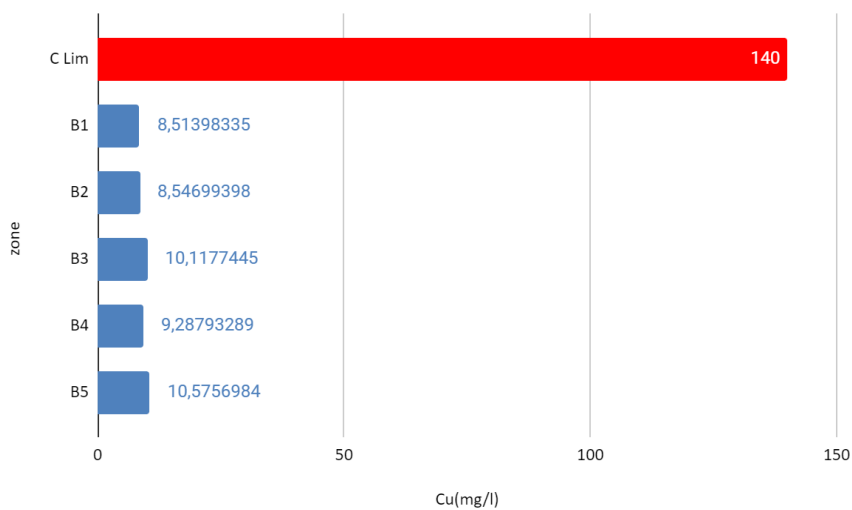


Figure 4.24 : Graphique à barre de la concentration du cuivre(mg/l)

Concentration de Zn (Zinc) :

- Les concentrations de zinc varient de 41.820mg/L à 63.228mg/L.
- Le point 5 présente également la concentration de zinc la plus élevée, tandis que le point 2 a la concentration la plus basse.

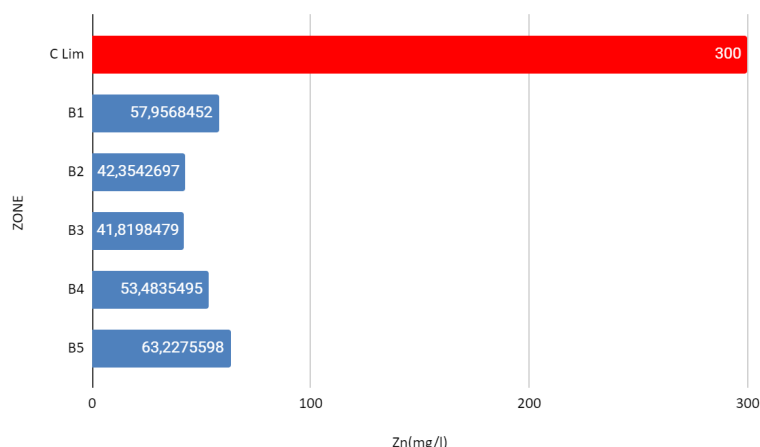


Figure 4.25: Graphique à barre de la concentration du Zinc(mg/l)

Interprétations de la SAA : l'extraction par Cacl2 0.001 M Sur le site de Boucaid:

la zone de baryte En comparant ces résultats, voici quelques observations

Concentration de Cd (Cadmium) :

- Les concentrations de cadmium sont relativement faibles dans tous les points, allant de 0.082mg/L à 0.222mg/L.
- Le point 1 présente la concentration la plus élevée de cadmium, tandis que le point 5 a la concentration la plus basse.

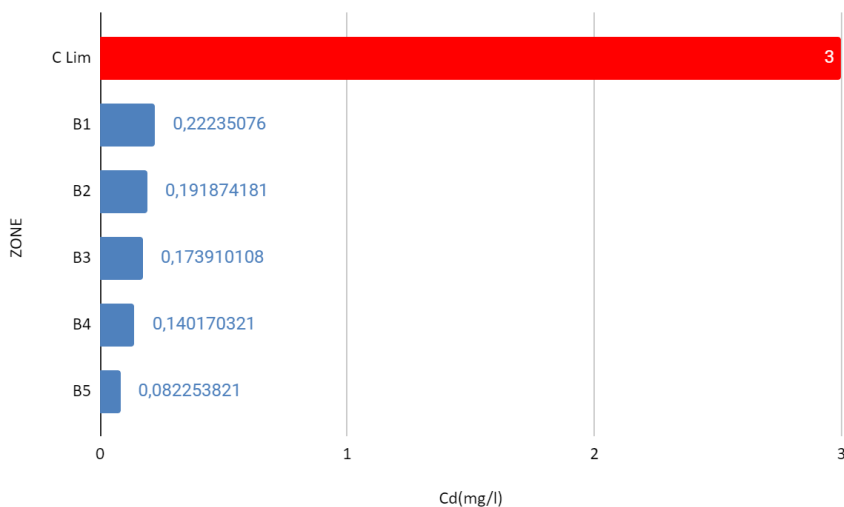


Figure 4.26: Graphique à barre de la concentration du cadmium (mg/l)

Concentration de Pb (Plomb) :

- Les concentrations de plomb varient de 0.099mg/L à 0.159mg/L.

- Le point 4 présente la concentration la plus élevée de plomb, tandis que le point 2 a la concentration la plus basse.

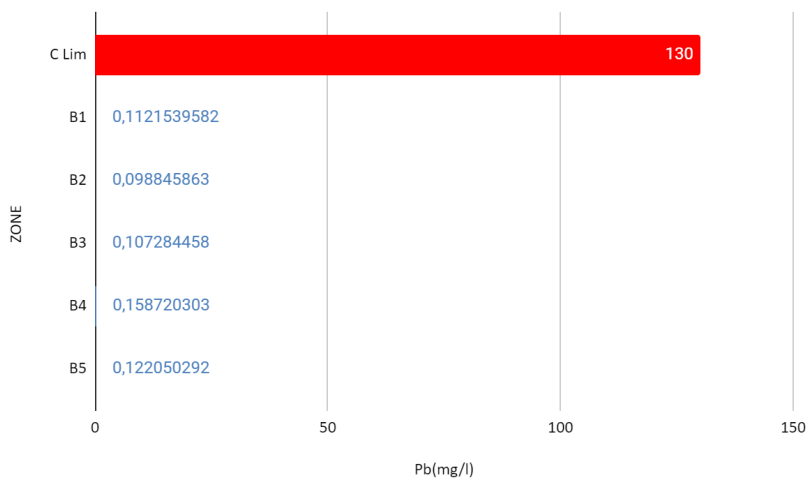


Figure 4.27: Graphique à barre de la concentration du plomb (mg/l)

Concentration de Cu (Cuivre) :

- Les concentrations de cuivre sont également relativement faibles, allant de 0.048mg/L à 0.082mg/L.
- Les points 1, 2 et 5 ont des concentrations de cuivre similaires, tandis que le point 4 présente la concentration la plus basse.

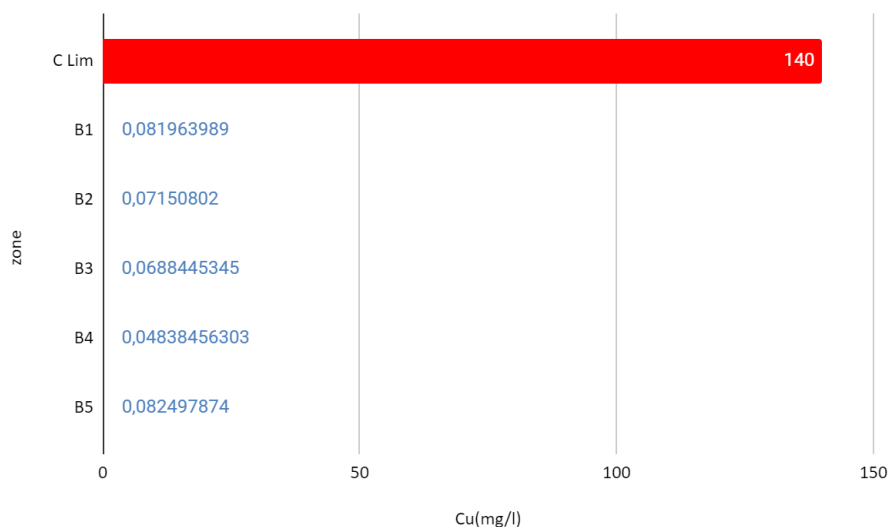


Figure 4.28: Graphique à barre de la concentration du cuivre (mg/l)

Concentration de Zn (Zinc) :

- Les concentrations de zinc varient de 18.479mg/L à 21.879mg/L.
- Le point 1 présente la concentration la plus élevée de zinc, tandis que le point 5 a la concentration la plus basse.

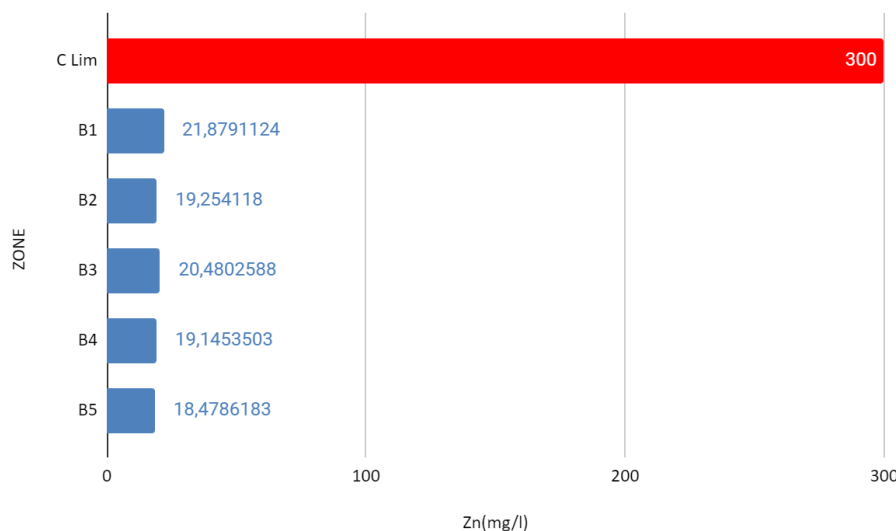


Figure 4.29: Graphique à barres de la concentration du Zinc(mg/l)

Comparaison entre les résultats fournis entre l'essais d'extraction du HNO₃ et CaCl₂ :

Il est observé que les concentrations de cadmium, plomb, cuivre et zinc sont généralement plus élevées lors de l'extraction avec l'HNO₃ par rapport à l'extraction avec le CaCl₂. L'utilisation de l'HNO₃ conduit à des concentrations de cadmium plus élevées, en particulier au point 4. En ce qui concerne le plomb, le point 5 présente la concentration la plus élevée lors de l'extraction avec l'HNO₃, dépassant la limite réglementaire de 130 mg/L, tandis que l'extraction avec le CaCl₂ montre des concentrations de plomb plus modérées. Les concentrations de cuivre demeurent relativement faibles dans les deux cas, avec des niveaux similaires entre les différents points. En ce qui concerne le zinc, l'extraction avec l'HNO₃ révèle des concentrations plus élevées dans plusieurs points, tandis que l'extraction avec le CaCl₂ présente des concentrations de zinc plus modérées.

Analyses de la composition chimique par FRX (site de Kef Oum teboul)

En observant les données du (voir **Annexe 5**) , on peut constater que le dioxyde de carbone (CO₂) présente des variations allant de 8.9547% à 14.642% dans les échantillons. En revanche, l'oxyde de sodium (Na₂O) est généralement présent en quantités relativement faibles, allant de 0% à 0.4633%.

L'oxyde de magnésium (MgO) affiche des pourcentages allant de 0.0018% à 0.7514%, tandis que l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) présente une plus grande variation, allant de 3.1825% à 20.6541%. L'oxyde de silicium (SiO₂) est également variable, avec des pourcentages allant de 23.6544% à 49.2132%.

Parmi les autres oxydes, on trouve le pentoxyde de phosphore (P₂O₅) avec des pourcentages allant de 0.0265% à 0.2523%, le trioxyde de soufre (SO₃) avec des variations allant de 1.4361% à 7.1154%, et l'oxyde de potassium (K₂O) avec des valeurs allant de 0.8658% à 2.9251%.

Les oxydes de calcium (CaO), de titane (TiO₂) et de fer (Fe₂O₃) montrent également des variations significatives dans les échantillons, avec des pourcentages compris entre 0.0555% et 0.2036%, 0.0018% et 1.183%, et 9.9542% et 15.9654% respectivement.

D'autres oxydes tels que le nickel (NiO), le cuivre (CuO), le zinc (ZnO), l'antimoine (Sb₂O₃) et le plomb (PbO) sont présents en quantités relativement faibles, mais avec des variations d'un échantillon à l'autre.

Analyses de la composition chimique par FRX (site de Boucaid):

Les données fournies (voir **Annexe 4_**) dans le décrivent la composition chimique de deux échantillons, à savoir la baryte et le Pb zn. La baryte présente une composition riche en différents oxydes. Elle contient 21.53% de SiO₂, 3.46% d'Al₂O₃, 9.71% de Fe₂O₃, 29.97% de CaO, 1.36% de MgO, 17.68% de SO₃, 0.5% de K₂O, 2.40% de Na₂O, 0.15% de P₂O₅ et 0.35% de TiO₂. D'autre part, le Pb zn affiche une composition distincte, dominée par 48.46% de CaO, 10.22% de Fe₂O₃, 7.21% de SiO₂, 2.94% de Na₂O, 1.32% d'Al₂O₃, 0.35% de SO₃, 0.14% de TiO₂, 0.12% de K₂O, 0.09% de P₂O₅ et 0.35% de MgO.

2. Minéralisation des plantes :

La biodisponibilité désigne la mesure dans laquelle un élément présent dans le sol peut être absorbé par les organismes vivants. Cela concerne principalement les métaux lourds et d'autres éléments polluants. Les métaux lourds sont essentiels aux plantes, par contre, les concentrations élevées de ces dernières peuvent provoquer du stress et perturber les réactions physiologiques normales. La translocation est le mouvement des substances, notamment les nutriments, l'eau et les éléments chimiques, à travers les différentes parties de la plante. La capacité de translocation des éléments polluants varie d'une espèce à l'autre, entraînant une accumulation préférentielle de ces éléments dans les parties aériennes des plantes.(merchichi,2022).

Les informations rapporté(voir **Annexe 2**) indique les concentration relevé des éléments Cd, Pb, Cu et Zn dans les échantillons de plantes prélevés dans les zones Z1 et de type PD révèlent des variations significatives. Les concentrations de Cd varient entre 7,973 mg/l et 15,532 mg/l dans les tiges, avec les échantillons de Z1 PD 2 présentant les concentrations les plus élevées. Les feuilles de Z1 PD 1 ont la concentration de Cd la plus élevée parmi tous les échantillons. Les concentrations de Pb varient entre 4,475 mg/l et 45,680 mg/l dans les feuilles, avec les échantillons de Z1 PD 5 montrant les concentrations les plus élevées. Pour le Cu, les concentrations varient entre 2,005 mg/l et 47,024 mg/l, les feuilles de Z1 PD 1 ayant la concentration la plus élevée. Enfin, les concentrations de Zn varient entre 278,65 mg/l et 984,047058 mg/l dans les feuilles, avec les échantillons de Z1 PD 1 présentant les concentrations les plus élevées. Ces variations soulignent la présence de métaux dans les plantes et peuvent indiquer une contamination environnementale potentielle.

Dans la zone Z2.1, les fleurs présentent des concentrations de Cd, Pb, Cu et Zn respectivement de 9,049 mg/L, 20,097 mg/L, 18,939 mg/L et 673,447 mg/L. Les tiges ont des concentrations plus faibles avec 5,347 mg/L de Cd, 17,068 mg/L de Pb, 10,235 mg/L de Cu et 101,587 mg/L de Zn. Les feuilles ont la concentration la plus élevée pour tous les éléments, avec 12,962 mg/L de Cd, 78,057 mg/L de Pb, 14,419 mg/L de Cu et 893,291 mg/L de Zn. Dans la zone Z2.2, les tiges présentent des concentrations plus élevées que les feuilles pour le Cd (24,495 mg/L) et le Pb (48,825 mg/L), tandis que les feuilles ont des concentrations plus élevées de Cu (5,361 mg/L) et de Zn (910,680 mg/L). Les concentrations de Cd dans les feuilles sont de 13,931 mg/L. En comparant les deux zones, on observe que les concentrations d'éléments dans la zone Z2.2 sont généralement plus élevées que dans la zone Z2.1.

Les concentrations d'éléments (Cd, Pb, Cu, Zn) dans les tiges et les feuilles d'échantillons prélevés dans les zones Z1 PG1, Z1 PG2 et Z1 PG3. Les tiges de Z1 PG1 affichent des concentrations relativement élevées de Cd (15,581 mg/L) et de Pb (33,912 mg/L), tandis que les feuilles présentent des concentrations élevées de Cd (12,411 mg/L) et de Pb (43,900 mg/L). Les tiges de Z1 PG2 et Z1 PG3 montrent des concentrations plus faibles pour tous les éléments, tandis que les feuilles de Z1 PG2 ont des concentrations plus basses pour Cd (1,680 mg/L) et Cu (8,688 mg/L). Les feuilles de Z1 PG3 affichent une concentration relativement élevée de Cu (23,1526992 mg/L). Ces résultats soulignent des variations dans les concentrations d'éléments d'un échantillon à l'autre, ce qui peut être utile pour évaluer la contamination potentielle dans ces zones et comprendre les différences de transfert des éléments entre les tiges et les feuilles.

Les concentrations d'éléments (Cd, Pb, Cu, Zn) dans les tiges, les feuilles, les racines et les fleurs d'échantillons prélevés dans les zones Z1 RS1 et Z1 RS3. Dans la zone Z1 RS1, les tiges affichent des concentrations relativement faibles de tous les

éléments, tandis que les fleurs présentent des concentrations plus élevées de Pb (80,6662422 mg/L) et de Zn (762,016296 mg/L). Les feuilles de Z1 RS1 montrent des concentrations élevées de Pb (105,223875 mg/L) et de Zn (870,486023 mg/L). Dans la zone Z1 RS3, les tiges et les racines présentent des concentrations similaires et relativement faibles pour tous les éléments. Les feuilles affichent des concentrations élevées de Pb (134,8205 mg/L) et de Zn (834,839783 mg/L), tandis que les fleurs présentent des concentrations plus faibles de tous les éléments. Ces résultats mettent en évidence des variations dans les concentrations d'éléments au sein des différentes parties de la plante et entre les zones Z1 RS1 et Z1 RS3. Cette variation peut être due à des facteurs tels que la bioaccumulation sélective des éléments dans certaines parties de la plante et les différences dans les niveaux de contamination dans les zones d'échantillonnage.

