



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

# *Mémoire de Fin d'Etudes*

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master**

**Filière : Génie Minier**

**Option : Valorisation des Ressources Minérales**

**Présenté par :**

**Atmani Chanez**

**Cherifi Sabine**

**Thème**

**Analyse et caractérisation des retombées climatiques issues  
de l'exploitation du mineraï de fer mine Boukhadra  
contamination par métaux lourds**

Soutenu le 08 / 07 /2024 devant le jury composé de :

Président	Z.Souici	M.C.A	U.A.M.Beaia
Encadrant	Mme kamli .O	M.C.B	U.A.M.Beaia
Co-encadrant	Mme Ait Wakli.N	Chercheur CRAPC	U.A.M.Beaia
Examinateur	A.Akdim	M.A.A	U.A.M.Beaia

*Promotion : 2023-2024*



## Dedicaces

*Je dedie ce travail à :*

*À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices sans fin. Vous m'avez enseigné la valeur du travail acharné, de la persévérance et de la foi en mes capacités. Votre encouragement constant a été ma source de force et de motivation tout au long de ce parcours.*

*A la plus extraordinaire des sœurs, tes encouragements sincères et ta compréhension ont été mes piliers durant ce mémoire, ta présence a rendu ce travail plus significatif.*

*A la mémoire de ma grand mère et de ma tente HASSINA que dieu préserve leur âmes dans son vaste paradis, malgré Votre absence physique qui est profondément ressentie, votre influence continue à m'inspirer.*

*a ma très cher binôme CHÉRIFI Sabine*

*Et enfin merci à tous mes proches et ma famille*

*Ce travail porte l'empreinte de nombreuses mains et de nombreuses âmes bienveillantes qui ont rendu possible cette réalisation*

*Chanez.*



## *Je dédie ce mémoire :*

*À mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments et Mon éternelle gratitude, pour leur patience illimitée, leurs encouragements continus et leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.*

*À mes frères : Amine, Fares, Rabah, Fateh , Razik.*

*À mes sœurs : Salîha et Sabrina*

*À mes amies et amis exceptionnellement.*

*À toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment.*

*À ma précieuse binôme Chanez.*

*Sabine.*



## **REMERCIEMENTS**

*Avant tout, nous remercions Allah de nous avoir données le courage, la patience et la volonté d'achever ce travail.*

*Nous tenons également à remercier notre promotrice Mme KAMLI .O*

*Notre Co promotrice Mme AIT WAKLI .N pour ses conseils et son écoute sans failles, et Mme SUICI d'avoir accepté de présider ce jury et sa précieuse aide et contribution à la réalisation de ce travail ainsi que M .AKDIM d'avoir accepté d'examiner ce travail afin de renforcer la rigueur scientifique de ce mémoire.*

*Et aussi, YAHIAOUI Khawla et YOUSFI Feriel de nous avoir permis de nous référer à leurs travail*

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes dont les contributions, directes ou indirectes, ont enrichi ce mémoire, Sans oublier l'équipe de plateau technique d'analyse physico-chimique.

Merci sincèrement à tous ceux qui ont rendu cette réalisation possible.

## Résumé

La présente étude vise à analyser et à caractériser les retombées climatiques associées à l'exploitation du minerai de fer de la mine de Boukhadra, en mettant particulièrement l'accent sur la contamination par les métaux lourds. L'exploitation minière engendre des impacts environnementaux notables, notamment à travers la dispersion des poussières et la pollution des sols et des eaux. Afin d'évaluer ces impacts, nous avons mené une étude approfondie basée sur une série d'analyses minéralogiques et chimiques avancées.

La première étape de cette étude a consisté à effectuer un échantillonnage systématique des sols, des plantes et des poussières aux abords de la mine. Ces échantillons ont ensuite été analysés à l'aide de différentes techniques : la diffraction des rayons X (DRX) pour identifier les phases minérales présentes, la fluorescence X (FRX) pour déterminer la composition chimique des éléments, la spectrométrie d'absorption atomique (SAA) et l'attaque triacide pour quantifier les concentrations en métaux lourds, ainsi que la spectroscopie UV-Visible pour évaluer les niveaux de contamination et leur évolution dans l'environnement.

Les résultats obtenus révèlent une contamination significative de la zone d'étude. Les analyses ont mis en évidence des concentrations élevées de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ainsi que d'autres oxydes métalliques, indiquant une pollution importante des sols et des végétaux environnants. La dispersion des poussières riches en métaux lourds par le vent et le ruissellement contribue à la dégradation des sols et à la contamination des ressources hydriques locales. L'étude des particules fines (PM10 et PM2.5) a montré des niveaux largement supérieurs aux seuils réglementaires, posant ainsi un risque sanitaire pour les populations exposées.

Ces résultats soulignent l'urgence de mettre en place des mesures d'atténuation afin de réduire les effets de cette pollution. Il est nécessaire d'adopter des stratégies de gestion environnementale rigoureuses, telles que la stabilisation des poussières, le suivi de la qualité des sols et des eaux, ainsi que la réhabilitation des zones affectées. En conclusion, cette étude montre clairement que la qualité des sols, de l'eau et de l'air est impactée, avec des concentrations de métaux lourds dépassant les normes environnementales, et met en lumière l'importance d'une exploitation plus durable et mieux encadrée des ressources minières afin de minimiser les impacts environnementaux et sanitaires.

**Mots-clés :** Mine de Boukhadra, exploitation minière, pollution, métaux lourds, contamination environnementale, analyses minéralogiques, gestion durable.

## Abstract

The present study aims to analyze and characterize the climatic fallout associated with the exploitation of iron ore at the Boukhadra mine, with a particular focus on heavy metal contamination. Mining activities generate significant environmental impacts, notably through dust dispersion and the pollution of soils and water bodies. To assess these impacts, we conducted an in-depth study based on a series of advanced mineralogical and chemical analyses.

The first step of this study involved systematic sampling of soils, plants, and dust around the mine. These samples were then analyzed using various techniques: X-ray diffraction (XRD) to identify the mineral phases present, X-ray fluorescence (XRF) to determine the chemical composition of the elements, atomic absorption spectrometry (AAS) and triacid digestion to quantify heavy metal concentrations, as well as UV-Visible spectroscopy to assess contamination levels and their evolution in the environment.

The results obtained reveal significant contamination in the study area. Analyses have highlighted high concentrations of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, as well as other metallic oxides, indicating substantial pollution of surrounding soils and vegetation. The dispersion of heavy metal-rich dust by wind and runoff contributes to soil degradation and the contamination of local water resources. The study of fine particulate matter (PM10 and PM2.5) showed levels well above regulatory thresholds, posing a health risk to exposed populations.

In conclusion, this study has highlighted the extent of contamination in the study area, confirming that iron ore mining at Boukhadra significantly affects the local environment. The results clearly show that the quality of soil, water, and air is impacted, with heavy metal concentrations exceeding environmental standards. These findings underscore the urgency of implementing mitigation measures to reduce the effects of this pollution. It is necessary to adopt rigorous environmental management strategies, such as dust stabilization, monitoring of soil and water quality, and rehabilitation of affected areas. Ultimately, this study underscores the importance of more sustainable and better-regulated mining practices to minimize environmental and health impacts.

**Keywords :** Boukhadra mine, mining exploitation, pollution, heavy metals, environmental contamination, mineralogical analysis, sustainable management.

## Sommaire

Liste des tableaux .....	I
Liste des figures .....	III
Liste des abréviations .....	V
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I : Généralité et présentation du site**

I.1. Introduction.....	2
I.2. Historique du site .....	2
I.3.Géologie locale du site.....	3
I.3.1. Stratigraphie .....	3
I.3.1.2. Le Crétacé .....	4
I.3.1.3. Le Tertiaire .....	4
I.3.1.4. Quaternaire .....	4
I.3.2. Tectonique .....	5
I.3.3. Géomorphologie.....	5
I.4. Topographie du site.....	7
I.5. Fond géochimique du gisement de fer Boukhadra .....	7
I.6.Cycle de vie d'une mine .....	8
I.7.Principe d'une mine à ciel ouvert .....	8
I.8.Les étapes d'exploitation d'une mine à ciel ouvert .....	9
I.9. Impacts environnementaux engendré par l'activité minière.....	10
I.9.1. Définition de l'environnement .....	10
I.9.2. Impacts engendré par l'exploitation minière.....	10
I.9.2.1. Destruction des écosystèmes .....	10
I.9.2.2. Dégradation des sols .....	10
I.9.2.3. Pollution de l'eau et de l'air .....	10
I.9.2.4. Production de déchets toxiques .....	10
I.9.2.5. Libération de gaz à effet de serre.....	10
I.9.3.Les impacts potentiels d'une mine à ciel ouvert .....	11
I.10. Définition des métaux lourds.....	11

I.10.1. Contaminations des métaux lourds dans la mine de fer.....	12
I.10.1.1. Contamination des sols.....	12
I.10.1.2. Contamination de l'eau .....	12
I.10.1.3. Contamination de l'air .....	13
I.11. Définition des retombées climatiques des poussières .....	13
I.11.1. Effets des retombées climatiques des poussières .....	14
I.11.1.1. Réchauffement climatique .....	14
I.11.1.2. Altération des écosystèmes.....	14
I.11.1.3. Santé humaine.....	14
I.12. Généralités sur les poussières .....	15
I.12.1. Définition .....	15
I.12.2. Méthodes de caractérisations des poussières.....	15
I.12.2.1. Etude granulométrique .....	15
I.12.2.2. Etude physico-chimique .....	16
I.12.3. Ressources d'émission de poussières suivant le cycle d'exploitation .....	16
I.12.3.1. Phénomènes naturels .....	16
I.12.3.2. Activités minières .....	17
I.12.4. Paramètres utilisés pour la caractérisation des poussières .....	19
I.12.4.1. Paramètres quantitatifs .....	19
I.12.4.2. Paramètres qualitatifs .....	20
I.12.5. Taux de déposition .....	20
I.13. Cadre réglementaire .....	22
I.13.1. loi sur les métaux lourds.....	22
I.14. Conclusion .....	23

## **Chapitre II : Echantillonnage et méthodes d'analyses**

II.1. Introduction .....	24
II.2. L'échantillonnage.....	24
II.2.1. Définition .....	24
II.2.1.1. Échantillon .....	24
II.2.1.2. Teneur.....	24
II.2.1.3. Minerai .....	24
II.2.1.4. L'échantillonnage.....	24

---

II.2.2. Types d'échantillons.....	24
II.2.2.1. Echantillon ponctuel.....	24
II.2.2.2. Echantillon composite .....	25
II.2.2.3. L'échantillonnage systématique.....	25
II.2.3. Préparation des échantillons reçus .....	26
II.2.3.1.Quartage .....	26
II.2.3.2. Minerai et stérile.....	26
II.2.3.3. Concassage .....	28
II.2.3.4. Broyage .....	28
II.2.3.5. Tamisage .....	29
II.2.3.6. Séchage de nos échantillons de poussières.....	30
II.3. Méthodes d'analyse .....	31
II.3.1. DIFRACTION PAR RAYONS X (DRX) .....	31
II.3.1.1. PRINCIPE D'ANALYSE .....	31
II.3.1.2. Conditions d'analyse .....	32
II.3.2. Fluorescence X (FX).....	33
II.3.2.1. Principe de l'analyse .....	33
II.3.3. la spectrométrie d'absorption atomique (SAA) .....	33
II.3.4. Attaque Triacide.....	34
III.3.4.1 Détermination des compositions chimiques des poudres étudie.....	34
III.3.4.2 La mise en solution par attaque triacide.....	34
III.3.4.3 Méthodes d'analyse des éléments chimiques.....	36
II.4. Conclusion .....	38

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1. Introduction .....	40
III.2. Présentation et interprétation des résultats d'analyse obtenus par la diffraction des rayons X .....	40
III.2.1.présentation des résultats DRX.....	40
III.2.2. Interprétation des résultats DRX .....	54
III.3. Présentation et interprétation des résultats d'analyse obtenus par la spectrométrie de fluorescence X.....	56
III.3.1.présentation des résultats de l'analyse FRX .....	56
III.3.2. Interprétation de l'analyse FRX .....	63

III.4. Présentation et interprétation des résultats d'analyse obtenus par la spectrométrie d'absorption atomique.....	64
III.4.1.Dosage de la silice SiO <sub>2</sub> solubilisée (dans le filtrat) par colorimétrie (UV) .....	65
III.4.2.Calcul des teneurs globales de SiO <sub>2</sub> dans les poudres étudié .....	68
III .4.3.Dosage colorimétrique (UV) d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	69
III.4.3.1.Principe .....	69
III.4.3.2 Mode opératoire .....	69
III.4.3.3.Calcul des teneurs d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en % des échantillons .....	71
III .4.4. Dosage de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) .....	73
III .4.5.Interprétations .....	76
II.5. Conclusion .....	78
Conclusion générale .....	79

**Références bibliographiques.**

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Taux de déposition 2010 des poussières au niveau des stations P1 à P6 de la mine Raglan (compilation d'après Xstrata Nickel, 2011).....	20
<b>Tableau I.2</b> : résultats des analyses de poussières effectuées par la Station de Surveillance de l'environnement d'Annaba aux Mines de fer de l'est MFE Spa Mine de Boukhadra. 02/06/2021.....	21
<b>Tableau I.3</b> : résultats des analyses de poussières effectuées par la Station de Surveillance de l'Environnement d'Annaba aux Mines de fer de l'est MFE Spa Mine de Boukhadra. 15/03/2021.....	22
<b>Tableau III.01</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon minerai de fer .....	40
<b>Tableau III.02</b> : caractérisation minéralogique de l'échantillon stérile .....	41
<b>Tableau III.03</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon S.1030.....	42
<b>Tableau III.04</b> : caractérisation minéralogique de l'échantillon S. ....	42
<b>Tableau III.05</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon S. E3 .....	44
<b>Tableau III. 06</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon S. O2.....	45
<b>Tableau III.07</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon S. O3.....	45
<b>Tableau III.08</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon S.S2 .....	46
<b>Tableau III. 09</b> : caractérisation minéralogique de l'échantillon S.S3 .....	47
<b>Tableau III. 10</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon Poussière concasseur in....	47
<b>Tableau III.11</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon poussière 1030.....	48
<b>Tableau III.12</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon poussière 2000.....	49
<b>Tableau III. 13</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon poussière 1000.....	49
<b>Tableau III. 14</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. 1030.....	50
<b>Tableau III. 15</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. S2 .....	51
<b>Tableau III. 16</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. S3 .....	52
<b>Tableau III. 17</b> : caractérisation minéralogique de l'échantillon P.O2.....	52
<b>Tableau III. 18</b> : Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. O3.....	53
<b>Tableau III.19</b> : résultat d'analyse de la SAA .....	64
<b>Tableau III.21</b> : Série des solutions étale de Si <sup>4+</sup> .....	67
<b>Tableau III.22</b> : Série des solutions étalons Si <sup>4+</sup> après l'ajout des réactifs.....	67
<b>Tableau III.23</b> : Variation des absorbances en fonction des concentrations de Si <sup>4+</sup> a 420 nm .....	67
<b>Tableau III.24</b> : Préparation des solutions filles d'Al+3 .....	70
<b>Tableau III.25</b> : Solutions étalons de Al <sup>3+</sup> après l'ajout des réactifs .....	70



<b>Tableau III.26</b> : Absorbances en fonction des concentrations des étalons de Al <sup>3+</sup> à 530 nm	71
<b>Tableau III .27</b> : Les résultats obtenus des compositions chimiques des échantillons après le calcul des compositions en oxydes.....	75

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1 :</b> la mine de Boukhadra.....	3
<b>Figure I.2 :</b> Carte géologique de la mine de Boukhadra (Dubourdieu, 1956).....	5
<b>Figure I.3 :</b> Colonne stratigraphique du Djebel Boukhadra. ....	6
<b>Figure I.4 :</b> Plan topographique du gisement de Boukhadra. ....	7
<b>Figure I.5 :</b> schéma de Déroulement d'une opération minière (tiré d'Artignan, 2003). .....	8
<b>Figure I.6 :</b> Composantes d'une mine à ciel ouvert. ....	9
<b>Figure I.7 :</b> Principales étapes d'exploitation d'une mine à ciel ouvert. ....	9
<b>Figure I.9 :</b> Représentation du phénomène d'érosion éolienne (tiré de Roose, 1994).....	17
<b>Figure I.10 :</b> illustration d'une de zone de transfert entraînant l'émission de poussières (tiré d'Ansart, 2007).....	18
<b>Figure I.11 :</b> graphique circulaire de l'importance relative des différentes sources d'émissions de poussières diffuses lors de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert (tiré de Chartier et Lansiart, 2004). .....	19
<b>Figure II.1 :</b> schéma du Protocole De Présentation Du Minerai et Stérile De Boukhadra.....	27
<b>Figure II.2 :</b> image du Concasseur à mâchoire de laboratoire. ....	28
<b>Figure II.3 :</b> image d'un broyeur à billes. ....	29
<b>Figure II.4 :</b> image d'un Mortier. ....	29
<b>Figure II.5 :</b> illustration de la Préparation des échantillons de sol.....	30
<b>Figure II.6 :</b> image Appareil PANalytical. ....	32
<b>Figure II.7 :</b> image Spectromètre d'absorption atomique. ....	34
<b>Figure II.8 :</b> image de la Pesée d'un échantillon de 0,5 g à l'aide d'une balance de précision. ....	35
<b>Figure II.9 :</b> image de la Préparation des acides pour la méthode d'attaque triacide sous hotte aspirante. ....	35
<b>Figure II.10 :</b> image du Chauffage de l'échantillon après ajout des acides. ....	35
<b>Figure II.11 :</b> image de la filtration du mélange obtenu dans une fiole. ....	36
<b>Figure II.12 :</b> illustration du principe de fonctionnement d'un spectromètre d'absorption UV visible .....	37
<b>Figure III.1 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon minerai de fer. ....	41
<b>Figure III.2 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon de stérile .....	41
<b>Figure III.3 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon S. 1030 in .....	42
<b>Figure III.4:</b> Le diffractogramme DRX de l'échantillon N1 .....	44
<b>Figure III.5:</b> Le diffractogramme DRX de l'échantillon E3 .....	44
<b>Figure III.6 :</b> Le diffractogramme par rayons X de l'échantillon S.O2 out.....	45

<b>Figure III.7:</b> Le diffractogramme de l'échantillon S.O3 out .....	46
<b>Figure III.8 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon S.S2 out .....	46
<b>Figure III.9 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon S.S3 out .....	47
<b>Figure III. 10 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon poussière .concasseur in .....	48
<b>Figure III.11:</b> Le diffractogramme de l'échantillon poussière 1030 in .....	48
<b>Figure III .12 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon poussière 2000 out .....	49
<b>Figure III.13 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon poussieres .1000 out .....	50
<b>Figure III. 14 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon P.1030 in .....	50
<b>Figure III. 15 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon P.S2 out .....	51
<b>Figure III. 16 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon P.S3 out .....	52
<b>Figure III. 17 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon P.O2 out .....	53
<b>Figure III. 18 :</b> Le diffractogramme de l'échantillon P.O3 out .....	53
<b>Figure III.19 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon mineraï de fer.....	56
<b>Figure III.20 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon de stérile. ....	57
<b>Figure III.21 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.1030 in.....	57
<b>Figure III.22 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.N1 out.....	58
<b>Figure III.23:</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.E3 out .....	58
<b>Figure III.24 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.O2 out.....	59
<b>Figure III.25 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.O3 out.....	59
<b>Figure III.26 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.S2 out .....	60
<b>Figure III.27 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.S3 out .....	60
<b>Figure III.28:</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussière concasseur in .....	61
<b>Figure III.29 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussière 1030 in.....	61
<b>Figure III.30 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussieres2000 out. ....	62
<b>Figure III.32 :</b> Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussières 1000 out... .	62
<b>Figure III.32 :</b> Les courbes d'étalonnage des éléments Si, Al et Fe. ....	75
<b>Figure III.33 :</b> Carte de zonage des dangers de la mine de Boukhedra. ....	77

## LISTE DES ABREVIATIONS

**Da** : diamètre aérodynamique Unité de masse atomique utilisée pour indiquer la masse d'atomes et de molécules

**GES** : Gaz à Effet de Serre (GES) : Les gaz dans l'atmosphère terrestre qui piègent la chaleur, contribuant ainsi au réchauffement climatique. Les principaux GES incluent le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$  ), le méthane ( $\text{CH}_4$  ), et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

**CCS** : Capture et Stockage de Carbone (CCS)

**Pa** : Pascal (Pa) : Unité de mesure de la pression dans le Système international d'unités (SI).

**PMx** : Particulate Matter (PM) : Particules fines en suspension dans l'air qui peuvent être inhalées et causer des problèmes de santé.

---

## *Introduction générale*

---

## Introduction générale

L'exploitation des ressources minérales représente une composante essentielle du développement industriel et économique. Cependant, cette activité entraîne des conséquences environnementales notables, notamment en termes de pollution et de dégradation des écosystèmes. Le gisement de minerai de fer de Boukhadra, situé à l'est des Aurès en Algérie, est l'un des sites miniers dont l'exploitation à ciel ouvert pose des défis significatifs en matière de gestion environnementale. [1]

Ce mémoire se concentre sur l'analyse et la caractérisation des retombées climatiques issues de l'exploitation du minerai de fer à Boukhadra, avec un accent particulier sur la contamination par les métaux lourds. L'objectif principal est d'évaluer l'impact environnemental de l'activité minière, en prenant en compte la dispersion des poussières et leur contribution à la pollution de l'air, des sols et des eaux. [2]

La structure géologique complexe du massif de Boukhadra, caractérisée par une anticlinale et des formations du Mésozoïque et du Tertiaire, constitue un cadre unique pour l'étude des interactions entre l'exploitation minière et l'environnement. En outre, l'analyse des échantillons de sols, de plantes et de poussières prélevés autour de la mine permet de mieux comprendre les mécanismes de contamination et les risques associés pour la santé humaine et les écosystèmes. [3,4]

Dans le premier chapitre, nous discutent sur une revue de la littérature sur les impacts environnementaux des mines à ciel ouvert, une description détaillée de la géologie et de la topographie de la région de Boukhadra.

Le deuxième chapitre est consacré d'une présentation des méthodes d'analyse minéralogique, chimique et spectroscopique utilisées pour caractériser les échantillons.

Le troisième chapitre aborde la caractérisation physico-chimique du minerai et des rejets de traitement. Ce chapitre détaille également le programme mis en œuvre tout au long de ce travail.

Ce mémoire se conclut par une conclusion générale qui synthétise et résume les principaux points abordés.

---

*CHAPITRE I*

*GENERALITES ET*

*PRESNTATION*

*DU SITE*

---

## I.1. Introduction

La mine de Boukhadra, représente un site d'importance historique et géologique considérable. Cette mine a joué un rôle crucial dans l'industrie minière algérienne, notamment pour l'extraction du minerai de fer. Ce chapitre explore l'historique du site, la géologie locale, la stratigraphie, la tectonique, et la topographie de la région, tout en mettant en lumière les impacts environnementaux engendrés par l'activité minière. La compréhension de ces aspects est essentielle pour appréhender les défis liés à l'exploitation du minerai de fer de Boukhadra et pour envisager des solutions durables pour minimiser son impact sur l'environnement.

## I.2. Historique du site :

La mine de Boukhadra, située dans la wilaya de Tébessa, a une riche histoire étroitement liée à l'exploitation du fer ; les Romains exploitaient initialement le cuivre dans la région avant de passer à l'exploitation du zinc et d'autres poly métaux. La mine de fer du Djebel Boukhadra a été découverte en 1878 par l'ingénieur français Tissot et est devenue opérationnelle en 1905. La concession Mokta El Hadid a vu l'exploitation du minerai de fer entre 1903 et 1906, marquant ainsi le début du développement industriel du site. Des personnalités historiques telles qu'Ibn Khaldoun et le géographe Al Idrissi ont déjà mentionné des gisements de minerai de fer dans la région. [1,2]

Le gisement de BOUKHADRA a été exploité par la société OUENZA de 1926 jusqu'à la nationalisation des mines en 1966. Cette dernière a été systématiquement étudiée à travers des travaux miniers et l'investigation des gisements de BOUKHADRA. [3]

De 1967 à 1984, la SONAREM était chargée de l'exploitation et de la recherche des gisements de minerai de fer d'OUENZA et de BOUKHADRA. [3]

Après la réorganisation de l'entreprise (1983 - 1984), FERPHOS était chargée de la gestion, du développement et de la recherche sur tous les gisements de minerai de fer existants sur le territoire national. [3]

Dans le cadre de la coopération avec des sociétés étrangères depuis le 18 octobre 2001, HOLDING L.N.M.N.V. ARCELORMITTAL a signé aujourd'hui un accord de partenariat avec HADID OUENZA - BOUKHADRA filiale FERPHOS, détenant pour la première fois une participation de 70%. [3, 4]

Les études universitaires récentes se sont concentrées sur divers aspects de la mine, y compris la stabilité des ouvrages miniers souterrains, qui est une préoccupation majeure pour les ingénieurs d'exploitation en raison de facteurs tels que les propriétés géologiques et mécaniques des roches, ainsi que les facteurs naturels et technologiques. De plus, la gestion des déchets miniers est un sujet de

préoccupation environnementale et de santé publique, car la mine génère des milliers de tonnes de déchets miniers en roches stériles chaque année. Des solutions de gestion intégrée et de valorisation de ces déchets sont nécessaires pour minimiser leur impact environnemental et contribuer au développement durable de l'industrie minière algérienne. [1,2]

La mine de Boukhadra continue d'être un sujet d'étude important pour les chercheurs et les universitaires, offrant des perspectives sur l'exploitation minière, la géotechnique, l'ingénierie environnementale et l'histoire industrielle de l'Algérie , joue un rôle crucial dans le développement économique et social de la région de boukhedra et continue d'être un acteur économique important .



**Figure I.1 :** la mine de Boukhadra .

### I.3.Géologie locale du site :

Le massif de Boukhadra présente une structure géologique complexe caractérisée par une forme anticlinale orientée NE-SW, traversée par le fossé de Tébessa-Morsott orienté NW-SE. L'ossature de cet anticinal est principalement constituée des terrains du Crétacé moyen (Aptien-Vraconien), qui forment une fermeture périclinale dans la partie NE du massif. Les formations les plus anciennes exposées en surface sont représentées par les évaporites du Trias, souvent en contact tectonique avec les formations du Crétacé. [5]

#### I.3.1. Stratigraphie :

La stratigraphie du secteur de Boukhadra se compose principalement de sédiments du Mésozoïque, avec des couches du Tertiaire et du Quaternaire. Dans le Mésozoïque, on trouve des dépôts du Trias et du Crétacé.

##### I.3.1.1. Le Trias :

Les dépôts du Trias dans la région de Boukhadra se caractérisent par des marnes bariolées, des gypses, des dolomies, des débris de calcaires et de grès. Ces

roches triasiques sont principalement situées dans les parties Ouest, Sud et Sud-est du secteur, avec un contact anormal avec les dépôts aptiens du Crétacé (Diapirisme).

### I.3.1.2. Le Crétacé :

Dans la stratigraphie du Crétacé à Boukhadra, plusieurs étages sont présents, notamment le Cénomanien, l'Aptien, l'Albien, le Coniacien, et à nouveau le Cénomanien où l'on trouve une série aptienne porteuse de la minéralisation. Cette série est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le gîte Sud, des calcaires récifaux construits avec des organismes fossiles (rudistes) qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale, et des grès et calcaires dans la partie supérieure de l'Aptien qui ne sont pas productifs on a :

- a. **L'Aptien** : L'Aptien dans la région de Boukhadra couvre de vastes étendus et se manifeste par deux types de faciès clairement différenciés :  
Un faciès carbonaté (constitué principalement de calcaire) et un faciès terrigène (composé de marnes, de grès et de calcaire).
- b. **L'Albien** : L'Albien est caractérisé par la présence principale de marnes à sa base et à son sommet, tandis que sa partie médiane est largement constituée de calcaires sublitographiques.
- c. **Le Vraconien** : se caractérise par des couches minces de marnes entrecoupées d'argile marneuse noire et de calcaires marno-argileux, avec une épaisseur maximale de 470 mètres.
- d. **Le Cénomanien** : est principalement composé de marnes grises ou verdâtres, avec par endroits des couches intercalaires de calcaires.
- e. **Le Turonien** : présente des formations de calcaires épais et de massifs pélitiques marneux à la base, avec quelques minces couches de marnes, observables surtout dans la partie Ouest et Sud du domaine étudié. Son épaisseur varie de quelques décimètres à plusieurs centaines de mètres.
- f. **Le Coniacien** : comprend des marnes argileuses avec des couches d'argile marneuse et, localement, de calcaire marneux.

### I.3.1.3. Le Tertiaire :

Représenté par les dépôts du Miocène, est observé uniquement dans la partie occidentale du domaine étudié. Ces dépôts se composent de conglomérats comprenant une diversité d'éléments, cimentés par une matrice carbonatée et comportant des intercalations de roches gréseuses.

