



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للمناجم والمعادن - عمار العسكري - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET DE LA METALLURGIE
AMAR LASKRI- ANNABA

Département Génie Minier

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme d'INGENIEUR

En Génie Minier

Thème

**La place de la phytoremédiation dans les techniques de
dépollution des sols de l'ancienne mine de mercure d'Azzaba
(Utilisation de la Menthe Aquatique)**

Présenté par : Bakri Cheyma

Encadré par : Dr. Sameh HABES Drici

Jury de Soutenance

Djamel NETTOUR

MCA, ENSMM Annaba

Présidente

Houda MAHTALI

MAA, ENSMM-Annaba

Examineur

Sameh HABES Drici

MCA, ENSMM-Annaba

Encadreur

Juillet 2021



**Modèle de déclaration sur l'honneur
relatif à l'engagement aux règles d'intégrité scientifique
en vue d'élaboration d'une recherche**

Je soussigné(e),

Mr, Mme :

Qualité : étudiant, enseignant, chercheur : Bakri cheyma.....

Portant carte d'identité n° 11996099503543000 délivrée le : ... 17. 02. 2019.....

Inscrit(e) à la faculté/institut. ENSMM Annabadépartement de..... Génie minier.....

Chargé(e) d'élaborer des travaux de recherche (mémoire, mémoire de master, mémoire de magister, thèse de doctorat) dont le titre

est : La place de la phytoremédiation dans les techniques de dépollution des sols de l'ancienne mine de mercure de Azzaba (utilisation de la Menthe Aquatique)

Je déclare en mon honneur de m'engager à respecter les critères scientifiques et méthodologiques ainsi que les critères d'éthique de la profession et de l'intégrité académique requises dans l'élaboration de la recherche sus citée.

Le.....

Signature de l'intéressé(e)



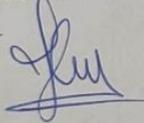
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie

Département Génie Minier

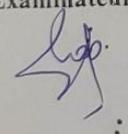
**AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Je soussigné (e) M. e. Neltou Djamel
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de fin d'études (MFE), déclare
avoir autorisé l'ingénieur d'état Melle Bakri Cheyba
à déposer son mémoire de fin d'études après avoir apporté les corrections
signalées par les membres du jury.

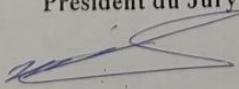
Avis du Promoteur :

A.F. 

Avis de l'Examineur :

A.F. 

Président du Jury



Résumé.

Le but de l'exploitation minière est de séparer les matériaux utiles de la gangue, derrière cette séparation minérale, un gros problème est la pollution de l'environnement.

La mine de mercure d'Ismail est une mine abandonnée qui n'a pas été restaurée depuis 2005, et elle est localisée à la Daïra de Azzaba, Wilaya de Skikda.

La zone minière est encore polluée à ce jour, notre travail est de proposer un plan de réhabilitation de ce site à partir d'une technique biologique qui est la phytoremédiation, par l'utilisation de la menthe aquatique.

Mots clés : Réhabilitation, pollution, mercure, phytoremédiation, menthe aquatique.

Abstract.

The purpose of mining is to separate the useful materials from the gangue, behind this mineral separation; a big problem is environmental pollution.

The Ismail mercury mine is an abandoned mine that has not been restored since 2005 and is located in Azzaba wilaya of Skikda.

The mining area is still polluted to this days, our job is to propose a rehabilitation plan for this site using a biological technique and phytoremediation, to using aquatic mint.

Keywords : Rehabilitation, pollution, Mercurey, phytoremediation, aquatic mint.

ملخص.

الغرض من التعدين هو فصل المواد المفيدة عن الشوائب، وراء هذا الفصل المعدني؛ مشكلة كبيرة هي تلوث البيئة، منجم الزئبق إسماعيل منجم مهجور لم يتم ترميمه منذ 2005 ويقع بولاية بسكيكدة. دائرة عزابه.

منطقة التعدين لا تزال ملوثة حتى يومنا هذا، مهمتنا هي اقتراح خطة إعادة تأهيل لهذا الموقع باستخدام تقنية بيولوجية ومعالجة نباتية. المعالجة بالنباتات باستخدام النعناع المائي.

الكلمات المفتاحية: إعادة تأهيل، تلوث، زئبق، معالجة نباتية، النعناع المائي

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. En second lieu, je tiens à remercier ma promotrice Mme HABES Drici Sameh, pour son soutien, sa disponibilité, ces précieux conseils, Ses qualités humaines et scientifiques sont pour moi un exemple et une référence.

Je tiens à remercier l'entreprise ENOF EL-GHEDIR qui m'a permis de développer une vision industrielle dans ce travail, à travers le soutien logistique sur terrain, les documents techniques fournis, et par l'expérience professionnelle apportée.

Je tiens bien évidemment à remercier aussi tous les Membres

Du laboratoire L3M de L'ENSMM en acceptant de me

Prendre en charge pendant mon travail

Tout particulièrement Mr. Soukehal Samir, Madame Linda

Mes sincères remerciements à Mesdames et Monsieur les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à l'évaluation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département génie minier qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont beaucoup aidé pour terminer
Mes études, et qui m'ont tellement encouragé moralement et
Psychiquement, et qui se sont sacrifiés pour moi.

J'aimerais qu'ils reçoivent le témoignage de ma consécration pour leur
Foi en moi.

Mes très chers frères, mon cher fiancé,

Mes amies

Imane, Rania, Sarah, Nada

Une mention spéciale au petit ange Rafif

Sommaire

Résumé.....	I
Abstract.....	II
ملخص.....	III
Remerciements	IV
Dédicaces.....	V
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
Introduction générale	VIII
<i>Chapitre I : Description de la zone d'étude</i>	
1.1. Cadre physique de la zone d'étude.....	1
1.1.1 Un peu d'Historique	1
1.1.2 Situation géographique.....	1
1.1.3.Géomorphologie et relief.....	2
1.2. Climat et végétation.....	3
1.2.1. Climat.....	3
1.2.2.Végétation.....	4
1.3. Réseau hydrographique	4
1.4. Aperçu socio-économique	5
1.5. Présentation de la mine d'Ismail.....	5
1.5.1. Contexte général de la zone d'étude.....	5
1.5.2. Description de la zone d'étude (mine d'ISMAIL).....	6
1.5.3. L'histoire de la mine de mercure.....	6
1.5.4. Cadre géographique et emplacement de la mine.	7
1.6. Présentation de l'usine de mercure.....	8
1.7. Problématique imposée par le site minier d'Ismail.....	10

1.7.1. Les installations administratives	10
1.7.2. L'usine de traitement.	13
1.7.3. Lagunes (bassin de décantation).....	15
1.7.4. Les Scories (calcines)	15
1.8. L'activité minière source polluante.....	16
1.9. Notions d'éléments traces métalliques.....	16
1.9.1. Le mercure.....	17
1.9.1.1. Propriétés physicochimiques.....	17
1.9.1.2. Propriétés physiques du mercure	18
1.10 .Le mercure en Algérie.....	19
1.11 .Etudes toxicologiques du mercure.....	19
1.12 .L'impact du mercure sur l'environnement.....	20
1.12.1. L'exposition au mercure.....	22
<i>Chapitre II : Etat de l'art sur les techniques biologique de dépollution d'un site</i>	
2.1. Pourquoi tant d'intérêt pour l'environnement ?	26
2.2. Définition de la réhabilitation d'un site minier.....	27
2.2.1. La réhabilitation dans le cadre du développement durable.....	28
2.2.2. Réhabilitation progressive.	28
2.2.3. Pratique de la réhabilitation.	29
2.3. Etude de cas et proposition d'un plan de réhabilitation pour le même site	29
2.4. Désinstallation des anciennes infrastructures et découpage de la terre contaminée	30
2.5. Sols contaminés : une gestion complexe et risquée.....	30
2.6. Quels sont les polluants qui contaminent les sols ? Sont-ils dangereux ?.....	30
2.7. Principe de décontamination	31
2.8. Les techniques biologiques de dépollution des sols	31
2.8.1. Parmi les techniques biologiques innovantes	32
2.9. Durée de traitement des méthodes citées.....	35

2.10. Phytoremédiation.....	36
2.11. En quoi consiste la phytoremédiation ?.....	37
2.12. Quelles sont les plantes utilisées en phytoremédiation ?.....	37
2.12.1. Quelques exemples de plantes bénéfiques pour certains contaminants spécifiques	37
2.12.2. Avantages de la phytoremédiation.....	37
2.12.3. Inconvénients potentiels.....	38
2.12.4. Les différentes formes de phytoremédiation.....	39
2.13. La phytoremédiation des sites contaminés, quelles techniques utilisées ?.....	40
2.13.1. Pour les métaux lourds.....	40
2.13.2. Pour les composés organiques complexes	40
2.14. Phytotransformation et phytovolatilisation pour le mercure	41
2.15. Les avantages de la phytoremédiation.....	42
2.16. Limites de cette technique de dépollution	42
2.17. Proposition d'une technique de remédiation du site mercuriel par l'utilisation de la phytoremédiation.....	43
2.17.1. Que savons-nous sur cette plante ?	43
2.17.2. Culture et récolte de la menthe aquatique	43
2.17.3. Histoire de la nomenclature	43
2.17.4. La menthe aquatique, une plante aux pouvoirs dépolluants	44
2.17.5. Des plantes aquatiques pour fixer les micropolluants de l'eau.....	44
2.17.6. Un complément naturel aux stations d'épuration.....	45
2.17.7. Près de 40 espèces végétales aquatiques	45
2.17.8. Une possible généralisation à d'autres communes en France	45
2.18. Fiche technique de la Menthe aquatique	49
<i>Chapitre III : Partie expérimentale</i>	
3.1. Les sorties sur terrains.....	55
3.2. La première sortie (Lagunes (bassin de décantation)).....	55

<i>3.2.1. Situation géographique du site de prélèvement du matériel végétal</i>	55
<i>3.2.2. Description du bassin</i>	55
<i>3.3. La deuxième sortie (Lac Tonga)</i>	56
<i>3.3.1. Description du Lac Tonga</i>	56
<i>3.4. Où trouve-t-on Menthe aquatique</i>	58
<i>3.5. Protocole expérimental</i>	59
<i>3.6. Interprétation des résultats du MEB :</i>	60
<i>Conclusion générale</i>	66
<i>Références Bibliographiques</i>	69
<i>Annexe 1</i>	71

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure 1.1 : Carte de la situation géographique de la zone d'étude Azzaba	1
Figure 1.2: Le relief de la zone detude	2
Figure 1.3: Type de climat de la région d'Azzaba.....	3
Figure 1.4: Réseau hydrographique -Azzaba.....	5
Figure 1.5: (A) Carte géographique du Nord-Est algérien. (B) Région d'Azzaba vue du ciel par Google Earth..	6
Figure 1.6: Image satellitaire de la mine d'Ismail de mercure Azzaba.	8
Figure 1.7: Complexe industriel minier d'Ismail.	9
Figure 1.8: Usine de traitement et résidus miniers du site minier de Azzaba.....	10
Figure 1.9: Le bâtiment d'administration du complexe mercuriel d'Ismail.	12
Figure 1.10 : Le centre de commande..	12
Figure 1.11: Les trémies d'alimentation.	14
Figure 1.12: Les fours (Horizontal et vertical)	14
Figure 1.13: Les lacs de décantation (1 et 2).	15
Figure 1.14 : Tableau périodique des éléments chimiques.	17
Figure 1.15 : Les propriétés physico-chimiques du mercure.....	18
Figure 1.16: Morphologie des corps minéralises dans le champ minier de Mra Sma	20
Figure 1.17 : Les sources d'exposition humaine au mercure.	23

Chapitre II

Figure 2.1: Processus de la phytoremédiation.....	40
Figure 2. 2 : L'expression du gène bactérien mer A chez Arabidopsis thaliana accroît la tolérance des plantes au mercures et a l'or.....	42
Figure 2.3: Représentation schématique et photo de la Menthe aquatique.	50
Figure 2.4: Mentha aquatique L. (sortie le 3juin 2021).....	500

Chapitre III

Figure 3.1: Les lacs de décantation (le 4 juin 2021).....	56
Figure 3.2: situation géographique du lac Tonga.....	57
Figure 3.3: Le lac Tonga (Le 10 avril 2021).....	58
Figure 3.4: Mentha-aquatocal (le 12 avril 2021)	59
Figure 3.5: Protocole expérimental (le 07 juin 2021).....	60
Figure 3.6: a-Imagerie du MEB de la Menthe aquatique prise depuis son milieu naturel (le 24 juin 2021).....	61
Figure 3. 7: b-Imagerie du MEB de la Menthe aquatique prise depuis le milieu naturel (Le 24/06/2021)	65
Figure 3. 8: c-Imagerie du MEB de la Menthe aquatique prise depuis le milieu naturel (Le 24/06/2021).....	63
Figure 3.9: Carte des rejets urbains dans les eaux des lacs.....	64
Figure 3. 10 : a- Imagerie du MEB de la Menthe aquatique prise depuis le milieu pollué (zone entière) (Le 24/06/2021).....	65
Figure 3. 11 : b-Imagerie du MEB de la Menthe aquatique prise depuis le milieu pollué (Le 24/06/2021	
Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans l'eau pollué zone 1) (Le 24/06/2021).....	66
Figure 3. 12 : c-Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans l'eau polluée (Le 24/06/2021).....	67
Figure 3. 13 : d- Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans l'eau pollué (Le 24/06/2021).....	68

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau 2.1: Fiche technique du traitement bioslurry.....	33
Tableau 2.2 : Fiche technique du traitement atténuation naturelle.....	34
Tableau 2.3: fiche technique de traitement bioremediation.	35

Introduction générale

L'activité minière et les industries associées sont considérées comme la source anthropique principale de la pollution par les éléments trace métalliques (ETM) sur l'environnement, aussi identifiés comme un des premiers impacts environnementaux provoqué par l'homme.

Le complexe de traitement du minerai d'Ismail (sulfure de mercure) est fermé depuis 2005 en raison de l'épuisement de ses principaux gisements de mercure (gisements d'Ismail, Gue nicha et Mra Sma), mais le site est toujours responsable de la pollution environnementale de la région d'Azzaba, à cause du sulfure de mercure. Sa transmission à longue distance dans l'atmosphère, sa persistance dans l'environnement (eau, sol, plantes et même air), le potentiel de bioaccumulation dans les écosystèmes, et sa contribution aux autres dérivés du mercure. Effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Ces derniers temps, les problèmes posés par les contaminants chimiques, en particulier les éléments traces métalliques (ETM) dans l'environnement, suscitent l'intérêt de la communauté scientifique, car la protection de l'environnement passe par la connaissance du devenir de ces contaminants et de leurs effets sur les êtres vivants qui en dépendent. Leur présence dans les matrices environnementales est souvent occasionnée par les activités anthropiques notamment l'agriculture, l'élevage, l'industrie et le transport. Les humains peuvent être exposés aux ETM du fait de leur présence dans les sols et dans l'atmosphère ou à travers la consommation de denrées alimentaires ou d'eau contaminées. Donc, l'adoption des meilleures pratiques environnementales dans cette industrie peut donc entraîner d'importants bénéfices environnementaux et un gain économique très significatif.

Le but du présent travail est de proposer un plan de réhabilitation de ce site à partir d'une technique biologique qui est la phytoremédiation.

Le présent projet, s'intitule : " La place de la phytoremédiation dans les techniques de dépollution des sols de l'ancienne mine de mercure d'Azzaba (utilisation de la Menthe Aquatique)", s'articule autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre décrit la zone d'étude.

Le deuxième est consacré à une recherche bibliographique sur l'état de l'art sur les techniques biologiques de dépollution d'un ce site.

Le troisième chapitre concerne la partie expérimentale. Les sorties sur terrains et l'expérience menée au laboratoire.

Et ce travail se concrétise par des conclusions et des recommandations.

Chapitre I : Description de la zone d'étude

1.1 Cadre physique de la zone d'étude.

1.1.1 Un peu d'Historique.

La région d'Azzaba (à l'origine, le village s'appelait Village du FENDECK, a pris plus tard le nom de JEMMAPES en souvenir de la victoire de la première république française remportée par le général Dumouriez sur les autrichiens le 6 novembre 1792. A l'indépendance, JEMMAPES est devenu AZZABA, qui est la commune la plus grande de la wilaya de Skikda. (Mostefai Abdelkader, 2017).

1.1.2 Situation géographique.

La ville de Azzaba est située au Nord-Est algérien à environ 500Km à l'Est d'Alger, à 80Km au Nord-Est de Constantine, à 67Km au Sud-Ouest d'Annaba, entre les latitudes $36^{\circ} 76' 08''$ et $36^{\circ} 85' 35''$ Nord et les longitudes $7^{\circ} 20'$ et $7^{\circ} 40'$ Est, connue par son champ minier essentiellement mercuriel. Azzaba était une région d'industrie minière très active, dont le gisement de mercure d'Ismail. Cette plaine occupe une dépression qui relie la plaine d'El Harrouche à celle de Fetzara, l'altitude moyenne est de 100m environ. Elle est entourée par Djebel Elouast au Nord-Est (254m), le Djebel Boufernana au Nord (223m), le Djebel Mekdoua (474m), le Djebel Denchaba (314m) au Nord-Ouest, par le Djebel Ferfour (362m) au Sud -Est, le Djebel Safia (496m) au Sud, et le Djebel Ousfane (325m) au Sud-Ouest.



Figure 1.1 : Carte de la situation géographique de la zone d'étude Azzaba (Google earth 2021).

1.1.3 Géomorphologie et relief.

La morphologie de notre zone d'étude présente deux zones différentes :

- L'une correspond à une zone surélevée formant les montagnes environnantes.
- L'autre correspond à la dépression d'Azzaba.

Le relief de la zone est très accidenté et l'élément topographique le plus important fait partie de la chaîne numidique. Les massifs orientés Est-Ouest s'allongent de Djebel Ghédir à l'Ouest jusqu'à Djebel Chbèbik à l'Est. Les chaînons les plus élevés, le Djebel Tengout et Djebel Saiafa atteignent respectivement 648m et 496m, ce sont des reliefs de grès quartzeux ou de grès calcaires couverts de forêts de chêne-liège. A l'Est ce sont des montagnes calcaires et dénudées, le Djebel Mazeur 473m, le Djebel Moul mdéfa 572m, le Djebel Chbèbik 447m et enfin au centre se trouve les montagnes gneissiques et schisteuses culminant à 464m au niveau de Djebel Raout-Lessoued. La dépression d'Azzaba communique à l'Ouest avec celle de Ramdane Djamel au méridien de Ras El Ma et débouche à l'Est sur la dépression de Fetzara.

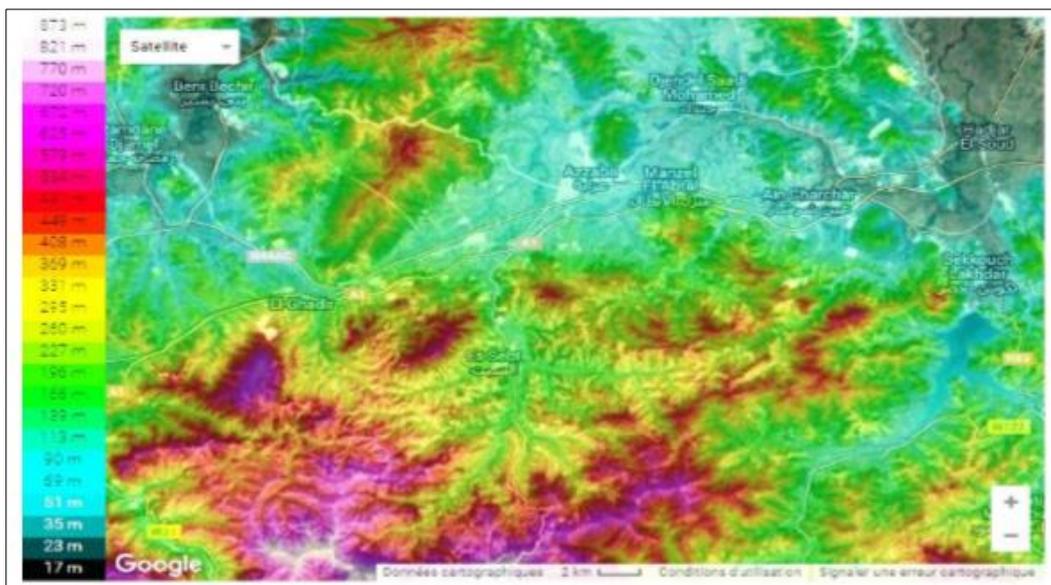


Figure 1.2: Le relief de la zone detude (<http://fr-fr.topographic-map.com>)

La zone de dépression forme la vaste plaine d'Azzaba constituée de formations récentes de vallées. Elle est orientée N.E-S.O. Elle est comprise entre le massif métamorphique au Nord appartenant au massif du littoral et les massifs de la chaîne numidique au Sud. Le relief est donc très ancien et caractérisé par de basses montagnes faiblement disloquées. Les sommets sont arrondis aux pentes douces alternant avec des vallées assez larges. Dans le Nord et le Sud-Ouest, cette plaine est assez étroite, elle s'élargit considérablement en se déplaçant vers l'Est.