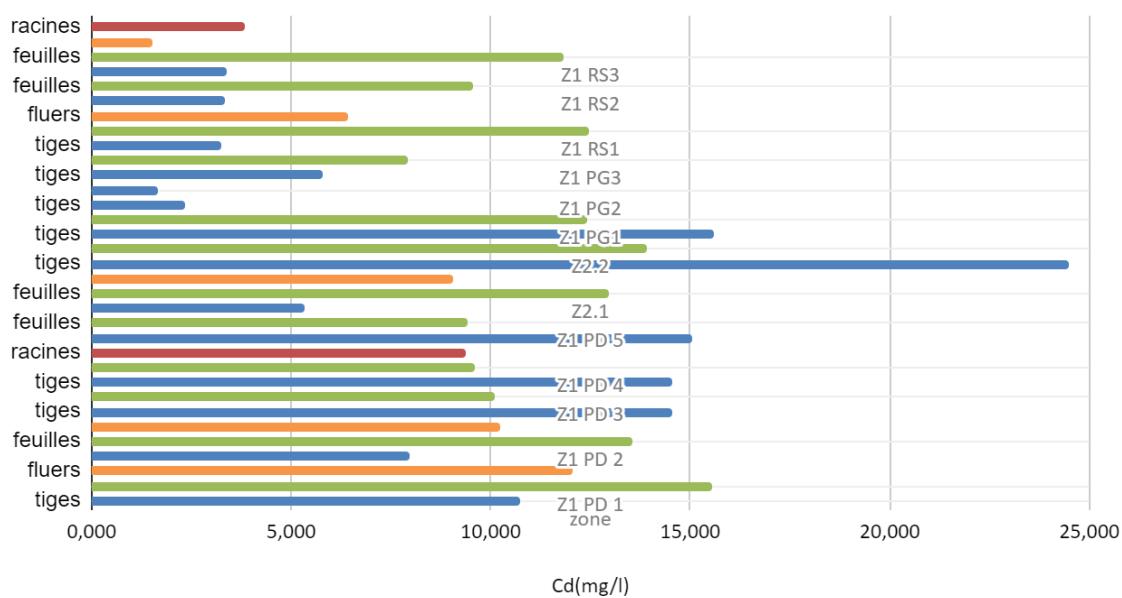


Figure 4.30 : Graphique à barre de la concentration du Cadmium (mg/l)

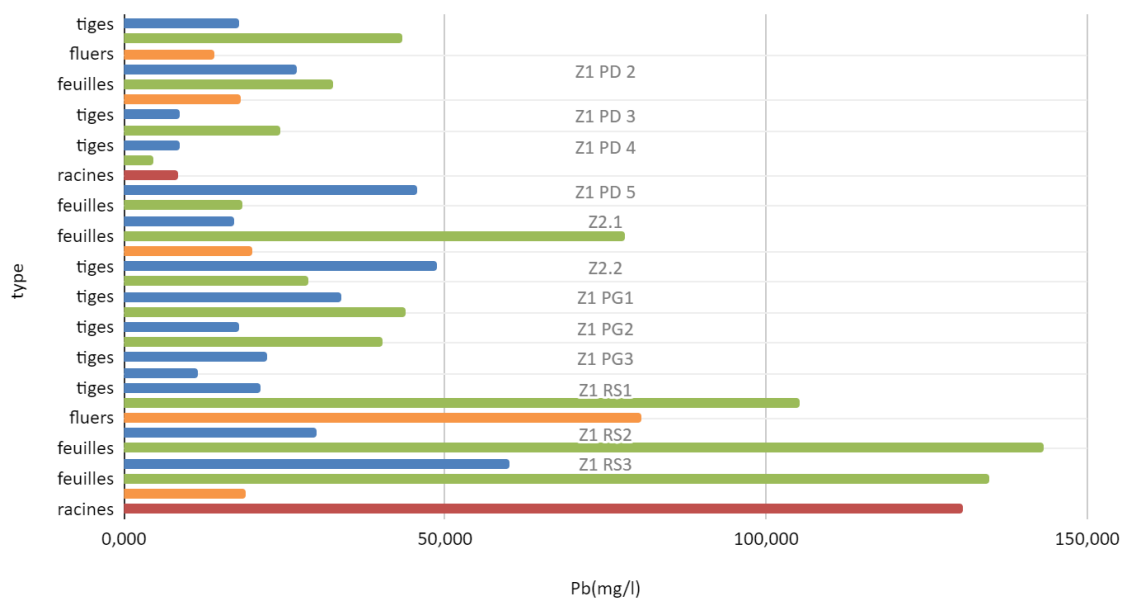


Figure 4.31 : Graphique à barre de la concentration du Plomb (mg/l)

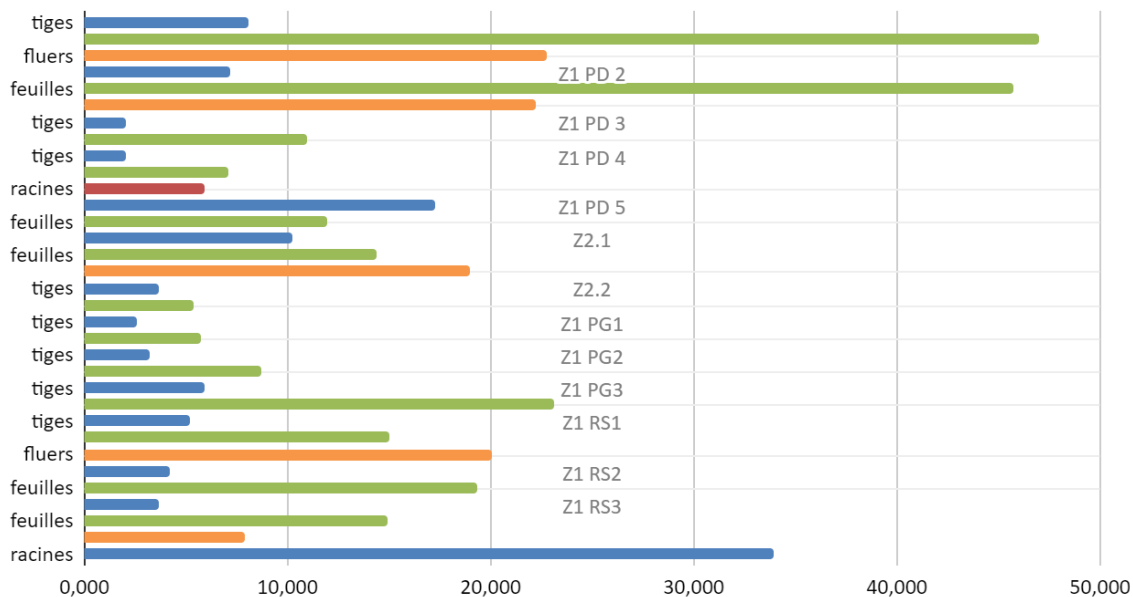


Figure 4.32 : Graphique à barre de la concentration du Cuivre (mg/l)

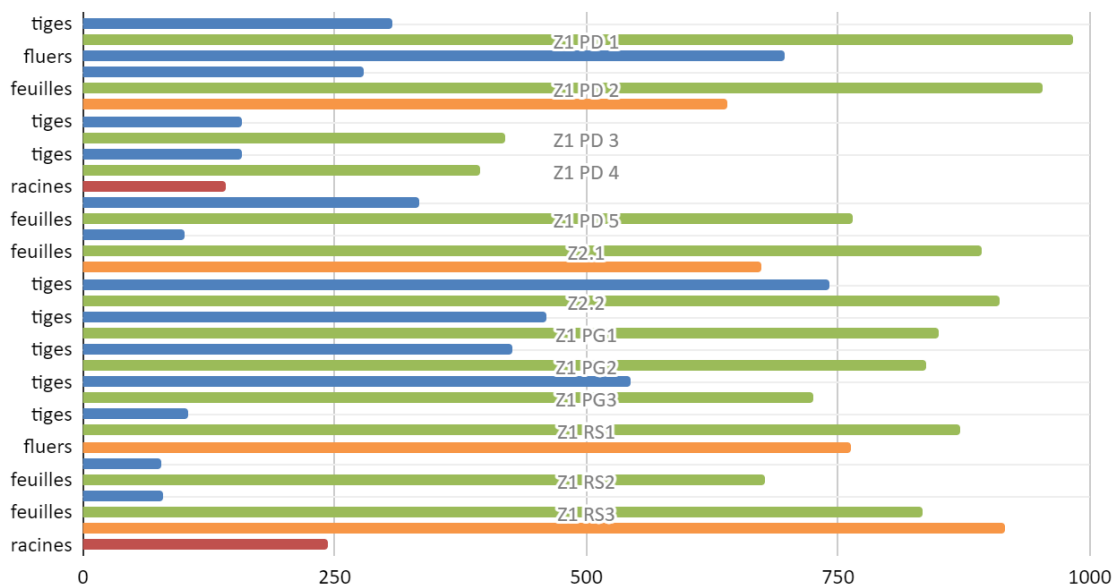


Figure 4.33 : Graphique à barre de la concentration du Zinc (mg/l)

2.1. Le facteur de translocation :

Le facteur de translocation des plantes est utilisé pour évaluer la capacité d'une plante à absorber et à transporter des éléments chimiques à partir de ses racines vers ses parties aériennes, en particulier les feuilles.

Ce facteur est calculé en divisant la concentration d'un élément chimique spécifique dans les parties aériennes (feuilles) d'une plante par sa concentration dans les racines. Il peut être exprimé en pourcentage ou sous forme de ratio.(noubissie,2015)

$$Ft = \frac{C_{aérienne}}{C_{racine}} \tag{4.2}$$

Le facteur de translocation est souvent utilisé pour évaluer l'efficacité de la translocation des nutriments, des métaux lourds ou d'autres substances dans les plantes. Il peut varier selon les espèces végétales et les conditions environnementales.(Antoniadis et al.,2016)

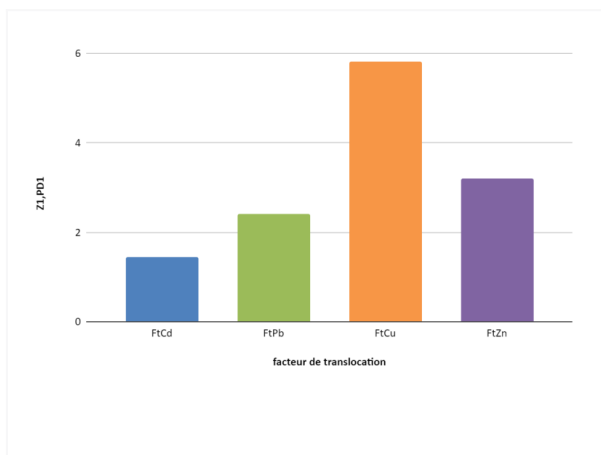


Figure 4.34: Ft des métaux lourds Z1 PD1

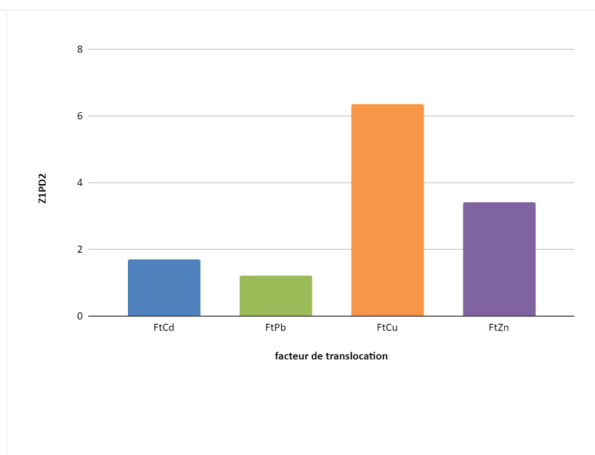


Figure 4.35: : Ft des métaux lourds Z1 PD2

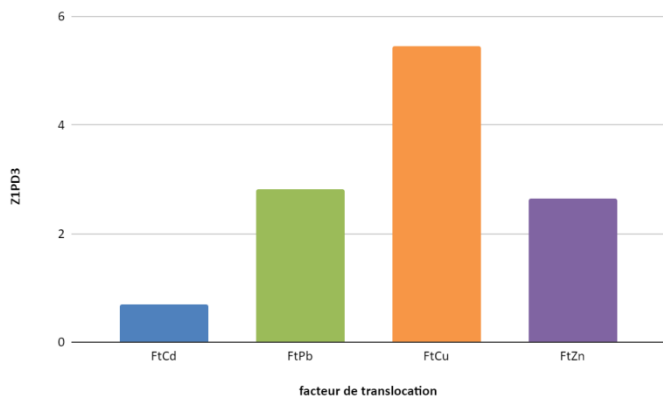


Figure 4.36: Ft des métaux lourds Z1 PD3

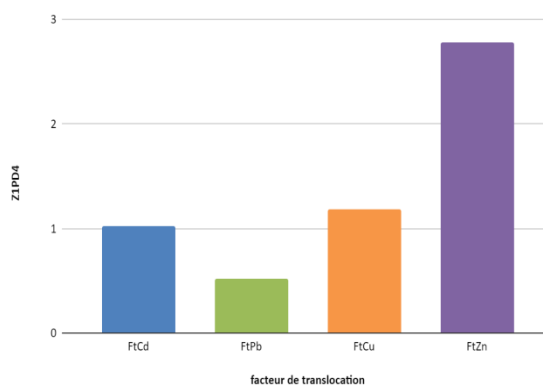


Figure 4.37 : Ft des métaux lourds Z1 PD4

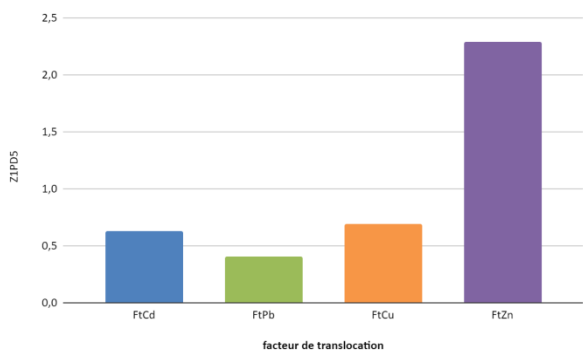


Figure 4.39: Ft des métaux lourds Z1 PD5

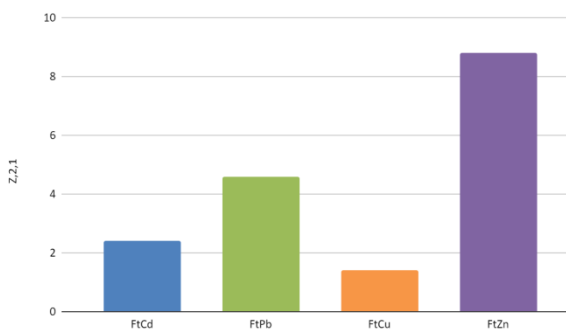


Figure 4.40 : Ft des métaux lourds Z2 1

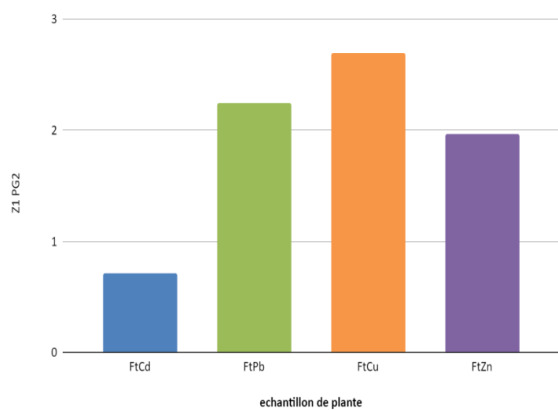


Figure 4.41 : Ft des métaux lourds Z2 2

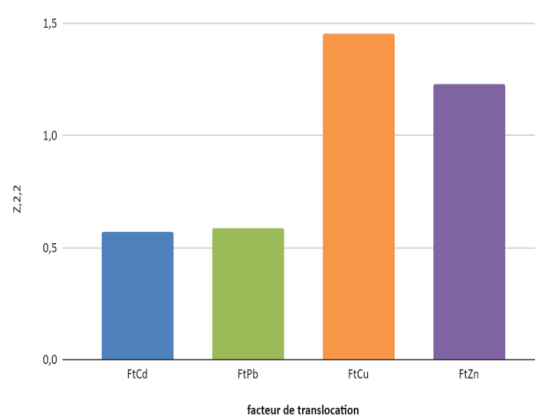


Figure 4.42: Ft des métaux lourds 1 PG1

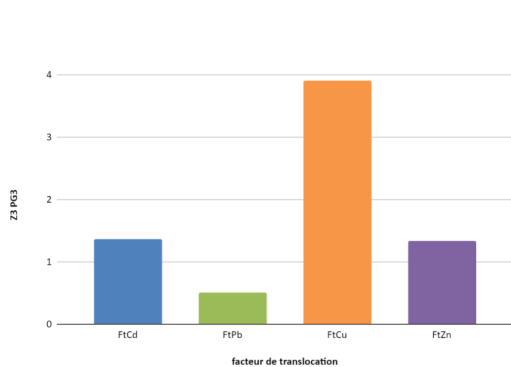


Figure 4.43 : Ft des métaux lourds Z1PG2

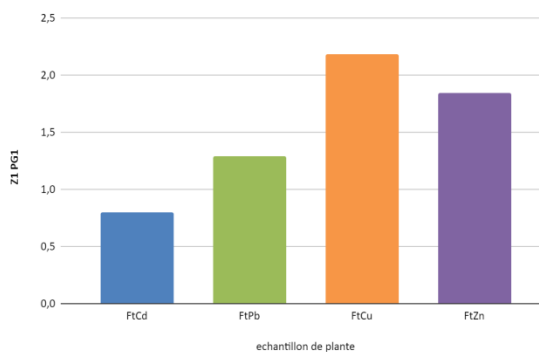


Figure 4.44: Ft des métaux lourds Z1PG3

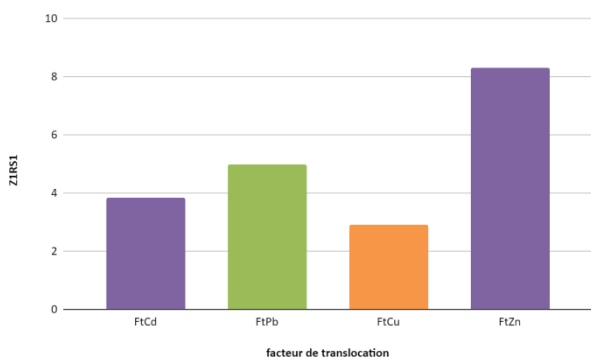


Figure 4.45 : Ft des métaux lourds Z1 RS1

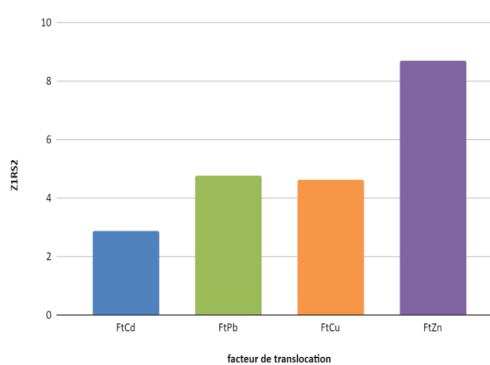


Figure 4.46 : Ft des métaux lourds Z1 RS2

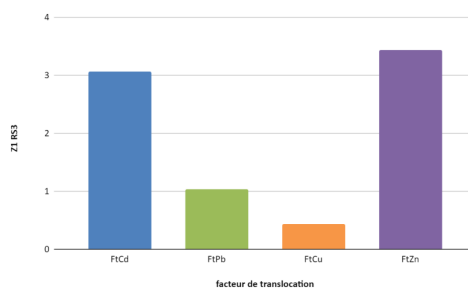


Figure 4.47 : Ft des métaux lourds Z1 RS3

Interprétation:

Les facteurs de translocation (Ft) indiquent la capacité d'une plante à absorber et à transporter des métaux à partir du sol vers d'autres parties de la plante, généralement les parties aériennes.