### I.3.1.4. Quaternaire :

Les dépôts récents du Quaternaire se composent d'un matériau caillouteux, de blocs de calcaires, de grès, de débris miniers et de conglomérats. Ces dépôts sont largement répartis le long des flancs de la montagne et dans les zones basses du relief. [6]

### I.3.2. Tectonique :

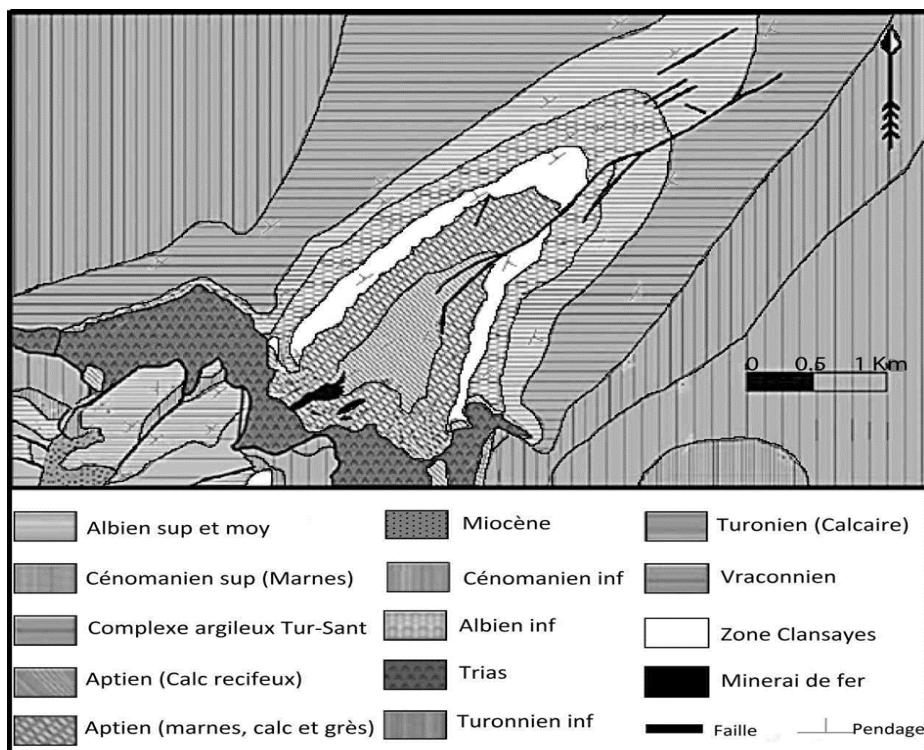
La région de Boukhadra est influencée par deux phases tectoniques majeures : la phase de plissement orientée NE/SO et la phase de tectonique cassante qui a entraîné des mouvements de socle responsables de la formation des fossés de Tébessa-Morsott et des Ouled-Boughanem, ainsi que du horst de Boudjaber.

L'anticlinal de Boukhadra est principalement affecté par la faille de Koudiet-El-Hamra, qui fait le lien avec la faille de Boukhadra orientée NE/SO. Dans la partie Sud-ouest (en aval du pic), la structure est affectée par un effondrement significatif.

D'autres failles, bien que de moindre importance et avec des rejets mineurs, sont également présentes dans les environs immédiats du gisement.

### I.3.3. Géomorphologie :

Le gisement ferrugineux de Boukhadra, situé dans le domaine de l'Atlas saharien, se trouve dans le massif montagneux de Djebel Boukhadra. Ce massif est caractérisé par une structure anticlinale assez simple orientée NE-SO, avec une terminaison périclinale au NE. Le Djebel Boukhadra s'étend sur environ 7 à 8 km de longueur et a une largeur variant entre 3 et 5 km, suivant une direction NE-SO. Les altitudes varient de 750 m au pied de la montagne à 1463 m au point culminant, situé au pic de Boukhadra. [7]



**Figure I.2 :** Carte géologique de la mine de Boukhadra (Dubourdieu, 1956).

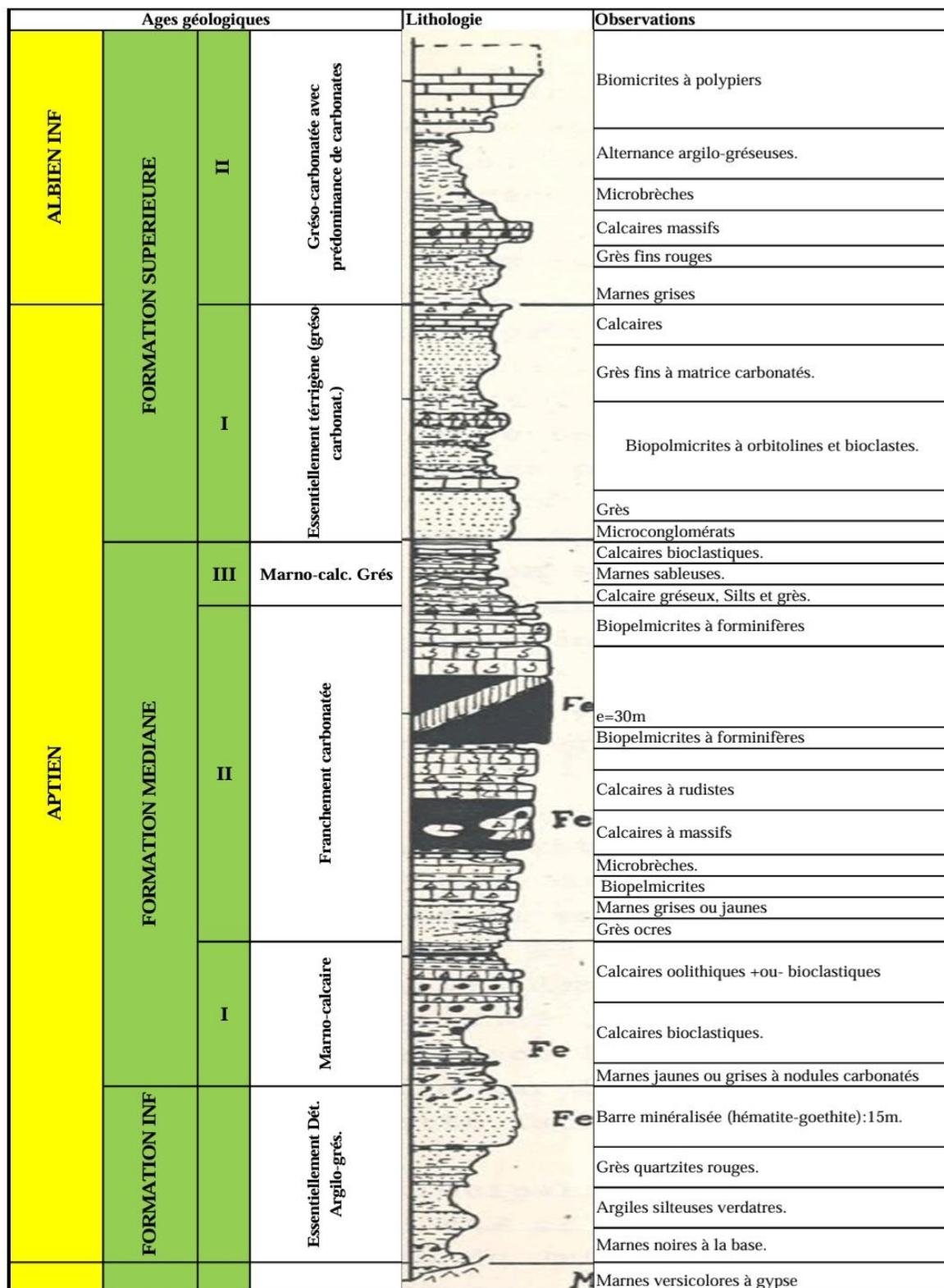
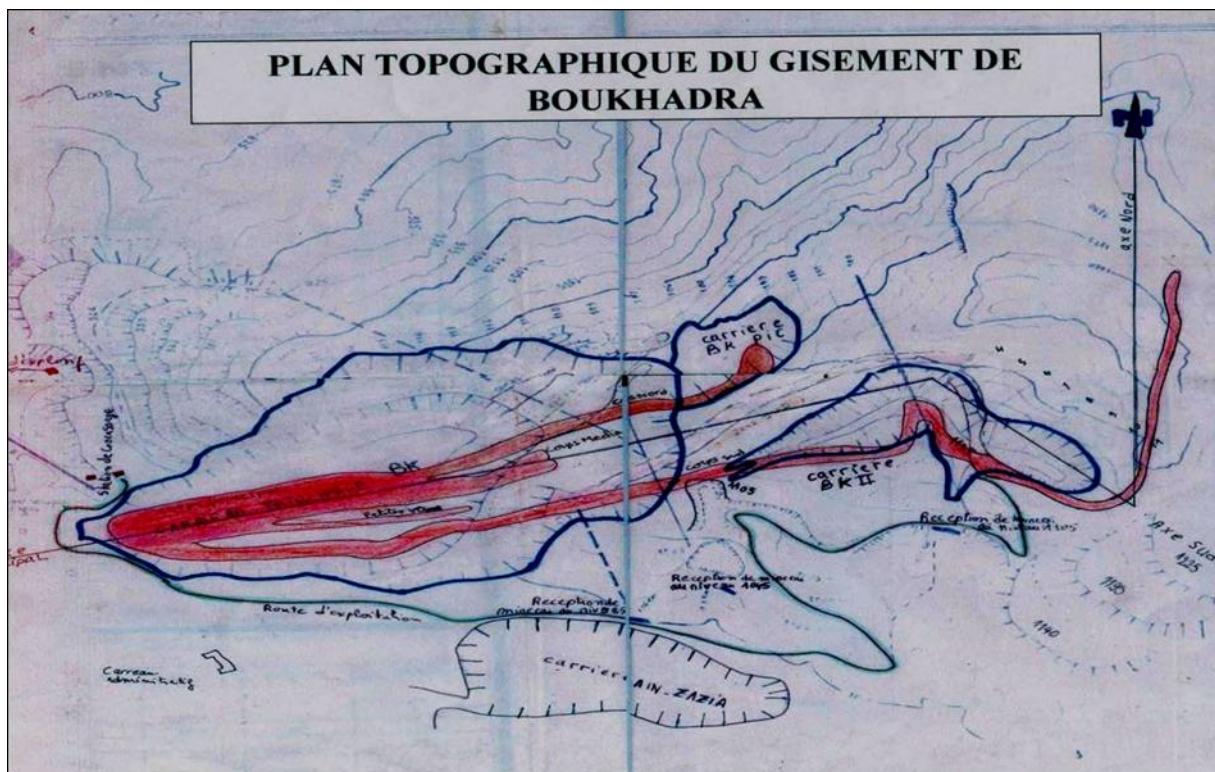


Figure I.3 : Colonne stratigraphique du Djebel Boukhadra.

#### I.4. Topographie du site :

La région de Boukhadra se trouve à l'Est des Aurès, à 43 km au nord de Tébessa (chef-lieu de la wilaya), à 191 km au sud d'Annaba et à 24 km à l'ouest de la frontière tunisienne. Caractérisée par un plateau, cette zone est entourée de forêts qui abritent une biodiversité riche en faune et en flore. [8]

Le climat de Boukhadra est de type continental et sec, marqué par des variations importantes de température tout au long de l'année. Les températures peuvent atteindre 40°C en été et descendre jusqu'à 0°C en hiver. La pluviométrie est généralement faible, avec parfois de faibles chutes de neige pendant les périodes les plus froides. [9]



**Figure I.4 :** Plan topographique du gisement de Boukhadra.

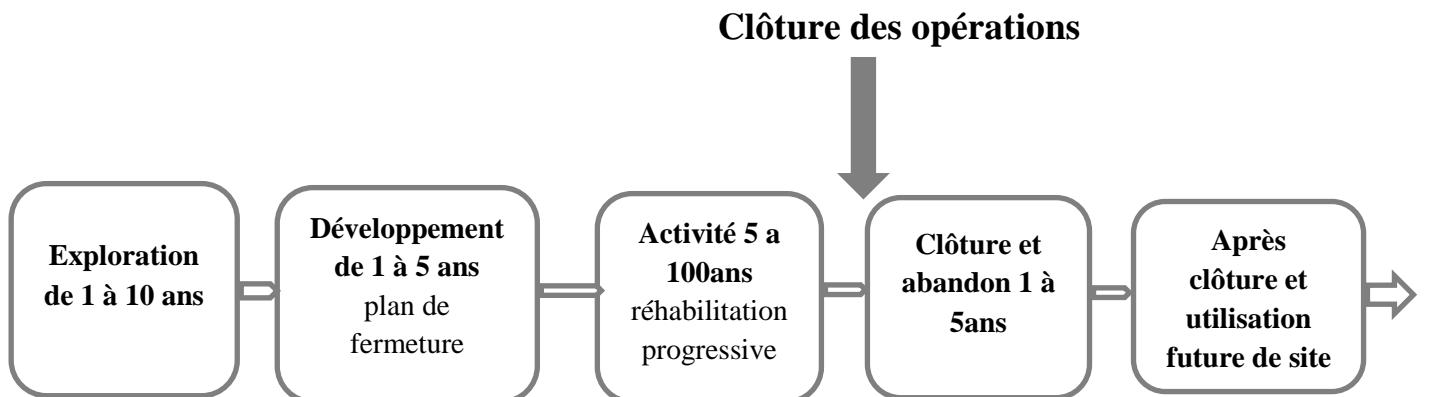
#### I.5. Fond géochimique du gisement de fer Boukhadra :

La mine de Boukhadra, située dans la région de Tébessa en Algérie, est probablement caractérisée par une forte concentration en fer, principalement sous forme d'hématite ( $Fe_2O_3$ ) ou de magnétite ( $Fe_3O_4$ ). On y trouve également d'autres éléments associés aux minerais de fer, comme le manganèse, le titane et le vanadium, ainsi que des éléments traces tels que le cuivre, le zinc, le nickel et le cobalt. Les concentrations en phosphore, en soufre et impuretés courantes dans les

gisements de fer, peuvent être élevées. Les minéraux de la gangue présents incluent le quartz, les carbonates (calcite, dolomite) et peut-être des silicates. En fonction de la géologie locale, des variations dans les concentrations d'éléments comme l'aluminium, le magnésium et le calcium peuvent également être observées.

### I.6.Cycle de vie d'une mine:

Quelque que soit l'exploitation mener à ciel ouvert ou en souterrain, le cycle de vie de la mine est le même, comme illustrer sur le schéma suivant :



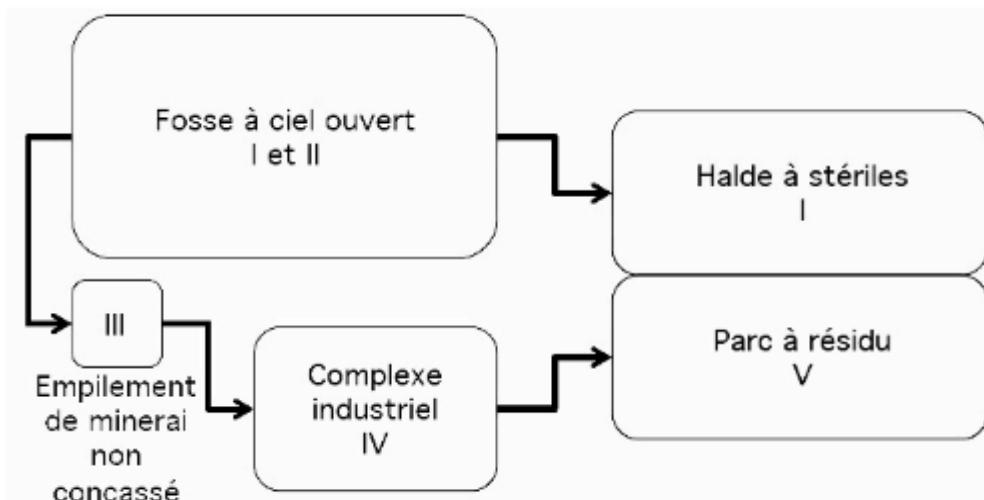
**Figure I.5 :** schéma de Déroulement d'une opération minière (tiré d'Artignan, 2003).

### I.7.Principe d'une mine à ciel ouvert :

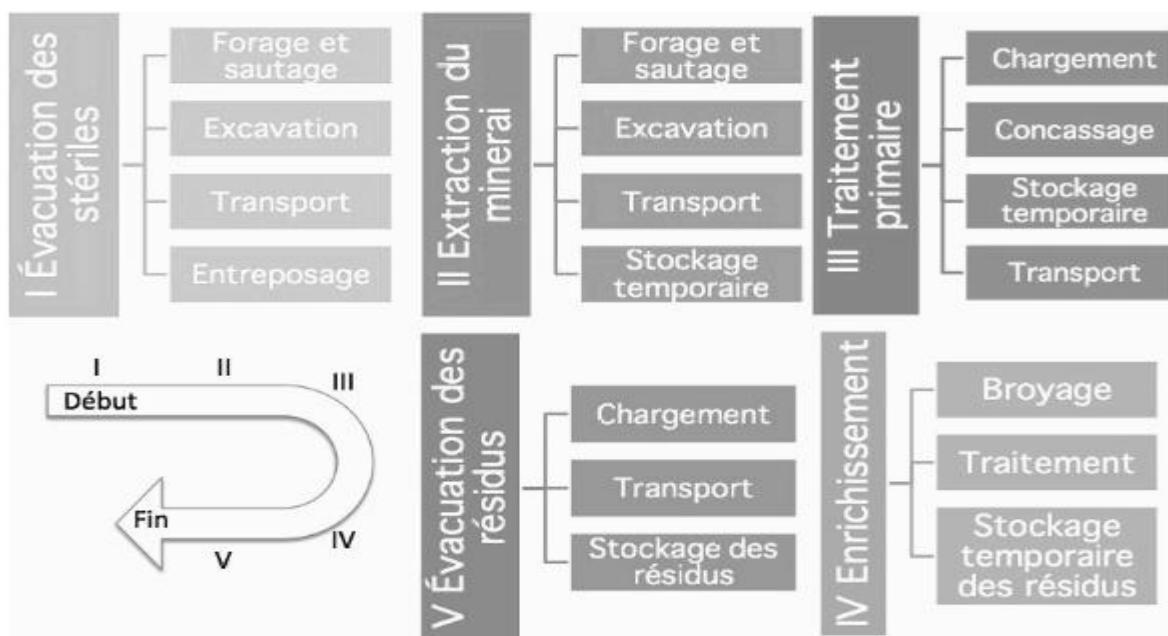
L'exploitation du gisement de minerai de fer de Boukhadra se fait en surface, sans recours à des galeries souterraines, ce qui signifie que toutes les opérations se déroulent à l'air libre. La mine est excavée par paliers successifs, formant des gradins ou terrasses, afin de permettre un accès optimal au minerai tout en maintenant la stabilité des parois. L'utilisation d'équipements lourds tels que pelles mécaniques, bulldozers et camions de grande capacité permet une extraction et un transport efficaces du minerai et des stériles. Les roches sans valeur économique sont stockées à proximité dans des verses. Le minerai extrait est généralement concassé et trié sur place, avec des installations de traitement présentes pour enrichir le minerai si nécessaire. Toutefois, cette méthode entraîne une modification importante du paysage et nécessite une gestion rigoureuse des poussières, du bruit, et des impacts sur les eaux de surface et souterraines. La réhabilitation progressive des zones épuisées est envisagée au fur et à mesure de l'avancée de l'exploitation. Économiquement, cette méthode est avantageuse pour les gisements proches de la surface, permettant l'extraction de grandes quantités de minerai de manière rentable. Cette approche est particulièrement adaptée au gisement de fer de Boukhadra, assurant une extraction efficace tout en nécessitant une gestion rigoureuse des impacts environnementaux.

## I.8.Les étapes d'exploitation d'une mine à ciel ouvert:

La production de minerai dans une mine à ciel ouvert comprend cinq composantes principales (Figure I.6) et peut être divisée en cinq étapes majeures (Figure I.7) (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010).



**Figure I.6 :** Composantes d'une mine à ciel ouvert.



**Figure I.7 :** Principales étapes d'exploitation d'une mine à ciel ouvert.

## I.9. Impacts environnementaux engendré par l'activité minière :

### I.9.1. Définition de l'environnement :

L'environnement est défini comme l'ensemble des éléments biotiques et abiotiques entourant un individu ou une espèce, dont certains contribuent directement à satisfaire ses besoins. Elle peut également être décrite comme l'ensemble des conditions naturelles (chimiques, biophysiques) et culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines. [10]

L'environnement regroupe les composantes naturelles de la terre comme l'air, l'eau, l'atmosphère, les roches, les plantes, les animaux et tous les phénomènes et interactions qui s'y produisent au cours du 19ème siècle alors que la protection de l'environnement est devenue un enjeu majeur. L'idée selon laquelle la pollution due aux activités humaines entraîne une dégradation de l'environnement mondial et local est devenue une réalité. [10]

### I.9.2. Impacts engendré par l'exploitation minière :

Les déchets miniers peuvent avoir de nombreux impacts environnementaux. Voici quelques-uns des principaux effets :

#### I.9.2.1. Destruction des écosystèmes :

L'extraction minière peut entraîner la destruction des habitats naturels, et favorise la déforestation, ce qui peut avoir un impact sur la biodiversité. [11]

#### I.9.2.2. Dégradation des sols :

Les déchets miniers peuvent entraîner une baisse du pH des sols, ce qui peut affecter la santé des sols et la croissance des plantes [12], elles peuvent aussi engendrer une pollution des sols par le lessivage des roches et des stériles par les eaux de pluie, ainsi que l'accumulation de minéraux fins et la contamination des sources d'eau souterraines.

#### I.9.2.3. Pollution de l'eau et de l'air :

Les déchets miniers peuvent contaminer les sources d'eau souterraines et l'air, par les poussières libérées lors de l'utilisation d'explosifs, ce qui peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement [11] [13].

#### I.9.2.4. Production de déchets toxiques :

Les déchets miniers peuvent contenir des substances toxiques qui, si elles ne sont pas correctement gérées, peuvent contaminer l'environnement [14].

#### I.9.2.5. Libération de gaz à effet de serre :

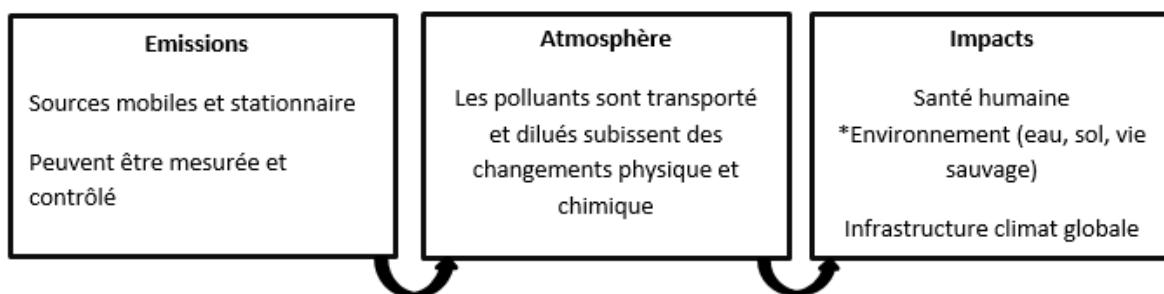
L'extraction et le traitement des minéraux peuvent entraîner la libération de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au changement climatique [11].

Il est important de noter que la gestion appropriée des déchets miniers peut aider à atténuer certains de ces impacts. Par exemple, certains déchets miniers

peuvent être considérés comme des ressources secondaires et être réutilisés, ce qui peut aider à réduire l'impact environnemental [14].

### I.9.3.Les impacts potentiels d'une mine à ciel ouvert :

L'exploitation d'une mine à ciel ouvert engendre plusieurs impacts significatifs qui peuvent être catégorisés selon les environnements touchés : physique (sol, eaux, air), biologique (faune, flore), et humain (paysage, qualité de vie). Ces impacts sont déterminés par l'étendue, la durée, l'intensité et la probabilité des perturbations causées par l'activité minière. Parmi les principaux impacts identifiés, on note la perte d'habitats biologiques, la modification de la quantité et de la qualité de l'eau, la dégradation des sols, l'augmentation de l'érosion, la pollution de l'air par les gaz à effet de serre et les particules, ainsi que les impacts sociaux comme les problèmes de santé et les changements dans la communauté locale. Ces liens sont mis en évidence dans la Figure présentée ci-dessous.



**Figure I.8 :** schéma représentant le lien entre les impacts sur la qualité de l'air et ceux sur le milieu social (tiré de Environmental Law Alliance Worldwide, 2010, p. 13).

### I.10. Définition des métaux lourds :

Les métaux lourds sont des éléments métalliques naturels caractérisés par une masse volumique égale ou supérieure à 5000 kg/m<sup>3</sup>. Leur présence est courante dans notre environnement et leur utilisation est répandue dans diverses industries. Émis principalement sous forme de particules fines, ils se propagent par le vent et se dispersent dans les sols ainsi que dans les environnements aquatiques, entraînant une contamination de la flore et de la faune. Cette contamination s'étend également à la chaîne alimentaire. [15]

L'activité industrielle et technologique entraîne une réduction du temps de rétention des métaux dans les roches, favorisant la formation de nouveaux composés métalliques. De plus, l'utilisation de produits fossiles contribue à l'introduction de métaux dans l'atmosphère par combustion. Il est essentiel de distinguer la part de contamination d'origine humaine (anthropogène) de celle qui est naturelle (géogène) pour une compréhension précise de l'impact environnemental. [16]

### I.10.1. Contaminations des métaux lourds dans la mine de fer :

La contamination par les métaux lourds dans la mine de fer peut être causée par divers processus, notamment l'exploitation minière elle-même, le traitement des minerais et les activités connexes. Ces métaux peuvent être libérés dans l'environnement sous forme de particules fines, contaminant les sols, les eaux souterraines et Contamination de l'air.

#### I.10.1.1. Contamination des sols :

Les sols peuvent être contaminés par les métaux lourds à partir de sources diverses telles que les résidus miniers, les rejets de produits chimiques utilisés dans le traitement du minerai, les dépôts atmosphériques provenant des activités minières et industrielles, ainsi que les pratiques de gestion des déchets.

Les métaux lourds peuvent migrer dans les sols par divers mécanismes, notamment la lixiviation, l'adsorption sur les particules du sol, la bioaccumulation par les plantes et les microorganismes, ainsi que le lessivage dans les eaux souterraines en cas de pluies ou d'irrigation.

**a. Effets sur l'environnement :** La contamination des sols par les métaux lourds peut avoir des effets néfastes sur la biodiversité, la fertilité des sols, la santé des plantes et des animaux, ainsi que sur la qualité des eaux souterraines lorsque les métaux se déplacent vers les nappes phréatiques.

#### b. Mesures de prévention et de remédiation :

Pour prévenir la contamination des sols, il est essentiel de mettre en place des pratiques de gestion environnementale telles que la réduction des rejets de métaux lourds, l'utilisation de techniques de confinement des résidus miniers, la régulation des pratiques d'exploitation minière et la surveillance régulière de la qualité des sols.

La remédiation des sols contaminés peut impliquer des techniques telles que la phytoremédiation (utilisation de plantes pour dépolluer les sols), la bioremédiation (utilisation de microorganismes), le traitement chimique ou physique des sols contaminés, et le reboisement des zones affectées pour restaurer la biodiversité et la stabilité des sols.

#### I.10.1.2. Contamination de l'eau :

Les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent être contaminées par les métaux lourds provenant des résidus miniers, des rejets d'eaux de processus miniers et des infiltrations à travers les sols contaminés.

Les métaux lourds se dissolvent dans l'eau et peuvent être transportés sur de longues distances, contaminant les cours d'eau, les lacs, les nappes phréatiques et les sources d'eau potable.

- a. **Effets sur l'environnement :** La contamination de l'eau par les métaux lourds peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques, la qualité de l'eau pour la consommation humaine, et la santé des populations vivant à proximité de la mine.
- b. **Mesures de prévention et de remédiation :** Pour prévenir la contamination de l'air et de l'eau par les métaux lourds, il est crucial de mettre en œuvre des mesures de contrôle des émissions, telles que l'utilisation de filtres et de systèmes de captage des poussières, la gestion des eaux de processus pour éviter les fuites, et la mise en place de barrières de confinement des contaminants dans les sols.

#### I.10.1.3. Contamination de l'air :

Les métaux lourds peuvent être émis dans l'air par divers processus, tels que le transport et le broyage des minéraux, la combustion de carburants pour les engins miniers, et les activités de traitement des minéraux. Une fois émis, les métaux lourds peuvent se disperser dans l'air sous forme de particules fines, qui peuvent être transportées sur de longues distances par le vent.

- a. **Effets sur l'environnement :** La présence de métaux lourds dans l'air peut avoir des effets sur la qualité de l'air et la santé humaine, notamment en augmentant les risques de maladies respiratoires et en contaminant les sols et les eaux lorsqu'ils retombent.

#### I.11. Définition des retombées climatiques des poussières :

Les retombées climatiques des poussières se réfèrent aux effets atmosphériques et environnementaux résultant de la présence de particules de poussière en suspension dans l'air. Ces particules peuvent avoir diverses origines, telles que les activités industrielles, les éruptions volcaniques, les tempêtes de sable et les incendies de forêt, entre autres.

Ces retombées peuvent avoir des impacts significatifs sur le climat, la qualité de l'air, la santé humaine et les écosystèmes. Elles influent sur le bilan radiatif de la Terre en absorbant ou réfléchissant la lumière solaire, ce qui peut se traduire par des phénomènes météorologiques comme des couchers de soleil rouges, des halos lumineux autour du soleil et de la lune, ainsi que des variations de température atmosphérique.