1.2 Climat et végétation.

1.2.1. Climat.

La région d'Azzaba jouit d'un climat méditerranéen à subtropical relativement doux. Il est caractérisé par :

- Une saison chaude et sèche s'étalant sur cinq mois environ, de Mai jusqu'à Septembre caractérisée par une température moyenne mensuelle de l'ordre de 23°C. Pendant cette saison des vents chauds (sirocco) arrivaient du Sud.
- Une saison froide et humide qui va d'Octobre jusqu'à Avril, caractérisée par une température moyenne saisonnière de l'ordre de 14°C, avec une précipitation moyenne de l'ordre de 82mm. La carte climatique de Köppen-Geiger y classe le climat d'Azzaba comme étant une zone de climat type Csa. (c : warm temperate ; s : summer. dry ; a : hot summer).

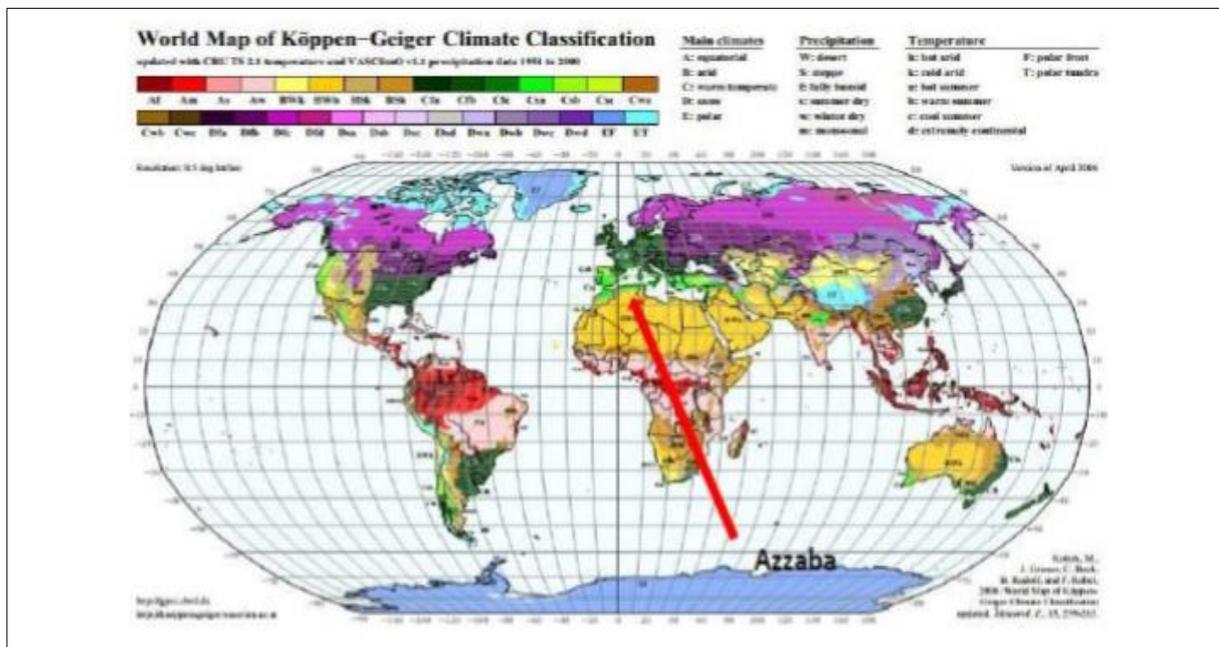


Figure 1.3: Type de climat de la région d'Azzaba (<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at>).

En moyenne la température à Azzaba est de 17.8°C. La moyenne des précipitations annuelles atteints 715mm.

1.2.2. Végétation.

A la faveur de ces conditions climatiques, il s'est développé une végétation typique dans la région. Au niveau de la plaine, on trouve surtout des cultures maraîchères, des céréales cultures, ainsi que d'orangeries et des vignes. Sur les versants des montagnes se développent une couverture forestière dégradée avec quelques regroupements de chênes lièges et d'oliviers.

1.3 Réseau hydrographique.

Le réseau hydrographique est peu dense, il est constitué surtout par des Oueds temporaires. Il est sous deux formes :

- Dans les montagnes délimitant les versants, les thalwegs s'ordonnent et forment des entailles profondes facilitant le drainage des ruissellements de surface.
- Dans la plaine, les Oueds sont peu nombreux, et peu profonds.

Les principaux Oueds sont :

- ✓ **L'Oued Fendek** avec un écoulement des eaux du Sud vers le Nord ; cet oued prend sa source dans les contres forts septentrionaux de la chaîne Numidique. En amont il a une direction subméridienne et en aval dans la dépression d'Azzaba, sa direction est proche de celle d'Oued Saf af qui se trouve à l'Ouest. En amont il a une direction subméridienne et en aval dans la dépression d'Azzaba, sa direction est proche de celle d'Oued Safsaf qui se trouve à l'Ouest.
- ✓ **L'Oued Adjoul** qui est le collecteur de plusieurs petits Oueds et qui s'écoule vers le Nord –Est.
- ✓ **Oued Zebda** est un affluent d'Oued Fendek se trouvant à environ 450m à côté du complexe mercuriel d'Azzaba.

Ces deux Oueds (fendek, Adjoul) rejoignent l'Oued Mchekel au Nord-Est d'Azzaba. Ils sont caractérisés pendant les périodes sèches, par de minces filets d'eau, alors que lors des saisons pluvieuses, le régime devient turbulent. L'Oued Mchekel s'écoule vers l'Oued Kebir qui se jette dans la mer Méditerranée à l'Est de Skikda (prés de Cap de Fer).

1.5.2. Description de la zone d'étude (mine d'ISMAIL)

Le district minier d'Azzaba, est le seul gîte de mercure du pays. La minéralisation mercurielle est exprimée par le cinabre et le méta cinabre.

La mine est entrée en production en 1971, dans le cadre du plan quadriennal 1970/1973, l'usine d'Azzaba est appelée à servir une large gamme d'usages, comme les industries de l'appareillage électrique de mesure et de contrôle, la fabrication de chlore par électrolyse, l'industrie des peintures et les opérations d'extraction de l'or.

L'exploitation minière a été arrêtée en 2005, pour des raisons techniques et environnementales, et depuis aucun travail de dépollution et de réhabilitation n'a été réalisé.

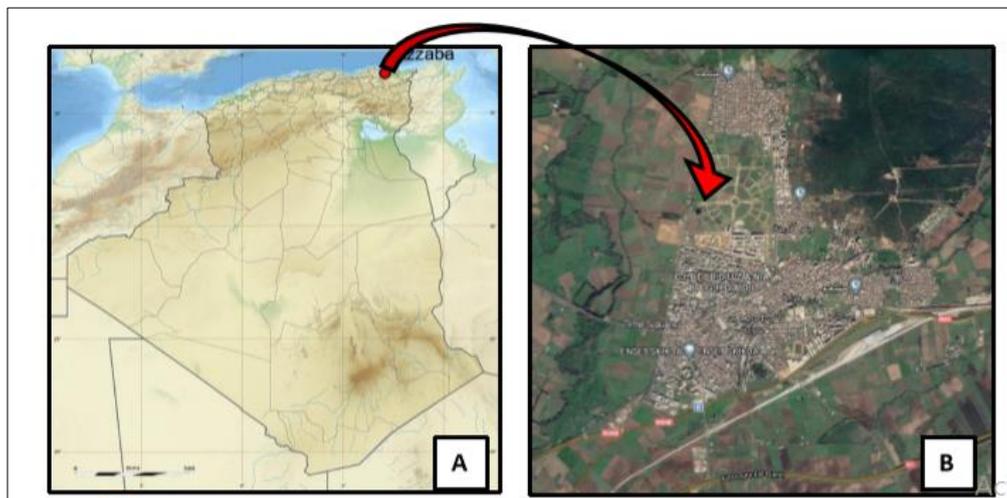


Figure 1.5: (A) Carte géographique du Nord-Est algérien. (B) Région d'Azzaba vue du ciel par Google Earth. (Biskri Zakaria, 2020).

1.5.3. L'histoire de la mine de mercure

En juillet 1966, une équipe de géologues soviétiques dirigée par A. Menakov découvre le gisement de mercure d'Ismail, puis les gisements de Mra Sma I et de Guenicha en 1968, le gisement Mra sma II en 1971, et enfin l'exploitation minière de Fendek Cinabre en 1984. La recherche technique et économique du projet de traitement et la construction du complexe de mercure Ismail ont été réalisées par une équipe d'experts de l'ex-Union soviétique. La construction a commencé en 1969 et la production a commencé dans la seconde moitié de 1971.

Depuis plus de 30 ans, le complexe mercuriel d'Azzaba est le principal fournisseur mondial de mercure. La production a été très importante dans les années 1970 et 1980, atteignant un pic de 31 000 vases en 1979. Il y a eu des mines à ciel ouvert dans les carrières d'Ismail, Mra Sma I, Mra Sma II et Guenicha. La minéralisation du gisement Fendek N°5 est située sous le complexe à une profondeur de 300m. En raison de conditions techniques et économiques défavorables, elle n'a pas été exploitée. L'exploitation a été arrêtée au cours de la seconde moitié de 2003 pour quelques mois afin de réhabiliter les équipements de la mine et du complexe, ainsi que le renforcement du travail minier en vue de relancer la production en janvier 2005.

Mais suite à l'épuisement des réserves, l'inondation de la carrière de Guenicha par les eaux souterraines, l'échec des travaux de pompage, la découverte importante et la pression dressée par les organismes environnementaux, l'arrêt de l'activité et la fermeture du complexe ont été annoncées officiellement en mai 2005, avec une clôture de production totale atteignant les 532 354 potiches (U=34,5 Kg), soit 18 367 tonnes.

En 2006, le ministre de l'environnement suite à une visite effectuée sur le site, a décidé de prendre en charge les travaux de dépollution, de ce fait des études ont été réalisées en collaboration avec la société française GenCos afin d'entamer des travaux de dépollution et de réhabilitation.

1.5.4. Cadre géographique et emplacement de la mine.

La dépression forme la vaste plaine d'Azzaba, constituée des strates de vallées les plus proches, et fait face au N.E-S.O. Elle est située entre le bloc métamorphique appartenant au bloc côtier au nord et le bloc de la chaîne numidique au sud. Par conséquent, les reliefs sont très anciens et se caractérisent par des montagnes basses et mal placées. Les sommets sont ronds, avec des pentes douces alternant avec des vallées assez larges.

Au Nord et au Sud-Ouest, cette plaine est assez étroite, et à mesure qu'elle se déplace vers l'Est, elle s'élargit considérablement.

De manière générale, la forme de la zone d'étude comporte deux zones différentes :

- L'une est le terrain élevé qui forme les montagnes environnantes ;
- L'autre est la dépression d'Azzaba. (Biskri Zakaria, 2020)

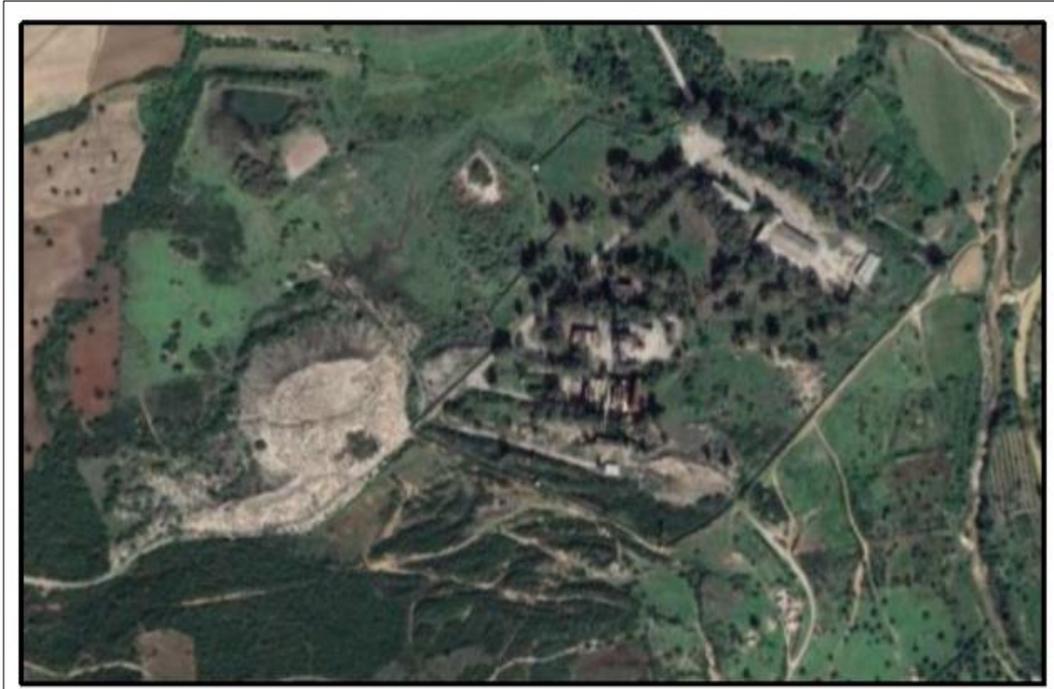


Figure 1.6: Image satellitaire de la mine d'Ismail de mercure Azzaba. (Seklaoui M'hamed, 2015).

1.6 Présentation de l'usine de mercure.

Le complexe de traitement du minerai d'Ismail. (Sulfure de mercure) dans la région d'Azzaba a été créé en 1970 et se classe au deuxième rang mondial après l'Espagne. Le complexe est fermé depuis 2005 en raison de l'épuisement de ses principaux gisements de mercure (gisements d'Ismail, Guenicha et Mra Sma), mais le site est toujours responsable de la pollution environnementale de la région d'Azzaba, à cause du sulfure de mercure.



Figure 1.7: Complexe minier d'Ismail (Seklaoui M'hamed, 2015).

Sa transmission à longue distance dans l'atmosphère, sa persistance dans l'environnement (eau, sol, plantes et même air), le potentiel de bioaccumulation dans les écosystèmes, et sa contribution aux autres dérivés du mercure.

Effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Au cours du processus de fabrication, le minerai de cinabre (HgS) est transporté jusqu'à la carrière par camion puis broyé avant de passer par les étapes suivantes :

- Calcination du minerai dans le four à $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, le mercure passe à l'état gazeux,
- Purification des gaz technologiques,
- Concentration des vapeurs de mercure dans des colonnes de liquéfaction.

Après purification, le mercure est conditionné dans des potiches prêtes à l'emploi.



Figure 1.8: Usine de traitement et résidus miniers du site minier d'Azzaba (Sortie du 22avril2021).

1.7 Problématique imposée par le site minier d'Ismail.

Le complexe de la mine d'Ismail s'étend sur 46ha, il englobe l'usine de traitement, les scories et les deux bassins de décantations (lagunes).

A ce jour, aucun travail de dépollution et de réhabilitation n'a été réalisé et le site reste toujours avec les déchets du traitement minéralurgique et de stockage. De plus, toutes les installations minières et administratives ont été laissées en place.

1.7.1. Les installations administratives.

- L'administration : Le bâtiment est dans un état moyen, la plupart des bureaux sont quasi-vide, quelque plafond et mur de première étage sont rongé par l'humidité ce qui a induit le gonflement de quelque mur et la corrosion de quelques poutrelles métalliques. Les concentrations en mercure gazeux sont inférieures aux normes sur la protection du personnel ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$).

- Le laboratoire : le bâtiment est dans un mauvais état, totalement fermé et abandonnés, remplie de produits chimiques et de matériel de labo défectueux. Les murs et le plafond sont gonflés par l'humidité ce qui a impliqué une fissuration de quelques murs, la plupart des fenêtres sont cassées ce qui permet l'infiltration des eaux de pluie et l'inondation du sol. Les teneurs en Hg gazeux sont supérieures aux normes, jusqu'à $100\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Bâtiment de la marque supérieure : c'est un bâtiment englobant des équipements de traitement des stuppes, l'embouteilleuse pour remplissage des potiches. Ce bâtiment est très pollué, des quantités considérables de gouttelettes de mercure sont éparpillées sur le sol, dans les équipements et la tuyauterie de traitement.
- Entrepôt de potiches : c'est une construction en charpente parfaitement fermée dont plus de 2100 potiches vides et abandonnées sont entreposées.
- L'atelier : c'est un hangar métallique contenant quelques machines usées avec des vieilles pièces de rechange rouillées éparpillées sur son enceinte.
- Centre de commande : les équipements électriques de ce centre sont détériorés, la construction est non fermée.
- Clôture : construite avec du parpaings et des piliers en béton tous les 4m environ, elle contient une hauteur de sécurité suffisante en bon état avec quelques fissurations qui est due à la croissance de petits arbres à proximité notamment dans la partie Ouest, on constate aussi qu'elle est trouée le long de sa hauteur à l'extérieur et peut servir comme échelle aux extras.



Figure 1.9: Le bâtiment d'administration du complexe mercuriel d'Ismail (Sortie du 05 mai 2021).



Figure 1.10 : Le centre de commande. (Sortie du 05 mai 2021).

1.7.2. L'usine de traitement.

Fermée depuis 2005, suite à l'arrêt de l'exploitation au niveau des carrières, son emplacement est occupé par plusieurs bâtiments (Administration, Laboratoire, bâtiment de la marque supérieur...) et importantes construction métalliques (Trémie, station de Concassage, les Fours, Cyclones, condensateurs, cheminée). Le tout est entouré par une clôture murale.

- ✓ **Pont bascule** : la construction du pont bascule est dans un état moyen, ouverte, les extrémités du toit bétonné sont corrodées, le dispositif de pesage est défectueux.
- ✓ **Trémie d'alimentation** : composé de deux trémies, dans un état vétuste, la charpente métallique est détériorée, la tôle et le support de béton sont détériorés, les grilles et la troisième trémie ont été démenagées. A proximité et en dessous : un stock de minerai de cinabre est présent.
- ✓ **Station de concassage** : composé par deux stations vétustes et une autre démenagé, les constructions métalliques englobant ces stations sont dans un état moyen, les parois des concasseurs sont très usées. Les bandes transporteuses caractérisant les deux premières stations sont absentes, ils ne restent que les supports mécaniques détériorés. Concernant la bande transporteuse de la troisième ligne, elle apparait dans un état moyen avec une corrosion de ses parois et de sa structure métallique.
- ✓ **Les fours** : Il s'agit de trois fours, deux horizontaux et un vertical, le premier est dans un état vétuste, corrodé avec un support bétonné dégradé. Le deuxième four est complètement détérioré, usé, ouvert et les briques réfractaires composant sa paroi interne ont été enlevées. La structure métallique du troisième four vertical à étage est complètement usée.
- ✓ **Condensateurs et cyclones** : caractérisant les trois lignes de traitement, leurs tuyaux en inox apparaissent en bon état, leurs bouchons sont absents, leurs parois internes sont entourées par une couche de stuppes d'environ 3 cm responsables des gouttelettes de mercure dispersés dans les auges en-dessous. Ces derniers avec les barrières de passage et de passerelles sont complètement dégradés et corrodés ce qui a induit un démembrement avancé.

- ✓ **Trémie à déchets** : complètement dégradée et détériorée, des petits arbres ont poussé tout autour.
- ✓ **Equipements de la marque supérieure** : les régulateurs, les épaisseurs, l'embouteilleuse et le granulateur sont détériorés, troués et remplis par des boues riches en gouttelette de mercure visible.
- ✓ **Cheminée** : la cheminée en inox en elle-même apparait en bon état par contre la structure métallique portant cette cheminée est corrodée.



Figure 1.11: Les trémies d'alimentation (Sortie du 22mai 2021).



Figure 1.12: Les fours (Horizontal et vertical). (Sortie du 22 mai2021).

1.7.3. Lagunes (bassin de décantation)

Ce sont deux petits lacs dans lesquels se faisait la décantation de déchets liquides (eaux techniques), situés à quelques mètres à l'Ouest de l'usine et au Nord du tas principal des scories, à proximité de l'un des affluents de l'Oued Fendek (Oued Zebda), elles sont mal aménagées et non surveillées, contenant des eaux qui peuvent déborder durant les périodes hivernales dans l'Oued suite à l'inclinaison suffisante du sol qui les sépare. Elles sont entourées par des champs ou l'exercice de pâturage est très marqué.