- Pour le métal Cd (cadmium), les plantes Z1PD2, Z1PD4 et Z3PG3 semblent avoir des facteurs de translocation élevés, indiquant qu'elles absorbent et transportent efficacement le cadmium dans leurs parties aériennes.
- Pour le métal Pb (plomb), les plantes Z1PD2, Z1PD3, Z1PD4, Z1PG2, et Z1RS3 montrent des facteurs de translocation élevés, suggérant une absorption et un transport efficaces du plomb.
- Pour le métal Cu (cuivre), les plantes Z1PD2, Z1RS1, et Z1RS2 présentent des facteurs de translocation élevés, indiquant une absorption et un transport efficaces du cuivre.
- Pour le métal Zn (zinc), les plantes Z1PD2, Z2,1, Z1RS1, et Z1RS2 montrent des facteurs de translocation élevés, suggérant une absorption et un transport efficaces du zinc.

Le facteur de translocation quantifie les mécanismes de défense des plantes qui ont tendance à restreindre les contaminants inorganiques aux racines, dans le but d'éviter la translocation des éléments traces (TE) vers les organes aériens vitaux, en particulier les graines. Normalement, les plantes présentent un $TF < 1$ lorsqu'elles sont soumises à des TE-stress. Un $TF > 1$ indique que les plantes non seulement tolèrent mais utilisent le contaminant étudié de manière bénéfique, ce qui est généralement la caractéristique des hyperaccumulateurs. Ainsi, un $TF > 1$ est un facteur décisif pour classer les espèces végétales en vue de la phytoremédiation (Chanu et Gupta, 2016).

En analysant les résultats dans le **tableau 4.10** (voir **Annexe 3**) obtenus :

- Pour les plantes Z1Pd1, Z1Pd2, Z2.1, Z1RS1 et Z1RS2, les facteurs de translocation des métaux Cd, Cu, Pb et Zn sont supérieurs à 1. Cela suggère que ces plantes peuvent tolérer et utiliser de manière bénéfique ces métaux, ce qui est une caractéristique des hyperaccumulateurs. Par conséquent, ces plantes pourraient être de bons candidats pour la phytoremédiation, car elles sont capables d'absorber et d'accumuler ces métaux contaminants de manière efficace.
- Pour les plantes Z1Pd3, Z1Pd4, Z1Pd5, Z2.2, Z1PG1, Z1PG2 et Z1RS3, les facteurs de translocation des métaux varient. Certaines plantes montrent des facteurs de translocation supérieurs à 1 pour certains métaux (Cu, Pb, Zn), indiquant une utilisation bénéfique de ces métaux, tandis que pour d'autres métaux (Cd, Pb), les facteurs de translocation sont inférieurs à 1, montrant une limitation de la translocation vers les parties aériennes. Ces plantes pourraient également être considérées pour des applications de

phytoremédiation, mais leur efficacité peut dépendre de la spécificité des métaux présents dans le sol ou l'eau contaminés.

- Pour les plantes Z1PG3 et Z1RS3, le facteur de translocation du Pb est inférieur à 1, indiquant une limitation de la translocation de ce métal. Cela peut être bénéfique pour éviter l'accumulation de plomb dans les parties aériennes, mais ces plantes peuvent encore transloquer d'autres métaux (Cu, Cd, Zn) en concentrations supérieures à 1, ce qui peut être bénéfique pour la phytoremédiation de ces métaux spécifiques.

En résumé, l'interprétation des facteurs de translocation selon les principes de base de la phytoremédiation suggère que certaines plantes présentent des caractéristiques d'hyperaccumulation bénéfiques pour l'élimination des métaux contaminants, tandis que d'autres peuvent avoir des limitations spécifiques dans la translocation de certains métaux. Ces informations peuvent être utilisées pour classer les espèces végétales en vue de leur utilisation potentielle dans des **stratégies de phytoremédiation.**

3. les indices caractéristiques de contamination:

Les indices de pollution fournissent une évaluation globale et synthétique du niveau de pollution des sols, ce qui facilite la comparaison entre différentes zones géographiques et la détection des sites les plus critiques nécessitant une intervention prioritaire en termes de remédiation et de protection de l'environnement.(Lapierre,2018)

3.1. L'indice de pollution(Pi):

Les éléments extraits par acide nitrique HNO₃ ont été utilisés pour calculer l'indice de pollution unique et l'indice de pollution de Nemerow. Le niveau de pollution d'un métal lourd spécifique a été évalué à l'aide de l'indice de pollution unique (Pi), qui est calculé en comparant la concentration du métal (Ci) dans un échantillon de sol à la norme autorisée pour ce métal (Si). Dans notre cas nous avons utilisé la norme Limites réglementaires pour les concentrations de métaux lourds dans le sol (EU-Richtlinie 91/692/EWG, ABI EG, 31. Dec. 1991 Nr. L377, p. 48) et KSVO, 1992)

$$Pi = \frac{Ci}{Si} \quad (4.3)$$

L'indice de pollution de Nemerow est également utilisé pour évaluer la pollution des métaux lourds, mais il prend en compte plusieurs facteurs tels que les concentrations de différents métaux dans le sol et leurs facteurs de toxicité. Ces

indices aident à fournir une mesure quantitative de la pollution des métaux lourds dans les sols et à évaluer leur impact potentiel sur l'environnement. ($P_n < 0,7$ est propre, $P_n 0,7-1,0$ est la limite d'avertissement, $P_n 1,0-2,0$ est légèrement pollué, $P_n 2,0-3,0$ est modérément pollué, et $P_n > 3,0$ est gravement pollué) (Kandziora-Ciupa et al., 2016)

$$P_n = \sqrt{\frac{(P_{ave}^2 + P_{max}^2)}{2}} \quad (4.4)$$

Pave: la moyenne de l'indice de pollution unique de tous les métaux.

Pmax : la valeur maximale de l'indice de pollution unique de tous les métaux.

Tableau 4.9 : Classification Pn des échantillons KOT Les résultats de classification de

Ech.	IP cd	IP pb	IP cu	IP zn	Pn	class.
Z.1.1	0,721	1,925	0,015	0,583	1,477	Légèrement pollué
Z.1.2	2,957	1,276	0,019	0,514	2,254	Légèrement pollué
Z.1.3	3,053	1,501	0,021	0,409	2,331	Légèrement pollué
Z.1.4	5,233	1,2666	0,017	0,438	3,899	Modérément pollué
Z.1.5	1,454	1,481	0,018	0,419	1,205	Légèrement pollué
Z.1.6	1,885	1,449	0,018	0,503	1,497	Légèrement pollué
Z.1.7	3,062	2,738	0,046	0,367	2,428	Légèrement pollué
Z.1.8	1,562	3,031	0,058	0,407	2,322	Légèrement pollué
Z.1.9	3,553	3,461	0,061	0,455	2,843	Modérément pollué
Z.1.10	7,183	4,350	0,060	0,518	5,512	Gravement pollué
Z.2.2	7,591	12,963	0,033	2,625	10,043	Gravement pollué
Z.2.3	7,886	14,350	0,062	2,428	11,048	Gravement pollué
Z3	4,286	1,329	0,026	0,444	3,216	Modérément pollué

Les résultats de classification de contamination des sols selon l'indice de pollution de Nemerow (Pn) dans la zone de Kef Oum Teboul ont révélé différents niveaux de pollution. La majorité des échantillons sont légèrement pollués, tandis que quelques-uns sont modérément pollués. De plus, certains échantillons ont été classés comme gravement pollués. Ces résultats soulignent la présence de problèmes de pollution des sols dans la zone étudiée.

La zone de BOUCAID:

Tableau 4.10 : Classification Pn des échantillons BOUCAID

Ech.	IP cd	IP pb	IP cu	IP zn	Pn	Class.
Pb/zn 1	2,075	0,753	0,018	4,544	3,468	Modérément pollué
Pb/zn 2	2,161	0,707	0,017	3,234	2,530	Légèrement pollué
Pb/zn 3	1,898	0,750	0,014	3,972	3,044	Modérément pollué
Pb/zn 4	1,921	0,566	0,021	3,805	2,913	Légèrement pollué
Pb/zn 5	2,118	0,629	0,020	3,286	2,558	Légèrement pollué
B1	0,283	0,651	0,060	0,193	0,506	Propre
B2	0,262	0,565	0,061	0,141	0,439	Propre
B3	0,274	0,537	0,072	0,139	0,421	Propre
B4	1,080	0,554	0,06	0,178	0,832	Propre
B5	0,185	0,664	0,075	0,210	0,510	Propre

Dans la zone de Boucaid, les résultats de classification de contamination des sols selon l'indice de pollution de Nemerow (Pn) ont révélé des niveaux différents dans différentes zones. La zone des rejets de plomb et de zinc a été classée comme légèrement polluée, ce qui suggère une présence de ces contaminants, bien que dans des quantités relativement faibles. En revanche, la zone de rejet de baryte a été jugée propre, indiquant l'absence significative de contamination des sols par ce composé.

3.2. Indice de pollution intégré (IPI) :

L'IPI est l'un des indices d'évaluation multi-élémentaire, il permet d'évaluer l'apport de plusieurs métaux sur le degré de pollution. Il dépend directement des valeurs de l'IP. En effet l'IPI est défini comme la moyenne des IPs déterminé pour chaque métal dans le même échantillon. (Chen et al., 2005; Wei & Yang, 2010; Singh et al., 2015).

$$IPI = \frac{\sum PI(X)}{N} \tag{4.5}$$

Il concerne 03 classes :

Tableau 4.11 : Classes de pollution selon l'indice de pollution intégré

IPI	Intensité de la pollution
$IPI \leq 1$	Faible pollution
$1 < IPI \leq 2$	Pollution moyenne
$IPI > 2$	Pollution élevée

La zone de Kef Oum teboul:

Tableau 4.12 : Classification IPI des échantillons KOT

Echantillon	IPI	Classification
Z1.1	0,811560725	Faible pollution
Z1.2	1,191854549	Pollution moyenne
Z1.3	1,246353388	Pollution moyenne
Z1.4	1,738907123	Pollution moyenne
Z1.5	0,8434626908	Faible pollution
Z1.6	0,9640067625	Faible pollution
Z1.7	1,553662718	Pollution moyenne
Z1.8	1,265134797	Pollution moyenne
Z1.9	1,883256978	Pollution moyenne
Z1.10 (milieu)	3,028316107	Pollution élevée
Z2.1	5,751701894	Pollution élevée
Z2.2	5,803597526	Pollution élevée
Z2.3	6,1817756	Pollution élevée
Z3	1,521778166	Pollution moyenne

Les résultats de classification de contamination des sols dans la zone de Kef Oum Teboul, évalués selon l'Indice de Pollution Intégré (IPI), ont révélé différents niveaux de pollution. Certains sites ont été classés comme présentant une faible pollution principalement dans la zone 1, tandis que d'autres ont montré une pollution moyenne ou élevée pour la zone 2 et 3.

La zone de boucaid :

Tableau 4.13 : Classification IPI des échantillons BOUCAID

Echantillon	IPI	classification
pb/zn 1	1,848000882	Pollution moyenne
pb/zn 2	1,530595125	Pollution moyenne
pb/zn 3	1,658933836	Pollution moyenne
pb/zn 4	1,578477236	Pollution moyenne
pb/zn 5	1,513647822	Pollution moyenne
B1	0,2972414802	Faible pollution
B2	0,2577649362	Faible pollution
B3	0,2559822506	Faible pollution
B4	0,4699457247	Faible pollution
B5	0,2840017783	Faible pollution

Dans la zone de Boucaid, les résultats de classification de contamination des sols selon l'Indice de Pollution Intégré (IPI) ont révélé des niveaux différents de pollution. La zone des rejets de plomb et de zinc a été classée comme présentant une pollution moyenne, indiquant la présence significative de métaux lourds. En revanche, la zone de rejet de baryte a été classée avec une faible pollution.

3.3. Facteur de contamination (CF) et degré de contamination (CD)

- **Le facteur de contamination (CF)** : l'indice est conçu pour évaluer le niveau de contamination d'origine humaine des sédiments par un élément trace potentiellement toxique spécifique.(Khelif et al. 2021), L'équation suivante est utilisée pour le calcul de cet indice:

$$Cf = \frac{CM}{CB} \tag{4.6}$$

Avec :

CM: concentration du métal dans l'échantillon

CB: concentration de fond(**the background concentration**)

La concentration de fond d'un élément fait référence à la concentration naturelle ou intrinsèque de cet élément dans un échantillon ou dans l'environnement sans qu'il y ait eu d'influence significative d'activités humaines ou de sources de pollution. Elle représente le niveau de concentration de cet élément dans un état non perturbé ou non affecté par des facteurs externes. La concentration de fond est

souvent utilisée comme référence pour évaluer les niveaux de contamination ou de pollution par rapport à la concentration naturelle de l'élément dans un contexte donné.

Classification du niveau de la contamination :

- Si $CF < 1$, la contamination est considérée comme faible.
 - Si $1 < CF \leq 3$, la contamination est modérée.
 - Si $3 \leq CF < 6$, il y a une contamination considérable.
 - La contamination est de niveau très élevé lorsque $CF \geq 6$.
- **Le degré de contamination (CD)** d'un échantillon donné peut être calculé en utilisant la somme des facteurs de concentration (CF) de tous les métaux traces étudiés.

$$CD = \sum_i^n Cfi \tag{4.7}$$

Ainsi, le CD est classé en quatre catégories : lorsque $CD < 8$, il est considéré comme modéré, lorsque $8 \leq CD < 16$, il est considéré comme notable ; lorsque $16 \leq CD < 32$, il est considéré comme considérable ; et lorsque $CD > 32$, il est considéré comme un degré de contamination très élevé.

La zone de Kef Oum teboul:

Tableau 4.13 : Classification CD des échantillons KOT

Echantillon	CD	Classification
Z1.1	3,2462429	modéré
Z1.2	4,767418197	modéré
Z1.3	4,98541355	modéré
Z1.4	6,955628493	modéré
Z1.5	3,373850763	modéré
Z1.6	3,85602705	modéré
Z1.7	6,214650873	modéré
Z1.8	5,060539187	modéré
Z1.9	7,533027913	modéré
Z1.10 (milieu)	12,11326443	notable
Z2.1	23,00680758	considérable
Z2.2	23,2143901	considérable

Z2.3	24,7271024	considérable
Z3	6,087112663	modéré

La classification de contamination des sols selon le degré de contamination (CD) dans le site de Kef Oum Teboul a révélé des niveaux variés de pollution, dans la zone 1 et 3 majoritairement la pollution est modéré tandis que dans la zone 2 est considérable

Tableau 4.14 : Classification IPI des échantillons BOUKAID

Echantillon	CD	classification
pb/zn 1	7,392003529	modéré
pb/zn 2	6,1223805	modéré
pb/zn 3	6,635735346	modéré
pb/zn 4	6,313908943	modéré
pb/zn 5	6,054591287	modéré
B1	1,188965921	modéré
B2	1,031059745	modéré
B3	1,023929002	modéré
B4	1,879782899	modéré
B5	1,136007113	modéré

La classification de contamination des sols selon le degré de contamination (CD) dans le site de boucaid est modéré que ce soit dans la zone de rejet plomb zinc ou la zone de rejet de la baryte.

3.4. Geoaccumulation index (Igeo)

L'indice de géoaccumulation (Igeo) a été mentionné pour la première fois par Muller (1969) et récemment appliqué par Shirani et al. (2020) afin de déterminer et définir la contamination métallique dans les sédiments en comparant les concentrations actuelles avec les niveaux préindustriels. (Khelif et al.,2021)

$$Igeo(x) = \log\left(\frac{Cn(x)}{1,5 Bn(x)}\right) \tag{4.8}$$

L'Igeo est distingué par sept (07) classes :

Tableau 4.16 : Classes de contamination selon l'indice de Géoaccumulation.