De plus, les particules de poussière en suspension peuvent véhiculer des contaminants, des allergènes et des agents pathogènes, affectant ainsi la qualité de l'air et la santé respiratoire des populations exposées. Elles peuvent également impacter les écosystèmes terrestres et aquatiques en altérant la composition chimique des sols et des eaux, ainsi que la biodiversité des habitats naturels.

### I.11.1. Effets des retombées climatiques des poussières :

Les poussières générées par l'exploitation minières peuvent avoir plusieurs effets :

**I.11.1.1. Réchauffement climatique :** les particules de poussières peuvent absorber le réfléchir la lumière solaire, contribuant ainsi au réchauffement de la planète.

**I.11.1.2. Altération des écosystèmes :** la poussière peut affecter la qualité des sols, des eaux et de l'air, perturbant les écosystèmes locaux.

**I.11.1.3. Santé humaine :** l'inhalation de poussières peut entraîner des problèmes respiratoires et d'autres problèmes de santé chez les travailleurs et populations environnantes.

Pour réduire les impacts climatiques de l'exploitation minière à Boukhadra, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

a) **Réduction des émissions de GES :**

- Utilisation de technologies et de pratiques minières plus efficaces en termes d'énergie.
- Adoption de sources d'énergie renouvelables pour les opérations minières.
- Mise en place de mesures pour capturer et stocker le carbone (CCS) sur les sites miniers.

b) **Reboisement et restauration des forêts :**

- Reboisement des zones déboisées et restauration des écosystèmes forestiers.
- Promotion de pratiques de gestion durable des forêts pour maximiser la séquestration du carbone.

c) **Gestion des eaux :**

- Mise en place de systèmes de gestion des eaux pour minimiser les perturbations des régimes hydrologiques.
- Protection des sources d'eau locales et des zones humides pour maintenir l'équilibre hydrologique.

d) **Contrôle des poussières :**

- Utilisation de technologies de suppression des poussières dans les sites miniers.
- Plantation de végétation autour des sites miniers pour capturer les particules fines.

## I.12. Généralités sur les poussières :

### I.12.1. Définition :

Particules très fines qui se détachent soit de terres sèche ou de matériaux divers sous l'effet de choc ou de déflagrations (tels que les poussières industrielles). [17]

D'une manière générale, la poussière est constituée de très fines particules solides en suspension dans l'air, et la mesure dans laquelle elle pénètre dans l'organisme par les poumons dépend de sa taille. [18]

### I.12.2. Méthodes de caractérisations des poussières :

La quantification et l'évaluation des poussières peuvent être assurées par une étude granulométrique ou une étude physico-chimique :

#### I.12.2.1. Etude granulométrique :

Généralement, les particules sont considérées comme en suspension si leur vitesse maximale de chute ne dépasse pas 0,25 m/s dans un air calme à une température de 20°C et une pression de 101 325 Pa (dans les études réalisées par Antoine coquard en 2012, les conditions de pression et de température étaient considérées comme normale). Cette vitesse est équivalente à celle atteinte par une sphère de diamètre 100  $\mu\text{m}$  et de densité égale à l'eau (103 kg/m<sup>3</sup>) [19.20]. Pour décrire la taille des particules qui composent les poussières, le paramètre utilisé est le diamètre aérodynamique (Da) [19.21]. Cette grandeur représente :

« Le diamètre de la sphère de masse volumique 103 kg/m<sup>3</sup> dont la vitesse limite de chute en air calme est identique à celle de la particule dans les mêmes conditions de pression, température et humidité relative » [19.20].

La poussière peut ensuite être caractérisée grâce à des études granulométriques des particules qui la composent. Les résultats sont donnés sous la forme d'un diagramme de répartition montrant le pourcentage de particules en fonction de Da. Pour identifier différentes fractions de particules, la notation PM<sub>x</sub> est utilisée. Cela représente des particules dont le Da est inférieur à x  $\mu\text{m}$ . [19.22]

Les fractions ont été séparées à l'aide d'un filtre constitué de pores avec une efficacité de rétention de 50% pour le Da considéré.

Dans l'industrie minière, on parle de poussières fines (PM1), de poussières moyennes (Da entre 1 et 40  $\mu\text{m}$ ) et de poussières grossières (Da entre 40 et 80  $\mu\text{m}$ ) [22]. Dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air, nous préférons désigner les PM2, 5 par les particules fines et les particules grossières dans la plage PM2, 5 à PM10 par les particules grossières. [19.22]

### **I.12.2.2.Etude physico-chimique :**

La caractérisation physico-chimique se fait par les différentes analyses à savoir (DRX, FRX, SAA, IR, UV-VISIBLE,...)

Dans les sections qui suivront nous nous baseront sur la caractérisation physico-chimique spécifiant des tailles granulométrique précise dont 45 et 60 micromètre, car nous n'avons les moyens de dérouler une étude granulométrique approfondie.

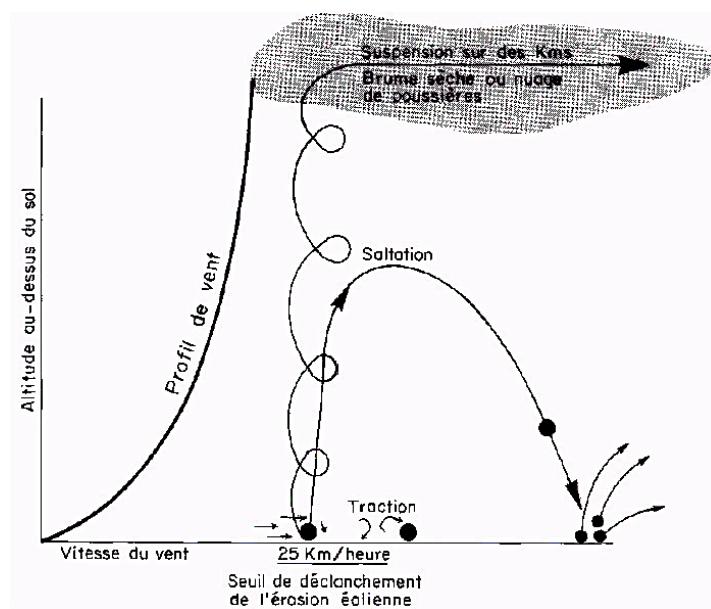
### **I.12.3.Ressources d'émission de poussières suivant le cycle d'exploitation :**

Les sources d'émission sont présentées dans cette section pour mettre en lumière les impacts sur la qualité de l'air résultant de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert, en mettant en avant l'importance des émissions de poussière diffuse. Les sections suivantes présentent les différentes sources d'émission à l'origine de ce problème. [23]

#### **I.12.3.1.Phénomènes naturels :**

L'érosion éolienne est un processus majeur de dispersion de poussière lors de l'exploitation des mines à ciel ouvert. Ce phénomène affecte principalement les particules fines, avec un diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$ , qui peuvent être transportées sur de longues distances et à des altitudes élevées, jusqu'à 10 km. Déclenchée par le gradient vertical de la vitesse du vent, l'érosion éolienne commence lorsque la vitesse du vent au sol est comprise entre 15 et 25 km/h, selon les conditions de turbulence atmosphérique. Ce gradient crée une différence de vitesse entre le bas et le sommet des particules, entraînant leur aspiration vers le haut. Lorsque cette

aspiration diminue, les particules sont transportées par le vent et retombent finalement sous l'effet de la gravité. [23]



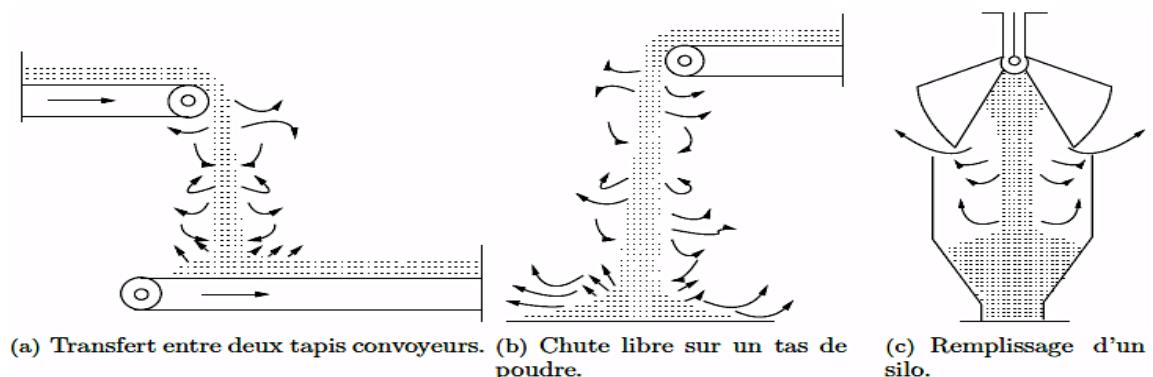
**Figure I.9 :** Représentation du phénomène d'érosion éolienne (tiré de Roose, 1994).

### I.12.3.2 Activités minières :

Les activités minières génèrent des émissions de poussière diffuse à toutes les phases de l'exploitation. L'une des principales causes de ces émissions est la circulation des engins miniers sur des routes non revêtues, que ce soit lors du transport des stériles et des résidus ou lors de l'extraction du minerai. Les camions utilisés pour le transport, avec des capacités importantes (jusqu'à plusieurs centaines de tonnes), circulent de manière continue (24/24, 7/7) sur des distances considérables, en raison de la taille des mines à ciel ouvert (Genivar, 2008). Cette circulation constante a deux effets sur les émissions de poussière (Chartier et Lansiart, 2004) :

- Le frottement des roues sur le sol nu provoque une fracturation des minéraux, entraînant la libération de particules.
- Le passage des véhicules crée des courants d'air qui remobilisent les particules dans l'air.

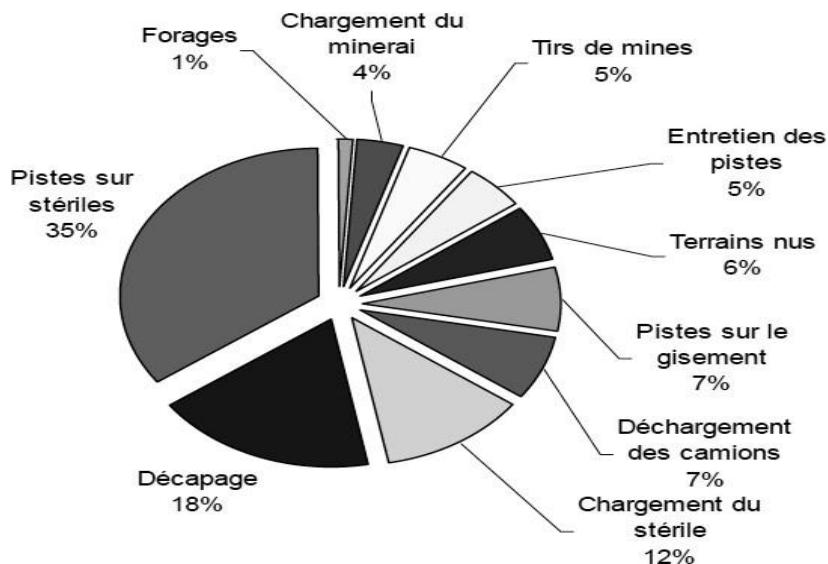
Une autre source significative d'émission diffuse de particules est liée aux transferts de matériaux effectués à chaque étape de l'exploitation (tapis convoyeurs, chargement des camions par pelle mécanique, déchargement par benne basculante). Cela entraîne la dispersion des matériaux, avec les particules les plus fines qui interagissent avec l'air ambiant, étant partiellement remises en suspension (Ansart, 2007). [23]



**Figure I.10 :** illustration d'une zone de transfert entraînant l'émission de poussières (tiré d'Ansart, 2007).

Une autre source majeure d'émission de poussière diffuse provient des opérations impliquant des contraintes mécaniques sur les matériaux extraits, telles que le forage, le dynamitage et le concassage. Ces activités génèrent une friction importante des matériaux, favorisant ainsi la formation de particules.

Il est très difficile de quantifier et de comparer ces différentes sources de manière précise. Leur importance relative dépend des caractéristiques physiques du gisement exploité (teneur en silt, humidité relative, etc.), des techniques utilisées et des mesures d'atténuation mises en place. Le graphique présenté ci-dessous (Figure), extrait d'une publication australienne, est donc donné à titre indicatif (Chartier et Lansiart, 2004). [23]



**Figure I.11 :** graphique circulaire de l'importance relative des différentes sources d'émissions de poussières diffuses lors de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert (tiré de Chartier et Lansiart, 2004).

#### I.12.4.Paramètres utilisés pour la caractérisation des poussières :

##### I.12.4.1.Paramètres quantitatifs :

Les paramètres de mesure des impacts environnementaux liés à l'exploitation minière comprennent la concentration dans l'air en particules totales en suspension (PTS), en particules fines (PM10) et très fines (PM2.5), exprimées en microgrammes par mètre cube ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ces mesures sont généralement effectuées sur une période de 24 heures à l'aide de samplers à volume élevé (Hi-Vol) ou à faible volume (Low-volume sampler), ainsi que des dispositifs en continu tels que BAM et TEOM. Les retombées de poussière sont quantifiées en microgrammes par mètre carré par jour ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$ ) ou en kilogrammes par kilomètre carré par an ( $\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$ ) à l'aide de méthodes gravimétriques impliquant le piégeage des particules dans une solution, suivie de leur évaporation et pesée. Les émissions totales annuelles sont estimées à l'aide de modèles statistiques et mathématiques, nécessitant une interprétation prudente en raison de leur nature prédictive. Il est important de noter que les mesures de PTS peuvent sous-estimer les particules plus grosses, ce qui doit être pris en compte lors de l'évaluation des impacts environnementaux de l'exploitation minière.

### I.12.4.2.Paramètres qualitatifs :

Pour caractériser qualitativement la poussière émise par une activité minière, il est possible de procéder à une ségrégation des particules selon divers critères. Une méthode courante consiste à réaliser une étude granulométrique pour évaluer la répartition des particules en fonction de leur taille. Cependant, cette approche est moins fréquente en pratique. Plus couramment, on analyse les concentrations de particules totales en suspension (PTS), de particules fines (PM10) et très fines (PM2.5) pour évaluer les impacts sur la qualité de l'air. Une autre méthode de caractérisation consiste à séparer les particules en fonction de leur nature minéralogique. Les minéraux peuvent être classés en huit catégories principales selon l'anion ou le groupe d'anions dominants, avec des sous-classes basées sur des critères chimiques ou structuraux spécifiques, comme indiqué dans le Tableau I.1 :

**Tableau I.1 :** Taux de déposition 2010 des poussières au niveau des stations P1 à P6 de la mine Raglan (compilation d'après Xstrata Nickel, 2011).

	Poussières totales	Poussières cuivre		Poussières nickel	
	g/m <sup>2</sup> /an	g/m <sup>2</sup> /an	%	g/m <sup>2</sup> /an	%
Jarres à poussières:	52,8	2,4	4,6	4,8	9,1
Carottes de neige	518,4	1	0,2	43,8	8,5

### I.12.5.Taux de déposition :

Les seuils de taux de dépôt de poussière dans une mine à ciel ouvert dépendent de plusieurs facteurs, tels que :

Le type de poussière: La composition et la taille des particules de poussière peuvent avoir un impact significatif sur leur dangerosité pour la santé des travailleurs. Par exemple, les poussières respirables, c'est-à-dire celles dont les particules ont un diamètre inférieur à 10 micromètres ( $\mu\text{m}$ ), sont plus dangereuses que les poussières non respirables. La concentration de poussière: Plus la

concentration de poussière dans l'air est élevée, plus le risque pour la santé des travailleurs est important. La durée d'exposition : Plus les travailleurs sont exposés à la poussière pendant une longue période, plus le risque pour leur santé est important. L'état de santé des travailleurs : Les personnes souffrant de problèmes respiratoires, tels que l'asthme ou la bronchite chronique, sont plus sensibles aux effets néfastes de la poussière.

Pour l'évaluation du taux de déposition de particules totales, nous utiliserons les données mesurées par la Station de Surveillance de l'Environnement d'Annaba aux Mines de fer de l'est MFE Spa Mine de Boukhadra. Les valeurs mesurées sont : 0,07 mg/Nm<sup>3</sup> au niveau du poste 30, 0,01 mg/Nm<sup>3</sup> au niveau du voisinage, et 0,09 mg/Nm<sup>3</sup> au niveau du concasseur. Ces mesures ont été effectuées le 02/06/2021 (tableau I.2 ci-dessous). Une deuxième série de mesures, datant du 15/03/2021 (tableau I.3 ci-dessous), donne les résultats suivants : 0,02 mg/Nm<sup>3</sup> au niveau du voisinage, 2,70 mg/Nm<sup>3</sup> au niveau de la bande transporteuse, et 0,55 mg/Nm<sup>3</sup> au niveau de la route d'exploitation. Toutes ces valeurs sont inférieures à la valeur limite réglementaire de 50 mg/Nm<sup>3</sup> définie par le Décret N°06-138 du 15 avril 2006. L'appareil utilisé pour ces mesures est l'Analyseur de Poussière Model: ADR1500.

**Tableau I.2 :** résultats des analyses de poussières effectuées par la Station de Surveillance de l'environnement d'Annaba aux Mines de fer de l'est MFE Spa Mine de Boukhadra. 02/06/2021

<b>Paramètre</b>	<b>Unités</b>	<b>Résultats</b>			<b>Valeurs limites</b>	<b>Appareil utilisés</b>
		<b>Prélèvement au niveau du poste 30</b>	<b>Prélèvement au niveau du voisinage</b>	<b>Prélèvement au niveau du concasseur</b>		

<b>Poussières totales</b>	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>0.07</b>	<b>0.01</b>	<b>0.09</b>	<b>50</b>	<b>Analyseur de poussière modèle ADR1500.</b>
---------------------------	--------------------------	-------------	-------------	-------------	-----------	---

**Tableau I.3 :** résultats des analyses de poussières effectuées par la Station de Surveillance de l'Environnement d'Annaba aux Mines de fer de l'est MFE Spa Mine de Boukhadra. 15/03/2021

<b>Paramètre</b>	<b>Unités</b>	<b>Résultats</b>			<b>Valeurs limites</b>	<b>Appareil utilisés</b>
		<b>Prélèvement au niveau du voisinage</b>	<b>Prélèvement au niveau de la bonde transporteuse</b>	<b>Prélèvement au niveau de la route d'exploitation</b>		
<b>Poussière totales</b>	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>0.02</b>	<b>2.70</b>	<b>0.55</b>	<b>50</b>	<b>Analyseur de poussière modèle ADR1500.</b>

### I.13.Cadre réglementaire :

#### I.13.1. loi sur les métaux lourds :

Décret exécutif n°06-104 du 29 Moharram 1427 correspondant au 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux.

Décret exécutif n° 06-105 du 2 Safar 1427 correspondant au 2 mars 2006 portant déclaration d'utilité publique l'opération relative à la réalisation d'un réseau d'assainissement et d'ouvrages pour la lutte contre la remontée des eaux de l'Oued.

### **I.13.2.La procédure d'étude d'impact sur l'environnement :**

L'étude d'impacts environnemental doit satisfaire les volets rédigé en conformité avec la loi cadre n° 03-10du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

L'objectif général de n'importe quelle étude d'impact environnemental est de proposer des mesures visant la réduction d'éventuelles nuisances qui peuvent être l'objet de l'activité des mines.

## **I.14. Conclusion**

L'exploration du site de Boukhadra révèle une riche histoire d'exploitation minière et une complexité géologique marquée par des formations du Mésozoïque, des structures tectoniques diversifiées et des altitudes variées. Cependant, cette exploitation intensive a également engendré des impacts environnementaux significatifs, notamment la destruction des écosystèmes, la dégradation des sols et la pollution de l'eau et de l'air. La gestion des déchets miniers et la contamination par les métaux lourds restent des défis majeurs pour la région. La compréhension approfondie des caractéristiques géologiques et environnementales de Boukhadra est donc cruciale pour élaborer des stratégies visant à réduire les impacts négatifs de l'exploitation minière et à promouvoir un développement durable de l'industrie minière en Algérie.

---

*CHAPITRE II*

*ECHANTILLONAGE*

*ET METHODES*

*D'ANALYSES*

---

## II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les différentes étapes de l'échantillonnage, de la préparation des échantillons à leur analyse par des techniques telles que la DRX, la fluorescence X, la spectrométrie d'absorption atomique et l'attaque triacide, et UV Visible en mettant en lumière l'importance de ces processus pour la compréhension et l'exploitation des ressources géologiques.

## II.2. L'échantillonnage :

### II.2.1. Définition :

**II.2.1.1. Échantillon :** Une portion d'un ensemble sélectionnée pour représenter une ou plusieurs propriétés caractéristiques de celui-ci. [24]

**II.2.1.2. Teneur :** La concentration relative d'un élément ou d'un minéral. La teneur en elle-même ne reflète pas la valeur économique d'une roche. [24]

**II.2.1.3. Minérai :** un minérai est un matériau solide naturel qui contient une substance utile dont l'extraction génère des profits. Minéraux ou roches ayant des teneurs et des accumulations suffisantes en un ou plusieurs éléments pour permettre une exploitation, une concentration, un traitement et un raffinage rentables. [25]

**II.2.1.4. L'échantillonnage :** est une étape cruciale dans les études géologiques, permettant de prélever des spécimens représentatifs d'une zone d'intérêt. Cette opération consiste à sélectionner judicieusement des points d'échantillonnage, généralement au niveau des affleurements rocheux clés, afin de caractériser les principales unités géologiques de la région étudiée. Pour assurer la représentativité et l'intégrité des échantillons, il est recommandé d'utiliser un matériel adapté, comme une masse métallique, et de les conditionner soigneusement dans des emballages adaptés, tels que du papier et du nylon, pour éviter toute contamination. Cette précaution est essentielle pour garantir la fiabilité des analyses et des interprétations géologiques qui en découlent. [26]

Les échantillons prélevés au sein de la mine de Boukhadra ont été collectés à différents niveaux à l'intérieur de la mine. De plus, des prélèvements ont été effectués suivant les quarts pôles du nord vers le sud à l'extérieur de la mine, à des emplacements distants les uns des autres d'un pas de 500 m sur un rayon de 2000 m.

### II.2.2. Types d'échantillons :

**II.2.2.1. Echantillon ponctuel :** Cet échantillon est obtenu à partir d'une seule station d'échantillonnage et peut être collecté en une ou plusieurs prises de benne. Ce type d'échantillon est spécifique à un point précis et peut fournir des informations détaillées sur une zone spécifique ou un instant donné.

**II.2.2.2. Echantillon composite :** est constitué à partir de prélèvements effectués en différents points, en veillant à ce que les caractéristiques des échantillons élémentaires soient équivalentes. Ces échantillons individuels sont ensuite mélangés de manière homogène pour former un échantillon composite représentatif d'une zone plus large.

### **II.2.2.3. L'échantillonnage systématique :**

L'échantillonnage systématique, également appelé échantillonnage probabiliste statistique ou aléatoire systématique dans certaines ressources, consiste à sélectionner un premier échantillon de manière aléatoire, puis à prélever les échantillons suivants selon un intervalle spécifique adapté aux objectifs de l'étude que cet échantillonnage doit servir. [27]. Comme précédemment présenté.

Le prélèvement s'est effectué en deux modes à l'intérieur de la mine (in situ) et Prélèvement à partir des carreaux de la mine (en dehors du champ minier) [28].

Ces prélèvements ont fait l'objet de Caractérisations nécessaires en vue d'identification du minerai de Fer de BK sur le plan qualitatif et quantitatif d'une part. Et de l'autre en vue d'en évaluer la portée des impacts (les résultats de ses analyses à savoir DRX ; FRX ; SAA sont exposés sur le Chap.3, quant à leurs interprétation, cette dernière qui constitue une base de données fut totalement reprises de notre part, en vue de servir notre étude et d'approfondir le sujet en abordant les retombées de poussières issues de l'exploitation du gisement de fer de BK).

De notre part et afin de servir l'objet de notre étude six échantillons de poussières énumérés (P1 ; P2 ; P3 ; P4 ; P5 et P6) ont été préparés en vue de les faire passer en UV-V et SAA (la préparation est présenté sur la partie séchage ; les quantités de ses poussières ; les emplacements de leur collecte sont indiqués sur le tableau (II.1) Présenté ci-dessous.

**Tableau II.1. : Donnée des échantillons des poussières préparés**

Numéro de l'échantillon	Quantité de l'échantillon (g)	Emplacement de collecte
P1	78	S2
P2	96.7	1060 in
P3	107.65	Route d'exploitation
P4	98	O3
P5	107	N1
P6	96.6	E4

### II.2.3. Préparation des échantillons reçus :

#### II.2.3.1. Quartage :

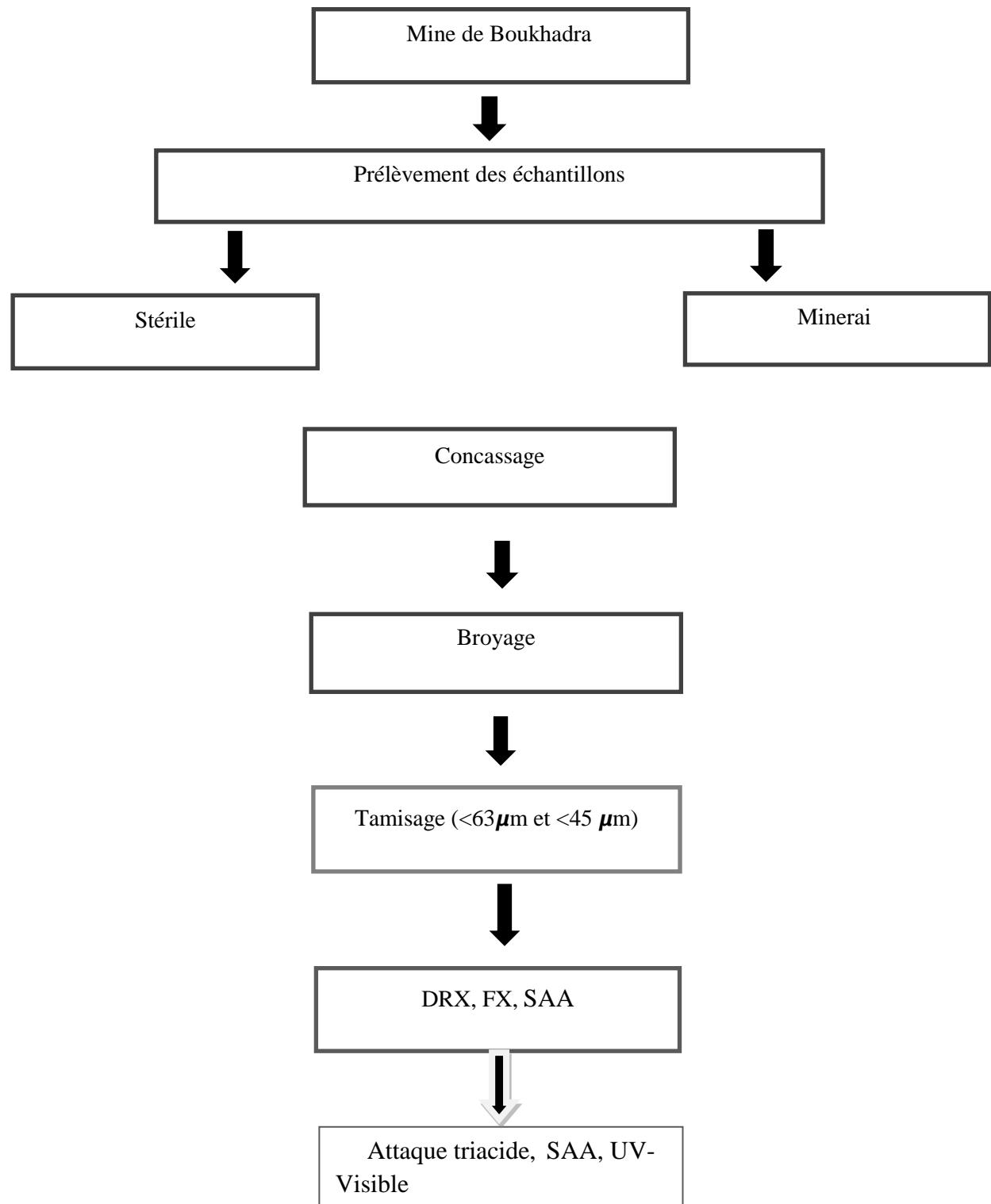
Lors de la réception de l'échantillon brut, la première étape consiste à procéder à une homogénéisation complète pour garantir une distribution uniforme des constituants. Ensuite, l'échantillon est divisé par quartage, une méthode qui permet d'obtenir des sous-échantillons représentatifs tout en minimisant les variations.

Le processus de quartage se déroule comme suit :

- a) **Homogénéisation de l'échantillon** : L'échantillon brut est soigneusement mélangé pour assurer une répartition uniforme des particules.
- b) **Division par quartage** : L'échantillon homogénéisé est divisé en quatre parts égales à l'aide d'un diviseur de quartage. Cette étape est répétée plusieurs fois pour obtenir des sous-échantillons de taille appropriée.
- c) **Sélection des sous-échantillons** : Parmi les parties obtenues, une ou plusieurs sont sélectionnées pour les étapes de préparation ultérieures.
- d) **Fragmentation** : Les sous-échantillons sélectionnés sont ensuite soumis à des procédés de fragmentation pour réduire la taille des particules et les préparer pour les analyses ultérieures.