Figure 1.13: Les lacs de décantation (1 et 2). (Sortie du 25 mai 2021)

1.7.4. Les Scories (calcines)

Ce sont les résidus de traitement, principalement de grillage (calcination). Ils ont un volume total de 609 000 M³, déposés dans deux endroits :

- ✓ **Scorie de stock de nuit.** Ce stock est déposé à l'intérieur de l'usine pour des raisons sécuritaires, d'un volume de 70 000 M³, composé par des déchets calcinés grossiers et des dépôts de curage fins très riches en mercure.
- ✓ **Scorie principale.** Ce stock est situé à quelques mètres au Sud-Ouest à l'extérieur de l'usine, d'une épaisseur qui varie entre 20 et 25m et d'un volume de 530 000 M³. Les camions bennaient les scories sur le sommet, où elles étaient étalées par un engin de chantier, tandis qu'une partie du solide se répandait sur les flancs. Les matériaux affleurant

sont assez homogènes même si l'aspect peut changer d'un point à un autre (la couleur variant du rouge sombre au gris) mais l'homogénéité proprement dite est à vérifier par des sondages. Dans l'ensemble, ce tas principal est sans végétation, marqué par des fissures, des affaissements, et des glissements. (Biskri Zakaria, 2020).

1.8 L'activité minière source polluante.

L'activité minière et les industries associées sont considérées comme la source anthropique principale de la pollution par les éléments trace métalliques (ETM) sur l'environnement, aussi identifiés comme un des premiers impacts environnementaux provoqué par l'homme.

En effet, la source majeure de l'introduction des ETM dans les eaux continentales et leurs sédiments est l'industrie d'extraction, alors qu'une des activités dérivées, la métallurgie sidérurgie est la source anthropique principale de la pollution atmosphérique (Calendre, 2003) et par la suite des sols avoisinants, ce qui peut affecter les cultures (Liu et al, 2005), lesquelles peuvent affecter l'alimentation de l'homme (Salvarredy, 2008).

1.9 Notions d'éléments traces métalliques.

La notion d'éléments-traces métalliques, ou ETM tend à remplacer celle de métaux lourds qui a été et qui reste un concept mal défini car associant des métaux toxiques réellement lourds à d'autres l'étant moins. Une partie des ETM est toxique, ou toxique au-delà d'un certain seuil ou radioactive (radionucléides).

Généralement, les chimistes appellent métaux lourds les éléments métalliques naturels (métaux ou dans certains cas métalloïdes) caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm^3 et qui forment des sulfures et hydroxydes insolubles. Parmi les métaux lourds présents dans tous les compartiments de l'environnement (l'eau, l'air, les roches et les sols), en quantités très faibles, se trouvent le cadmium (Cd), le manganèse (Mn), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le mercure (Hg), le nickel (Ni) et le zinc (Zn).

1.9.1. Le mercure

C'est un métal argenté brillant, le seul se présentant sous forme liquide dans les conditions normales de température et de pression, conditions dans lesquelles il se vaporise toutefois assez aisément.

Son symbole (Hg) provient du latin, lui-même emprunté au grec, hydrargyrum qui signifie « argent liquide ».

On trouve le mercure sous forme naturelle ou oxydée, principalement sous forme de cinabre (sulfure de mercure HgS) de couleur rouge vermillon. Il a 38 isotopes, dont plusieurs isotopes stables éventuellement utilisables pour des analyses isotopiques ou un traçage isotopique. Il a aussi des isotopes radioactifs instables 31 de ces 38 isotopes dont seulement 4 ont une période supérieure à la journée). Seul le ^{203}Hg a selon l'IRSN une application pratique (traceur isotopique) (Glinka N., 1981).

CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

- Métaux
- Semi-conducteurs
- Non-métaux
- Gaz nobles
- Lanthanides et actinides

Li : Solide à 25°C, sous 1 bar

He : Gaz à 25°C, sous 1 bar

Br : Liquide à 25°C, sous 1 bar

Tc : Obtenu par synthèse

I												VIII												
1	H																			2	He			
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Pb	Bi	Po	At	Rn							
7	Fr	Ra	Lw	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub												
Série des Lanthanides			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb								
Série des Actinides			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No								

Figure 1.14 : Tableau périodique des éléments chimiques.

1.9.1.1. Propriétés physicochimiques

Le mercure existe sous trois formes : le mercure élémentaire ou métallique, le mercure inorganique et le mercure organique.

Le mercure est un métal blanc argenté, brillant, très dense et très mobile. C'est le seul métal liquide à température ambiante, ce qui lui a valu son symbole (Hg) (argent liquide). Le mercure élémentaire ou mercure métal est volatil aux températures ambiantes habituelles (assez pour être à l'origine d'intoxication) et pratiquement insoluble dans l'eau. Il forme des amalgames avec de nombreux métaux. En plus de l'élément lui-même (Hg⁰), le mercure peut exister sous deux valences principales +1 et +2, correspondant aux composés mercureux et mercuriques. De la spéciation dépendent la cinétique et la toxicité du mercure qui est un toxique cumulatif.

Parmi les composés minéraux inorganiques, on peut retenir les composés suivants :

Le sulfure mercurique (HgS), l'oxyde mercurique (HgO), les chlorures mercurique et mercureux (HgCl₂, Hg₂Cl₂), le sulfate mercurique (HgSO₄). Les dérivés organométalliques peuvent être classés en trois catégories :

- Les composés alkyles qui sont les plus toxiques : composés méthyl mercuriels (hydroxydes, chlorures, cyanamides.), éthylmercuriels (hydroxydes, chlorures.), di MeHg et diéthylmercure ;
- Les dérivés alkoxyalkylés (chlorure et silicate de méthoxyéthylmercure ;
- Les dérivés aryles (diphénylmercure, acétate et nitrate de phénylmercure) en général moins dangereux.

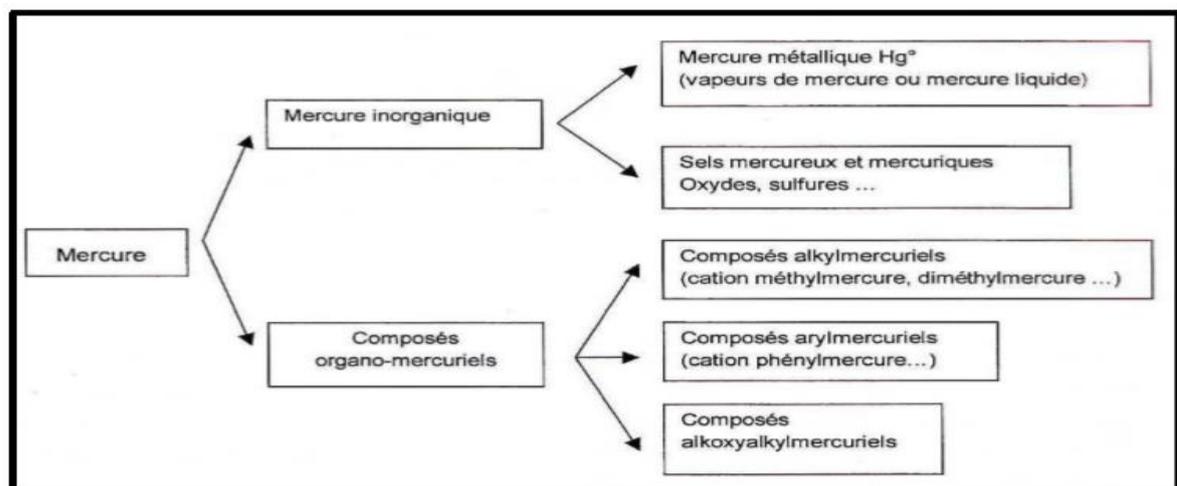


Figure 1.15 : Les propriétés physico-chimiques du mercure.

1.9.1.2. Propriétés physiques du mercure

Les propriétés physiques du mercure sont illustrées dans les points suivants :

- Numéro atomique : 80 ;
- Masse atomique : 200,59 g.mol⁻¹ ;
- Electronegativité de Pauling : 1,9 ;
- Masse volumique : 13,6 g.cm⁻³ à 20°C ;
- Température de Fusion : - 38,9 °C ;
- Température d'ébullition : 356,6 °C ;
- Rayon atomique (Van der Waals) : 0,157 nm ;
- Rayon ionique : 0,11 nm (+2) ;
- Isotopes : 38 ;
- Configuration électronique : [Xe] 4f14 5d10 6s2 (Biskri Zakaria, .2020).

1.10 Le mercure en Algérie.

Les gisements de mercure de la zone Nord numidique sont situés sur le flanc Nord de la chaîne calcaire, au Sud de la ville d'Azzaba, Nord-Est Algérie. Les différents indices minéralisés affleurant dans la région d'Azzaba sont classés en polymétalliques (Pb, Zn, Cu) et mercure-polymétalliques (Hg, Pb, Zn, Cu).

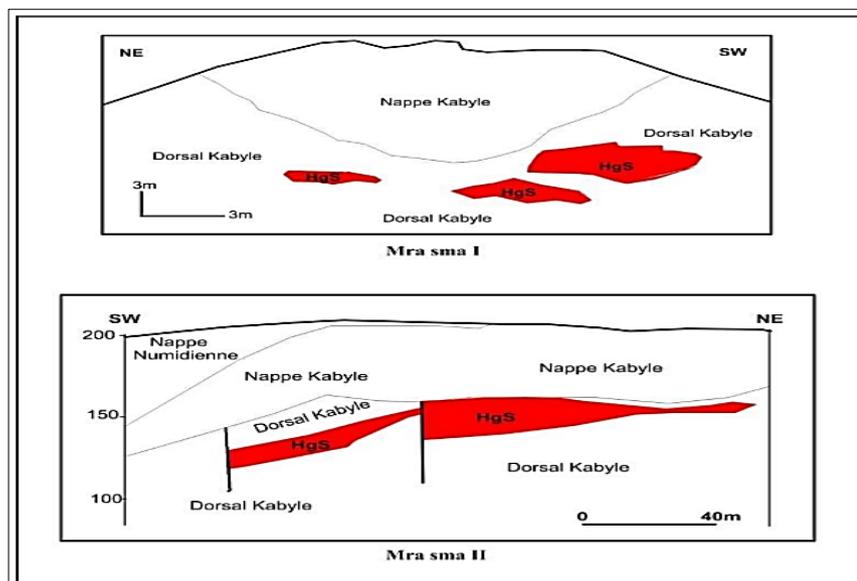


Figure 1.16: Morphologie des corps minéralisés dans le champ minier de Mra Sma (Hellal et al., 1994).

1.11 Études toxicologiques du mercure.

a. Effet cytotoxique.

Le mercure fait partie intégrante des métaux toxiques non biodégradables qui ont des effets néfastes sur les êtres vivants, Homme, animaux et végétaux. Utilisé chez les modèles animaux, le mercure conduit à l'apoptose des cellules, induit des aberrations chromosomiques ou favorise des cancers. La mort cellulaire programmée ne peut pourtant se produire que lorsque les dommages cellulaires ou bien les dommages du matériel génétique dépassent largement la capacité de régénération de la cellule.

b. Altération de la fonction cognitive.

Le mercure Hg est l'un des principaux contaminants environnementaux qui préoccupent les scientifiques actuellement. En effet, ce métal, lorsqu'il se trouve dans un milieu aquatique et ce indépendamment de sa forme initiale, organique ou inorganique se transforme en méthyl mercure MeHg encore plus toxique, via un processus de méthylation, qui s'effectue par le biais des micro-organismes, tels que les planctons, qui seront pourtant la nourriture principale des petits poissons.

c. Dégradation du système visuel.

Très peu d'études scientifiques ont parlé de l'effet de ce métal sur les systèmes visuel et auditif, alors que les premiers signes de l'intoxication concernent surtout ces fonctions de l'organisme. Il a été démontré lors de l'incident d'intoxication en Irak et au Japon que le cortex visuel est particulièrement vulnérable lors d'une exposition aiguë au méthyl mercure. D'importantes lésions ont été remarquées chez les victimes de la tragédie de Minamata en 1949, entraînant une cécité bilatérale, vision tunnel, constriction du champ visuel, ou encore faible vision de nuit. (Bakir F. & al., 1978).

1.12 L'impact du mercure sur l'environnement.

Les opérations d'extraction et de traitement de mercure génèrent plusieurs déchets dans l'environnement. L'impact varie selon le mode d'exploitation et de traitement. En effet, les exploitations à ciel ouvert, génèrent une grande quantité de stériles, de poussières et d'eaux contaminées par l'Hg. Dans les procédés de traitement historiques, le minerai était calciné en

tas découvert ou dans des vases argileuses. Ces méthodes provoquent l'émission de la moitié de la quantité d'Hg dans l'environnement (Kavcic et al., 2008), (Tersic et al., 2011).

Les anciennes méthodes provoquent une pollution immédiate sur le même site, apparaît sous forme de déchets solides riches en Hg, généralement en phase cinabre vu que la récupération n'est pas complète. Par contre, les procédés développés de récupération d'Hg par calcination sont réalisés dans des milieux confinés (fours, cyclones, condensateurs ...), ce qui est supposé limiter la pollution.

Mais la production massive et le procédé lui-même génèrent des rejets de tous types : atmosphérique, à travers les cheminées et dont les gaz sont riches en particules de mercure qui sont transportées sur des distances lointaines, et liquides, dans les eaux de purification et de condensation des vapeurs d'Hg et solides, principalement sous forme de déchets de calcination. Les phases d'Hg les plus solubles sont rencontrées dans les rejets de ces procédés, ce qui les rend plus polluants et plus toxiques (Tersic et al., 2011).

Le mercure est en fait, selon ses formes, tout à la fois inoffensif et extrêmement dangereux. Il peut se lier dans l'organisme aux molécules constituant la cellule vivante (acides nucléiques, protéines...) modifiant leur structure ou inhibant leurs activités biologiques, il peut aussi passer dans les graisses et y être stocké.

Sa toxicité dépend de la forme sous laquelle il se présente. Dans sa forme métallique ou inorganique : le mercure peut exister sous trois états d'oxydation notés Hg(0) ; Hg(I) sels et complexes peu stables ; Hg(II) lié au soufre, à l'azote, à l'oxygène et aux halogènes. Le mercure élémentaire, liquide, il est pratiquement inoffensif : on peut y plonger les mains sans risque. Si par mégarde il est ingéré par voie orale, il est rapidement éliminé dans sa quasi-totalité par les voies naturelles. Il faut cependant se méfier de ce métal liquide, car il est très volatil et peut être aisément respiré.

A température ambiante, il se transforme aisément en vapeur et par inhalation pénètre dans les poumons puis dans le sang. Il est alors transporté dans les différentes parties du corps, plus particulièrement dans le cerveau. La forme gazeuse est très nocive si elle est inhalée pendant de longues périodes.

Le mercure monovalent (Hg^{+1}) et divalent (Hg^{+2}), il intervient dans la composition des sels mercurieux et mercuriques, le divalent peut également exister sous forme ionique libre. Sous la forme ionisée, il peut pénétrer dans le corps par inhalation ou par voie cutanée et gagner le foie et les reins. Les composés inorganiques du mercure ont pour cibles le système nerveux central (forme métallique $\text{Hg}(0)$ et les reins $\text{Hg}(\text{II})$).

Le mercure organique, avec des degrés d'oxydation (I) ou (II) est combiné au carbone par une liaison covalente très forte. Le poids atomique élevé du mercure favorise la formation de dérivés stables avec le radical méthyle CH_3 , pour former les dérivés mercuriels mono méthyles et diméthyles. Les mono méthyles sont produits par des bactéries dans les sédiments et les eaux douces et ils ont une grande affinité pour les protéines, notamment pour les enzymes cellulaires. Parmi les dérivés diméthyles produits par des bactéries dans les sols, on trouve le chlorure de méthyle mercure, soluble dans les graisses. Tous ces dérivés sont donc extrêmement toxiques car leur insolubilité leur permet de franchir aisément les barrières cellulaires et placentaires. Pour les composés organiques, le neurotoxique est prédominant.

La bioaccumulation dans la chaîne trophique constitue le gros danger du mercure organique. Au fur et à mesure que l'on progresse dans la chaîne alimentaire, les concentrations de mercure augmentent. Cette bioaccumulation entraîne la bioamplification. Le méthyle mercure possède un fort potentiel de bioaccumulation et, à partir d'un milieu peu pollué, on peut aboutir à des concentrations extrêmement toxiques. Le mercure absorbé par le plancton se concentre ensuite dans les poissons (Dutra Maia, 2008).

1.12.1. L'exposition au mercure.

La plupart des gens sont exposés à de faibles quantités, souvent par le biais d'une exposition chronique (contact intermittent ou continu à long terme). Cependant, certaines personnes sont exposées à des niveaux élevés, y compris lors d'expositions aiguës (sur une courte durée, souvent moins d'une journée), par exemple à la suite d'un accident industriel. Les facteurs déterminant les effets sur la santé sont la forme chimique de mercure, la dose, l'âge ou le stade de développement, la durée de l'exposition et le mode d'exposition (inhalation, ingestion ou contact avec la peau). Les fœtus, particulièrement, sont sensibles aux incidences du mercure sur le développement. L'exposition professionnelle au mercure est essentiellement celle des usines d'extraction du mercure.

La consommation de poissons et de mammifères marins contaminés représente la principale source d'exposition humaine au MeHg, notamment chez les populations dont l'alimentation repose largement sur ce type de nourriture (WHO, 1990). La concentration de mercure présent dans les poissons varie selon l'espèce entre 0,05 et 1,4 mg/kg (PNUE, 2005). Les premiers accidents écologiques très sérieux sont illustrés par la dramatique intoxication entre 1953 et 1956 de villageois de la Baie de Minamata au Japon. Elle faisait suite à la consommation de poissons et coquillages contaminés par le MeHg formé à partir du sulfate mercurique rejeté par une usine de production d'acétaldéhyde. L'apport quotidien en mercure total par les poissons frais consommés a été estimé entre 2 et 5 mg pendant plusieurs mois, voire plusieurs années. Le même scénario s'est produit à Niigata le long du fleuve Agano en 1964-1965 (Tsubaki T, Sato 1966). Plusieurs séries de cas d'intoxication à partir de farines issues de graines traitées par des organomercuriels se sont produites en Irak en 1956, en 1960 et en 1971-1972 (Bakir, 1973) et au Guatemala. À l'heure actuelle, il existe un risque d'exposition des populations fortement consommatrices de poisson, comme dans les Îles Féroé, ou s'il existe une pollution environnementale par le mercure inorganique, susceptible de se transformer en MeHg.

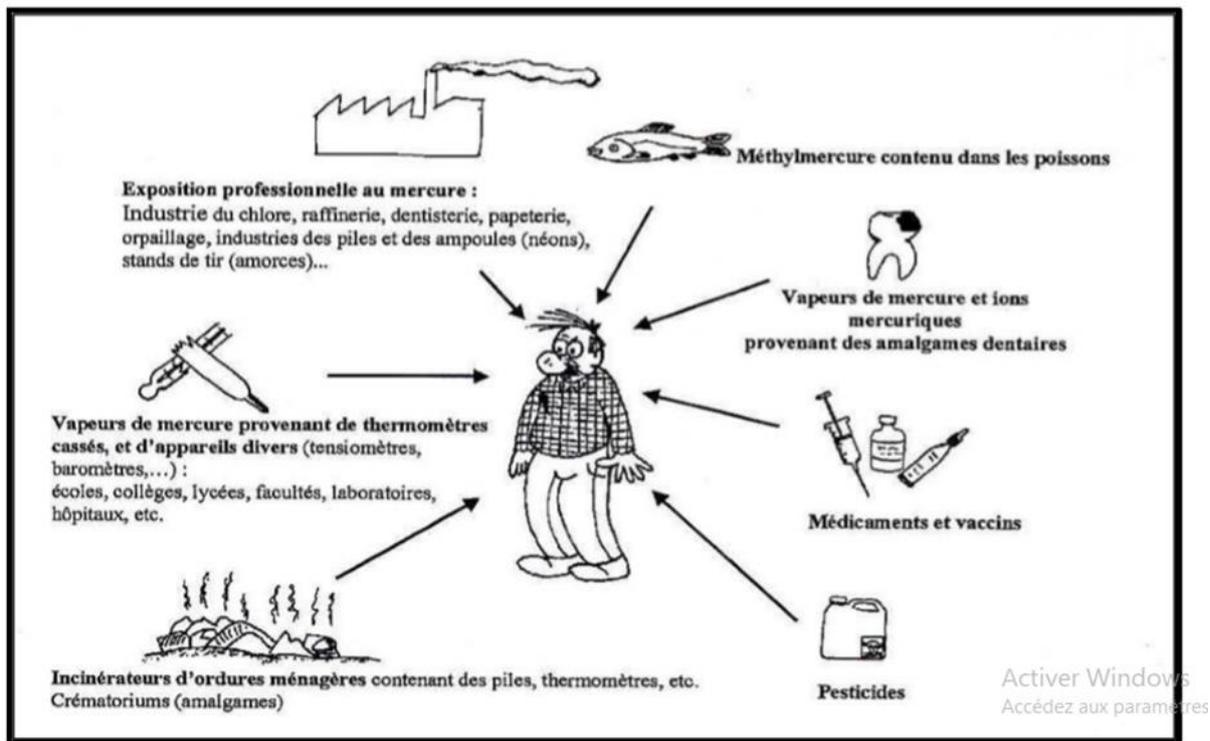


Figure 1.17 : Les sources d'exposition humaine au mercure. (Biskri Zakaria, .2020)

Problématique.