Valeur de l'index (Igeo)	Classes Igeo	Intensité de la pollution
Igeo > 5	6	Contamination extrême
5 > Igeo > 4	5	Forte à extrême contamination
4 > Igeo > 3	4	Forte contamination
3 > Igeo > 2	3	Contamination modérée à Forte
2 > Igeo > 1	2	Contamination modérée
1 > Igeo > 0	1	Sans à légère Contamination
Igeo < 0	0	Non contaminé

Avec :

Cn: concentration du métal étudié ;

Bn, concentration de fond ; le facteur 1.5 est introduit pour minimiser la variation possible de Bn.

La Zone de Kef Oum Teboul:

Tableau 4.15 : Classification Igeo des échantillons KOT

Ech.	Igeo Cd	Classi.	Igeo PB	Classi.	Igeo Cu	Classi.	Igeo Zn	Classi.
Z1.1	-0,317	Non contaminé	0,108	Sans à légère Contamination	-1,98	Non contaminé	2,06	Non contaminé
Z1.2	0,294	Sans à légère Contamination	-0,070	Non contaminé	-1,896	Non contaminé	-0,46	Non contaminé
Z1.3	0,308	Sans à légère Contamination	0,0003	Sans à légère Contamination	-1,847	Non contaminé	-0,56	Non contaminé
Z1.4	0,542	Sans à légère Contamination	-0,073	Non contaminé	-1,933	Non contaminé	-0,53	Non contaminé
Z1.5	-0,013	Non contaminé	-0,005	Non contaminé	-1,913	Non contaminé	-0,55	Non contaminé
Z1.6	0,099	Sans à légère Contamination	-0,014	Non contaminé	-1,909	Non contaminé	-0,47	Non contaminé
Z1.7	0,309	Sans à légère Contamination	0,261	Sans à légère Contamination	-1,507	Non contaminé	-0,61	Non contaminé
Z1.8	0,017	Sans à légère Contamination	0,305	Sans à légère Contamination	-1,405	Non contaminé	-0,56	Non contaminé
Z1.9	0,374	Sans à légère Contamination	0,363	Sans à légère Contamination	-1,384	Non contaminé	-0,51	Non contaminé
Z1.10 (milieu)	0,680	Sans à légère Contamination	0,462	Sans à légère Contamination	-1,391	Non contaminé	-0,46	Non contaminé
Z2.1	0,746	Sans à légère Contamination	0,893	Sans à légère Contamination	-1,525	Non contaminé	0,279	Sans à légère Contamination
Z2.2	0,704	Sans à légère Contamination	0,936	Sans à légère Contamination	-1,651	Non contaminé	0,243	Sans à légère Contamination
Z2.3	0,720	Sans à légère Contamination	0,980	Sans à légère Contamination	-1,383	Non contaminé	0,209	Sans à légère Contamination
Z3	0,455	Sans à légère Contamination	-0,052	Non contaminé	-1,75	Non contaminé	-0,52	Non contaminé

Selon les résultats obtenus, L'Indice de Géoaccumulation du cadmium et L'Indice de Géoaccumulation du plomb donnent une classification allant de sans à légère

contamination. Cela suggère la présence de ces contaminants dans le sol, mais à des niveaux relativement faibles. En revanche, l'Indice de Géoaccumulation du zinc et l'Indice de Géoaccumulation du cuivre donnent une classification de non contaminé, indiquant une absence significative de contamination par ces métaux dans le sol.

3.5. Pollution load index PLI:

L'indice de charge de pollution (PLI) est un indice utilisé pour évaluer le niveau de contamination d'une zone ou d'un site spécifique. Il calcule une valeur numérique basée sur les concentrations de divers polluants tels que les métaux lourds ou les composés organiques. Le PLI fournit une mesure quantitative résumant le niveau global de pollution, permettant des comparaisons et des évaluations des niveaux de contamination dans différentes zones. (Jorf et al. 2017 ; Sey and Belford 2019).(khelifi et al .,2021)

La PLI d'un site spécifique est la racine n-ième du produit des n facteurs de contamination, donc :

$$PLI = \sqrt[n]{Cf1 \times Cf2 \times \dots \times Cfn} \quad (4.9)$$

En conséquence, une valeur nulle de l'indice PLI désigne une valeur de référence,

- un $PLI \geq 1$ indique une dégradation progressive (non pollué à modérément pollué),
- une pollution modérée est désignée par un $PLI \geq 2$,
- tandis qu'un site fortement pollué est marqué par un $PLI \geq 4$.

La zone de Kef Oum teboul:

Tableau 4.17 : Classification PLI des échantillons KOT

Echantillon	PLI	Classification
Z1.1	0,1117301858	non pollué à modérément pollué
Z1.2	0,1922941376	non pollué à modérément pollué
Z1.3	0,2000031327	non pollué à modérément pollué
Z1.4	0,2253865494	non pollué à modérément pollué
Z1.5	0,1287004686	non pollué à modérément pollué
Z1.6	0,1594092798	non pollué à modérément pollué
Z1.7	0,3789021078	non pollué à modérément pollué
Z1.8	0,3374398121	non pollué à modérément pollué
Z1.9	0,5889493639	non pollué à modérément pollué
Z1.10 (milieu)	0,9935445469	non pollué à modérément pollué
Z2.1	3,540967919	pollution modérée
Z2.2	2,940675395	pollution modérée
Z2.3	4,129096886	fortement pollué
Z3	0,2581203491	non pollué à modérément pollué

Les résultats de classification de contamination des sols dans la zone de Kef Oum Teboul, ont révélé selon l'Indice de Pollution Intégré (IPI) différents niveaux de pollution. La zone 1 et la zone 3 sont classées non polluées à modérément polluées , tandis que la zone 2 est classée fortement polluée .

La Zone de BOUCAID:

Tableau 4.18 : Classification PLI des échantillons BOUCAID

Echantillon	PLI	Classification
pb/zn 1	0,3588270997	non pollué à modérément pollué
pb/zn 2	0,2964490722	non pollué à modérément pollué
pb/zn 3	0,2859834474	non pollué à modérément pollué
pb/zn 4	0,2975984285	non pollué à modérément pollué
pb/zn 5	0,2989808633	non pollué à modérément pollué
B1	0,04658610305	non pollué à modérément pollué
B2	0,03581208696	non pollué à modérément pollué
B3	0,03855593314	non pollué à modérément pollué
B4	0,08420164417	non pollué à modérément pollué
B5	0,04428697301	non pollué à modérément pollué

La classification de contamination des sols selon L'indice de charge de pollution (PLI) dans le site de boucaid est non pollué à modérément pollué que ce soit dans la zone de rejet plomb zinc ou la zone de rejet de la baryte.

3.6. Potential ecological risk index (Er^i) :

L'indice de risque écologique potentiel (Er^i) est utilisé pour évaluer le potentiel de danger de la concentration des métaux lourds obtenue sur les systèmes écologiques (Hakanson, 1980). Il est calculé en tenant compte des concentrations de polluants, de leur toxicité et de leur persistance dans l'environnement. (El Azharia, et al., 2017) il est calculé selon l'équation suivante:

$$Er^i = Tf^i \times Cf^i \quad (4.10)$$

Cf^i représente le facteur de contamination calculé,
 Tf^i correspond à la réponse toxique du métal lourd.

Le degré de risque écologique des métaux traces correspond à la valeur de risque écologique potentiel Ei_r obtenue (Hakanson, 1980), où $Ei_r < 40$ indique un faible risque ; $40 < Ei_r \leq 80$ est un risque modéré ; $80 < Ei_r \leq 160$ est un risque écologique élevé ; $160 < Ei_r \leq 320$ est un risque écologique grave et $Ei_r > 320$ est un risque écologique très grave. (Moldovan, 2022)

● **La zone de Kef Oum teboul:**

Tableau 4.19 : Classification Er^i des échantillons KOT

Ech.	Er^{Cd}	Classi.	Er^{Pb}	Classi.	Er^{Cu}	Classi.	Er^{Zn}	Classi.
Z1.1	21,66	faible	9,625	faible	0,0769	faible	0,583	faible
Z1.2	88,73	elevé	6,380	faible	0,095	faible	0,514	faible
Z1.3	91,59	elevé	7,506	faible	0,106	faible	0,409	faible
Z1.4	157	elevé	6,333	faible	0,087	faible	0,438	faible
Z1.5	43,63	modéré	7,407	faible	0,091	faible	0,419	faible
Z1.6	56,55	modéré	7,245	faible	0,092	faible	0,503	faible
Z1.7	91,87	elevé	13,692	faible	0,233	faible	0,367	faible
Z1.8	46,88	modéré	15,156	faible	0,294	faible	0,407	faible
Z1.9	106,6	elevé	17,309	faible	0,309	faible	0,455	faible
Z1.10 m	215,51	elevé	21,751	faible	0,304	faible	0,518	faible
Z2.1	251,15	elevé	58,676	modéré	0,223	faible	2,855	faible
Z2.2	227,74	elevé	64,818	modéré	0,167	faible	2,625	faible
Z2.3	236,58	elevé	71,752	modéré	0,310	faible	2,428	faible
Z3	128,59	elevé	6,647	faible	0,131	faible	0,444	faible

Selon la classification de l'indice de risque écologique potentiel du cadmium sur le site de kef Oum Teboul ; le risque a été classé de modéré à élevé, ce qui indique une préoccupation significative en termes de contamination des sols par ce métal. En revanche, le plomb a classé le risque de faible à modéré, suggérant une présence relativement moins préoccupante. Les indices de risque écologique potentiel du cuivre et du zinc ont tous deux donné une classification de faible risque, indiquant une contamination moins prononcée par ces métaux dans les sols.

● **La zone de BOUCAID:**

Tableau 4.20 : Classification Er^i des échantillons BOUCAID

Ech.	Er^{Cd}	Classi.	Er^{Pb}	Classi.	Er^{Cu}	Classi.	Er^{Zn}	Classi.
pb/zn 1	62,277	modéré	3,769	faible	0,090	faible	4,544	faible
pb/zn 2	64,857	modéré	3,539	faible	0,088	faible	3,234	faible
pb/zn 3	56,958	modéré	3,750	faible	0,072	faible	3,972	faible
pb/zn 4	57,634	modéré	2,830	faible	0,107	faible	3,805	faible
pb/zn 5	63,547	modéré	3,146	faible	0,102	faible	3,286	faible
B1	8,507	faible	3,256	faible	0,304	faible	0,193	faible
B2	7,888	faible	2,829	faible	0,305	faible	0,141	faible
B3	8,228	faible	2,689	faible	0,361	faible	0,139	faible
B4	32,407	faible	2,774	faible	0,331	faible	0,178	faible
B5	5,563	faible	3,321	faible	0,377	faible	0,210	faible

Sur le site de Boucaid, plus précisément dans la zone de rejets de plomb et de zinc, l'indice de risque écologique potentiel a classé le risque comme modéré . En revanche, la zone de rejet de la baryte l'a classée comme à faible risque. Que ce soit pour la zone de rejet de plomb et de zinc ou pour la zone de rejet de la baryte, l'indice de risque écologique potentiel du plomb, du zinc et du cuivre indique un risque faible.

4. Analyse spatiale

cette partie se concentre sur la modélisation numérique de deux cartographies spatiales sur le logiciel arcGIS desktop 10.8 en exploitant les résultats des données de concentrations des ETM, de l'indice du degré du risque écologique (E_r) et du facteur de translocation **Ft** des **ETM** dans les plantes pour le site de Kef Oum Teboul.

4.1 Analyse spatiale des concentrations des éléments traces métalliques dans le site de Kef Oum Teboul:

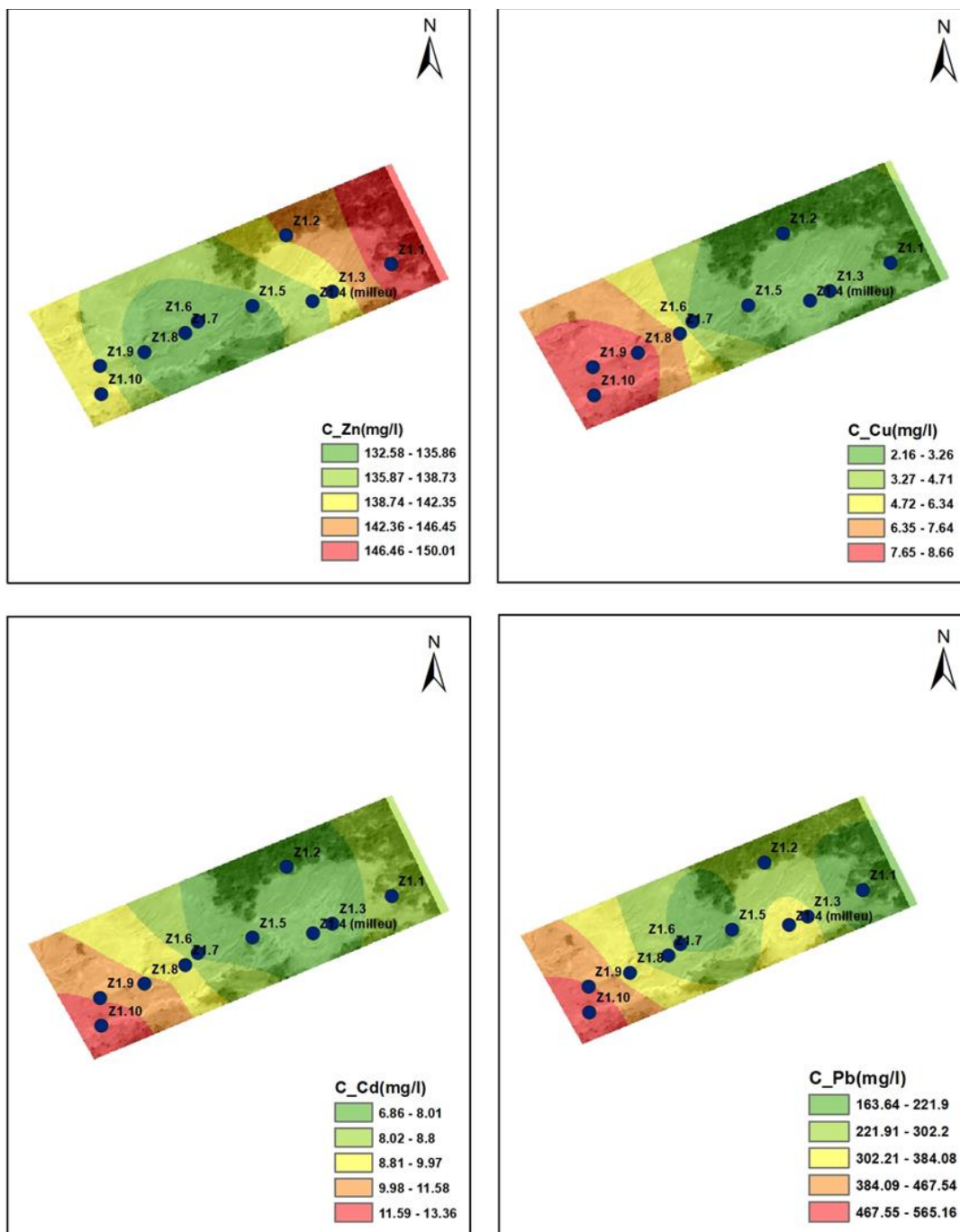


Figure 4.48. : cartographie des variations des ETM (voir **Annexe 6**)

Interprétation:

La figure ci-dessus présente le variogramme sphérique des concentrations ETM réalisé par l'outil modulaire **krigeage** (voir **Annexe 6**) sur la zone délimitée dans le site de Kef Oum Teboul. on observe les résultats suivant:

- Le zinc présente une concentration très élevée (140 mg/l) au nord-est du point Z.11, avec une migration détectée vers les points Z1.22 et Z1.3.
- Le plomb atteint sa concentration maximale au sud-ouest (490 mg/l) avec une migration vers le nord-est jusqu'au point Z8 avec une concentration moins importante.
- Le cuivre présente une concentration très élevée (8 mg/l) dans la zone sud-est, touchant les points Z.1.8, Z.1.9 et Z.1.10, avec une migration vers le nord-est.
- Le cadmium est détecté avec une concentration élevée (12 mg/l) dans la zone sud-est, dépassant largement la limite réglementaire, tout en migrant vers le nord-est.