#### II.2.3.2. Mineraï et stérile :

Les échantillons ont été traités au laboratoire du département de génie minier, où un processus de préparation est suivi. Ce processus, illustré dans la figure (II.1), comprend les étapes de concassage, de broyage, ainsi que l'analyse physico-chimique (DRX, FX, SAA, Attaque triacide, UV-V) des échantillons de mineraï et de stérile



**Figure II.1 :** schéma du Protocole De Présentation Du Minerai et Stérile De Boukhadra.

### II.2.3.3. Concassage :

Le concassage constitue la première étape du processus de fragmentation, généralement réalisée par voie sèche, et vise à diminuer la taille du mineraï. Cette phase de traitement prépare le mineraï pour une réduction granulométrique ultérieure (broyage) ou pour passer directement aux étapes de classification et/ou de concentration. En général, elle ne produit pas de résidus. [29]

Cette opération est effectuée au laboratoire de génie de procédés du département génie des procédés au niveau de l'université de Bejaia.

Le concassage des échantillons étudiés a été assuré par un concasseur à mâchoire de type FRITSCH, il permet une réduction des morceaux jusqu'à une dimension de 1 mm, le concasseur est représenté sur la figure ci-dessous :



**Figure II.2 :** image du Concasseur à mâchoire de laboratoire.

### II.2.3.4. Broyage :

Le broyage représente la dernière étape du processus de fragmentation, il peut être réalisé par voie sèche et ou par voie humide. Il consiste à diviser un solide afin d'augmenter sa surface spécifique, et ce, jusqu'à atteindre la maille de libération du mineraï. [30] Les échantillons ont été broyés manuellement à l'aide d'un mortier, et pour certains échantillons de sol, le broyage a été réalisé avec un broyeur à billes pendant 30 minutes, suivi d'une poursuite manuelle du broyage jusqu'à obtention de la granulométrie souhaitée.



**Figure II.3 :** image d'un broyeur à billes.



**Figure II.4 :** image d'un Mortier.

#### II.2.3.5. Tamisage :

Le tamisage est un procédé de séparation des particules d'un matériau en fonction de leur taille à l'aide d'un tamis ou d'une série de tamis. Ce procédé permet de trier et de classer les particules en fonction de leurs dimensions, en retenant celles qui sont plus grandes que les ouvertures du tamis et en laissant passer les plus petites.

L'analyse granulométrique des échantillons est effectuée sur un tamis de dimension de 63  $\mu\text{m}$  et 45  $\mu\text{m}$ .

- **Sol :**

Les échantillons de sol ont été broyés manuellement à l'aide d'un mortier, puis passés à travers un tamis métallique avec une maille inférieure à 65 µm et inférieure à 45µm. Ensuite, ces échantillons ont été placés dans du papier aluminium, puis dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. La figure ci-dessous illustre les étapes de préparation du sol. Enfin, une série d'analyses physico-chimique (DRX, FX et SAA et attaque triacide en vue d'une UV visible) sera réalisée sur ces échantillons. Les analyses DRX et FX, UV-V ont été effectuées au PTAPC entre autre le laboratoire de physique. Tandis que l'analyse SAA a été menée à l'ORGM de Boumerdes.



**Figure II.5 :** illustration de la Préparation des échantillons de sol.

#### II.2.3.6. Séchage de nos échantillons de poussières :

Pour garantir l'intégrité de nos échantillons de poussières, qui avaient été soigneusement prélevés et conservés, nous avons suivi un protocole de séchage. Tout d'abord, les échantillons ont été placés dans une étuve pendant six heures afin d'éliminer toute trace d'humidité, assurant ainsi leur état optimal pour les analyses ultérieures. Après cette étape de séchage, les échantillons ont été transférés dans des boîtes en plastique soigneusement paraffinées pour prévenir toute contamination éventuelle.

## II.3. Méthodes d'analyse :

Les analyses des différentes fractions granulométriques broyées obtenues par tamisage ont été effectuées par fluorescence X au laboratoire de physique. La diffraction des rayons X et UV Visible ont été réalisée au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-chimiques (PTAPC) siégeant à l'Université de Bejaïa, et la spectrométrie d'absorption atomique a été menée à l'Office National de la Recherche Géologique et Minière de Boumerdès.

### II.3.1. DIFFRACTION PAR RAYONS X (DRX) :

La Diffraction des Rayons X (DRX ou XRD) est une technique d'analyse qui permet d'étudier les différentes phases de matières et matériaux cristallins en donnant des informations quantitatives que l'on retrouve dans l'arrangement des éléments d'un matériau ainsi que qualitatives qui nous permet d'identifier les différents composés cristallins et leur formes cristallographiques.

Si l'appareil de mesure est photographique, on l'appelle chambre de diffraction ; et si elle contient un système de comptage de photons, on l'appelle diffractomètre. Les données obtenues forment un diagramme de diffraction.

La technologie de diffraction des rayons X est généralement utilisée dans les domaines de la céramique, de la géochimie, de la métallurgie, de la médecine et dans d'autres domaines.

#### II.3.1.1. PRINCIPE D'ANALYSE :

Après avoir finement broyé l'échantillon nous l'installons sur un porte échantillon adéquat.

L'échantillon est ainsi soumis à un faisceau de rayons X pour être diffractés par les plans réticulaires des phases cristallines présentes. La relation entre l'angle du faisceau diffracté et la distance réticulaire séparant les plans d'atomes dans un réseau cristallin est représenté par la loi de Bragg :  $n\lambda = 2ds\sin\theta$

D'où

$\lambda$  : longueur d'onde en angströms ;

$d$  : distance réticulaire en angströms ;

$\theta$  : angle de diffraction ou de réflexion en degrés.

On obtient un diffractogramme, qui sont interprétés selon les positions et les intensités des pics, ces derniers sont comparés aux fichiers de référence PDI-ICDD (Powder Diffraction File - International Center for Diffraction Data) afin d'identifier les phases minéralogiques présentes.

L'estimation semi quantitatives des phases correspondantes détectées (si c'est possible ou requis) on utilise le RIR RIR (Référence Intensité Ratio) inclus dans le logiciel HighScore Plus du fichier PDF-ICDD.

#### II.3.1.2. Conditions d'analyse :

- Diffractomètre PANalytical: XPERT-PRO, tube radiogène céramique à anticathode de cuivre, puissance du générateur à RX: 40 mA, 45 kV .
- Logiciel pour l'acquisition des données : Data Collector de PANalytical .
- Logiciel pour traitement des données : HighScore Plus de PANalytical.
- Longueur d'onde Cu K $\alpha$  [Å] : 1,5418.
- Angle de départ [ $^{\circ}$ 2Th] : 2,0000.
- Angle final [ $^{\circ}$ 2Th] : 70,0000 roche totale et 35,0000 pour les argiles orientées.
- Taille du pas [ $^{\circ}$ 2Th] : 0,0170.
- Temps du pas [s] : 87,2256.



**Figure II.6 :** image Appareil PANalytical.

### II.3.2. Fluorescence X (FX) :

La fluorescence X est une caractéristique spectrale des atomes utilisée en analyse pour identifier qualitativement la composition élémentaire de divers mélanges. Cette méthode est non destructive et ne requiert pas de préparation d'échantillons, seules les petites dimensions des échantillons peuvent nécessiter une adaptation du porte-échantillon. La configuration de certains appareils, qui permettent de travailler très près de l'échantillon, constitue un avantage notable, notamment lorsque l'échantillon est de petite taille.

#### II.3.2.1. Principe de l'analyse :

L'échantillon séché et pressé est utilisé pour analyser les éléments majeurs et traces. La pastille obtenue est exposée à une source de rayonnement X primaire, ce qui provoque l'excitation des atomes. Ces derniers émettent ensuite un rayonnement X secondaire de fluorescence, révélant la composition chimique caractéristique de l'échantillon à analyser.

### II.3.3. la spectrométrie d'absorption atomique (SAA) :

La spectrophotométrie d'absorption atomique est essentiellement une méthode d'analyse quantitative, qui convient beaucoup plus à la détermination des teneurs en éléments traces. Elle présente de nombreux avantages: haute sensibilité, grande spécificité, influence négligeable de la composition du milieu analysé (moins d'interférences), rapidité, faible quantité de solution nécessaire (1 ml de la solution peut suffire) et facilité de préparation des solutions étalons. [31]

Le spectrophotomètre utilisé au cours de cette étude est un spectrophotomètre de marque SHIMADZU de modèle 8500 piloté par un ordinateur à lecture directe des absorbances et des concentrations des échantillons analysés. Les échantillons sont analysés à la longueur d'onde maximale  $\lambda_{\max}$  correspondant au maximum d'absorption de chaque élément, telles que celles-ci sont connues pour chaque élément à doser, sous une température de flamme d'air/acétylène de l'ordre de 2500°C.

Les résultats des concentrations des échantillons, en différents éléments chimiques, sont obtenus grâce à l'établissement d'une courbe d'étalonnage avant chaque analyse. Les échantillons les plus concentrés sont dilués avant leur dosage. [32]



**Figure II.7 :** image Spectromètre d'absorption atomique.

#### **II.3.4. Attaque Triacide :**

##### **III.3.4.1 Détermination des compositions chimiques des poudres étudie**

Afin de déterminer les compositions chimiques de nos échantillons, et de faire une comparaison par rapport aux résultats théoriques, on a utilisé la méthode de la mise en solution par attaque avec la méthode triacide ( $\text{HCl-HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$ ). [33]  
Parmi les éléments analysés, nous avons ciblé en majeur partie les oxydes :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,

##### **III.3.4.2 La mise en solution par attaque triacide**

Afin de réaliser l'analyse chimique de nos échantillons, nous devons procéder à la mise en solution de chaque échantillon pour avoir une dissolution complète de ces dernières.[33]

Nous appliquons une méthode très efficace de mise en solution des silicates d'aluminium, qui est l'attaque triacide ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), permettant de solubiliser pratiquement tous les minéraux tels que les argiles, les feldspaths, les carbonates, etc. Sauf  $\text{SiO}_2$  du quartz.

#### **A. Les réactifs**

- $\text{HCl}$  à 37,5%.
- $\text{HNO}_3$  concentré.
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré.
- $\text{HCl}$  dilué (10%).

#### **B. Protocole de mise en solution triacide**

Pour cette attaque, les mêmes étapes ont été suivies pour l'analyse de tous nos échantillons :

-Mettre 0.5g d'échantillon préalablement séché à 105C° pendant 24 h dans un bêcher de 250ml.



**Figure II.8 :** image de la Pesée d'un échantillon de 0,5 g à l'aide d'une balance de précision.

- Ajouter 10ml de HNO<sub>3</sub>, 5ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> puis 15ml de HCl concentré (2/1/3).



**Figure II.9 :** image de la Préparation des acides pour la méthode d'attaque triacide sous hotte aspirante.

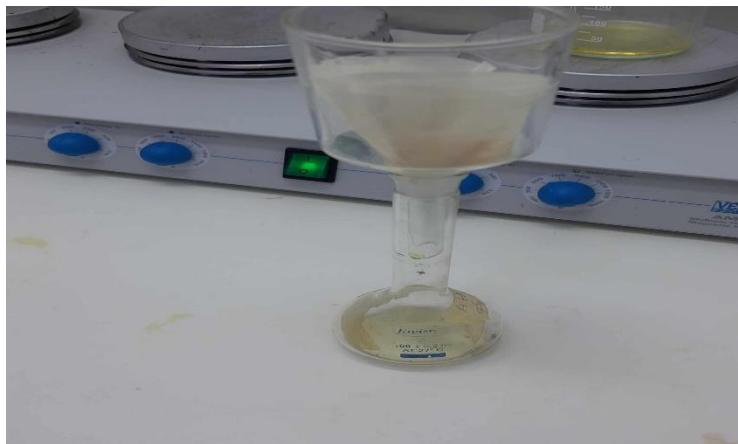
-Mettre le bêcher sur une plaque chauffante et laisser évaporer à sec ou bien dans un matras d'un appareil de Kjeldahl (appareil de minéralisation) à 100°C-150°C .



**Figure II.10 :** image du Chauffage de l'échantillon après ajout des acides.

-Reprendre par 10ml de HNO<sub>3</sub>, 5ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> puis 15ml de HCl concentré et laisser évaporer à sec pour une seconde fois.

-Ajouter ensuite 10ml de HCl à 10% et filtrer dans une fiole de 100ml



**Figure II.11:** image de la filtration du mélange obtenu dans une fiole.

- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

### III.3.4.3 Méthodes d'analyse des éléments chimiques

#### a) Dosage par gravimétrie

cette méthode est utilisée pour la quantification des éléments insolubles (SiO<sub>2</sub> du quartz) grâce à la pesée avec une précision de  $\pm 0,1\text{mg}$ , de la masse des échantillons de poudre avant mise en solution, et après séchage des résidus après l'attaque triacide. La différence des masses par rapport à la masse de la prise d'essai, aboutit à la détermination du taux de SiO<sub>2</sub> insoluble (quartz) et en l'occurrence à la composition en silice. De plus, lorsque cette teneur est additionnée de celle de SiO<sub>2</sub> solubilisée (quartz soluble, argiles et feldspaths), qui sera déterminée ultérieurement par spectrophotométrie, on obtient la teneur globale en SiO<sub>2</sub> de chacun des échantillons mis en solution. [34]

#### b) Dosage par spectrophotométrie UV-visible

La spectrophotométrie UV-visible est utilisée pour doser les cations présents en solution, lorsque ces derniers sont capables d'absorber des photons, dans la gamme de longueurs d'onde balayée de 400nm à 800nm située dans le domaine du visible. [35]

Cette technique sera appliquée pour déterminer les compositions chimiques, en aluminium, en silice (solubilisé), et en chrome total sous forme de chrome hexa valent des échantillons étudiés

Le spectrophotomètre utilisé au cours de cette étude est un appareil à mono faisceau de marque UVSCAN 50, piloté par un ordinateur à lecture directe des densités optiques: une source de lumière de radiations du visible est émise en direction de la chambre d'analyse, dans laquelle est disposée une cuve contenant la solution de l'échantillon à doser. Un monochromateur placé dans le trajet optique, permet de sélectionner une longueur d'onde spécifique du rayonnement absorbé par l'élément à doser, grâce à un réseau de diffraction. Une subdivision du faisceau incident par réflexion sur deux miroirs distincts, aboutit à la séparation en deux faisceaux. L'un est dirigé vers la cuve de référence contenant seulement le solvant (ou le blanc), l'autre traverse l'échantillon à analyser **A.** [36]

Deux photorécepteurs permettent de mesurer l'intensité lumineuse de chacun des deux faisceaux. L'absorbance (A) de la solution est ensuite calculée à partir de l'équation :

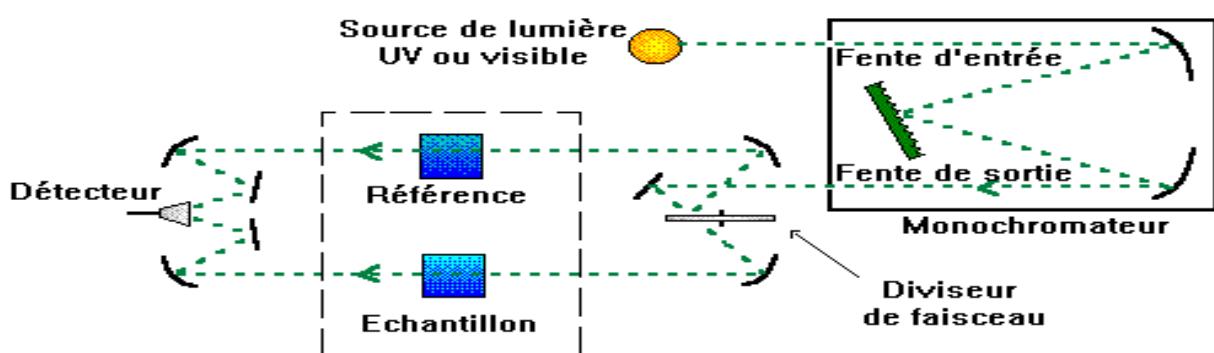
$$A = -\log\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

$I_0$ : l'intensité du faisceau de référence ou incident

$I$  : l'intensité transmise au détecteur du faisceau traversant l'échantillon.

Les échantillons sont analysés à la longueur d'onde maximale  $\lambda_{\max}$  correspondant au maximum d'absorption de l'élément. La valeur de  $\lambda_{\max}$  est déterminée après balayage en longueurs d'ondes de la région du spectre comprise entre 400 et 800 nm, effectué sur un échantillon en solution (BAGHDAD. [35]

Les résultats des concentrations des différents échantillons en éléments chimiques, sont obtenus grâce à l'établissement au préalable d'une courbe d'étalonnage propre à chaque élément analysé. Les échantillons les plus concentrés sont dilués avant leur dosage. Le seuil limite de détection dépend du type d'élément et de la méthode de dosage. Pour l'UV-Visible, il est rare de pouvoir des éléments à l'état de trace, les éléments décelables doivent avoir des teneurs de l'ordre de quelques ppm (mg/l).



**Figure II.12:** illustration du principe de fonctionnement d'un spectromètre d'absorption UV visible.

## II.4. Conclusion

L'échantillonnage et l'analyse des échantillons géologiques sont des éléments essentiels dans les études géologiques, minières et environnementales. Ces processus permettent d'obtenir des données précises et représentatives sur la composition chimique, la structure et les propriétés des minéraux et des sols, fournissant ainsi une base solide pour la prise de décisions dans le domaine de l'exploration minière. Les techniques d'analyse modernes telles que la DRX et la fluorescence X, la spectrométrie d'absorption atomique et l'attaque triacide offrent des outils puissants pour caractériser les échantillons géologiques avec une grande précision, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des processus géologiques et à une exploitation plus efficace et durable des ressources minérales.

---

## *CHAPITRE III*

# *RESULTATS ET DISCUSSIONS*

---

### **III.1. Introduction**

L'analyse approfondie des échantillons prélevés sur le site de la mine de fer de Boukhadra est essentielle pour comprendre sa composition minéralogique et chimique. Ce chapitre présente les résultats de différentes techniques d'analyse telles que la DRX, la FRX, la SAA, l'Attaque triacide et l'UV visible. Ces résultats, présentés à travers des diffractogrammes, histogrammes et tableaux, sont clairement organisés pour faciliter leur compréhension et leur utilisation dans l'étude environnementale.

### **III.2. Présentation et interprétation des résultats d'analyse obtenus par la diffraction des rayons X :**

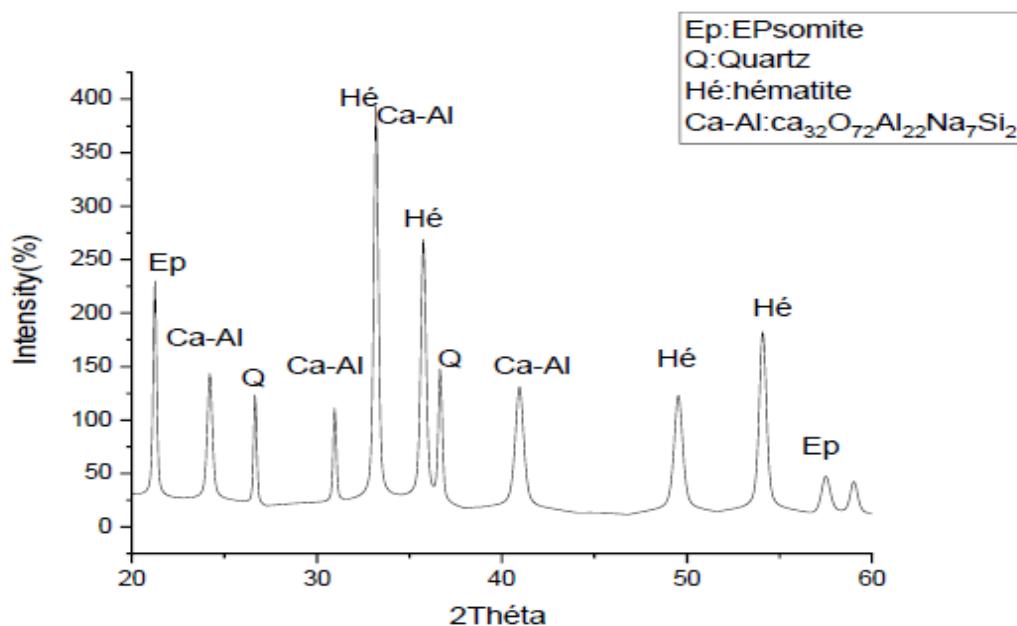
#### **III.2.1.présentation des résultats DRX**

La caractérisation minéralogique qualitative des différents échantillons, réalisée par diffraction des rayons X (DRX), a été menée pour atteindre trois objectifs : quantifier les phases composantes ou dominantes de notre mineraï, les identifier, et les utiliser comme base de données comparatives. Cela permet de vérifier leur présence dans les composantes environnementales afin de confirmer l'impact et l'étendue, quelle que soit leur ampleur. Nous estimons que ces objectifs ont été atteints :

Le diffractogramme des résultats d'analyse de l'échantillon de mineraï de fer de Boukhadra, illustré dans la figure III.01, révèle que cet échantillon est principalement composé de quatre phases minérales majeures, comme indiqué dans le tableau III.01 :

**Tableau III.01 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon mineraï de fer.

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,17 35,64 49,47 54,1
Epsomite	MgSO <sub>4</sub> · 7(H <sub>2</sub> O)	21,12 58,98
sodium d'aluminium et d'oxyde de calcium	Ca <sub>32</sub> O <sub>72</sub> Al <sub>22</sub> Na <sub>7</sub> Si <sub>2</sub>	40,90
Quartz	SiO <sub>2</sub>	26,68 36,66

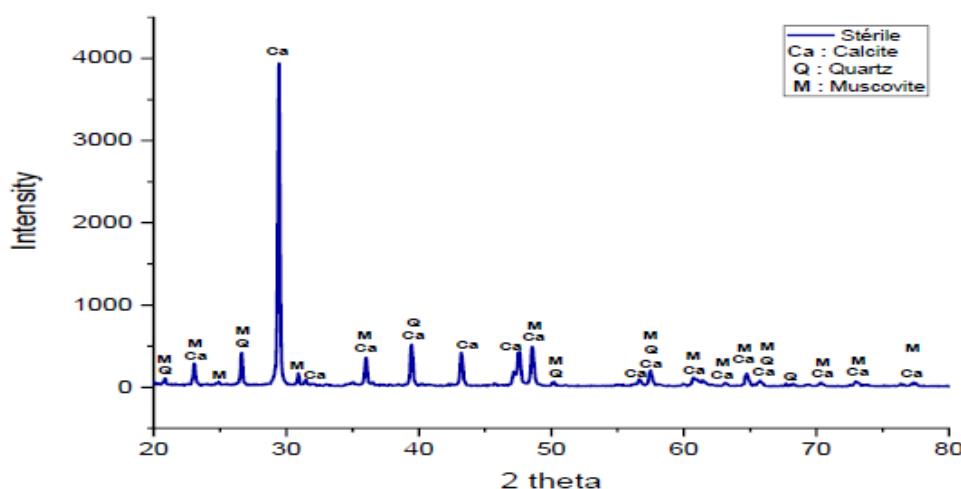


**Figure III.1 :** Le diffractogramme de l'échantillon minéral de fer.

**Stérile :**

**Tableau III.02 :** caractérisation minéralogique de l'échantillon stérile :

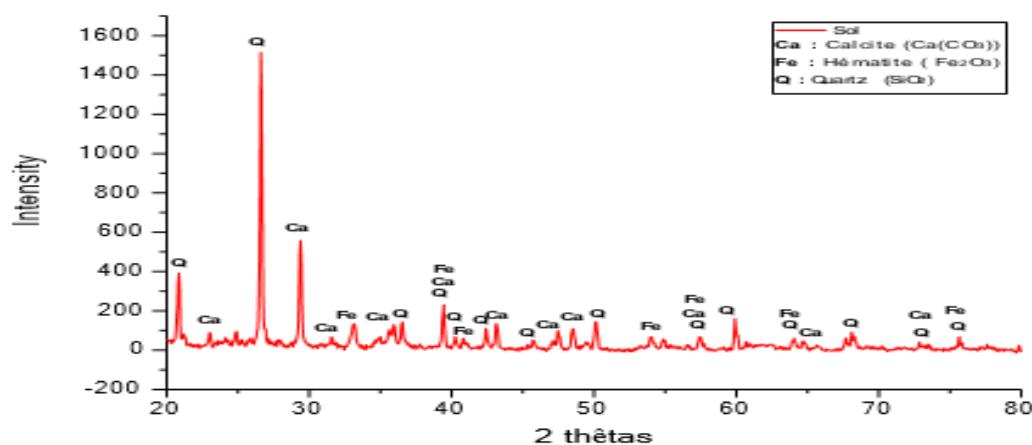
Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêtas
Calcite	$\text{CaCO}_3$	23.20 ; 31.10 ; 36.09 ; 42.96 ; 47 ; 48 ; 64.26
Quartz	$\text{SiO}_2$	21.02 ; 26.42 ; 50.12 ; 68.53
Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{OH}, \text{F})$	39.42 ; 57.40 ; 77.36



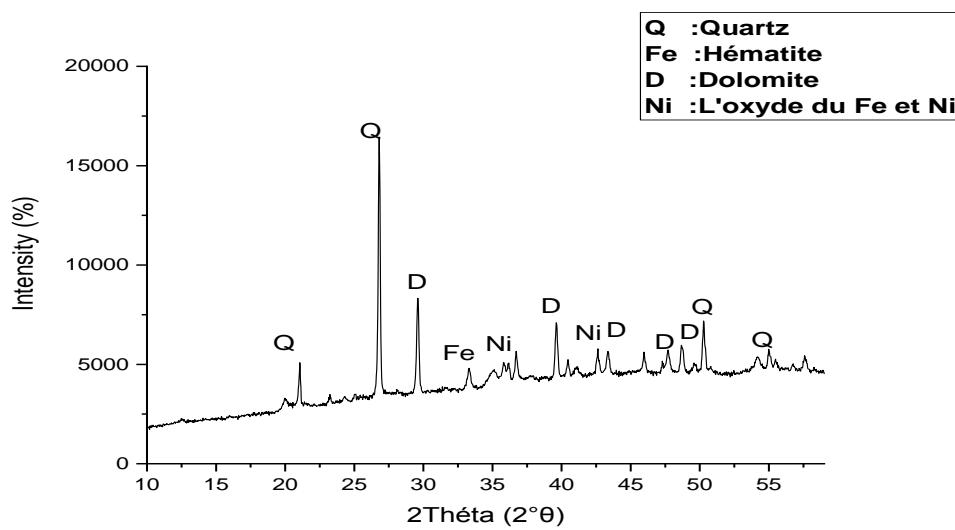
**Figure III.2 :** Le diffractogramme de l'échantillon de stérile

**Sol :****Échantillon S1030 (in-situ)****Tableau III.03 : Caractérisation minéralogique de l'échantillon S.1030 :**

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 théta
Calcite	Ca CO <sub>3</sub>	23.41 ; 29.34 ; 47 ; 48
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.18 ; 41.09 ; 54.08 ; 54.64.47
Quartz	SiO <sub>2</sub>	21.02 ; 26.63 ; 45.76 ; 50.23 ; 60.21 ; 68.21

**Figure III.3 : Le diffractogramme de l'échantillon S. 1030 in****N1 sol :(out situ)****Tableau III.04 : caractérisation minéralogique de l'échantillon S.**

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 théta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.30 ; 33.28 ; 35.74 ; 40,97 ; 54,23 ; 57,72
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,95 ; 26,74
Dolomite	MgCa(CO <sub>3</sub> )	29,55 ; 39,60 ; 43,36 ; 48,76
Oxyde de Nikel iron.	Fe <sub>1/6</sub> Ni O <sub>4</sub> Sc <sub>0,4</sub>	35,10 ; 42,61

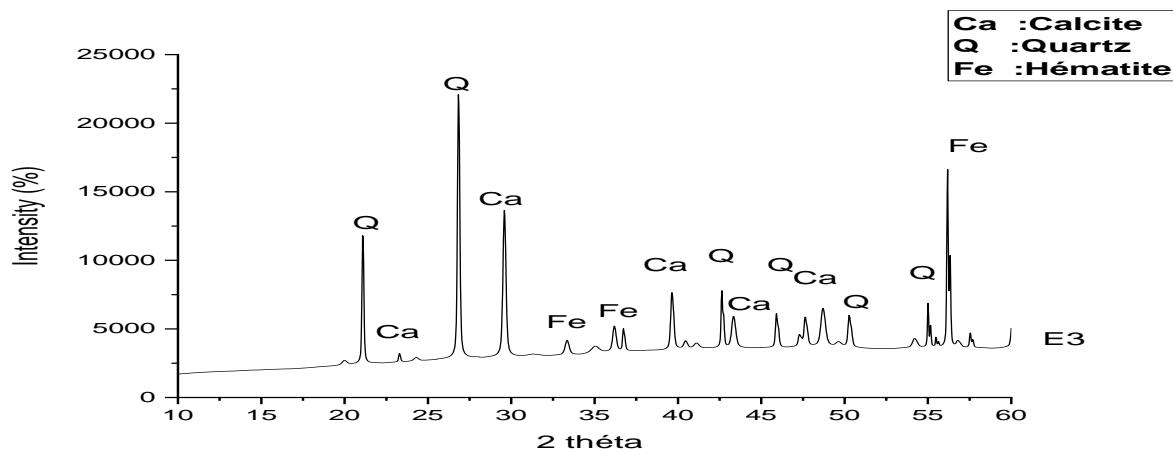


**Figure III.4:** Le diffractogramme DRX de l'échantillon N1

E3 sol (out situ)