- ✓ Quelle solution proposée pour traiter cette pollution !
- ✓ Quelles sont les techniques de dépollution de sol ! Quelles sont les applications et les plantes ont appliqué !
- ✓ On détaillera tout ceci dans le chapitre qui suit.

Chapitre II : Etat de l'art sur les techniques biologique de dépollution d'un site

Le problème des sols pollués par les métaux lourds est la conséquence d'un passé, et trop souvent encore d'un présent industriel, peu soucieux des rejets d'éléments toxiques dans les sols, rendant de nombreux sites potentiellement pollués et dangereux pour la santé publique et animale. Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés par les métaux lourds, néanmoins toutes ne sont pas applicables dans toutes les conditions. Une étude est donc nécessaire pour déterminer la meilleure technique à utiliser pour les sols pollués. Le contexte économique est à prendre en considération, dans ce cas, afin de trouver des solutions innovatrices à la problématique de la contamination des sols par les métaux lourds.

2.1. Pourquoi tant d'intérêt pour l'environnement ?

Toutes les activités humaines ont un impact sur l'environnement. Cependant, au cours du siècle dernier, la nature et l'étendue de ces influences ont évolué au point où l'environnement doit être pris en compte dans nos activités. La compréhension croissante de l'environnement nous permet de prévoir les dommages graves et irréversibles sans rien faire. Les problèmes environnementaux auxquels nous devons faire face ont des caractéristiques que l'homme n'a pas encore.

L'exploitation minière a un effet néfaste sur l'environnement, lorsqu'elle n'est pas accompagnée par une étude sur l'impact environnemental. Parmi les objets nuisant à l'environnement : les stériles.

L'exploitation minière représente une activité économique très importante au niveau mondial. L'augmentation de la population mondiale et l'importance accrue du système capitaliste, sur lequel reposent les bases de la plupart des sociétés d'aujourd'hui, et en conséquence le développement économique et technologique global, font en sorte que nos besoins en minéraux et métaux ne cessent de s'accroître. Par conséquent, l'activité minière demeure une composante essentielle de l'économie de divers pays. L'exploitation d'une ressource minérale, comme celle de toutes ressources naturelles, ainsi qu'un grand nombre d'activités humaines, comportent de nombreux risques pour l'environnement. La fermeture d'une mine, la récupération d'un site minier en vue de l'implantation d'une nouvelle activité ainsi que la gestion des résidus miniers et des haldes à stériles demeurent un défi pour notre génération et les générations à venir.

La contamination croissante de l'environnement par les métaux lourds est un problème environnemental préoccupant. Le coût de nettoyage des sols contaminés par les métaux lourds est une menace sérieuse à la santé économique des grandes villes industrialisées, vu la progression continue de la production industrielle et le développement des connaissances sur la toxicité des métaux lourds.

Ces derniers temps, les problèmes posés par les contaminants chimiques, en particulier les éléments traces métalliques (ETM) dans l'environnement, suscitent l'intérêt de la communauté scientifique, car la protection de l'environnement passe par la connaissance du devenir de ces contaminants et de leurs effets sur les êtres vivants qui en dépendent. Leur présence dans les matrices environnementales est souvent occasionnée par les activités anthropiques notamment l'agriculture, l'élevage, l'industrie et le transport. Les humains peuvent être exposés aux ETM du fait de leur présence dans les sols et dans l'atmosphère ou à travers la consommation de denrées alimentaires ou d'eau contaminées.

La contamination par les ETM a été tout d'abord mise en évidence dans les pays industriellement avancés en raison de leurs déversements industriels plus importants, et spécialement à la suite d'accidents dus à une pollution par le mercure (Hg) et le cadmium (Cd) en Suède et au Japon (Goldberg, 1979). Dans quelques pays africains, les activités minières sont à l'origine d'importants apports des ETM dans l'environnement ; citons par exemple l'Hg en Algérie, l'arsenic (As) en Namibie et en Afrique du Sud, l'étain (Sn) au Nigéria et en République Démocratique du Congo, et le cuivre (Cu) en Zambie. Il ne fait pas de doute que les très fortes concentrations de certains métaux relevées dans des plans d'eau déterminés sont le résultat d'une pollution aiguë. (Braham Iness, 2020)

2.2. Définition de la réhabilitation d'un site minier.

La réhabilitation comprend la conception et la construction de reliefs, ainsi que la mise en place d'écosystèmes durables ou d'une végétation alternative, en fonction de l'utilisation prévue du terrain une fois les opérations minières terminées.

La réhabilitation consiste à aménager la friche industrielle en considération de l'intérêt public. Le gérant de la société exploitante est tenu de créer les conditions qui permettront

ultérieurement un nouvel usage du site. Mais il n'est pas obligé d'en mettre en œuvre ni d'en financer la réalisation. Ce qui est essentiel, c'est que le gérant est obligé de prendre en

Considération « l'intérêt public ». On entend par cette notion des stipulations concrètes dans des plans de droit public, comme par exemple des plans d'occupation des sols ou des plans d'aménagement des espaces naturels, ou d'autres telles que les listes des monuments ou les inscriptions au cadastre des biotopes. Pour relever pleinement de l'intérêt public ces stipulations doivent être validées. De simples projets à l'étude ne sont pas reconnus comme expressions de l'intérêt public.

La réhabilitation d'un site minier doit chercher à remplir trois objectifs-clés :

- La durabilité et la stabilité à long terme des reliefs, des sols et de l'hydrologie du site,
- La réparation partielle ou totale de la capacité de l'écosystème à offrir un habitat au biote et des services aux individus,
- La prévention de la pollution aux alentours du site.

Plusieurs termes ont été employés pour décrire la réparation du sol perturbé par des activités minières, ou autres formes d'utilisation de la terre, parmi lesquels : réhabilitation, réclamation, reconstruction, réparation, restauration et revégétalisation.

2.2.1. La réhabilitation dans le cadre du développement durable.

Les activités minières ne sollicitent le sol que sur une période déterminée (même si certaines mines peuvent durer très longtemps), et chaque opération est amenée à se terminer un jour. La fin d'une activité minière a généralement lieu lorsque les ressources sont épuisées ou que le coût de la production dépasse les bénéfices réalisés. La clôture de la mine permet donc aux sols perturbés par l'exploitation d'être réhabilités, en leur attribuant un nouvel usage, adapté et durable.

La réhabilitation doit faire partie intégrante de leurs stratégies de développement durable. La réhabilitation reste invariablement un indicateur de performance clé, permettant de juger la performance de la société en termes d'environnement. Les mines mal réhabilitées posent des problèmes à long terme pour l'ensemble des éléments de la société, gouvernements, communautés et sociétés.

2.2.2. Réhabilitation progressive.

Le fait de ne pas planifier les opérations et de débiter la réhabilitation relativement tôt au cours du projet peut constituer une entrave à l'élaboration des compétences et connaissances nécessaires pour un résultat durable, conforme aux critères de réussite établis. Dans le cas où la clôture du site débiterait sans que le site n'ait eu le temps de déployer les compétences, l'équipement et les compétences techniques nécessaires à la bonne réalisation des opérations de réhabilitation, les conséquences possibles seraient un résultat décevant, qui entraînerait d'importants coûts supplémentaires et une probabilité d'échec de la clôture assez grande.

Connaissances dont l'on dispose concernant le site, les recherches déjà menées et les rapports de suivi disponibles. Les opportunités et les dangers doivent être identifiés suffisamment tôt de manière à ce que les options de réhabilitation disponibles ne soient pas réduites une fois le projet lancé. Ainsi, un retard d'investissement entraîne un retard de la clôture, au-delà de la fin de vie utile de la mine, ce qui génère des frais supplémentaires voire, dans certains cas, la rétention directe pour les sinistres de responsabilité, sur une durée supérieure à celle initialement prévue.

2.2.3. Pratique de la réhabilitation.

De nombreux facteurs entrent en jeu lorsque l'on veut définir la pratique de réhabilitation d'un site minier. Le fait d'accéder au terrain nécessite de la part des sociétés d'exploitation d'être en mesure de prouver leur volonté de respecter l'occupation des terres, telle que définie au départ.

La réhabilitation reste invariablement un indicateur de performance clé. Les orientations réglementaires sont telles que, à court ou moyen terme, le fait de respecter les bonnes pratiques de réhabilitation constituera un avantage concurrentiel ; à plus long terme, il s'agira de la condition de base pour pouvoir accéder au terrain. Le fait de ne pas s'engager fermement sur ce plan peut entraîner des retards d'approbation et, dans le pire des scénarios, une perte totale des opportunités de développement.

2.3. Etude de cas et proposition d'un plan de réhabilitation pour le même site.

Pour le cas de la mine d'Ismail, on propose à traiter le problème de la pollution induit par l'exploitation et le traitement du mercure par deux phases :

- ✓ La première phase consiste à dépolluer le site par la désinstallation des infrastructures existantes, la sensibilisation et négociation avec la population pour quitter le site

contaminé, ensuite la création d'une zone imperméable pour le dépôt de tous les déchets, puis le décapage de la terre végétale de toute la surface de la zone.

- ✓ La deuxième phase sera la végétalisation du site par des plantes absorbantes du mercure (application de la phytoremédiation).

2.4. Désinstallation des anciennes infrastructures et découpage de la terre contaminée.

Dans cette étape, il s'agit d'enlever tous les dispositifs et les infrastructures minières existantes dans le site abandonné, tels que : la trémie d'alimentation, station de concassage, les fours condensateurs et cyclones, trémie à déchets, cheminé, scorie de stock et la scorie principale. Cette procédure est considérée comme une intervention immédiate et à court terme.

Après la désinstallation, la terre végétale au niveau de la mine et d'usine de traitement doit être enlevée et déplacée vers un autre endroit de décharge. Ce dernier sera préparé pour que les terrils soient isolés (élimination de contact) de la surface et des nappes phréatiques. (Biskri Zakaria, 2020).

2.5. Sols contaminés : une gestion complexe et risquée.

D'après Michel Labrecque, les métaux sont bénéfiques à la croissance des végétaux, qui les captent puis les fixent ou les métabolisent pour leur croissance. Selon le choix des plantes, on peut autant décontaminer les matières organiques, qui sont dégradées dans le sol, in situ, et les matières inorganiques, qui sont accumulées dans les tiges et les feuilles des plantes. Avec cette méthode, de nombreux contaminants seront ainsi dégradés directement dans le sol. Les métaux qui se retrouvent dans les plantes sont quant à eux concentrés après ces traitements. On gère donc des kilos de végétaux contaminés, plutôt que des tonnes de terre ! »

2.6. Quels sont les polluants qui contaminent les sols ? Sont-ils dangereux ?

La présence de métaux lourds dans le sol est normale, et bénéfique aux plantes. C'est leur teneur qui pose problème : des sols contaminés peuvent contenir de fortes concentrations de métaux lourds, ce qui est toxique pour les organismes. Les sites pollués ne sont généralement pas contaminés d'une seule substance : on peut retrouver, sous différentes concentrations, des pesticides, du cuivre, du cadmium, du plomb, nickel, différents hydrocarbures et produits pétroliers, du cuivre, peintures, teintures, huiles et solvants ou même des explosifs...

Ces métaux lourds, proviennent d'anciennes industries ayant rejeté les polluants sur leur terrain d'exploitation, de l'exploitation agricole, de stations-services, de sites d'enfouissement, etc.

Et un sol contaminé peut être synonyme de problèmes nombreux : détérioration et disparition de certaines fonctions, pollution des eaux de surfaces et des eaux sous-terrain, perte de valeur commerciale, inutilisation de l'espace, fardeau visuel...

2.7. Principe de décontamination.

Les plantes vont soit absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker, soit réduire voire empêcher la libération du contaminant dans d'autres compartiments de l'environnement (phytostabilisation). Le plus souvent, les composés organiques (xénobiotiques ou non) peuvent être dégradés et métabolisés pour la croissance de la plante. Le polluant est alors éliminé. Lorsqu'il s'agit de composés inorganiques polluants (métaux, métalloïdes ou radionucléides), il ne peut y avoir que phytostabilisation ou phytoextraction car ces types de polluants ne sont pas biodégradables.

2.8. Les techniques biologiques de dépollution des sols.

Les techniques biologiques de dépollution des sols sont nombreuses. Selon la nature de la pollution à traiter, elles sont mises en œuvre seules ou combinées à d'autres procédés, physiques, chimiques, thermiques ou biologiques.

Bien que l'avantage principal des techniques biologiques réside dans leur mise en œuvre sur le site même (in situ), certaines nécessitent l'excavation des terres et sont réalisées sur site (excavation des terres qui sont traitées sur le site même) ou hors site (excavation et transport des terres vers un centre de dépollution).

L'identification des techniques biologiques existantes ou émergentes et l'analyse des procédés impliqués mettent en évidence l'existence de deux catégories principales :

Les techniques de bio remédiation qui utilisent essentiellement des bactéries et les techniques de phytoremédiation qui exploitent les propriétés des végétaux (plantes, arbustes, arbres). Elles peuvent être classées en fonction de leur degré d'innovation :

- Les techniques innovantes qui font l'objet de travaux de recherche et développement poussés et d'essais pilotes sur site.

- Les techniques plus anciennes, qui n'évoluent plus vraiment, à l'exception d'ajustements mineurs pour optimiser leur rendement et gagner en efficacité.

2.8.1. Parmi les techniques biologiques innovantes.

Certaines sont commercialisées tout en faisant l'objet de travaux de recherche et développement en vue d'améliorer les conditions d'utilisation et d'optimiser les performances, d'autres n'ont pas dépassé le stade expérimental et sont étudiées soit en laboratoire, soit dans des serres, ou font l'objet d'essais sur le terrain (chantiers expérimentaux, sites pilotes). Figurent parmi ces technologies innovantes à la fois des techniques **de bio remédiation** et **de phytoremédiation**.

Ces catégories répertoriées ci-après sont présentées plus en détail dans les tableaux suivants :

Tableau 2.1: Fiche technique du traitement bioslurry.

Fiche technique	BIOSLURRY	BIOSLURRY	
		Principe	Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol en suspension dans l'eau (concentration de solide entre 10 et 50 % en poids) ; l'eau utilisée étant de l'eau de rivière ou de l'eau souterraine, contaminée ou non. - ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. - système d'aération employé pour les procédés aérobies.
		Application	traitement ex situ des sols, boues
		Polluant	carburants et huiles, pentachlorophénol, PCB, HAP, composés organiques halogénés volatils ou semi volatils, etc. métaux lourds, chlorures (prétraitement nécessaire car ces polluants peuvent inhiber le métabolisme bactérien)
		Techniques	Para- mètres à définir - caractéristiques physiques du mélange liquide/solide, régies par la distribution des composés organiques dans le mélange, la viscosité et la tension superficielle des contaminants - énergie nécessaire à apporter au système pour homogénéiser la suspension - temps de séjour des solides et liquides pour obtenir le résultat souhaité - apport minéral (N, P,...), température et quantité d'oxygène pour parvenir à la biodégradation maximale - caractéristiques des émissions gazeuses (CO2 et produits volatils)
		Points forts	microorganismes utilisés : - microorganismes indigènes - microorganismes naturels pré-adaptés - mélanges de souches
		Points faibles	facteurs d'efficacité : - résultat étroitement lié à l'accessibilité du polluant et à sa sensibilité à la dégradation biologique (transfert des composés organiques de la phase solide vers la phase aqueuse) - taux de dégradation variable selon le type de sol et la nature du polluant : exemple : dans un sol constitué de 5 % de gravier, 40 % de sable et 55 % de limon et d'argile,

Tableau 2.2 : fiche technique de traitement atténuation naturelle

ATTENUATION NATURELLE	
Principe	Processus se produisant naturellement dans les sols et les eaux souterraines, sans intervention humaine, visant à réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration de polluants dans ces milieux. Les processus impliqués sont la dispersion, la dilution, la volatilisation, l'adsorption, les mécanismes de stabilisation ou de destruction des polluants (dégradation biotique ¹² par des bactéries autochtones ou abiotique ¹³), qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques ¹⁴
Application	traitement in situ des sols et des eaux
Techniques	<p>Protocole</p> <ul style="list-style-type: none"> - France : le « Biorestauration Protocol », procédure de traitement microbiologique in situ élaborée¹⁵ en 2002 (solvants chlorés, HAP, métaux, métalloïdes) - Grande Bretagne : un guide sur l'évaluation et la surveillance de l'atténuation naturelle de contaminants dans les eaux souterraines publié en juin 2000 par l'English and Welsh Environment Agency (une distinction importante entre les termes « atténuation naturelle » et « atténuation naturelle contrôlée »). - Etats-Unis : de nombreux guides d'évaluation du potentiel d'atténuation naturelle (émanant d'organismes fédéraux, nationaux, entreprises privées, associations professionnelles) ; seuls ceux réalisés par l'EPA (1999, 1998, 1997) sont officiellement reconnus
Points forts	<ul style="list-style-type: none"> - économique : bien moins coûteux que des traitements actifs - technique : évite l'excavation et le transport des terres - sanitaire : limite le contact des opérateurs avec les polluants - environnemental : ne génère aucun déchet
Points faibles	<ul style="list-style-type: none"> - peu efficace pour des concentrations élevées de polluant - exige une surveillance à long terme (mesures, contrôles) - activité microbienne susceptible d'être inhibée par des composés toxiques - migration de polluants possible en cas de processus très lent

Tableau 2.3 : fiche technique de traitement Bio remédiation

		BIOREMEDIATION	
		Principe	utilisation de microorganismes, généralement des bactéries, pour réduire la pollution d'un site : identification et caractérisation biochimique des microorganismes susceptibles de réaliser la transformation des polluants présents sur le site
Application	traitement in situ ou hors site des sols, boues, sédiments, effluents liquides		
Polluant	métaux, solvants, hydrocarbures (HAP), explosifs, produits phytosanitaires, etc.		
Fiche technique	Techniques	biodégradation	utilisation de la capacité de certains microorganismes à transformer le polluant en substrat (source de carbone, d'énergie) ; la biodégradation totale d'un composé organique s'appelle la minéralisation
		bio-immobilisation	utilisation de la capacité de certains microorganismes (essentiellement des bactéries) à immobiliser un / plusieurs composants présents à l'état soluble
		biolixiviation	solubilisation par les microorganismes et entraînement dans la phase aqueuse de polluants fixés ou piégés dans le sol
		biorestauration	ajout de nutriments (azote/phosphore) pour stimuler la croissance des microorganismes indigènes et favoriser la dégradation des polluants
		bioaugmentation	introduction dans le sol contaminé de microorganismes allochtones ⁸ capables de traiter les polluants présent
Points forts	<ul style="list-style-type: none"> - intérêt économique : coûts de traitement réduits - intérêts techniques : - traitement d'une gamme diversifiée de polluants (organiques, minéraux) - possibilité de préparer des microorganismes spécialisés - capacité des microorganismes à vivre dans des conditions extrêmes (pH, oxygénation, concentrations élevées de polluant, etc.) - nombreux microorganismes identifiés et caractérisés - tests en laboratoire concluants 		
Points faibles	<ul style="list-style-type: none"> application sur le terrain plus complexe : -concentrations élevées de polluant peuvent ralentir le processus - aléas du terrain : composition et propriétés du terrain 		

2.9. Durée de traitement des méthodes citées.

La durée du traitement varie en fonction de plusieurs facteurs mentionnés précédemment.

- La quantité de contaminants présents dans les sols,
- Le type de sol,

- La superficie contaminée ainsi que le type de contaminant en sont de bons exemples. Toutefois, l'utilisation d'une technologie biologique nécessite une durée de temps très flexible puisque la mise en place de cultures biologiques dans un environnement donné peut parfois être complexe. Les microorganismes doivent bénéficier des meilleures conditions pour survivre et ainsi permettre le bon déroulement de la biodégradation. Si le temps presse et que le client veut se débarrasser rapidement de sa problématique, l'utilisation de la biodégradation ou bio ventilation n'est peut-être pas la meilleure option.