4.2 Analyse spatiale de l'indice de risque écologique potentiel E_r et du facteur de translocation ft dans le site de Kef Oum Teboul:

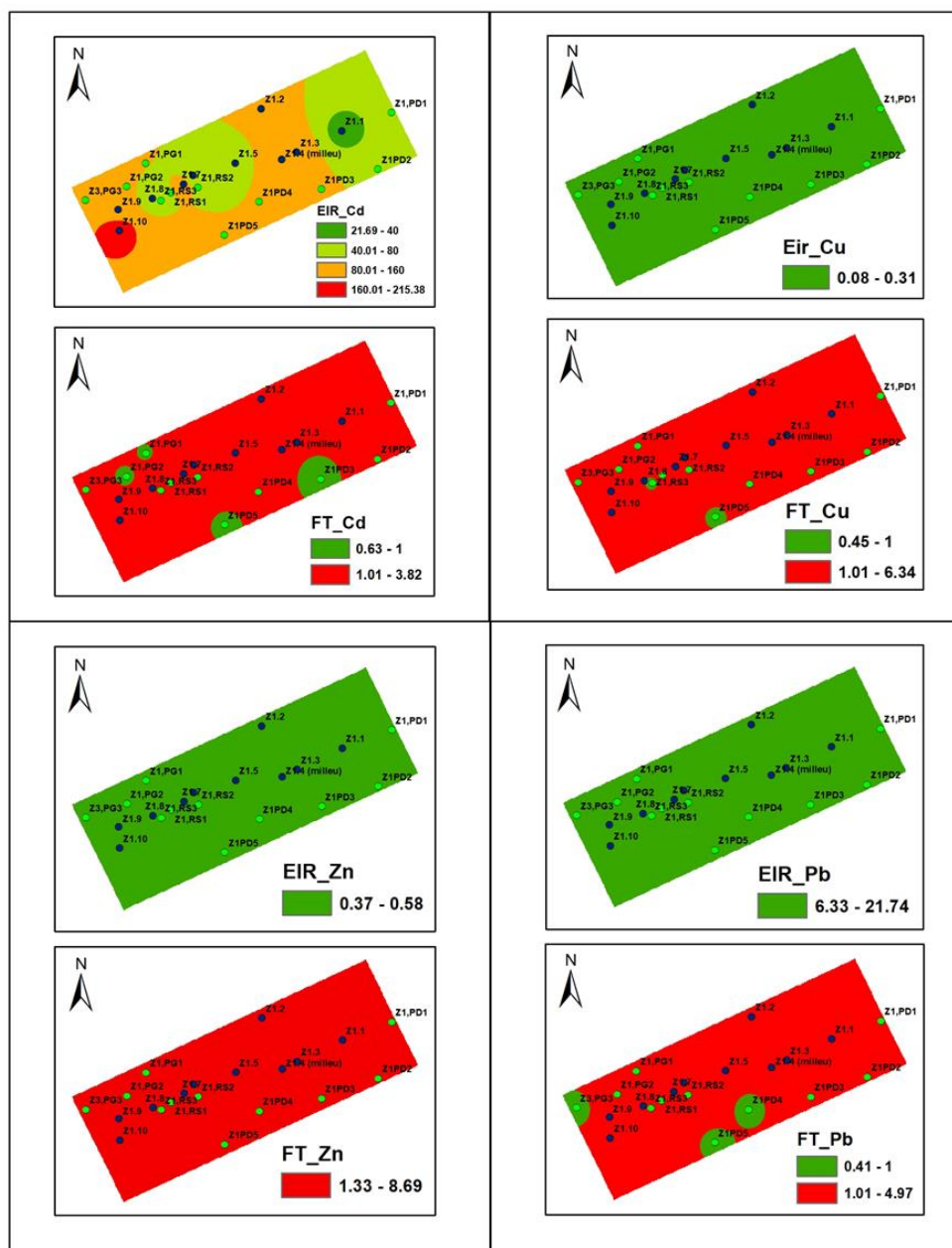


figure 4.49: cartographie des variations du E_r et Ft (voir **Annexe 6**)

interprétation

La figure ci-dessus présente le variogramme sphérique des concentrations ETM réalisé par l'outil modulaire IDW (voir **Annexe 6**).

l'examen simultanée des variogrammes spatiales de l'indice de risque écologique potentiel E_r et du facteur de translocation de la zone suggère:

Pour tous les ETM présentés dans la zone, les espèces de plantes sont hyperaccumulatrices avec des valeurs de Ft allant jusqu'à 6

1. pour le cuivre, zinc et plomb : la zone présente un indice de risque écologique potentiel faible, ce qui élimine les risques toxicologiques que peuvent présenter ces éléments sur les espèces de plantes.

2. pour le cadmium: la zone présente un risque écologique potentiel:

- **Faible** autour de l'échantillon de sol 1,
- **Modéré** au Nord Est de l'échantillon Z1 et dans la zone contenant les échantillons de sol (Z1.5, Z1.8,) et les échantillons de plantes (PG1, RS1, RS2 et RS3),
- **Élevé** dans la zone contenant les échantillons de sol Z1.2, Z1.3, Z1.4, Z1.9 et les échantillons de plantes PD3, PD4, PD5, PG3
- **Grave** autour de l'échantillon sol Z1 10

cet analyse simultanée, suggère la présence de risques toxicologiques allant de faible jusqu'à grave du cadmium sur les espèces de plantes

Conclusion

Ce chapitre, consacré à la consolidation et à l'interprétation des résultats obtenus grâce à l'application de nos méthodes d'échantillonnage et de caractérisation, a révélé des informations essentielles sur la nature et la composition des échantillons prélevés sur les sites d'étude de Kef Oum Teboul et Boucaid.

L'analyse des échantillons a indiqué des concentrations plus élevées d'éléments métalliques tels que le cadmium, le plomb, le cuivre et le zinc, notamment dans les sols et les plantes du site de Kef Oum Teboul. Il est à noter que ces concentrations dépassent souvent les limites réglementaires établies, mettant en évidence la gravité de la contamination dans cette zone. Cela souligne l'importance cruciale d'une gestion environnementale efficace pour atténuer l'impact de ces contaminants sur les écosystèmes locaux et la santé humaine.

L'étude de la minéralisation des plantes a apporté une perspective supplémentaire, permettant d'appréhender comment les plantes réagissent à la présence de contaminants dans leur environnement, et d'explorer les interactions complexes entre les éléments minéraux et le biote.

En outre, nous avons présenté une série d'indices de contamination qui ont fourni un éclairage unique sur l'ampleur de la pollution dans nos sites d'étude. Ces indices nous ont permis de dresser un bilan détaillé de la situation, révélant non seulement les niveaux de pollution, mais aussi leurs implications potentielles pour l'environnement et les écosystèmes locaux.

En utilisant le logiciel ArcGIS, nous avons pu créer des variogrammes visuelles de la distribution spatiale de la contamination, offrant une vue d'ensemble claire des zones les plus touchées.

En somme, ce chapitre nous a permis d'obtenir une image précise et détaillée des défis environnementaux auxquels nos sites d'étude sont confrontés. Ces résultats seront la base de la discussion et des recommandations dans le prochain chapitre, où nous envisagerons des stratégies de gestion et de réhabilitation efficaces pour ces zones fortement contaminées.

Chapitre 5

Analyses statistiques des données

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'utilisation innovante de l'apprentissage artificiel comme outil pour étudier la contamination des sols par les métaux lourds. L'apprentissage artificiel, un sous-domaine de l'intelligence artificielle, offre des perspectives passionnantes pour l'analyse et la prédiction de la contamination par les métaux lourds dans différents environnements. Grâce à l'exploitation d'algorithmes d'apprentissage automatique, nous pourrions tirer parti d'un large ensemble de données de contamination par les métaux lourds pour élaborer des modèles prédictifs.

À travers l'application d'outils de visualisation de données, de mesures descriptives et d'analyses statistiques univariées et multivariées, nous serons en mesure d'identifier les associations géochimiques entre les métaux individuels et les associations multi-métalliques. Cela sera réalisé grâce à l'analyse de corrélation et l'analyse de classification (clustering).

Cependant, en raison de limitations inhérentes à notre ensemble de données en termes de représentativité, notamment le nombre de points d'échantillonnage et les résultats des indices de pollution obtenus dans le chapitre précédent, nous focaliserons principalement sur l'étude du site de Kef Oum Teboul pour développer notre modèle prédictif.

Ce chapitre détaille notre approche méthodologique pour l'intégration de l'apprentissage artificiel dans notre étude. L'organigramme [Figure 5.1](#) ci-dessous fournit un aperçu de cette méthodologie, servant de guide pour l'analyse de la contamination des sols par les métaux lourds sur le site de Kef Oum Teboul.

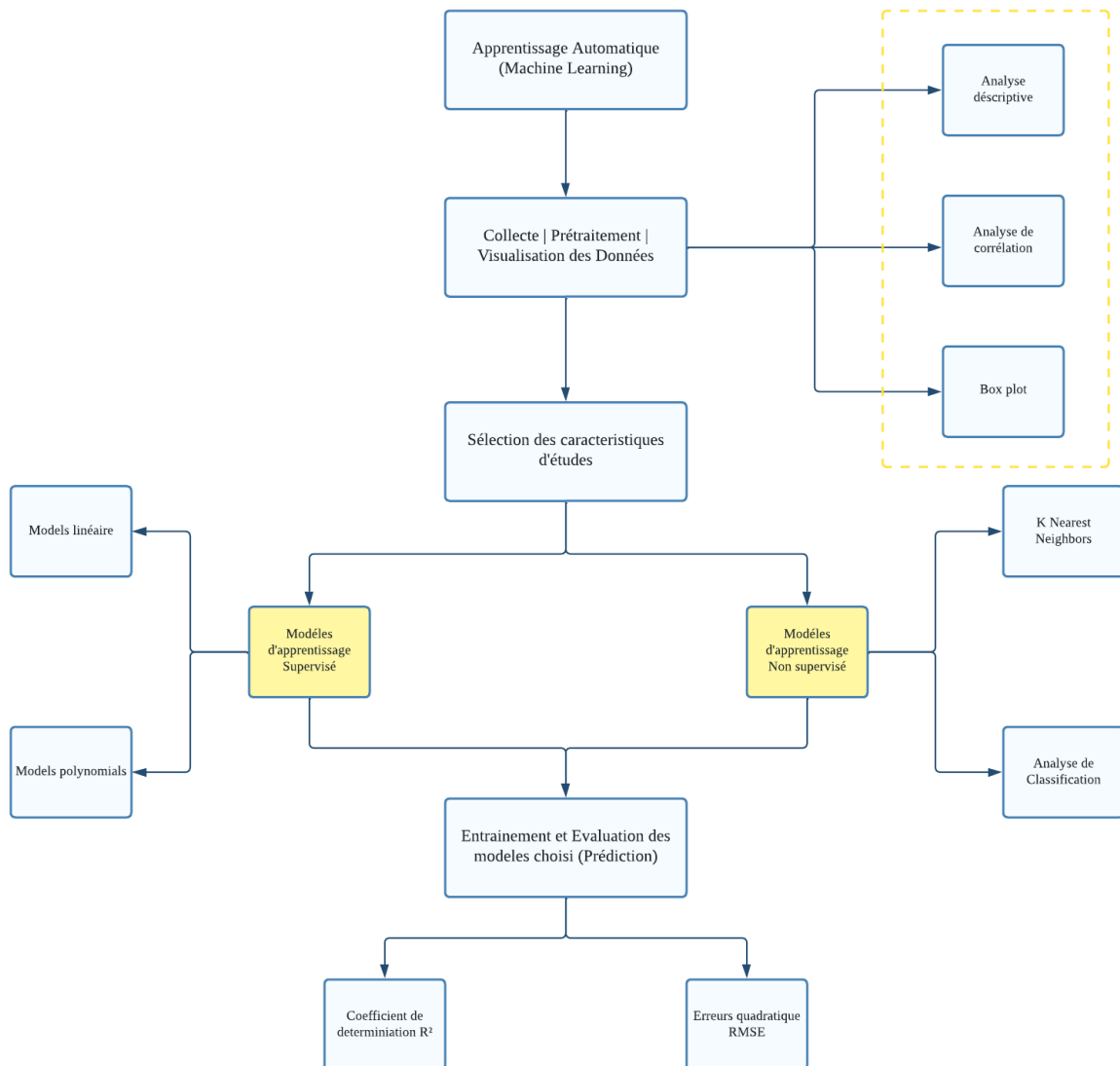


Figure 5.1 : Organigramme du chapitre 5

1. Analyse descriptive

La description statistique est une méthode d'analyse qui vise à résumer, organiser et présenter les données de manière significative. Elle permet de décrire les caractéristiques et les propriétés des données, en fournissant des mesures et des indicateurs qui révèlent des informations clés sur le jeu de données. (Wei et al., 2011)

1.1 Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site de Kef Oum Teboul

L'analyse descriptive des métaux lourds sur le site de Kef Oum Teboul révèle que les concentrations moyennes et les troisièmes quartiles du cadmium et du zinc ont dépassé le seuil établi, 3 mg/l et 300 mg/l respectivement.

	Cd	Pb	Zn	Cu
count	14.000000	14.000000	14.000000	14.000000
mean	12.600571	583.704357	278.003214	5.048500
std	7.849080	616.448641	279.629870	2.655193
min	2.166000	164.660000	110.129000	2.154000
25%	6.459500	189.434000	127.311000	2.606500
50%	9.923500	303.133500	143.908500	4.181500
75%	20.088250	536.658000	170.251750	7.824250
max	25.115000	1865.558000	856.561000	8.685000

Figure 5.2: Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site Kef Oum Teboul.

1.2 Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site Boucaid

L'analyse descriptive des métaux lourds effectuée sur le site de Boucaid met en évidence que les concentrations moyennes ainsi que les troisièmes quartiles des concentrations de cadmium et de zinc dépassent les limites établies, fixées à 3 mg/l et 300 mg/l respectivement.

	Cd	Pb	Zn	Cu
count	10.000000	10.000000	10.000000	10.000000
mean	3.678800	82.962400	591.183300	5.993900
std	2.674995	10.536738	578.751201	3.660517
min	0.556000	69.936000	41.820000	2.024000
25%	0.830000	73.570500	54.602250	2.615250
50%	4.468500	83.245000	516.840000	5.755000
75%	6.111750	90.605250	1102.681250	9.102750
max	6.486000	98.006000	1363.223000	10.576000

Figure 5.3. : Analyse descriptive des concentration des métaux lourds sur le site Boucaid

1.3 Analyse descriptive des indices de pollution du site de Kef Oum Teboul

En se basant sur l'indice de pollution de Nemerow (Pn), il a été constaté que le site présentait une pollution grave, comme en témoignent les moyennes et les troisièmes quartiles. De même, l'indice de pollution intégré (IPI) a confirmé cette classification de gravement pollué pour le site, avec des moyennes et des troisièmes quartiles démontrant une contamination préoccupante. La présence notable de cadmium (Cd) dans le sol a également été observée, avec des moyennes et des troisièmes quartiles indiquant un degré de contamination notable pour le site. Cependant, l'indice de charge de pollution (PLI) a montré une classification allant de non pollué à modérément pollué, avec des moyennes et des troisièmes quartiles reflétant cette variation de la pollution.

	PLI	CD	IPI	Pn
count	14.000000	14.000000	14.000000	14.000000
mean	1.013230	9.652963	2.413241	4.237297
std	1.406109	7.906424	1.976606	3.381969
min	0.111730	3.246243	0.811561	1.205434
25%	0.194221	4.821917	1.205479	2.271674
50%	0.297780	6.150882	1.537720	2.635886
75%	0.892396	10.968205	2.742051	5.109322
max	4.129097	24.727102	6.181776	11.048758

Figure 5.4 : Analyse descriptive des indices de pollution KOT

2. Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation est une méthode essentielle dans l'étude de la contamination des sols en métaux lourds. Elle permet de quantifier les relations entre les concentrations de différents métaux lourds et d'identifier les associations entre ces variables. Cette analyse fournit des informations précieuses pour comprendre les processus de contamination et orienter les stratégies de gestion et de remédiation des sols contaminés.

Le coefficient de corrélation est utilisé pour déterminer s'il existe ou non une relation entre deux variables. Il est calculé de la manière suivante :

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{(\sum x_i^2) \times (\sum y_i^2)}} \quad \text{avec } -1 < r < +1 \quad (5.1)$$

Plus le coefficient r se rapproche de -1 ou de +1, plus la corrélation est forte et plus les deux variables sont liées. Si r est positif, cela signifie que les deux variables évoluent de manière proportionnelle. Si r est négatif, cela indique que les deux variables évoluent en sens inverse. (Cohen et al., 2003 ; Soper.D.S, 2016).

2.1 Analyse de corrélation des métaux lourds du Site de Kef Oum Teboul

La matrice de corrélation des métaux lourds sur le site de kef Oum teboul révèle une corrélation forte entre le cadmium (Cd) et le zinc (Zn), ainsi qu'entre le cadmium et le plomb (Pb). Cela suggère que ces métaux lourds sont étroitement associés et évoluent ensemble de manière similaire. De plus, la corrélation entre le plomb et le zinc est identifiée comme très forte.

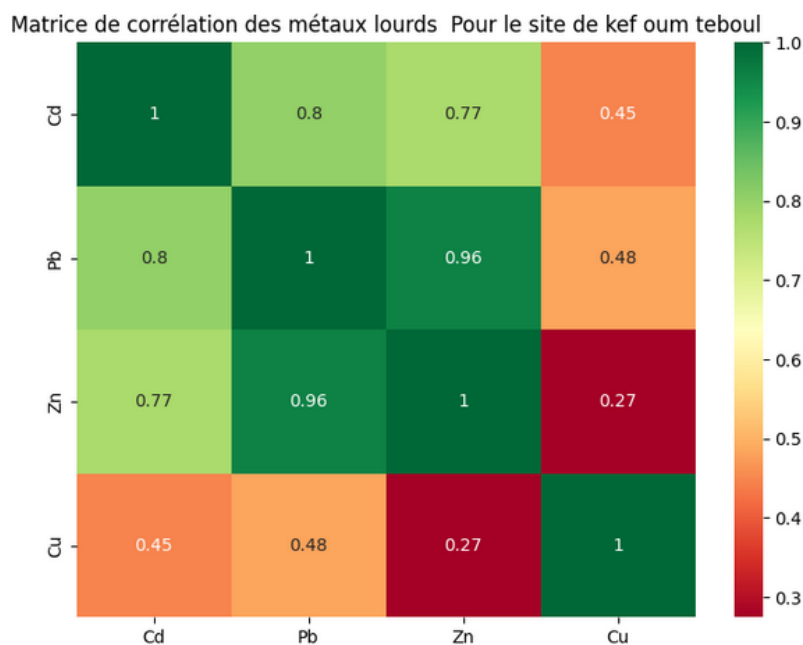


Figure 5.5. : Matrice de corrélation des métaux lourds entre eux pour le site de Kef Oum

Teboul

2.3 Analyse de corrélation des métaux lourds du Site de Boucaid

La matrice de corrélation des métaux lourds du site de Boucaid révèle une corrélation forte entre le cadmium (Cd) et le zinc (Zn), ainsi qu’une forte corrélation inverse entre le cadmium et le cuivre. De plus, la corrélation entre le plomb et le zinc est identifiée comme forte.