**Tableau III.05 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon S. E3 :

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,28 35,74
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,96 26,75
Carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	23,40 29,74 39,61

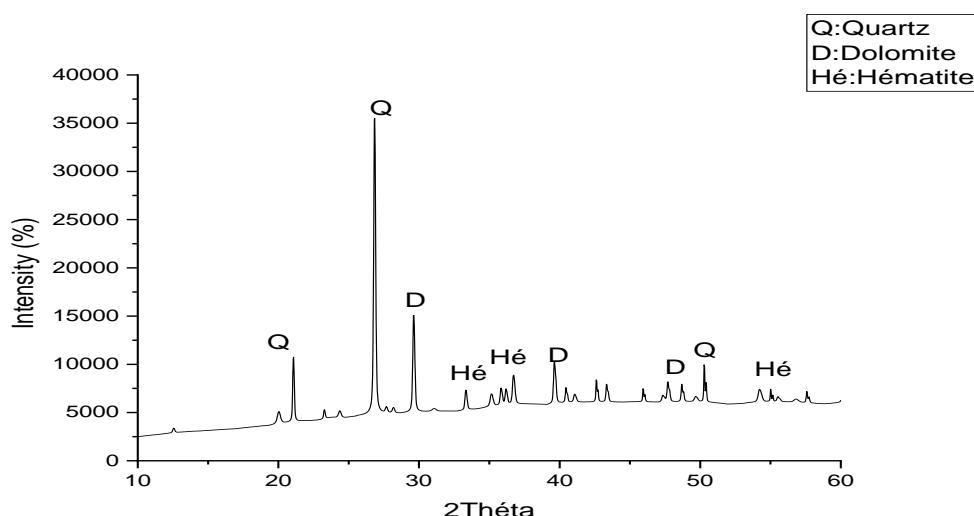


**Figure III.5:** Le diffractogramme DRX de l'échantillon E3

## O2 sol (out situ)

**Tableau III. 06 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon S. O2 :

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,30 35,79 54,32
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,99 26,81 50,92
Dolomite	MgCa(Co <sub>3</sub> )	29,55 39,46 47,78 48,75

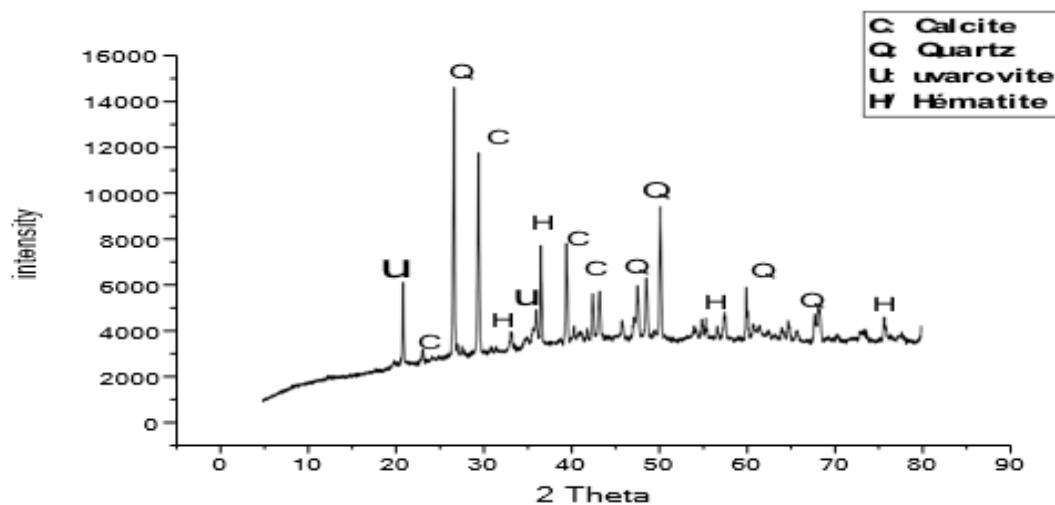


**Figure III.6 :** Le diffractogramme de l'échantillon S.O2 out.

## O3 sol (out situ)

**Tableau III.07 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon S. O3 :

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Calcium Magnésium	(MgCa)(CO <sub>3</sub> )	23.29 ; 29.4 ; 43.55 ; 39.72
Quartz	SiO <sub>2</sub>	26.63 ; 45.75 ; 50.16 ; 68 ; 50.57 ; 60.17
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.19 ; 36.47 ; 57.56
Uvarovite	(Ca Mn)(Cr Al Fe Ti)Si O	21 ; 36.66

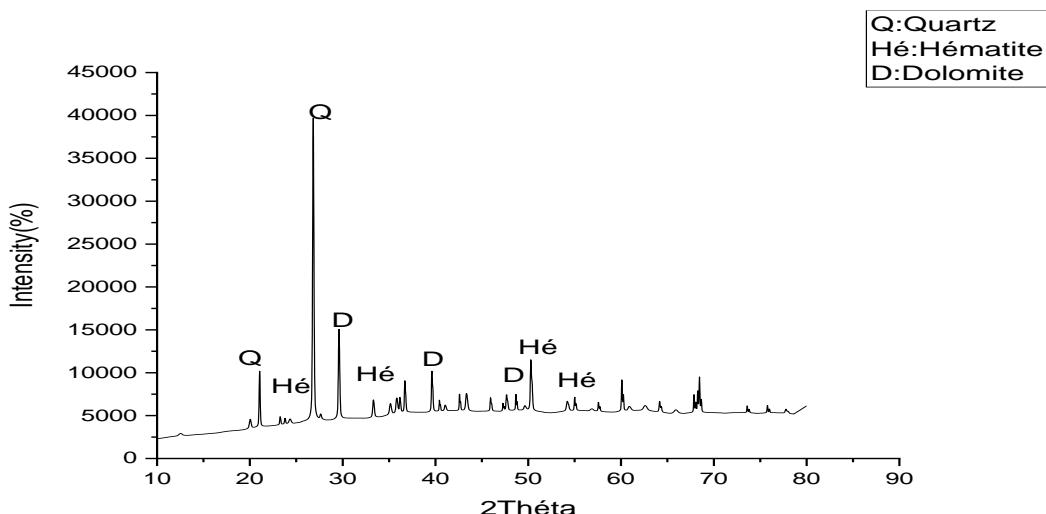


**Figure III.7 :** Le diffractogramme de l'échantillon S.O3 out.

### S2 sol (out situ)

**Tableau III.08 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon S.S2 :

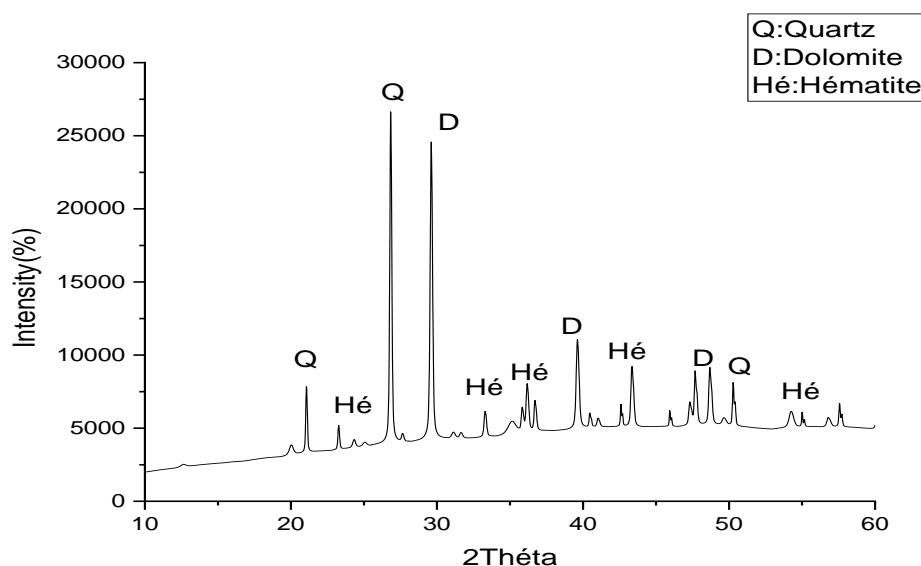
Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,30 33,28 35,74 54,23
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,95 26,75
Dolomite	MgCa(CO <sub>3</sub> )	29,55 39,60 47,78 48,75



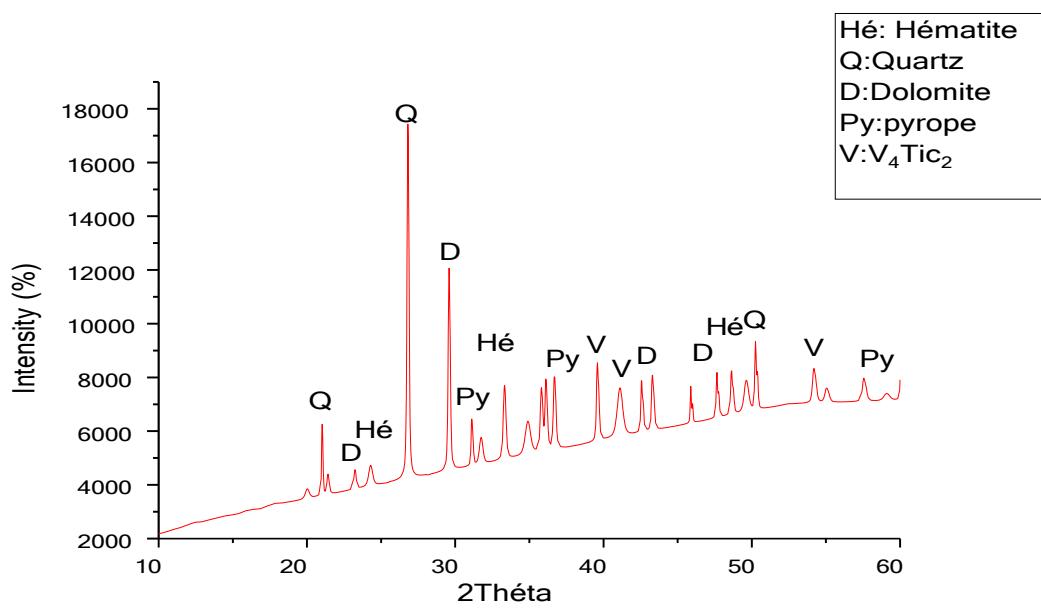
**Figure III.8 :** Le diffractogramme de l'échantillon S.S2 out.

**S3 sol (out situ)****Tableau III. 09 :** caractérisation minéralogique de l'échantillon S.S3 :

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,30 33,28 35,74 54,23
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,99 26,81 50,92
Dolomite	MgCa(CO <sub>3</sub> )	29,55 39,60 47,78 48,75

**Figure III.9 :** Le diffractogramme de l'échantillon S.S3 out.**Poussière concasseur (in-situ)****Tableau III. 10 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon Poussière concasseur in.

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,22 33,22 49,62
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,96 26,75 50,35
Dolomite (calcite manganésienne)	MgCa(CO <sub>3</sub> )	23,16 29,55 43,36
Vanadium titanium	VTiC <sub>2</sub>	39,20 41 54,15
Pyrope	Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	31 39,20 57,73

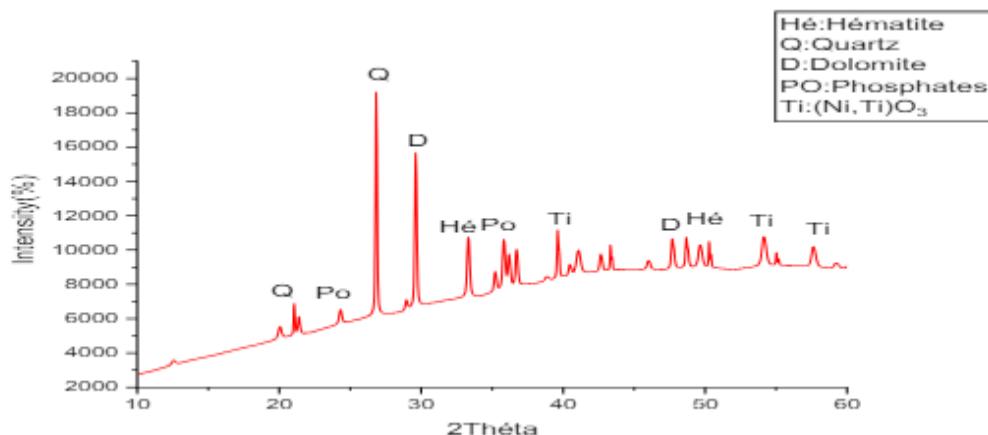


**Figure III. 10 :** Le diffractogramme de l'échantillon poussiéreux concasseur in.

#### Poussière route d'exploitation 1030 (in situ)

**Tableau III.11 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon poussiéreux 1030.

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite hydraté	Fe <sub>10,56</sub> H <sub>0,36</sub> O <sub>18</sub>	33,30 41 49,69
Dolomite	CaMgCO <sub>3</sub>	29,55 39,60 48,75
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,95 26,75 50,35 36,72
Phosphate sodium et cobalt	NaCo(PO <sub>4</sub> )	35,72 37 49,59
Oxyde de Nikel et titane	(Ni, Ti)O <sub>3</sub>	24,13 53,55

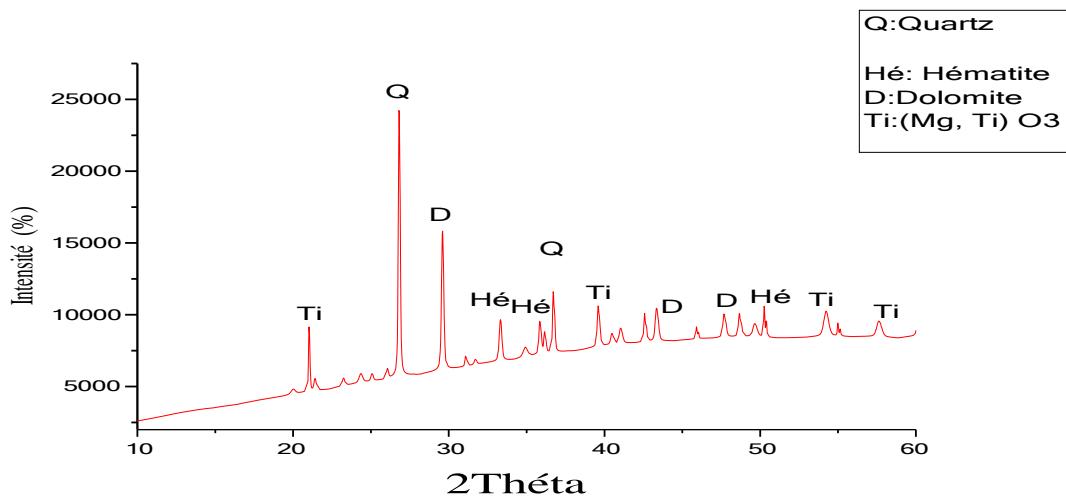


**Figure III.11:** Le diffractogramme de l'échantillon poussiéreux 1030 in.

### Poussière 2000 (out situ)

**Tableau III.12 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon poussière 2000.

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	$\text{Fe}_{10,56} \text{H}_{0,36} \text{O}_{18}$	34.2 ; 36.05 ; 50
Dolomite	$\text{CaMgCO}_3$	30.10 ; 45 ; 47 ; 48
Quartz	$\text{SiO}_2$	26.02 ; 38.10
Oxyde de titane et de magnésium	$(\text{Mg.Ti})\text{O}_2$	21.5 ; 39 ; 40.09 ; 55 ; 59.02

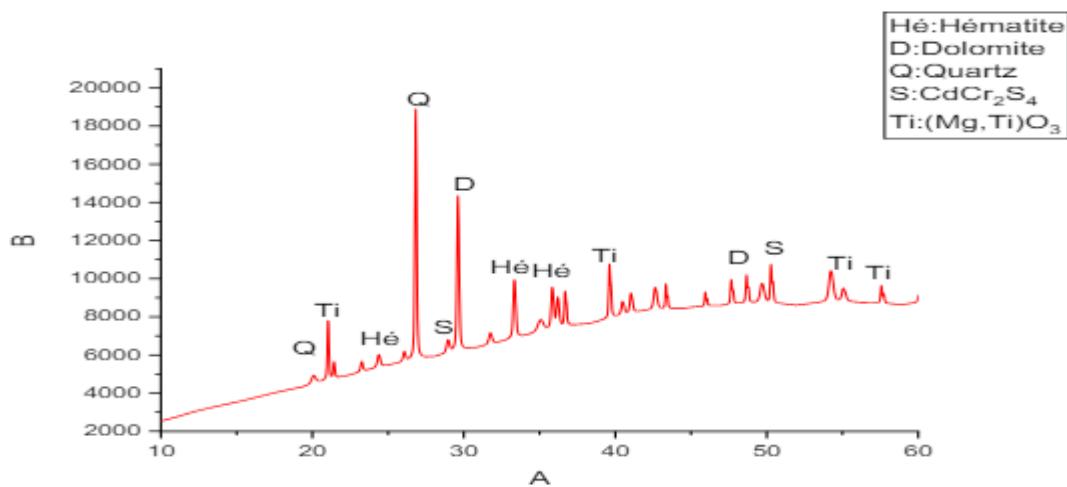


**Figure III .12 :** Le diffractogramme de l'échantillon poussière 2000 out.

### Poussière 1000 (out situ)

**Tableau III. 13 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon poussière 1000.

Nom de la phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Hématite	$\text{Fe}_{10,56} \text{H}_{0,36} \text{O}_{18}$	34.2 ; 36.05 ; 50
Dolomite	$\text{CaMgCO}_3$	30.10 ; 45 ; 47 ; 48
Quartz	$\text{SiO}_2$	20.10.26.02 ; 38.10
Oxyde de titane et de magnésium	$(\text{Mg.Ti})\text{O}_2$	21.5 ; 39 ; 40.09 ; 55 ; 59.02
Composé : cadmium chrome sulfure	$\text{Cd Cr}_2\text{S}_4$	39.1. 52.12



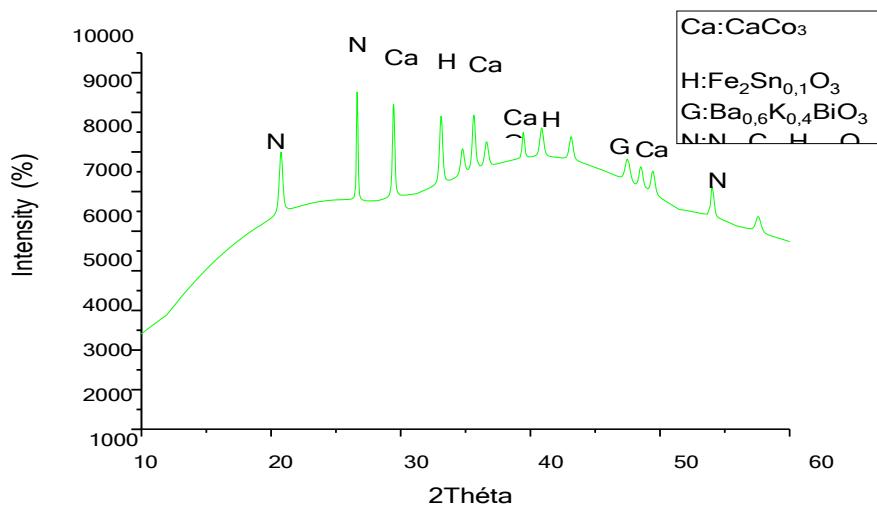
**Figure III.13 :** Le diffractogramme de l'échantillon poussières .1000 out.

**Plante :**

**1030 plantes (in situ)**

**Tableau III. 14 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. 1030.

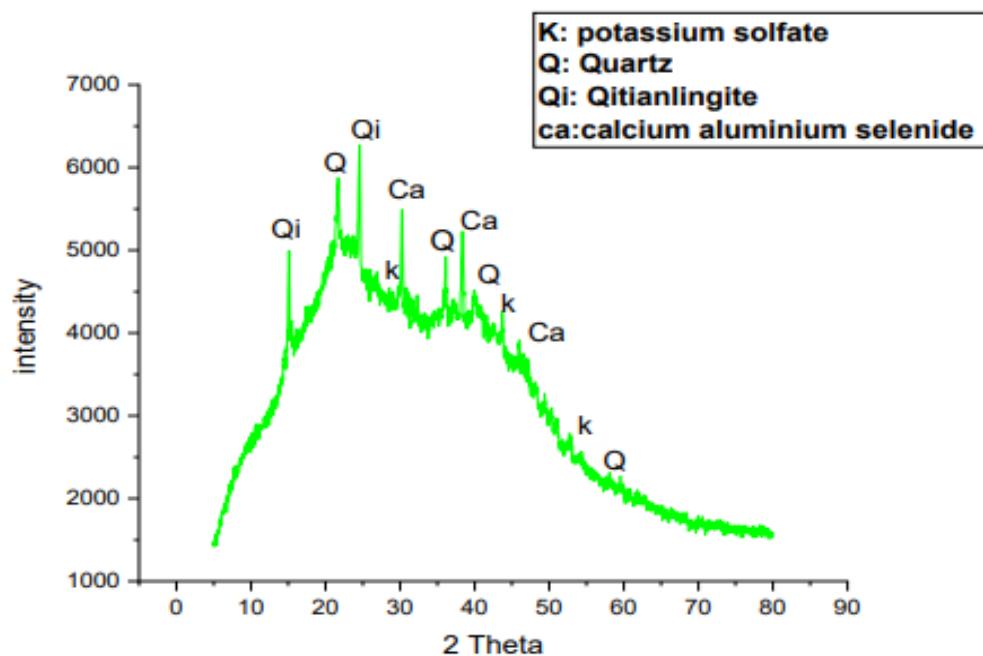
Nom de phase	Formule chimique	Angle 2θ
Iron Tin Oxyde	Fe <sub>2</sub> Sn <sub>0,1</sub> O <sub>3</sub>	33,1 40,8 49,38
Carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	29 35 39 48
Oxyde de barium de bismuth et de potassium	Ba <sub>0,6</sub> K <sub>0,4</sub> BiO <sub>3</sub>	43 47
Pyridyl actommi	N <sub>16</sub> C <sub>88</sub> H <sub>120</sub> O <sub>24</sub>	20,68 26,64 54



**Figure III. 14 :** Le diffractogramme de l'échantillon P.1030 in.

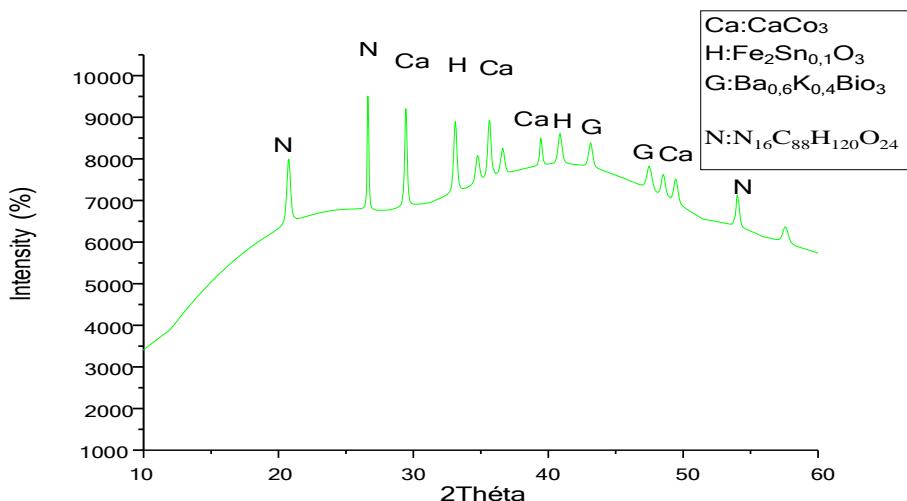
**S2 plante (out situ) :****Tableau III. 15 : Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. S2.**

Nom de phase	Formule chimique	Angle 2 theta
Calcium Aluminium Selenide	$\text{Ca Al}_2 \text{Se}_4$	16.93 ; 30 ; 38.47 ; 46.42 ; 68
Qitianlingite	$(\text{Fe Mn Sn Nb})(\text{W Nb})(\text{Nb Ta Ti})\text{O}_{10}$	15.11 ; 24.85 ; 53.15
Quartz	$\text{SiO}_2$	21.86 ; 36.27 ; 40.09 ; 58.48
Potassium Sulfate	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$	29.12 ; 44.45 ; 52

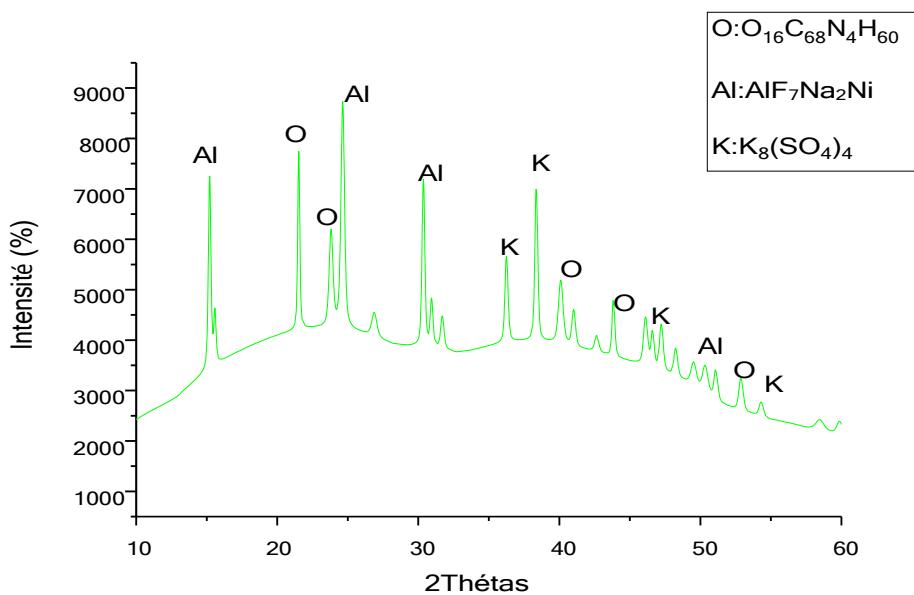
**Figure III. 15 : Le diffractogramme de l'échantillon P.S2 out.**

**S3 plante (out situ) :****Tableau III. 16 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. S3.

Nom de phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Manganacolumbite ferroan	(Mn,Fe)Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	24 35 36 69
oxyde de nickel et de fer hydraté et de carbone	N <sub>8</sub> C <sub>40</sub> O <sub>16</sub> F <sub>4</sub> H <sub>52</sub>	15,26 16,88 23,38
oxyde de potassium et oxyde de nickel	(PO <sub>4</sub> ) <sub>8</sub> NiO	14,85 28,72 34,81
hydratation de fer et de carbone	C <sub>5</sub> F <sub>6</sub> H	22,78 26,54 39,93 41,16 42,33 47,12

**Figure III. 16 :** Le diffractogramme de l'échantillon P.S3 out.**O2 plante (out situ) :****Tableau III. 17 :** caractérisation minéralogique de l'échantillon P.O2.

Nom de phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Oxygène carbonaté et hydrogène de nickel	O <sub>16</sub> C <sub>68</sub> N <sub>4</sub> H <sub>60</sub>	21,39 24,54 41 44
Sodium Aluminium Nikel Floride	AlF <sub>7</sub> Na <sub>2</sub> Ni	14,97 30,21 30 51,1
Sulfate Potassium	K <sub>8</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>	29,90 35 37 48,32 55,18

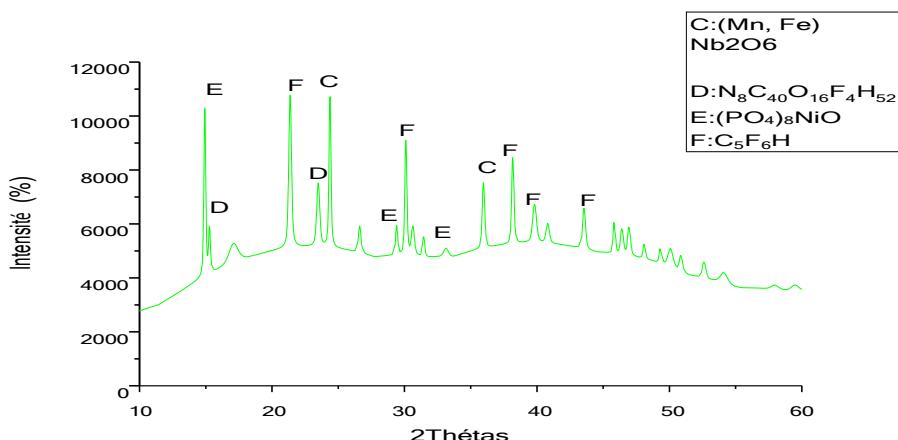


**Figure III. 17 :** Le diffractogramme de l'échantillon P.O2 out.

**O3 plante :**

**Tableau III. 18 :** Caractérisation minéralogique de l'échantillon P. O3.

Nom de phase	Formule chimique	Angle 2 thêta
Nickel carbonate barium hydrogène	$N_4C_{16}B_4H_{48}$	16,29 21,47 24,74 30
Composé : oxygène carbone potassium rubinium hydrogène nickel	$O_{304}C_{164}Rb_{32}K_{16}C_{640}H_{704}N_{384}$	14,74



**Figure III. 18 :** Le diffractogramme de l'échantillon P.O3 out.

### **III.2.2. Interprétation des résultats DRX :**

#### **Mineraï de fer (Tableau III.01 et Figure III.1) :**

Le diffractogramme révèle la présence dominante d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), confirmant la nature ferrifère du mineraï. La présence d'epsomite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) indique une composante sulfatée, tandis que le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) et le silicate complexe de sodium, aluminium et calcium suggèrent une gangue silico-alumineuse. Les pics intenses et bien définis de l'hématite témoignent d'une bonne cristallinité du mineraï.