2.10. Phytoremédiation.

L'étymologie provient du grec « python » = plante, et du latin « remedium » = rétablissement de l'équilibre, remédiation. La phytoremédiation n'est pas un concept nouveau puisqu'il y a 3000 ans les hommes utilisaient déjà les capacités épuratoires des plantes pour le traitement de l'eau. Depuis les années 1970 cette pratique a trouvé un regain d'intérêt notamment pour le traitement des pesticides et des métaux.

La phytoremédiation est un ensemble de technologies utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques polluants (naturels ou de synthèse) du sol, de l'eau ou de l'air provenant d'activités humaines. Cette technique permet également de traiter des pollutions inorganiques, tels qu'éléments traces métalliques ou radionucléides.

- **Sol :** Cette technique est utilisée pour décontaminer biologiquement les sols pollués par des métaux et métalloïdes, pesticides, solvants, explosifs, pétrole brut et ses dérivés, radionucléides et contaminants divers.
- **Eaux usées et effluents liquides :** La phytoremédiation sert également à la décontamination d'eaux chargées en matière organique ou en contaminants divers (métaux, hydrocarbures, organochlorés, pesticides). On considère alors les traitements sur sol en place (l'effluent est épandu) ou directement en milieu humide.
- **Air :** Il peut s'agir aussi de dépolluer l'air intérieur ou de recycler l'eau grâce aux plantes dépolluantes.

Au-delà de la dépollution, la phytoremédiation permet la valorisation des sites pollués tels que les friches industrielles. De plus, elle est intégrée dans l'intérêt socio-économique à cause de son faible coût et son intérêt à l'aménagement paysagé. Aussi, grâce à la phytoextraction, les

métaux stockés dans les feuilles et tiges peuvent être réutilisés en éco-catalyseur dans les procédés pharmaceutiques et chimiques. (<https://www.ecohabitation.com>)

2.11. En quoi consiste la phytoremédiation ?

En bref, la phytoremédiation est simple :

C'est utiliser des plantes pour décontaminer les sols, l'eau ou même l'air, et préserver les nappes phréatiques et la chaîne alimentaire de manière biologique. Le traitement permet de décontaminer toutes sortes de surfaces, mais on traite surtout des terrains industriels abandonnés, pour ensuite réutiliser un espace qui serait sinon resté stérile.

2.12. Quelles sont les plantes utilisées en phytoremédiation ?

La clé du choix réside surtout dans une bonne interaction entre les plantes, les micro-organismes et le sol. Selon le type de contamination et le sol, sont donc généralement utilisés des mélanges de plantes et végétaux à croissance différente.

2.12.1. Quelques exemples de plantes bénéfiques pour certains contaminants spécifiques.

- De la moutarde pour nickel et le plomb
- Des peupliers pour le cadmium et le zinc
- Des tournesols pour les radioéléments
- Des saules pour les hydrocarbures et les pesticides.

Certaines plantes et végétaux possèdent des capacités d'accumulation et d'absorption très élevées, jusqu'à mille fois plus que les autres. Pour Michel Labrecque, alors que les plantes poussent naturellement sur les terrains abandonnés, la phytoremédiation représente simplement une meilleure gestion de leur travail : « Si on ne fait rien, la plupart du temps des végétaux s'établissent déjà, les sols sont rarement assez contaminés pour nuire aux végétaux. En somme, la phyto c'est seulement de mieux gérer l'ensemble ! ».

Dans tous les cas, on évitera les plantes envahissantes et on optera plutôt pour des espèces indigènes, adaptées au site et aux contaminants présents.

2.12.2. Avantages de la phytoremédiation.

Avec la phytoremédiation, on traite le sol sur place, ce qui permet d'éviter de remuer et transporter des tonnes de terres contaminées et risquer de disperser le problème.

De plus, le procédé est plus écologique, son coût est moindre, et le traitement est adapté à de nombreuses réalités de surface et de sol. Enfin, planter des végétaux qui dépolluent les sols limite l'érosion et ne nécessite pas d'excavation, que peu d'entretien. Peu d'impacts négatifs lui sont associés.

En considérant les avantages intrinsèques aux plantes et végétaux, on parle même d'avantages positifs sur l'environnement et la santé : réduction des îlots de chaleur, biodiversité, lutte aux changements climatiques...

- Si les avantages sont si nombreux, pourquoi la phytoremédiation n'est-elle pas la norme ?

Pour Michel Labrecque, c'est une question de législation, de temps et de bénéfices, principalement ; le traitement par phytoremédiation se fait partout dans le monde, et c'est une tendance de plus en plus acceptée. Mais ici, la technologie n'est pas encore acceptée par le Ministère de l'environnement, qui a besoin de preuves et données nombreuses qui démontrent son efficacité avant de l'appuyer. Ceci dit, ça pourrait bientôt changer à ce niveau, puisqu'on a plusieurs années d'essais qui appuient la technologie et permettent de plus en plus de prédire comment les sols et les plantes vont réagir ».

La phytoremédiation soulève un autre problème : très peu d'entreprises se sont lancées dans ce genre de service, d'une part, il est très difficile de donner des garanties sur le temps et les résultats, d'autre part, le processus est très peu rentable pour les entreprises. Michel Labrecque souligne que « c'est pour ces raisons qu'on reste pour le moment surtout dans le dig and dump, au Québec. C'est rapide, rentable et facile pour les entreprises de creuser et se débarrasser de la terre, et elles peuvent ainsi fournir des garanties ».

Quant à elle, « la phytoremédiation demande du suivi et de l'entretien, c'est long, et peu d'entreprises veulent se lancer là-dedans. On voit donc pour le moment plutôt des initiatives municipales et des essais sur des terrains privés abandonnés depuis des décennies, avec des associés universitaires », précise l'expert.

2.12.3. Inconvénients potentiels

- Profondeur des zones atteintes. La phytoremédiation convient aux sites où la contamination n'est pas profonde, moins de 1.5 m de profondeur.
- Niveau de contaminants. Les concentrations doivent être relativement faibles pour permettre aux plantes de croître.

- Risque pour la chaîne alimentaire. Si les plantes contaminées sont ingérées par des animaux.

- Temps. Le processus n'est pas adapté pour décontaminer et restaurer un site rapidement. Il convient plutôt à des sites abandonnés, sans contrainte de temps à respecter. Par ailleurs, au Québec, il fait froid, et les saisons de croissance sont plus petites. Prévoir entre 5 à 10 ans selon la concentration, la zone contaminée, le type de plante utilisé et le sol.

2.12.4. Les différentes formes de phytoremédiation.

➤ **La phytostabilisation.**

Connue aussi sous le nom de phytoséquestration, ce procédé vise à contenir ou immobiliser les polluants dans les vacuoles des racines dans le sol ou dans l'eau contaminée, et ainsi permet de réduire la mobilité des polluants et leur biodisponibilité dans la chaîne alimentaire,

Ce qui prévient la migration du panache de contamination vers les nappes phréatiques ou dans l'atmosphère.

➤ **La Phytoextraction.**

Aussi appelée Phytoaccumulation, la Phytoextraction réfère à l'absorption de contaminants présents dans le sol via les racines des végétaux. Par la suite, ces contaminants sont transférés et accumulés dans les parties aériennes des plantes telles que les feuilles et tiges, et grâce au processus d'incinération de ces plantes, les contaminants peuvent être récupérés et réutilisés, c'est ce qu'on appelle la phytomining.

De plus, cette technique utilise des plantes dites hyperaccumulatrices ayant la capacité d'emmagasiner de grandes quantités d'éléments métalliques comparativement aux autres plantes (Schnoor et al., 1995).

➤ **La phytodégradation**

Aussi appelée phytotransformation, cette méthode consiste à dégrader des polluants organiques en molécules moins toxiques et plus simples. Ces mécanismes de dégradation se font de manière directe par un relâchement d'enzymes produites par la plante dans la rhizosphère ou bien sont le résultat de l'activité métabolique dans ces tissus. (Greipsson, 2011).

Une fois dégradés, les contaminants sont absorbés par le végétal, incorporé aux tissus et utilisés comme nutriments afin de contribuer à la croissance de la plante.

➤ La phytovolatilisation.

C'est un processus peu fréquent par lequel les plantes transforment les contaminants du sol ou des eaux polluées en éléments volatils en les relâchant successivement dans l'atmosphère via les stomates de la plante. Des espèces végétales comme le canola et la moutarde indienne sont utiles pour la phytovolatilisation du sélénium. De plus les bactéries présentes dans la rhizosphère contribuent également à la biotransformation des contaminants, ce qui augmente éventuellement le taux de phytovolatilisation. (MacGrath 1998 - Cristaldi et al., 2017).

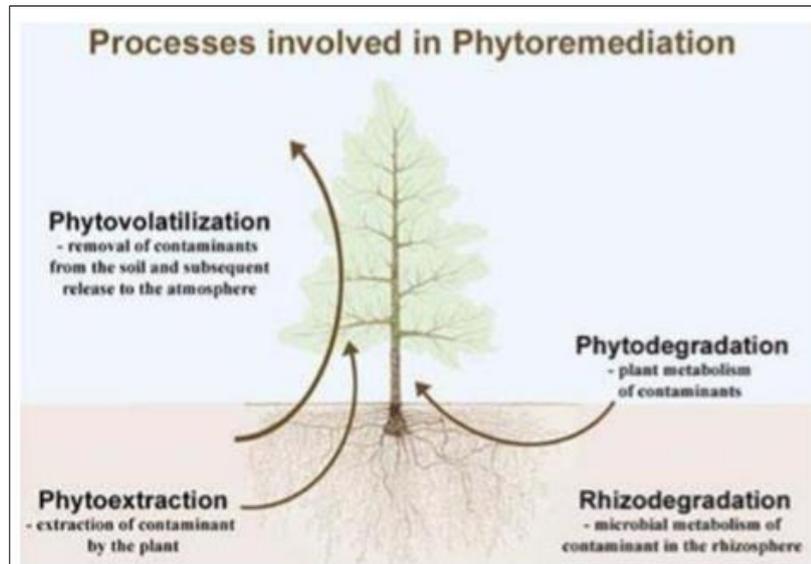


Figure 2.1: Processus de la phytoremédiation. ([Http://revues.imist.ma](http://revues.imist.ma)).

2.13. La phytoremédiation des sites contaminés, quelles techniques utilisées ?

Pour dépolluer les sols, quatre formes principales de phytoremédiation sont possibles :

2.13.1. Pour les métaux lourds.

- Phytostabilisation. Stabilisation des polluants tels que l'uranium et l'arsenic via la séquestration et l'immobilisation dans les racines, ce qui les empêche de remonter à la surface et de se volatiliser, ou de se disperser dans les zones plus profondes des sols.
- Phytoextraction. Prélèvement des polluants et métaux lourds dans les racines et accumulation dans les parties aériennes (tiges, et les feuilles).

2.13.2. Pour les composés organiques complexes.

- **Phytodégradation.** Dégradation des contaminants organiques comme les pesticides via les enzymes pour les convertir en substances moins toxiques et les fixer dans la plante.
- **Phytovolatilisation.** Transformation des polluants tels que le mercure dans les enzymes des feuilles en éléments infiniment moins nocifs qui sont alors libérés dans l'atmosphère via la transpiration de la plante.

À chaque polluant sa stratégie !

Pour dépolluer les sols, quatre formes principales de phytoremédiation sont possibles. Notez que pour faciliter la croissance des végétaux, des études sont présentement en cours sur les bactéries, algues et certains champignons. Des champignons vivants sur les racines de saules, par exemple, augmenterait la productivité. (<https://www.ecohabitation.com>)

2.14. **Phytotransformation et phytovolatilisation pour le mercure.**

Dans notre cas où le mercure est le polluant le plus dominant dans le site, on utilise la méthode **de phytotransformation et phytovolatilisation.**

- **Phytotransformation, ou phytodégradation :** certaines plantes produisent des enzymes (déhalogénase, oxygénase...) qui catalysent la dégradation des substances absorbées ou adsorbées ; celles-ci sont transformées en substances moins toxiques ou non toxiques par la métabolisation des contaminants dans les tissus des plantes ou par les organismes de la rhizosphère maintenue par la plante (on parle alors de rhizodégradation : dégradation par la rhizosphère).
- **Phytovolatilisation :** les plantes absorbent l'eau de la lithosphère contenant des contaminants organiques et autres produits toxiques, transforment ceux-ci en éléments volatils, et les relâchent dans l'atmosphère via leurs feuilles. Elles peuvent aussi dans certains cas transformer des contaminants organiques en éléments volatils avant de les transférer dans l'atmosphère - toujours via les feuilles. La phytovolatilisation n'est pas toujours satisfaisante, car si elle décontamine les sols elle libère parfois des substances toxiques dans l'atmosphère. Dans d'autres cas plus satisfaisants, les polluants sont dégradés en composants moins - ou non toxiques avant d'être libérés.

Les dérivés organomercuriels sont encore plus toxiques (permutation membranaire efficace). Chez certaines bactéries la résistance aux organomercuriels dépend d'une enzyme (MerB) qui catalyse la protonolyse d'un organomercuriel ($RSHg^+$) en un composé moins toxique.

D'autres bactéries sont capables de réduire Hg(II) en Hg(0) (volatil et moins toxique)
(Biskri Zakaria, 2020)

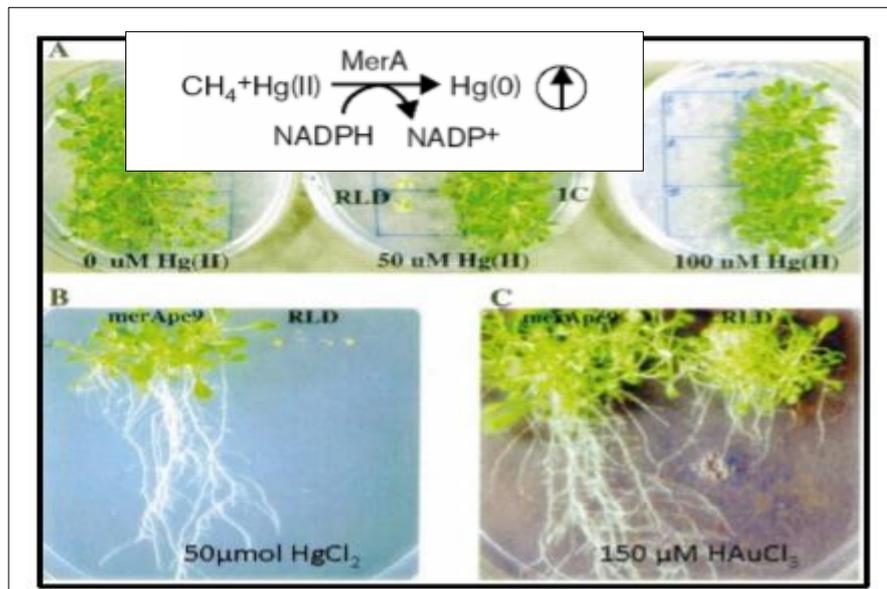


Figure 2. 2 : L'expression du gène bactérien mer A chez *Arabidopsis thaliana* accroît la tolérance des plantes aux mercures et à l'or (Biskri Zakaria, 2020)

2.15. Les avantages de la phytoremédiation.

- Le coût est de 10 à 100 fois inférieur aux technologies classiques ;
- Traitement in situ ;
- Technique adaptée à une pollution faible sur une grande surface ;
- Préviend l'érosion du sol pollué et n'affecte pas sa fertilité ;
- Permet de maintenir la pollution en attente d'un traitement définitif.

2.16. Limites de cette technique de dépollution.

- Temps de traitement très long (minimum 3 ans),
- Nécessite une étude au cas par cas : choix des espèces, traitement du sol,
- Efficacité variable suivant les saisons,
- Peu applicable en cas de pollution aiguë ou multiple,
- Transfert possible du contaminant. (<https://www.ecohabitation.com>).

2.17. Proposition d'une technique de remédiation du site mercuriel par l'utilisation de la phytoremédiation.

Dans le cas de la zone d'étude, et selon la recherche bibliographique menée auparavant, on propose l'utilisation de la technique de la revégétalisation du site abandonné.

Pour ce faire, on a utilisé une plante aux vertus dépolluantes, qui est la menthe aquatique.

2.17.1. Que savons-nous sur cette plante ?

La menthe aquatique aussi connue sous le nom de baume d'eau, menthe rouge ou menthe à grenouille est une menthe sauvage originaire d'Europe (sauf sa partie la plus septentrionale), d'Afrique du nord et de l'est, d'Asie du Proche et Moyen-Orient, poussant dans les milieux humides comme les bords de fossés, de rivières ou d'étangs. C'est une plante à forte capacité d'adaptation quel que soit la nature du sol grâce à ses stolons ayant une vitesse de pousse rapide. Ici le nom "aquatique" désigne une plante poussant en bordure de zone humide et non dans l'eau. C'est une plante mellifère de 20 à 60cm de haut en pleine floraison, capable de s'hybrider naturellement pour donner de nombreuses sous-espèces aux caractéristiques chimiques propres. Connue des Egyptiens, des babyloniens, des grecs et des romains cette plante aromatique au parfum caractéristique rappelant le bitume a été décrite par Linné comme faisant partie du groupe des menthes dites aquatiques avec la menthe bergamote. Actuellement, le genre menthe est divisé en 18 sous-espèces. Elle se couvre de fleurs roses claires de juin à septembre en lisière de forêt pour faire des parterres très utiles à l'environnement.

2.17.2. Culture et récolte de la menthe aquatique.

Vous pouvez la cultiver dans un terrain humide de type argileux ou tourbeux, même marécageux, les bords des fossés, de rivières ou d'étangs. Elle ne demande pas de soins particuliers. Il est conseillé de l'installer dans un endroit sans entretien ou vous pourrez éventuellement passer la tondeuse pour la raccourcir et la rajeunir de temps en temps. D'après notre expérience elle supporte bien la sècheresse momentanée surtout si elle est exposée mi-ombre. Comme plante mellifère, elle attirera tous les insectes des milieux humides qui servent de nourriture aux poissons et aux batraciens. Elle supporte bien le piétinement. Plante plus ou moins en repos végétatif selon les rigueurs de l'hiver.

2.17.3. Histoire de la nomenclature.

Les peuples de l'Antiquité babylonienne, égyptienne et gréco-romaine connaissaient et utilisaient plusieurs espèces de menthes. Durant l'Antiquité européenne, de nombreux hyponymes ont été utilisés pour décrire les menthes, mais les auteurs gréco-romains s'appuyant sur des considérations plus utilitaires que botaniques, il est maintenant souvent difficile de retrouver derrière leurs dénominations les espèces linnéennes de l'époque moderne.

2.17.4. La menthe aquatique, une plante aux pouvoirs dépolluants.

Pour révéler les pouvoirs dépolluants de la menthe aquatique dans la préservation de l'eau des rivières, Klorane Botanical Fondation (fondation d'entreprise qui œuvre pour la protection et la valorisation du patrimoine végétal) s'engage dans un projet innovant et inspirant dans les Cévennes, avec le Laboratoire de Chimie Bio-inspirée et d'Innovations écologiques.

Ils se sont ainsi associés afin de trouver la méthode la plus efficace pour filtrer l'eau polluée avec de la menthe aquatique, et, plus largement, pour ouvrir le pas à de nouvelles méthodes naturelles de dépollution de l'environnement. Les études ont alors prouvé que les racines de cette plante avaient un haut pouvoir de captation des métaux lourds. Après cette découverte en laboratoire, direction les Cévennes pour un test grandeur nature dans la vallée de la Vis, où la rivière est polluée par des métaux lourds (zinc, plomb, fer, cadmium) en raison du passé minier de la région.

L'objectif est double et ambitieux :

- Purifier l'eau qui s'écoule de la grande mine des Malines grâce à la menthe aquatique, juste en amont de la Vis.
- Transformer en ressource renouvelable les métaux lourds captés par la plante grâce à un processus exclusif de recyclage écologique, l'éco catalyse. Plus concrètement, les racines de la menthe aquatique sont séchées et broyées pour fabriquer de grands filtres naturels, sous forme de colonnes. Ils sont disposés en amont de la rivière afin que l'eau puisse s'écouler au travers de ces filtres. Des plants de menthe aquatique vivante sont également installés en aval dans un bassin pour filtrer d'éventuels métaux lourds résiduels.

Un test dans la rivière de la vallée de la Vis est mis en place dans l'espoir et la volonté de démocratiser ensuite ce type de filtre naturel à un plus grand nombre.

2.17.5. Des plantes aquatiques pour fixer les micropolluants de l'eau.

Dans l'Hérault, un projet unique au monde, baptisé "zone Libellule", a vu le jour grâce à une filiale de la Lyonnaise des Eaux : une zone humide où poussent des plantes aquatiques dépolluantes, pour débarrasser l'eau des micropolluants qui subsistent après le traitement en station d'épuration.