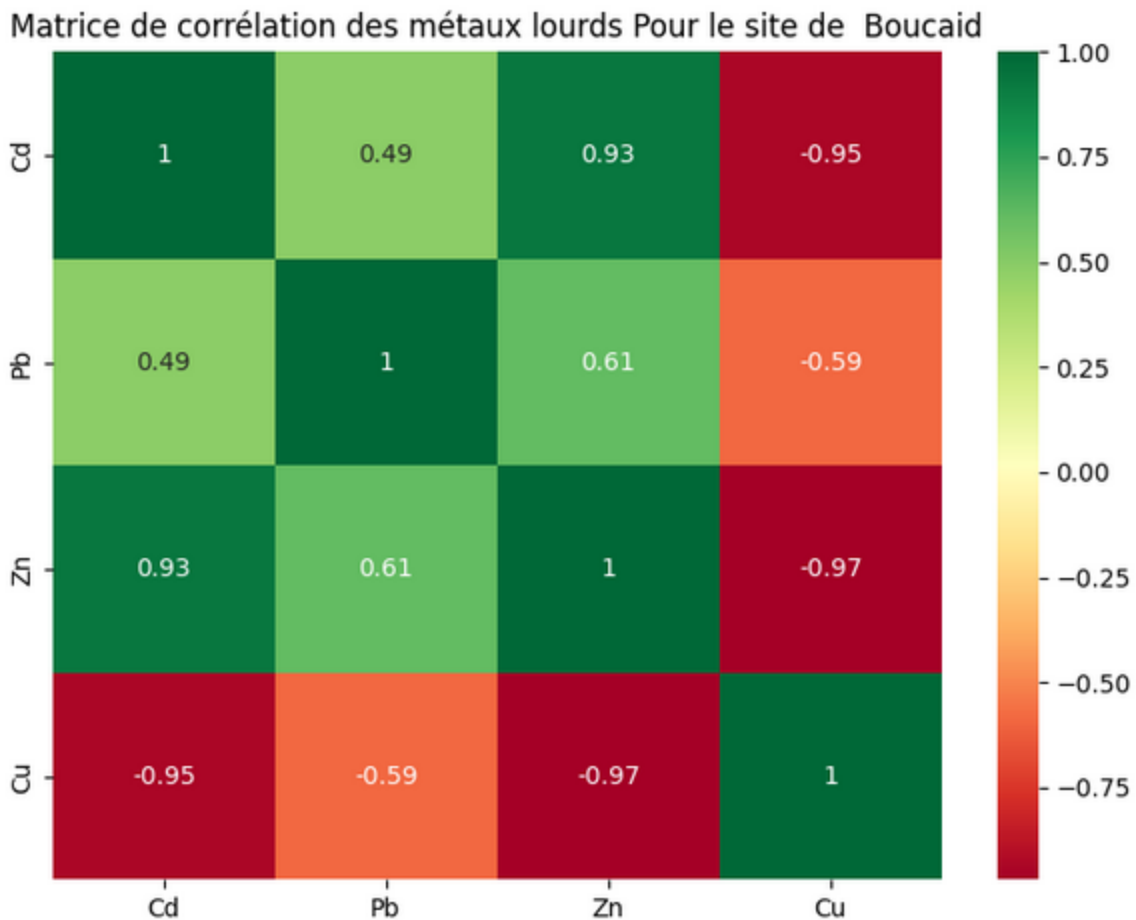


Figure 5.6. : Matrice de corrélation des métaux lourds entre eux pour le site de Boucaid.

Ces résultats des analyses de corrélation des deux sites soulignent l'importance d'examiner ces métaux lourds en tant que groupe et de prendre en compte leurs interactions lors de l'évaluation de la contamination.

Explication de la corrélation des métaux lourds entre eux :

Dans le cas spécifique du cadmium (Cd) et du zinc (Zn), il est courant de trouver une forte corrélation entre ces deux métaux (**0.93 dans le cas de Boucaid et 0.77 dans le cas de Kef Oum Teboul**). Cela peut s'expliquer par le fait que le zinc est souvent associé à des minéraux contenant du cadmium, et leur libération dans l'environnement peut se produire simultanément.

La forte corrélation (**0.8 dans le cas de Kef Oum Teboul**) entre le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) peut également être due à des sources communes de contamination. Le plomb et le cadmium sont souvent associés dans des gisements minéraux et peuvent être libérés dans l'environnement à partir des mêmes sources anthropiques ou naturelles. Par conséquent, leur présence et leur comportement peuvent être étroitement liés, ce qui se reflète dans leur corrélation élevée.

La corrélation entre le plomb (Pb) et le zinc (Zn) est plus forte sur le site de Kef Oum Teboul (**0.96**) en raison d'une mauvaise séparation des minéraux lors du processus de flottation. En revanche, sur le site de Boucaid, la corrélation entre le plomb et le zinc est légèrement moins prononcée (**0.61**), suggérant une meilleure séparation.

2.4 Analyse de corrélation entre les concentrations des métaux lourds et l'indice de pollution de Nemerow (Pn)

La matrice de corrélation entre les métaux lourds et l'indice de pollution de Nemerow (Pn) révèle une corrélation très forte entre le Pn et les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et le zinc (Zn). Cette forte corrélation justifie notre choix d'utiliser l'indice de pollution de Nemerow (Pn) pour l'analyse de clustering.

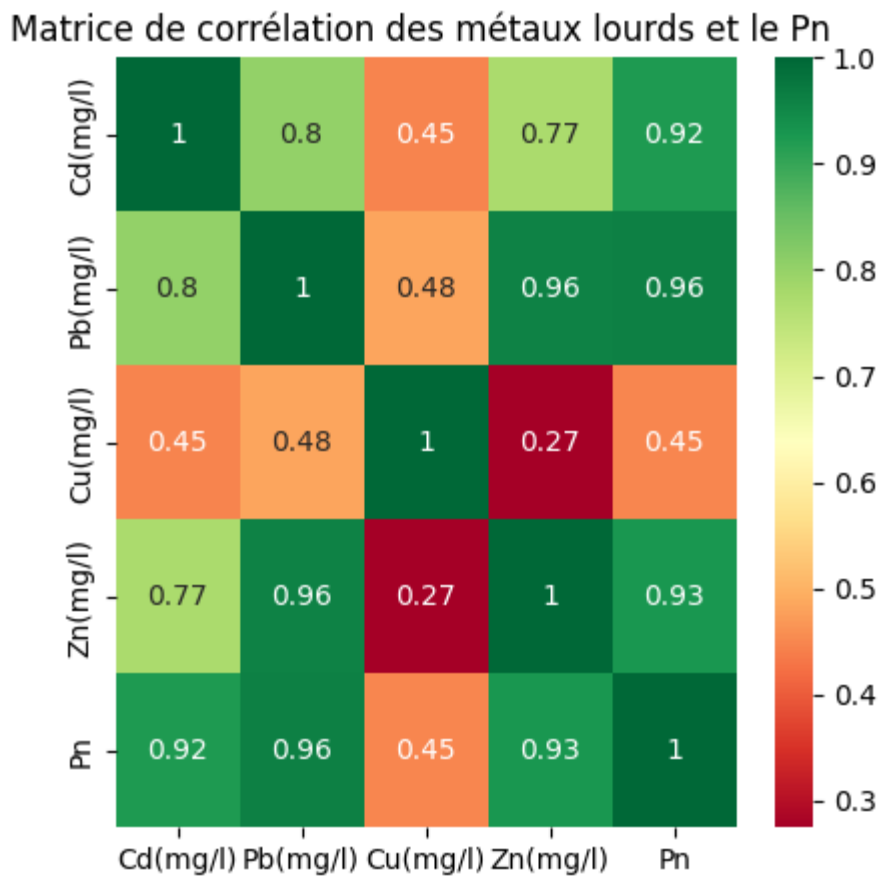


Figure 5.7. : Matrice de corrélation des métaux lourds entre eux pour le site de Kef Oum Teboul.

3. Le Box plot

Les box plots sont un outil graphique simple mais puissant qui peut être utilisé à la place des histogrammes pour atteindre ces deux objectifs. Alors que les histogrammes nécessitent un échantillon d'au moins 30 pour être utiles, les box plots ne nécessitent qu'un échantillon de seulement 5, offrent plus de détails dans les extrémités de la distribution et sont plus facilement comparables entre trois échantillons ou plus. Plusieurs améliorations apportées au box plot de base peuvent le rendre encore plus informatif.

Le box plot est un outil visuel utile pour analyser la distribution des concentrations de métaux lourds dans les échantillons de sol. Il permet de visualiser la médiane, les quartiles, l'étendue et les valeurs aberrantes, offrant ainsi une compréhension globale de la variation des données. Cela peut aider à identifier les concentrations anormalement élevées ou basses, les écarts entre les échantillons et les tendances générales de contamination.(Krzywinski,2014).

3.1 Box plot des concentrations des métaux lourds pour le site de kef oum teboul

Le box plot illustré présente les distributions des métaux lourds sur le site de Kef Oum Teboul. Les résultats indiquent une homogénéité relative des concentrations de cuivre (Cu), cadmium (Cd) et zinc (Zn) autour de la médiane. En revanche, pour le plomb (Pb), les valeurs de concentration sont plus dispersées, avec une plus grande variation observée. Il est important de noter que la médiane pour le zinc (Zn) dépasse le seuil de référence .

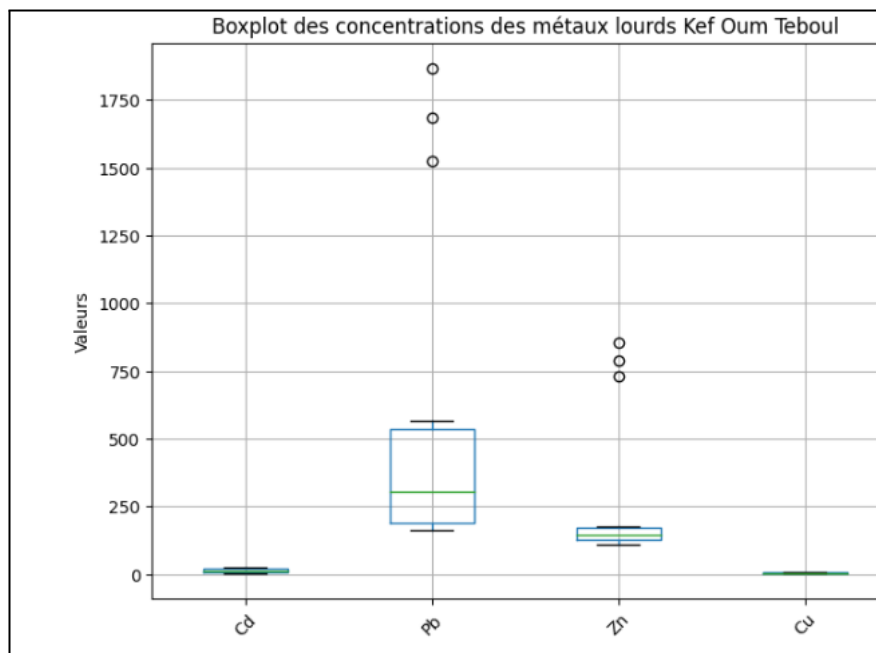


Figure 5.8 : Box plot des métaux lourds pour le site de kef oum teboul.

3.2 Box plot des concentrations des métaux lourds pour le site de Boucaid

Le box plot illustré présente les distributions des métaux lourds sur le site de Boucaid. Les résultats indiquent une homogénéité relative des concentrations de cuivre (Cu), cadmium (Cd) et du plomb (Pb) autour de la médiane. En revanche, pour le zinc (Zn), les valeurs de concentration sont plus dispersées, on note aussi que la médiane de ce dernier dépasse le seuil de référence.

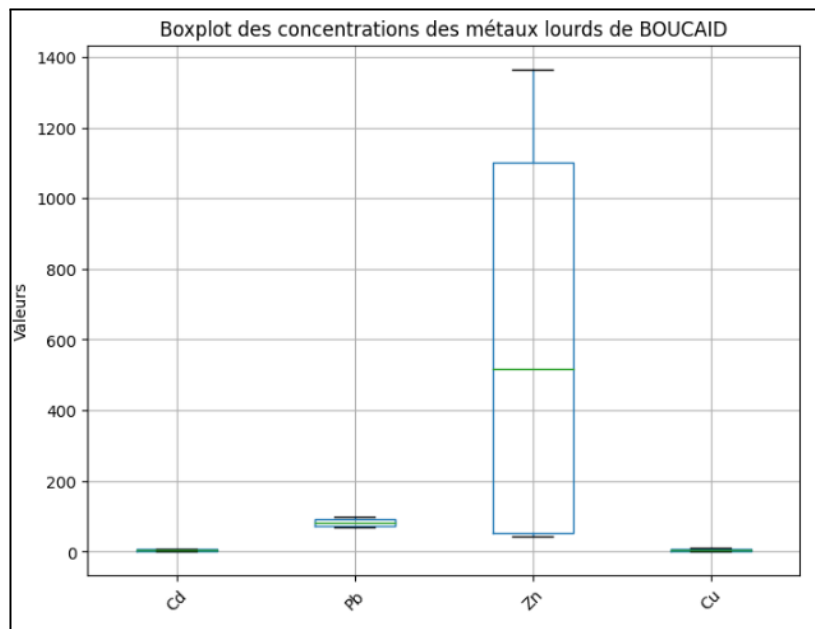


Figure 5.9 : Box plot des métaux lourds pour le site de Boucaid.

3.4 Box plot des indices de pollution pour le site de kef oum teboul

La Figure 5.10 ci-dessous illustre les box plots des indices de pollution, notamment l'indice de pollution de Nemerow (Pn), le degré de contamination (CD) et l'indice de charge de pollution (PLI). Une observation notable est la présence d'une dispersion des valeurs par rapport à la médiane. Cela indique que les données des indices de pollution peuvent varier considérablement autour de la valeur centrale, ce qui suggère une certaine hétérogénéité dans la répartition de la pollution

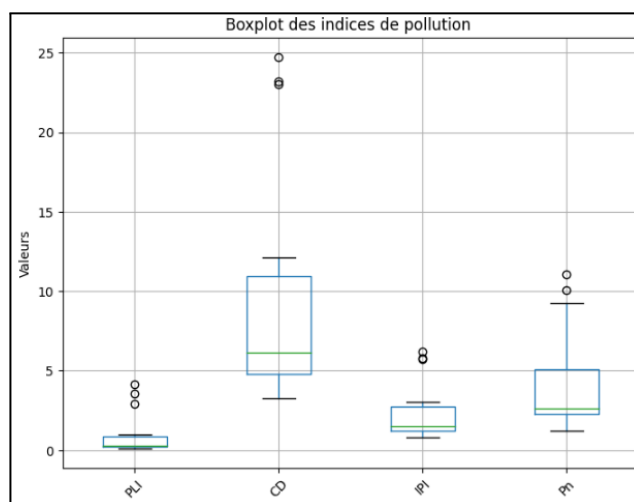


Figure 5.10 : Box plot des indices de pollution pour le site de kef oum teboul.

4. Analyse de classification (Clustering)

L'Analyse de classification, ou clustering, est une méthode statistique utilisée pour regrouper des données similaires sans connaissances préalables sur les groupes.

Elle est largement utilisée pour explorer des ensembles de données complexes et trouver des structures ou des sous-groupes intrinsèques. Dans le contexte de la contamination des sols en métaux lourds, l'analyse de classification peut être appliquée pour regrouper les échantillons de sol en fonction de leurs profils de contamination similaires, ce qui permet de mieux comprendre la répartition et la classification des zones contaminées.

Le clustering est une méthode de classification automatisée qui vise à regrouper des individus (échantillons) ayant des similarités et des tendances similaires dans des groupes distincts. L'objectif est de créer des regroupements de manière à ce que les membres d'un même groupe partagent des caractéristiques communes (Vidal et al., 2004 ; Chen et al., 2005 ; Pérez-Sirvent et al., 2009 ; Swarnalatha et al., 2015).

5. Choix de l'algorithme implémenté

Notre choix s'est porté sur l'algorithme du Regroupement hiérarchique agglomératif (Agglomerative clustering) pour les raisons suivantes :

- La représentativité des données recueillies en terme de nombre de points d'échantillonnage
- Les résultats des indices caractéristiques de pollution pour le site de Kef Oum Teboul, comme il est affiché dans les matrices de corrélation, diminuent également la représentativité des données. Ceci réduit l'efficacité de l'implémentation des modèles supervisés (modèle linéaire et polynomial) car ce sont des algorithmes paramétriques qui nécessitent un vaste ensemble de donnée pour pouvoir déterminer la tendance directe qui existe entre les variables comme illustré dans les figures ci-dessous:

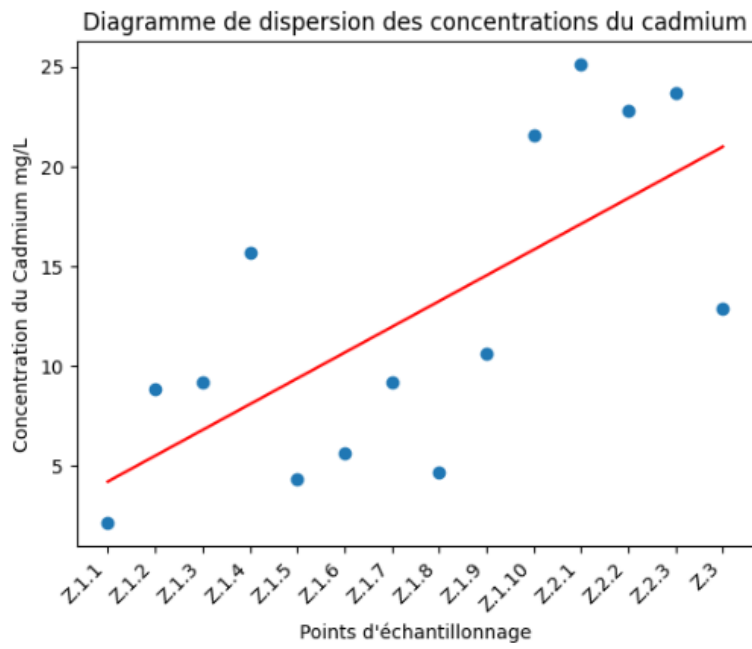


Figure 5.11 : Tendence entre les points d'échantillonnage et Cd(mg/l)

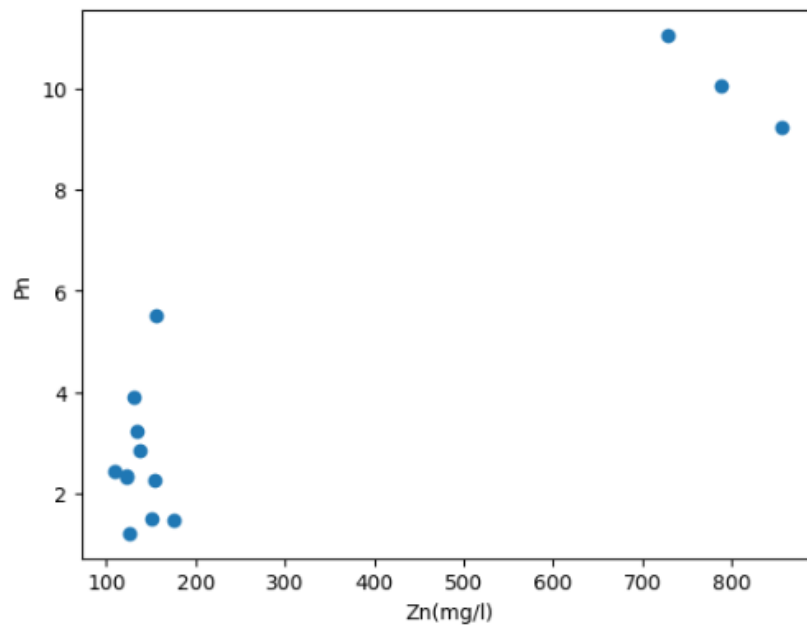


Figure 5.12 : Tendence entre Pn et Zn(mg/l)

5.1 Le Regroupement hiérarchique agglomératif (Agglomerative clustering)

L'analyse de regroupement des points d'échantillonnage selon l'indice de pollution de Nemerow (P_n) permet de visualiser la répartition des échantillons en fonction de leurs caractéristiques similaires et de les regrouper en clusters. Dans notre cas, nous avons choisi que le nombre de clusters soit 3, ce qui correspond à trois classifications différentes des échantillons. Cette approche nous permet de mieux comprendre la similarité et la dissimilarité entre les échantillons en termes de leurs propriétés et de leur composition. Ces informations peuvent être utiles pour identifier des patterns ou des tendances communes dans les données, ce qui peut ensuite orienter les décisions et les actions appropriées en matière de gestion de la contamination des sols.