#### **Stérile (Tableau III.02 et Figure III.2) :**

Le diffractogramme du stérile est dominé par la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), cohérent avec une roche encaissante calcaire. La présence de quartz et de muscovite indique une composante silico-alumineuse dans le stérile. L'absence de pics d'hématite confirme la nature non-minéralisée de cet échantillon.

#### **Sols (Tableaux III.03 à III.09 et Figures III.3 à III.9) :**

**Échantillon S1030 (in-situ) :** La présence simultanée de calcite, hématite et quartz suggère une influence directe du mineraï et de la roche encaissante sur le sol local.

**Échantillons out-situ (N1, E3, O2, O3, S2, S3) :** Ces échantillons montrent une variabilité dans leur composition minéralogique, reflétant la dispersion des composants du mineraï et du stérile dans l'environnement. La présence systématique d'hématite dans tous les échantillons de sol indique une contamination généralisée par le mineraï de fer. La dolomite ( $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ ) apparaît dans plusieurs échantillons, suggérant une influence de roches dolomitiques dans certaines zones. L'échantillon O<sub>3</sub> se distingue par la présence d'uvarovite, un grenat chromifère, indiquant potentiellement une source locale de chrome. [37]

**Dispersion du mineraï :** La présence d'hématite dans tous les échantillons de sol confirme une dispersion significative des particules de mineraï de fer dans l'environnement, probablement due à l'érosion éolienne et au ruissellement. [38]

**Influence de la roche encaissante :** La calcite et la dolomite dans les sols témoignent de l'influence de la roche encaissante calcaire et dolomitique sur la composition des sols environnants.

**Variabilité spatiale :** Les différences de composition minéralogique entre les échantillons de sol suggèrent une dispersion hétérogène des particules, influencée par la topographie et les conditions météorologiques locales.

**Contamination potentielle :** La présence d'uvarovite dans l'échantillon O<sub>3</sub> pourrait indiquer une contamination localisée en chrome, nécessitant une investigation plus approfondie.

**Altération des minéraux :** La présence d'epsomite dans le minerai suggère des processus d'altération et de précipitation de sulfates, potentiellement liés à l'oxydation de sulfures.

**Tableau III.10 et Figure III.10 (Poussière concasseur in-situ) :** Ce diffractogramme révèle une composition minéralogique complexe, typique d'un environnement minier :

- Hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : Sa présence dominante confirme qu'il s'agit bien de poussières issues du traitement du minerai de fer.
- Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) : Indique la présence de gangue siliceuse dans le minerai.
- Dolomite ( $\text{MgCa}(\text{CO}_3)$ ) : Suggère une composante carbonatée, probablement issue de la roche encaissante.
- Vanadium titanium ( $\text{VTiC}_2$ ) et Pyrope ( $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) : Ces minéraux moins communs pourraient indiquer des impuretés dans le minerai ou des contaminations d'autres sources géologiques locales.

L'intensité et la netteté des pics, notamment pour l'hématite, indiquent une bonne cristallinité des minéraux, ce qui est cohérent avec des poussières fraîchement produites par le concassage.

**Tableau III.11 et Figure III.11 (Poussière route d'exploitation 1030 in-situ) :** Ce diffractogramme montre une composition légèrement différente :

- Hématite hydratée : Indique une possible altération du minerai de fer.
- Dolomite et Quartz : Similaires à l'échantillon précédent, confirmant la constance de ces composants.
- Phosphate de sodium et cobalt, et Oxyde de nickel et titane : Ces composés plus rares pourraient indiquer une contamination ou des minéralisations secondaires.

La présence de formes hydratées et d'oxydes complexes suggère une interaction avec l'environnement, potentiellement due à l'exposition aux conditions atmosphériques sur la route d'exploitation.

**Tableau III.12 et Figure III.12 (Poussière 2000 out-situ) :** Ce diffractogramme montre une composition similaire aux précédents, avec quelques différences notables :

- La présence continue d'hématite, dolomite et quartz confirme la constance de ces minéraux principaux même à distance du site.
- L'oxyde de titane et de magnésium indique une possible concentration différentielle des minéraux lors du transport éolien.

**Tableau III.13 et Figure III.13 (Poussière 1000 out-situ) :**

Ce diffractogramme est très similaire au précédent, avec l'ajout d'un composé de cadmium, chrome et sulfure. Cela pourrait indiquer une contamination locale ou une variation dans la composition du minéral.

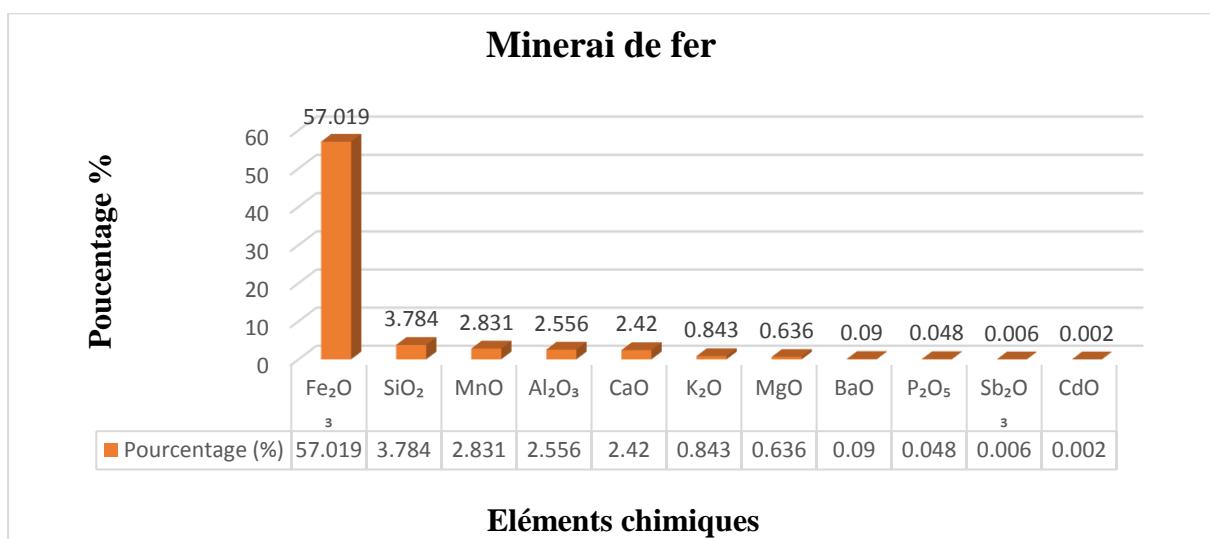
**Tableaux III.14 a III.18 et Figures III.14 a III.18 (Échantillons de plantes) :**

Ces diffractogramme montrent des compositions très différentes des échantillons de poussières et de sols :

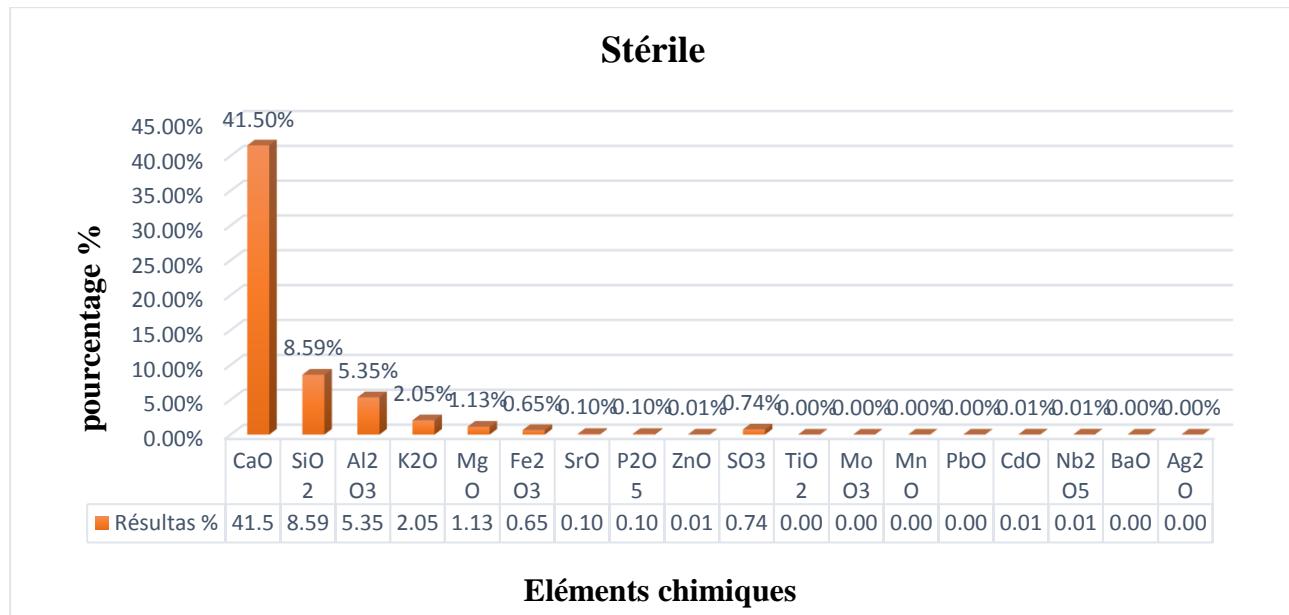
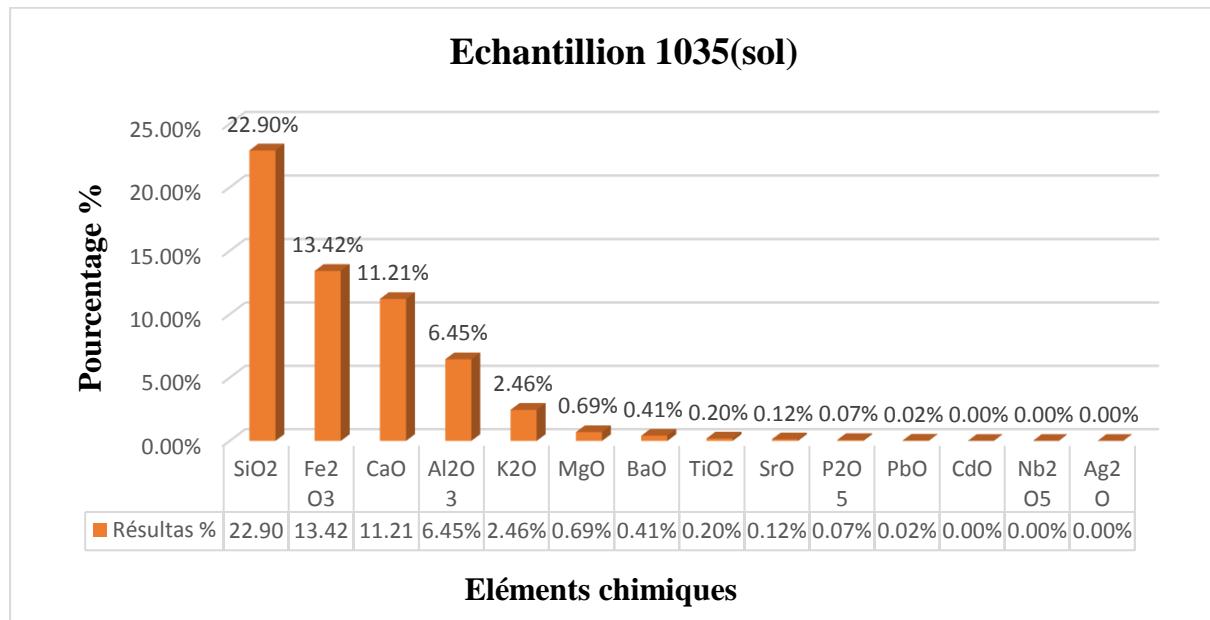
- Présence de composés organiques complexes, ce qui est attendu pour des échantillons de plantes.
- Présence de minéraux inhabituels comme des oxydes de fer-étain, des séléniums, et des composés de nickel, baryum, et bismuth.
- Absence ou faible présence des minéraux dominants dans les échantillons de sol et de poussière (hématite, quartz, calcite).

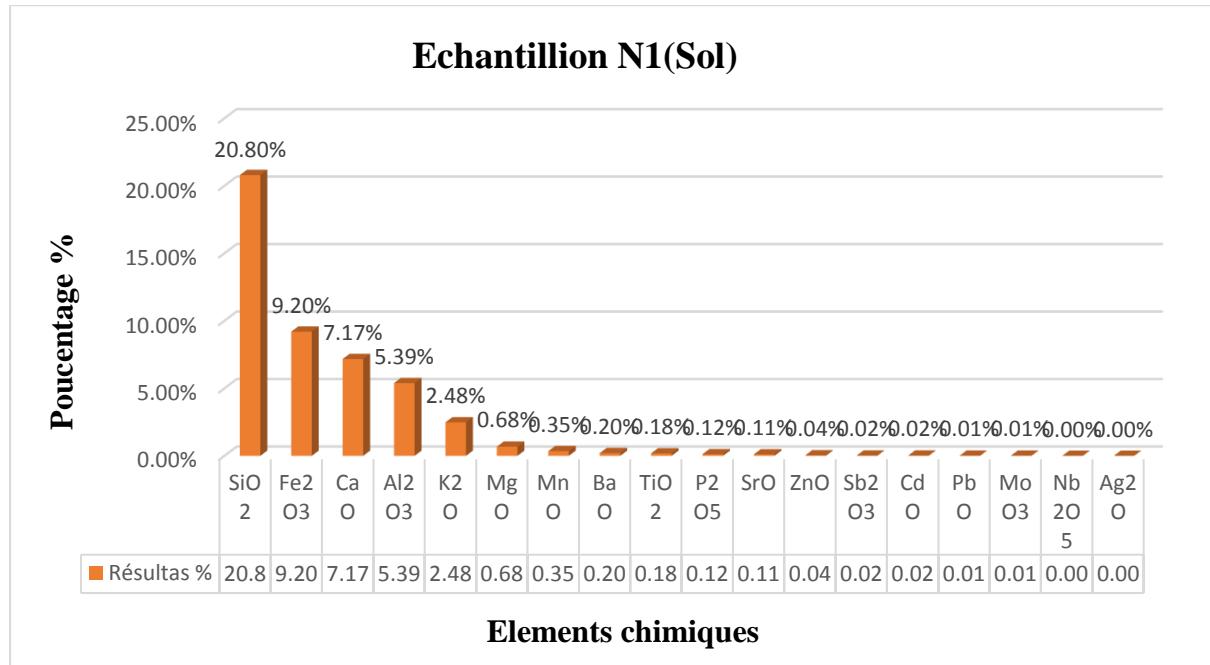
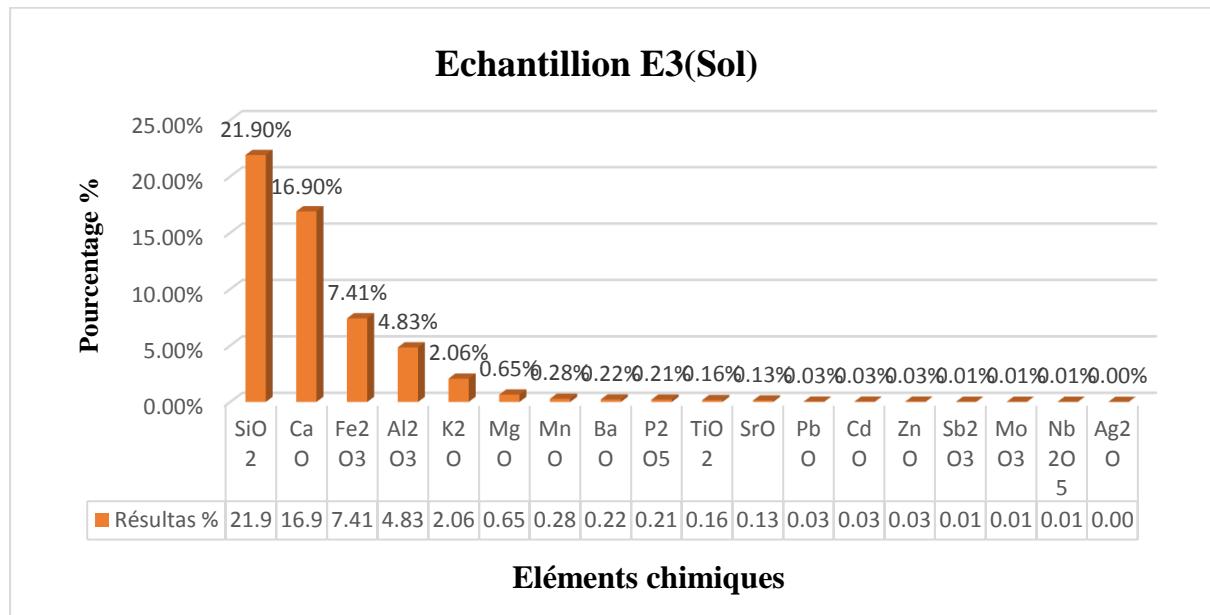
**III.3. Présentation et interprétation des résultats d'analyse obtenus par la spectrométrie de fluorescence X :****III.3.1.présentation des résultats de l'analyse FRX :**

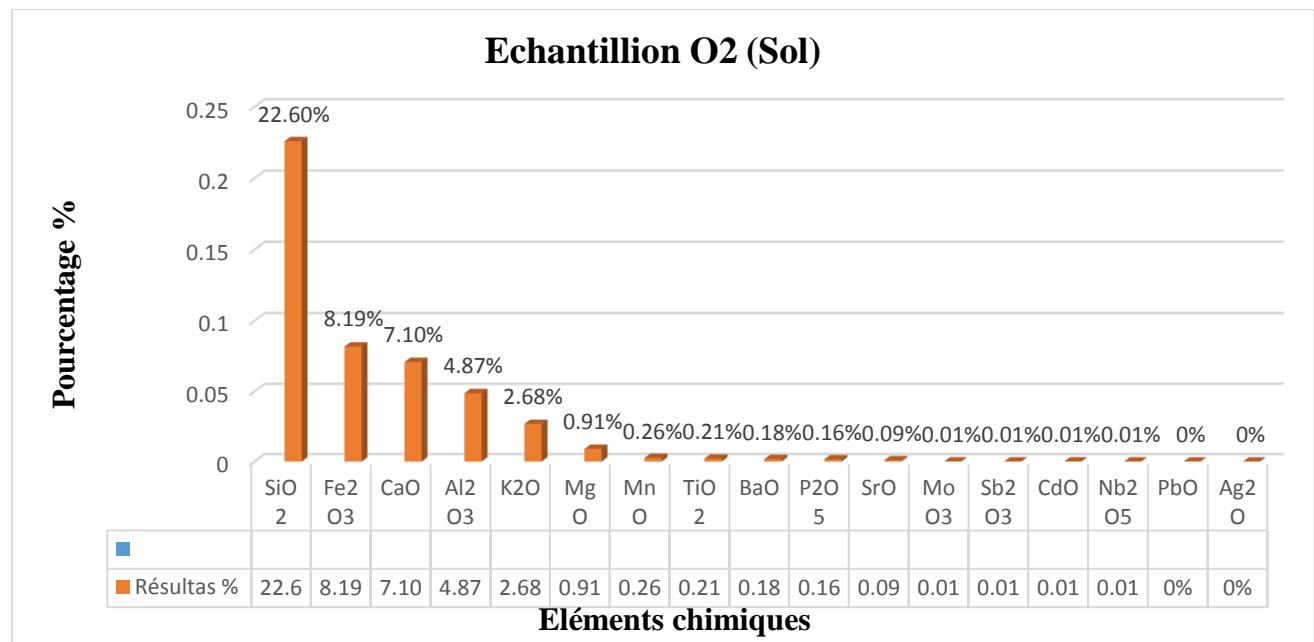
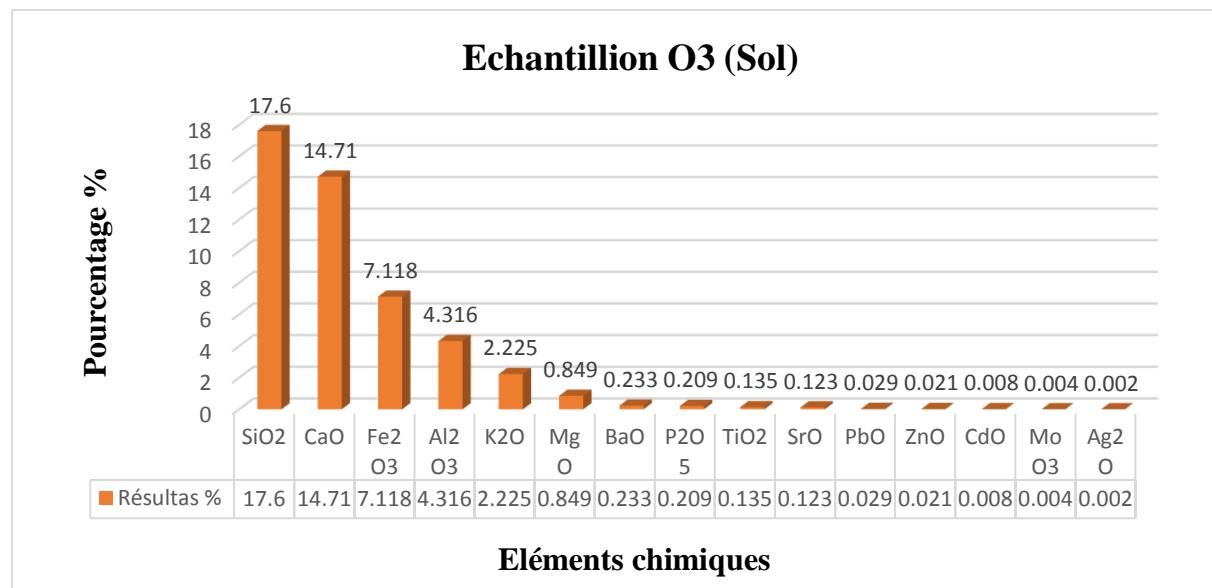
Avant de procéder à l'analyse, il est important de préciser que les résultats présentés dans cette section proviennent de l'analyse chimique quantitative par FRX des mêmes échantillons qui ont été soumis à une analyse minéralogique qualitative par DRX. Les résultats de l'analyse chimique sont présentés de manière graphique à travers les histogrammes illustrés dans les figures ci-dessous.

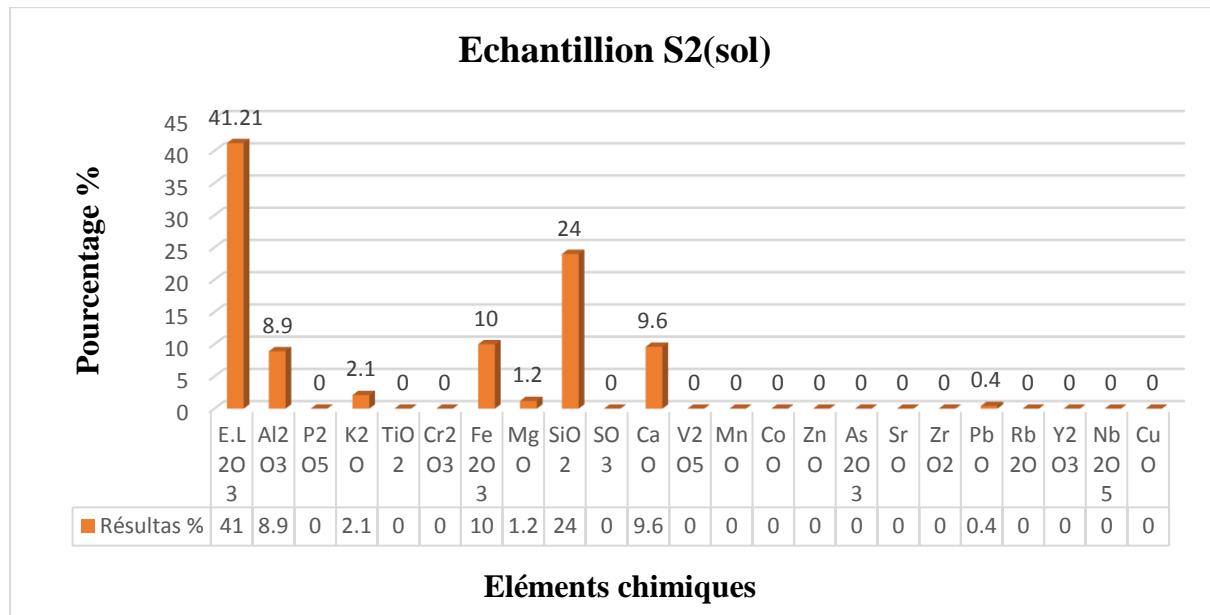
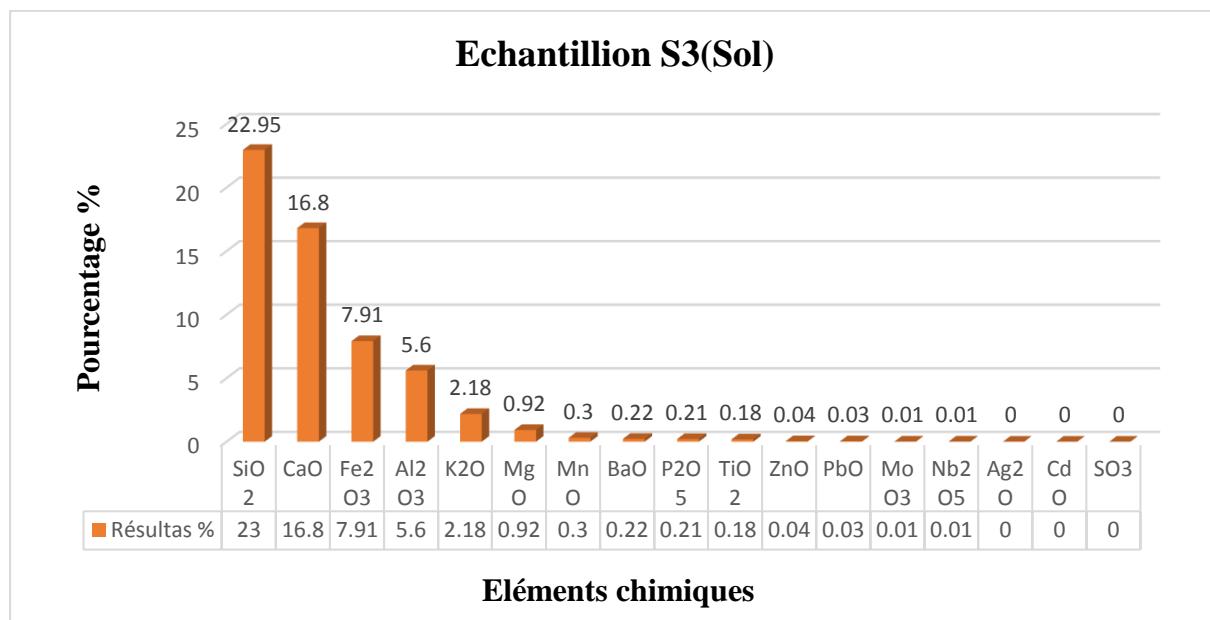


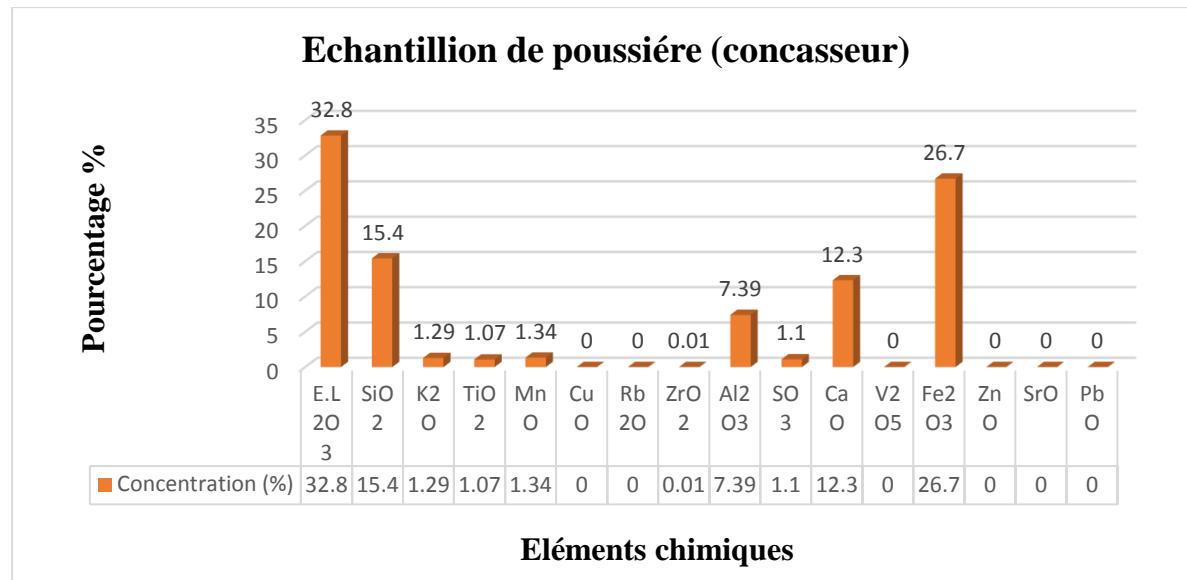
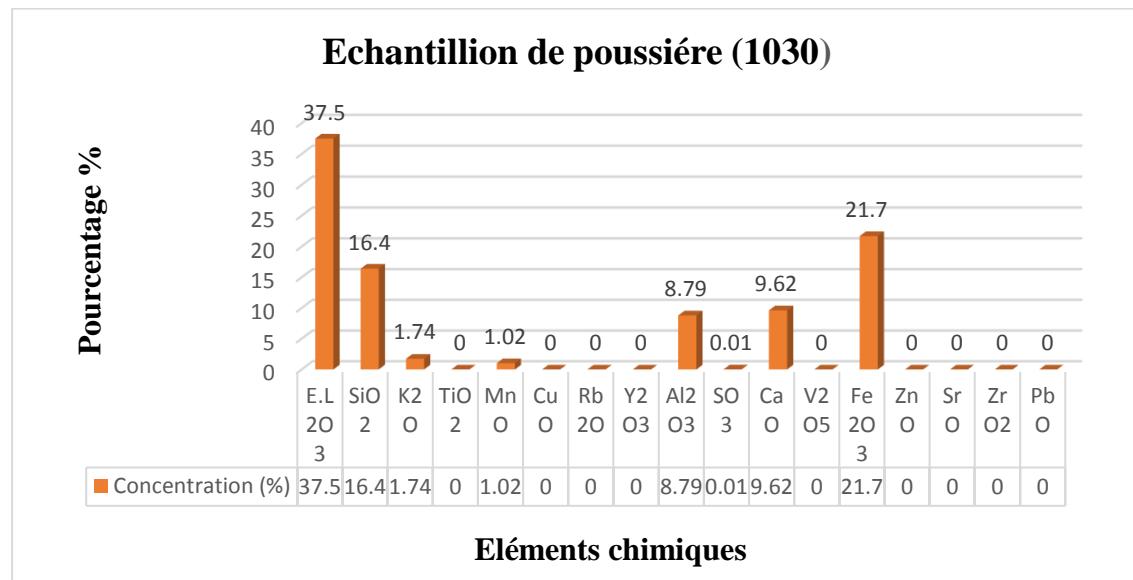
**Figure III.19 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon minéral de fer.