2.17.6. Un complément naturel aux stations d'épuration.

Résidus de médicaments, de pesticides et d'hydrocarbures, perturbateurs endocriniens et métaux ne sont généralement pas traités par les stations d'épuration, qui sont performantes surtout pour le carbone, l'azote et le phosphore. Les micropolluants, eux, restent dans les eaux après traitement et rejoignent le milieu naturel, créant des perturbations au niveau des écosystèmes aquatiques.

Avec l'espace tampon humide installé en sortie de station d'épuration sur la commune de St Just, près de Montpellier, dans l'Hérault, les micropolluants sont captés par les plantes aquatiques installées à cet effet : c'est une eau d'une meilleure qualité qui retourne à la rivière.

2.17.7. Près de 40 espèces végétales aquatiques.

Une quarantaine d'espèces végétales aquatiques locales et parfaitement adaptées ont été plantées sur les 17.000m² de la zone humide. Menthe aquatique, lentilles d'eau, roseaux, nénuphars...

Ces plantes captent théoriquement jusqu'à 99% des micropolluants tout au long du circuit parcouru lentement par l'eau. Ce circuit hydraulique comprend des bassins à phytoplancton, des méandres, des deltas, une prairie humide, et il faut 10 à 20 jours à l'eau pour rejoindre la rivière qui coule à proximité.

Les mares accueillent également des batraciens et toute une faune et une flore aquatiques, ce qui permet de développer la biodiversité locale.

2.17.8. Exemple d'une étude de cas. Une possible généralisation à d'autres communes en France.

Le projet "Zone Libellule" (pour Zone de Liberté Biologique et de Lutte contre les Polluants Aquatiques) est une première mondiale. Si l'essai s'avère concluant, la Lyonnaise des Eaux devrait installer d'autres zones tampon humides de ce type dans d'autres communes françaises comptant moins de 10.000 habitants.

La dépollution des sols par les plantes s'appelle la phytoremédiation. Cette technique est couramment utilisée dans le monde entier pour dépolluer les friches industrielles et les sites pollués par accident.

Elle consiste à planter des végétaux qui vont par leurs caractéristiques biologiques absorber puis transformer les polluants en des matières organiques utilisables par les sols et les autres végétaux.

Ces plantes ont chacune leur « spécialité ». Certaines sont efficaces sur les hydrocarbures, d'autres sur certains éléments chimiques (métaux lourds), d'autres sur les bactéries, etc.

En voici une liste non exhaustive :

- Alysson alpestre (*Alyssum alpestre*)
- Bald ingère faux-roseau (*Phalaris arnica*)
- Brassica (chou, moutarde...)
- Fétuque rouge (*Festuca rubra*)
- Glycérie des marais (*Glycéria maxima*)
- Iris jaune (*Iris pseudacorus*)
- Ivraie (*Lolium*)
- Jacinthe d'eau (*Eichomia crassipes*)
- Jonc épars (*Juncus effuses*)
- Massette à larges feuilles (*Typha latifolia*)
- Menthe aquatique (*Menthe aquatique*)
- Pétris rubané (*Pétris vitata*), fougère capable d'accumuler l'arsenic
- Roseaux (*Phragmites sp.*)
- Rubanier d'eau (*Sparagnum erectum*)
- Scirpe des marais (*Lochais palustris*)
- Trèfle violet (*Trifolium pratense*).

La plupart de ces espèces, comme la jacinthe d'eau ou les joncs, servent à dépolluer les eaux. On les trouve dans les stations d'épuration écologiques ou les piscines naturelles.

Les termes de phyto-épuration, phytoremédiation, myco-remédiation désignent des alternatives aux méthodes industrielles de traitement des eaux et des sols, au moyen de végétaux (phyton en grec ancien) ou de champignons (mukês). Ils appartiennent au champ plus large de la bioremédiation, ensemble des techniques reposant sur l'usage d'écosystèmes vivants pour la dépollution des sols, des eaux ou de l'air. Celles-ci s'appuient sur la capacité de certaines

plantes ou champignons, et des nombreux micro-organismes qui les accompagnent, à absorber des molécules nocives ou à les dégrader chimiquement. De telles propriétés sont propres à chaque espèce : les écosystèmes que l'on sélectionne dépendent donc des substances polluantes à éliminer. Ainsi, la Moutarde indienne est connue pour absorber des métaux lourds (plomb, zinc, cuivre), des lentilles d'eau peuvent capter les pesticides, les massettes s'attaquent aux antileptiques, les hydrocarbures peuvent être décomposés par des champignons saproxyliques, ... le tournesol a même été utilisé pour diminuer la concentration d'éléments radioactifs dans les sols de Tchernobyl.

Bien que les définitions se chevauchent, le terme de phyto-épuration est principalement employé pour désigner le traitement d'une eau peu polluée, avant son retour au milieu naturel. Elle fait appel à des plantes aquatiques ou de milieux humides comme les roseaux, les phragmites, la menthe aquatique, etc. Leur action repose sur plusieurs mécanismes physiques et chimiques associés :

- la filtration de l'eau par le système racinaire ou les parties submergées. Cela permet de retenir les plus grosses particules dans les sédiments ou le sol le temps qu'elles soient dégradées,
- La précipitation (formation de particules à partir de substances dissoutes) et la sédimentation (dépôt des particules vers le fond de l'eau, par action de la gravité). De même que pour la filtration, ces phénomènes évitent que les polluants s'écoulent trop rapidement vers les cours d'eau,
- La sécrétion par les plantes et micro-organismes de molécules réagissant chimiquement avec les polluants, formant des substances moins nocives ou plus facilement assimilables par le milieu,
- L'absorption de certains polluants par les racines et leur stockage dans les tissus de la plante, - la dilution des contaminations ponctuelles, dont la diffusion vers le milieu naturel est étalée dans le temps. En diminuant la concentration des substances polluantes, leur toxicité directe pour la faune et la flore est réduite, et leur dégradation facilitée,
- L'exposition prolongée à d'autres facteurs de l'environnement, comme le rayonnement solaire.

La phyto-épuration peut être utilisée pour traiter les eaux domestiques dites « grises », les moins polluées (provenant du lavabo, de la salle de bain...), éventuellement celles dites « noires » (eaux des toilettes). Elle peut se présenter sous la forme de filtres ou de lagunages, avec généralement une série de bassins plantés dans lesquelles l'eau séjourne plusieurs jours, le temps que les écosystèmes qui y vivent fassent leur œuvre. Ainsi les roseaux sont efficaces contre les métaux lourds et les dérivés de détergents, la menthe aquatique capte le zinc, les callitriches retiennent des pesticides... Cette technique permet notamment d'éviter la saturation des stations d'épuration, en réduisant les volumes à prendre en charge. En revanche, elle ne convient pas pour les eaux usées les plus polluées (effluents industriels notamment), qui doivent être acheminées vers des installations spécialisées.

La phyto-épuration est aussi adaptée à la gestion des eaux pluviales, qui se chargent en polluants en traversant l'atmosphère et par le ruissellement sur les surfaces urbaines imperméables (chaussée, parking...) ou à travers des espaces agricoles traités par des produits phytosanitaires. Intégrée à des aménagements de transport de l'eau (noues, fossés), de rétention et d'infiltration, la phyto-épuration permet de réduire la saturation du système d'assainissement des eaux et d'éviter les débordements lors de précipitations importantes.

On parle plutôt de phytoremédiation lorsqu'il s'agit de nettoyer des sols contaminés par une pollution diffuse (métaux lourds, hydrocarbures...). De nouveau, plusieurs mécanismes peuvent entrer en jeu.

Des espèces végétales qualifiées d'hyper-accumulatrices sont réputées pour absorber certains de ces polluants en grande quantité. Le Tabouret calaminaire, par exemple, apprécie particulièrement les sols contenant du zinc. Les contaminants absorbés par les racines transitent dans la plante et sont tantôt libérés sous une forme volatile (cas du sélénium, du mercure..., ce qui peut nécessiter de prendre d'autres précautions, pour éviter une pollution atmosphérique), tantôt stockés au sein d'un organe (les racines, les tiges, les feuilles...). Ces végétaux sont alors contaminés à leur tour : ils doivent être traités dans des établissements spécialisés et non simplement décomposés sur place ou compostés. Ce procédé de phytoremédiation consiste ainsi à transférer la pollution vers un autre compartiment : l'atmosphère ou les tissus végétaux, plus faciles à gérer que le sol. Des études sont également à l'œuvre pour exploiter cette nouvelle ressource de métaux, qui peut présenter un rendement intéressant pour l'industrie, comme dans le cas de l'*Allysum murale*.

D'autres polluants sont susceptibles d'être modifiés par les substances que sécrète les micro-organismes ou végétaux cultivés. C'est par exemple le cas des hydrocarbures, dégradés par des champignons saproxyliques. Les hydrocarbures ayant une structure moléculaire semblable, ils peuvent également être « découpés » par ces enzymes, jusqu'à être réduits en éléments simples assimilables par d'autres organismes. Si cette technique fonctionne bien en laboratoire, elle est toutefois imparfaite sur le terrain, du fait du manque de contrôle sur les conditions de développement des champignons.

Un autre intérêt du système racinaire des plantes peut simplement consister à retenir les éléments polluants sur place, afin d'éviter leur dissémination dans le milieu. Dans ce cas, la modification physique et chimique du sol par les végétaux et les microorganismes associés conduit à réduire la liberté de mouvement des molécules visées. Celles-ci ne sont pas éliminées, mais ce procédé évite que la contamination se propage jusqu'à d'autres écosystèmes plus fragiles.

2.18. Fiche technique de la Menthe aquatique

Selon Tison et al, 2014.

- Règne : Plantae
- Division : Magnoliophyta ;
- Classe : Magnoliopsida ;
- Ordre : Lamiales ;
- Famille : Lamiaceae ;
- Genre : Menthe ;
- Espèce : Menthe aquatique L.



Figure

2.3:

Représentation schématique et photo de la Menthe aquatique (Abdelli Narimene. Guider Sanaa .kabtani Hafiza chérine, 2019)

La menthe aquatique aussi connue sous le nom de baume d'eau, menthe rouge ou menthe à grenouille est originaire d'Europe, d'Afrique du nord et de l'est, d'Asie du Proche et Moyen-Orient, pousse dans les zones humides et lieux frais comme les marécages, les bords de fossés, de rivières ou d'étangs.

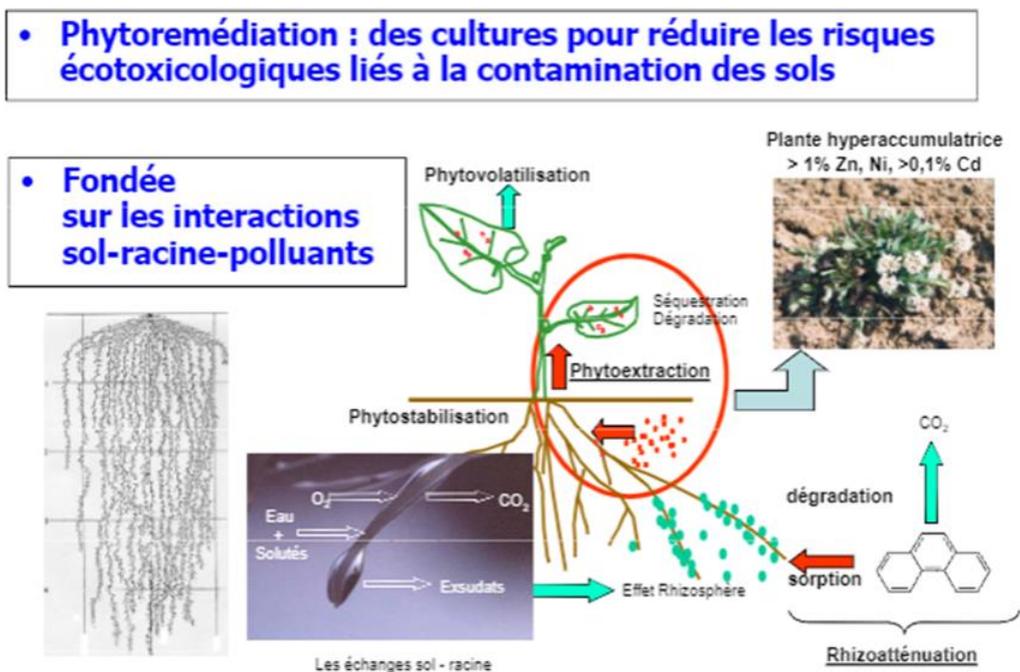


Figure 2.4: Modes d'action des plantes sur les polluants des sols. (Fournon Dominique, 1999)

Le devenir des polluants toxiques dans les cultures utilisées pour la phytoremédiation. Les plantes ont été longtemps une source d'énergie (puisqu'on brûlait le bois) puis elles ont été appréciées pour leur aspect esthétique.

Ce n'est que très récemment (depuis la dernière décennie) que les chercheurs ont mesuré l'importance de leur capacité à stocker, dégrader, ou minéraliser les substances polluantes de l'environnement et en particulier les polluants du sol. Grâce à différents procédés les plantes peuvent, *in situ*, épurer les sols.

Ceci permet un traitement *in situ* des sols et des sédiments grâce aux végétaux afin de pouvoir soit fixer les polluants (et ainsi éviter toutes migrations vers les nappes phréatiques) c'est la phytostabilisation, soit réduire la quantité de polluants du sol par différents procédés :

- par accumulation de composés inorganiques et en particulier les métaux lourds dans les tissus de la plante, c'est la phytoextraction.
- par dégradation des composés organiques par les micro-organismes de la rhizosphère.
- par transformation du contaminant au niveau de la plante en composé volatil comme par exemple le mercure ou le sélénium, c'est la phytovolatilisation.

La phytoremédiation s'adapte bien à certains types de contamination comme des contaminations superficielles des sols (< 5m de profondeur), des contaminations par des polluants modérément hydrophobes comme le benzène, le toluène, l'éthylbenzène, ou le **xylène** (BTEX), des solvants chlorés ou du nitrotoluène, des pesticides, des métaux lourds (plomb, nickel, cobalt, cadmium, sélénium), ou bien encore des radionucléides. Mais les plantes peuvent également être utilisées pour stocker ou dégrader certains polluants des cours d'eau ou des marais et ainsi participer à la décontamination des eaux polluées. (**Fournon Dominique, 1999**)

Chapitre III : Partie expérimentale

✓ Matériel biologique utilisé.

3.1. Les sorties sur terrains

Pendant le stage, on a effectué deux sorties :

La première a été réalisée au niveau de la mine d'Ismaïl Azzaba d'où on a prélevé de l'eau polluée par le mercure, et la deuxième sortie est au niveau du lac Tonga (Kala) d'où on a ramené la menthe aquatique.

3.2. La première sortie (Lagunes (bassin de décantation))

3.2.1. Situation géographique du site de prélèvement du matériel végétal

Le prélèvement de l'eau a été effectué au niveau de la mine d'Ismaïl.

3.2.2. Description du bassin

Ce sont deux petits lacs dans lesquels se réalise la décantation de déchets liquides (eaux techniques), situés à quelques mètres à l'ouest de l'usine et au nord du tas principal des scories, à proximité de l'un des affluents de l'oued Fendek (Oued Zebda), elles sont mal aménagées et non surveillées, contiennent des eaux qui peuvent déborder dans les périodes hivernales dans l'oued suite à l'inclinaison suffisante du sol qui les sépare. Elles sont entourées par des champs ou l'exercice de pâturage est très marqué.

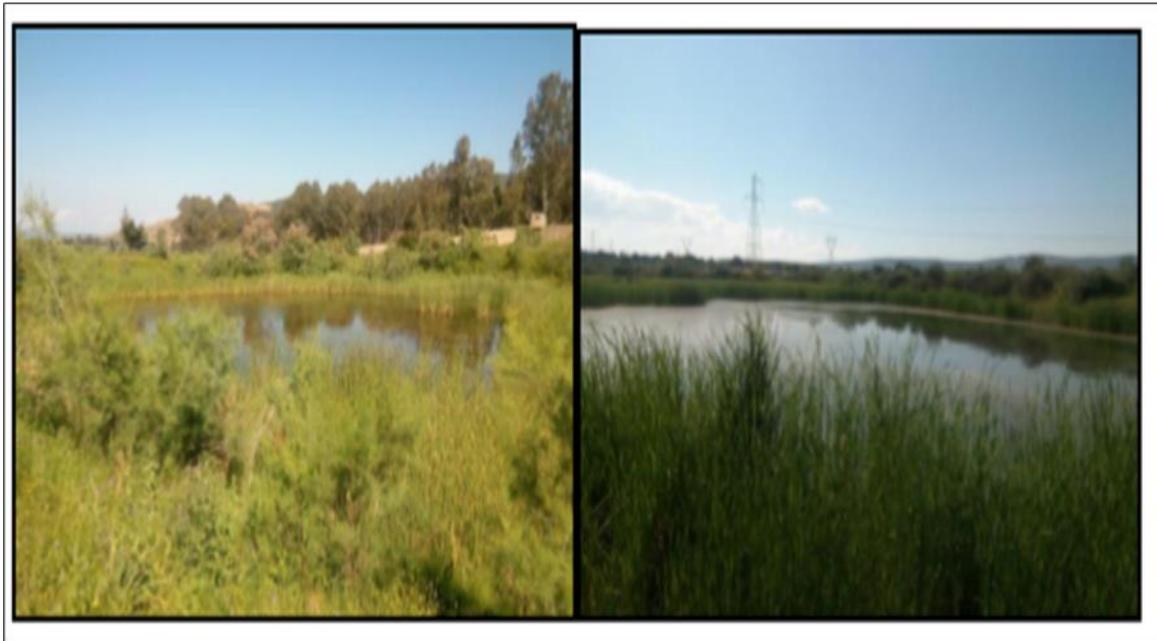


Figure 3.1: Les lacs de décantation (Sortie du 4 juin 2021).

3.3. La deuxième sortie (Lac Tonga)

Notre échantillonnage s'est déroulé au début du mois de juin 2021, au niveau du lac Tonga.

3.3.1. Description du Lac Tonga

Description du lac Tonga ($36^{\circ}53'N$, $08^{\circ}31'E$) de 2 400 ha de superficie (Abbaci, 1999). Il est alimenté principalement par l'Oued El-Hout au Sud et par l'Oued El-Eurg au Nord-Est avec quelques petits cours d'eau issus des crêtes qui l'entourent. Au Nord, nous remarquons l'Oued Messida qui permet d'évacuer l'excès d'eau vers la Méditerranée.

La côte du lac est située à 2.20 m au-dessus de la mer et sa profondeur est voisine de 2.80 m ce qui permet d'avoir un écoulement lent et pourrait expliquer l'échec des travaux d'assèchement entrepris par le gouvernement français au début des années 1920 (Thomas, 1975). La végétation du Lac Tonga est très diversifiée (Kadid 1989, Dd Belair 1990, Abbaci 1999). Les collines gréseuses sont recouvertes de chênes liège. Les dunes à l'Ouest de la Messida sont occupées par le pin maritime et le pin pignon. Cependant une aulnaie de 57 ha décrite par Maire et Stephenson (1930) comme étant une association *Alnetum glutinosa* occupe le Nord du lac (Belkhenchir 1998, Abbaci, 1999). Le climat quasi tropical régnant sur cette aulnaie, a favorisé le développement des cyprès chauves, peupliers de Virginie, aulnes glutineux, ormes champêtres et les acacias. Dans le plan d'eau, il y a des formations émergentes de *Scirpus lacustris*, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Iris pseudoacorus*, *Sparganium erectum*,

Lythrum salicaria, *Lycopus europaeus*, *Oenanthe fistulosa*, *Ranunculus baudotii* (Kadid 1989, Abbaci 1999). Du point de vue faunistique, le Lac Tonga est un site privilégié de nidification pour le Fuligule Milouin *Aythya ferrina*, la Poule sultane *Porphyrio porphyrio*, Héron crabier *Ardea ralloïdes*, Héron bihoreau *Nycticorax nycticorax*, Héron pourpré *Ardea purpurea*, Butor étoilé *Botaurus stellaris*, Le Fuligule nyroca *Aythya nyroca* et l'Érismature à tête blanche *Oxyura leucocephala* (Chalabi, 1990).