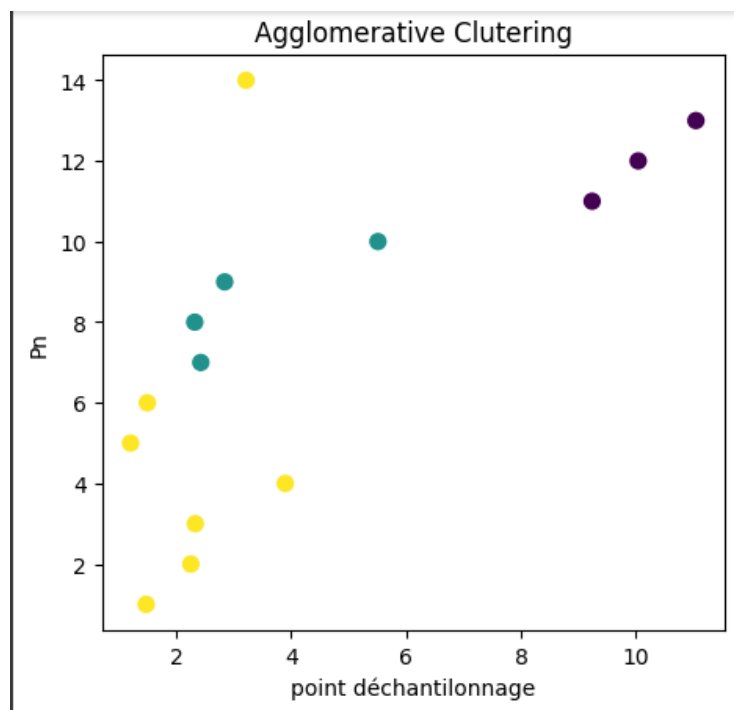


Figure 5.13. : Agglomerative clustering entre les points d'échantillonnage de kef Oum Teboul selon le P_n .

5.2 Le Elbow plot

Le elbow plot est un outil visuel qui aide à déterminer le nombre optimal de clusters dans une analyse de clustering en identifiant le point où l'inertie intra-cluster cesse de diminuer rapidement. Cela permet de choisir un nombre approprié de clusters pour une interprétation cohérente des données.

Dans notre cas, l'elbow plot indique que le nombre optimal de clusters est de 3, cela confirme notre choix précédent du nombre de clusters et renforce sa justesse.

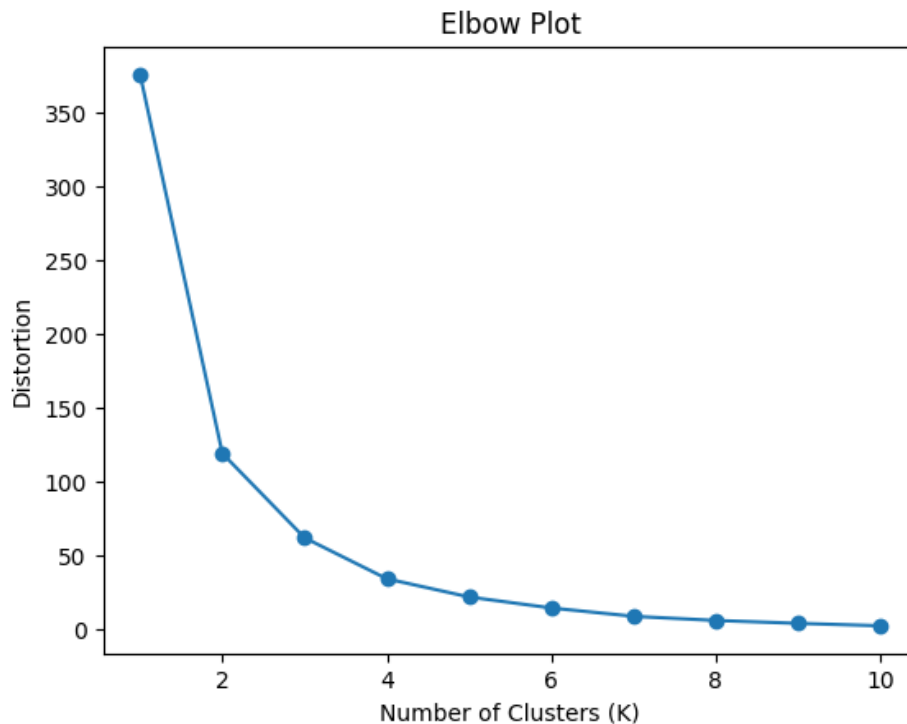


Figure 5.14 : Représentation graphique de l'elbow plot.

5.4 Coefficient de détermination R^2 et l'erreur quadratique moyenne RSE

Le RSE (Root Mean Square Error) est une mesure de l'écart moyen entre les valeurs observées et les valeurs prédites par un modèle statistique. Il représente la dispersion des résidus du modèle et permet d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle aux données. Plus le RSE est faible, plus le modèle est considéré comme précis.

Le R^2 (coefficient de détermination) est une mesure de la proportion de la variance totale de la variable dépendante expliquée par le modèle. Il varie entre 0 et 1, où une valeur de 1 indique que le modèle explique parfaitement la variation de la variable dépendante et une valeur de 0 indique que le modèle n'explique aucune variation. Le R^2 est souvent utilisé pour évaluer la qualité de l'ajustement du modèle, où une valeur élevée indique un bon ajustement.

En résumé, le RSE mesure l'erreur de prédiction du modèle, tandis que le R^2 mesure la qualité globale de l'ajustement du modèle aux données.

En appliquant le RSE et le R^2 à notre modèle nous obtenons :

$$R^2 = 84,97\%$$

Ce qui suggère que le modèle explique environ 84,97 % de la variation de la variable dépendante.

Et

$$Accuracy = 69.69\%$$

Ce qui indique que le modèle prédit correctement la valeur de la variable dépendante pour environ 69,70 % des observations.

Les limites de la méthode :

Lorsque le nombre de données est restreint, il devient difficile d'obtenir une représentativité adéquate de la variabilité réelle des classes présentes dans l'ensemble de données. Par conséquent, les clusters formés peuvent être peu distincts et ne pas séparer correctement les différentes classes.

De plus, la sensibilité aux données aberrantes est un problème majeur avec un petit nombre d'échantillons. Une seule donnée aberrante peut avoir un impact disproportionné sur les résultats du clustering, entraînant ainsi des erreurs importantes dans la classification. Les valeurs extrêmes peuvent fausser la formation des clusters et altérer considérablement les résultats.

Un autre défi lié au nombre limité d'échantillons est l'instabilité des clusters. De légères variations dans les valeurs des échantillons peuvent conduire à des changements significatifs dans la composition et la structure des clusters. Cela peut rendre les résultats de classification moins fiables et sensibles aux fluctuations des données d'entrée.

De plus, un nombre restreint d'échantillons peut conduire à un surapprentissage. Les modèles de clustering peuvent être trop ajustés aux caractéristiques spécifiques des échantillons disponibles, ce qui limite leur capacité à généraliser et à classifier de nouvelles données de manière précise.

Un manque de diversité est également un problème potentiel avec un petit nombre d'échantillons. Certaines caractéristiques ou variations possibles peuvent ne pas être capturées, ce qui limite la capacité du clustering à différencier les classes de manière significative.

Enfin, l'évaluation et l'ajustement des paramètres de la méthode de clustering deviennent plus difficiles avec un nombre réduit d'échantillons. Les techniques de validation croisée et d'optimisation peuvent être moins fiables et produire des résultats moins robustes, ce qui peut affecter la précision et la performance globale du clustering.

Pour atténuer certains de ces problèmes, il peut être bénéfique d'explorer des techniques de prétraitement des données, de régularisation ou d'augmentation de données afin d'améliorer la représentativité des échantillons et de renforcer la stabilité des clusters.

Conclusion

Ce chapitre, consacré à l'analyse statistique des données de contamination des sols par l'apprentissage artificiel, a permis d'établir une analyse plus approfondie de la contamination dans les sites de Kef Oum Teboul et de Boukaid. Plus précisément dans le site de Kef Oum Teboul, l'utilisation des différents outils de visualisation d'analyse de corrélation et de classification entre les concentrations des métaux lourds et l'indice caractéristique, nous a permis de prédire un regroupement des échantillons selon l'indice Pn sans aucune hypothèse préalable.

Le modèle non paramétrique choisi (regroupement hiérarchique agglomératif) explique 84,97 % de la variation des données du Pn et prédit à 70% le nombre optimal de groupe (3) que ce dernier peut atteindre.

En l'absence d'une collecte de données exhaustive et étendue, on aurait pu exploiter davantage les outils de l'apprentissage artificiel pour faire l'étude des tendances qu'offre les modèles paramétrique pour expliquer les corrélations qui peuvent exister entre les données de contamination de sol

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études a porté sur l'évaluation des risques de contamination des éléments traces métalliques (ETM) dans les sols, les plantes, les sédiments et les rejets miniers sur deux sites miniers, à savoir Kef Oum Teboul et Boucaïd. Tout d'abord nous avons abordé la problématique environnementale liée à l'activité minière en Algérie en mettant en évidence l'importance de la réglementation, de la gestion adéquate des rejets miniers et de la réhabilitation des sites pour atténuer les problèmes environnementaux.

Des prélèvements de sols et de plantes ont été réalisés sur deux sites miniers. Des tests ont été effectués pour caractériser physiquement les échantillons, tels que la mesure du pH et de la teneur en eau. Pour la caractérisation chimique et minéralogique, des analyses par DRX, FRX et SAA ont été effectuées. De plus, des essais de prédiction de DMA et d'extraction ont été réalisés pour étudier la caractérisation géochimique des échantillons. Ces analyses ont fourni des informations détaillées sur la composition et les propriétés des échantillons prélevés, permettant ainsi une caractérisation complète des sites miniers étudiés.

Les résultats ont révélé que le site de Kef Oum Teboul présentait une pollution plus importante que celui de Boucaïd, en particulier en ce qui concerne le cadmium, le plomb et le zinc, dépassant les seuils limites réglementaires. Les résultats de la SAA ont été utilisés pour le calcul des indices de pollution, ce qui a permis une classification des sites. Pour les plantes, le facteur de translocation (FT) a été calculé, ainsi qu'une cartographie a été réalisée pour visualiser la mobilité des concentrations des métaux lourds, et le degré de risque écologique.

Une analyse statistique approfondie a été réalisée à l'aide de l'apprentissage artificiel pour exploiter davantage les données. La matrice de l'analyse descriptive, les corrélations, les box plots ainsi que l'analyse du clustering en utilisant l'algorithme de Regroupement hiérarchique agglomératif.

Les recommandations suggérées sur les sites miniers de Kef Oum Teboul et Boucaïd

1. Essais cinétiques (mini cellule d'altération) : Les essais cinétiques ont été utilisés pour évaluer la vitesse d'altération des minéraux contenant des métaux lourds dans le sol. Ces tests fournissent des informations précieuses sur les processus de libération des métaux et aident à comprendre la dynamique de leur migration dans l'environnement. Il est recommandé de poursuivre ces essais pour approfondir notre compréhension de la cinétique de libération des métaux lourds dans les sites miniers étudiés.
2. Essais d'amendement alcalin (petite et grande échelle) : Les essais d'amendement alcalin donnent des résultats prometteurs pour réduire la mobilité des métaux lourds dans le sol. Ces essais impliquent l'ajout de matériaux alcalins pour augmenter le pH du sol, ce qui favorise la précipitation des métaux lourds sous forme insoluble. Il est recommandé de réaliser ces essais à petite et grande échelle pour évaluer leur efficacité à long

terme et leur applicabilité pratique dans la remédiation des sites miniers contaminés.

3. Utilisation d'espèces hyperaccumulatrices pour la phytoremédiation : Les espèces végétales hyperaccumulatrices, telles que le romarin, présentent la capacité d'absorber et de concentrer de grandes quantités de métaux lourds dans leurs tissus. L'utilisation de ces plantes dans le processus de phytoremédiation peut aider à réduire les concentrations de métaux lourds dans le sol. Il est recommandé de poursuivre les études sur l'utilisation du romarin et d'autres espèces hyperaccumulatrices pour évaluer leur efficacité dans la décontamination des sites miniers étudiés.
4. Étude statistique : Pour garantir la représentativité des données, il est recommandé de recueillir un nombre plus important d'échantillons. Une taille d'échantillon adéquate permettra une meilleure estimation des paramètres, réduira l'incertitude statistique et renforcera la validité des conclusions tirées de l'étude. Il est également important de prendre en compte la variabilité spatiale des métaux lourds dans les sites miniers, en effectuant des échantillonnages stratifiés pour couvrir différentes zones et profondeurs du sol.

Les résultats obtenus jusqu'à présent suggèrent que ces approches sont prometteuses pour réduire la mobilité des métaux lourds et décontaminer les sites miniers, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer leur efficacité à grande échelle et leur applicabilité pratique. Ces recommandations fournissent une base solide pour orienter les futures recherches et les actions de remédiation visant à réduire l'impact environnemental des sites miniers contaminés par les métaux lourds.

Bibliographie

GHERBI, Mohamed. Problematic of environment protection in Algerian cities. Energy Procedia, 2012, vol. 18, p. 265-275.

Nick Ceto, Shahid Mahmud, et al. Abandoned mine site characterization and cleanup handbook. U.S. Environmental Protection Agency, Region 10. 2001. 418. 48503775. [Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook \(epa.gov\)](#)

MCNELLY, Gregory D. Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA: Chemical Dehalogenation: Final. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1992.

MEANS, B. Risk-assessment guidance for superfund. Volume 1. Human health evaluation manual. Part A. Interim report (Final). Environmental Protection Agency, Washington, DC (USA). Office of Solid Waste and Emergency Response, 1989.

Hanna Punkkinen, Markku Juvankoski, et al. Subaqueous in-pit disposal. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland. [En Ligne]. [Subaqueous in-pit disposal – Mine Closure \(gtk.fi\)](#)

Nadia RAMDANI, Les déchets, les résidus et les stériles. Thèse Doctorat. 2021. [Polycopié RAMDANI.pdf \(univ-sba.dz\)](#)

Federal Remediation Technologies Roundtable. Environmental Dredging. [En Ligne]. 2022. [Technology Screening Matrix | Federal Remediation Technologies Roundtable \(frtr.gov\)](#)

Rick Szilagyi. Mine Backfill. [En Ligne]. 12/04/2016. [Mine Backfill \(westech-inc.com\)](#)

NAIDU, Ravi. Recent advances in contaminated site remediation. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, vol. 224, p. 1-11.

Geofix Fundações .Slurry Wall with Clamshell and / or Hydromill. [En Ligne]. 2023. [Geofix Fundações - Services](#)

Landon Halloran, Gabriel Rau , Martin Andersen, et.al. Groundwater facts 2017 Office of Solid Waste and Emergency Response. UNSW Sidney. 2017. [UNSW-CWI groundwater-facts_2017.pdf](#)

International Hydropower Association. Sediment management strategies. [En Ligne]. 2022. [Strategies \(hydropower.org\)](https://www.hydropower.org/strategies)

Bray Brothers Drainage. ECO TRENCH WASTEWATER SYSTEMS: WHAT IS AN ECO TRENCH?. [En Ligne]. 2022. [Eco Trench Wastewater Systems - Bray Brothers Drainage](https://www.braybrothersdrainage.com/eco-trench-wastewater-systems)

ROHRBACHER, Fanny et ST-ARNAUD, Marc. Root exudation: the ecological driver of hydrocarbon rhizoremediation. *Agronomy*, 2016, vol. 6, no 1, p. 19.

HU, Yihang, CHEN, Ziwei, JIAO, Yang, et al. Experimental Investigation of Vitrification Process for the Disposal of Hazardous Solid Waste Containing Chlorides. *Processes*, 2022, vol. 10, no 3, p. 526. Vitrification Process for the Disposal of Hazardous Solid Waste Containing Chlorides

CASSISTA, Madame Annie. Revue de littérature en vue de la mise à jour du guide de caractérisation des résidus miniers et du minierai. 2015.

BOUZAHZAH, Hassan. Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable du drainage minier acide. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

EDAHBI, Mohamed. Prédiction du comportement géochimique des rejets miniers porteurs de terres rares. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2018.

BAILLY, France, AMIR, Hamid, BART, Frédéric, et al. Environnement et restauration des sites miniers. *Géologues*, 2021.

WORLDWIDE, Environmental Law Alliance. Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers. Environmental Law Alliance Worldwide. Oregon, USA, 2010.