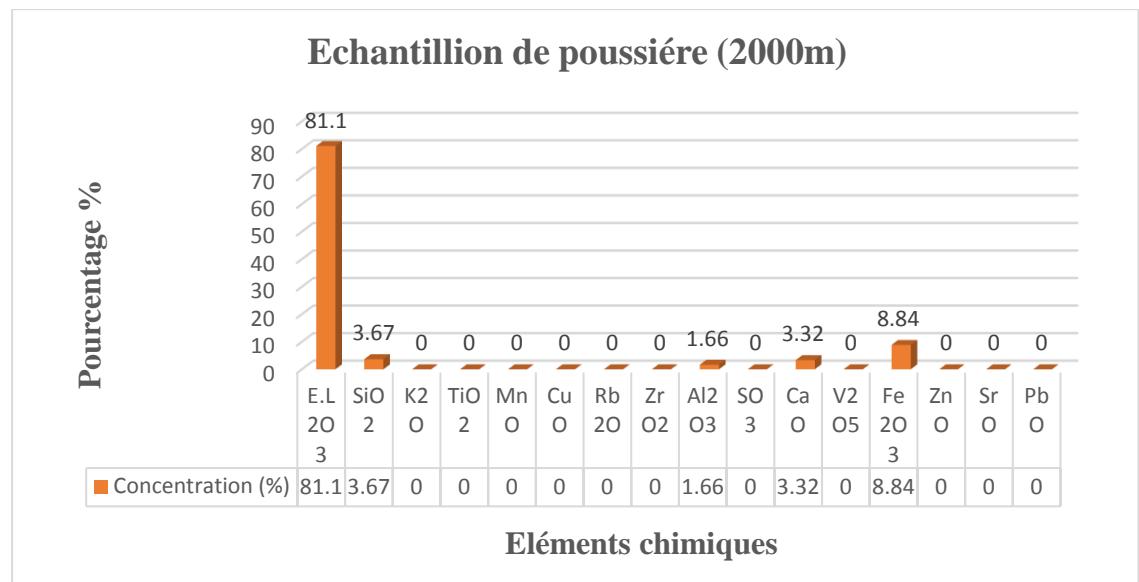
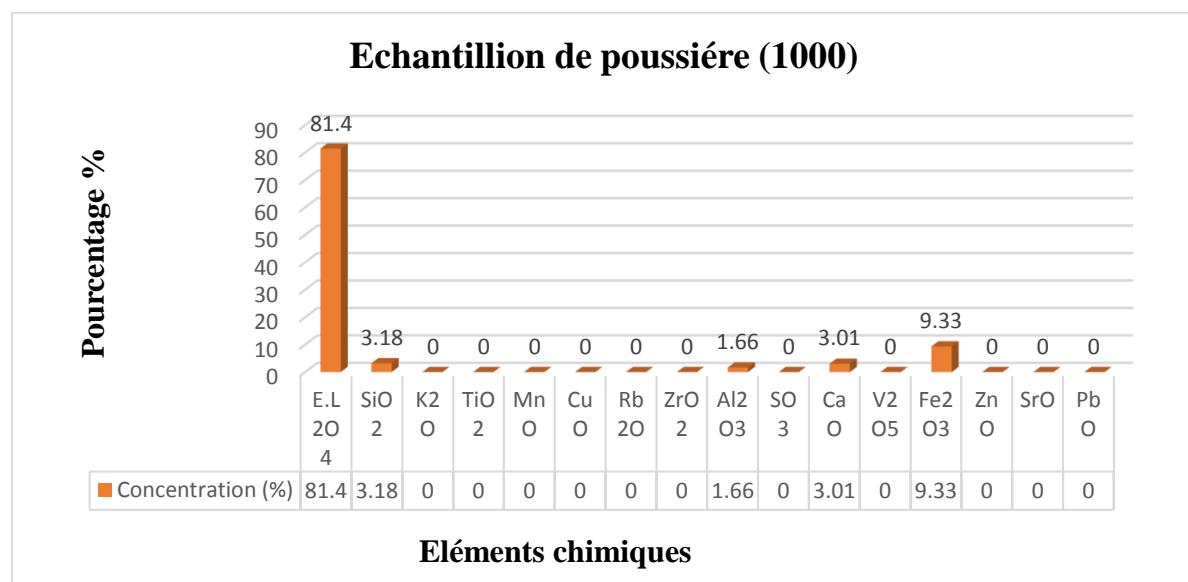
**Stérile :****Figure III.20 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon de stérile.**Sol 1035 :****Figure III.21 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.1030 in.

**Sol N1 :****Figure III.22 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.N1 out.**Sol E3 :****Figure III.23 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.E3 out.

**Sol O2 :****Figure III.24 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.O2 out.**Sol O3 :****Figure III.25 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.O3 out.

**Sol S2 :****Figure III.26 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.S2 out.**Sol S3 :****Figure III.27 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon S.S3 out.

**Poussière concasseur (in situ) :****Figure III.28 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussière concasseur in.**Poussière 1030 :****Figure III.29 :** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussière 1030 in.

**Poussière 2000 :****Figure III.30:** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussière 2000 out.**Poussière 1000 :****Figure III.32:** Histogramme de l'analyse chimique de l'échantillon poussière 1000 out.

### III.3.2. Interprétation de l'analyse FRX :

#### Mineraï de fer (Figure III.1) :

L'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) prédomine avec 57% de la masse, ce qui est conforme à la nature d'un mineraï de fer. La présence notable de quartz ( $\text{SiO}_2$ ) à 3,78% suggère une gangue siliceuse. Les oxydes mineurs tels que  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  indiquent la présence de minéraux associés. La perte au feu élevée, atteignant 29,76%, révèle une forte teneur en matières organiques ou en eau de constitution. [39]

#### Stérile (Figure III.2) :

Le  $\text{CaO}$  est le composant principal avec 41,50%, suggérant une roche encaissante calcaire. La présence de  $\text{SiO}_2$  (8,59%) et d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5,35%) indique des aluminosilicates. La faible teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,65%) confirme qu'il s'agit bien de stérile, distinct du mineraï de fer.

#### Sols (Figures III.3 à III.9) :

Les sols montrent une variabilité dans leur composition, reflétant l'influence du mineraï de fer et de la roche encaissante. Le  $\text{SiO}_2$  est généralement dominant, avec des concentrations variant de 20% à 23%, indiquant une forte composante siliceuse. Le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  varie entre 9% et 13%, suggérant une contamination par le mineraï de fer. La présence de  $\text{CaO}$ , oscillant entre 7% et 11%, reflète l'influence de la roche calcaire. Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et autres oxydes mineurs varient selon les échantillons, soulignant la diversité des sources de contamination et d'influence géologique.

La présence de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dans les sols environnants indique une dispersion des particules de mineraï de fer, probablement due à l'érosion éolienne ou au transport par l'eau. Les teneurs en  $\text{CaO}$  dans les sols suggèrent une influence de la roche calcaire, soit par érosion naturelle, soit par les activités minières. La présence d'éléments traces comme le Pb, le Cd, et le Zn dans certains échantillons pourrait indiquer une contamination liée à l'activité minière. Les différences de composition entre les échantillons de sol suggèrent une variabilité spatiale des retombées, probablement influencée par la topographie et les vents dominants. Les pertes au feu élevées dans certains échantillons indiquent une teneur importante en matière organique, ce qui pourrait affecter la mobilité et la biodisponibilité des éléments métalliques.

L'analyse des échantillons révèle une variation de la composition chimique selon leur distance par rapport au site d'extraction. Les échantillons de poussières prélevés près du concasseur montrent des concentrations élevées en E.L (32,8%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (26,7%),  $\text{SiO}_2$  (15,4%), et  $\text{CaO}$  (12,3%), indiquant une composition typique de mineraï de fer avec des gangues siliceuses et calcaires. À une distance de 1030 mètres, bien que la concentration en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  reste dominante (21,7%), on observe

une légère augmentation d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8,79%). En revanche, les échantillons prélevés à 1000 mètres et 2000 mètres montrent une concentration très élevée en E.L (81,4% et 81,1% respectivement), avec des diminutions de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cette tendance suggère une ségrégation des particules fines de fer lors du transport aérien, où les particules plus légères voyagent plus loin de la source. L'impact environnemental potentiel est notable, avec des risques accrus pour la santé respiratoire due à la présence de particules fines riches en fer dans les échantillons distants, soulignant l'importance d'une évaluation continue des effets sur l'environnement et la santé publique.

### **III.4. Présentation et interprétation des résultats d'analyse obtenus par la spectrométrie d'absorption atomique :**

**Tableau III.19 :** résultat d'analyse de la SAA.

<b>N° D'ordre</b>	<b>N° D'échantillon</b>	<b>Analyse par spectromètre de masse couplé à plasma inductif Teneurs en %</b>		
		<b>Fe</b>	<b>AI</b>	<b>TI</b>
<b>01</b>	<b>Eau de source</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>&lt;0.5</b>
<b>02</b>	<b>E1 (500m)</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>&lt;0.5</b>
<b>03</b>	<b>S3 (sol- 1500m)</b>	<b>7.30</b>	<b>2.18</b>	<b>0.14</b>

D'après le tableau III.19 : présentant les résultats d'analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) de l'échantillon de sol S3 prélevé à 1500m de la mine de Boukhadra et pour deux échantillons d'eau, Eau de source et E1 (500m) ; un échantillon d'eau prélevé à 500 mètres de la mine.

Les concentrations de fer, aluminium et titane sont inférieures à 0,5 ppm (mg/L) dans l'échantillon d'eau de source. De même, pour l'échantillon "E1 (500m)", prélevé à 500 mètres de la mine, les concentrations de ces éléments sont également inférieures à 0,5 ppm (mg/L). Cela indique que la méthode utilisée a une limite de détection de 0,5 ppm. Les très faibles concentrations de fer, aluminium et titane dans

l'eau de source suggèrent une bonne qualité de l'eau en ce qui concerne ces éléments. De plus, l'échantillon E1 présente des concentrations similaires à celles de l'eau de source, indiquant que l'activité minière n'a pas d'impact significatif détectable sur les concentrations de ces éléments dans l'eau à 500 mètres de la mine, du moins pas au-dessus de la limite de détection de 0,5 ppm. Ces résultats montrent que les concentrations sont bien en dessous des limites typiques pour l'eau potable. Par exemple, la limite de l'OMS pour le fer dans l'eau potable est de 0,3 mg/L, et les échantillons analysés sont inférieurs à cette valeur. Cependant, il est important de noter que d'autres éléments potentiellement préoccupants n'ont pas été analysés ou ne sont pas présentés dans ce tableau. La limite de détection de 0,5 ppm pourrait être trop élevée pour détecter des contaminations subtiles.

Teneur en fer (Fe) : La concentration de 7,30% est significative et indique une présence notable de fer dans le sol. Ceci est cohérent avec la proximité d'une mine de fer et suggère une dispersion des particules de mineraï dans l'environnement.

Teneur en aluminium (Al) : La concentration de 2,18% d'aluminium est modérée et peut provenir à la fois des minéraux aluminosilicates naturellement présents dans le sol et potentiellement des retombées de poussières issues de l'exploitation minière.

Teneur en titane (Ti) : La faible concentration de 0,14% de titane est typique des sols et ne semble pas indiquer une contamination particulière liée à l'activité minière.

Contamination globale : Bien que ces résultats confirment la présence de métaux dans le sol, les concentrations mesurées ne semblent pas alarmantes à première vue. Cependant, une comparaison avec les normes locales et internationales serait nécessaire pour évaluer précisément le niveau de contamination.

Dispersion spatiale : L'échantillon ayant été prélevé à 1,5 km de la mine, ces résultats indiquent une dispersion significative des particules métalliques sur une distance importante, soulignant l'étendue potentielle de l'impact environnemental de l'exploitation minière.

Nécessité d'analyses complémentaires : Ces résultats justifient des analyses plus approfondies, notamment sur d'autres métaux lourds potentiellement présents, ainsi qu'une étude de la biodisponibilité de ces métaux en fonction du pH du sol mentionné dans le texte.

### **III.4.1.Dosage de la silice SiO<sub>2</sub> solubilisée (dans le filtrat) par colorimétrie (UV)**

#### ➤ Réactifs

- HCl (1 :1) :

On ajoute 100 ml d'eau distillée à 100 ml de HCl concentré à 37%, dans un flacon hermétiquement fermé.

- Molybdate d'ammonium à (10%) :

Dissoudre 10g de molybdate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  dans 100 ml d'eau distillée. Chauffer légèrement pour bien dissoudre. Ajuster le pH à 7,5 à l'aide de NH<sub>4</sub>OH concentré (30%) et conserver la solution dans un flacon de polyéthylène.

- Acide oxalique à 10% :

#### ➤ **Mode opératoire**

Pour préparer les solutions étalons, nous avons procédé comme suit :

### **A) Préparation de la solution mère de silicium (0,1g /l) de Si<sup>4+</sup>**

#### **A.1) Réactifs**

- Tiosulfate de sodium (Na<sub>2</sub> SiO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O) ..... 0,755g
- Eau distillée ..... 1 L

#### **A.2) Mode opératoire**

- faire dissoudre 0 ,755 g de (Na<sub>2</sub> SiO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O) préalablement pesé dans l'eau distillée.
- compléter ensuite le volume jusqu'au trait de jauge dans une fiole de 1 litre.

### **B) Préparation de la solution fille ou standard à (10 mg /l) de Si<sup>4+</sup>**

Prélever avec précision 10 ml de la précédente solution mère (0,1g /l de Si<sup>4+</sup>) dans une fiole de 100 ml, puis compléter avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge pour obtenir une solution fille de 10 mg /l de Si<sup>4+</sup>.

### **C) Préparation des étalons de Si<sup>4+</sup>**

Une série de solution fille ont été préparées dans des fioles de 25ml, suivant le tableau ci - dessous :

**Tableau III.21 :** Série des solutions étale de Si<sup>4+</sup>.

N° d'éton	Blanc (1)	2	3	4	5	6	7
Solution fille (10mg/l) V (ml)	0	1,25	2,5	3,75	5	6,25	12,5
Eau distillée (ml)	25	23,75	22,5	21,25	20	18,75	12,5
[Si <sup>4+</sup> ] (mg/l)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	5

**D) Etablissement de la courbe d'étalonnage**

Afin de tracer la courbe d'étalonnage (les absorbances en fonction des concentrations), nous avons d'abord effectué des ajouts des réactifs, aux étalons précédents selon le modèle du tableau suivant :

**Tableau III.22 :** Série des solutions étalons Si<sup>4+</sup> après l'ajout des réactifs.

Réactifs \ N° d'éton	Blanc (1)	2	3	4	5	6	7
HCl(1 :1)		1 ml					
Molybdate d'ammonium à (10%)			2 ml				
Acide oxalique 10%				1,5 ml (après 6 à 7 minutes)			
[Si <sup>4+</sup> ] (mg/l)							

On laisse reposer au minimum 2mn, puis on mesure l'absorbance de chaque solution étalon, par rapport au blanc à la longueur d'onde  $\lambda = 420$  nm.

**Tableau III.23 :** Variation des absorbances en fonction des concentrations de Si<sup>4+</sup> à 420 nm

N° d'éton	01	02	03	04	05	06	07
Absorbances	0	0,016	0,024	0,041	0,045	0,054	0,058
[Si <sup>4+</sup> ] mg/l	0	0,424	0,85	1,27	1,69	2,12	2,54

**E) Préparation de l'échantillon à doser :** réaliser successivement les ajouts comme suit :

- introduire 1 ml du filtrat de chaque matière provenant de l'attaque triacide, dans une fiole de 25ml
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- 1 ml de HCl (1:1).
- 2 ml Molybdate d'ammonium à (10%).
- 1,5 ml Acide oxalique 10%.
- Mesurer l'absorbance à  $\lambda = 420$  nm après 6 à 7 mn, par rapport au blanc.

### III.4.2.Calcul des teneurs globales de SiO<sub>2</sub> dans les poudres étudié

Nous allons déterminer la teneur globale en **SiO<sub>2</sub>%** de nos échantillons comme suit :

D'abord, on détermine la concentration en Si<sup>4+</sup> des différents filtrats des échantillons en utilisant l'équation de la courbe d'étalonnage correspondante :

$$Abs = \alpha C + \beta$$

$\alpha$  : La pente de la courbe d'étalonnage (droite).

$\beta$  : L'ordonnée à l'origine de la courbe d'étalonnage (droite)

$$C'_{Si} = \frac{Abs - \beta}{\alpha} \text{ (mg/l)}$$

C'<sub>Si</sub> : la concentration de l'échantillon déterminée à partir de la courbe d'étalonnage.

$$C_{Si} = C'_{Si} * (25+1+2+1,5) / V_{PE}$$

V<sub>PE</sub> : le volume prélevé du concentré de filtrat (1 ml)

$$C_{Si} = C'_{Si} \times 29,5$$

➤ **Calcul de la quantité de Si<sup>4+</sup> dans 100ml du filtrat (m<sub>Si</sub>)**

$$C_{Si} \text{ (mg/l)} \longrightarrow 1000 \text{ ml de concentré}$$

$$MSi \longrightarrow 100 \text{ ml de concentré}$$

D'où :

$$m_{Si} = C_{Si} \times \frac{100}{1000}$$

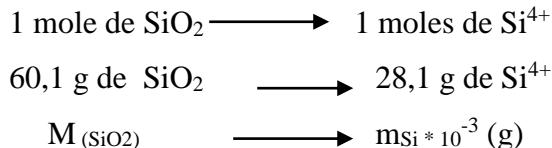
$$m_{Si} = C'_{Si} \times 0,1 \times 29,5$$

➤ **Calcul de la quantité de SiO<sub>2</sub> dans les filtrats (m(SiO<sub>2</sub>))**

Soit les masses molaires de la silice et l'oxyde de silice :

$$M_{Si} = 28,1 \text{ g/mol} \quad M_{SiO_2} = 60,1 \text{ g/mol}$$

On a :



$$m_{(SiO_2)} = 6,309 \times C'_{Si} \text{ (mg)}$$

➤ **Calcul de la teneur de SiO<sub>2</sub> dans les filtrats (%SiO<sub>2</sub>) pour 0,5 g d'échantillon**

$$m_{(SiO_2)} * 10^{-3} \longrightarrow 0,5 \text{ g d'échantillon}$$

$$\% SiO_2 \longrightarrow 100 \text{ g d'échantillon}$$

$$\% SiO_2 = C'_{Si} \times 1,26$$

La précédente équation est utilisée pour tous les calculs des pourcentages en % SiO<sub>2</sub> dans les échantillons

### III .4.3.Dosage colorimétrique (UV) d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### III.4.3.1.Principe

Nous avons utilisé la méthode colorimétrique qui consiste à former un complexe d'Al+3 avec l'aluminon, stable en milieu tampon acide. Le complexe formé peut être dosé par colorimétrie à  $\lambda = 530\text{nm}$  .[37]

#### Réactifs

- Acide ascorbique à 1,5%
- NH<sub>4</sub>OH 1:4.
- HCl à 1 N.
- Amidon à 1%.
- Aluminon à 0,1%.

#### III.4.3.2 Mode opératoire

Pour préparer les solutions étalons, nous avons procédé comme suit :

##### A) Préparation de la solution mère d'aluminium (0,5g /l) :

### A.1) Réactifs

- Chlorure d'aluminium ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ..... 0,447g.
- Eau distillée ..... 100ml.
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré ..... quelques gouttes.

### A.2) Mode opératoire

Faire dissoudre 0,447g de chlorure d'aluminium préalablement pesé, dans l'eau distillée légèrement acidifiée par l'acide sulfurique concentré. Compléter ensuite le volume jusqu'à 100ml.

### B) Préparation des solutions filles d' $\text{Al}^{3+}$

Une série de solution filles ont été préparées dans des fioles de 50ml, suivant le tableau ci-dessous :

**Tableau III.24 : Préparation des solutions filles d' $\text{Al}^{3+}$**

N° de solution fille	1	2	3	4	5	6	7	8
Solution mère à 0,5g /l de $\text{Al}^{3+}$ V (ml)	0	2	4	6	8	10	12	14
Eau distillée (ml)	50	48	46	44	42	40	38	36
$[\text{Al}^{3+}]$ (mg/l)	0	20	40	60	80	100	120	140

### C) Etablissement de la courbe d'étalonnage

Afin de tracer la courbe d'étalonnage (les absorbances en fonction des concentrations), nous avons d'abord réalisé une série de solutions étalons dans des fioles de 100ml, selon le modèle suivant :

**Tableau III.25 : Solutions étalons de  $\text{Al}^{3+}$  après l'ajout des réactifs**

N° de solution	1	2	3	4	5	6	7	8
Solution fille (ml)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Acide ascorbique (ml)	4	4	4	4	4	4	4	4
$\text{NH}_4\text{OH}$ 1 :4 (ml)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Amidon 1% (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1
Aluminon 0,1% (ml)	25	25	25	25	25	25	25	25

HCl 1N (ml)	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Eau distillée (ml)	15,75	15,75	15,75	15,75	15,75	15,75	15,75	15,75
[Al <sup>3+</sup> ] (mg /l)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4

La formation du complexe des cations Al<sup>3+</sup> avec l'Aluminon est cinétiquement lente. Par conséquent, les solutions étalons sont laissées au repos pendant 4 heures, pour que la réaction soit complète. Ensuite, nous mesurons l'absorbance de chaque solution étalon, par rapport au blanc (Eau distillée plus les réactifs de dosage) à la même longueur d'onde  $\lambda = 530\text{nm}$ . Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

**Tableau III.26 :** Absorbances en fonction des concentrations des étalons de Al<sup>3+</sup> à 530 nm

N° d'étalon	1	2	3	4	5	6
absorbances	0	0,017	0,025	0,049	0,071	0,084
[Al <sup>3+</sup> ]	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,4

**D) Préparation de l'échantillon à doser :** on doit suivre les mêmes étapes de dosage que les précédents étalons d'Al<sup>3+</sup> :

- Introduire 0,5 ml du filtrat de chaque matière provenant de l'attaque triacide, dans une fiole de 50ml
- Ajouter 4 ml d'acide ascorbique (1,5%).
- 1,5 ml d'ammoniaque (1 :4).
- 1 ml d'amidon (1%).
- 2,25 HCl à 1 N.
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et vérifier que le pH de la solution, qui doit être de 4,7.
- Mesurer l'absorbance à  $\lambda = 530\text{nm}$  après 4 heures de réaction

### III.4.3.3.Calcul des teneurs d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en % des échantillons

Nous allons déterminer la teneur en alumine (%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de nos échantillons comme suit :

D'abord, on détermine la concentration en  $\text{Al}^{3+}$  des différents filtrats des échantillons à l'aide de la courbe d'étalonnage, par extrapolation de l'absorbance correspondante mesurée. [37]

Techniques et documentations, Lavoisier, Paris (1990) comme suivant :

$$C'_{\text{Al}} = \frac{\text{Abs} - \beta}{\alpha}$$

Avec :

$C'_{\text{Al}}$  : la concentration de l'échantillon déterminée par la courbe d'étalonnage.

$\alpha$  : La pente de la droite d'étalonnage.

$\beta$  : L'ordonnée à l'origine de la courbe (droite) d'étalonnage.

$C'_{\text{Al}}$  (mg)  $\longrightarrow$  0,5 ml du filtrat

$C''_{\text{Al}}$  (mg)  $\longrightarrow$  50ml du filtrat

$$C''_{\text{Al}} = C'_{\text{Al}} \times \frac{50}{0,5}$$

$$C_{\text{Al}} = C'_{\text{Al}} \times F \times 100$$

$C_{\text{Al}}$  : la concentration de l'échantillon après dilution

F : facteur de dilution.

### B) Calcul de la quantité de $\text{Al}^{3+}$ dans 100ml du filtrat ( $m_{\text{Al}}$ )

$C_{\text{Al}^{3+}}$  (mg)  $\longrightarrow$  1000ml de concentré

$m_{\text{Al}}$   $\longrightarrow$  100ml de concentré

D'où la masse de  $\text{Al}^{3+}$  est donnée par :

$$m_{\text{Al}}(\text{mg}) = C_{\text{Al}} * 100 / 1000$$

En remplaçant  $C_{\text{Al}}$  par l'équation précédente on obtient la formule suivante :

$$m_{\text{Al}} = C'_{\text{Al}} \times 10 \times F (\text{mg})$$

### C) Calcul de la quantité d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ dans les filtrats (m ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ))

Soient :

$M_{\text{Al}}$  : la masse molaire de Al (g/mole) = 26,98g/mol

$M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  : la masse molaire de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (g/mole) = 101,96g/mol

1 mole de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . 2 moles de  $\text{Al}^{3+}$

101,96 g de  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\longrightarrow$  2 \* 26,98 g de  $\text{Al}^{3+}$

$m_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$   $\longrightarrow$   $m_{\text{Al}} * 10^{-3}$  (g)

$$m_{\text{Al}_2\text{O}_3} = C'_{\text{Al}} \times F \times 18,9$$

**D) Calcul de la quantité d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en % dans les filtrats (%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pour 0,5 g d'échantillon**

$$\begin{array}{l} m_{(Al_2O_3)} * 10^{-3} \longrightarrow 0,5 \text{ g d'échantillon} \\ \% Al_2O_3 \longrightarrow 100 \text{ g d'échantillon} \end{array}$$

$$\% Al_2O_3 = C'_{Al} \times F \times 3,78$$

### III .4.4. Dosage de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

- Etablissement de la courbe d'étalonnage**

On prépare des solutions étalons du fer de concentrations connues, puis on mesure leurs absorbances par SAA. Par l'intermédiaire d'un capillaire, on injecte les étalons dans la flamme. La mesure par SAA nous donne les concentrations de fer sous forme de cations trivalents Fe<sup>3+</sup>, par mesure des absorbances correspondantes à une longueur d'onde  $\lambda=284,3$ . [40]

Techniques et documentations, Lavoisier, Paris (1990) suivant.

#### Préparation des échantillons à doser

-Prélever 1 ml de la solution de filtrat obtenue de l'attaque triacide dans un tube à essai de 25ml scellé.

- Ajouter 9 ml d'eau distillée. Agiter pour bien mélanger, puis injecter un volume de la solution dans la flamme, par aspiration du gaz.

- Expression des résultats**

La concentration en Fe<sup>3+</sup> est exprimée comme suit

$$C_{Fe^{3+}} = C \times F$$

Tel que,  $F = (V1 + V2) / V1$

**C<sub>Fe3+</sub>** : la concentration en Fe<sup>3+</sup> dans l'échantillon en mg/l

**C** : la concentration en Fe<sup>3+</sup> dans l'échantillon donnée par l'appareil en mg/l.

**F** : Facteur de dilution.

**V1 = 1ml** : Volume de la solution du filtrat.

**V2=9ml** : Volume de l'eau distillée.

➤ **Calcul des teneurs en % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** Pour déterminer la teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on a utilisé la méthode suivante :

$$C_{Fe} (\text{mg/l}) \longrightarrow 1000 \text{ ml}$$

$m_e$ (mg)  $\longrightarrow$  100 ml

$$m_e = \frac{100 \times C_{Fe}}{1000} \text{ (mg)}$$

$m_e$ : la quantité de fer  $Fe^{3+}$  de l'échantillon dans 100 ml de filtrat.