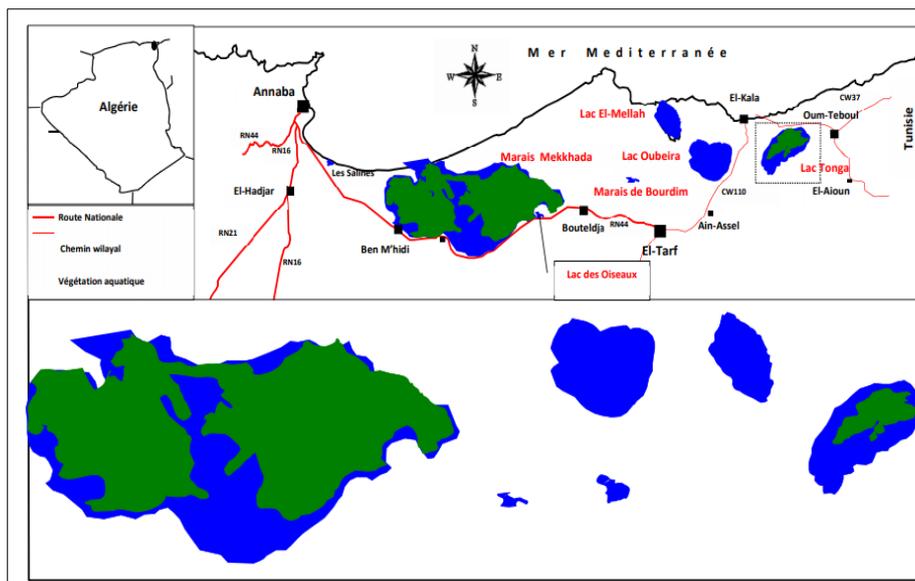


Figure 3.2: situation géographique du lac Tonga.



Figure 3.3: Le lac Tonga (Sortie du 06 juin 2021)

3.4. Où trouve-t-on Menthe aquatique.

Elle croît sur le bord des eaux, dans les lieux humides et marécageux. Menthe aquatique L. est une menthe vivace, à tiges tétraédriques, simples ou rameuses. Les feuilles sont ovales ou oblongues, couvertes sur les deux faces de poils assez nombreux. Les fleurs sont roses, disposées en glomérules peu nombreux, tous réunis en tête terminale et subglobuleuse (Figure 26). L'inflorescence est de forme capitée. La corolle est velue à l'intérieur et les fruits sont globuleux et verruqueux. Les comptages chromosomiques de cette espèce ont montré qu'elle était octoploïde soit $2n = 96$ (Harley et Brighton, 1977). Les travaux de Ruttle (1931) ont montré que l'espèce *M. aquatique* L. aurait donc une origine allopolyploïde.



Figure 3.4: Mentha-aquatica (Sortie du 06 juin 2021)

3.5. Protocole expérimental.

L'expérimentation a été réalisée au niveau du laboratoire de l'ENSMM Annaba. Après avoir ramené les échantillons de la menthe aquatique et des eaux polluées, on a utilisé des bocaux pour l'expérience.

Deux bocaux avec l'eau prélevée du milieu d'origine de la menthe aquatique, c'est les témoins. Et deux bocaux avec de l'eau polluée depuis le site mercuriel.



Figure 3.5: Protocole expérimental (le 07 juin 2021)

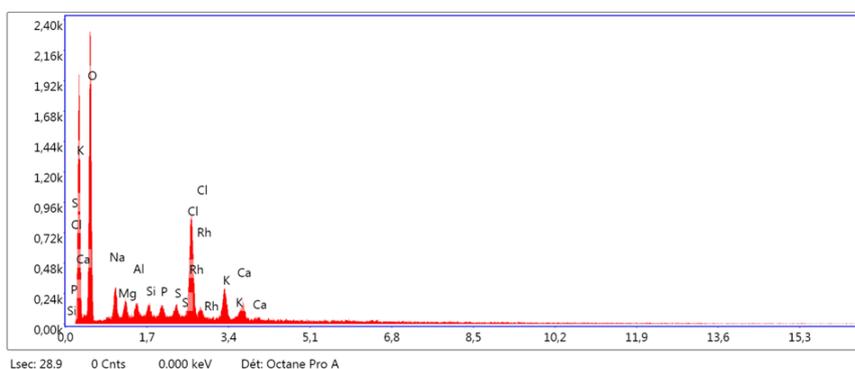
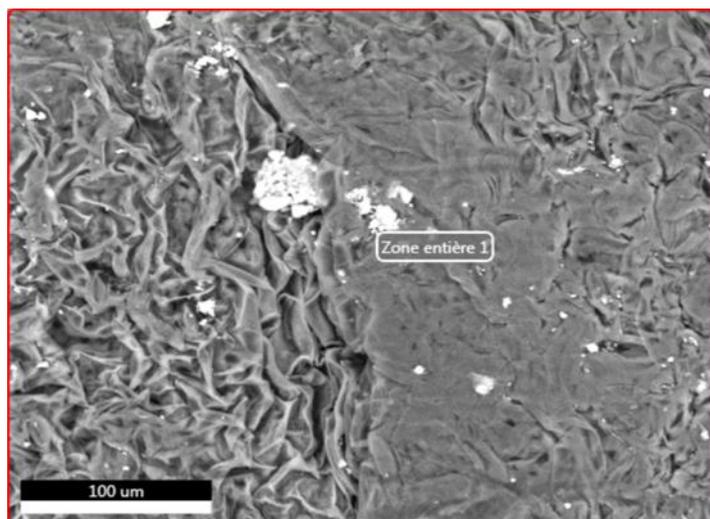
Nous avons laissé nos échantillons dans l'eau pendant une quinzaine de jours, et au cours du temps, nous avons constaté que l'eau polluée a commencé à changer de couleur, et elle est devenue plus claire.

Après la période d'expérimentation, nous avons cueilli des feuilles des plantes des milieux (naturel et pollué), nous les avons sécher, puis broyer, et à la fin nous les avons passé au microscope à balayage électronique.

3.6. Interprétation des résultats du MEB.

Après avoir utilisé le microscope à balaye électronique, nous avons pu obtenir l'imagerie suivante :

1- Première étape, la menthe aquatique mise depuis son milieu naturel.



Lsec: 28.9 0 Cnts 0.000 keV Dét: Octane Pro A

Elément	% de	%	Intensité	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	64.28	77.08	519.63	9.10	0.1807	1.0418	0.2699	1.0000
NaK	9.99	8.33	83.31	12.39	0.0193	0.9512	0.2023	1.0026
MgK	4.21	3.32	60.53	11.81	0.0107	0.9689	0.2623	1.0038
AlK	2.37	1.69	47.53	13.20	0.0079	0.9342	0.3562	1.0058
SiK	1.46	1.00	41.00	12.96	0.0067	0.9558	0.4732	1.0091
P K	1.40	0.87	40.00	13.93	0.0078	0.9190	0.5960	1.0139
S K	1.10	0.66	38.30	15.62	0.0074	0.9380	0.7030	1.0205
ClK	7.78	4.21	272.50	5.04	0.0555	0.8932	0.7898	1.0111
RhL	2.53	0.47	44.88	14.84	0.0203	0.7384	1.0880	1.0011
K K	3.00	1.47	95.62	8.31	0.0224	0.8906	0.8299	1.0121
CaK	1.88	0.90	54.37	10.94	0.0148	0.9076	0.8608	1.0110

Figure 3.6: a- Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans son milieu naturel (Zone 1) (le 24 juin 2021).

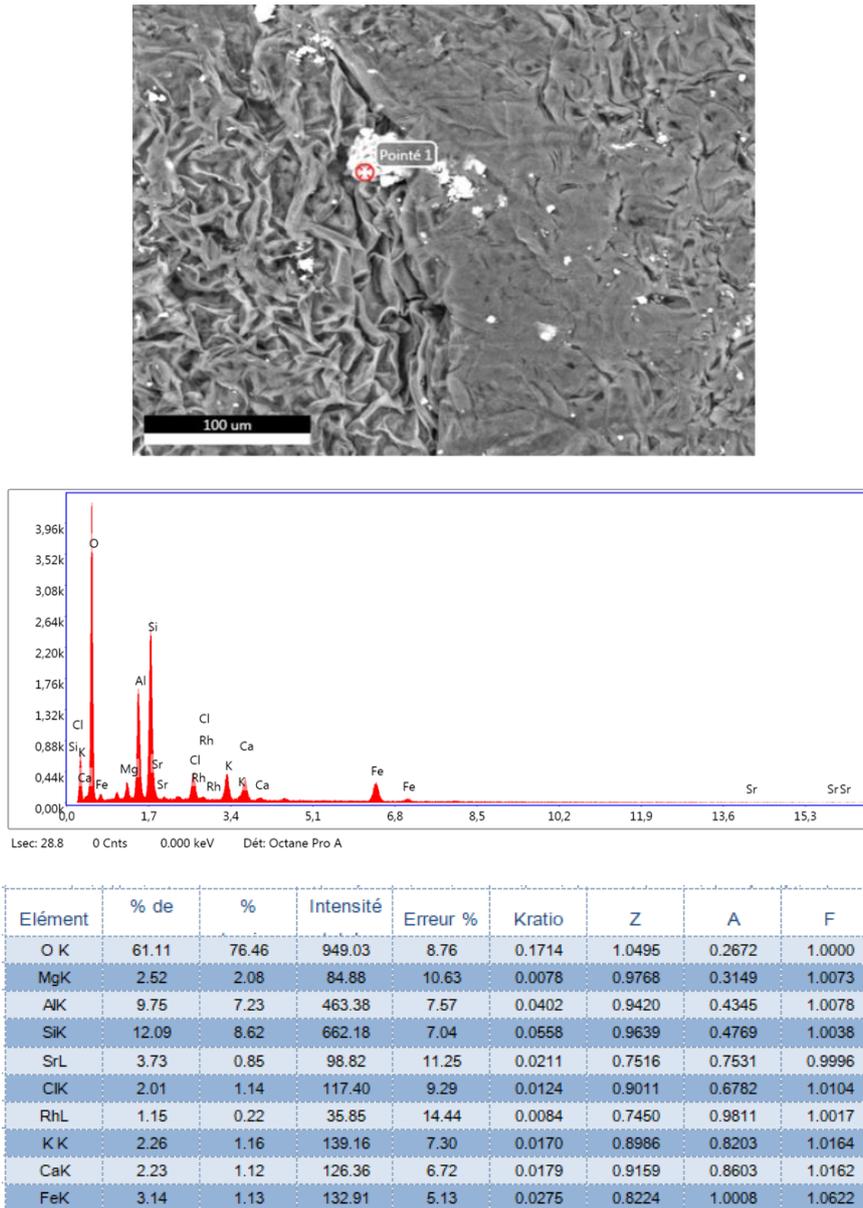


Figure 3.7 : b- Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans son milieu naturel (Zone 2) (le 24 juin 2021).

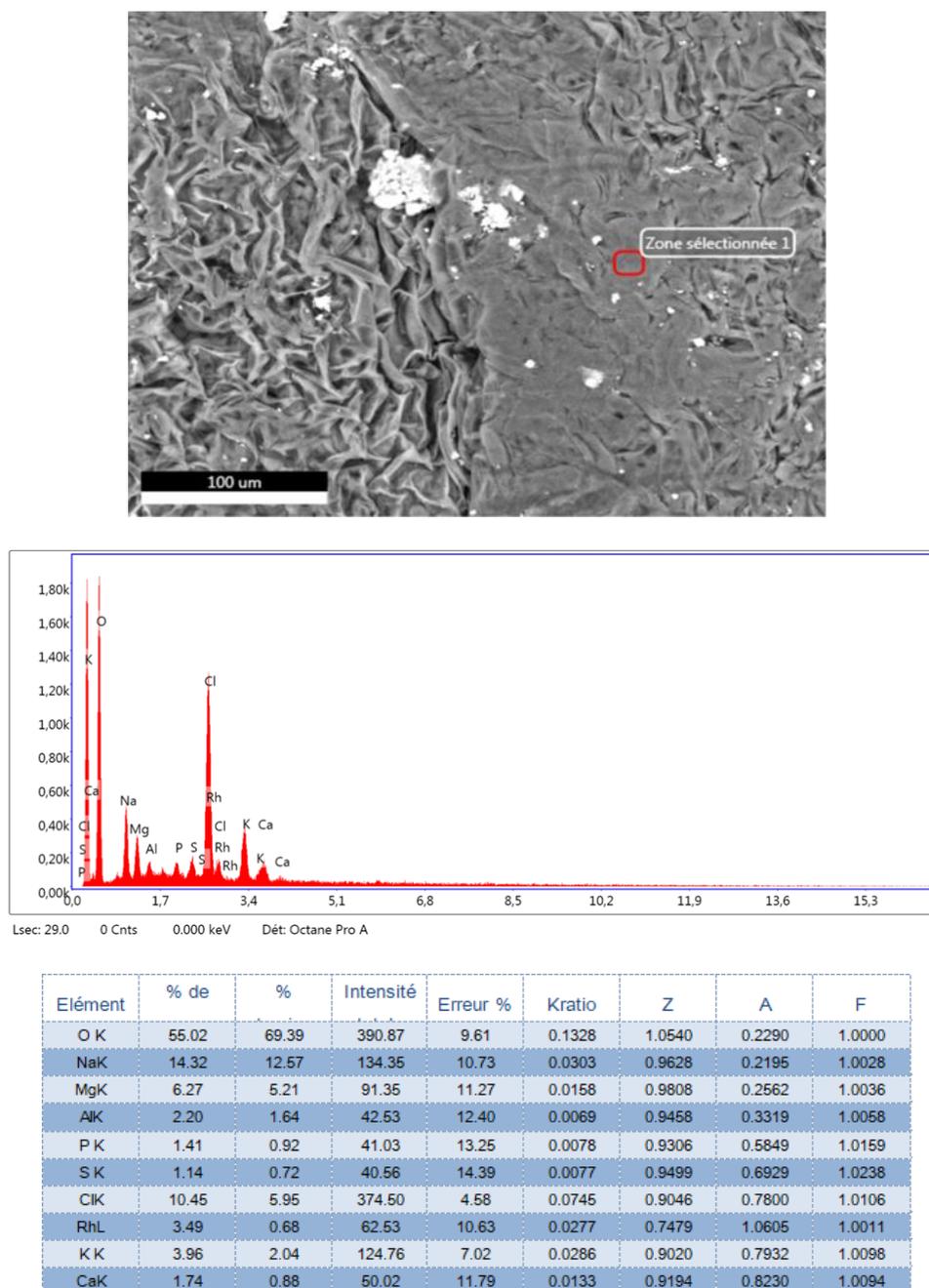


Figure 3.8 : c- Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans son milieu naturel (Zone 3) (le 24 juin 2021).

D'après les résultats obtenus du MEB, nous avons trouvé déceler la présence des éléments majeurs tels que : Ca, Na et autres, leur présence est naturelle dans les eaux et les sédiments.

Alors que pour la présence de l'élément (Rh) radium, qui est dispersé dans l'environnement et peut être retrouvé dans les biotopes aquatiques où il s'accumule notamment dans les sédiments des mares, lacs et cours d'eau. (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Rhodium>)

La présence de fer est expliquée par la présence de tels éléments, par l'existence d'une ancienne fonderie de plomb argentifère provenant de l'ancienne mine du Kef Oum Tboul datant de 1856.

Malheureusement malgré la préservation du Parc et l'administration du Parc avec ses agents on assiste toujours en observant ces rejets directs sans traitement ni même un simple lagunage. La carte suivante illustre la localisation des différents points de rejets :

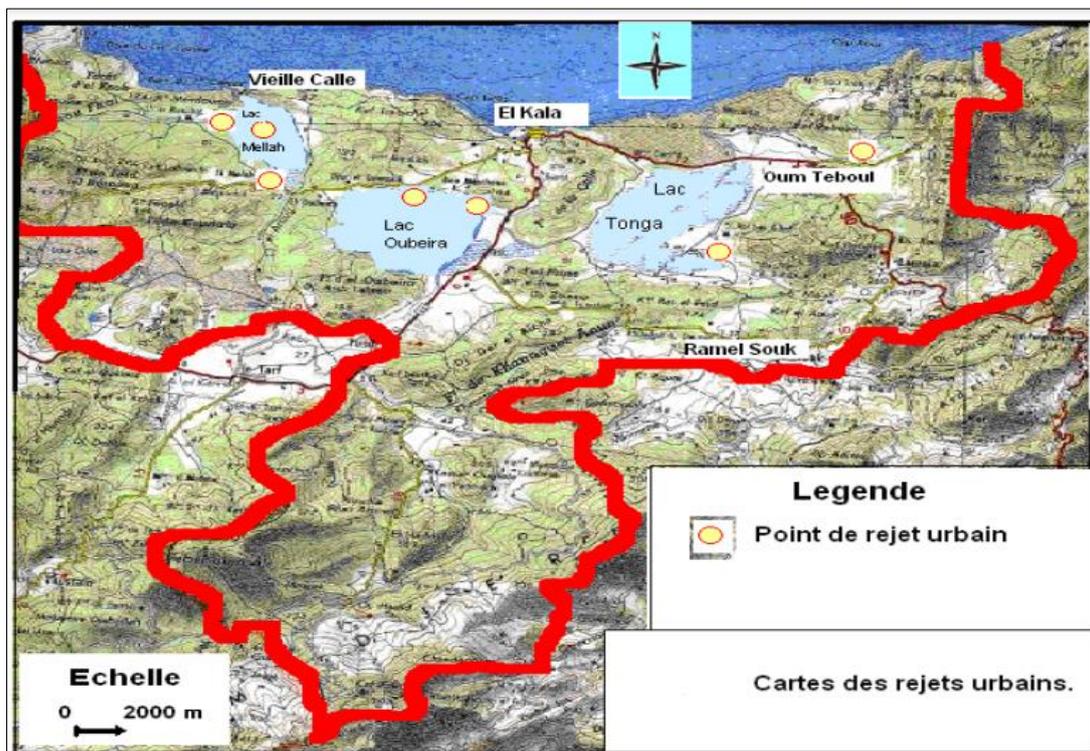
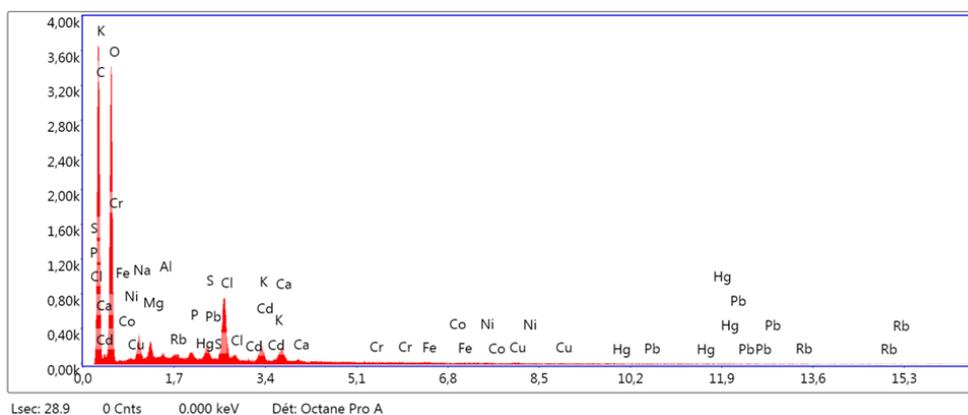
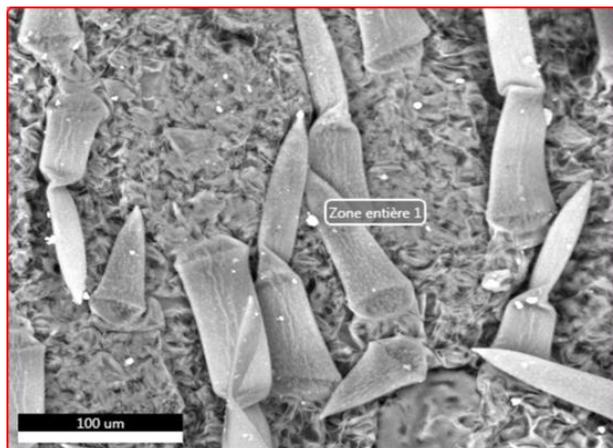


Figure 3.9 : Carte des rejets urbains dans les eaux des lacs (Bentouili Yassine, 2007).