Gouvernement Australien. Programme des bonnes pratiques pour le développement durable de l'industrie minière. RÉHABILITATION DE SITES MINIERES. [En Ligne]. 2016. [RÉHABILITATION DE SITES MINIERES](https://www.environment.gov.au/minerals/industry-rehabilitation)

F. Khelifi, N. Mokadem, G. Liu, B. Yousaf, H. Zhou, Ncibi Y. Hamed. Occurrence, contamination evaluation and health risks of trace metals within soil, sediments and tailings in southern Tunisia. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03531-8>

Hassan Bouzahzah, Mostafa Benzaazoua, Bruno Bussière, Benoît Plante. Revue de littérature détaillée sur les tests statiques et les essais cinétiques

comme outils de prédiction du drainage minier acide. Environnement, Ingénierie & Développement, 2014, N°66 - mars 2014, pp.14-31. [ff10.4267/dechetssciences-techniques.34off.ffhal-03161738f](https://doi.org/10.4267/dechetssciences-techniques.34off.ffhal-03161738f)

PÉPIN, Geneviève. Évaluation du comportement géochimique de stériles potentiellement générateurs de drainage neutre contaminé à l'aide de cellules expérimentales in situ. École Polytechnique de Montréal, 2009./

Plante, B. Comparaison des essais statiques et évaluation de l'effet de l'altération pour des rejets de concentrateur à faible potentiel de génération d'acide. École Polytechnique de Montréal. 2004.

Gouvernement du Québec Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, [Plan de travail 2021-2022 - Restauration des sites miniers abandonnés](#). [en ligne]. 2021. mmf.gouv.qc.ca

AISSAOUI, Tiziri. Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines d'Azzaba et Kef Oum Teboul. 2017. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

ARAB, Larbi Hadj, BOUTALEB, Abdelhak, et BERDOUS, Dalila. Environmental assessment of heavy metal pollution in the polymetallic district of Kef Oum Teboul (El Kala, Northeast Algeria). Environmental Earth Sciences, 2021, vol. 80, p. 1-13.

ALI ZERROUKI, Ahmed et MELILA, Mamatchi. Evaluation of soil contamination by heavy metals in the vicinity of Boucaid Mine, Ouarsenis (NO Algeria). Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2021, vol. 30, no 8, p. 924-942.

Serna, F., Lagneau, J., & Carpentier, J.-M. (2014). Diffraction des rayons X et Catalyse. CHIMIE NOUVELLE N° 116 - octobre 2014.

Thirion-Merle, V. V. (2014). Spectrométrie de fluorescence X. Dans Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes (Collection Sciences Archéologiques). Éditions des archives contemporaines. (ISBN: 9782813001634). [Identifiant HAL: ffhal-01393984].

Dr. ADOUANI, I. (2020). LA SPECTROSCOPIE ATOMIQUE (SA). Université Ferhat Abbas Sétif-1, Faculté de médecine, département de pharmacie: Laboratoire de chimie analytique.

Pellet, M., & Laville-Timsit, L. (1993). Échantillonnage de sols pour caractérisation d'une pollution : Guide méthodologique (Rapport BRGM n° 37865).

F. Khelif, N. Mokadem, G. Liu, B. Yousaf, H. Zhou, K. Ncibi, Y. Hamed (2021). Occurrence, contamination evaluation and health risks of trace metals within soil, sediments and tailings in southern Tunisia. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03531-8>.

Marta Kandziora-Ciupa, Ryszard Ciepał, Aleksandra Nadgórska-Socha (2016). Assessment of Heavy Metals Contamination and Enzymatic Activity in Pine Forest Soils under Different Levels of Anthropogenic Stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 651-658. DOI: 10.15244/pjoes/61813.

Abdellah El Azharia, Ali Rhoujjatia, Moulay Laârab El Hachimib, Jean-paul Ambrosi (2017). Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.

Moldovan, A., Török, A. I., Kovacs, E., Cadar, O., Mirea, I. C., & Micle, V. (2022). Metal Contents and Pollution Indices Assessment of Surface Water, Soil, and Sediment from the Aries River Basin Mining Area, Romania.

Seklaoui, M. (2018). Etude environnementale de la pollution minière du district mercuriel d'Azzaba.

Kandziora-Ciupa, M., Ciepał, R., & Nadgórska-Socha, A. (2016). Assessment of Heavy Metals Contamination and Enzymatic Activity in Pine Forest Soils under Different Levels of Anthropogenic Stress. *Pol. J. Environ. Stud.*, 25(3), 1045-1051. DOI: 10.15244/pjoes/61813

Noubissie, E. (2015). Spéciation des composés organométalliques (Hg, Sn, Pb) dans les sols des cultures maraîchères et dans trois espèces de plantes cultivées à Ngaoundéré (Cameroun) [Doctoral dissertation, L'Université de Pau et des Pays de l'Adour]

F. Khelif, N. Mokadem, G. Liu, B. Yousaf, H. Zhou, K. Ncibi, Y. Hamed (2021). Occurrence, contamination evaluation and health risks of trace metals within soil, sediments and tailings in southern Tunisia. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03531-8>

Abdellah El Azharia, Ali Rhoujjatia, Moulay Laârab El Hachimib, Jean-paul Ambrosi (2017). Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.

Moldovan, A., Török, A. I., Kovacs, E., Cadar, O., Mirea, I. C., & Micle, V. (2022). Metal Contents and Pollution Indices Assessment of Surface Water, Soil, and Sediment from the Aries River Basin Mining Area, Romania.

Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W., & Rinklebe, J. (2016). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*. doi:10.1016/j.earscirev.2017.06.005

Lapierre, E. (2018). Accumulation et translocation de cinq éléments traces dans la biomasse aérienne de végétaux d'intérêt dans un contexte de phytoremédiation. Mémoire de l'Université de Montréal.

Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003). Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences (3rd ed.). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.

Soper, D. S. (2016). p-value calculator for correlation coefficients [software]. Available from [Free Statistics Calculators - Home](#).

Vidal, J., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., & Navarro, M. C. (2004). Origin and behaviour of heavy metals in agricultural calcareous fluvisols in semiarid conditions. *Geoderma*, 121(3–4), 257–270. doi:10.1016/j.geoderma.2003.12.001.

Chen, T. B., Zheng, Y. M., Lei, M., Huang, Z. C., Wu, H. T., Chen, H., et al. (2005). Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*, 60(4), 542–551. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.12.072.

Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., García-Lorenzo, M. L., Molina, J., & Tudela, M. L. (2009). Geochemical background levels of zinc, cadmium and mercury in anthropically influenced soils located in a semi-arid zone (SE, Spain). *Geoderma*, 148(3–4), 307–317. Doi: 10.1016/j.geoderma.2008.10.017.

Swarnalatha, K., Letha, J., Ayoob, S., & Nair, A. G. (2015). Risk assessment of heavy metal contamination in sediments of a tropical lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), 322. doi:10.1007/s10661-015-4558-7.

Kaur, M., & Kaur, U. (2013). Comparison between K-mean and hierarchical algorithm using query redirection. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 3(7), 1454–1459

Wei, Z., Wang, D., Zhou, H., & Qi, Z. (2011). Assessment of soil heavy metal pollution with principal component analysis and geoaccumulation index. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 1946–1952.

Singh, S., Raju, N. J., & Nazneen, S. (2015). Environmental risk of heavy metal pollution and contamination sources using multivariate analysis in the soils of Varanasi environs, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), 345. Doi:10.1007/s10661-015-4577-4.

Annexes

Annexe I

Tableau 4.21 : Concentration en métaux lourds dans les différentes parties des plantes

Zone	Type	Echantillon	Cd(mg/l)	Pb(mg/l)	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)
Z1 PD 1	tiges	29	10,723	17,930	8,073	307,600311
	feuilles	30	15,532	43,379	47,024	984,047058
	fleurs	31	12,048	14,175	22,752	696,892944
Z1 PD 2	tiges	32	7,973	27,034	7,207	278,649994
	feuilles	33	13,567	32,485	45,730	954,082581
	fleurs	34	10,247	18,115	22,229	639,77655
Z1 PD 3	tiges	35	14,559	8,644	2,005	158,173386
	feuilles	36	10,090	24,400	10,939	420,149567
Z1 PD 4	racines	37	9,375	8,547	5,966	141,927841
	tiges	38	14,559	8,644	2,005	158,173386
	feuilles	39	9,617	4,475	7,048	394,053772
Z1 PD 5	tiges	40	15,046	45,680	17,304	334,183258
	feuilles	41	9,443	18,527	11,918	765,375244
Z2.1	fleurs	42	9,049	20,097	18,939	673,447632
	tiges	43	5,347	17,068	10,235	101,587082
	feuilles	44	12,962	78,057	14,419	893,29126
Z2.2	tiges	45	24,495	48,825	3,690	741,31665
	feuilles	46	13,931	28,592	5,361	910,680481
Z1 PG1	tiges	47	15,581	33,912	2,608	460,169403
	feuilles	48	12,411	43,900	5,698	849,713623
Z1 PG2	tiges	49	2,359	17,992	3,227	425,723602
	feuilles	50	1,680	40,394	8,688	837,765137
Z1 PG3	tiges	51	5,795	22,403	5,919	544,342041
	feuilles	52	7,93886035	11,4008418	23,1526992	725,085876
Z1 RS1	tiges	53	3,26539941	21,1425098	5,15890674	104,616623
	fleurs	54	6,4093374	80,6662422	20,081457	762,016296
	feuilles	55	12,4786494	105,223875	15,062459	870,486023
Z1 RS1	tiges	56	3,3291604	30,1144434	4,17776367	78,0281754
	feuilles	57	9,54005273	143,319109	19,3838496	678,085327
Z1 RS3	tiges	60	3,37450464	59,9332539	3,64430811	79,1688538
	racines	61	3,85488428	130,672992	33,9008242	242,91716

	feuilles	62	11,8051729	134,8205	14,9565264	834,839783
	fleurs	63	1,50388428	18,9319336	7,94319482	916,57373

Annexe II

Tableau 21: espèces de plantes

Nom de la plante	figure	Nom dela plante	figure
Pistachier lentisque		eucalyptus thyme	
Romarin		eucalyptus largiflorens	
desmodium tortuosum		phillyrea latifolia	
symphoricarpos albus var		eucalyptus	

<p>eucalyptus à feuilles rondes</p>	 <p>A photograph of a branch of Eucalyptus with round, green leaves and reddish-brown stems. A small white label with the number '2.2' is attached to the branch.</p>	<p>genévrier de virginie</p>	 <p>A photograph of a branch of Juniper with small, needle-like leaves. A small white label with the handwritten text '2.1' and 'P.6' is attached to the branch.</p>
---	--	----------------------------------	---

Annexe III

Tableau 22: Valeurs du facteur de translocation des métaux lourds dans les plantes

Plantes	Ft Cd	Ft Pb	Ft Cu	Ft Zn
Z1,PD1	1,448523657	2,419355988	5,824852561	3,199109438
Z1PD2	1,701509251	1,201660076	6,344799777	3,423946175
Z1PD3	0,6930722739	2,822925723	5,455465974	2,656259549
Z1PD4	1,025833959	0,5236034478	1,181515337	2,776437443
Z1PD5	0,6275751359	0,4055749493	0,688726391	2,29028602
Z,2,1	2,42393377	4,573416665	1,408778792	8,793354848
Z,2,2	0,5687250641	0,585592809	1,452901264	1,228463547
Z1,PG1	0,79654277	1,294515029	2,184825534	1,846523514
Z1,PG2	0,7123071949	2,245122458	2,69241658	1,96786162
Z1,PG3	1,370048141	0,5088935141	3,911874932	1,332040925
Z1,RS1	3,821477202	4,976886661	2,919699804	8,320723782
Z1,RS2	2,86560321	4,759148529	4,639766902	8,690262505
Z1,RS3	3,062393588	1,031739596	0,4411847426	3,436726261

Annexe IV

tableau 23: Résultats des analyses FRX de la zone de Kef Oum Teboul

Nb	Oxyde	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z1 10	Z2 1	Z2 2	Z2 3	Z2 3
1	CO ₂	9,9109	9,9012	9,8475	9,8745	9,8152	8,9547	10,654 1	10,254 1	9,6542	9,1145	14,642	14,523 1	14,321 1	14,154 4
2	Na ₂ O	0,247	0,236	0,363	0,2563	0,2365	0,2436	0,3654	0,3412	0,4633	0,4574	0	0	0	0
3	MgO	0,5377	0,5268	0,5377	0,469 8	0,4125	0,5142	0,7514	0,6584	0,6655	0,7452	0,0031	0,002 9	0,0018	0,002 2
4	Al ₂ O ₃	20,525 3	20,495 3	20,136 4	19,159 8	19,165 4	20,654 1	16,021 5	18,364 8	18,987 4	19,254 1	3,1825	3,2541	3,3154	3,225 4
5	SiO ₂	47,289 6	46,989 6	48,00 52	49,125 1	49,213 2	45,365 4	47,654 1	46,245 2	45,974 3	45,245 1	23,762 4	23,654 4	24,354 2	24,52 98
6	P ₂ O ₅	0,1499	0,1599	0,2523	0,2154	0,2314	0,2356	0,1952	0,2106	0,2234	0,2441	0,028 4	0,029 6	0,027 8	0,026 5
7	SO ₃	1,6662	1,5962	1,4361	1,4351	1,5241	1,5511	2,6541	2,1542	2,3541	2,7454	6,7452	6,5254	7,0214	7,1154
8	K ₂ O	2,7223	2,6587	2,6635	2,6354	2,6005	2,7984	2,9251	2,8741	2,8972	2,6999	0,964	0,9331	0,9227	0,865 8
9	CaO	0,1733	0,1729	0,203 6	0,1893	0,1964	0,1964	0,1524	0,1654	0,1597	0,1655	0,0547	0,063 8	0,064 5	0,055 5
10	TiO ₂	1,1549	1,0254	1,1645	1,183	1,1753	1,1625	1,1202	1,1452	1,1428	1,1785	0,3452	0,5256	0,4225	0,564 1
11	V ₂ O ₅	0,0523	0,049 8	0,044 4	0,0536	0,0561	0,0574	0,0451	0,054 6	0,0547	0,056 9	0	0	0	0
12	Cr ₂ O ₃	0,032 3	0,048 7	0,026 4	0,0255	0,0254	0,0216	0,0351	0,030 2	0,0397	0,0254	0,036 8	0,036 9	0,039 9	0,035 2
13	Fe ₂ O ₃	10,274 6	10,944 9	10,054 6	9,9542	10,364 8	11,911	12,365 1	11,936 5	11,974 5	12,687 5	15,114 5	15,965 4	14,998 7	14,98 77
14	NiO	0,0109	0,0118	0,022 2	0,020 4	0,029 8	0,0176	0,01	0,0195	0,0187	0,0185	0	0	0	0
15	CuO	0,038	0,030	0,014	0,019	0,018	0,016	0,0145	0,0125	0,0165	0,0177	0,2958	0,3241	0,3121	0,299 8
16	ZnO	0,0779	0,098 5	0,063 6	0,063 2	0,0635	0,063 2	0,0951	0,0756	0,084 7	0,088 4	0,4952	0,5622	0,6557	0,662 2
17	As ₂ O ₃	1,2013	1,1015	1,0400	1,0824	1,0385	1,1542	1,1021	1,1236	1,1212	1,1301	3,5965	3,7513	3,659	3,487 5
18	Rb ₂ O	0,069	0,049	0,044	0,051	0,0411	0,056 4	0,0153	0,065 4	0,0457	0,0554	0	0	0	0
19	SrO	0,096 4	0,0935	0,064 2	0,0812	0,084 6	0,0714	0,0514	0,0754	0,082 4	0,0817	0	0	0	0
20	ZrO ₂	0,1001	0,0901	0,203 6	0,18	0,1802	0,1976	0,1236	0,1952	0,1457	0,1487	0	0	0	0
21	Nb ₂ O 5	0,0163	0,0163	0,0265	0,023 6	0,024 8	0,026 4	0,0183	0,0265	0,0168	0,0114	0	0	0	0
22	Sb ₂ O ₃	0,092	0,084	0,096	0,0801	0,096	0,089	0,0715	0,096	0,095	0,102	0,8474	0,9122	0,9545	0,987

		3	3	4		5	7		5	6					6
23	BaO	0,5915	0,6198	0,5264	0,8621	0,5462	0,6541	0,4525	0,7452	0,5278	0,5993	0,000 0	0	0	0
24	PbO	2,97	3,00	3,16	2,96	2,86	3,9874	3,1069	3,1301	3,2541	3,1273	29,88 63	28,935 9	28,928 7	29,00 09

Annexe V

tableau 4.24: Résultats des analyses FRX de la zone de Kef Oum Teboul

échantillon	baryte	Pb zn
perte au feu (%)	12,9	25.89
somme des conc. (%)	100	100
SiO ₂ Si ₂ (%)	21.53	7.21
Al ₂ O ₃ Al ₂ (%)	3.46	1.32
Fe ₂ O ₃ Fe ₂ (%)	9.71	10.22
CaO Ca ₂ (%)	29.97	48.46
MgO Mg ₂ (%)	1.36	0.35
So ₃ S ₂ (%)	17.68	0.35
K ₂ O K ₂ (%)	0.5	0.12
Na ₂ O ₂ Na ₂ (%)	2.40	2.94
P ₂ O ₅ P ₂ (%)	0.15	0.09
TiO ₂ Ti ₂ (%)	0.35	0.14

Annexe VI les outils modulaires Krigeage et IDW:

krigeage: Le krigeage est une méthode d'interpolation utilisée dans le domaine de la géostatistique pour estimer les valeurs inconnues d'une variable dans l'espace à partir des valeurs observées disponibles. C'est une technique a été utilisée dans le logiciel ArcGIS 10.8 pour **la création du variogramme de concentrations des ETM**

IDW: La fonction IDW (Inverse Distance Weighting) est une méthode d'interpolation utilisée pour estimer les valeurs d'une variable inconnue à partir de valeurs observées à des emplacements ponctuels. (E_r en fonction des échantillon de sol et de plantes , et F_t en fonction des échantillon de plante) cette dernière fonctionne en attribuant un poids inversement proportionnel à la distance entre les points observés et le point à estimer ce qui est le cas de E_r . Plus précisément, les valeurs observées les plus proches des échantillons de sols ont un poids plus élevé de E_r , tandis que les valeurs plus éloignées ont un poids plus faible. Les poids sont calculés en utilisant une fonction de décroissance, généralement la fonction puissance.