1 mole de  $Fe_2O_3$   $\longrightarrow$  2 moles de Fe

160g  $Fe_2O_3$   $\longrightarrow$  2 x 56 g de Fe

$m_{(Fe_2O_3)}$  g  $\longrightarrow$   $m_e \times 10^{-3}$ g

$$m_{(Fe_2O_3)} = \frac{m_e \times 10^{-3} \times 160}{112}$$

Avec:  $m_e = 100 * C_{Fe} / 1000$

Pour une masse d'échantillon  $P_e = 0.5$ g :

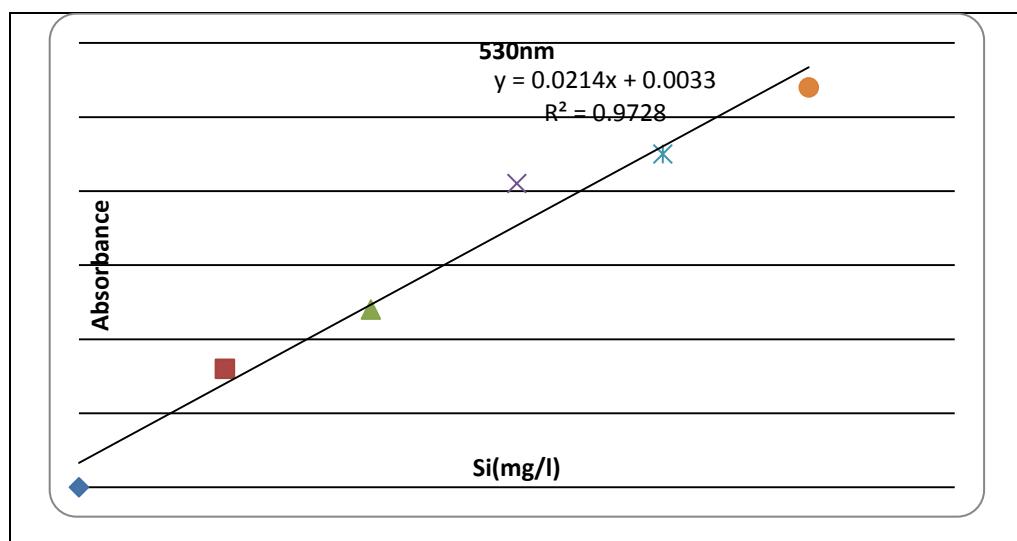
$P_e = 0.5$  g d'échantillon  $\longrightarrow C_{Fe} \cdot M_{(Fe_2O_3)} \cdot 10^{-4} / 2 \cdot M_{(Fe)}$

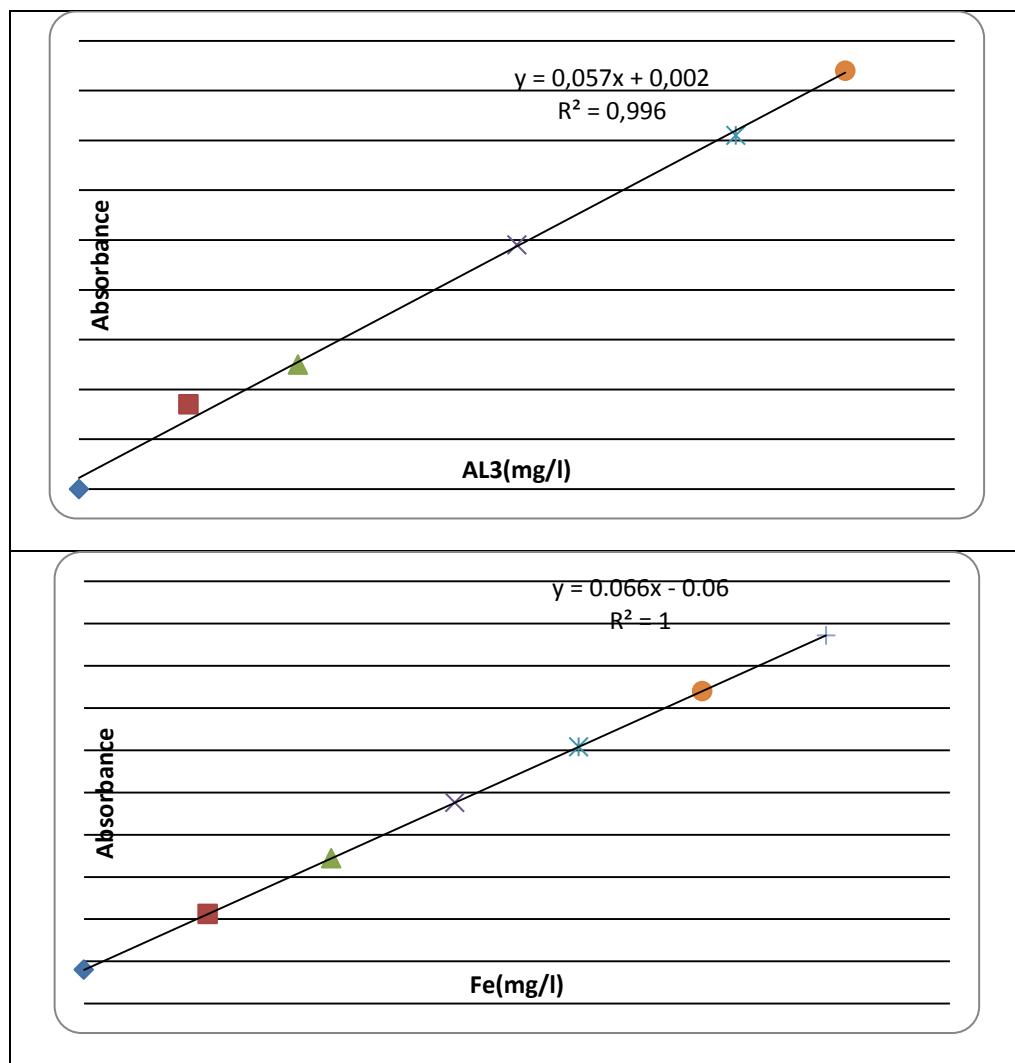
100g d'échantillon  $\longrightarrow \% Fe_2O_3$

➤ L'équation globale est :  $\% Fe_2O_3 = \frac{100 \times C_{Fe} \times 10^{-3} M_{Fe_2O_3}}{0,5 \times 1000 \times 2 M_{Fe}}$

$$\% Fe_2O_3 = 0,0286 \times C_{Fe}$$

Les courbes d'étalonnage des éléments Si, Al et Fe :





**Figure III .32 :** Les courbes d'étalonnage des éléments Si, Al et Fe.

**Les résultats obtenus des compositions chimiques des échantillons P1, P2, P3, P4, P5 et P6 après le calcul des compositions en oxydes :**

**Tableau III .27 :** Les résultats obtenus des compositions chimiques des échantillons après le calcul des compositions en oxydes.

N° Echantillons	Lieu de collection	Q collecté en g/J	Q Pesée (g)	Surface collectée (Jours) <sup>2</sup>	Pourcentage M composition			Classe de danger relatif
		g/3 mois d'analyse			SIO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
P1	A 1000 m sur le pôle sud (S2)	9	0,5	28,5	35,14	31,86	5,83	Faible
P2	Niveau 1060 - Mines	9,7	0,5	28,5	42 ,02	29,41	10,71	Moyen danger

P3	Route d'exploitation - Mines	19 ,6	0,5	28,5	41,62	7,45	20,64	Danger extrême
P4	1500 m – Ouest (O3)	9,8	0,5	28,5	29,30	26,79	16,61	Dangereuse
P5	500 m – Nord (N1)	9,78	0,5	28,5	32,99	25,86	21,59	Danger extrême
P6	2000 m – Est (E4)	9,6	0,5	28,5	38,99	25,86	13,59	Dangereuse

### III .4.5.Interprétations :

#### Courbes d'étalonnage :

Les courbes d'étalonnage pour Si, Al et Fe montrent une bonne linéarité, ce qui est crucial pour une quantification précise de ces éléments dans vos échantillons de retombées climatiques. La haute précision est particulièrement importante pour Fe, qui peut être considéré comme un métal lourd dans ce contexte.

#### Analyse des compositions chimiques :

Le tableau présente les pourcentages d'oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dans deux échantillons (P1, P2, P3, P4, P5 et P6), qui sont probablement des échantillons de sol ou de poussières atmosphériques collectés autour de la mine de Boukhadra.

#### Interprétation dans le contexte de la contamination par métaux lourds :

##### a) Teneur en $\text{Fe}_2\text{O}_3$ :

Varie de 21,59% (P5) à 13.59 (P6)

Les échantillons P5 et P6 montrent des teneurs élevées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $>13\%$ )

Ceci pourrait indiquer une contamination significative par le fer provenant des activités minières

##### b) Variation des teneurs :

La grande variabilité des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  entre les échantillons suggère une distribution non uniforme des retombées de fer, probablement influencée par des facteurs tels que la direction du vent, la distance de la source, et la topographie.

##### c) Relation avec $\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{SiO}_2$ :

L'échantillon riche en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (comme P5) ont généralement des teneurs plus faibles en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ce qui pourrait indiquer un enrichissement en fer au détriment d'autres composants du sol.

La teneur en SiO<sub>2</sub> varie moins drastiquement, ce qui pourrait suggérer que la contamination en fer affecte moins la composition en silice des sols.

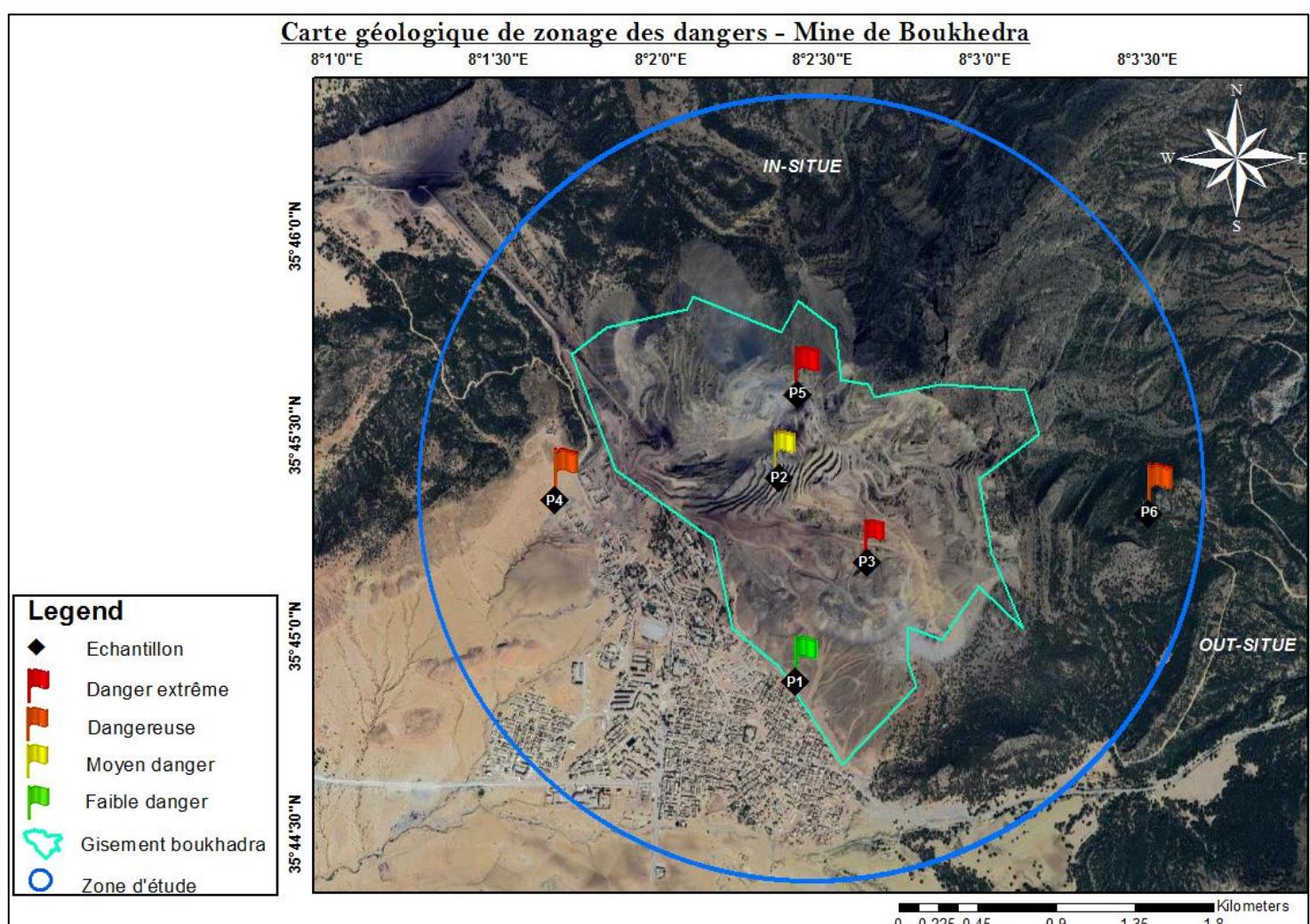
#### d) Implications pour la contamination :

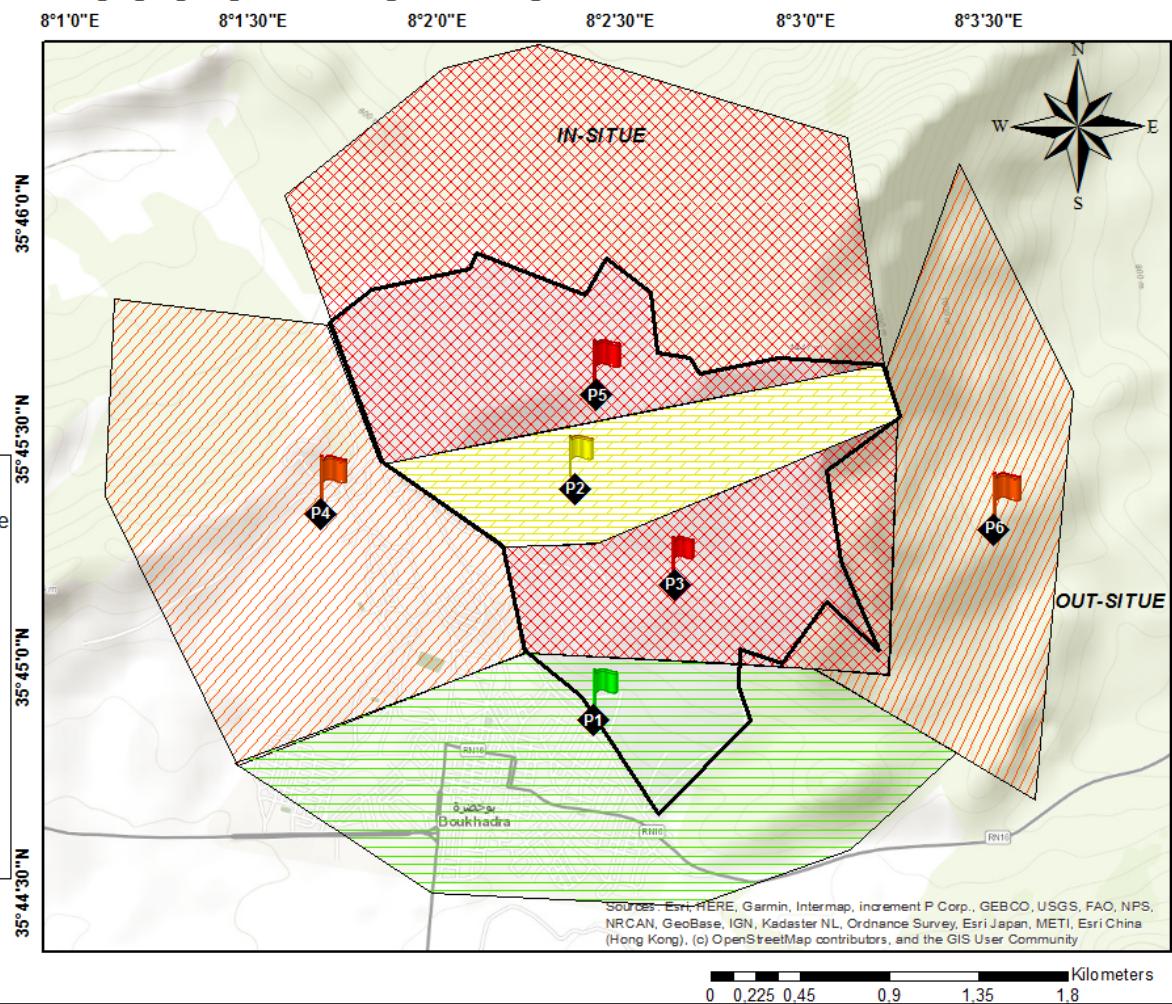
L'échantillon P5, avec sa hautes teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (21,59%), pourraient représenter des zones particulièrement affectées par les retombées de l'exploitation minière.

#### e) Considérations environnementales :

Les niveaux élevés de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans certains échantillons pourraient avoir des implications sur la qualité des sols, l'eau de surface et souterraine, ainsi que sur la végétation locale.

La variabilité des teneurs suggère que l'impact des retombées de la mine n'est pas uniforme et nécessite une cartographie détaillée pour identifier les zones les plus à risque.



**Carte topographique de zonage des dangers - Mine de Boukhedra****Figure III .33 :** Carte de zonage des dangers de la mine de Boukhedra.

## II.5. Conclusion

Le présent chapitre décrit les méthodes de caractérisation des échantillons prélevés autour du site minier de Boukhadra, mettant en lumière l'étendue de la contamination par les métaux lourds. Les techniques utilisées, telles que la DRX, la FRX, la SAA, l'attaque triacide et la spectroscopie UV-Visible, ont révélé des concentrations élevées de métaux lourds dans les sols et les plantes. Ces résultats soulignent l'impact environnemental significatif de l'exploitation minière et la nécessité de mettre en place des mesures de réhabilitation et de gestion durable pour atténuer ces effets.

---

## *Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

La présente étude vise à analyser et à caractériser les retombées climatiques issues de l'exploitation du mineraï de fer de Boukhadra, avec un accent particulier sur la contamination par les métaux lourds. Grâce à une méthodologie rigoureuse incluant des échantillonnages systématiques de sols, de plantes, de poussières et d'eau, ainsi qu'une série d'analyses minéralogiques et chimiques avancées (DRX, FRX, SAA, UV-Visible, Attaque triacide), nous avons pu établir un diagnostic précis de la situation environnementale actuelle.

Les résultats obtenus révèlent une contamination des sols et de la végétation environnante par des métaux lourds dont  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : 57,019$ ,  $\text{SiO}_2 : 3,784$ ,  $\text{MnO} : 2,83$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 : 2,55$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ . Clairement présent sur les résultats DRX, FX ainsi que SAA (Analyse par spectromètre de masse couplé à plasma inductif Teneurs). Ces éléments, émis principalement sous forme de particules fines, sont disséminés dans l'environnement par le vent et les eaux de ruissellement, affectant ainsi la qualité des sols, des eaux et la santé des écosystèmes locaux. Nous pensons que cette contaminations ne tardera pas à s'accentuer vu les résultats UV et SAA, et donc plus d'analyse pourront être prouvée.

La spectroscopie UV-Visible et les autres techniques de caractérisation ont permis de quantifier les niveaux de contamination et de comparer ces niveaux aux seuils réglementaires et aux éléments constitutifs de fond géochimiques. Les concentrations élevées de métaux lourds (en oxyde de fer particulièrement – Résultat UV) et d'autre élément en oxyde dans les échantillons de poussière ainsi que les autres échantillons indiquent un transfert préoccupant de ces éléments vers la chaîne alimentaire, avec des implications potentielles pour la santé humaine et animale.

Quant aux quantités de poussière collectées (caractérisées par Da incluses en PM10 – PM2,5), et au taux de disposition déterminer leur valeur s'avèrent logiquement similaire à la théorie ( cercle émission de poussière Chartier et Lamziart 2004 ) ce qui assure d'une part que le travail dirigé de notre part c'est mené convenablement et que les résultats sont sensés , d'autre part les taux et les valeurs sont bien en dessous que ce que détecter par la réglementation en vigueur .(M.D.D.E.P .2010)

Nous recommandons d'approfondir et l'expérience sur le sujet en cours qu'en veux d'aboutir à des résultats plus concluants, et pourquoi pas la réalisation de modèle de référence.

---

## *Références bibliographiques*

---

## Références bibliographiques

- [1] A. Lemrabet. A. Tayebi. « Approche comparative de deux gisements de fer Boukhadra et Rouina : Contexte géologique et Méthodes d'exploitation » Mémoire de master. Université de Bejaia, [2015]
- [2] A. Seriani. « Recherche du soutirage du mineraï par machines automotrices dans les conditions de Boukhadra », MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Magistère En EXPLOITATION DES MINES à Annaba, [1983]
- [3] YAHIAOUI Khawla et YOUSFI Feriel « Etude d'impact d'une activité minière sur l'environnement : cas des étendues Atmosphériques (mine de fer à ciel ouvert de Boukhadra) » Université Abderrahmane Mira de Bejaia. Mémoire de master (2011)
- [4] N. Menchar. “Etude Comparative de Deux Gisements de Fer en Contextes Géologiques Distincts. Le Gisement de Sidi Marouf (Petite Kabylie, Jijel) et de Boukhadra (Monts du MELLEGUES, Tébessa) Algérie Nord Orientale”. Université Mohamed Mentouri – Constantine, [2007]
- [5] L. Gadri « Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis », Thèse présenté en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, université Badji Mokhtar, Annaba, [2012]
- [6] Azzouguen, Z. Les activités minières et leurs impacts sur l'environnement. Mémoire de master : Génie des procédés de l'environnement. Bejaia : Université Abderrahmane Mira – Bejaia, [2021]
- [7] Chenafa W. et M'zoughem K., «Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain el kebira (Sétif) », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en géologie, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 68 pages. [2006]
- [8] Chenini, N. Impact des activités minières sur l'environnement en Algérie : Plan d'action de remise en état des lieux[En ligne]. Mémoire de magister : Mines et environnement. Alger : Ecole nationale polytechnique, [2010]
- [9] ATTOUCHEK L., Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youcef (Sétif) et son impact sur l'environnement, Magister en géologie minière, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, [2006]
- [10] MEDKOUR N., Influence des eaux minières sur les sols et contamination par le plomb et le zinc dans la région d'Ain Azel (wilaya de Sétif). Thèse de Magister INA. Alger. [1994]
- [11] Gestion des résidus miniers : cas d'étude de retraitement, discussion, perspectives Séance Technique du CFGI Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement – CNAM, Paris [2020]

[12] K. TIZAOUI. « Élimination des métaux lourds en solution aqueuse par des argiles algériennes, thèse magister » Université de Tlemcen, [2013]

[13] Exposition aux poussières provenant d'une mine à ciel ouvert : évaluation des risques et biodisponibilité des métaux par Antoine coquard ; centre universitaire de formation en environnement université de Sherbrooke Montréal, Québec, Canada, (2012)

[14] Bazin .h. Norme française x43-261, qualité de l'air, air des lieux de travaux-prélèvement a poste fixe et mesurage de la pollution particulaire totale .AFNOR Edition, paris, 9p (1988).

[15] DETEC. Poussière fines - Question et réponses concernant les propriétés, les émissions, les immiscions, les effets sur la santé et les mesures. Office fédérale de l'environnement OFEV édition, Berne, 32 p. (2011)

[16] Marjolaine Rodier-Sylvestre. « Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement » Thèse, Université de Sherbrooke, Canada, [2007]

[17] BEN YOUSSEF Ali Ahmed, MANSOURI Amir : Proposition d'une Méthode d'exploitation à ciel ouvert pour les réserves programmées en souterrain du gisement de fer de Boukhadra Université LARBI TEBSSI. (2015-2016)

[18] Ben Ammar, S. 'Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le Choix des traitements adaptés dans les pays en développement' : résultats de la caractérisation Dans le grand Tunis : mise au point d'une méthode adaptée. Thèse de Doctorat, Vandoeuvreles-Nancy, INPL. (2006).

[19] Matias Miguel and, Salvarredy Aranguren. « Contamination en métaux lourds Des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets Miniers : approches géochimique, minéralogique et hydro chimiques. Toulouse université de France. (2008)

[20] Andrea Ranzani da Costa. « La réduction du minerai de fer par l'hydrogène : étude cinétique, phénomène de collage et modélisation. Matériaux » Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), [2011]

[21] Serge Bouchard, 1946, « traitement du minerais », « les éditions le griffon d'argile ».

[22] BAGHDAD. BENSTAALI, «Méthodes et techniques d'analyse physique», 1ere Edition, Introduction à la spectroscopie UV-Visible – Culture Sciences Chimie. (2003)

[23] B.BENSTAALI, « Méthodes et techniques d'analyse physique»,1ere édition, (2003)

[24] (1. D.NJOPWOUO, M.ORLIAC, «Note sur le comportement de certains minéraux triacide», j ORSTOM, ser, Pédol, xvii, pp 329-337(1979). 2 « Fondements théoriques du traitement chimique des eaux».Vol. I, Techniques et documentations, Lavoisier, Paris (1990).

[25] D.NJOPWOUO, M.ORLIAC, «Note sur le comportement de certains minéraux triacide», j ORSTOM, ser, Pédol, xvii, pp 329-337(1979).

[26] (BAGHDAD. BENSTAALI, «Méthodes et techniques d'analyse physique», 1ere Edition, (2003)

[27] (LECLOUX, « Exploitation des isothermes d'adsorption et de désorption d'azote pour l'étude de la texture des solide poreux », Mémoire Société Royale des Sciences de Liège, 6ème série, tome I, Fasc 4 (1971)

[28] M. Les procédés d'Enrichissement et mise en tas du minerai de fer de l'Ouenza. Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach 16200 Alger Alegria

[29] H. ROQUES, « Fondements théoriques du traitement chimique des eaux».Vol. I, Techniques et documentations, Lavoisier, Paris (1990)

[30] Achterberg, E.P., Herzl, V.M.C., Braungardt, C.B. et Millward, G.E. Comportement des métaux dans un estuaire pollué par le drainage minier acide : le rôle des particules. Pollution de l'environnement. (2003)

[31] Ali, A., Flora, S.J.S., Saxena, G., Kolehmainen, E., Mahieu, B. et Rao, C.P., Synthèse et caractérisation des complexes Sn(IV) du dérivé 1,3-diacide du bord inférieur du calixarène et de leurs effets protecteurs sur le stress oxydatif des tissus et la concentration en métaux essentiels dans le plomb exposé Rats Wistar mâles. Journal of Inorganic Biochemistry. (2006)

[32] Astrom, M., Abondance et profils de fractionnement des terres rares dans les cours d'eau affectés par des sols sulfatés acides. Géologie chimique. (2001)

[33] Alpers, C.N., Nordstrom, D.K. et Spitzley, J., Drainage minier acide extrême d'un gisement de sulfures massifs pyritiques : le membre terminal Iron Mountain. Dans : J.L. Jambor, D.W. Blowes et A.I.M. Ritchie (éd.), Aspects environnementaux des déchets miniers. Série de cours abrégés. Association minéralogique du Canada, Vancouver (2003)

[34] Alvarez, E., Fernandez Marcos, M.L., Vaamonde, C. et Fernandez-Sanjurjo, M.J., Métaux lourds dans la décharge d'une mine abandonnée en Galice (nord-ouest de l'Espagne) et dans la végétation spontanée. Science of The Total Environment. (2003)

[35] Aries, S., Valladon, M., Polvé, M. et Dupré, B., Une méthode de routine pour les oxydes et hydroxydes corrections d'interférences dans l'analyse chimique ICP-MS d'échantillons environnementaux et géologiques. Bulletin Géostandards. (2000)

[36] Audry, S., Blanc, G. et Schafer, J., 2005. Impact de l'oxydation des sulfures sur les apports de métaux dissous (Cd, Zn,Cu, Cr, Co, Ni, U) dans le système fluvial Lot-Garonne (France). Applied Geochemistry.

[37] Demoraes, F., Etude de l'évolution de l'agglomération de La Paz-El Alto depuis les vingt dernières années, compte tenu des contraintes environnementales du site. Mémoire de maîtrise, Savoie, (1998)

[38] Down, C.G. et Stocks, J., Impact environnemental de l'exploitation minière. Wiley, New York. (1977)

- [39] Fanfani, L., Zuddas, P. et Chessa, A., L'analyse de la spéciation des métaux lourds comme outil d'étude des mines altération des résidus. Journal d'exploration géochimique, (1997)
- [40] Gäbler, H.E., Mobilité des métaux lourds en fonction du pH d'échantillons provenant d'un profil de sédiments de débordement contaminé par des activités minières. Journal of Geochemical Exploration. (1997)
- [41] Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. et Toro, L., Extraction séquentielle de métaux lourds dans les sédiments fluviaux d'une zone d'exploitation minière de pyrite abandonnée : détection de pollution et séries d'affinité. Environmental Pollution. (2004)
- [42] Plumlee, G.S., La géologie environnementale des gisements minéraux. Dans : G.S. Plumlee et M.J. Logsdon. (1999)
- [43] Protano, G. et Riccobono, F., Teneurs élevées en éléments de terres rares (REE) dans les eaux de ruisseau d'une zone minière CuPb-Zn. Environmental Pollution, (2002)