Les rejets sont marqués par les déversements d'égouts très importants de toute une agglomération telle le village d'Oum Teboul directement dans le lac Tonga (Réserve de la biosphère). (Bentouili Yassine, 2007)

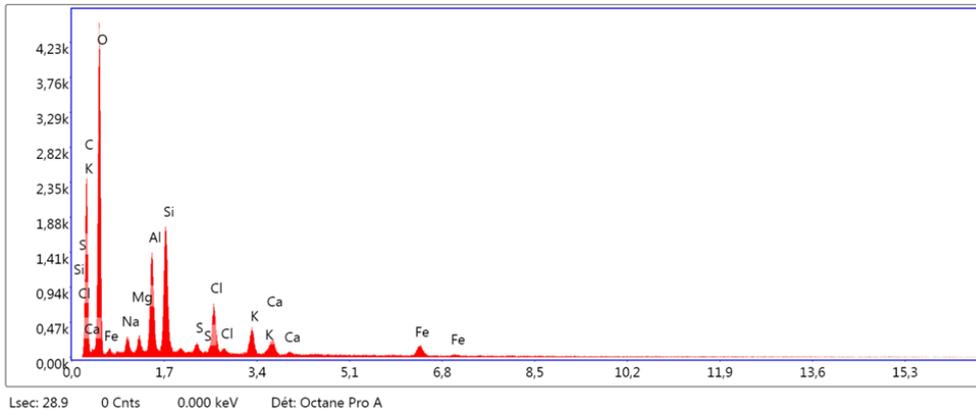
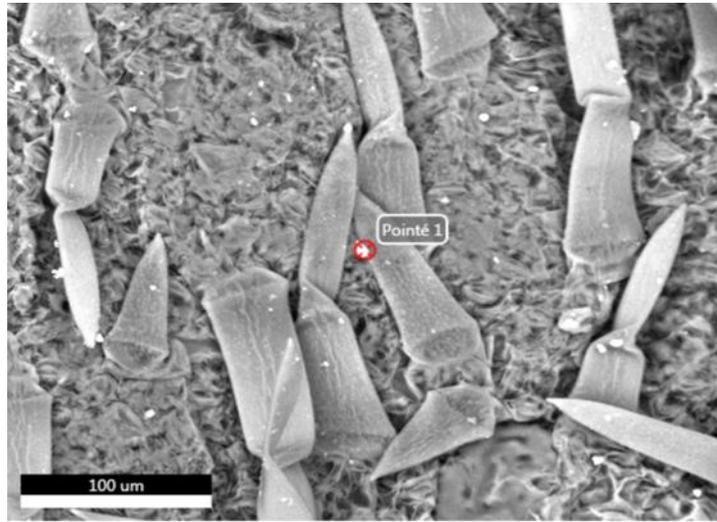
Deux points importants au niveau du lac Tonga, directs celui d'Oum Teboul et l'autre indirect à travers Oued El Hout celui de l'agglomération de Ramel Souk.

2- Deuxième partie, la menthe aquatique mise dans de l'eau polluée prélevée depuis le site mercuriel d'Ismail – Azzaba.



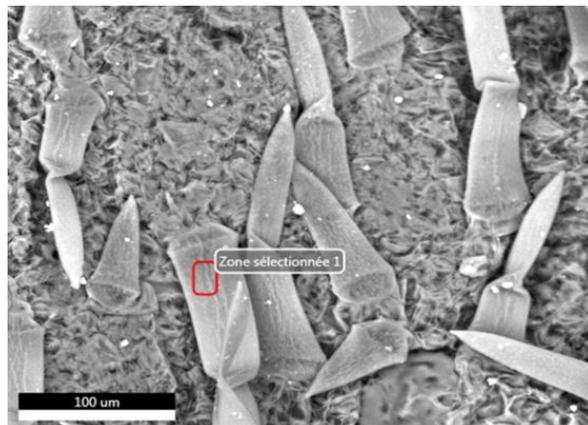
Elément	% de	%	Intensité	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	48.66	57.36	738.85	7.66	0.2053	1.0277	0.4104	1.0000
O K	44.17	39.09	722.60	10.31	0.0630	0.9863	0.1445	1.0000
NaK	2.64	1.62	94.46	11.66	0.0054	0.8988	0.2270	1.0014
MgK	0.99	0.57	71.00	10.66	0.0031	0.9149	0.3422	1.0023
AlK	0.25	0.13	26.93	15.97	0.0011	0.8818	0.4893	1.0040
RbL	0.23	0.04	15.71	15.40	0.0016	0.7037	1.0383	0.9995
P K	0.22	0.10	31.68	13.52	0.0015	0.8668	0.7820	1.0101
S K	0.31	0.13	51.38	9.88	0.0024	0.8845	0.8836	1.0147
ClK	1.52	0.61	250.51	3.45	0.0124	0.8420	0.9510	1.0152
CdL	0.02	0.00	1.80	82.73	0.0002	0.6744	1.3507	1.0003
K K	0.41	0.15	63.61	9.27	0.0036	0.8390	1.0136	1.0280
CaK	0.44	0.16	61.21	10.35	0.0040	0.8550	1.0312	1.0327
CrK	0.02	0.01	2.08	67.87	0.0002	0.7695	1.0506	1.1143
FeK	0.02	0.01	2.13	73.13	0.0002	0.7665	1.0476	1.1863
CoK	0.01	0.00	0.53	95.85	0.0001	0.7496	1.0449	1.2386
NiK	0.01	0.00	1.21	79.97	0.0001	0.7757	1.0421	1.2858
CuK	0.02	0.00	1.58	75.28	0.0002	0.7373	1.0389	1.3676
HgL	0.03	0.00	0.48	72.35	0.0002	0.5425	1.1059	1.0569
PbL	0.03	0.00	0.40	66.52	0.0002	0.5276	1.0958	1.0644

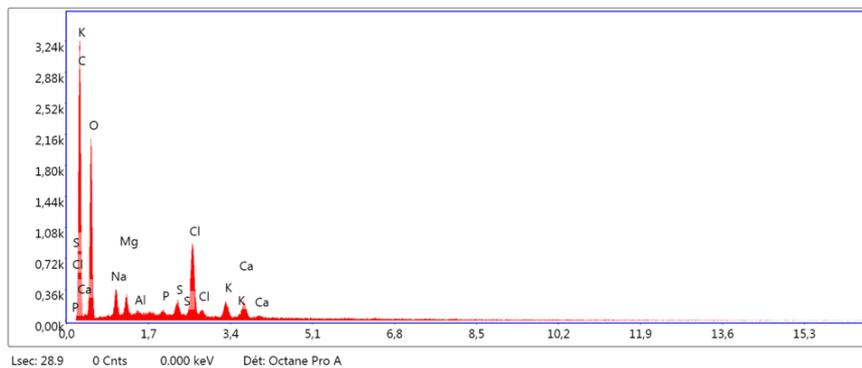
Figure 3. 10 : a. Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans de l'eau polluée (zone entière) (Le 24/06/2021)



Elément	% de	%	Intensité	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	38.66	48.17	491.59	8.93	0.1247	1.0373	0.3110	1.0000
O K	47.91	44.82	982.08	9.83	0.0781	0.9959	0.1638	1.0000
NaK	1.90	1.24	73.48	13.28	0.0038	0.9079	0.2211	1.0025
MgK	1.00	0.62	79.15	10.41	0.0031	0.9243	0.3395	1.0043
AlK	3.53	1.96	410.08	7.18	0.0153	0.8908	0.4853	1.0051
SiK	3.51	1.87	525.54	6.04	0.0190	0.9112	0.5927	1.0046
S K	0.23	0.11	38.57	17.91	0.0017	0.8937	0.7944	1.0118
ClK	1.33	0.56	223.70	4.45	0.0101	0.8508	0.8808	1.0136
K K	0.74	0.28	121.35	6.91	0.0063	0.8479	0.9750	1.0242
CaK	0.57	0.21	84.16	7.89	0.0051	0.8640	0.9984	1.0280
FeK	0.62	0.17	64.27	11.69	0.0056	0.7747	1.0406	1.1332

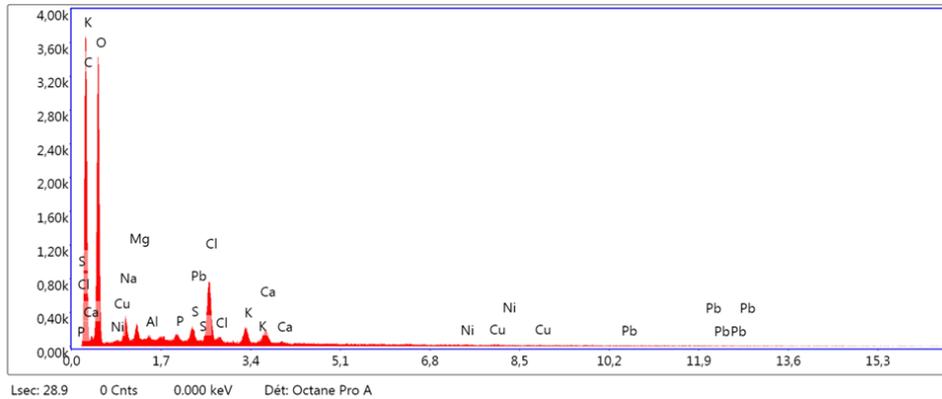
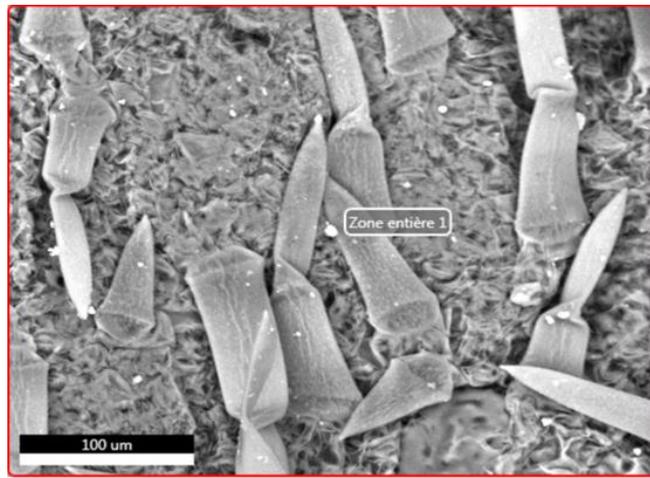
Figure 3. 11 : b. Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans de l'eau polluée (zone 1) (Le 24/06/2021)





Elément	% de	%	Intensité	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	54.23	63.23	655.63	7.87	0.2199	1.0264	0.3951	1.0000
O K	36.94	32.34	446.64	10.55	0.0470	0.9850	0.1292	1.0000
NaK	3.25	1.98	103.21	11.16	0.0071	0.8976	0.2430	1.0017
MgK	1.28	0.74	79.66	10.38	0.0042	0.9137	0.3577	1.0025
AlK	0.29	0.15	26.02	13.23	0.0013	0.8806	0.5028	1.0044
P K	0.23	0.11	28.50	17.72	0.0016	0.8656	0.7983	1.0121
S K	0.43	0.19	61.18	10.72	0.0035	0.8832	0.8974	1.0173
ClK	2.17	0.86	297.34	2.81	0.0178	0.8408	0.9605	1.0154
K K	0.54	0.19	68.63	9.37	0.0047	0.8379	1.0119	1.0278
CaK	0.63	0.22	71.25	7.71	0.0057	0.8538	1.0287	1.0303

Figure 3.12 : c. Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans de l'eau polluée (zone 2) (Le 24/06/2021)



Elément	% de	%	Intensité	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	48.63	57.20	739.89	7.59	0.2089	1.0270	0.4183	1.0000
O K	44.53	39.32	720.57	10.11	0.0638	0.9856	0.1454	1.0000
NaK	2.68	1.65	94.37	11.66	0.0055	0.8981	0.2268	1.0014
MgK	1.01	0.58	71.07	10.67	0.0031	0.9142	0.3416	1.0022
AlK	0.27	0.14	27.53	13.93	0.0011	0.8811	0.4884	1.0038
P K	0.22	0.10	31.48	13.95	0.0015	0.8661	0.7861	1.0103
S K	0.19	0.09	32.22	11.16	0.0015	0.8837	0.8879	1.0154
ClK	1.52	0.61	247.62	3.41	0.0124	0.8412	0.9565	1.0158
K K	0.43	0.15	64.86	9.37	0.0037	0.8383	1.0172	1.0290
CaK	0.45	0.16	61.32	10.89	0.0041	0.8542	1.0340	1.0336
NiK	0.02	0.00	1.35	78.21	0.0002	0.7750	1.0425	1.2960
CuK	0.02	0.01	1.80	72.06	0.0002	0.7366	1.0392	1.3798
PbL	0.04	0.00	0.51	63.79	0.0002	0.5270	1.0967	1.0646

Figure 3. 13 : d. Imagerie du MEB de la Menthe aquatique mise dans de l'eau polluée (zone 3) (Le 24/06/2021)

D'après l'imagerie obtenue après utilisation du microscope à balayage électronique, et d'après les résultats quantitatifs intelligents, on remarque la présence des éléments majeurs tels que, le calcium, magnésium, sodium et potassium (pour les cations), et les chlorures (pour les anions). Cette présence est confirmée par les valeurs de la conductivité électrique mesurée in situ au niveau des deux lagunes 01 et 02 (4700 µS/cm et 5006 µS/cm).

On remarque que les deux lagunes ont des valeurs maximales de la salinité (2.54 psu et 2.73

psu) ; l'origine de cette salinité est due à la présence des ions comme les chlorures ; les sulfates et le sodium dans les deux stations. Par contre les deux autres stations sont moins chargées par les sels traduisant une salinité ne dépassant pas 0.47 psu. (Mostefai, 2017) D'où la présence des sels minéraux dans les feuilles et tiges de la plante utilisée pour notre expérience.

La présence des éléments Al, Si, S, P, C, O après passage au MEB, montre le pouvoir dépolluant de la menthe aquatique, ce pouvoir a été observé lors de l'expérience menée, par l'épuration de l'eau polluée (changement de la couleur de l'eau) au fil des jours.

Nous avons constaté que le Mercure Hg se trouve en trace avec une erreur de 72,36%, ce qui dénote que la menthe aquatique ne peut pas absorber le mercure dilué dans un site.

A la lumière des résultats obtenus, on peut recommander ce qui suit :

- Préserver un site pollué (Site minier à titre d'exemple), avec la réalisation d'un projet pilote grandeur nature, pour tester les promesses de la Menthe aquatique en conditions réelles, dans la zone d'Ismail, qui est pollué par les métaux lourds, en raison du passé minier de la région.
- l'Utilisation de la phytovolatilisation, où la plante, toujours grâce aux micro-organismes présents autour de ses racines, absorbe certains polluants présents dans le sol (minéraux comme le sélénium ou le mercure, composés organiques légers comme le trichloroéthylène), ceux-ci passent dans la sève et sont évacués dans l'atmosphère, sous forme de gaz, au niveau des feuilles, soit tels quels (ils sont alors dégradés par les UV, comme c'est le cas pour le trichloroéthylène), soit sous forme modifiée, volatile et non toxique, ou en tout cas, moins toxique (mercure, sélénium méthylé).
- Par exemple, plusieurs variétés de tourbe se comportent en filtre de piégeage. Certaines permettent de fixer le mercure, d'autres le cuivre, le zinc et le plomb (<http://www.mediachimie.org/ressource/la-boue-et-le-roseau>).

L'arbuste endémique *Grevillea exul exul* est utilisé pour la re-végétalisation des sols miniers et s'avère être un hyper-accumulateur de plusieurs métaux <https://www.youtube.com/watch?v=s2023I5GI58> .

Conclusion générale.

Bien que le district mercuriel d'Azzaba est fermé depuis 2005, mais malheureusement aucune mesure de réhabilitation et de reconversion n'a été entreprise jusqu'à ce jour. Des millions des tonnes de stérile sont générés par l'extraction minière et entreposé anarchiquement à proximité de la mine d'Ismail. Des lacs d'eaux polluées sont formés par l'abondant des fosses.

Le complexe industriel, un danger physique est toujours présent, les installations et les équipements de traitements sont abandonnés et ils sont dans un état vétuste, les gouttelettes et les rejets sont éparpillés à la surface et sur le sol de l'usine, ils peuvent être une source de toxicité par le mercure.

Les teneurs maximales en Hg dans les eaux dans les bassins de décantation et dans les trois mines dépassent tous les seuils, alors, elles sont considérées comme source d'émission vers les eaux de l'Oued Fendek et Zebda. Ces derniers ainsi que les eaux souterraines sont les vecteurs de transport de pollution, les premiers impacts de la pollution ont été incarnés dans les compartiments des sols dans l'usine et les terrains agricoles environnants, les sédiments des lits des oueds cités et les eaux de surface et souterraines considérées aussi comme un évier emmagasinant les particules polluantes, consommées par la population à travers leurs différentes activités

Ce qui peut présenter un risque permanent sur la santé de la population en aval dans la plaine d'Azzaba. Cela est transmis à travers les sols agricoles tapissant la région, et les eaux de surface et souterraine utilisées pour l'irrigation et la consommation quotidienne, l'impact sur la santé humaine à Azzaba a été vérifié et prouvé par plusieurs études sanitaires.

Ce modeste travail m'a permis d'employer mes connaissances dans le domaine de génie minier plus spécifiquement dans le coté d'environnement. La réhabilitation joue un grand rôle dans la réalisation des projets miniers, et elle est considérée comme un facteur-clé pour toute stratégie de développement durable établie par une société minière.

D'après les études faites précédemment dans le site d'Ismail et même les autres sites mercuriels dans la région d'Azzaba, on met l'accent sur la nécessité de la réhabilitation du site. Selon la recherche menée, on a essayé de proposer la technique de la revégétalisation du site abandonné. On propose l'utilisation de la menthe aquatique pour son pouvoir dépolluant et pour le mercure d'autres méthodes peuvent être appliquées et la nécessite d'un essai pilote grandeur nature sur site doit être mis en place, pour pouvoir préserver ce site.

Références Bibliographies.

Abdelli Narimene, Guider Sanaa, kabtani Hafiza Chérine. 2019. la phéto-épuraton : étude comparative entre deux plantes capacité épuratrice. Mémoire de master. Université Badji Mokhtar Annaba.62p

Bakir F. & al., 1978. Methymercury poisoning in Iraqi children: clinical observations over two years. Br. Med J 1978; 1:6113613-616.

Biskri Zakaria, 2020. Projet de réhabilitation et reconversion du site de la mine abandonnée d'Ismail. (N-E de l'Algérie) .Mémoire de master. École nationale supérieur des mines et métallurgie.58p

Biskri Zakaria.brahm iness, 2020.Suivi de la pollution des eaux aux alentours d'une ancienne mine de mercure. Cas de la mine d'Ismail. (N-E de l'Algérie) .École nationale supérieur des mines et métallurgie.124p

Bentouili Yassine, 2007. Inventaire et Qualité des Eaux des Sources du Parc National d'El Kala (N.Est algérien). Mémoire de magister. Université Badji Mokhtar Annaba. 134p

Fournon Dominique, 1999. La phytoremédiation. Thèse de doctorat en pharmacie. Université Joseph Fourier Grenoble, France. 119

Kahoul, M., Alioua, A., Derbal, N., et Ayad, W., 2014. Comportement des micromycètes du sol vis-à-vis de la pollution au mercure dans la région d'Azzaba (Algérie). Journal of Materials and Environmental Science, 5 (5), 1470–1476.

Mostefai Abdelkader, 2017. Synthèse géophysique et étude hydrogéologique du site minier fermé du complexe d'Ismail, région de Azzaba. Mémoire d'Ingéniorat, ENSMM Annaba. 125p

Seklaoui M'hamed et al., 2015. Caractérisation de La Pollution Minière Dans Le District mercuriel D'Azzaba 4p.

Site internet :

<http://fr-fr.topographic-map.com>

<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at>

<Http://revues.imist.ma>

<https://www.ecohabitation.com>

<http://www.mediachimie.org/ressource/la-boue-et-le-roseau>

<https://www.youtube.com/watch?v=s2023I5G158>

Annexe 1. Tableau périodique des éléments chimiques

Tableau périodique des éléments chimiques

1																	18																																									
1																	He																																									
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																																								
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																																								
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																																								
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																																								
6	Cs	Ba	Lanthanoïdes		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																							
7	Fr	Ra	Actinoïdes		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og																																							
			<table border="1"> <tr> <td>Lanthanoïdes</td> <td>Cétones</td> <td>Practinoïdes</td> <td>Neptunoïdes</td> <td>Plutonioïdes</td> <td>Américains</td> <td>Curthoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> <td>Californoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> <td>Californoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> <td>Californoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> <td>Californoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> <td>Californoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> <td>Californoïdes</td> <td>Émilioïdes</td> </tr> <tr> <td>57-71</td> <td>89-103</td> </tr> </table>																Lanthanoïdes	Cétones	Practinoïdes	Neptunoïdes	Plutonioïdes	Américains	Curthoïdes	Émilioïdes	Californoïdes	Émilioïdes	57-71	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103										
Lanthanoïdes	Cétones	Practinoïdes	Neptunoïdes	Plutonioïdes	Américains	Curthoïdes	Émilioïdes	Californoïdes	Émilioïdes																																																	
57-71	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103	89-103																																							

Métaux : Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanoïdes, Actinoïdes, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaux lourds, Aluminosilicates, Halogènes, Gaz nobles, Non classés, Synthétique